ภูมิศาสตร์กายภาพ เล่ม2

มิชัย วงสายัณห์
ประยูร ดาศรี น้อม งามนิสัย
รัชนีวรรณ เวชพฤติ สุวัฒนา สุกใส

ราคา 110.00 บาท

ภูมิศาสตร์กายภาพ

เล่ม 2

พิมพ์ครั้งแรก พ.ศ. 2527
จำนวน 3,000 ฉบับ
ลิขสิทธิ์ภาษาไทยเป็นของมูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์
ISBN 974-07-5351-5

บริษัทสำนักพิมพ์ ไทยวัฒนาพานิช จำกัด
599 ถนนไมตรีจิต กรุงเทพมหานคร
ผู้แทนจำหน่าย

ภูมิศาสตร์กายภาพ

เล่ม 2

น้อม งามนิสัย
รัชนีวรรณ เวชพฤติ
สุวัฒนา สุกใส

แปลจาก

Introduction to Physical Geography

by

Arthur N. Strahler

A Wiley International Edition

(1967)

ประเสริฐ วิทยารัฐ
(บรรณาธิการ)

มูลนิธิโครงการตำรา
สังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์
กรุงเทพมหานคร

รายชื่อคณะกรรมการบริหาร
มูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์

๑. นายเสน่ห์ จามริก	ประธานกรรมการ
๒. นางเพ็ชรี สุมิตร	รองประธาน
๓. นางสาวกุสุมา สนิทวงศ์ ณ อยุธยา	กรรมการ
๔. นายธวัชชัย ยงกิตติกุล	กรรมการ
๕. นางสาวสดชื่น ชัยประสาธน์	กรรมการ
๖. นายสุเทพ สุนทรเภสัช	กรรมการ
๗. นายนรนิติ เศรษฐบุตร	กรรมการ
๘. นายสุลักษณ์ ศิวรักษ์	กรรมการ
๙. นายวิทยา สุจริตธนารักษ์	กรรมการ
๑๐. นางอารี สันหฉวี	กรรมการ
๑๑. นางอมรา พงศาพิชญ์	กรรมการ
๑๒. นางสาวศุภลักษณ์ เลิศแก้วศรี	กรรมการ
๑๓. นายเฉลิม ทองศรีพงศ์	กรรมการและที่ปรึกษากฎหมาย
๑๔. นายบดินทร์ อัศวาณิชย์	กรรมการและที่ปรึกษากฎหมาย
๑๕. นายเกริกเกียรติ พิพัฒน์เสรีธรรม	กรรมการและเหรัญญิก
๑๖. นายชาญวิทย์ เกษตรศิริ	กรรมการและเลขานุการ
๑๗. นายรังสรรค์ ธนะพรพันธุ์	กรรมการและผู้จัดการ

มูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์
เลขที่ 413/38 ถนนอรุณอมรินทร์ บางกอกน้อย กรุงเทพ ฯ
โทร. 4245768

คำแถลงของมูลนิธิโครงการตำรา ฯ

โครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ ก่อตั้งขึ้นเมื่อ พ.ศ. 2509 ด้วยความร่วมแรงร่วมใจกันเองเป็นส่วนบุคคลในหมู่ผู้มีความรักในภารกิจบริการการศึกษาจากสถาบันต่าง ๆ เมื่อเริ่มดำเนินงานโครงการตำรา ฯ มีฐานะเป็นหน่วยงานหนึ่งของสมาคมสังคมศาสตร์แห่งประเทศไทย โดยได้รับความร่วมมือด้านทุนทรัพย์จากมูลนิธิร็อกกี้เฟลเลอร์ เพื่อใช้จ่ายในการดำเนินงานขั้นต้น เป้าหมายเบื้องแรกของโครงการตำรา ฯ ก็คือ ส่งเสริมให้มีหนังสือตำราภาษาไทยที่มีคุณภาพดี โดยเฉพาะในทางวิชาสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ ทั้งนี้เพราะต่างก็เห็นพ้องต้องกันในระยะนั้นว่า คุณภาพของหนังสือตำราภาษาไทยระดับอุดมศึกษาแขนงวิชาดังกล่าวยังไม่สูงพอ ถ้าส่งเสริมให้มีหนังสือเช่นนี้เพิ่มมากขึ้นย่อมมีส่วนช่วยยกระดับมาตรฐานการศึกษาในขั้นมหาวิทยาลัยไปด้วยโดยปริยาย อีกทั้งยังอาจหนุนช่วยการสร้างสรรค์ทางปัญญา ความคิดริเริ่ม และความเข้าใจอันถูกต้อง ในเรื่องที่เกี่ยวเนื่องกับสังคม วัฒนธรรม เศรษฐกิจ และการเมืองโดยส่วนรวม

พร้อมกันนี้โครงการตำรา ฯ ก็มีเจตนารมณ์อันแน่วแน่ที่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งชุมนุมงานเขียนของนักวิชาการต่าง ๆ ทั้งในและนอกสถาบัน เพื่อให้ผลงานวิชาการที่มีคุณภาพได้เป็นที่รู้จักและแพร่หลายออกไปโดยทั่วถึงทั้งในหมู่ผู้สอน ผู้เรียน และผู้สนใจงานวิชาการ การดำเนินงานของโครงการตำรา ฯ มุ่งขยายความเข้าใจและความร่วมมือของบรรดานักวิชาการออกไปในวงกว้างยิ่ง ๆ ขึ้นด้วย ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดนโยบายสร้างตำรา การเขียน การแปล และการใช้ตำรานั้น ๆ ซึ่งจะเป็นเครื่องส่งเสริมและกระชับความสัมพันธ์อันพึงปรารถนา ตลอดจนความเข้าใจอันดีต่อกันในวงวิชาชีพที่เกี่ยวข้อง

นโยบายพื้นฐานของโครงการตำรา ฯ คือ ส่งเสริมและเร่งรัดให้มีการจัดพิมพ์หนังสือตำราทุกประเภท ทั้งที่เป็นงานแปลโดยตรง งานแปล–เรียบเรียง งานถอดความ งานรวบรวม งานแต่งและงานวิจัย ในช่วงแรก ๆ เราได้เน้นส่งเสริมงานแปลเป็นงานหลัก ขณะเดียวกันก็ได้ส่งเสริมให้มีการจัดพิมพ์ตำราประเภทอื่น ๆ ด้วย นับแต่ได้ก่อตั้งโครงการตำรา ฯ มาจนกระทั่งถึงปัจจุบัน ซึ่งบัดนี้สามารถแยกตัวออกมาบริหารและดำเนินการอย่างอิสระจากสมาคมสังคมศาสตร์แห่งประเทศไทย มูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ โดยความร่วมมืออย่างดียิ่งของนักวิชาการหลายสถาบัน สามารถส่งเสริม–กลั่นกรอง–ตรวจสอบ–และจัดพิมพ์หนังสือตำราภาษาไทยระดับอุดมศึกษาที่มีคุณภาพตามเป้าหมาย เจตนารมณ์ และนโยบาย ได้ครบทุกประเภทและมีเนื้อหาครอบคลุมสาขาวิชาต่าง ๆ ถึง 8 สาขา ดังต่อไปนี้ คือ 1) สาขาวิชาภูมิศาสตร์ 2) สาขาวิชาประวัติศาสตร์ 3) สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์ 4) สาขาวิชารัฐศาสตร์ 5) สาขาวิชาสังคมวิทยาและมานุษยวิทยา 6) สาขาวิชาปรัชญา 7) สาขาวิชาจิตวิทยา 8) สาขาวิชาภาษาและวรรณคดี นอกจากนี้ เรายังมีโครงการผลิตตำราสาขาวิชาอื่นเพิ่มขึ้นด้วย เช่น สาขาวิชาศิลปะ ซึ่งกำลังอยู่ในขั้นดำเนินงาน และยังได้ขยายงานให้มีการ

แต่งตำราเป็น "ชุด" ซึ่งมีเนื้อหาคาบเกี่ยวระหว่างหลายสาขาวิชา เช่น "ชุดชีวิตและงาน" ของบุคคลที่น่าสนใจ ดังที่ได้จัดพิมพ์เผยแพร่ไปแล้วบางเล่ม

ปัจจุบัน มูลนิธิโครงการตำรา ฯ ยังคงมีเจตนารมณ์อันแน่วแน่ที่จะขยายงานของเราต่อไปอย่างไม่หยุดยั้ง แม้ว่าจะประสบอุปสรรคนานัปการ โดยเฉพาะอุปสรรคด้านทุนรอน เพราะกิจการของเรามิใช่กิจการด้านแสวงหากำไร หากมุ่งประสงค์ให้นักศึกษาและประชาชนได้มีโอกาสซื้อหาหนังสือในราคาย่อมเยาพอสมควร

อนุกรรมการทุกสาขาวิชาของมูลนิธิโครงการตำรา ฯ ยินดีน้อมรับคำแนะนำและคำวิพากษ์วิจารณ์จากท่านผู้อ่านทุกท่าน และปรารถนาอย่างยิ่งที่จะให้ทุกท่านได้เข้ามามีส่วนร่วมในมูลนิธิโครงการตำรา ฯ ไม่ว่าจะเป็นการสนับสนุนแนะนำอยู่ห่าง ๆ ช่วยแต่ง แปล เรียบเรียง หรือรวบรวมตำราสาขาวิชาต่าง ๆ ให้เรา หรือเข้ามาช่วยบริหารและดำเนินงานร่วมกับเรา

ประธานกรรมการ

มูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์

คำนำของบรรณาธิการ

หนังสือภูมิศาสตร์กายภาพเล่มนี้ ได้แปล เรียบเรียง และดัดแปลงมาจากหนังสือ Introduction to Physical Geography ของ Arthur N. Strahler ซึ่งเป็นหนังสือภูมิศาสตร์กายภาพที่นิยมใช้เป็นตำราเรียนวิชาภูมิศาสตร์กายภาพกันโดยทั่วไป ไม่เพียงแต่มหาวิทยาลัยในสหรัฐอเมริกายังมีมหาวิทยาลัยอื่น ๆ ทั่วโลก

ผู้เขียนหนังสือเล่มนี้ได้ทำการสอนวิชาภูมิศาสตร์กายภาพมาเป็นเวลานาน จากประสบการณ์และการค้นคว้าของเขา ทำให้หนังสือซึ่งพิมพ์ออกสู่ตลาดครั้งแรกในปี พ.ศ. 2494 ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง จากนั้นมาหนังสือภูมิศาสตร์กายภาพเล่มนี้ได้รับการปรับปรุงแก้ไขอยู่เสมอ จนเรียกได้ว่าเป็นหนังสือที่ดีเด่นที่สุดเท่าที่จะหาได้ในท้องตลาดปัจจุบัน การที่มูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ได้รับอนุญาตให้แปลและพิมพ์หนังสือเล่มนี้ได้ นับว่าเป็นที่น่ายินดีมาก เพราะผลที่ได้รับคือทำให้ผู้เรียนวิชาภูมิศาสตร์กายภาพในประเทศไทยได้มีโอกาสอ่าน และค้นคว้าทางด้านนี้อย่างกว้างขวางยิ่งขึ้น ซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์ต่อวงวิชาการเป็นส่วนรวม สมควรที่จะได้ขอบคุณเจ้าของลิขสิทธิ์หนังสือเล่มนี้ ตลอดจนผู้เขียนไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ทางด้านการแปล บรรดาอาจารย์ที่ร่วมแปลหนังสือเล่มนี้ ได้พยายามทำการแปลเป็นอย่างดี และได้พยายามดัดแปลงบางตอนบางเรื่องให้เหมาะสมกับสภาพของประเทศไทย พร้อมทั้งยกตัวอย่างของประเทศไทยด้วยในกรณีที่ทำได้ จึงเป็นที่หวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาภูมิศาสตร์กายภาพเป็นอย่างดี และจะเป็นรากฐานแห่งความก้าวหน้าทางภูมิศาสตร์ในประเทศไทยสืบไปในภายภาคหน้า

(ดร. ประเสริฐ วิทยารัฐ)

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดพิมพ์หนังสือเรื่อง ภูมิศาสตร์กายภาพ เล่ม 1 และเล่ม 2 ซึ่งแปลจาก **Introduction to Physical Geography by Arthur N. Strahler** มูลนิธิโครงการตำราสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ใคร่ขอขอบคุณสำนักงานสารนิเทศระหว่างประเทศแห่งสหรัฐอเมริกา (USICA) ในความอนุเคราะห์ติดต่อขอลิขสิทธิ์การแปล และลิขสิทธิ์ในการตีพิมพ์ภาพประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสุคนธ์ พลภัทรพิจารณ์ เจ้าหน้าที่ของสำนักงานแห่งนี้ที่เอื้อเฟื้อและช่วยเหลือมูลนิธิ ฯ ด้วยดีมาโดยตลอด

ภาพประกอบที่ตีพิมพ์ในหนังสือทั้งสองนี้ เป็นลิขสิทธิ์ของผู้มีนามต่อไปนี้

1. สำนักพิมพ์ **Harper and Row** รูปที่ 2.6, 2.8, 2.12, 3.1, 3.7, 4.1, 4.5, 4.7, 4.10, 5.18, 6.2, 6.7, 6.14, 6.16, 8.3, 8.4, 18.1, 18.12, 18.13, 18.16, 19.16, 23.16, 26.24, 20.28 และ 27.10
2. สำนักพิมพ์ **Doubleday and Company, Inc.** รูปที่ 9.5
3. ศาสตราจารย์ **A.L. Washburn** รูปที่ 13.4, 13.5
4. **American Geographical Society** รูปที่ 11.4
5. **Ewing Galloway** รูปที่ 6.10
6. **H. Armstrong Roberts** รูปที่ 1.5
7. **State of Utah Travel Council** รูปที่ 23.28
8. **The American Museum of Natural History** รูปที่ 17.3

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 17 วัตถุประกอบโลกและแหล่งแร่	**1**
ส่วนประกอบของเปลือกโลก	1
แร่ซิลิเกต	2
หินหนืดซิลิเกตและสารระเหิด	5
หินอัคนี	6
การผันแปรของแร่	8
บทที่ 18 เปลือกโลกและลักษณะภูมิประเทศ	**31**
โครงสร้างภายในของโลก	31
เปลือกโลก	32
การกระจายของทวีปและแอ่งสมุทร	33
อัตราส่วนของภูมิประเทศของโลก	34
ลักษณะภูมิประเทศอันดับสองของพื้นสมุทร	35
ลักษณะภูมิประเทศอันดับสองของทวีป	39
มาตราเวลาเชิงธรณีวิทยา	42
กระบวนการแปรโครงสร้างแบบแผ่นและการเลื่อนลอยของทวีป	45
บทที่ 19 ลักษณะภูมิประเทศและการเคลื่อนที่ตามความลาด	**52**
ธรณีสัณฐาน	52
คำอธิบายภูมิประเทศกำเนิด	53
ภูมิประเทศกำเนิดและภูมิประเทศตามลำดับขั้น	53
ตัวการกัดกร่อนพื้นดิน	54
หินฐาน ดิน และเศษหินที่อยู่กับที่	55
การพัดพาวัตถุที่ผุพัง	56
อิทธิพลของหินฐานต่อลักษณะภูมิประเทศ	57
การเคลื่อนที่ของวัตถุตามพื้นลาด	57
การผุพังและการเคลื่อนที่ตามพื้นลาด	58
ลักษณะการแตกเชิงเรขาคณิตของหิน	58
การผุพังตามกระบวนการกายภาพและรูปทรง	60

หน้า

กระบวนการพังทลายทางเคมีและรูปทรง 65
การเคลื่อนที่ตามพื้นลาด 67
ลานหินตีนผารูปกรวย 68
ดินคืบ 69
ดินไหล 71
โคลนไหล 73
แผ่นดินถล่ม 73
หินตกและลานหินตีนผา 76
การเคลื่อนที่ตามพื้นลาดจากการกระทำของมนุษย์ 78

บทที่ 20 ภูมิประเทศเกิดจากการกระทำของน้ำไหล 81

การกัดกร่อนพัดพาโดยน้ำไหลบนผิวดิน 81
การเร่งการกัดกร่อนพัดพาดิน 83
รูปแบบของอัตราเร่งการกัดกร่อนและพัดพา 84
การกระทำเชิงธรณีวิทยาของลำน้ำ 87
การกัดกร่อนโดยลำน้ำ 87
การพัดพาโดยลำน้ำ 88
สารแขวนลอยในแม่น้ำขนาดใหญ่ 89
แม่น้ำเปลี่ยนเป็นน้ำท่วมได้อย่างไร 90
ชีวประวัติของลำน้ำ 92
สมดุลลำน้ำ 93
วิวัฒนาการของที่ราบน้ำท่วมถึง 94
คุ้งน้ำของลำน้ำดินตะกอน 96
เขื่อนธรรมชาติ 97
มาตรการบรรเทาอุทกภัย 98
การเพิ่มระดับลำน้ำและลำน้ำเกลียวเชือก 99
การเพิ่มระดับและการตกตะกอนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ 100
ที่ราบขั้นบันได 101
ดินดอนสามเหลี่ยม 102
ลำน้ำวัยกลับและโค้งน้ำตวัดอยู่ตัว 104

หน้า

บทที่ 21 วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดิน 109

วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดินในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น 109
ระดับฐานและพื้นเกือบราบ 111
พื้นดินวัยกลับ 112
ลักษณะของสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรการกัดกร่อน 112
โครงข่ายการระบายน้ำ 114
กฎของเพลย์แฟร์ 116
ความหยาบและความละเอียดของภูมิประเทศ 116
กระบวนการน้ำไหลในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง 118
ลำน้ำซึมและลำน้ำซับ 119
น้ำใต้ดินในเนินตะกอนรูปพัด 121
สิ่งแวดล้อมในเนินตะกอนรูปพัด 121
วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดินในเขตแห้งแล้ง 122
ลักษณะสิ่งแวดล้อมสำคัญของวัฏจักรในเขตร้อน 124

บทที่ 22 ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็ง 126

การกัดกร่อนของธารน้ำแข็ง 128
ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งภูเขา 128
ร่องธารน้ำแข็งและฟยอร์ด 132
สิ่งแวดล้อมของธารน้ำแข็งภูเขา 133
พืดน้ำแข็งในยุคปัจจุบัน 134
พืดน้ำแข็งยุคไพลสโตซีน 136
ยุคน้ำแข็ง 137
สาเหตุของการเกิดธารน้ำแข็งในทวีป 139
การกัดกร่อนโดยแผ่นน้ำแข็ง 140
การทับถมที่เหลือจากพืดน้ำแข็ง 141
การทับถมลงในแหล่งน้ำถาวร 146
สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากธารน้ำแข็ง 147

บทที่ 23 ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ 150

การกัดกร่อนพัดพาโดยคลื่น 151
วิวัฒนาการของหน้าผาชายทะเล 151

หน้า

การหันเหของคลื่น 154
การพัดพาเลียบชายฝั่ง 155
สันดอน สันดอนจะงอย และชายหาดขนาดเล็ก 157
การพัดพาเลียบชายฝั่งและการป้องกันชายฝั่ง 160
กระแสน้ำขึ้น–น้ำลง 161
การตกตะกอนจากกระแสน้ำขึ้น–น้ำลง 163
การจำแนกชายฝั่ง 165
ชีวประวัติของชายฝั่งยุบจมลง 167
สิ่งแวดล้อมสำคัญของชายฝั่งที่ยุบจมลง 169
วิวัฒนาการของชายฝั่งเกาะขวางกั้น 169
ปากทางน้ำเข้าและดินดอนสามเหลี่ยมน้ำขึ้นน้ำลง 171
สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของเกาะขวางกั้นแนวชายฝั่ง 172
ชายฝั่งยกตัว 172
ชายฝั่งปะการัง 173

บทที่ 24 ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของลม 179

การกัดกร่อนโดยลม 179
พายุฝุ่นและพายุทราย 181
เนินทราย 182
เนินทรายชายหาดกับมนุษย์ 187
ดินเลิสส์ 189
มนุษย์เป็นตัวการที่ทำให้เกิดการพัดพาฝุ่น 190

บทที่ 25 ที่ราบชายฝั่ง ชั้นหินระนาบ โดม 193

การจำแนกลักษณะภูมิประเทศ 193
โครงสร้างของชั้นหินเป็นปัจจัยควบคุมลักษณะภูมิประเทศ 195
แนวเขาและแนวสันหิน 196
ที่ราบชายฝั่ง 197
ที่ราบชายฝั่งในสหรัฐอเมริกาและอังกฤษ 199
ลักษณะสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของที่ราบชายฝั่ง 201
ชั้นหินระนาบ 204
สิ่งแวดล้อมของชั้นหินแนวระนาบ 207
ทรัพยากรแร่ในชั้นหินแนวระนาบ 208

หน้า

ถ้ำหินปูน 209
ลักษณะภูมิประเทศคาร์สต์ 211
โดมและแอ่ง 212
สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรที่สำคัญของโดม 216

บทที่ 26 รอยโค้ง รอยเลื่อน และภูเขารอยเลื่อน 221

สันเขาคดเลี้ยวและรอยโค้งดึงตัว 224
สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรในเขตรอยโค้ง 225
รอยเลื่อนและภูเขารอยเลื่อน 226
วิวัฒนาการการกัดกร่อนของหน้าผารอยเลื่อน 229
ภูเขารอยเลื่อน 230
สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรในบริเวณรอยเลื่อนและภูเขารอยเลื่อน 231
แผ่นดินไหว–สิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดโศกนาฏกรรม 232
แผ่นดินไหวกับการวางผังเมือง–แผ่นดินไหว ซาน เฟอร์นานโด 235

บทที่ 27 มวลผลึกหิน และรูปทรงภูเขาไฟ 238

ผลึกหินเนื้อเดียวกัน 238
แนวหินแปร 240
บริเวณที่เป็นโครงสร้างสลับซับซ้อน 241
ทรัพยากรธรรมชาติในเขตหินอัคนีมวลมหาศาล แนวหินแปรและบริเวณที่สลับซับซ้อน 242
ภูเขาไฟและลักษณะภูมิประเทศที่เกี่ยวข้อง 243
ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟ 243
ภูเขาไฟแบบกรวยซ้อน 244
แอ่งภูเขาไฟ 245
วัฏจักรการกัดกร่อนของภูเขาไฟ 246
โดมลาวาหรือภูเขาไฟรูปโล่ 249
สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของภูเขาไฟ 249

บทที่ 17
วัตถุประกอบโลกและแหล่งแร่

ความคิดแรกของมนุษย์คิดว่า ความหนาแน่น ความแข็งของหินที่อยู่ใต้ชั้นดินนั้นไม่มีบทบาทต่อสิ่งแวดล้อมของมนุษย์เลย แผ่นหินแกรนิตที่ขัดอย่างดีแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงพอที่จะสังเกตเห็นได้เป็นเวลาหลาย ๆ ทศวรรษ ทั้ง ๆ ที่หินเหล่านั้นสัมผัสกับแสงอาทิตย์ ฝน น้ำค้างแข็งและลม ความคิดที่สอง เราเชื่อว่าหินที่โผล่จากใต้ดินขึ้นมาสัมผัสกับอากาศ แสงอาทิตย์ ฝน และลมนั้นจะเปลี่ยนแปลงจนสังเกตได้ ตัวอย่างเช่น สุสานฝังศพหินอ่อนที่มีอายุนับศตวรรษนั้นบางส่วนได้บุบสลายลง จากหลักฐานแสดงว่าหินอ่อนที่สลายตัวนั้นเกิดจากการกระทำของบรรยากาศและความชื้นทำให้หินอ่อนค่อย ๆ ละลายเป็นไอออนของสาร

ก่อนที่ไอออนจำนวนมหาศาลจะสลายตัวออกมาจากแร่ในหิน หินจะต้องแตกเป็นก้อนเล็ก ๆ เสียก่อน โดยมีขนาดตั้งแต่เม็ดทรายจนถึงอนุภาคดินเหนียว ซึ่งมีมิติเท่ากับอนุภาคของสารคล้ายวุ้นจากการศึกษาในกระบวนการเกิดดิน พบว่าสารคล้ายวุ้นนี้เป็นสารกำเนิดของแร่ในดิน ชีวิตทั้งหลายบนโลกนี้จะมีชีวิตอยู่ไม่ได้ถ้าขาดชั้นดิน ดังนั้น บทบาททางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญประการหนึ่งของกระบวนการทางธรณีวิทยา (geologic process) ก็คือการทำให้เกิดสารกำเนิดดินและสารเหล่านี้เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช แม้แต่พืชน้ำที่ลอยไปตามกระแสน้ำ ในทะเลสาบและมหาสมุทร (เช่นสาหร่ายต่าง ๆ) ถึงแม้จะไม่ต้องการดินเพื่อการเจริญเติบโตแต่ก็ยังต้องการไอออนจากการสลายตัวของหินและน้ำพัดพามาในลักษณะของสารละลาย

แผ่นดินมีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ เพราะแผ่นดินจะสนองความต้องการของมนุษย์ในเรื่องแร่ธาตุ ซึ่งถ้าขาดแร่ธาตุเสียแล้วการพัฒนาอุตสาหกรรมจะเกิดขึ้นไม่ได้ ทรัพยากรแร่รวมทั้งเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของมนุษย์ และแผ่นดินยังเป็นแหล่งของสารที่จำเป็นต่อการสร้างสรรค์อารยธรรม เช่น โลหะ อโลหะและสารเคมีอื่น ๆ ที่ใช้ในการอุตสาหกรรมทุกชนิดและใยสังเคราะห์ต่าง ๆ เพื่อความเข้าใจอันดีถึงขีดจำกัดของทรัพยากรประเภทสูญสิ้นเหล่านี้ เราควรทำความเข้าใจว่า หินเกิดขึ้นได้อย่างไร และแร่กระจายอยู่ในก้อนหินได้อย่างไร ตลอดจนแร่เหล่านั้นพากันรวมเป็นแหล่งแร่ได้อย่างไร

ส่วนประกอบของเปลือกโลก

แผ่นดินเป็นสิ่งแวดล้อมชนิดของแข็งและเป็นเปลือกนอกสุดของโลกที่มีความสำคัญต่อมนุษย์มาก เราเรียกส่วนนี้ว่า "เปลือกโลก" (earth crust) เปลือกโลกที่ประกอบไปด้วยแร่ธาตุนี้หนาราว 10 ไมล์ (17 กิโลเมตร) ห่อหุ้มโลกอยู่โดยตลอด ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นทวีปและพื้นสมุทร และเป็นแหล่งกำเนิดของดินและตะกอนอื่น ๆ ที่มีความจำเป็นต่อชีวิต ของเหลือในทะเล ก๊าซในบรรยากาศและน้ำในรูปอื่น ๆ ในมหาสมุทร ในบรรยากาศและบนแผ่นดิน

ตารางที่ 17.1 เป็นรายชื่อของแร่ธาตุส่วนประกอบสำคัญของเปลือกโลกโดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของสาร ธาตุที่มีปริมาณมากที่สุด คือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักแล้วมีค่าเกือบครึ่งหนึ่ง ออกซิเจนจะปรากฏอยู่ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ ธาตุที่มีมากในอันดับสอง คือ ซิลิคอน

ตารางที่ 17.1 ธาตุสำคัญในเปลือกโลก

ธาตุ	สัญลักษณ์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกซิเจน	O	46.6
ซิลิคอน	Si	27.7
อะลูมิเนียม	Al	8.1
เหล็ก	Fe	5.0
แคลเซียม	Ca	3.6
โซเดียม	Na	2.8
โพแทสเซียม	K	2.6
แมกนีเซียม	Mg	2.1
	รวม	98.5

จากตารางนี้อะลูมิเนียมและเหล็กจะอยู่ในอันดับสามและสี่ตามลำดับ ธาตุทั้งสองนี้เป็นธาตุที่มีความสำคัญเป็นอันมากต่อการอุตสาหกรรม ธาตุทั้งสองนี้มีปริมาณค่อนข้างมาก ธาตุโลหะอีกสี่ชนิดสุดท้ายส่วนมากจะอยู่ในรูปของไอออนของสารในดิน คือ แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ธาตุทั้งสี่ชนิดนี้มีปริมาณพอ ๆ กันคือตั้งแต่ 2--4 เปอร์เซ็นต์ และเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน

ถ้าเราจะเรียงอันดับรายชื่อธาตุในตารางที่ 17.1 ต่อไปอีก ธาตุอันดับที่เก้าคือ ไทเทเนียม และอันดับต่อไปได้แก่ ไฮโดรเจน ฟอสฟอรัส แบเรียม และสทรอนเชียม ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอีกชนิดหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช

แร่อื่น ๆ ที่เรารู้จักกันดีเพราะเป็นแร่สำคัญทางอุตสาหกรรม เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี นิกเกิล และดีบุกนั้นเป็นแร่ที่มีเปอร์เซ็นต์ต่ำมาก และหาได้ยาก

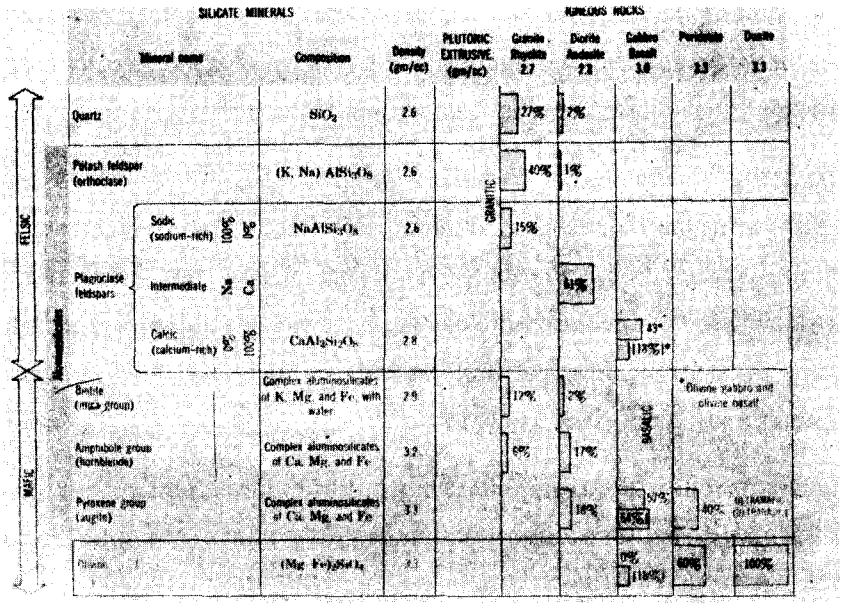
แร่ซิลิเกต

หิน เป็นสารที่ประกอบไปด้วยแร่ซึ่งในสถานภาพที่เป็นของแข็งนั้นจะมีส่วนประกอบลักษณะทางกายภาพและอายุต่าง ๆ กัน หินส่วนใหญ่จะประกอบด้วยแร่ธาตุสองชนิดหรือมากกว่าขึ้นไป และเป็นแร่ซึ่งมีอยู่มาก มีหินเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่ประกอบไปด้วยแร่เพียงชนิดเดียว หินในเปลือกโลกส่วนมากมีอายุมากเมื่อเปรียบเทียบกับอายุของมนุษย์ เนื่องจากมันเกิดนับล้าน ๆ ปีแล้ว และขณะ

เดียวกันก็มีหินอีกจำนวนหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ ได้แก่ หินเหลวลาวาที่ภูเขาไฟพ่นออกมา เมื่อลาวาสัมผัสกับอากาศลาวาก็จะแข็งตัวเป็นหินแข็ง

คำนิยามง่าย ๆ ของแร่คือ สารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ตามปกติจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่คงที่และมีโครงสร้างทางอะตอมจำเพาะ แร่ที่เรารู้จักจำนวนมาก จะมีชื่อเช่นเดียวกับหินที่แร่นั้นเป็นส่วนประกอบอยู่ จึงจำเป็นจะต้องทำความเข้าใจให้กระจ่างว่าเมื่อใดคำนั้นหมายถึงแร่ เมื่อใดหมายถึงหิน

หินเปลือกโลกส่วนมากเป็นหินอัคนีซึ่งเป็นหินกำเนิด หมายความว่าเป็นหินผลึกหรือหินแก้วแข็งที่แข็งตัวมาจากสารเหลวที่มีอุณหภูมิสูงหรือหินหนืด (magma) หินอัคนีส่วนมากจะประกอบด้วยแร่ซิลิเกตเจ็ดชนิดหรือเจ็ดกลุ่ม ตามส่วนประกอบของโลหะในรูปที่ 17.1 หรือเป็นสารประกอบที่ประกอบไปด้วย ซิลิคอนกับออกซิเจน ตามปกติจะมีแร่โลหะหนึ่งชนิดหรือมากกว่าประกอบอยู่ด้วย



รูปที่ 17.1 แผนผังแสดงแร่ซิลิเกตที่พบทั่วไป และหินอัคนีที่พบมาก

กลุ่มแรกคือ ควอร์ตซ์ เป็นแร่ที่มีพบในหินทุกชนิด แร่นี้ประกอบไปด้วยซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) แร่กลุ่มที่สองถึงกลุ่มที่หกเป็นแร่ประเภทอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) เป็นกลุ่มแร่ที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย กล่าวคือกลุ่มที่สองกับกลุ่มที่สามเป็นแร่พวกเฟลสปาร์ ได้แก่ โพแทชเฟลด์สปาร์ เป็นแร่ที่ประกอบไปด้วยโพแทสเซียมเป็นสำคัญ มีโซเดียมประกอบอยู่ด้วยในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และแพลจิโอเคลสเฟลด์สปาร์ เป็นแร่เกิดต่อเนื่องกับแร่โพแทชเฟลด์สปาร์

ซึ่งเป็นแร่ที่มีแคลเซียมกับโซเดียมประกอบอยู่ในอัตราต่าง ๆ กัน ถ้ามีโซเดียมอยู่มากกว่าแคลเซียม เราก็เรียกว่าเป็นแร่พวกโซดิค (sodic) ถ้ามีแคลเซียมมากเราเรียกว่าเป็นแร่พวกแคลซิค (calcic) กลุ่มที่สี่เป็นกลุ่มไมกา (mica group) เป็นกลุ่มแร่ที่มีคุณลักษณะแยกออกเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ ได้แก่ แร่ไบโอไทต์ เป็นไมกาสีเข้ม มีสูตรทางเคมีอันสลับซับซ้อน กล่าวคือมีโพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญและมีน้ำปนอยู่บ้างเล็กน้อย กลุ่มที่ห้าคือกลุ่มแอมฟีโบลมีแร่อะลูมิโนซิลิเกตที่สำคัญคือฮอร์นเบลนด์เป็นส่วนประกอบ ฮอร์นเบลนด์ เป็นแร่ที่ประกอบไปด้วยแร่อะลูมิโนซิลิเกตอันสลับซับซ้อน ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียมและเหล็ก กลุ่มที่หกเป็นแร่อะลูมิโนซิลิเกต กลุ่มสุดท้าย คือ แร่กลุ่มไพรอกซีน เป็นกลุ่มแร่ที่มีส่วนประกอบคล้ายกับแร่กลุ่มแอมฟีโบล แต่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า แร่ที่สำคัญได้แก่ แร่ออไจต์ กลุ่มที่เจ็ดคือกลุ่มโอลิวีน เป็นแร่สีเขียวเข้ม ประกอบไปด้วยแมกนีเซียมและเหล็กแต่ไม่มีอะลูมิเนียม จึงไม่จัดเป็นพวกอะลูมิโนซิลิเกต

ตามรายชื่อแร่ที่กล่าวมานี้จะเห็นว่าความหนาแน่นของแร่ซิลิเกตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยควอร์ตซ์มีความหนาแน่นน้อยที่สุดและโอลิวีนมีความหนาแน่นมากที่สุด ความเปลี่ยนแปลงในความหนาแน่นนี้ขึ้นอยู่กับการลดปริมาณของอะลูมิเนียมและโซเดียม ซึ่งเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมน้อยและการเพิ่มอัตราส่วนประกอบของแคลเซียมและเหล็ก เพราะเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมมาก

เมื่อพิจารณาโดยส่วนรวมแล้วเราจะแบ่งแร่ที่กล่าวถึงมาแล้วได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มเฟลซิค (felsic) เป็นกลุ่มที่ประกอบด้วยควอร์ตซ์และเฟลด์สปาร์ และกลุ่มมาฟีค (mafic) ประกอบด้วยแร่ซิลิเกตที่มีแมกนีเซียมและเหล็กมาก คำว่า เฟลซิคมาจากคำว่า เฟล (fel) ใช้แทนเฟลด์สปาร์และซิ (Si) แทนคำว่าซิลิกา คำว่ามาฟีคก็เช่นกัน มา (ma) แทนคำว่าแมกนีเซียม และอักษรเอฟ (f) เป็นตัวย่อของ fe ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของเหล็ก แร่เฟลซิคเป็นแร่ที่มีสีจางและมีความหนาแน่นน้อย แร่มาฟีคเป็นแร่ที่มีสีเข้มและมีความหนาแน่นมาก

แร่มาฟีคสองชนิดที่ไม่ใช่แร่ซิลิเกตและมีอยู่มากในหินอัคนีคือ แมกนีไทต์ เป็นเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) และอิลเมไนต์ เป็นออกไซด์ของเหล็กและไทเทเนียม มีสูตรทางเคมีว่า $FeTiO_3$ แร่ทั้งสองชนิดนี้มีสีดำ มีความหนาแน่นมาก ประมาณ $4\frac{1}{2} - 5\frac{1}{2}$ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ชื่อแร่ที่กล่าวถึงมานี้เป็นแหล่งสำคัญของไอออนที่เป็นสิ่งแวดล้อมเบื้องต้นที่สำคัญต่อชีวิต ไอออนในน้ำทะเลนั้นมีทั้งซิลิคอน แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ในกระแสน้ำที่ไหลบนทวีปจะมีไอออนเหล่านี้ด้วย ถ้าต้นน้ำนั้นมาจากแหล่งหินอัคนี ออกไซด์ของอะลูมิเนียมสลายตัวมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแร่ซิลิเกต ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของดินและเมื่อมาสะสมกันมาก ๆ จะกลายเป็นแหล่งแร่เหล็กและอะลูมิเนียมที่สำคัญ เมื่อพิจารณาตามเงื่อนไขทางธรณีวิทยาแล้ว แร่ซิลิเกตเป็นวัตถุพื้นฐานของหินประเภทอื่น ๆ (ได้แก่หินชั้นและหินแปร) ด้วย

หินหนืดซิลิเกตและสารระเหิด

ประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ของมวลหินอัคนีของเปลือกโลกประกอบไปด้วยกลุ่มแร่ซิลิเกตเจ็ดกลุ่มหรือกลุ่มแร่ที่มีรายชื่ออยู่ในรูป 17.1 ส่วนที่เหลือ (อีกหนึ่งเปอร์เซ็นต์) ประกอบด้วยแร่ที่มีความสำคัญเป็นอันดับสอง แม้ว่าจะมีจำนวนมากก็ตาม กลุ่มแร่ซิลิเกตที่กล่าวถึงมาแล้วนั้นเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดหินอัคนีหลายชนิด เพื่อความสะดวกเราจะแบ่งหินอัคนีออกเป็นห้ากลุ่มตามลักษณะการเกิดของหินอัคนี

หินอัคนีเป็นหินที่เกิดจากหินหนืดซิลิเกตที่อยู่ลึกลงไปใต้ผิวโลกภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความกดดันสูง เนื่องจากเราไม่สามารถจะศึกษาหินหนืดเหล่านี้ได้ภายใต้สภาวะที่เป็นอยู่ใต้เปลือกโลกในระดับลึก การศึกษาจึงทำได้แต่เพียงในห้องทดลอง โดยทำให้แร่หลอมเหลวแล้วปล่อยให้แข็ง และได้จากการศึกษาหินหนืดที่ภูเขาไฟพ่นออกมา ณ ระดับความลึกของผิวโลกลงไปหลาย ๆ ไมล์ หินหนืดซิลิเกตอาจจะมีอุณหภูมิระหว่าง 900°—2200°F (500°—1200°C) และอยู่ภายใต้ความกดดัน 6,000—12,000 เท่าของความกดดันบรรยากาศ ณ ระดับน้ำทะเล

ลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของหินหนืดก็คือ สารระเหิด (volatile) สารนี้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นก๊าซหรือของเหลวในภาวะที่อุณหภูมิต่ำกว่าหินหนืดซิลิเกต เมื่อหินหนืดเย็นตัวลงสารระเหิดเหล่านี้จะแยกตัวออกมาแล้วแข็งตัวกลายเป็นผลึกของของแข็ง จากการวิเคราะห์ตัวอย่างก๊าซที่ได้จากการระเบิดของภูเขาไฟพบว่า สารระเหิดมีน้ำประกอบเป็นจำนวนมาก ตารางที่ 17.2 เป็นรายชื่อของสารระเหิดที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซจากการระเบิดของภูเขาไฟฮาวาย-เอียน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสารระเหิดที่เป็นส่วนประกอบของน้ำและบรรยากาศของโลก

ตารางที่ 17.2 สารระเหิดจากก๊าซในหินหนืดเปรียบเทียบกับสารระเหิดในบรรยากาศและเปลือกโลก

	ก๊าซลาวาจากภูเขาไฟมาอูนาโลอาและกิลาอูอา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	สารระเหิดอิสระในบรรยากาศและพื้นน้ำของโลก (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
น้ำ (H_2O)	60	93
คาร์บอน (CO_2)	24	5.1
กำมะถัน (S_2)	13	0.3
ไนโตรเจน (N_2)	5.7	0.24
อาร์กอน (A)	0.3	ตรวจสอบไม่ได้
คลอรีน (Cl_2)	0.1	1.7
ไฮโดรเจน (H_2)	0.04	0.07
ฟลูออรีน (F_2)	–	ตรวจสอบไม่ได้

การระเหยของสารระเหิดจากเปลือกโลกเราเรียกว่า "การพ่นก๊าซ" (outgasing) และเป็นแหล่งกำเนิดของน้ำอีสระของอุทกภาคในโลก รวมทั้งเป็นต้นกำเนิดของก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศด้วย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน อาร์กอนและไฮโดรเจน สารประกอบของคลอรีนและกำมะถันในน้ำทะเลนั้นสลายตัวมาจากก๊าซที่ถูกพ่นออกมาเช่นกัน เราสามารถสรุปได้ว่า หินหนืดซิลิเกตซึ่งมีสารระเหิดประกอบอยู่ด้วยและค่อย ๆ ระเหยออกมาตลอดระยะเวลาทางธรณีวิทยานั้น เป็นแหล่งสำคัญขององค์ประกอบสำคัญของบรรยากาศภาค อุทกภาคและธรณีภาคของโลก เมื่อสิ่งมีชีวิตวิวัฒนาการขึ้น รูปร่างและกระบวนการของวิวัฒนาการจะปรับตัวให้เข้ากับสารเคมีที่ได้รับจากหินหนืดและสารระเหิดโดยตรง มิได้เป็นผลมาจากบรรยากาศและแผ่นดินแต่อย่างใด เพราะทั้งสองประการนี้ก็เป็นผลมาจากหินหนืดซึ่งค่อย ๆ มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามอายุขัยของโลก (ประมาณ $4\frac{1}{2}$ พันล้านปีมาแล้ว) แต่เมื่อสิ่งมีชีวิตวิวัฒนาการขึ้นมาในทะเลตื้น และค่อย ๆ แพร่พันธุ์ขึ้นมาบนแผ่นดิน กระบวนการแห่งชีวิตก็เริ่มทำให้ส่วนประกอบของบรรยากาศ สารละลายของของแข็งในน้ำทะเล และการสะสมของแร่ธาตุในท้องทะเลเปลี่ยนแปลง ดังนั้น โมเลกุลของก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่ไม่เคยพบมาก่อนจากก๊าซของหินหนืดก็เริ่มมีขึ้นจากการสังเคราะห์แสงของพืชและเพิ่มปริมาณเข้าสู่บรรยากาศ (มีประมาณ 21 เปอร์เซ็นต์ ในบรรยากาศ) ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอุทกภาคในปัจจุบันนี้มีน้อยกว่าในหินหนืด เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนสถานภาพไปเป็นของแข็ง จมตัวเป็นชั้น ๆ อยู่ใต้ท้องทะเลและบางส่วนเป็นส่วนประกอบของเชื้อเพลิงในรูปของไฮโดรคาร์บอน เช่น ถ่านหินและน้ำมันดิบในหิน กำมะถันก็เช่นกัน แยกตัวออกจากบรรยากาศและน้ำและแทรกตัวเข้าไปเป็นส่วนประกอบของหิน ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นในกระบวนการของสิ่งมีชีวิตบนโลก เป็นผลทำให้อนินทรียสารบนเปลือกโลกเปลี่ยนแปลงไป

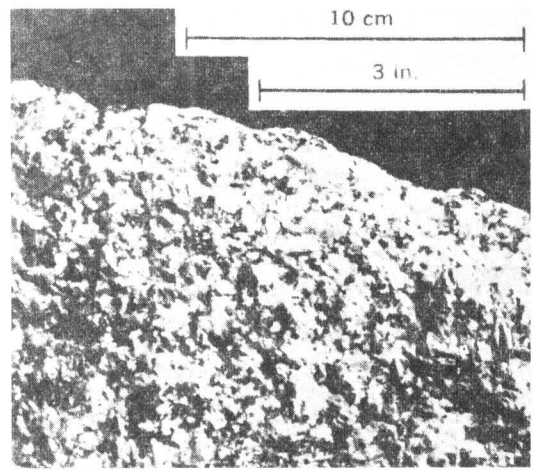
น้ำที่มีอยู่ในหินหนืดซิลิเกตนั้นมีความสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพของหินหนืดมาก น้ำจะมีปฏิกิริยาอยู่ใต้ผิวโลกในระดับไม่ลึกนัก แม้น้ำนั้นจะมีปริมาณน้อยและมีอุณหภูมิต่ำแต่ก็สามารถทำให้หินหนืดอยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวได้ ต่อเมื่อหินหนืดดันตัวสูงขึ้นและมีอุณหภูมิต่ำลง น้ำที่มีอยู่ในหินหนืดจะช่วยให้หินหนืดดันตัวสูงขึ้นอีก จนในที่สุดจะไหลออกมาจากเปลือกโลกเป็นจำนวนมากในรูปของลาวา

เมื่ออุณหภูมิและความกดดันเปลี่ยนไป หินหนืดที่ค่อย ๆ เย็นตัวลงและมีความกดดันลดลงจะเริ่มตกผลึก (crystallization) จากกระบวนการตกผลึกอันสลับซับซ้อน ธาตุต่าง ๆ แปดชนิดตามรายชื่อในตารางที่ 17.1 จะรวมกันเป็นสารประกอบแล้วตกผลึกเป็นแร่ซิลิเกตชนิดต่าง ๆ หินอัคนีเป็นผลมาจากการตกผลึกของหินหนืด ทำให้หินอัคนีมีแร่ต่าง ๆ ประกอบอยู่ สำหรับอัตราส่วนของแร่ในหินอัคนีนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของแร่ที่มีอยู่ในหินหนืด

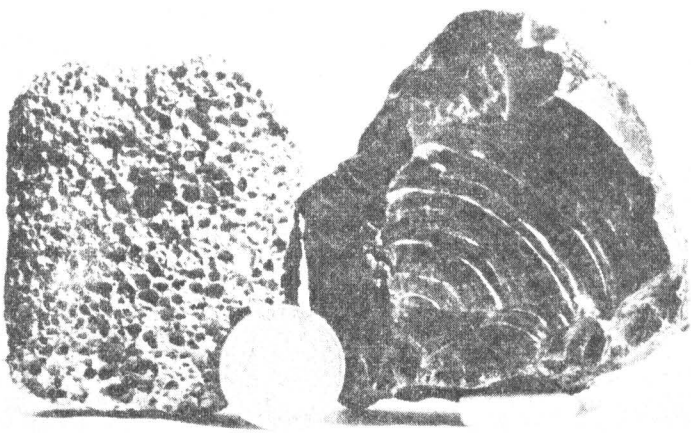
หินอัคนี

ก่อนที่จะจำแนกหินอัคนี จำเป็นที่เราต้องเข้าใจเสียก่อนว่าการจำแนกหินอัคนีนั้นมิได้จำแนกตามส่วนประกอบของแร่เท่านั้น แต่ยังจำแนกตามขนาดของผลึกด้วย คำว่าพื้นผิว (texture) เราหมายถึงขนาดของเม็ดและการจัดเรียงตัวของผลึกด้วย

กล่าวโดยทั่วไปแล้วหินหนืดที่อยู่ในระดับลึกแล้วค่อย ๆ เย็นตัวลง ผลึกของแร่จะมีขนาดใหญ่ ทำให้หินมีเนื้อหยาบ (coarse grain texture) มวลหินอัคนีที่เนื้อหยาบซึ่งแข็งตัวลึกลงไปใต้ผิวโลก เราเรียกว่า พลูโตนิค (plutonic) หินแกรนิต (granite) เป็นหินอัคนีพลูโตนิคเนื้อหยาบชนิดหนึ่ง (รูป 17.2) ในทางตรงกันข้ามหินหนืดที่เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เช่น หินหนืดที่ดันตัวขึ้นมาใกล้ผิวโลก หรือดันออกมานอกเปลือกโลกในรูปของลาวา ผลึกแร่จะมีขนาดเล็ก ทำให้หินอัคนีมีเนื้อละเอียด (fine-grain texture) ลาวาชนิดเย็นตัวภายนอก (extrusive) เป็นชนิดที่ตรงกันข้ามกับลาวาที่เย็นตัวภายใน (intrusive) ใต้ผิวโลก ผลึกของแร่ที่เย็นตัวภายนอกจะมีขนาดเล็ก จนบางครั้งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ต้องดูด้วยแว่นขยาย หินหนืดที่เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วที่เกิดจากภูเขาไฟพ่นลาวาออกมาตามธรรมชาติ เราเรียกว่าออบซิเดียน (obsidian) ดังรูปขวาในรูป 17.3 ถ้าหินหนืดที่เย็นตัวลงนั้นมีก๊าซผสมอยู่มาก การขยายตัวของก๊าซจะทำให้หินมีรูพรุน เรียกว่า สกอเรีย (scoria) ดังรูปซ้ายในรูป 17.3



รูป 17.2 ภาพถ่ายใกล้แสดงให้เห็นหินอัคนีเนื้อหยาบ เป็นหินอัคนีชนิดเย็นตัวภายใน ซึ่งแสดงให้เห็นผลึกของแร่บางชนิด



รูป 17.3 ด้านซ้ายเป็นลาวาที่แข็งตัวโดยมีฟองอากาศอยู่ข้างในทำให้เบา หินดังกล่าว คือ สกอเรีย ด้านขวาเป็นลาวาที่แข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เป็นหินแก้วภูเขาไฟมีสีดำ

เพื่อความสะดวกในการจำแนกหิน เราจะแยกหินออกเป็นห้าชนิดตามส่วนประกอบของแร่ แต่ละชนิดเรายังแยกเป็นชนิดเนื้อหยาบหรือพวกพลูโตนิคและพวกเนื้อละเอียดหรือชนิดที่เย็นตัวภายนอกด้วย ดังรายชื่อที่อยู่ทางขวาของรูป 17.1 นั้น เป็นพวกพลูโตนิคห้าชื่อและเป็นพวกที่เย็นตัวภายนอกสามชื่อ (ชนิดเย็นตัวภายนอกสองชื่อสุดท้ายไม่มีความสำคัญแต่อย่างใด)

จากรูปที่ 17.1 วงเล็บใหญ่พร้อมตัวเลขกำกับนั้นแสดงให้เห็นถึงเปอร์เซ็นต์ส่วนประกอบของแร่ในหินอัคนีชนิดต่าง ๆ หินแกรนิตและหินที่เย็นตัวภายในชนิดใกล้เคียงกันเช่น ไรโอไลต์ เป็นแร่ที่มีควอร์ตซ์และโพแทชเฟลด์สปาร์มากมีโซคิคพลาจิโอเคลส ไบโอไทต์ และแอมฟิโบลน้อย ไดออไรต์ (diorite) และหินอัคนีที่เย็นตัวภายนอกที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น แอนดีไซต์เกือบจะไม่มีควอร์ตซ์และโพแทชเฟลด์สปาร์ปนอยู่เลยแต่มีแร่แพลจิโอเคลสจำนวนปานกลางและมีแร่กลุ่มมาฟิคอยู่น้อย ก่อนที่จะพูดถึงหินที่ประกอบไปด้วยแร่กลุ่มมาฟิคเป็นส่วนใหญ่ เรามาพูดถึงแกบโบร (gabbro) และลาวาที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกันคือหินบะซอลต์ (basalt) เสียก่อน หินชนิดนี้ประกอบด้วยแพลจิโอเคลสเฟลด์สปาร์ชนิดแคลซิคครึ่งหนึ่งและครึ่งหนึ่งเป็นพวกไพรอกซีน หินแกบโบรและบะซอลต์โดยทั่วไปจะมีโอลิวีนประกอบเป็นส่วนสำคัญของเฟลด์สปาร์ หินชนิดต่อมาได้แก่เพอริโดไทต์ (peridotite) มีอยู่ตามเปลือกโลกไม่มากนัก แต่จะมีมากในระดับลึกลงไปหรือในชั้นแมนเติลประกอบด้วยไพรอกซีนและโอลิวีนเป็นส่วนมาก หินชนิดสุดท้ายได้แก่หินดูไนต์ (dunite) เป็นหินที่หาได้ยากประกอบไปด้วยโอลิวีนร้อยเปอร์เซ็นต์ เป็นหินที่มีกลุ่มแร่มาฟิคมากที่สุด

หินแกรนิตห้าชนิดที่จำแนกมานี้เราจำแนกตามส่วนประกอบของแร่ จะเห็นว่าหินแกรนิตและไดออไรต์เป็นหินที่มีแร่กลุ่มเฟลสิคประกอบอยู่มาก เรารวมเรียกว่าหินแกรไนติค (granitic) ส่วนพวกแกบโบรและหินที่เกี่ยวข้องเรารวมเรียกว่า หินบะซอลติค (basaltic) หินชนิดที่มีแร่กลุ่มมาฟิคเป็นส่วนประกอบมากที่สุดเราเรียกว่า หินอุลตรามาฟิค (ultramafic)

ความหนาแน่นของหินอัคนีเป็นสัดส่วนกับความหนาแน่นของแร่ประกอบหิน ดังนั้น หินแกรนิตจะมีความหนาแน่นประมาณ 2.7 แกบโบรและบะซอลต์ประมาณ 3.0 เพอริโดไทต์และดูไนต์ 3.3 จากเหตุผลนี้กระบวนการทางธรณีวิทยามีแนวโน้มว่าจะทำให้หินอัคนีวางตัวเป็นชั้น ๆ ตามความหนาแน่น จะพบว่าหินแกรไนติกจะวางตัวอยู่ตอนบนของเปลือกโลก ชั้นต่ำลงไปเป็นหินบะซอลติคและชั้นล่างสุดเป็นหินอุลตรามาฟิค

การผันแปรของแร่

ณ พื้นผิวสัมผัสระหว่างบรรยากาศและพื้นผิวน้ำกับแผ่นดิน จะทำให้ออกซิเจนและน้ำสัมผัสกับหินอัคนี เป็นผลทำให้เกิดแร่ชนิดใหม่ขึ้น สารประกอบชนิดใหม่นี้จะคงทนต่อสภาวะอุณหภูมิและความกดดันต่ำได้ดีกว่าแร่ในหินอัคนีที่เกิดขึ้นจากภาวะอุณหภูมิและความกดดันสูง กระบวนการนี้เราเรียกว่า "การผันแปรของแร่" (mineral alteration) กล่าวคือหินแข็งจะอ่อนตัวลงและแตกเป็นชั้นๆ แต่ละก้อนมีขนาดต่าง ๆ กัน ต่อมากระแสน้ำ กระแสลมหรือน้ำแข็งพัดพาไปกองอยู่รวมกันเราเรียกวัตถุนี้ว่า "ตะกอน" (sediment) ในความหมายกว้าง ๆ แล้วคำว่าตะกอนมีความหมายทั้งสิ่งที่เป็นอินทรียสารและอนินทรียสาร บางครั้งเราก็รวมสารละลายที่ละลายมาในลักษณะของไอออนเข้าไปด้วย

กระแสน้ำจะพัดพาตะกอนไปสู่ที่ต่ำและตะกอนจะตกทับถมอยู่รวมกัน (ลมและธารน้ำแข็งสามารถพัดพาตะกอนไปได้แต่อาจไม่ไปตกรวมกันในที่ที่เหมาะสม) สถานที่ที่ตะกอนจะไปตกทับถมกันได้แก่ บริเวณทะเลตื้นที่อยู่ใกล้ทวีป ตามแหล่งน้ำภายในทวีป ชั้นของตะกอนเหล่านี้จะหนาขึ้นทุก ๆ ปี เมื่อเวลาผ่านไปเนิ่นนานขึ้นตะกอนเหล่านี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปทั้งด้านกายภาพและเคมีหรือเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง ตะกอนจะอัดตัวกันแน่นและแข็งขึ้นทำให้เกิดเป็นหินชั้น (sedimentary rock) กระบวนการอัดแน่นและแข็งตัวนั้นเรียกว่า กระบวนการอัดแน่น (lithification)

ตะกอนและหินชั้นมีทรัพยากรธรรมชาติที่มีประโยชน์ต่อการอุตสาหกรรมผสมอยู่ ประการแรกมีวัตถุที่จำเป็นต่อการก่อสร้าง เช่น การสร้างทางหลวงหรือตึก ประการที่สองมีวัตถุดิบสำหรับการอุตสาหกรรมเคมี เช่น การทำปุ๋ยและน้ำกรด ประการที่สามเป็นแหล่งของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งพลังงานเหล่านี้จะช่วยหมุนวงล้อเครื่องจักร ช่วยในการคมนาคมและให้ความร้อน

สิ่งแวดล้อมของผิวดินไม่เหมาะสมที่จะช่วยอนุรักษ์หินพลูโตนิคที่เกิดขึ้นมาภายใต้สภาวะความกดดันและอุณหภูมิสูง แร่ซิลิเกตทั้งหมดไม่สามารถจะคงทนต่อไปได้เมื่อต้องโผล่จากผิวโลกขึ้นมาสัมผัสกับอุณหภูมิและความกดดันของบรรยากาศ โดยเฉพาะออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่มีจำนวนมหาศาล ผิวของหินจะแตกออกตามกระบวนการกล เป็นผลให้หินแกรนิตแตกออกเป็นเกล็ดเล็ก ๆ และแยกออกเป็นผลึกแร่ นอกจากนี้การแตกของหินยังเนื่องมาจากกระบวนการทางเคมีด้วย ทำให้พื้นผิวของหินที่แตกตามกระบวนการนี้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น กระบวนการแตกสลายของหินตามกระบวนการกลจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 19 ในบทนี้เราจะเน้นเฉพาะกระบวนการทางเคมี เพราะเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการผันแปรในแร่ได้ ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดตะกอนได้

เราย้อนกลับมาพูดถึงการผันแปรของแร่กันอีกครั้งหนึ่ง ออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำเมื่อมาสัมผัสกับแร่ในหินจะทำให้แร่เกิดการผุพังเรียกว่า ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นกระบวนการทำให้เกิดสารประกอบของไอออนของออกซิเจนกับไอออนของโลหะ เช่น แคลเซียม โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียมและเหล็กซึ่งมีอยู่ในแร่ซิลิเกต ขณะเดียวกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำจะทำให้เกิดกรดอ่อน ๆ คือกรดคาร์บอนิก (carbonic acid) ซึ่งสามารถละลายแร่บางชนิดได้ เมื่อพิจารณาการกระทำของพืช รวมกับความชื้นในดินซึ่งมีกรดอินทรีย์อันสลับซับซ้อน ก็มีผลทำให้แร่เกิดการผันแปรได้ แร่บางชนิด เช่น เกลือหิน (NaCl) จะละลายได้โดยตรงในน้ำ แต่การละลายง่ายๆ แบบนี้จะไม่เกิดกับแร่ซิลิเกตได้มากนัก

น้ำเมื่อรวมกับสารประกอบบางชนิดจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้ เราเรียกว่ากระบวนการไฮโดรไลซีส (hydrolysis) กระบวนการนี้ไม่เพียงแต่จะซึมเข้าไปในแร่หรือทำให้แร่เปียกเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยตรง ทำให้เกิดสารประกอบต่าง ๆ กันในแร่แต่ละชนิด กระบวนการนี้จะเกิดอย่างช้า ๆ และใช้เวลานานเช่นเดียวกับกระบวนการออกซิเดชัน หรืออีก

ตารางที่ 17.3 ผลจากการผันแปรของแร่ซิลิเกต

แร่ซิลิเกตต้นกำเนิด	ผลจากการผันแปร	
โพแทสเฟลด์สปาร์ และแพลจิโอเคลส เฟลด์สปาร์	เคโอลิไนต์ และ บ็อกไซต์	ไฮดรัส อะลูมิโนซิลิเกต
มัสโควิต์ไมกาและ เฟลด์สปาร์	อิลไลต์	ไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกต ของโพแทสเซียม
เฟลด์สปาร์ กลุ่มแร่มาฟิค เถ้าภูเขาไฟ (ผลึกของสารประกอบซิลิเกต)	มอนต์มอริลโลไนต์	ไฮดรัสสลับซับซ้อน อะลูมิโนซิลิเกตของเหล็ก และแมกนีเซียม
กลุ่มแร่มาฟิค (ไบโอไทต์ แอมฟิโบล ไพรอกซีน โอลิวีน)	ไลมอไนต์	ไฮดรัสออกไซด์ของเหล็ก

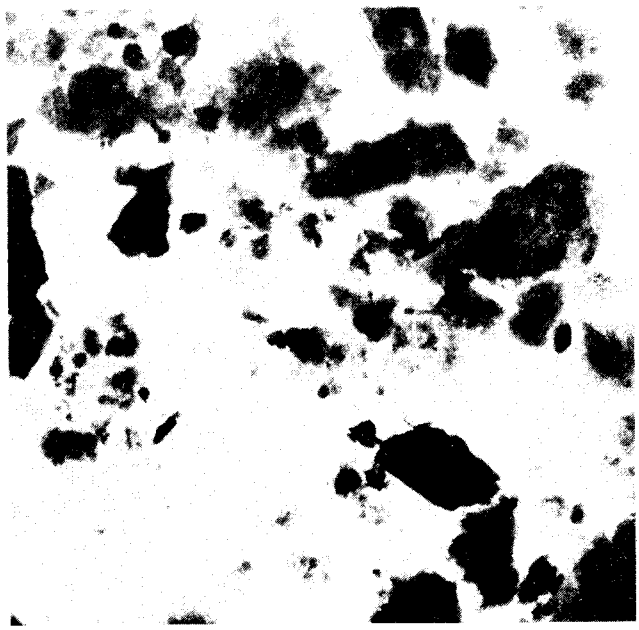
นัยหนึ่งความเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้แร่ค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมใหม่ของความกดดันและอุณหภูมิ

ตารางที่ 17.3 แสดงให้เห็นผลของการผันแปรของแร่ซิลิเกตบางชนิด ผลผลิตสำคัญอย่างหนึ่งของการผันแปร คือ แร่ดินเหนียว (clay mineral) แร่ดินเหนียว เป็นแร่ที่มีคุณสมบัติเหมือนพลาสติกเหลวเมื่อถูกความชื้น เพราะเป็นแร่ที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก เมื่อถูกน้ำเคลือบผิวจะลื่น โพแทสเฟลด์สปาร์เมื่อเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการไฮโดรไลซีสจะกลายเป็น เคโอลิไนต์ (kaolinite) เป็นแร่สีขาวมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง เมื่อเปียกน้ำเคโอลิไนต์จะมีลักษณะคล้ายพลาสติกเหลว เป็นแร่ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบ เช่น ใช้ทำถ้วยชาม เครื่องลายคราม และกระเบื้องมุงหลังคา

บ็อกไซต์เป็นแร่ที่ผันแปรมาจากเฟลด์สปาร์ เป็นแร่ที่เกิดในภูมิอากาศร้อนและเขตศูนย์สูตรซึ่งมีฝนตกชุกตลอดปีหรือชุกในฤดูผ่น ส่วนประกอบสำคัญคือแร่ไดแอสพอร์ มีสูตรทางเคมี $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ เซสควิออกไซด์ของอะลูมิเนียม (Al_2O_3) นั้นแสดงให้เห็นว่าแร่นี้เกิดจากการออกซิเดชัน แร่นี้จะต่างจากเคโอลิไนต์ซึ่งเป็นดินเหนียวที่แท้จริง และเมื่อเปียกจะมีลักษณะคล้ายพลาสติกเหลว แต่บ็อกไซต์จะมีลักษณะคล้ายหินผุงตัวอยู่ใต้ผิวดิน เราเรียกแร่นี้ว่าดินศิลาแลง (laterite)

แร่ดินเหนียวอีกชนิดหนึ่งได้แก่ อิลไลต์ ผันแปรมาจากแร่เฟลด์สปาร์และมัสโควิต์ไมกา อิลไลต์เป็นไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกตของโพแทสเซียม เป็นแร่ที่มีอยู่มากในหินชั้น ซึ่งจะอยู่ในลักษณะของ

อนุภาคคล้ายวุ้นอนุภาคเล็ก ๆ และจะถูกน้ำพัดพาไปได้เป็นระยะทางไกล ๆ อีกชนิดหนึ่งได้แก่ มอนต์-มอริลโลไนต์ผันแปรมาจากแร่เฟลด์สปาร์ กลุ่มแร่มาฟิคหรือเถ้าภูเขาไฟ



รูป 17.4 ภาพนี้เป็นแผ่นบาง ๆ ของแร่ดินเหนียวที่เรียกว่าอิลไลต์ (ขอบคม) และมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งขยายขึ้น 20,000 เท่า อนุภาคนี้เป็นตะกอนแขวนลอย และตกลงในอ่าวแซนแฟรนซิสโก

แร่ที่ผันแปรจากกลุ่มแร่มาฟิคที่สำคัญได้แก่ ไลมอไนต์ เป็นโฮดรัสของสารประกอบของเหล็กมีสูตร $2Fe_2O_3 \cdot H_2O$ เหล็กเซสควิออกไซด์ (Fe_2O_3) ในแร่ไลมอไนต์เป็นรูปแบบหนึ่งของเหล็กออกไซด์ ที่มีพบโดยทั่วไปในหินและดิน มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับบ็อกไซด์ในดินศิลาแลง ในเขตละติจูดต่ำ ไลมอไนต์จะทำให้ดินศิลาแลงมีสีช็อกโกเลต น้ำตาล ไลมอไนต์ที่สะสมตัวอยู่ในระดับตื้น ๆ อาจทำเหมืองแร่เหล็กได้

แร่ซิลิเกตมีความไวต่อการผันแปรต่างๆ กัน โอลิวีนเป็นแร่ที่มีความไวต่อการผันแปรมากที่สุด รองลงมาได้แก่ไพรอกซีน แอมฟีโบล ไบโอไทต์ และโซดิคพลาจิโอเคลส โพแทชเฟลด์สปาร์มีความไวน้อยกว่า มัสโคไวต์ไมกาค่อนข้างจะคงทนต่อการผันแปร ควอร์ตซ์นั้นทนทานต่อกระบวนการไฮโดรไลซีสและออกซิเดชัน เมื่อแร่ซิลิเกตมีความไวต่อการผันแปรต่าง ๆ กันเช่นนี้เป็นผลให้หินอัคนีมีความไวต่อการผันแปรต่างกันไปด้วย หินมาฟิคแตกสลายได้ง่าย ขณะที่หินเฟลซิคจะคงทนกว่า

การจัดขนาดของอนุภาคตะกอน

นอกจากองค์ประกอบทางแร่แล้ว ขนาดก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกตะกอน ขนาดของตะกอนจะสัมพันธ์กับเนื้อหิน ตารางที่ 17.4 เป็นรายชื่อที่เรียงตามลำดับขนาดของตะกอน ถ้าจะแบ่งกันจริง ๆ แล้ว แต่ละขนาดยังแบ่งย่อยได้อีกเป็นหยาบ ปานกลาง ละเอียด เราเรียกมาตรานี้ว่า มาตราเวนท์เวอร์ท (Wentworth Scale) ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานในทางธรณีวิทยา สำหรับนักปฐพีวิทยาอาจใช้มาตราจำแนกขนาดต่างไปจากนักธรณีวิทยา

ตารางที่ 17.4 การจัดขนาดของตะกอนตามมาตราเวนท์เวอร์ท

ชื่อขนาด	ขนาด มิลลิเมตร	ขนาด นิ้ว
หินมน (boulder)	256	10
กรวดมน (cobbles)	64	2.5
ทรายหิน (pebbles)	2	0.08
		ไมครอน
ทราย (sand)	0.0625	62
ทรายแป้ง (silt)	0.004	4
ดินเหนียว (ไม่มีสารคล้ายวุ้น)	0.001	1
ดินเหนียว (มีสารคล้ายวุ้น)	เล็กกว่า 1—0.001 ไมครอน	

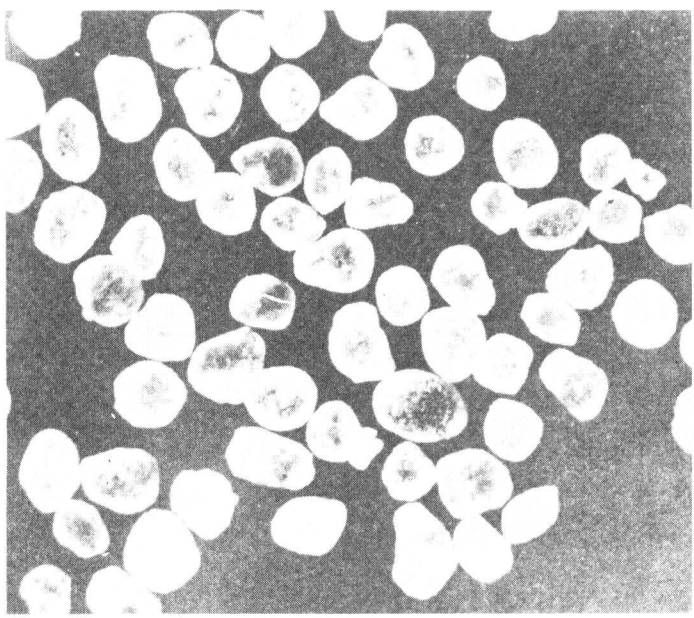
ตะกอนเนื้อเดิมและหินชั้น

ความสำคัญของตะกอนต่อชีวิตมนุษย์นั้นมีหลายประการ ตะกอน (รวมทั้งดิน) เป็นสิ่งที่เตรียมปัจจัยพื้นฐานทางกายภาพให้กับสิ่งมีชีวิต ทุกรูปแบบแม้ไม่ทั้งหมดในชีวิตแต่ก็ต้องมีอย่างน้อยหนึ่งอย่างหรือหลายอย่างในวัฏจักรชีวิตของสิ่งมีชีวิตหรือในการสะสมอาหารของสิ่งมีชีวิต ทราย ทรายแป้งและโคลนที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำ เป็นสิ่งแวดล้อมของสิ่งมีชีวิตในน้ำนับพันชนิดที่เกิดอยู่ในทะเลน้ำตื้นปากน้ำที่น้ำขึ้นถึง ก้นทะเลสาบและท้องลำธารตลอดจนหนองบึงที่ชื้นและอื่น ๆ หลักการสำคัญก็คือสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นจะใช้อวัยวะต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงตะกอนเหล่านั้นให้เหมาะแก่การดำรงชีวิตและเป็นอาหาร เช่น ใช้สร้างเปลือกและกระดูก กระบวนการที่สิ่งมีชีวิตกระทำต่อตะกอนนี้ จะตรงกันข้ามกับกระบวนการผันแปรธาตุ เพราะมันจะสร้างสรรค์แร่ธาตุเหล่านั้นขึ้นมาจากตะกอน

เราจำแนกตะกอนออกเป็นสองชนิด คือ ตะกอนเนื้อเดิม (clastic) และตะกอนเกิดใหม่ (nonclastic) ตะกอนเนื้อเดิม เป็นตะกอนที่เกิดจากหินบริเวณนั้นโดยตรง เช่น ตะกอนที่แตกจากหินต้นกำเนิด ตรงข้ามกับตะกอนเกิดใหม่ เป็นตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนของแร่ธาตุที่ละลาย

ไปกับน้ำตามกระบวนการทางเคมี หรือเกิดจากการกระทำของสิ่งที่มีชีวิต ตะกอนเนื้อเดิมนั้นรวมถึงอนุภาคที่เกิดจากภูเขาไฟในรูปของเถ้าถ่าน ขี้เถ้าและฝุ่น ตะกอนนี้จะอธิบายอีกครั้งในบทที่ 27

ตะกอนเนื้อเดิมนั้นสลายตัวมาจากหินกลุ่มต่าง ๆ เช่น หินอัคนี หินชั้น และหินแปร ตะกอนเนื้อเดิมจึงมีแร่ต้นกำเนิดมากมายหลายชนิด ตะกอนพวกหนึ่งมีกำเนิดมาจากแร่ซิลิเกตและแร่ที่ผันแปรมาจากซิลิเกต เนื่องจากแร่ที่มีความไวต่อการผันแปรนั้นส่วนมากได้แก่ กลุ่มแร่มาฟิค จึงเปลี่ยนแปลงและถูกพัดพาไป ส่วนควอร์ตซ์นั้นคงทนต่อการผันแปรจึงเป็นตะกอนที่ยังคงมีสภาพเป็นเกล็ดควอร์ตซ์เล็ก ๆ เหมือนกับควอร์ตซ์ต้นกำเนิด (ดูรูป 17.5) เฟลด์สปาร์และไมกาก็ยังคงมีลักษณะเหมือนแร่ต้นกำเนิด แร่ดินเหนียวโดยเฉพาะเคโอลิไนต์ อิลไลต์และมอนต์มอริลโลไนต์เป็นตะกอนเนื้อเดิมที่มีอนุภาคละเอียดมาก

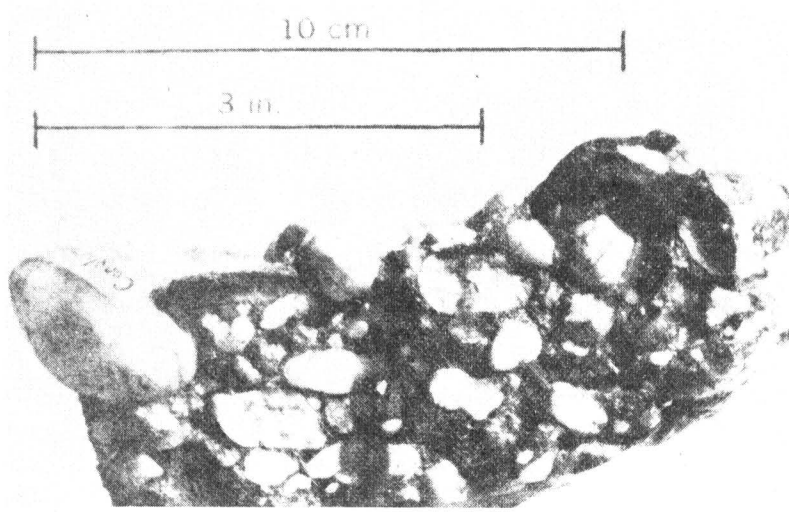


รูป 17.5 เม็ดควอร์ตซ์รูปกลมจากหินทรายดึกดำบรรพ์ เม็ดควอร์ตซ์นี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. (0.04 นิ้ว)

ตะกอนเนื้อเดิมที่มีความสำคัญนั้นได้แก่แร่หนัก (heavy mineral) คำว่า "หนัก" หมายถึงแร่ที่มีความหนาแน่นมาก ตัวอย่างแร่หนักที่สำคัญสองชนิด ได้แก่ แมกนีไทต์ มีความหนาแน่นประมาณ 5 และอิลเมไนต์ แร่หนักเหล่านี้สลายตัวมาจากหินชนิดใดชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นมาก่อน ซึ่งแร่เหล่านี้มีความคงทนต่อการขัดสีมาก ตะกอนจึงเคลื่อนที่ไปตามกระแสน้ำ ไปตามชายหาดได้ไกล ๆ เช่นเดียวกับควอร์ตซ์ ตะกอนเหล่านี้จะไปสะสมกันอยู่ตามชายหาดและตามลันทรายใต้ท้องธาร สาร

เหล็กที่ละลายน้ำจะไหลผ่านเข้าไปในทรายแห้งและจะเคลือบเม็ดทรายเป็นชั้นหนาเรียกว่าเกล็ดแมกนีไทต์ (magnetite grain) ขณะที่แร่หนักอื่น ๆ ซึ่งอาจจะไม่มีความสำคัญโดยตรงต่อกระบวนการแห่งชีวิต แร่เหล่านี้อาจจะสะสมกัน ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งในสภาพแหล่งแร่โลหะ ตัวอย่างเช่น อิลเมไนต์ที่สลายตัวจะทำให้เกิดแหล่งแร่ไทเทเนียม อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ แร่หนักแคสซิเทอไรต์ (cassiterite) เป็นออกไซด์ของดีบุก (SnO_2) จะสะสมกันเป็นแหล่งแร่รวมกับกรวดทราย ที่เราเรียกกันว่าแหล่งดีบุกใต้ท้องธาร

การจัดขนาดตามธรรมชาติของอนุภาคตะกอนเนื้อเดิมนั้นเราดูได้จากความสะดวกในการพัดพาและการเคลื่อนที่ที่กระแสน้ำได้พัดพาตะกอนนั้นมา ตะกอนที่มีขนาดละเอียดมากกระแสน้ำจะพัดพาไปได้ง่ายและล่องลอยไปในน้ำในลักษณะสารแขวนลอย (suspension) ตะกอนที่หยาบกว่ามีแนวโน้มว่าจะตกลงสู่ก้นท้องธารใต้ระดับผิวน้ำ จากวิธีการดังกล่าวมานี้ การตกตะกอน การจัดขนาดตามธรรมชาติและการเกิดหินชั้นก็จะเกิดตะกอนที่จัดขนาดกันแล้ว สารคล้ายวุ้นของดินเหนียวจะไม่ตกตะกอนจนกว่าจะได้เกาะตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ขึ้นเราเรียกกระบวนการนั้นว่า "การเกาะรวมตัวกัน" (flocculation)



รูป 17.6 หินกรวดมนประกอบไปด้วยกรวด และมีทรายเป็นตัวเชื่อมให้เป็นหินแข็ง

การอัดตัวแน่น (compaction) และการเชื่อมต่อกัน (cementation) ระหว่างอนุภาคตะกอนในแต่ละชั้นจะทำให้เกิดชั้นหินชั้น หินชั้นชนิดสำคัญ ๆ มีดังนี้คือ หินกรวดมน (conglomerate) ประกอบด้วยทรายหินหรือกรวดมนซึ่งมาเชื่อมต่อกันโดยมีทรายฝังอยู่ระหว่างตะกอนขนาดใหญ่ (ดูรูป 17.6) ชั้นหินกรวดจะเกิดจากตะกอนจากชายหาดหรือตะกอนใต้ท้องธาร หินทราย (sandstone) เกิดจากตะกอนที่มีขนาดเท่าเม็ดทราย มีซิลิกา (SiO_2) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCo_3$) เป็นตัวเชื่อมให้เป็นหิน ตามปกติเม็ดทรายจะประกอบด้วยควอร์ตซ์ ดังแสดงในรูป 17.5 บางครั้งก็เป็น

พวกเฟลด์สปาร์ซึ่งจะทำให้เกิดหินกรวดที่มีเนื้อละเอียดและมีแร่บางชนิดผสมอยู่ด้วย หินทรายแป้งและหินดินดาน (siltstone and shale) เป็นหินชั้นที่เกิดจากอนุภาคทรายแป้งและดินเหนียวตามลำดับ และหินที่เกิดจากตะกอนของทรายแป้งและดินเหนียว คือหินโคลน (mudstone)

หินชั้นที่มีจำนวนมากได้แก่หินดินดาน เกิดจากแร่ดินเหนียวเคโอลิไนต์ อิลไลต์และมอนต์มอริลโลไนต์ กระบวนการอัดตัวแน่นนั้นจะทำให้ดินเหนียวและโคลนเดิมมีปริมาตรลดลงไปมาก เพราะน้ำจะถูกบีบออกไปเกือบหมด

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของหินชั้นคือจะจัดเรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นเราเรียกว่าหน่วยชั้นหิน (strata) แต่ละหน่วยชั้นหินจะมีเนื้อหินและส่วนประกอบต่างกันวางตัวสลับกัน ระนาบที่อยู่ระหว่างหน่วยชั้นหินเราเรียกว่า "ระนาบชั้นหิน" (bedding plane)

ตะกอนเกิดใหม่และหินชั้น

ตะกอนเกิดใหม่เป็นตะกอนที่เป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของชีวิตเพราะเป็นปัจจัยที่สะสมคาร์บอนไว้เป็นจำนวนมาก ซึ่งได้มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศและเปลี่ยนเป็นสารประกอบคาร์บอเนตและไฮโดรคาร์บอนโดยกระบวนการของอนินทรีย์และอินทรีย์ ตะกอนเกิดใหม่นี้เราแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด (1) ตะกอนเกิดใหม่ที่เกิดตามกระบวนการเคมี (chemical precipitate) เป็นการตกตะกอนโดยตรงจากน้ำโดยไอออนถูกขจัดออกไป เราเรียกการตกตะกอนแบบนี้ว่า การเกิดจากน้ำ (hydrogenic) (2) การตกตะกอนจากการกระทำของสิ่งมีชีวิต (organically-derived sediment) เป็นการตกตะกอนจากการกระทำโดยกระบวนการแห่งชีวิตของพืชและสัตว์ เราเรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดจากสิ่งที่มีชีวิต (biogenic)

การตกตะกอนตามกระบวนการทางเคมีที่สำคัญอันดับแรกเป็นกระบวนการที่เกิดมากในพื้นทะเล ส่วนการตกตะกอนที่มีความสำคัญเป็นอันดับสองนั้นได้แก่การสะสมของเกลือในทะเลสาบ ในแผ่นดินบริเวณทะเลทราย ซึ่งมีการระเหยมากกว่าหยาดน้ำฟ้าที่ได้รับ

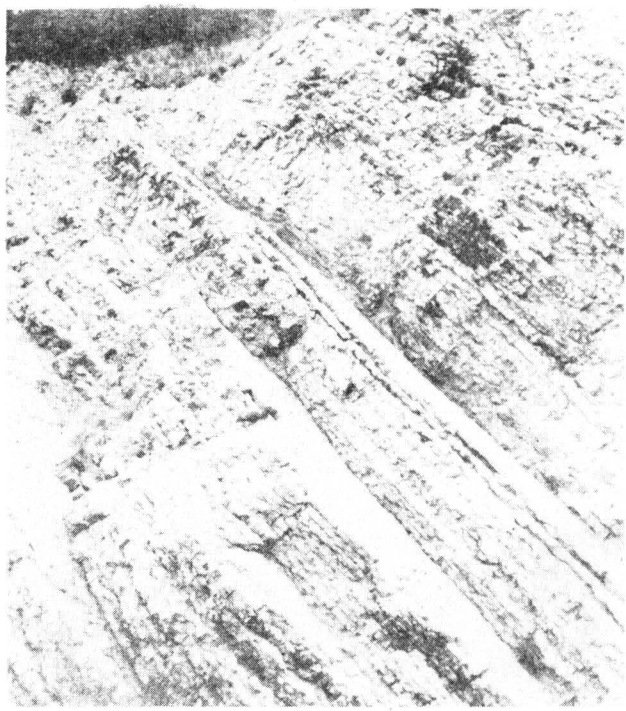
แร่ที่เกิดจากน้ำและเกิดจากสิ่งมีชีวิตที่สำคัญ (ไม่รวมสารประกอบไฮโดรคาร์บอน) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 17.5 รวมทั้งบอกส่วนประกอบด้วย สามชนิดแรกได้แก่ แคลไซต์ อะราโกไนต์ และโดโลไมต์ จัดรวมกันเป็นพวกคาร์บอเนต แคลไซต์เป็นพวกคาร์บอเนตที่สำคัญและปรากฏในหลายรูปแบบ อะราโกไนต์เป็นแร่ที่มีส่วนประกอบเหมือนแคลไซต์แต่มีโครงสร้างของผลึกต่างกัน เป็นส่วนประกอบสำคัญในเปลือกของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง โดโลไมต์มีแมกนีเซียมประกอบอยู่เท่า ๆ กับแคลเซียม แร่ทั้งสามชนิดนี้เป็นแร่อ่อนเมื่อเปรียบเทียบกับแร่ซิลิเกต กลุ่มที่สองได้แก่พวกที่เกิดจากการระเหย (evaporation) คือเกิดจากการระเหยของน้ำทะเลในอ่าวแคบ ๆ ได้แก่ แอนไฮไดรต์ และยิปซัม ประกอบด้วยแคลเซียมซัลเฟต แต่ยิปซัมมีน้ำปนอยู่ด้วย ยิปซัมเป็นแร่ที่มีความสำคัญในทางเศรษฐกิจมากเพราะใช้ในการอุตสาหกรรมทำวัสดุก่อสร้าง แร่ที่เกิดจากการระเหยชนิดที่สาม ได้แก่ เฮไลต์ โดยทั่วไปเราเรียกว่า เกลือหิน (rock salt) ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เมื่อบดให้ละเอียดแล้วใช้เป็นเกลือประกอบอาหารและปรุงรส

ตารางที่ 17.5 แร่ที่เกิดจากน้ำและจากสิ่งมีชีวิตที่พบโดยทั่วไป

	ชื่อแร่	ส่วนประกอบ	ความหนาแน่น
คาร์บอเนต	แคลไซต์	แคลเซียมคาร์บอเนต $CaCO_3$	2.72
	อะราโกไนต์	แคลเซียมคาร์บอเนต $CaCO_3$	2.9—3
	โดโลไมต์	แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต $(CaMgCO_3)_2$	2.9
เกิดจากการระเหย	แอนไฮไดรต์	แคลเซียมซัลเฟต $CaSO_4$	2.7—3
	ยิปซัม	ไฮดรัสแคลเซียมซัลเฟต $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2
	เฮไลต์	โซเดียมคลอไรด์ NaCl	2.1—2.3
	ฮีมาไทต์	เซสควิออกไซด์ของเหล็ก Fe_2O_3	4.3—5.9
	คาลซิโดนี	ซิลิกา SiO_2	2.6

ฮีมาไทต์ เป็นเซสควิออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) เป็นแร่ที่มีพบโดยทั่วไปในหินชั้น เป็นแหล่งสำคัญของสินแร่เหล็ก แร่นี้มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าแร่ที่มีส่วนประกอบเป็นพวกคาร์บอเนตและแร่ที่เกิดจากการระเหยคือคาลซิโดนี เป็นแร่ที่มีผลึกละเอียดมาก สูตรทางเคมีของแร่นี้เหมือนกับของควอร์ตซ์

ชื่อแร่ที่ปรากฏในตารางที่ 17.5 สามารถจะตกผลึกได้จากน้ำทะเลหรือน้ำในทะเลสาบที่มีเกลือปนอยู่ หรือได้จากการกระทำของสิ่งมีชีวิต ทำให้เกิดหินตะกอนจากตะกอนเกิดใหม่ หินคาร์บอเนตที่พบมากได้แก่ หินปูน (limestone) ซึ่งมีหลายรูปแบบด้วยกัน (รูป 17.7) แหล่งสำคัญแหล่งหนึ่งได้แก่หินปะการัง ซึ่งเกิดจากการกระทำของปะการังและเห็ดราทะเล อีกรูปแบบหนึ่งคือชอล์ก เกิดจากโครงสร้างของพืชทะเลพวกเห็ดรา หินปูนอีกชนิดหนึ่งเกิดจากเปลือกสัตว์ทะเลที่แตกหักหรือสารคาร์บอเนตอื่น ๆ ที่แตกหัก หินปูนบางชนิดมีลักษณะเป็นผลึก โดโลไมต์เป็นหินที่มีชื่อเดียวกับแร่ที่ประกอบหินนั้น เกิดจากการผันแปรของหินปูนโดยไอออนของแมกนีเซียมในน้ำทะเลเข้าไปแทนที่ไอออนของแคลเซียม เชิร์ต เป็นองค์ประกอบของคาลซิโดนี เป็นหินชั้นประเภทซิลิกาที่สำคัญ มันจะเกิดเป็นก้อนกลมอยู่ในหินปูนและในบางกรณีจะเกิดเป็นชั้นหินแข็ง เราเรียกว่าแผ่นหินเชิร์ต (bedding cherts) ยิปซัม แอนไฮไดรต์และเฮไลต์เป็นหินแผ่นและเกิดรวมกับหินชั้นที่เกิดจากตะกอนเนื้อเดิม



รูป 17.7 ชั้นหินปูนในรัฐโอกลาโฮมา เป็นชั้นซึ่งวางตัวลาดชันมาก

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในหินชั้น

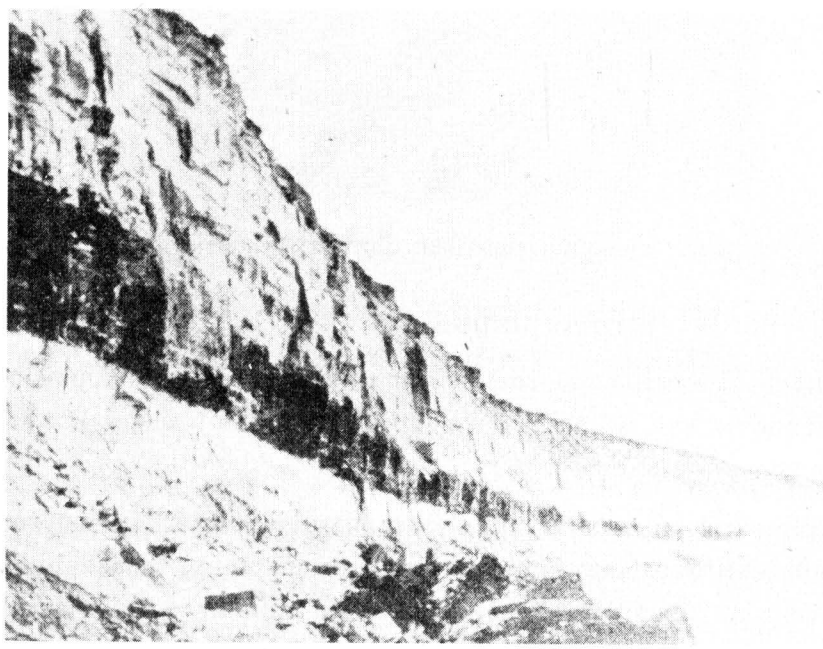
สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นตะกอนที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต อินทรียสารเหล่านี้เกิดทั้งในรูปของแข็ง (พีทและถ่านหิน) ของเหลวและก๊าซ (น้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ) มีแต่เพียงถ่านหินเท่านั้นที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่เรียกได้ว่าเป็นหิน

พีท (peat) เป็นสารใยอ่อนมีสีน้ำตาลถึงดำ สะสมตัวอยู่ในแหล่งน้ำซึ่งมีน้ำท่วมอยู่ตลอดเวลา ทำให้ต้นไม้ผุเปื่อยและเกิดออกซิเดชัน รูปแบบหนึ่งของพีทนั้นเกิดในแอ่งน้ำจืดและต่อมาแอ่งน้ำนั้นตื้นเขินขึ้น ในอเมริกาเหนือและยุโรปพบแหล่งพีทตามแอ่งน้ำเก่านับพันแห่ง ซึ่งต่อมาแอ่งน้ำนั้นตื้นเขินขึ้นจากการกระทำของธารน้ำแข็งในยุคไพลสโตซีน มนุษย์รู้จักนำพีทเหล่านี้มาใช้หลายศตวรรษมาแล้วโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำ พีทอีกพวกหนึ่งเกิดในแอ่งน้ำเค็มซึ่งน้ำเค็มจะท่วมในช่วงน้ำขึ้น ทำให้แอ่งนั้นเป็นบึงน้ำเค็ม

ช่วงเวลาและสถานที่ต่าง ๆ ของยุคธรณีวิทยาในอดีตนั้นเหมาะแก่การที่จะเป็นแหล่งสะสมขนาดใหญ่ของซากพืช ร่วมกับการทรุดตัวของแอ่งน้ำทำให้ซากพืชที่ฝังตัวอยู่ใต้ชั้นดินหนาถูกอัดแน่นมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ชั้นถ่านหิน (coal seams) จะวางตัวอยู่ระหว่างชั้นหินดินดานและชั้นหินทราย ชั้นถ่านหินมีความหนาต่าง ๆ กัน ตั้งแต่หนาเพียงหนึ่งนิ้วจนหนาถึง 50 ฟุต (12 เมตร) ถ่านหินส่วน

มากประกอบด้วยสารประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน และตามปกติจะมีกำมะถันปะปนอยู่ด้วย ถ่านหินคุณภาพต่ำส่วนมากจะประกอบไปด้วยสารระเหิดไฮโดรคาร์บอนและน้ำ ถ่านหินคุณภาพสูงส่วนมากจะประกอบไปด้วยคาร์บอน

ปิโตรเลียม (petroleum) รูป 17.8 หรือน้ำมันดิบ (crude oil) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนเหลว ตัวอย่างน้ำมันดิบชนิดหนึ่งจะประกอบไปด้วย คาร์บอน 82 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 15 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนและออกซิเจน 3 เปอร์เซ็นต์ ก๊าซธรรมชาติ (natural-gas) จะพบสัมพันธ์กับปิโตรเลียม เป็นก๊าซผสม ก๊าซที่สำคัญคือมีเธน (H_4) ก๊าซอื่น ๆ ซึ่งมีจำนวนน้อยได้แก่อีเธน โปรเพนและออกซิเจน บางครั้งจะมีฮีเลียมปนอยู่ด้วย เราไม่จัดว่าปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติเป็นแร่ แต่มันมีกำเนิดในลักษณะขององค์ประกอบของตะกอนจากสิ่งมีชีวิต จะได้อธิบายถึงการกำเนิดและการสะสมของน้ำมันปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติอีกครั้งในบทที่ 25



รูป 17.8 ชั้นถ่านหินหนา 8 ฟุต โผล่ให้เห็นบริเวณริมฝั่งน้ำ ณ เมืองดอว์สัน รัฐมอนตานา

นักวิชาการต่างยอมรับกันว่าน้ำมันปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาตินั้นเกิดจากสิ่งมีชีวิต แต่กระบวนการเกิดนั้นยังคงเป็นเพียงสมมติฐานเท่านั้น คำอธิบายที่เหมาะสำหรับการเกิดของปิโตรเลียมนั้นคือเกิดจากพืชขนาดเล็กที่ล่องลอยอยู่บนผิวน้ำทะเล (เป็นแพลงก์ตอนพืช—phytoplankton) เช่น พวกไดอะตอม เมื่อแต่ละไดอะตอมตายลง จะมีน้ำมันหยดเล็ก ๆ สลายตัวออกมาซึ่งจะเกาะติดอยู่กับ

อนุภาคของตะกอนโคลนใต้ผิวน้ำ สุดท้ายโคลนก็จะเปลี่ยนสภาพเป็นหินดินดานและเกิดน้ำมันขึ้น ปัจจุบันนี้เรามีหินน้ำมัน (oil shale) กระจายอยู่ในหลายบริเวณของโลก ซึ่งเป็นหลักฐานที่สนับสนุนสมมติฐานที่เรากล่าวถึงมาแล้ว อย่างไรก็ตาม การที่มีน้ำมันจำนวนมากสะสมอยู่ในรูพรุนของหินเช่นหินทรายนั้น เนื่องจากมีพลังบางอย่างขับดันให้น้ำมันซึมออกมาจากหินแหล่งกำเนิดน้ำมัน สารระเหิดไฮโดรคาร์บอนและก๊าซอื่น ๆ จะลอยตัวขึ้นมาอยู่เหนือน้ำมันดิบซึ่งเป็นของเหลว

มนุษย์เรียกเชื้อเพลิงที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดในเปลือกโลกว่า "เชื้อเพลิงซากบรรพชีวิต" (fossil fuel) เชื้อเพลิงที่สะสมตัวกันเป็นจำนวนมากนั้นจะต้องใช้เวลานับร้อยล้านปี แต่สังคมอุตสาหกรรมของเราสามารถบริโภคให้หมดสิ้นไปในเวลาไม่นานนัก เชื้อเพลิงนี้เป็นทรัพยากรชนิดสูญสิ้น แม้จะมีกระบวนการเกิดน้ำมันตามกระบวนการทางธรณีวิทยานับพันปีแต่ก็คงมีปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันที่สะสมตัวมาตลอดช่วระยะเวลาทางธรณีวิทยา

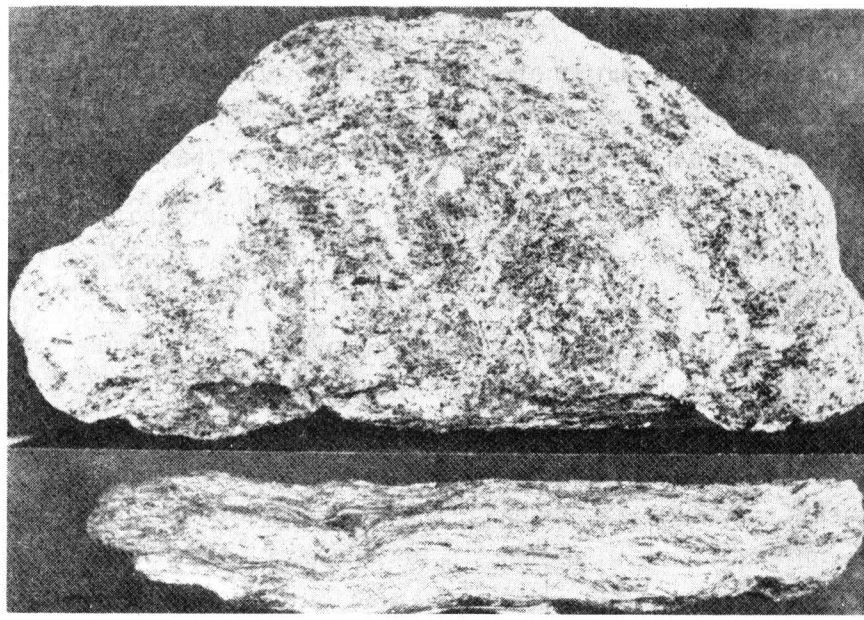
หินแปร

หินอัคนีและหินชั้นเมื่อได้รับความกดดันและอุณหภูมิสูงอาจแปรเปลี่ยนรูปไปได้ จะเกิดร่วมกับการสร้างภูเขาจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลก เป็นผลให้หินมีรูปร่างและส่วนประกอบเปลี่ยนไป เราเรียกว่าหินแปร (metamorphic rocks) โดยทั่วไปแล้วหินแปรจะแข็งกว่าและอัดแน่นกว่าหินต้นกำเนิด ยกเว้นการอัดแน่นในหินอัคนี ยิ่งไปกว่านั้นกระบวนการคลุกเคล้าและกระบวนการอบผิวจะทำให้หินมีโครงสร้างใหม่หรือแม้แต่การเกิดแร่ใหม่ก็อาจเป็นได้ หินแปรในโลกที่แปรมาจากหินแกรนิตนั้นมีปริมาณเท่า ๆ กับหินที่แปรมาจากหินชั้น หินแปรที่เกิดจากหินชั้นนั้นเราเรียกว่า หินแปรจากหินชั้น (metasediment)

หินดินดาน เมื่อได้รับแรงอัดและบีบจากกระบวนการเกิดภูเขา จะเปลี่ยนสภาพเป็นหินชนวน (slate) เป็นหินที่มีสีเทาหรือสีอิฐแดงและสามารถกะเทาะออกมาเป็นแผ่นบาง ๆ ได้เหมาะสำหรับใช้ทำกระเบื้องมุงหลังคา กระเบื้องประดับ กระเบื้องปูทางเท้า ระนาบรอยแยกนี้เราเรียกว่า "รอยแยกหินกาบ" (slaty cleavage) เป็นโครงสร้างซึ่งเกิดขึ้นใหม่ในขณะที่ผ่านกระบวนการแปรสภาพ มิใช่เป็นระนาบรอยแยกหรือรอยแยกของชั้นดั้งเดิมแต่อย่างใด หินชนวนเป็นหินทั้งที่มีเนื้อละเอียดและมีผิวขรุขระ

ถ้าหินชนวนยังได้รับแรงอัดและแรงบีบต่อไป หินชนวนจะเปลี่ยนเป็นหินชิสต์ (chist) เป็นหินแปรชั้นสูงขึ้นอีกชั้นหนึ่งของหินดินดาน โครงสร้างของหินชิสต์เราเรียกว่า "โครงสร้างแบบกาบ" (foliation) ประกอบด้วยชั้นบาง ๆ แต่ขรุขระและโค้ง ชิสต์ประกอบด้วยหินชนวนและเกล็ดหยาบของไพไลต์และไมกา รวมทั้งผลึกแร่ที่เกิดขึ้นใหม่ เช่น การ์เนต สตอโรไลต์ เป็นแร่ที่โตขึ้นมาขณะที่หินชนวนได้รับแรงกด (ดูรูป 17.9 ในหน้า 20)

หินแปรที่เกิดจากหินกรวดหินทรายและหินทรายแป้งคือหินเมตาควอร์ตไซต์ (metaquartzite) เกิดขึ้นจากการที่มีซิลิกา (SiO_2) เข้าไปเพิ่มทำให้ช่องว่างเม็ดควอร์ตซ์เดิมนั้นตันหมด ส่วนประกอบทั้งหมด คือ ควอร์ตซ์ (รวมทั้งซิลิกา) กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยการกระทำของ



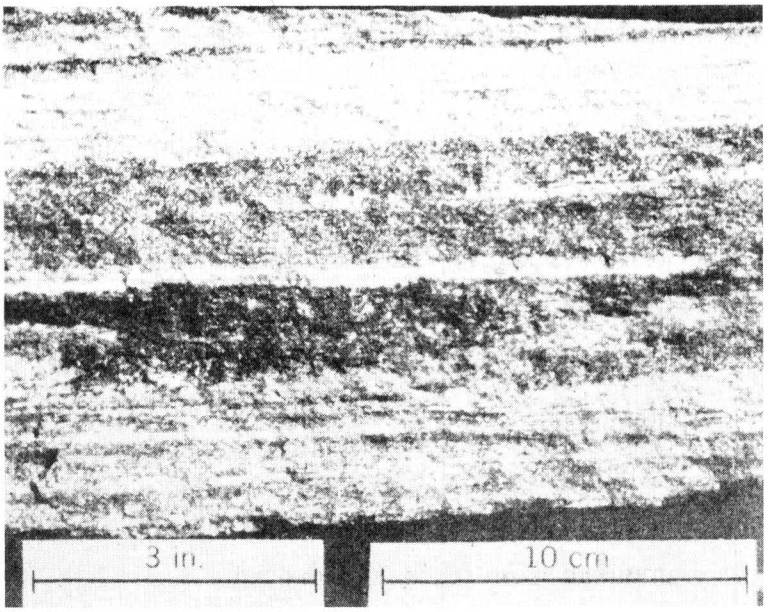
รูป 17.9 เป็นส่วนหนึ่งของหินชิสต์ซึ่งยาว 6 นิ้ว (15 ซม.) มีพื้นผิวขรุขระ และส่องแสงแวววาว เพราะประกอบไปด้วยเกล็ดไมกา (บน) (ล่าง) เป็นภาพที่แสดงให้เห็นขอบของแผ่นหินที่ลอกเป็นกาบมาจากก้อนบน

น้ำใต้ดินจะนำซิลิกาไหลซึมเข้าไปในหินทราย แล้วซิลิกาก็จะตกตะกอนอยู่ในช่องว่างของเม็ดทราย แรงกดดันและแรงบีบนั้นไม่มากพอที่จะทำให้เกิดควอร์ตซ์ได้ แต่จะทำให้เม็ดควอร์ตซ์เปลี่ยนสภาพไป เมื่อเราใช้ค้อนทุบไปบนควอร์ตไซต์ มันจะแตกออก โดยรอยแตกอาจจะแตกผ่านเม็ดทรายหรือทรายหินได้ ปรากฏการณ์นี้แหละที่ทำให้หินควอร์ตไซต์แตกต่างออกไปจากหินทราย ซึ่งตามปกติรอยแตกจะวิ่งไปรอบ ๆ เม็ดทราย

หินปูนเมื่อแปรสภาพจะเป็นหินอ่อน (marble) ตามปกติจะมีสีขาว เมื่อทุบให้แตกใหม่ ๆ พื้นผิวจะคล้ายน้ำตาล ขณะที่หินปูนได้รับแรงกดดันและอุณหภูมิสูง แคลไซต์จะเปลี่ยนรูปผลึกโดยมีผลึกเป็นรูปแบนและใหญ่ขึ้น ระนาบชั้นหินจะมีลักษณะไม่ชัดเจน และแร่อื่น ๆ ที่ปะปนอยู่ในแคลไซต์จะถูกดึงแยกตัวออกมาให้รวมอยู่ด้วยกันเป็นเกลียวหรือเป็นแถบยาว

หินแปรชนิดสุดท้ายที่มีความสำคัญ คือ หินไนส์ (gneiss) แปรมาจากหินอัคนีแทรกซ้อนและหินอัคนีผุ หรือจากหินชั้น เป็นหินแปรที่มีความแข็งมาก มักพบอยู่ในบริเวณที่เปลือกโลกมีอายุเก่าแก่

หินไนส์แต่ละชนิดมีส่วนประกอบของแร่และโครงสร้างต่าง ๆ กัน หินไนส์ที่พบมากได้แก่ แกรนิตไนส์ (granite gneiss) เป็นหินไนส์ที่เกิดจากหินแกรนิตเหลวโดยตรง แกรนิตไนส์แตกต่างจากแกรนิตเพราะมีเนื้อต่างกันทั้งเท็กซ์เจอร์ (ความหยาบความละเอียด) และแร่ที่ประกอบกันขึ้น



รูป 17.10 หินไนส์แสดงให้เห็นพื้นผิวเป็นลายแถบ

หินไนส์อื่น ๆ จะมีลักษณะเป็นแถบ ๆ มีทั้งสีอ่อนและเข้ม (รูป 17.10) หรืออาจจะเป็นชั้นโค้งไปโค้งมาก็ได้ เป็นไปได้ว่าแถบสีต่าง ๆ กันนั้นประกอบด้วยแร่ต่าง ๆ กัน ซึ่งอาจจะเป็นแร่ในชั้นหินดินดานและหินทรายรวมทั้งแร่ใหม่ที่เพิ่มเข้าไปจากหินที่เย็นตัวภายในซึ่งอยู่ใกล้หินชั้นนั้น

แหล่งแร่โลหะ

แหล่งทรัพยากรสูญสิ้นซึ่งมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมสมัยใหม่คือ "แหล่งแร่โลหะ" (metalliferous deposits) เป็นการสะสมของสารประกอบโลหะในเปลือกโลก เมื่ออัตราการสะสมของโลหะมากพอที่จะให้ผลตอบแทนคุ้มค่าทางเศรษฐกิจที่จะนำมาถลุงแล้ว เราเรียกแหล่งโลหะนั้นว่า "สินแร่" (ore)

เพื่อความเข้าใจในปริมาณของแร่โลหะต่าง ๆ ที่มีอยู่ในโลก โปรดศึกษาหาตัวเลขต่าง ๆ ในตารางที่ 17.6 ตารางนี้จะบอกปริมาณประมาณเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโลหะแต่ละชนิดโดยเฉลี่ยในหินเปลือกโลก โปรดสังเกตว่าอะลูมิเนียมและเหล็กเป็นโลหะที่มีค่อนข้างมาก โลหะอื่น ๆ ที่มีความสำคัญทางอุตสาหกรรม เช่น สังกะสี ทองแดงและตะกั่วมีปริมาณน้อย ในกรณีของปรอทมีปริมาณเพียง 1/10,000,000 เท่านั้น

สินแร่โลหะที่สะสมกันอยู่ในลักษณะสารประกอบนั้นต้องมีส่วนประกอบของโลหะมากพอ ยิ่งไปกว่านั้นส่วนประกอบในหินต้องมีคุณภาพเหมาะสมที่จะเป็นสินแร่ด้วย ตัวอย่างเช่น สินแร่ตะกั่วต้องมีตะกั่วผสมอยู่อย่างน้อย 4 เปอร์เซ็นต์จึงจะเหมาะแก่การขุดขึ้นมาถลุง เพื่อให้การสะสมมีปริมาณมากพอดังกล่าวนี้ หินในเปลือกโลกจะต้องมีปริมาณตะกั่วเพิ่มมากกว่าที่เป็นอยู่ถึง 2,500 เท่า

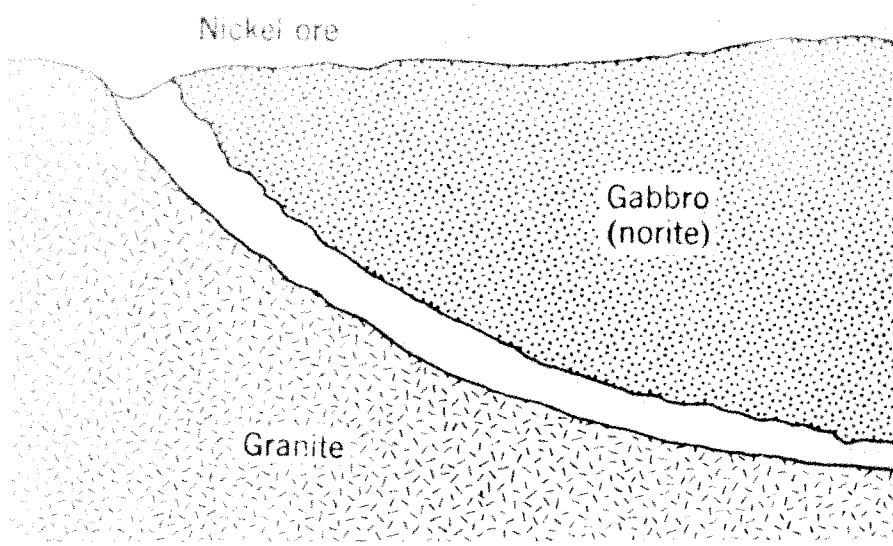
ตารางที่ 17.6 ปริมาณแร่โลหะบางชนิดโดยเฉลี่ยในหินเปลือกโลก

สัญลักษณ์	ชื่อธาตุ	คล้าด (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	การบริโภครายปีของโลก (ตัน)
Al	อะลูมิเนียม	8.1	6,100,000
Fe	เหล็ก	5.0	310,000,000
Mg	แมกนีเซียม	2.1	150,000
Ti	ไทเทเนียม	0.44	10,000
Mn	แมงกานีส	0.10	6,000,000
V	วาเนเดียม	0.014	7,000
Cr	โครเมียม	0.010	1,400,000
Ni	นิกเกิล	0.0075	400,000
Zn	สังกะสี	0.0070	3,800,000
Cu	ทองแดง	0.0055	5,400,000
Co	โคบอลต์	0.0025	13,000
Pb	ตะกั่ว	0.0013	2,800,000
Sn	ดีบุก	0.00020	190,000
U	ยูเรเนียม	0.00018	30,000
Mo	โมลิบดีนัม	0.00015	45,000
W	ทังสเตน	0.00015	30,000
Sb	พลวง	0.00002	60,000
Hg	ปรอท	0.000008	9,000
Ag	เงิน	0.000007	8,000
Pt	แพลทินัม	0.000001	30
Au	ทองคำ	0.0000004	1,600

ในบทนี้เราจะได้อธิบายสั้น ๆ ถึงกระบวนการทางธรณีวิทยาบางอย่างที่ทำให้โลหะมาสะสมกันอยู่ในรูปสินแร่ ตารางที่ 17.7 แสดงให้เห็นสินแร่บางชนิดที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรม แร่บางชนิดได้เคยกล่าวถึงมาแล้วในย่อหน้าก่อน ๆ เช่น บอกไซต์ แมกนีไทต์ ฮีมาไทต์ ไลมอไนต์ และอิลเมไนต์ โปรดสังเกตว่า ถ้ายกเว้นโลหะที่มีมาแต่กำเนิด (native metals) ตัวอย่างเช่น ทองแดงกำเนิดแล้ว แร่อื่น ๆ ไม่เป็นพวกออกไซด์ก็เป็นซัลไฟด์ แร่ซัลไฟด์ประกอบไปด้วยโลหะหนึ่งชนิดหรือมากกว่าที่มารวมตัวกับกำมะถันซัลไฟด์เป็นสินแร่สำคัญของโลหะนิกเกิล สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ ตะกั่ว ปรอทและเงิน

ซัลไฟด์เป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญนอกจากจะเป็นแหล่งโลหะสำคัญ ๆ แล้ว กำมะถันยังระเหยเป็นไอเข้าสู่บรรยากาศได้ ขณะที่มนุษย์ทำการถลุงแร่ ไอกำมะถันจากปล่องควันของโรงถลุงโลหะจะไปทำลายพืชพรรณ ยิ่งไปกว่านั้นน้ำฝนที่ไหลผ่านเข้าไปในเหมืองยังทำให้เกิดน้ำสกปรกไหลออกมาจากเหมืองอีกด้วย

แหล่งของสินแร่ที่สำคัญนั้นจะเกิดขึ้นในหินหนืด ซึ่งโลหะจะมารวมตัวกันตามความถ่วงจำเพาะของโลหะแล้วตกผลึกในเวลาต่อมา ตัวอย่างเช่น โครไมต์ เป็นสินแร่สำคัญของโครเมียมมีความหนาแน่นประมาณ 4.4 บางครั้งเราจะพบแถบโครไมต์อยู่ใต้ชั้นหินอัคนี อีกตัวอย่างหนึ่งคือสินแร่นิกเกิลในซัสเบอรีในรัฐออนแตริโอ เป็นซัลไฟด์ของนิกเกิลแยกตัวออกมาจากหินหนืด แล้วรวมตัวกันอยู่ในชั้นฐาน (ดูรูป 17.11) แมกนีไทต์ก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่แยกตัวออกมาจากหินหนืดมารวมตัวกันเป็นสินแร่ที่สำคัญ

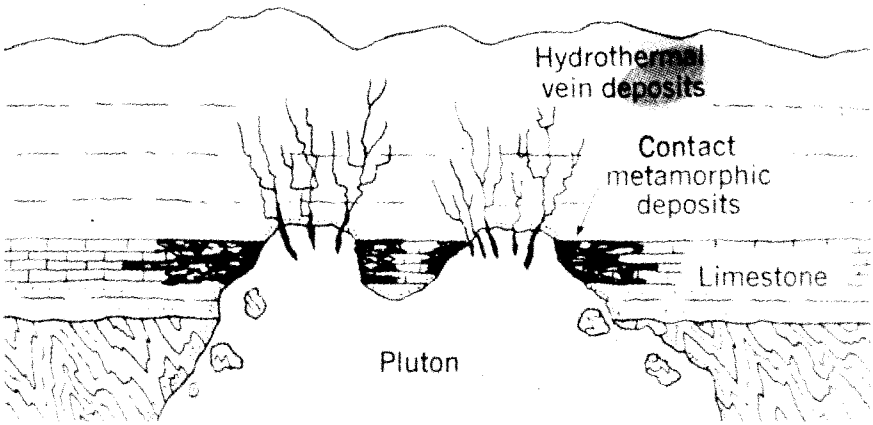


รูป 17.11 ภาพตัดด้านข้างแสดงให้เห็นการสะสมตัวของแร่นิกเกิล โดยวางตัวอยู่ใต้หินแกบโบรและเหนือหินแกรนิตซึ่งมีอายุมากกว่า

ตารางที่ 17.7 ตารางแสดงสินแร่โลหะ

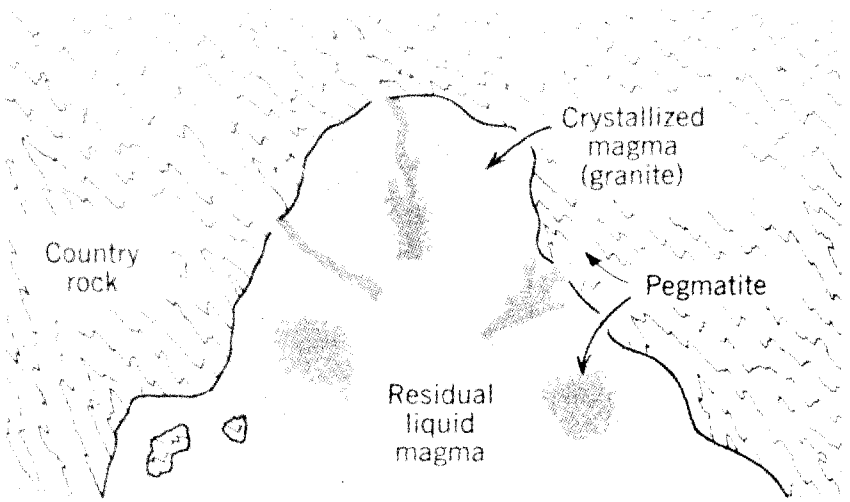
โลหะ	สัญลักษณ์	ชื่อแร่	ส่วนประกอบ
อะลูมิเนียม	Al	บอกไซต์ (ไม่ใช่แร่เดี่ยว)	ไฮดรัสอะลูมิเนียมออกไซต์
เหล็ก	Fe	แมกนีไทต์	$Fe\ (FeO_2)_2$
		ฮีมาไทต์	Fe_2O_3
		ไลมอไนต์ (ไม่ใช่แร่เดี่ยว)	$Fe_2O_3 \cdot nH_2O$
		ไพไรต์	FeS_2
ไทเทเนียม	Ti	อิลเมไนต์	$FeTiO_3$
แมงกานีส	Mn	ไพโรลูไซต์	MnO_2
		แมงกาไนต์	$Mn_2O_3 \cdot H_2O$
โครเมียม	Cr	โครไมต์	$FeCr_2O_4$ (มี Al, Mg, Fe ด้วย)
สังกะสี	Zn	สฟาเลอไรต์	(SN, Fe) S
ทองแดง	Cu	ทองแดงกำเนิด	Cu
		คาลโคไพไรต์	$CuFeS_2$
		ชาลโคไซต์	Cu_2S
ตะกั่ว	Pb	กาลีนา	PbS
ดีบุก	Sn	แคสซิเทอไรต์	SnO_2
โมลิบดีนัม	Mo	โมลิบดีไนต์	MoS_2
ทังสเตน	W	วุลแฟรไมต์	(Fe, Mn) WO_4
ยูเรเนียม	U	พิตช์เบลนด์ (ยูเรนิไนต์)	ไฮดรัสอะลูมิเนียมออกไซต์
ปรอท	Hg	ซินนาบาร์	HgS
เงิน	Ag	เงินกำเนิด	Ag
		อาร์เจนไทต์	Ag_2S
ทองคำ	Au	ทองคำกำเนิด	Au, Ag
แพลทินัม	Pt	แพลทินัม	Pt

กระบวนการสำคัญอีกประการหนึ่งที่เกิดร่วมกับการเกิดหินอัคนีภายใน คือ การแปรสัมผัส (contact metamorphism) เกิดจากการที่หินหนืดดันตัวขึ้นมา สารละลายเคมีที่ดันตัวขึ้นมาด้วยจะทำให้หินที่อยู่โดยรอบเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างเช่น ชั้นหินปูนจะมีสินแร่เหล็กที่ประกอบด้วยฮีมาไทต์และแมกนีไทต์เข้าไปแทนที่ (ดูรูป 17.12 ในหน้า 25) สินแร่ทองแดง สังกะสีและตะกั่วก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันนี้



รูป 17.12 ภาพตัดด้านข้างผ่านเข้าไปในเนื้อหินอัคนีชนิดเย็นตัวภายในตอนบน แสดงให้เห็นสายแร่และการแปรสัมผัส

การสะสมของแร่โลหะอีกวิธีการหนึ่งเกิดจากการเย็นตัวภายในของหินอัคนีในลำดับขั้นสุดท้ายของการตกผลึกของหินหนืด แกรนิตจะมีหินหนืดเหลว (watery magma) เหลืออยู่ หินหนืดเหลวนี้จะมีซิลิกามาก ภายใต้สภาวะความกดสูงสารละลายนี้จะหลุดออกมาจากหินหนืดขนาดใหญ่ที่แข็งตัวไปแล้วแทรกซึมเข้าไปในมวลหินที่อยู่โดยรอบในลักษณะของแท่งขนาดเล็กและไหลซึมเข้าไปตามรอยแตกแล้วก็ตกผลึกทำให้เกิดมวลหินเปกมาไทต์ ส่วนประกอบเกือบทั้งหมดของมวลหินเปกมาไทต์ประกอบด้วยผลึกขนาดใหญ่ของโลหะ เปกมาไทต์มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นแท่งต่อมาจากพลูโตนิค อาจจะมีลักษณะเป็นพนังหิน (dike) หรือเป็นสายแร่ (vien) ก็ได้



รูป 17.13 ภาพตัดด้านข้างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลหินเปกมาไทต์ที่เกิดอยู่ในหินอัคนีชนิดเย็นตัวภายใน

มวลหินเปกมาไทต์ส่วนมากประกอบด้วยควอร์ตซ์ เฟลด์สปาร์ ไมกา และแร่โลหะอื่น ๆ ของหินแกรนิต บางครั้งอาจมีแร่โลหะและอโลหะอื่น ๆ ที่หาได้ยากปนอยู่ด้วย ตัวอย่างเช่น หินเปกมาไทต์ในแบลคฮิลส์ ในรัฐดาโกตาใต้ มีผลึกแร่สปอดูมีน และอะลูมิโนซิลิเกตของลิเทียมขนาดใหญ่เกิดอยู่ด้วย มีการบันทึกไว้ว่าผลึกแร่หนึ่งผลึกยาวถึง 47 ฟุต (14 ม.) เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 ฟุต แต่ละผลึกหนักมากกว่า 30 ตัน เปกมาไทต์แห่งนี้และแห่งอื่น ๆ เป็นแหล่งสำคัญของโลหะเบาลิเทียม ซึ่งมีความสำคัญในการอุตสาหกรรมมาก โลหะอีกชนิดหนึ่งได้แก่เบริลเลียม ก็มีพบในหินเปกมาไทต์ในรูปของแร่เบริล และอะลูมิโนซิลิเกตของเบริลเลียม เบริลเลียมเป็นโลหะที่ใช้ผสมกับทองแดง โคบอลต์ นิกเกิลและอะลูมิเนียมให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น โลหะอีกสองชนิดที่พบในหินเปกมาไทต์ได้แก่ แทนทาลัม และโคลัมเบียม เป็นแร่ที่หายากแต่มีความสำคัญในการอุตสาหกรรม เนื่องจากผลึกเปกมาไทต์มีขนาดต่าง ๆ กัน จากเส้นผ่าศูนย์กลางเพียงไม่กี่นิ้วจนถึงหลาย ๆ ฟุต เปกมาไทต์จึงเป็นแหล่งแร่อโลหะที่สำคัญในทางการค้าโดยเฉพาะเฟลด์สปาร์ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้องมุงหลังคา กระเบื้องเคลือบและแก้ว มัสโคไวต์ไมกา (muscovite mica) ที่ใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าเพื่อทำฉนวนนั้นต้องเป็นแผ่นแบนขนาดใหญ่ และคุณสมบัตินี้จะมีอยู่เฉพาะมัสโคไวต์ไมกาที่เกิดในเปกมาไทต์เท่านั้น

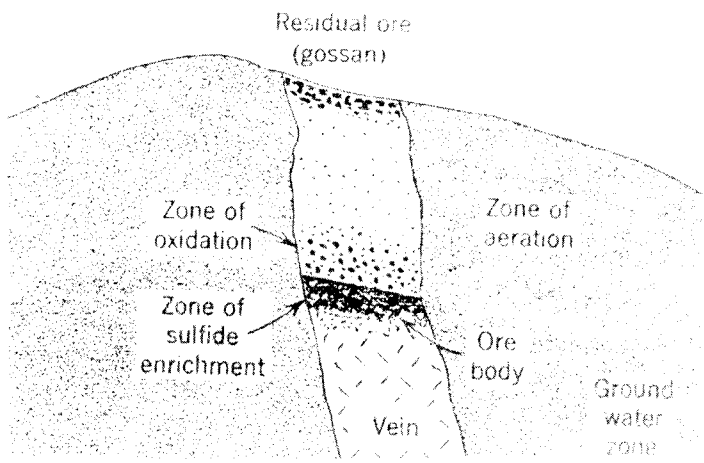
รูป 17.14 ผลึกขนาดใหญ่ของเปกมาไทต์ชื่อว่าเอตตาเปกมาไทต์ อยู่เมืองเพนนิงตัน รัฐดาโกตาใต้

การสะสมของสินแร่อีกชนิดหนึ่งเกิดจากสารละลายอุณหภูมิสูงเราเรียกว่า **"น้ำแร่"** (hydrothermal solutions) ซึ่งแยกตัวมาจากหินหนืดในระหว่างขั้นสุดท้ายของการตกผลึกของหินหนืด และมาสะสมในรอยแตกทำให้เกิดสายแร่ สายแร่บางสายจะสังเกตเห็นได้ง่ายเพราะน้ำแร่แทรกเข้าไปในรอยแตก สายแร่อีกชนิดหนึ่งดูเหมือนว่าจะเกิดจากการที่น้ำแร่ซึมเข้าไปแทนที่หินที่อยู่โดยรอบ จึงเป็นสายแร่ที่เกิดในระดับลึกเราเรียกว่า "สายแร่ในหิน" (lode)

นอกจากนี้น้ำแร่ยังทำให้เกิดแหล่งสินแร่อื่น ๆ อีกด้วย เราเรียกว่า "แหล่งแร่แพร่กระจาย" (disseminated deposit) กล่าวคือ สินแร่จะกระจายเข้าไปทั่วมวลหินขนาดใหญ่ แหล่งแร่ทองแดงที่เกิดโดยวิธีนี้เราเรียกว่า "แหล่งแร่ทองแดงพอร์ไฟรี" (porphyry copper deposit) เนื่องจากในบางกรณีสินแร่จะแพร่เข้าไปในมวลหินอัคนีขนาดใหญ่ทำให้เกิดหินเนื้อดอก (porphyry) ขึ้น

น้ำแร่ที่ดันตัวขึ้นมาถึงผิวโลกทำให้เกิดสายแร่ในระดับตื้น หรืออาจโผล่ขึ้นมาในบริเวณน้ำพุร้อน แร่มีค่าหลายชนิด เช่น ทองคำและเงินจะสะสมอยู่ในสายแร่ระดับตื้น ๆ นี้ โดยเฉพาะที่น่าสนใจมากได้แก่สินแร่ปรอทที่เกิดในรูปของแร่ซินนาบาร์ (cinnabar) จะเกิดอยู่ในแหล่งน้ำแร่ระดับตื้นๆ แหล่งที่มีแร่นี้มากในปัจจุบันได้แก่เขตอัลมาเดนในสเปน ซึ่งมีการทำเหมืองปรอทกันมานับเป็นศตวรรษแล้ว และเป็นแหล่งแร่ปรอทที่สำคัญของโลก

การสะสมสินแร่อีกแบบหนึ่งที่แตกต่างจากที่กล่าวมาแล้วได้แก่ การเคลื่อนที่ของสารละลายเข้าไปในรูพรุนและเขตน้ำใต้ดิน การสะสมสินแร่โดยวิธีนี้เราเรียกว่า "กระบวนการทุติยภูมิ" (secondary process) โปรดพิจารณาสายแร่ปฐมภูมิซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแร่ทุติยภูมิหลายชนิด (ดูรูป 17.15) แร่นี้เกือบทั้งหมดเป็นแร่ซัลไฟด์ของทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และเงิน ส่วนทองคำนั้นส่วนมากจะแพร่กระจายเข้าไปในหินและไม่ได้รวมกันเป็นสินแร่มากนัก เมื่อพื้นที่นั้นถูกกัดกร่อน น้ำใต้ดินจะไหลผ่านสายแร่ สายแร่ส่วนหนึ่งจะอยู่ใต้ระดับน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะอยู่เหนือระดับน้ำ สมมติว่าเขตนั้นเป็นเขตชุ่มชื้น ซึ่งระดับน้ำใต้ดินและชั้นน้ำใต้ดินจะคงสภาพอยู่ตลอดเวลาและมีเขตที่มีรูพรุนอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินขึ้นมา น้ำที่เพิ่มเข้ามาใหม่เช่นจากฝนหรือจากการละลายของหิมะจะไหลผ่านเขตที่มีอากาศแทรกอยู่ นักธรณีวิทยาเรียกน้ำนี้ว่าเมทีโอริค (meteoric) น้ำนี้จะมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน ๆ เพราะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ (กรดคาร์บอนิก) บางครั้งอาจมีกรดกำมะถันจากการละลายของเหล็กซัลไฟด์รวมอยู่ด้วย



รูป 17.15 ภาพตัดด้านข้างแสดงการสะสมตัวของแร่ทุติยภูมิ ซึ่งเกิดในย่านที่มีสายแร่อยู่มาก

น้ำเมทีโอริคทำให้เกิดสินแร่ มี 3 เขต เขตแรกอยู่ใกล้พื้นผิวที่สุด เมื่อแร่ที่ละลายน้ำได้ละลายไปหมดแล้ว ส่วนที่เหลือจะได้แก่แร่ที่ละลายน้ำไม่ได้ ได้แก่ พวกทองคำ เงินและตะกั่ว เมื่อแร่เหล่านี้สะสมตัวกันมากขึ้นก็จะเป็นแหล่งสินแร่ได้ การสะสมแร่แบบนี้เราเรียกว่า "กากสินแร่" (gossan) ในกากสินแร่นี้จะมีเหล็กออกไซด์และควอร์ตซ์สะสมอยู่ด้วย ถ้ากระบวนการนี้เกิดนานต่อไป บริเวณนี้จะอุดมไปด้วยแร่เหล็กจนสามารถทำเหมืองแร่เหล็กได้ แต่แหล่งแร่นั้นอาจถูกค้นพบและถูกขุดไปหมดแล้วก็ได้ การชะล้าง (leaching) แร่อื่นๆ น้ำจะนำแร่เหล่านั้นไปยังเขตออกซิเดชัน (oxidation) ในเขตที่สองนี้จะมีออกไซด์หลายชนิดสะสมตัวกันอยู่ ได้แก่ออกไซด์ของสังกะสี ทองแดง เหล็กและตะกั่วรวมกับแร่กำเนิดชนิดอื่น ๆ เช่น เงิน ทองแดงและทองคำ เขตที่สามเป็นเขตที่อุดมไปด้วยซัลไฟด์ซึ่งอยู่ติดส่วนบนของน้ำใต้ดินแต่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน เป็นซัลไฟด์ของเหล็ก ทองแดง ตะกั่วและสังกะสี ซึ่งจะมาสะสมตัวกันอยู่ในเขตนี้เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างแร่ได้แก่ ไพไรต์ คาลโคไพไรต์ คาลโคไซต์ กาลีนา และสฟาลอไรต์

ได้กล่าวมาแล้วว่าบอกไซต์เป็นสินแร่หลักที่มีอะลูมิเนียมสะสมอยู่ โดยสะสมอยู่ใกล้ ๆ ผิวดินในเขตละติจูดต่ำที่มีความชื้นสูงและกระบวนการเกิดดินเป็นแบบแลทเทอไรเซชัน บอกไซต์เป็นแร่ผสมไฮดรัสออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่สลายตัวมาจากการผันแปรของแร่อะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งจะไม่สามารถละลายได้ในเขตภูมิอากาศเช่นนั้น และเมื่อการกัดกร่อนแผ่นดินดำเนินต่อไป แร่นี้ก็จะสะสมตัวอยู่ได้ จากภาวะแวดล้อมคล้าย ๆ กันนี้จะมีกากแร่บางชนิดเหลืออยู่ด้วย ได้แก่ แมงกานีส (แร่—แมงกาไนต์) และเหล็ก (แร่—ไลมอไนต์) นักธรณีวิทยาเรียกกากแร่พวกนี้ว่าศิลาแลง

การสะสมของแร่อีกวิธีหนึ่งเกิดจากการกระทำของตัวการพัดพาคือกระแสน้ำและคลื่น โดยเฉพาะแร่หนักที่ไม่ละลายน้ำที่เหลือจากกระบวนการกัดกร่อนและแตกเป็นก้อนเล็กก้อนน้อย กระแสน้ำจะพัดพาลงสู่ลำธารและสู่หุบเขาไปพร้อมกับทรายและกรวดในลักษณะของวัตถุท้องธาร (bed material) เนื่องจากเป็นแร่ที่มีความหนาแน่นมาก แร่เหล่านี้จะไปตกรวมกันเป็นกระสะแร่ (pracer deposits) ทองคำกำเนิดเป็นแร่ชนิดหนึ่งที่จะพบได้ในกระสะแร่เช่นเดียวกับแพลทินัม ชนิดที่สามได้แก่ออกไซด์ของดีบุกคือแร่แคสซิเทอไรต์ซึ่งมีสะสมอยู่มากในกระแสแร่ เพชรก็เช่นเดียวกันจะมีสะสมอยู่ในกระสะแร่รวมทั้งหินรัตนชาติอื่น ๆ เมื่อแร่หลักเหล่านี้ถูกกระแสน้ำพัดพาลงสู่ทะเล มันจะตกตะกอนกระจายอยู่ริมหาดทรายทำให้เกิดกระสะแร่ริมฝั่งสมุทร (marine placers)

สุดท้ายเป็นแหล่งสะสมแร่ที่เกิดจากการกระทำของน้ำ ส่วนมากจะได้แก่การสะสมของแร่อโลหะ แต่บางครั้งก็อาจมีแร่โลหะสะสมโดยวิธีนี้ได้ เหล็กเป็นสินแร่ที่เกิดจากการตกตะกอนในปริมาณมหาศาลได้เช่นกัน สินแร่เหล็กที่ตกทับถมเป็นเหล็กออกไซด์ตามปกติจะเป็นฮีมาไทต์ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดได้แก่ สินแร่เหล็กชุดคลินตัน (clintan formation) ในยุคไซลูเรียน ซึ่งมีกระจายอยู่ทั่วไปบริเวณเทือกเขาแอปปาเลเชียน จะเป็นด้วยเหตุผลใดยังไม่ทราบชัด ที่ทำให้สินแร่เหล็กออกไซด์จำนวนมหาศาลผุกร่อนจากกลุ่มแร่มาฟีคในหินที่โผล่มาจากใต้ผิวโลก แล้วกระแสน้ำก็พัดพาลงสู่ทะเลและตกผลึกในรูปของฮีมาไทต์ แร่ชนิดอื่น ๆ ได้แก่ แมงกานีส ซึ่งก็สะสมจากกระบวนการทับถมเป็นสินแร่ตะกอน

เช่นเดียวกับกรณีของเชื้อเพลิงจากซากบรรพชีวิต มนุษย์บริโภคโลหะอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่แร่เหล่านี้จะสะสมให้ทันได้ ซึ่งแร่โลหะต่าง ๆ เหล่านั้นอาจจะหมดไปจากโลกในเร็ว ๆ วันนี้

คำถามทบทวน

คำถามทบทวนบทที่ 17

1. จงอธิบายถึงบทบาทของแร่และหินเปลือกโลกในฐานะเป็นสิ่งแวดล้อม
2. จงบอกชื่อธาตุสำคัญแปดชนิดในเปลือกโลก แต่ละชื่อมีความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมหรือต่ออุตสาหกรรมอย่างไร
3. จงบอกชื่อแร่ประกอบหินของกลุ่มแร่ซิลิเกตที่สำคัญและบอกส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญของแร่นั้นด้วย บอกด้วยว่าแร่ใดเป็นกลุ่มแร่มาฟิคหรือเป็นกลุ่มแร่เฟลสิค
4. หินหนืดมีคุณสมบัติทางกายภาพอย่างไร สารระเหิดในหินหนืดคืออะไร ทำไมมันจึงเป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ
5. หินอัคนีคืออะไร เราจำแนกหินอัคนีตามลักษณะเนื้อหินได้อย่างไร จงบอกชื่อและอธิบายความสำคัญของหินอัคนีชนิดต่าง ๆ ชนิดไหนเป็นหินเฟลสิค ชนิดไหนเป็นหินมาฟิค ชนิดไหนเป็นหินอุลตรามาฟิค จะเปรียบเทียบความหนาแน่นได้อย่างไร
6. จงอธิบายกระบวนการพื้นฐานในการผันแปรของแร่ การตะกอนคืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร หินชั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร
7. แร่ดินเหนียวคืออะไร จงบอกชื่อและอธิบายลักษณะของแร่ดินเหนียวมาสามชนิด แร่ที่ผันแปรมาจากแร่ดินเหนียวมีความสำคัญต่อการอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อมอย่างไร
8. มาตราเวนท์เวิร์ทคืออะไร จงอธิบายการเกิดสารคล้ายวุ้น (colloids) จากการผันแปรของแร่
9. จงอธิบายความแตกต่างระหว่างตะกอนเนื้อเดิมกับตะกอนเกิดใหม่ แร่ส่วนใหญ่ที่พบในตะกอนเนื้อเดิม ได้แก่แร่อะไร แร่หนักคืออะไร บอกมาสองชื่อ
10. จงบอกชื่อและอธิบายถึงความสำคัญของหินตะกอนเนื้อเดิม อะไรคือโครงสร้างที่เกิดขึ้นขณะที่มีการทับถม
11. เราแบ่งตะกอนเกิดใหม่ออกเป็นสองชนิดได้แก่อะไรบ้าง จงบอกชื่อแร่สำคัญ ๆ ที่เกิดจากน้ำ และสภาวะเช่นใดที่จะทำให้ตะกอนนั้นตกตะกอนได้
12. แร่ที่เกิดจากสิ่งที่มีชีวิตโดยทั่วไปมีอะไรบ้าง มันเกิดขึ้นได้อย่างไร หินชั้นชนิดใดบ้างที่ประกอบไปด้วยแร่ที่เกิดจากสิ่งมีชีวิต
13. สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดใดบ้างที่มีพบในหินชั้น จงอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างพีทกับถ่านหิน จงเปรียบเทียบส่วนประกอบของถ่านหินกับน้ำมันปิโตรเลียมและก๊าซธรรมชาติ น้ำมันปิโตรเลียมมีกำเนิดมาอย่างไร
14. เชื้อเพลิงจากซากบรรพชีวินคืออะไร ในกรณีใดที่กล่าวว่าเชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นเชื้อเพลิงสูญสิ้น
15. หินแปรเกิดขึ้นได้อย่างไร จงอธิบายหินแปรที่พบโดยทั่วไปมาสองสามชนิด
16. แหล่งสะสมแร่โลหะคืออะไร สินแร่คืออะไร จงกล่าวโดยทั่ว ๆ ไปถึงแร่โลหะที่พบมากในเปลือกโลก การจำแนกแร่โลหะตามคุณสมบัติทางเคมีของสินแร่นั้นมีอะไรบ้าง ยกตัวอย่างประกอบด้วย

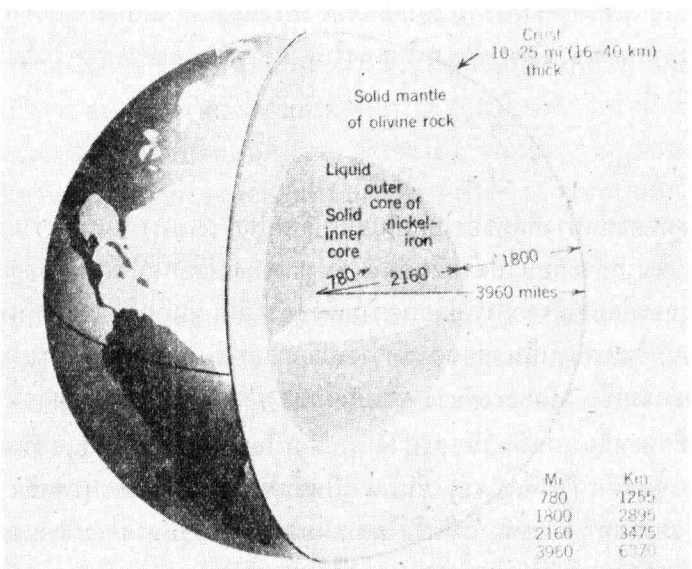
17. เปกมาไทต์คืออะไร มันเกิดขึ้นได้อย่างไร สินแร่สำคัญ ๆ ที่เกิดในเปกมาไทต์มีอะไรบ้าง
18. น้ำแร่ทำให้เกิดแหล่งสินแร่ได้อย่างไร จงบอกชื่อสินแร่สำคัญ ๆ ที่สะสมตัวโดยการแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อหินอื่น
19. จงอธิบายกระบวนการสะสมแร่ทุติยภูมิ และบอกชื่อแร่ที่สะสมโดยวิธีนี้สองสามชื่อ กระสะแร่คืออะไร
20. แร่อะไรบ้างที่สะสมโดยการตกตะกอนจากน้ำ
21. ในกรณีใดบ้างที่เรากล่าวได้ว่าแหล่งแร่โลหะเป็นทรัพยากรสูญสิ้น

บทที่ 18
เปลือกโลกและลักษณะภูมิประเทศ

มนุษย์ที่เหยียบย่ำผิวโลกอยู่ทุกวันนี้มีอยู่ไม่น้อยที่ไม่เห็นความจำเป็นของการศึกษาสาขาหนึ่งของธรณีวิทยา คือ การศึกษาโครงสร้างภายในโลก โครงสร้างใต้พื้นผิวทวีป ลักษณะภูมิประเทศของพื้นสมุทร และเหตุการณ์ในธรณีประวัติยุคบรรพกาล จริงอยู่ที่สิ่งเหล่านั้นอยู่ห่างไกลกับชีวิตมนุษย์มากทั้งมิติของสถานที่และมิติแห่งเวลา แต่สิ่งเหล่านั้นก็มีความสำคัญในทางอ้อมต่อกระบวนการเศรษฐกิจ สังคมและวัฒนธรรมของมนุษย์เป็นอย่างมาก เราอาจจะมองไม่เห็นเพราะสิ่งเหล่านั้นเกี่ยวข้องกับชีวิตมนุษย์โดยตรงน้อยมาก อย่างไรก็ตาม สิ่งเหล่านั้นก็ยังมีคุณค่าที่เราควรจะได้ศึกษาเอาไว้ในลักษณะกว้าง ๆ ทั้งลักษณะภูมิประเทศ ภูมิอากาศและมหาสมุทร

โครงสร้างภายในของโลก

มนุษย์สามารถศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพภายในของโลกได้จำกัด เช่นเดียวกับความลึกของเหมืองแร่และการเจาะลึกลงในแผ่นดิน ซึ่งก็เจาะลึกลงไปได้ไม่กี่ไมล์ ดังนั้นมนุษย์จึงต้องศึกษาลักษณะภายในของโลกโดยทางอ้อม การศึกษาลักษณะภายในของโลกนั้นเราใช้ความรู้ด้านธรณีฟิสิกส์ (geophysics) โดยใช้เครื่องมือวัดคลื่นแผ่นดินไหว อำนาจแม่เหล็กโลกและแรงดึงดูดของโลก การตีความหมายจากข้อมูลเหล่านี้ตามกฎหมายฟิสิกส์ ทำให้มนุษย์ได้ความรู้ใหม่ๆ และรายละเอียดใหม่ ๆ เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างภายในของโลก



รูป 18.1 โครงสร้างภายในของโลก

รูปที่ 18.1 แสดงให้เห็นโครงสร้างภายในสำคัญๆ ของโลก โลกเรามีลักษณะเกือบเป็นทรงกลม มีรัศมีตามระนาบศูนย์สูตรยาว 3,960 ไมล์ (6,370 กม.) ที่ศูนย์กลางของโลกเป็นแกน (core) เป็นเขตที่เป็นรูปทรงกลมมีรัศมีประมาณ 2,160 ไมล์ (3,475 กม.) เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่เคลื่อนที่มาถึงเขตนี้แล้วจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนไป เราจึงสรุปได้ว่าแกนนอก (outer core) มีคุณสมบัติเป็นของเหลว ซึ่งมีลักษณะตรงข้ามกับของแข็งที่ล้อมรอบแกนอยู่ อย่างไรก็ตาม แกนใน (inner core) ซึ่งรัศมี 780 ไมล์ (1,255 กม.) นั้นมีลักษณะเป็นของแข็งหรือไม่ก็เป็นผลึก

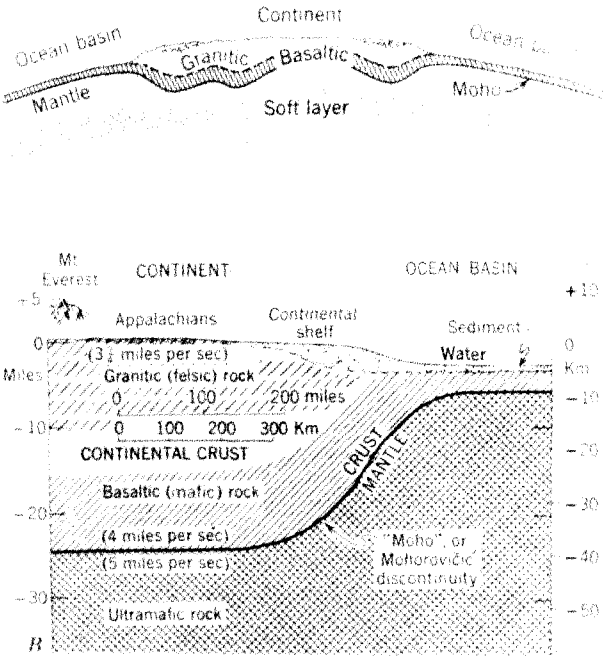
จากการคำนวณตามวิธีดาราศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของโลกมีค่าประมาณ $5\frac{1}{2}$ ขณะที่หินเปลือกโลกโดยเฉลี่ยมีความหนาแน่น 3 หรือน้อยกว่านี้ ข้อสังเกตนี้ตีความได้ว่าความหนาแน่นของหินจะเพิ่มขึ้นไปสู่ศูนย์กลางของโลก ซึ่งอาจมีความหนาแน่น 10—15 สารที่ประกอบกันเป็นแกนกลางของโลกนั้นน่าจะได้แก่ เหล็กผสมกับนิกเกิลเล็กน้อยและอยู่ในสภาพหลอมเหลว ข้อสรุปนี้มีข้อเท็จจริงที่ยืนยันได้คืออุกกาบาตซึ่งแตกมาจากบริวารของดวงอาทิตย์นั้นประกอบไปด้วยเหล็กและนิกเกิล อุณหภูมิ ณ แกนกลางของโลกอยู่ระหว่าง 4,000 และ 5,000 องศาฟาเรนไฮต์ (2,200 และ 2,750 องศาเซลเซียส) ความกดดันมากกว่าความกดบรรยากาศ ณ ระดับน้ำทะเล 3—4 ล้านเท่า

รอบแกนโลกเป็นชั้นเปลือกโลกชั้นใน ชั้นนี้หนาประมาณ 1,800 ไมล์ (2,895 กม.) ประกอบไปด้วยแร่ต่าง ๆ ที่อยู่ในสถานะเป็นของแข็ง จากการวิเคราะห์ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหว ลงความเห็นได้ว่าเปลือกโลกชั้นในประกอบด้วยโอลิวีน (olivine = magnesium iron silicate) ผสมกับหินอุลตรามาฟิคที่เรียกว่าดูไนต์ หินนี้อาจอยู่ในลักษณะเป็นแก้ว มีความแข็งและความหนาแน่นมาก จึงทำให้คลื่นแผ่นดินไหวที่เคลื่อนที่มาถึงบริเวณนี้มีความเข้มเพิ่มขึ้นทันทีทันใด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งหินเปลือกโลกชั้นในสามารถเคลื่อนไหวได้ด้วยแรงที่ไม่เสมอภาคที่กระทำต่อชั้นนี้ตลอดเวลาที่โลกเกิดมา ลักษณะเช่นนี้คล้าย ๆ กับน้ำมันดินเย็นจัดซึ่งแข็งและแตกได้ง่ายถ้าถูกวัตถุใด ๆ มากระแทก แต่ถ้านำไปทิ้งไว้ตามลาดเขามันจะค่อย ๆ ไหลลงไปตามลาดเขาได้อย่างช้า ๆ ถ้าไม่มีสิ่งใดมารบกวนเป็นระยะเวลานาน ๆ

เปลือกโลก

ชั้นนอกสุดและชั้นบางที่สุดของโลกเป็นชั้นเปลือกโลก (crust) ชั้นนี้มีความหนา 5—25 ไมล์ (8—40 กม.) ส่วนมากประกอบไปด้วยหินอัคนี ชั้นฐานของเปลือกโลกที่สัมผัสอยู่กับเปลือกโลกชั้นในนั้น เราสามารถจะศึกษาได้จากการเปลี่ยนความเร็วของคลื่นแผ่นดินไหวอย่างทันทีทันใด ณ ระดับนั้น (รูป 18.2 A) ระนาบที่เป็นรอยต่อระหว่างเปลือกโลกกับเปลือกชั้นในเราเรียกว่าระนาบโมโฮ (Moho) เป็นคำย่อจากชื่อ Mohorovičić ซึ่งเป็นชื่อของผู้ที่ค้นพบระนาบรอยต่อนี้

จากการศึกษาคลื่นแผ่นดินไหวสรุปได้ว่าเปลือกโลกมีอยู่สองชั้น (1) ชั้นล่างเป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยหินบะซอลติค (มาฟิค) (2) ชั้นบน เป็นชั้นของหินแกรนิติค (เฟลสิค) ซึ่งประกอบกันเป็นหินส่วนใหญ่ของตัวทวีป ชั้นแกรนิตจึงไม่ต่อเนื่องกันคือจะยุบหายไปบนพื้นสมุทร (ดูรูป 18.2 ในหน้า 33) ชั้นหินชั้นในทวีปซึ่งเป็นชั้นบาง ๆ ไม่ได้แสดงไว้ในภาพนี้ แม้ว่าบางแห่งนี้จะหนานับพันฟุตก็ตาม



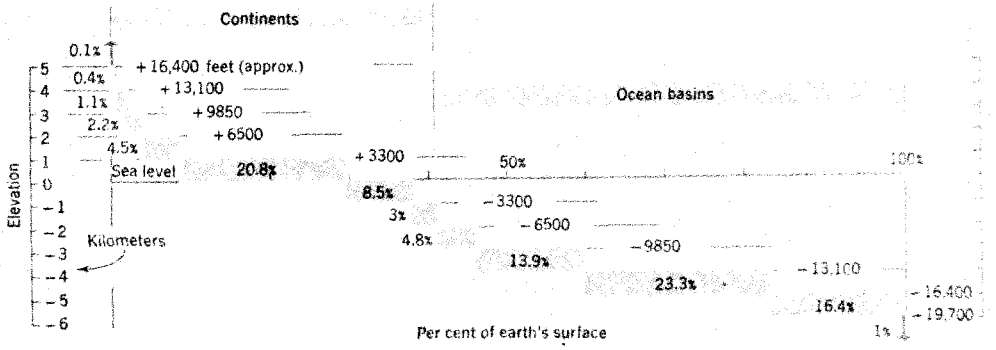
รูป 18.2 เปลือกโลกบริเวณตัวทวีปจะหนากว่าบริเวณมหาสมุทร

ส่วนของเปลือกโลกที่เป็นตัวทวีปจะหนากว่าส่วนของเปลือกโลกที่อยู่ใต้ท้องสมุทร จึงดูเหมือนว่าตัวทวีปเป็นภูเขาน้ำแข็งขนาดมหึมาลอยอยู่ในทะเล และมีบางส่วนเท่านั้นที่โผล่ขึ้นมาเหนือระดับน้ำทะเล ส่วนใหญ่จะจมอยู่ใต้ระดับน้ำทะเล หินคล้ายแก้วในเปลือกโลกชั้นในนั้นจะเคลื่อนที่อย่างเร็วทำให้แผ่นทวีปซึ่งเบากว่าค่อยๆ เคลื่อนที่ตามไปด้วยคล้าย ๆ กับภูเขาน้ำแข็งในทะเล

การกระจายของทวีปและแอ่งสมุทร

ลักษณะภูมิประเทศชั้นที่หนึ่ง (first-order relief- หมายถึง ทวีปกับมหาสมุทรโดยไม่คำนึงถึงภูมิประเทศอื่นที่อยู่ในทวีปและมหาสมุทร-ผู้แปล) เมื่อดูจากโลกจำลองหรือจากสมุดแผนที่ เราคำนวณได้ว่าโลกนั้นเป็นแผ่นดิน 29 เปอร์เซ็นต์ เป็นมหาสมุทร 71 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ถ้าระดับน้ำในทะเลลดระดับลงจะพบว่ามีแผ่นดินกว้างขวางวางตัวเรียงรายอยู่โดยรอบทวีป บริเวณที่เป็นทะเลน้ำตื้นนับตั้งแต่ชายฝั่งออกไปจนถึงบริเวณที่มีน้ำลึกไม่เกิน 600 ฟุต (180 ม.) บริเวณนี้เราเรียกว่าไหล่ทวีป (continental shelves) จากนั้นความลึกของทะเลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงพื้นสมุทรอาจมีความลึกหลายพันฟุต ถ้าระดับน้ำในมหาสมุทรลดลงไปราว 600 ฟุต (180 เมตร) พื้นที่ของทวีปจะเพิ่มขึ้นเป็น 35 เปอร์เซ็นต์ พื้นสมุทรจะลดลงเหลือเพียง 65 เปอร์เซ็นต์

จากรูป 18.3 แสดงการกระจายของพื้นที่ผิวโลกด้วยกราฟเปอร์เซ็นต์โดยอ้างอิงจากระดับความสูงทั้งที่อยู่เหนือและใต้ระดับน้ำทะเล โปรดสังเกตว่าพื้นดินเกือบทั้งหมดของทวีปมีระดับต่ำกว่า 3,300 ฟุต (1 กม.) เหนือระดับน้ำทะเล ระดับความสูงจาก—3,000 ถึง—10,000 ฟุต (—1 ถึง—3 กม.) จนถึงพื้นสมุทรนั้นจะลดระดับลงอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่ของพื้นสมุทรจะมีระดับลึก 10,000 และ 20,000 ฟุต (3 และ 6 กม.) ใต้ระดับน้ำทะเล ถ้าปราศจากความโค้งของผิวโลกแล้วเราจะมองเห็นตัวทวีปเหมือนกับการยกพื้นโดยยกสูงขึ้นจากพื้นสมุทรและพื้นสมุทรจะเป็นที่ราบกว้างใหญ่

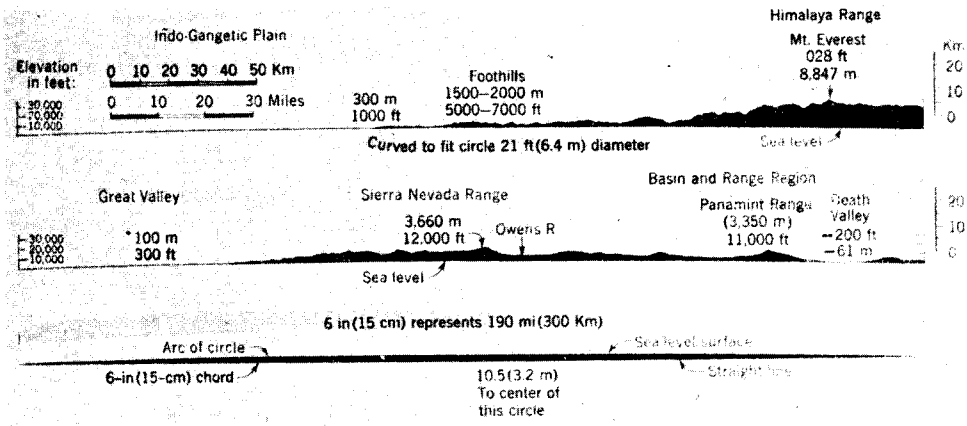


รูป 18.3 ปริมาณของผิวโลก (เป็นเปอร์เซ็นต์) ณ ระดับความสูงต่าง ๆ กัน

อัตราส่วนของภูมิประเทศของโลก

ก่อนที่จะกล่าวถึงลักษณะภูมิประเทศย่อยของทวีปและพื้นสมุทร ขอกล่าวถึงอัตราส่วนของลักษณะภูมิประเทศของโลกเปรียบเทียบกับทรงกลมโลก ลูกโลกจำลองที่แสดงลักษณะภูมิประเทศหรือแผนที่แสดงภูมิประเทศด้วยรูปภาพเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาโดยมีความคลาดเคลื่อนในแนวดิ่ง (vertical exaggeration — หมายถึงความคลาดเคลื่อนของภาพภูมิประเทศที่เกิดขึ้นจากมาตราส่วนในการย่อภาพภูมิประเทศในแนวราบไม่เท่ากับแนวดิ่ง ส่วนมากในแนวดิ่งจะมีมาตราส่วนใหญ่กว่ามาตราส่วนแนวราบ—ผู้แปล) เมื่อคำนวณมาตราส่วนได้ 1 : 2,000,000 เราสามารถเขียนวงกลมแทนภาพตัดด้านข้างของโลกด้วยความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 21 ฟุต (6.4 ม.) เส้นชอล์กซึ่งหนาเพียง 3/8 นิ้ว (0.15 ซม.) จะเป็นความหนาซึ่งไม่ใช่จะใช้แทนจุดสูงสุดของโลกเท่านั้น (ภูเขาเอฟเวอเรสต์สูง + 29,000 ฟุต หรือ + 8,840 ม.) แต่ยังรวมจุดที่ลึกที่สุดของร่องลึกก้นสมุทรด้วยซึ่งลึกถึง —35,000 ฟุต (—10,700 ม.)

รูป 18.4 แสดงให้เห็นภาพตัดตามยาว (profile) ที่แทนความโค้งที่แท้จริงตามมาตราส่วนที่คำนวณแล้ว ทำให้ได้ลูกโลกจำลองมีความยาว 21 ฟุต (6.4 ม.) ภาพตัดตามยาวของภูมิประเทศนั้นเขียนตามความเป็นจริงโดยไม่มีความคลาดเคลื่อนในทางดิ่ง แม้กระนั้นก็ตามลักษณะภูมิประเทศของเอเชียและอเมริกาเหนือที่แสดงนั้นยังดูเหมือนมีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของโลกจำลอง



รูป 18.4 ภาพตัดตามยาวตัดผ่านย่านที่มีความสูงมาก ๆ เปรียบเทียบกับระดับผิวโค้งของน้ำทะเลบนโลกจำลอง ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 21 ฟุต (6.4 ม.)

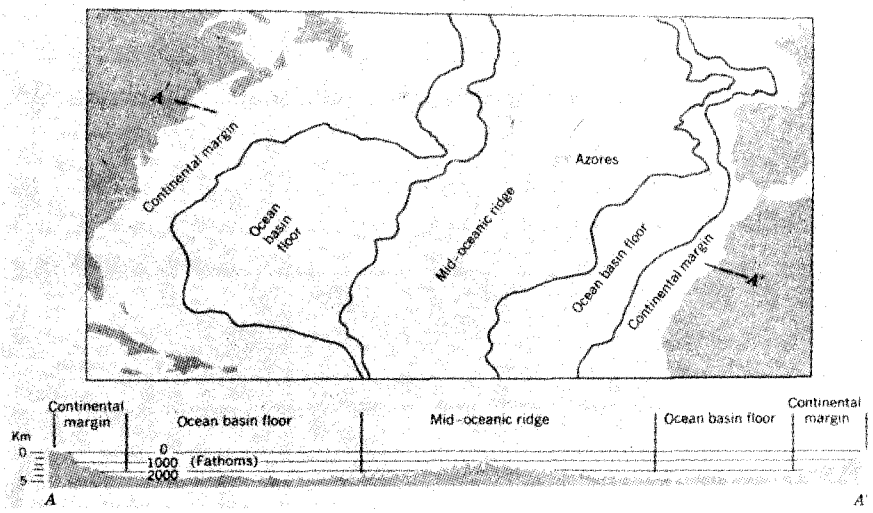
ลักษณะภูมิประเทศอันดับสองของพื้นสมุทร

ขอยกมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือเป็นตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นลักษณะภูมิประเทศชนิดต่างๆ ของพื้นมหาสมุทรที่อยู่โดยรอบตัวทวีป ลักษณะภูมิประเทศในมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ (1) ขอบทวีป

(2) แอ่งพื้นสมุทร

(3) สันเขากลางสมุทร (ดูรูป 18.5 ในหน้า 36) ลักษณะภูมิประเทศดังกล่าวมานี้เราเรียกว่า "ภูมิประเทศอันดับสอง" (second-order relief) ของเปลือกโลก

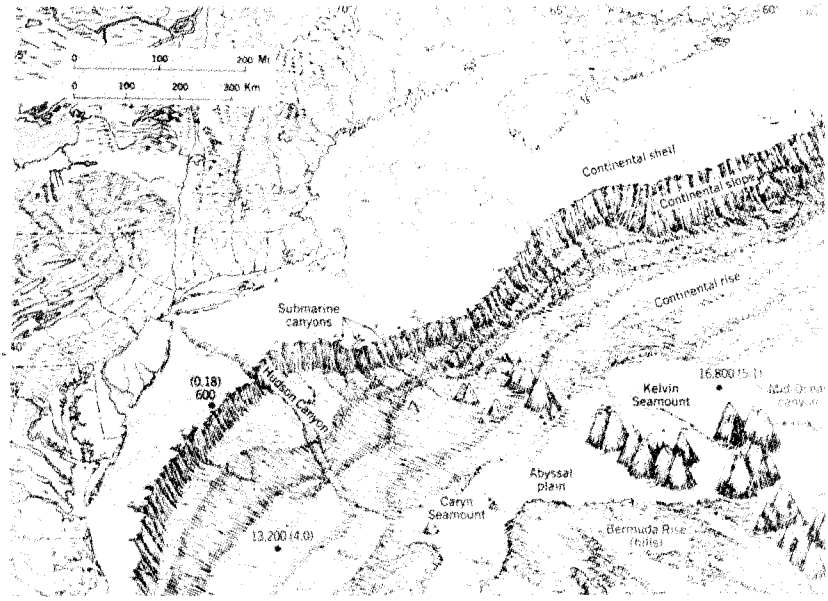
ตามขอบทางตะวันออกของทวีปอเมริกาเหนือเป็นบริเวณที่เรียกว่า "ไหล่ทวีป" เป็นพื้นลาดที่ราบเรียบกว้าง 75—100 ไมล์ (120—160 กิโลเมตร) ไปจนถึงระดับความลึก 600 ฟุต (180 ม.) ซึ่งเป็นขอบนอกสุดของไหล่ทวีป ไหล่ทวีปเป็นส่วนหนึ่งของขอบทวีป (continental margin) เป็นเขตที่ประกอบไปด้วยหินชั้นที่เกิดจากตะกอนซึ่งไหลมาจากภาคตะวันออกของสหรัฐ ฯ โดยกระแสน้ำเป็นตัวการพัดพามา และตะกอนจะถูกกระแสน้ำในมหาสมุทรพัดให้กระจายไปทั่วพื้นทะเล ณ ขอบนอกสุดของไหล่ทวีปพื้นสมุทรจะลดระดับลงอย่างรวดเร็ว เป็นเขตที่เรียกว่า"ลาดทวีป" (continental



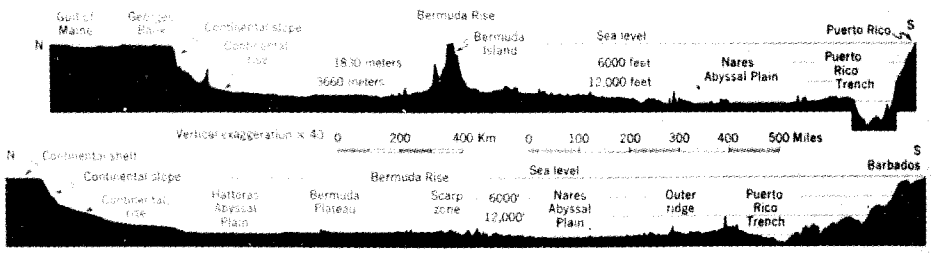
รูป 18.5 ภาพบนแสดงให้เห็นอาณาเขตต่าง ๆ ของแอ่งมหาสมุทรนอร์ต แอตแลนติก และภาพล่างแสดงให้เห็นภาพตัดตามยาวตั้งแต่ชายฝั่งนิวอิงแลนด์ไปจนถึงชายฝั่งแอฟริกา ภาพตัดความยาวนี้มีความผิดพลาดทางดิ่ง 40 เท่า

slope) จากนั้นพื้นลาดจะเอียงเล็กน้อยโดยมีระดับค่อย ๆ สูงขึ้นเราเรียกว่า "ลาดเนินชายฝั่งทวีป" (continental rise) พื้นลาดนี้จะมีระดับสูงขึ้นจนไปชนกับแอ่งพื้นสมุทร ณ ระดับความลึกประมาณ 12,000 ฟุต (3,700 ม.)

บริเวณไหล่ทวีปติดต่อกับลาดทวีปจะมีโกรกธารเกิดขึ้นเราเรียกว่า "หุบผาชันใต้สมุทร" (submarine canyon) ดูเหมือนว่าหุบผาชันนี้เกิดจากการกระทำของกระแสน้ำ คล้าย ๆ กับการไหลของน้ำโคลนซึ่งเราเรียกว่า "กระแสน้ำข้น" (turbidity current) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีพายุหรือแผ่นดินไหวทำให้ตะกอนที่ละเอียดอ่อนบริเวณไหล่ทวีปฟุ้งกระจายขึ้นมา กระแสน้ำนี้จะไหลลงไปตามลาดทวีปเพราะเป็นน้ำที่มีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำทะเลที่อยู่โดยรอบ เมื่อกระแสน้ำข้นกระจายไปสู่ที่ราบพื้นสมุทรแล้วจะเคลื่อนที่ช้าลงและตกตะกอนในที่สุด ตะกอนนี้จะกระจายเป็นบริเวณกว้างและสะสมกันอยู่เป็นเวลานับล้าน ๆ ปี โดยทับถมภูมิประเทศที่ขรุขระก้นสมุทรจนกลายเป็นที่ราบกว้างใหญ่เรียกว่า "ที่ราบใต้ท้องทะเลลึก" (abyssal plain) ดูรูป 18.7 วางตัวอยู่บนแอ่งพื้นสมุทร แอ่งกว้างของมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือที่เป็นที่ราบกว้างใหญ่ มีระดับความลึกประมาณ 18,000 ฟุต (5,500 ม.) บนพื้นเหล่านี้จะมีภูเขาตั้งตระหง่านอยู่เราเรียกว่า "ภูเขาใต้สมุทร" (submarine mountains) ภูเขาเหล่านี้จะกระจายอยู่ห่าง ๆ กันเรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า "ภูเขาทะเล" (sea mountains) บางลูกเป็นภูเขาไฟดึกดำบรรพ์ กลุ่มของภูเขาทะเลมีลักษณะดังที่แสดงไว้ในมุมล่างขวาของรูป 18.6



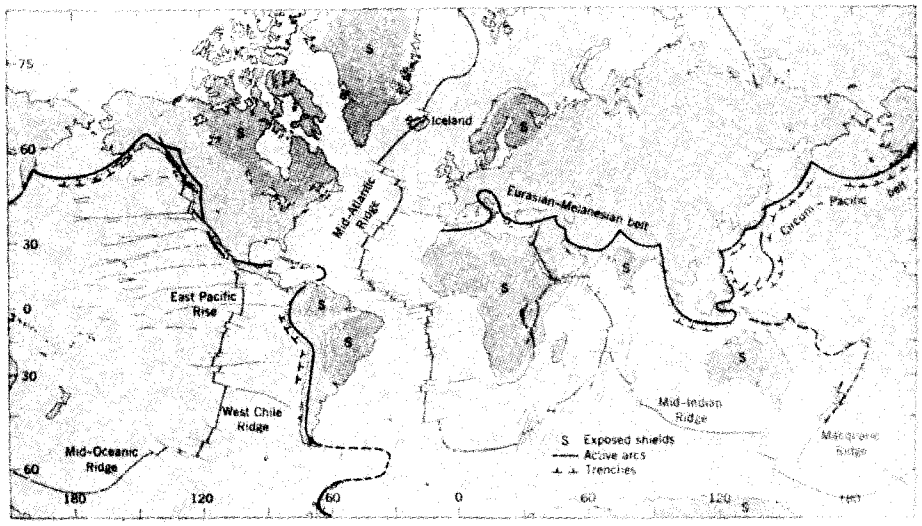
รูป 18.6 ลักษณะภูมิประเทศชายฝั่งสมุทรและแอ่งสมุทรของชายฝั่งทางตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกา ความลึกมีหน่วยเป็นฟุตและเป็นเมตรตามลำดับ



รูป 18.7 ภาพตัดตามยาวตัดข้ามแอ่งมหาสมุทรแอตแลนติก แสดงให้เห็นไหล่ทวีปและลาดทวีป พื้นราบขั้นบาดาล เหวทะเลและภูมิประเทศขนาดเล็กอื่น ๆ

ตามแนวกลางของมหาสมุทรแอตแลนติก มีเทือกเขาใต้สมุทรขนาดใหญ่วางตัวยาวต่อเนื่องกันไปเรียกว่า "สันเขากลางสมุทรแอตแลนติก" (Mid-Atlantic Ridge) เปรียบได้กับเทือกเขารอกกี้ทั้งขนาดและความสูง แต่สันเขากลางสมุทรแอตแลนติกนั้นจะจมอยู่ใต้ระดับน้ำเกือบหมด ยกเว้นเฉพาะบริเวณหมู่เกาะอะซอร์ส (Azores islands) สันเขานี้เป็นส่วนหนึ่งของสันเขากลาง

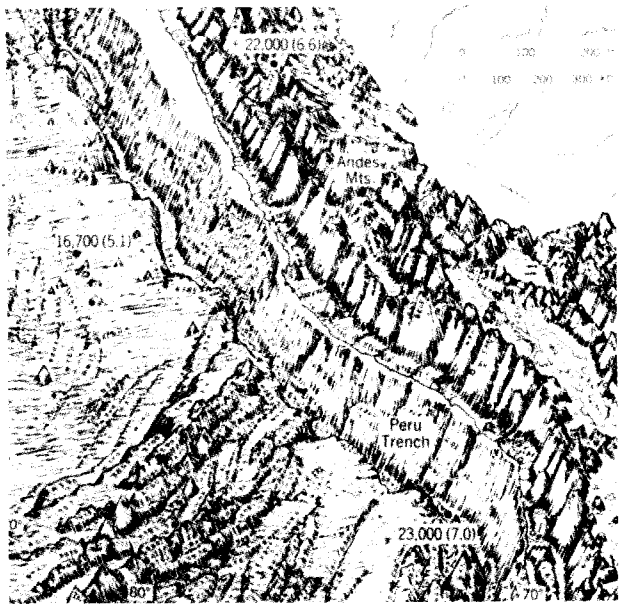
สมุทร (Mid-Oceanic Ridge) สันเขานี้จะยาวต่อเนื่องกันไปผ่านมหาสมุทรแอตแลนติกใต้ มหาสมุทรอินเดีย มหาสมุทรแปซิฟิกเหนือ มหาสมุทรแปซิฟิกใต้ และมหาสมุทรอาร์กติก มีการค้นพบว่าใต้ท้องสมุทรมีรอยแยกขนาดใหญ่ต่อเนื่องกันเป็นระบบของรอยแยก (ดูรูป 18.8) เปลือกโลกใต้ท้อง



รูป 18.8 ระบบทิวเขากลางสมุทร (เส้นทึบ) และเขตรอยแยก (เส้นบาง) ที่ต่อเนื่องกัน

สมุทรกำลังอยู่ในกระบวนการดึงแยกตามแนวสันเขาใต้สมุทร เป็นเหตุให้เกิดหุบเขาแขวน (rift valleys) วางตัวบริเวณกึ่งกลางของสันเขาใต้สมุทร (ดูภาพตัดตามยาวในรูป 18.5 ในหน้า 36) ขณะเดียวกัน เปลือกโลกชั้นในจะถูกดันให้มีระดับสูงขึ้นมาด้วย หลักฐานที่สนับสนุนการแยกตัวของเปลือกโลกบริเวณสันเขากลางสมุทรได้มาจากการศึกษาคุณสมบัติของอำนาจแม่เหล็กในหินบะซอลต์ในบริเวณที่ติดกับสันเขากลางสมุทร อัตราการแยกของเปลือกโลกในมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือประมาณกันว่ามีค่า 0.8 นิ้ว (2 ซม.) ต่อปี (ดูรูป 18.8)

ลักษณะภูมิประเทศอีกอย่างหนึ่งของพื้นสมุทร คือ "เหวทะเล" (trenches or foredeeps) เป็นร่องลึกยาวแต่แคบ ก้นเหวทะเลอาจลึกถึง 24,000 — 30,000 ฟุต (7,500 — 10,000 เมตร) หรือมากกว่านี้ (ดูรูป 18.7 และ 18.9) เหวทะเลนั้นจะเกิดสัมพันธ์กับการสร้างภูเขาในยุคปัจจุบัน การทับถมของตะกอนในก้นเหวทะเลนั้นเป็นไปได้ช้ามาก แอ่งน้ำจึงไม่ใคร่มีอะไรตกลงไปเหมือนกับแอ่งหรือเหวที่อยู่บนทวีป

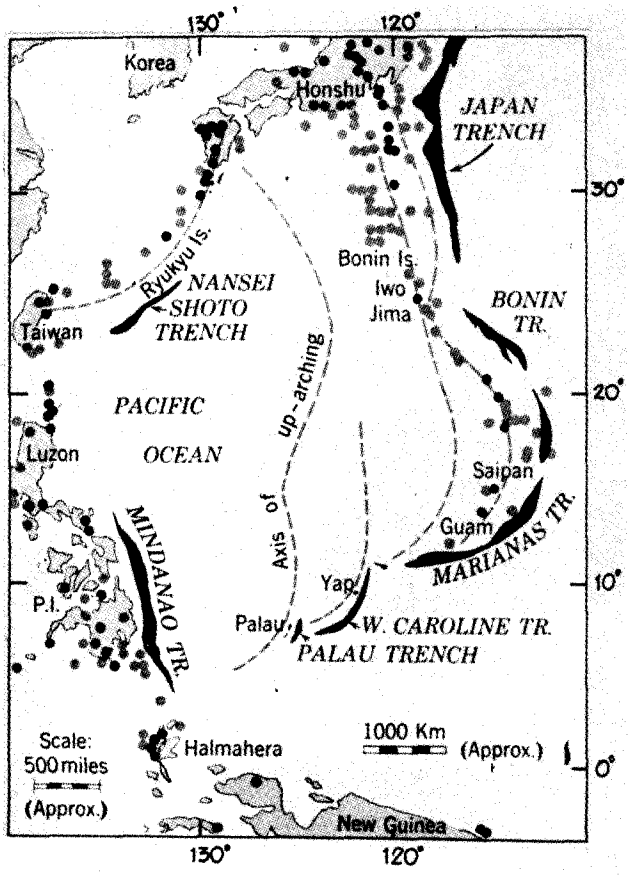


รูป 18.9 เหวทะเลเปรู–ชิลี ซึ่งอยู่ตามชายฝั่งของอเมริกาใต้

การเกิดภูเขาในยุคปัจจุบันจะเกิดใกล้กับขอบของแอ่งสมุทร โดยวางตัวเป็นแนวโค้งเรียกว่า "แนวเกาะโค้ง" (island arcs) ดังรูป 18.10 ในหน้า 40 แต่ละแนวแสดงให้เห็นการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกและสัมพันธ์กับแนวภูเขาไฟที่คุกรุ่นอยู่และแนวแผ่นดินไหว เหวทะเลที่ลึกมาก ๆ จะวางตัวตามแนวด้านนอกของแนวเกาะโค้ง

ลักษณะภูมิประเทศอันดับสองของทวีป

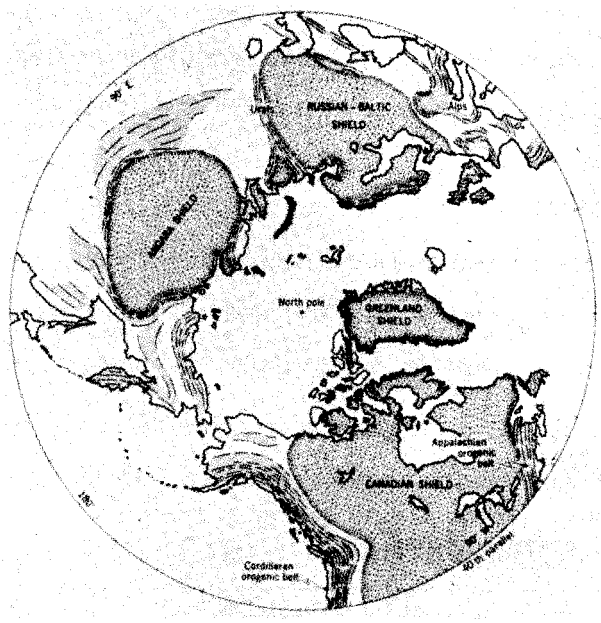
เราสามารถจำแนกลักษณะภูมิประเทศบนทวีป เป็นภูมิประเทศอันดับที่สองได้เช่นเดียวกับมหาสมุทร ลักษณะภูมิประเทศบนทวีปเมื่อจำแนกตามลักษณะทางธรณีวิทยาจะจำแนกได้เป็น (1) หินฐานธรณี (shield) (2) แนวภูเขา (mountain belts or orogenic belts) หินฐานธรณีเป็นแผ่นดินใจกลางของเปลือกโลกส่วนที่เป็นทวีปและประกอบด้วยหินดึกดำบรรพ์ หินฐานธรณีมีอายุอยู่ในยุคพรีแคมเบรียน คือมีอายุมากกว่า 600 ล้านปี ส่วนใหญ่จะมีอายุมากกว่าหนึ่งพันล้านปี บางบริเวณมีอายุถึง $3\frac{1}{2}$ พันล้านปี การเกิดภูเขาในยุคต่าง ๆ มีผลกระทบต่อหินฐานธรณียุคพรีแคมเบรียน ทำให้หินชั้นดึกดำบรรพ์เกิดการแปรสภาพ เช่นเดียวกับที่เกิดจากหินแกรนิตชนิดเย็นตัวภายในในรูปของบั้นหินอัคนี (batholiths) เทือกเขาสำคัญ ๆ ในโลกที่เกิดในช่วงต่าง ๆ ของยุคพรีแคมเบรียนถูก



รูป 18.10 แผนที่แสดงส่วนทางตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิก แสดงให้เห็นเหวทะเล (เส้นดำทึบ) แนวหมู่เกาะ (เส้นประ) ภูเขาไฟที่ยังคุกรุ่นอยู่ (จุดดำ) และโฟกัสแผ่นดินไหวระดับลึก (จุดจางกว่าจุดดำ)

กัดกร่อนพัดพา (erosion) จนมีระดับต่ำลงจนถึงเชิงเขา ทำให้ตัวทวีปเป็นที่ราบที่เกือบไม่มีความต่างระดับเลย หินฐานธรณีจึงมีลักษณะเป็นที่ราบหรือที่ราบสูง ๆ ต่ำ ๆ เป็นบริเวณที่มีความมั่นคงมากที่สุดของเปลือกโลก

การเคลื่อนไหวของเปลือกโลกบริเวณหินฐานธรณีในยุคดึกดำบรรพ์เป็นการเคลื่อนไหวที่เราเรียกว่า "กระบวนการสร้างทวีป" (epeirogenic – อ่านว่า ไพโรเจนิค – ผู้แปล) เป็นการยกตัวหรือจมตัวของเปลือกโลกเป็นบริเวณกว้างโดยที่หินไม่มีการหักหรือโค้งงอเกิดขึ้นเลย กระบวนการสร้างทวีปเป็นผลให้เปลือกโลกมั่นคง ตรงข้ามกับกระบวนการสร้างภูเขา (orogenic) ซึ่งทำให้เปลือกโลกได้รับแรงอัดแรงดึงเป็นผลให้เป็นเขตที่ไม่มั่นคง (รูป 18.11)



รูป 18.11 หินฐานธรณีซึ่งมีแนวเทือกเขาเป็นอาณาเขต (เส้นประ) เกิดในยุคพาลีโอโซอิก และอายุน้อยกว่าบริเวณหินฐานธรณีนั้น รวมทั้งบริเวณที่มีหินชั้นปกคลุมอยู่ด้วย

เมื่อกระบวนการเกิดทวีปมีลักษณะไปในทางลบหรือชนิดจมตัวลง ทำให้ส่วนใหญ่ของหินฐานธรณีจมลงใต้ระดับน้ำทะเล กลายเป็นส่วนของทะเลตื้นและไหล่ทวีป ส่วนนี้เป็นแหล่งกำเนิดของหินชั้นที่วางตัวอยู่บนหินแปรหรือหินแกรนิตดึกดำบรรพ์ ในกรณีที่กระบวนการมีลักษณะไปในทางบวกหรือการยกตัวขึ้น กระบวนการสร้างทวีปจะช่วยยกให้หินชั้นสูงขึ้นมาเหนือระดับน้ำทะเล ต่อมาแผ่นดินนั้นจะถูกกัดกร่อนพัดพาโดยร่องน้ำเป็นเนินเขาและที่ราบสูง

หินฐานธรณีในซีกโลกเหนือดังที่แสดงในรูป 18.11 แผ่นดินใจกลางทวีปอเมริกาเหนือ คือ หินฐานธรณีแคนาเดียน (Canadian shield) ในทวีปยุโรป คือ หินฐานธรณีรุสเซียน (Russian shield) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า หินฐานธรณีเฟนโน–สแกนเดียน (Fenno-Scandian shield) หินทั้งสองบริเวณนี้มีอายุเก่าแก่ที่สุดในช่วงระยะเวลาทางธรณีวิทยา มีอายุระหว่าง 1–3 พันล้านปี ในซีกโลกใต้ มีหินฐานธรณีลักษณะคล้าย ๆ กันนี้ในออสเตรเลีย แอฟริกาใต้และแอนตาร์กติก (ดูรูป 18.8 ในหน้า 38)

แนวภูเขาของตัวทวีปเป็นแนวเขตภูเขาแคบ ๆ ตามแนวที่เปลือกโลกถูกอัด และดันให้เป็นรอยโค้งและขณะเดียวกันก็มีระดับความสูงเพิ่มขึ้นด้วย

ภูเขาที่มีอายุมากและหมดพลังแล้วจะมีลักษณะภูมิประเทศขรุขระ และมีความสูงปานกลาง ในบางแห่งลดระดับลงจนเป็นเนินเขา (hill) ไปก็มี ภูเขาที่มีอายุน้อยซึ่งมีอยู่หลายบริเวณ เป็นบริเวณที่เปลือกโลกยังมีการเคลื่อนไหวและเป็นเขตภูเขาไฟ ภูเขาจะสูงมาก

มาตราเวลาเชิงธรณีวิทยา

การอธิบายถึงวิวัฒนาการของลักษณะภูมิประเทศบนทวีปจำเป็นต้องอ้างอิงกับปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยาในอดีต นักภูมิศาสตร์สนใจในเรื่องการเกิดและการกระจายของสินแร่และแร่เชื้อเพลิง ซึ่งจะช่วยให้มีความรู้เกี่ยวกับธรณีประวัติ ซึ่งจะเป็นผลให้ทราบแหล่งแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจในส่วนต่าง ๆ ของโลก

ตารางที่ 18.1 แสดงให้เห็นช่วงเวลาสำคัญ ๆ และการแบ่งย่อยช่วงเวลาทางธรณีวิทยา

ตารางที่ 18.1 มาตราเวลาเชิงธรณีวิทยา

มหายุค (Era)	ยุค (Period)	ช่วงเวลา (ล้านปี)	อายุ (ล้านปี)	กระบวนการสร้างภูเขา
ซีโนโซอิก (Cenozoic)	ควาเตอร์นารี (Quaternary)	2.5	2.5	คาสคาเดียน (Cascadian)
	เทอร์เชียรี (Tertiary)	62.5	65	
มีโซโซอิก (Mesozoic)	ครีเตเชียส (Cretaceous)	71	136	ลาราเมียน (Laramian)
	ยูแรสสิก (Jurassic)	54	190	เนวาเดียน (Nevadian)
	ไทรแอสสิก (Triassic)	35	225	
พาลีโอโซอิก (Paleozoic)	เปอร์เมียน (Permian)	55	280	แอปปาเลเชียน (Appalachian)
	คาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) เพนซิลเวเนียน	45	325	
	มิสซิสซิปเปียน	20	345	อาคาเดียน (Acadian)
	ดีโวเนียน (Devonian)	50	395	คาลีโดเนียน (Caledonian)
	ไซลูเรียน (Silurian)	35	430	ทาโคเนียน (Taconian)
	ออร์โดวิเชียน (Ordovician)	70	500	
	แคมเบรียน (Cambrian)	70	570	

		ช่วงเวลา (พันล้านปี)	อายุ (พันล้านปี)	
	พรีแคมเบรียนตอนปลาย	0.3—0.4		
ก่อนแคมเบรียน			0.9—1.0	เกรนวิลล์ (Grenville)
(Precambrian)	พรีแคมเบรียนตอนกลาง	0.6—0.8	1.6—1.7	ฮัดโซเนียน (Hudsonian)
หรือโปรโตโซอิก-		0.7—0.9	2.4—2.5	เคโนราน (Kenoran)
(Protozoic)	พรีแคมเบรียนตอนต้น	0.9—1.0		
.....	หินที่มีอายุมาก		3.4±0.1	เคโนราน (Kenoran)
.....	โลกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์	4.6—4.7		
.....	อายุของจักรวาล	18—19		

อายุที่กำหนดขึ้นในตารางนี้ได้มาจากการวิเคราะห์แร่กัมมันตภาพรังสี และโดยทั่วไปก็เป็นที่ยอมรับของนักธรณีวิทยา แต่เวลาที่กำหนดไว้นี้อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ในทุก ๆ ช่วงเวลาเชิงธรณีวิทยา จะมีหินชั้นเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้าง หินชั้นจะเป็นสิ่งที่บันทึกปรากฏการณ์ในยุคดึกดำบรรพ์และภาวะแวดล้อมเอาไว้ในลักษณะของซากพืชซากสัตว์ที่ฝังจมอยู่ในหินชั้น

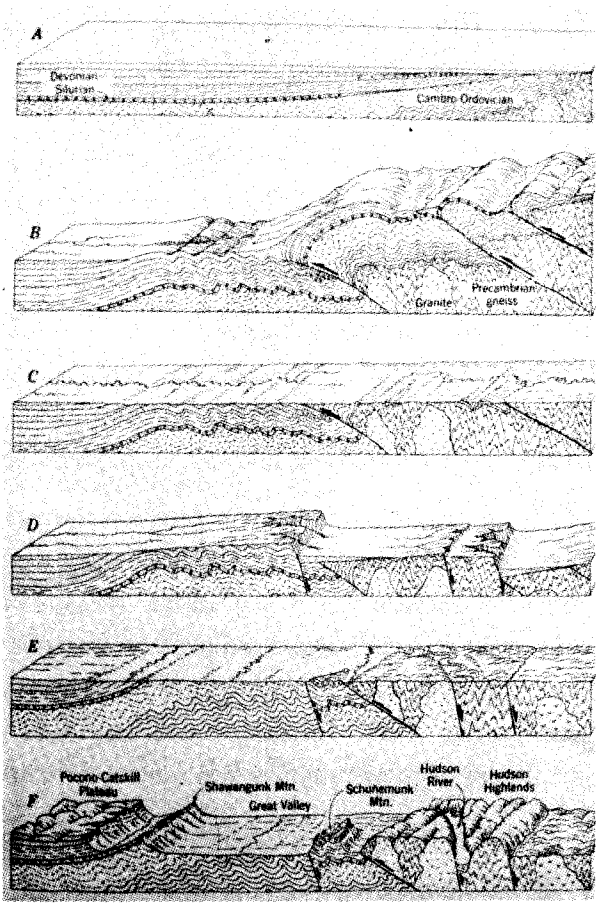
กล่าวโดยทั่วไปแล้วหน่วยเวลาสำคัญ ๆ จะสัมพันธ์ใกล้ชิดกับกระบวนการเกิดภูเขา เรียกว่า "กระบวนการพลิกแผ่นดิน" (revolution) จะทำให้กระบวนการตกตะกอนที่เกิดอย่างต่อเนื่องนั้นถูกรบกวน หน่วยเวลาที่ยาวที่สุดคือมหายุค (Era) ซึ่งมีสามมหายุคคือซีโนโซอิก มีโซโซอิกและพาลีโอโซอิก ช่วงเวลาทั้งหมดก่อนที่จะกำหนดมหายุคนี้ขึ้นมาเรียกว่า ก่อนแคมเบรียน (precambrian) ในยุคนี้หลักฐานการกำหนดเวลายังมีไม่มากพอที่จะกำหนดเวลาเป็นช่วง ๆ ได้ ช่วงเวลาหน่วยที่สองคือ "ยุค" (period) มหายุคพาลีโอโซอิกแบ่งเป็นเจ็ดยุคโดยยุคคาร์บอนิเฟอรัสยังแบ่งเป็นยุคเพนซิลเวเนียนและมิสซิสซิปเปียน มหายุคมีโซโซอิกมีสามยุคและซีโนโซอิกมีสองยุค

ตัวอย่างการเคลื่อนไหวของเปลือกโลก–แอปปาเลเชียน

จากการศึกษาธรณีประวัติของเทือกเขาในบริเวณใดบริเวณหนึ่งโดยเฉพาะ เราสามารถจะเรียนรู้ถึงลำดับเหตุการณ์ทางธรณีวิทยาโดยทั่วไปในบริเวณนั้นได้ ซึ่งอาจจะเกิดซ้ำกันมาแล้วหลายครั้งในช่วงเวลาในอดีต ไดอะแกรมในรูป 18.12 หน้า 44 ใช้แทนเหตุการณ์ที่วิวัฒนาการขึ้นในหุบเขายัดสัน ตลอดมหายุคพาลีโอโซอิก มีโซโซอิกและซีโนโซอิก เป็นเวลามากกว่า 600 ล้านปี

ในบล็อค A แสดงให้เห็นบริเวณนั้นขณะเป็นท้องทะเลในมหายุคพาลีโอโซอิก มีชั้นหินหนานับพันฟุตสะสมตัวอยู่ ถ้าการตกตะกอนลักษณะเช่นนี้เกิดในแอ่งน้ำบนแผ่นดินที่อยู่ไกลชายฝั่งทะเลเรียกว่า "แอ่งแผ่นดินกระทะหงาย" (geosyncline) ต้นกำเนิดของตะกอนมาจากแนวเกาะภูเขาไฟทางตะวันออก มหายุคพาลีโอโซอิกนั้นสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการเกิดภูเขาคือ การเกิดภูเขาแอปปาเลเชียน ชั้นหินชั้นชายฝั่งทะเลจะถูกยกตัวขึ้นขณะเดียวกันก็เกิดการหัก บางส่วนจึงเลื่อนตัวไปทับบนอีกส่วนหนึ่ง (บล็อค B) จะเกิดขึ้นในบริเวณที่เคยเป็นทะเลมาก่อน การบิดงอของชั้นหินโดยทั่วไปเรียกว่า "การโค้งตัว" (folding) ผิวดินบริเวณหนึ่งเลื่อนตัวไปทับอีกบริเวณหนึ่งเราเรียก

ว่ารอยเลื่อนไถลทับ (overthrust faults) กระบวนการนี้เราเรียกว่า การเลื่อนไถลทับ (overthrusting) ตัวการกัดกร่อนผิวโลกจะกัดกร่อนภูเขากำเนิด (inital mountain) ตั้งแต่ช่วงเวลาที่แผ่นดินบริเวณนั้นเริ่มโค้งตัวหรือเลื่อนตัวขึ้นมา



รูป 18.12 ลำดับขั้นของปรากฏการณ์ซึ่งเกิดซ้ำบนพื้นทวีปตลอดช่วงเวลาทางธรณีวิทยา ภาพนี้แสดงให้เห็นพื้นที่บริเวณหุบเขาอัดสันในไดอะแกรมนี้ ด้านตะวันตกเฉียงเหนือจะอยู่ทางซ้าย ตะวันออกเฉียงใต้อยู่ทางขวา รูป A การทับถมของตะกอนในเขตน้ำตื้นติดตัวทวีปในมหายุคพาลีโอโซอิก ทำให้เกิดหินชั้นหนานับพันฟุต รูป B กระบวนการสร้างภูเขาในตอนปลายมหายุคพาลีโอโซอิก ทำให้เกิดรอยต่อโค้งและรอยเลื่อน รอยเลื่อนย้อนทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่ยกตัวสูงขึ้นกว่าระดับน้ำทะเล รูป C เมื่อผ่านวัฏจักรการกัดกร่อนมาก็เข้าสู่สภาวะพื้นที่เกือบราบ รูป D การเลื่อนตัวในยุคไทรแอสสิก ทำให้เกิดภูเขาบล็อคเอียงลาด รูป E การสึกกร่อนในวัฏจักร ต่อมาทำให้เกิดพื้นที่เกือบราบขึ้นอีก รูป F เป็นลักษณะภูมิประเทศในปัจจุบันซึ่งพื้นที่มีความต่างระดับอยู่มาก

หลังจากที่ภูเขาแอปปาเลเชียนเกิดขึ้นมาและมั่นคงมาเป็นเวลาหลายล้านปี ภูเขาก็เริ่มถูกกัดกร่อนให้ต่ำลงด้วยกระบวนการกัดกร่อนผิวดิน จนระดับความสูงลดลงจนมีสภาพเป็นพื้นที่เกือบราบ (peneplain) ซึ่งแสดงอยู่ในบล็อก C ให้สังเกตว่าหินเก่าที่สุดเป็นหินไนส์ยุคพรีแคมเบรียนจะโผล่อยู่บริเวณแกนของแนวภูเขา ขณะที่หินชั้นซึ่งมีอายุน้อยที่สุดของมหายุคพาลีโอโซอิกจะอยู่ในเขตที่ได้รับการกระทบกระเทือนน้อยซึ่งอยู่ทางซ้ายสุดของไดอะแกรม

ในบล็อก D แสดงให้เห็นการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกอีกครั้งหนึ่งแต่ไม่รุนแรงเหมือนครั้งแรก เราเรียกการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกครั้งนี้ว่า "การไหวตัวพาลิซาเดียน" (palisadian disturbance) ซึ่งเริ่มต้นเคลื่อนไหวในยุคไทรแอสสิก ทำให้พื้นที่บริเวณนั้นแตกออกเป็นส่วนๆ แต่ละส่วนจะเอียงเข้าหาส่วนที่อยู่ถัดไป รอยแตกนี้เป็นรอยแตกชนิดรอยเลื่อน แต่แตกต่างไปจากรอย

เลื่อนไถลทับตรงที่ว่าการเลื่อนนี้เกือบอยู่ในแนวดิ่ง และไม่มีแรงอัดมากระทำต่อผิวโลกแต่อย่างใด เราเรียกการเลื่อนแบบนี้ว่า "การเลื่อนเป็นบล็อค" (block faulting) พื้นที่เกือบราบที่เกิดมาก่อนทำให้แผ่นดินระหว่างรอยเลื่อนมีลักษณะเป็นพื้นลาดเรียบเอียงไปทางหนึ่ง

ในบล็อก E บริเวณนี้มีระดับลดลงอีกครั้งหนึ่ง เพื่อกลับไปสู่พื้นผิวเกือบราบอันเป็นสภาวะที่พื้นผิวบริเวณนี้เกิดความมั่นคงตลอดช่วงยุคไทรแอสสิก หินแข็งต่าง ๆ เช่นไนส์ แกรนิต หินกรวดมนและหินทรายจะคงเป็นเนินเขาตั้งอยู่ในพื้นที่ราบซึ่งมีชั้นหินดินดานอยู่เบื้องล่าง

ต่อมาพื้นที่บริเวณนี้เกิดการเคลื่อนไหวขึ้นอีกครั้งหนึ่ง มีธรรมชาติคล้ายกับกระบวนการสร้างทวีปเป็นการยกตัวขึ้นหรือทรุดตัวลงอย่างธรรมดา ๆ ไม่มีการเลื่อนตัวหรือการโค้งตัวเกิดขึ้น เนื่องจากพื้นที่เกือบราบในบล็อก E ได้ยกตัวขึ้นเกือบ 2,000 ฟุต (600 ม.) ลำน้ำและตัวการกัดกร่อนจึงเริ่มต้นทำงานอีกครั้งหนึ่ง และกัดกร่อนบริเวณหินที่อ่อนให้กลายเป็นหุบเขา ส่วนหินแข็ง เช่นหินทราย หินกรวดมน แกรนิตและไนส์จะคงความสูงอยู่ในสภาพของสันเขาและมวลภูเขาดังแสดงในบล็อค F ซึ่งเป็นลักษณะภูมิประเทศในปัจจุบัน ลักษณะภูมิประเทศในปัจจุบันนี้เป็นผลจากความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนพื้นผิว เนื่องจากหินบริเวณนั้นมีลักษณะโครงสร้างสลับซับซ้อนซึ่งเคยผ่านการเปลี่ยนแปลงมาแล้วตลอดระยะเวลาทางธรณีวิทยา

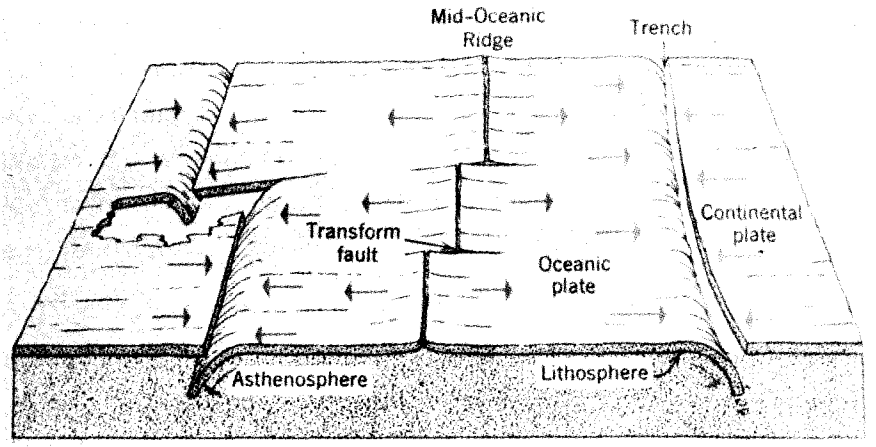
กระบวนการแปรโครงสร้างแบบแผ่นและการเลื่อนลอยของทวีป

กระบวนการสร้างภูเขาสำคัญ ๆ เช่นเทือกเขาแอปปาเลเชียน เทือกเขาแอลป์ หรือเทือกเขาแอนดิส ต้องใช้กำลังมหาศาลจึงจะทำให้เปลือกโลกส่วนนั้นเคลื่อนไหวได้ ในปัจจุบันนี้นักธรณีวิทยาและนักฟิสิกส์ได้ให้ความสนใจในการศึกษาเปลือกโลกชั้นในที่อยู่ใต้ระนาบโมโฮ หลักฐานจากการศึกษาคลื่นแผ่นดินไหวทำให้มีเหตุผลพอที่จะสรุปได้ว่า ตอนบนของเปลือกโลกชั้นในนั้นเป็นชั้นอ่อน (soft layer) มีความแข็งน้อย (ดูรูป 18.2 ในหน้า 33) สภาวะความอ่อนนิ่มนี้อยู่ในระดับความลึกประมาณ 40 ไมล์ (60 กม.) ความแข็งจะค่อย ๆ ลดลงตามความลึกและจะมีค่าต่ำสุด ณ เขตที่อยู่ในความลึก 125 ไมล์ (200 กม.) ใต้เขตนี้ลงไปความแข็งจะเพิ่มขึ้น การสูญเสียความแข็งในเขตอ่อนนิ่มนี้อาจจะเป็นสาเหตุทำให้มีการสะสมความร้อนจากกัมมันตภาพรังสีเกิดขึ้น ทำให้อุณหภูมิในหินของเปลือกโลกชั้นในสูงขึ้นเกือบถึงจุดหลอมเหลว เช่นเดียวกับเหล็กในเตาถลุง หินที่ร้อนจัดเหล่านี้จะสูญเสียความแข็งไปและสามารถเคลื่อนที่ได้ช้า ๆ โดยการไหลไปสู่บริเวณที่มีแรงเค้น (stresses) ไม่เท่ากัน

เปลือกโลกรวมกับส่วนบนสุดของเปลือกโลกชั้นในเป็นส่วนที่แข็ง ไม่ยืดหยุ่นเราเรียกว่า "ธรณีภาค" (lithosphere) ใต้ชั้นธรณีภาคเป็นชั้นที่อ่อนนิ่มเรียกว่า "ภาคกึ่งเหลว" (asthenosphere) โปรดจำไว้ว่าชั้นเปลือกโลกสองชั้นนี้เราแบ่งตามความแข็ง ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจการแตกแยกของเปลือกโลกตามแนวสันเขากลางสมุทรมาก

การแตกและการบิดงอของหินเปลือกโลกนั้นเราเรียกรวมกันว่า "กระบวนการแปรโครงสร้าง" (tectonic activity) การศึกษาพฤติกรรมและโครงสร้างที่เกิดจากกระบวนการนี้เราเรียกว่า "การแปรโครงสร้าง" (tectonic) ย้อนกลับไปดูลักษณะโดยทั่วไปในระบบการแปรโครงสร้างของโลกในชั้นธรณีภาคหรือชั้นเปลือกโลกซึ่งแข็งและแตกหักได้โดยการเคลื่อนที่ไปบนชั้นกึ่งเหลว เนื่องจากแรงชนิดหนึ่งที่เรายังเรียนรู้ได้น้อยมาก

ในราวสองทศวรรษที่ผ่านมานี้ ได้มีการสำรวจพื้นสมุทรและเปลือกโลกบริเวณพื้นสมุทร พบหลักฐานว่าชั้นธรณีภาคนี้เคลื่อนตัวไปได้อย่างมหาศาล หลักฐานที่ค้นพบใหม่นี้ทำให้มีการปรับปรุงทฤษฎีต่าง ๆ ทางธรณีวิทยาเป็นทฤษฎีว่าด้วยกระบวนการธรณีวิทยาขนาดใหญ่ (large-scale geological process) หลังสงครามโลกครั้งที่สองเพียงเล็กน้อยได้มีการพบสันเขากลางสมุทร หลังจากนั้นในราวปี 1960 พบหลักฐานว่ามีรอยแยกอยู่กลางสันเขากลางสมุทร การวิจัยในระยะต่อมาทำให้สรุปเป็น "ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแบบแผ่น" (plate tectonic) ดังแสดงในภาพ 18.13 เปลือกโลกทั้งหมดรอบโลกนี้ ถูกแบ่งออกเป็น "แผ่นเปลือกโลก" (lithospheric plate) ซึ่งมีแผ่นสำคัญ ๆ อยู่หกแผ่นและมีแผ่นเล็ก ๆ แทรกตัวอยู่ภายในหรือระหว่างแผ่นใหญ่ ๆ อีกหลายแผ่น สันเขากลางสมุทรนั้นเป็นเขตรอยแยกของแต่ละแผ่นซึ่งจะเคลื่อนที่ห่างออกจากกัน แผ่นเปลือกโลกจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ไปบนชั้นอ่อนนิ่มของเปลือกโลกชั้นใน มีลักษณะคล้าย ๆ การเคลื่อนที่ของคราบน้ำนมที่เคลื่อนที่ไปบนน้ำนมอุ่น ๆ ในบริเวณที่แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่เข้าหากัน มันจะเคลื่อนที่เข้าชนกันและแผ่นหนึ่งในสองแผ่นนั้นจะโค้งลง แล้วเคลื่อนตัวไปใต้อีกแผ่นหนึ่ง ดังรูป 18.13 การจมตัวของแผ่นเปลือกโลกไปสู่ชั้นเปลือกโลกชั้นในเราเรียกว่า "การจมมุด" (subduction) เขตที่แผ่นเปลือกโลกชนกันจะเป็นแนวเกิดภูเขา (orogenic belt)

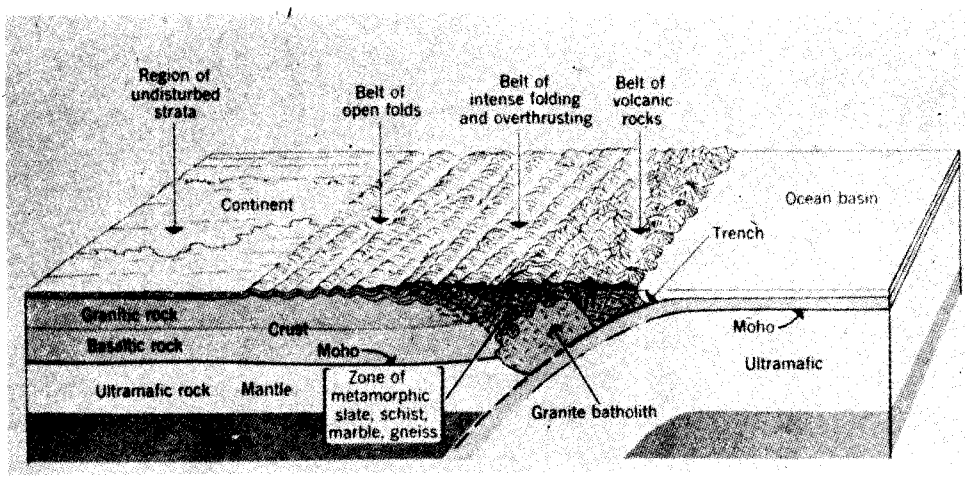


รูป 18.13 ไดอะแกรมแสดงลักษณะสำคัญของการแปรโครงสร้างแบบแผ่น ภาพนี้ไม่คำนึงถึงความโค้งของผิวโลก

จากรูป 18.14 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างแนวเกิดภูเขาดังเช่นเทือกเขาแอปปาเลเชียนและเขตการจมมุดที่อยู่ข้างล่าง ขณะที่แผ่นเปลือกโลกแผ่นหนึ่งเคลื่อนที่ไปข้างล่างก็จะไปชนกับขอบของแผ่นที่อยู่ตรงข้าม หินชั้นในแผ่นดินโค้งกระทะหงายจะถูกบีบและแปรสภาพ ในระดับความลึกมาก ๆ หินชั้นจะหลอมเหลวกลายเป็นหินหนืดและกลายเป็นปื้นหินอัคนีในแกนของแนวภูเขา

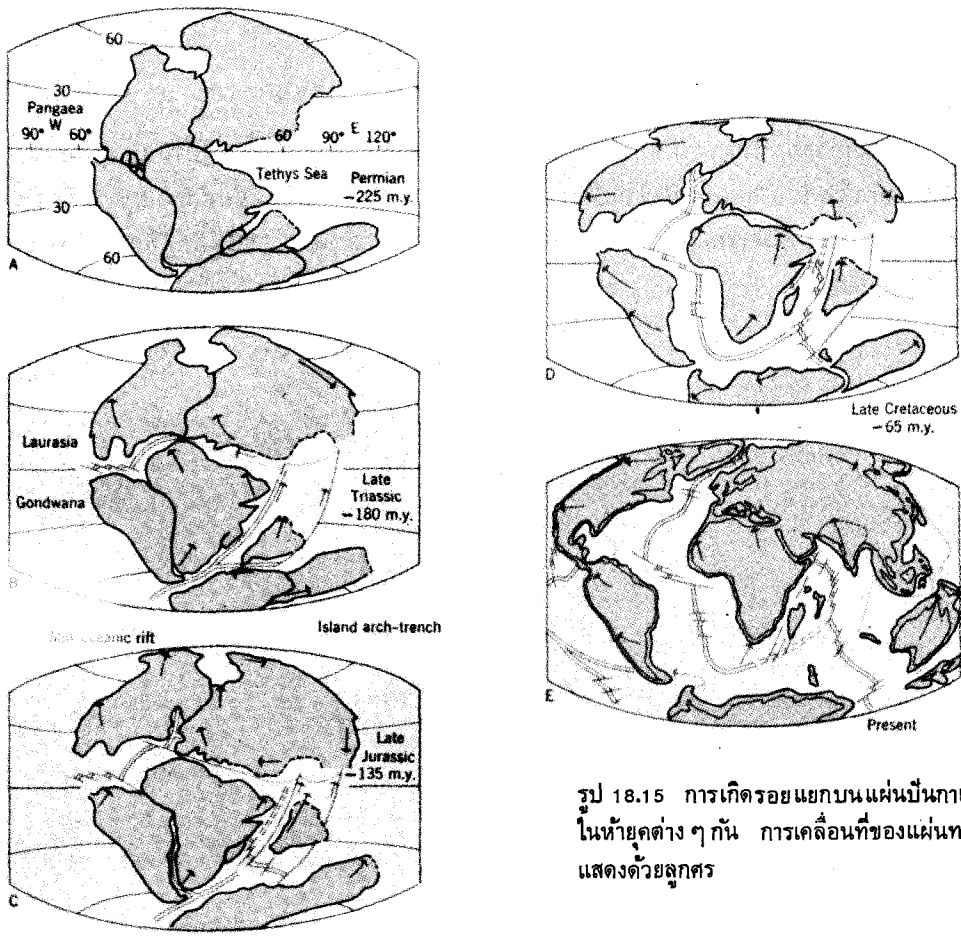
ตลอดช่วงเวลาทางธรณีวิทยาแผ่นเปลือกโลกจะลอยห่างกันไปเรื่อย ๆ พื้นที่อันกว้างใหญ่ของท้องสมุทรที่ประกอบด้วยหินบะซอลติคก็จะคงสภาพอยู่เช่นนั้น ขณะเดียวกันกระบวนการตกตะกอน การเกิดภูเขาและการเย็นตัวภายในหินอัคนีก็ยังคงเกิดขึ้นเหนือเขตจมมุด และจะค่อย ๆ เพิ่มความหนาให้กับตัวทวีปทีละน้อยโดยเป็นการเพิ่มปริมาณของหินเฟลสิคในเขตที่อยู่เหนือขึ้นมา ดังนั้นทวีปจึงสูงขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ ในช่วงระยะเวลา 3—4 พันล้านปีมานี้ เราพบว่าภายในหินฐานธรณีในตัวทวีป มีแกนตรงกลางเล็ก ๆ ที่หินมีอายุ 2.7—3.5 พันล้านปี บริเวณนั้นเป็นศูนย์กลาง (nuclei) ของทวีป รอบ ๆ ศูนย์กลางนี้เป็นพื้นหินกว้างใหญ่ที่มีอายุน้อยกว่า โดยมีอายุราว 0.8—2.7 พันล้านปี

เปลือกโลกกันสมุทรเกิดจากการดันตัวของ บะซอลติคแมกมา ขึ้นมาตามแนวเทือกเขากลางสมุทร เป็นหินที่มีอายุน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับหินบนทวีป เปลือกโลกกลางสมุทรที่มีอายุมากที่สุดพบทางส่วนตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิกมีอายุราว 75 ล้านปี ซึ่งมีอายุเพียง 1/40 ของหินศูนย์กลางของทวีป



รูป 18.14 แนวเกิดภูเขาซึ่งจะปรากฏอยู่บริเวณที่แผ่นทวีปแผ่นหนึ่งเลื่อนตัวทับลงไปบนอีกแผ่นหนึ่ง

ในราว ๆ ต้นศตวรรษที่ 19 มีผู้เสนอความคิดว่าทวีปอเมริกาเหนือและใต้ ทวีปยุโรป แอฟริกา ออสเตรเลียและแอนตาร์กติกาและอนุทวีปอินเดีย (ทางใต้ของเทือกเขาหิมาลัยตลอดจนเกาะมาดากัสการ์) กำเนิดรวมกันเป็นมหาทวีป (supercontinental) (ดูรูป 18.15) มีชื่อว่า "ปันกาเอีย" (Pangaea) ปันกาเอียเริ่มแตกเป็นแผ่นในราว 200 ล้านปีมาแล้ว (ยุคไทรแอสสิก) แต่ละแผ่นค่อย ๆ เคลื่อนที่ห่างออกจากกัน ดังนั้น มหาสมุทรแอตแลนติกจึงเกิดขึ้นจากการที่ทวีปอเมริกาเลื่อนลอยห่างออกไปจากทวีปแอฟริกาและยุโรป ทฤษฎีว่าด้วยการเลื่อนลอยของทวีป (continental drift) นี้ในตอนแรกนักธรณีวิทยาส่วนมากไม่ยอมรับหรือไม่ก็ยังสงสัยอยู่ โดยเฉพาะนักธรณีวิทยาชาวอเมริกัน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการพบหลักฐานการแพร่กระจายของเปลือกโลก จึงทำให้นักธรณีวิทยาส่วนมากในปัจจุบันนี้ยอมรับทฤษฎีการเลื่อนลอยของทวีปดังที่ได้กล่าวถึงมาแล้วและได้มีการทำให้ยอมรับทฤษฎีการผันแปรโครงสร้างแบบแผ่น รูป 18.15 แสดงให้เห็นลำดับขั้นของการแยกตัวของทวีปตามหลักฐานที่ค้นพบในปัจจุบัน

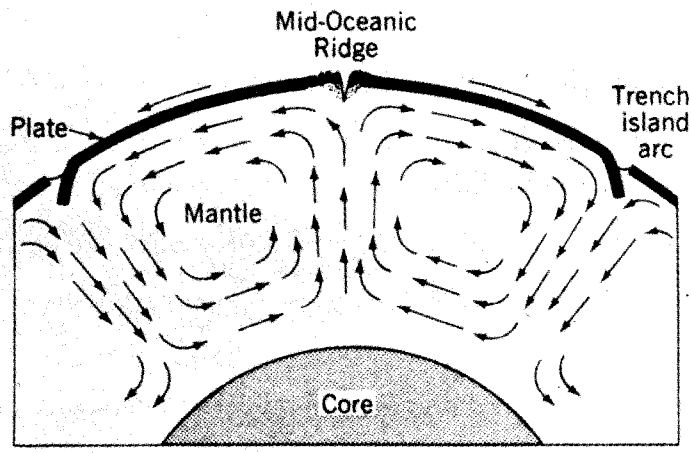


รูป 18.15 การเกิดรอยแยกบนแผ่นปันกาเอียในห้ายุคต่าง ๆ กัน การเคลื่อนที่ของแผ่นทวีปแสดงด้วยลูกศร

จากทฤษฎีการแปรโครงสร้างแบบแผ่น แสดงว่าทวีปอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้เป็นส่วนของอเมริกันเพลท (American plate) ซึ่งเคลื่อนที่ไปทางตะวันตกของเทือกเขากลางสมุทรแอตแลนติก จากนั้นขอบทางตะวันตกของแผ่นนี้จะไปชนกับอีกแผ่นหนึ่งซึ่งอยู่ทางตะวันตก เขตการจมมุดมีผลทำให้เกิดแนวเทือกเขาคอร์ดิลเลอรันและแอนดีน มีเหวทะเลขนาดมหึมาวางตัวอยู่ทางชายฝั่งตะวันตกของทวีปอเมริกาใต้และอีกแห่งหนึ่งอยู่ใกล้กับเกาะอาลิวเชียน เหวทะเลทั้งสองแห่งนี้สันนิษฐานกันว่าเป็นเขตจมมุดของแผ่นที่วางตัวอยู่ทางตะวันตก ซึ่งถูกกดให้จมลงไปสู่ชั้นอ่อนนิ่มและอเมริกันเพลทเคลื่อนตัวขึ้นไปบนแผ่นนั้น

ถ้าดูที่มหาสมุทรแปซิฟิกให้ละเอียด เราจะพบว่ามีแผ่นเปลือกโลกเพียงแผ่นเดียวที่มีเปลือกโลกใต้สมุทรล้อมรอบ รอบ ๆ ขอบของแปซิฟิกเพลทเป็นวงแหวน การแปรโครงสร้างของเปลือกโลก เราเรียกว่า "แนวล้อมรอบทวีปแปซิฟิก" (Ciscum Pacific Belt) เป็นแนวโค้งที่ประกอบไปด้วยภูเขาหรือเกาะภูเขาไฟและมีเหวทะเลเป็นอาณาเขต เป็นแนวที่เปลือกโลกอ่อนแอจึงเกิดแผ่นดินไหวขึ้นบ่อย ๆ รวมทั้งมีภูเขาไฟมากด้วย บริเวณนี้จึงเป็นแนวเขตการจมมุดที่ยาวต่อเนื่องกันไปรอบแปซิฟิกเพลท

ขณะที่เรายังไม่ทราบว่าพลังที่ดันแผ่นเปลือกโลกนั้นมาจากที่ใดก็มีทฤษฎีอีกทฤษฎีหนึ่งที่กล่าวถึงการยกตัวของสารเหลวในเปลือกโลกชั้นในส่วนลึกคล้าย ๆ กับการหมุนเวียนของบรรยากาศในละติจูดต่ำในแฮดเลย์เซลส์ (Hadley cell—เป็นการเปรียบเทียบการเคลื่อนไหวของสารเหลวในเปลือกโลกว่าคล้ายกับการเคลื่อนไหวของบรรยากาศบริเวณเขตร้อน คือการพัดของลมจากละติจูด 25°—30° เหนือและใต้ มายังศูนย์สูตร (ซึ่งเคลื่อนมาในระดับพื้นผิว) และการเคลื่อนที่ของอากาศจากศูนย์สูตรไปยังละติจูด 25°—30° ทั้งเหนือและใต้ (ซึ่งเคลื่อนที่ไปในระดับสูง) ทำให้อากาศหมุนเป็นวัฏจักรซึ่งเรียกว่า "เซลล์" และเซลล์นี้ตั้งชื่อตามนักภูมิอากาศวิทยาที่เป็นผู้อธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ ชื่อว่า



รูป 18.16 ภาพจำลองอย่างง่าย ๆ แสดงการไหลเวียนของหินหนืดที่สัมพันธ์กับแผ่นทวีป

Hadley จึงเรียกการเคลื่อนไหวของอากาศนี้ว่า Hadley cell – ผู้แปล) การที่หินเปลือกโลกชั้นในมีความร้อนไม่เท่ากัน หินจึงมีความหนาแน่นต่างกัน เป็นเหตุให้มวลหินค่อย ๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง เชื่อกันว่าการเคลื่อนที่ในแนวระนาบของมวลหินเปลือกโลกชั้นในเกิดขึ้นระหว่างเขตที่มวลหินเปลือกโลกชั้นในเคลื่อนตัวขึ้น (บริเวณสันเขากลางสมุทร) และเขตที่มวลหินจมตัวลง (ใต้แนวเกาะและภูเขาที่วางตัวเป็นแนวโค้ง) การเคลื่อนที่ในแนวระนาบของหินเปลือกโลกชั้นในนั้นมีแรงดึงพอที่จะดึงแผ่นเปลือกโลกให้เคลื่อนที่ไปได้ อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์นี้เป็นเพียงข้อเสนอเท่านั้น แต่ความจริงที่ยอมรับกันแล้วก็คือแผ่นเปลือกโลกนั้นมีการเคลื่อนที่ได้จริง ซึ่งเราจะต้องศึกษากันต่อไปว่ามีพลังงานใดที่ทำให้แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่ไปได้

คำถามทบทวนบทที่ 18

1. จงอธิบายลักษณะของแกนโลกและเปลือกโลกชั้นใน โดยบอกขนาด ส่วนประกอบทางแร่และคุณสมบัติทางกายภาพ หลักฐานใดบ้างที่เราใช้ศึกษารายละเอียดภายในโลก ความกดดันและอุณหภูมิ ณ จุดศูนย์กลางของโลกมีลักษณะอย่างไร
2. เปลือกโลกคืออะไร มีความหนาเพียงใด มีคุณสมบัติแตกต่างจากเปลือกโลกชั้นในอย่างไร เปลือกโลกประกอบไปด้วยหินสองชนิดได้แก่หินอะไรบ้าง จงเปรียบเทียบความหนาและส่วนประกอบของเปลือกโลกทวีปกับเปลือกโลกท้องสมุทร
3. จงอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของทวีปและพื้นสมุทร โดยพิจารณาถึงระดับของพื้นผิว ถ้าระดับน้ำทะเลลดลง 600 ฟุต (180 ม.) โลกจะมีแผ่นดินเพิ่มอีกกี่เปอร์เซ็นต์
4. ถ้าโลกจำลองมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 21 ฟุต (6.4 ม.) ระดับสูงที่สุดจะสูงจากระนาบที่ใช้แทนระดับน้ำทะเลเท่าไร
5. ลักษณะภูมิประเทศอันดับที่สองที่สำคัญ ๆ ของมหาสมุทรมีอะไรบ้าง
6. ไหล่ทวีปคืออะไร หินใต้ไหล่ทวีปเป็นหินอะไร ลาดทวีปคืออะไร ลาดเนินชายฝั่งทวีปคืออะไร โกรกธารใต้ท้องสมุทรสัมพันธ์กับลักษณะภูมิประเทศดังกล่าวอย่างไร
7. กระแสน้ำขั้นคืออะไร มันทำให้เกิดปรากฏการณ์ใดบ้าง และทำให้เกิดการทับถมได้อย่างไร
8. ลักษณะภูมิประเทศเช่นไรบ้างที่พบได้ตามพื้นสมุทร จงอธิบายภูเขาใต้ทะเล เหวทะเล และเทือกเขาใต้สมุทร
9. จงอธิบายระบบของเทือกเขากลางสมุทร อะไรคือภูมิประเทศสำคัญในแนวแกนกลางของเทือกเขานี้ นักธรณีวิทยาศึกษาระบบสันเขากลางสมุทรได้อย่างไร
10. แนวเกาะโค้งและแนวทะเลสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกอย่างไร

11. ลักษณะภูมิประเทศอันดับที่สองของทวีปมีอะไรบ้าง หินฐานธรณีคืออะไร แนวการเกิดภูเขาคืออะไร

12. การเคลื่อนไหวของเปลือกโลกในกระบวนการสร้างทวีปคืออะไร จงอธิบายความแตกต่างระหว่างกระบวนการสร้างทวีปและกระบวนการสร้างภูเขา

13. จงบอกชื่อมหายุคของเวลาทางธรณีวิทยาและช่วงเวลาเป็นปีของแต่ละมหายุค จงบอกชื่อของยุคในแต่ละมหายุค ปรากฏการณ์สำคัญใดบ้างที่เกิดขึ้นในสมัย (epoch) ไพลสโตซีน

14. มีปรากฏการณ์ใดบ้างที่สัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับมหายุคและยุคทั้งหลาย เรารู้ช่วงเวลาในช่วงพรีแคมเบรียนได้อย่างไร ช่วงเวลาพรีแคมเบรียนยาวกว่าช่วงเวลาหลังแคมเบรียนเท่าไร

15. จงอธิบายลักษณะโดยทั่วไปของปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยาที่ถูกทับถมอยู่ในหินชั้นและเปลี่ยนแปลงอย่างไร และลบเลือนไปด้วยการกัดกร่อนพัดพาได้อย่างไร

16. การโค้งตัวและการเลื่อนตัวไถลทับหมายความว่าอย่างไร การผันแปรของเปลือกโลกต้องการแรงอัดหรือแรงดึงของเปลือกโลกส่วนนอกหรือไม่

17. พื้นเกือบราบคืออะไร ณ ระดับใดที่พื้นที่เกือบราบจะเกิดขึ้น ช่วงเวลาที่ภูเขาจะถูกกัดกร่อนกลายเป็นพื้นที่เกือบราบต้องใช้เวลานานเท่าใด

18. การเลื่อนตัวคืออะไร การเลื่อนเป็นแท่ง (บล็อก) ต่างจากรอยเลื่อนไถลทับอย่างไร

19. เมื่อพื้นที่เกือบราบยกตัวขึ้น ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดตามมามีลักษณะอย่างไร อะไรเกิดขึ้นกับพื้นที่เกือบราบ

20. ชั้นอ่อนนิ่มของเปลือกโลกชั้นในคืออะไร จงอธิบายความแตกต่างระหว่างธรณีภาค (เปลือกโลก) กับชั้นอ่อนนิ่ม ทำไมชั้นอ่อนนิ่มจึงมีความแข็งน้อย

21. การแปรโครงสร้างหมายความว่าอย่างไร จงอธิบายทฤษฎีที่ว่าด้วยการแปรโครงสร้างแบบแผ่นโลกเรามีแผ่นสำคัญ ๆ กี่แผ่น อะไรบ้าง

22. กระบวนการจมมุดคืออะไร สัมพันธ์กับแนวเกิดภูเขาอย่างไร และมันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร การจมมุดในปัจจุบันมีอยู่ ณ บริเวณใดบ้าง

23. การแยกเป็นแผ่นสัมพันธ์กับการเกิดสันเขากลางสมุทรอย่างไร

24. ตลอดช่วงเวลาธรณีวิทยาที่ผ่านมานี้ตัวทวีปมีการเปลี่ยนแปลงอย่างใดบ้าง เปลือกโลกบนทวีปเกิดขึ้นได้อย่างไร จงเปรียบเทียบอายุของเปลือกโลกบนทวีปกับเปลือกโลกใต้ท้องสมุทร

25. ปันกาเอียคืออะไร จงอธิบายกระบวนการเลื่อนลอยของทวีป การแยกตัวของทวีปเกิดขึ้นตั้งแต่เมื่อใด

26. กระบวนการกลที่ทำให้แผ่นเปลือกโลกเคลื่อนที่ที่คนเชื่อถือกันนั้นเกิดขึ้นได้อย่างไร แหล่งของพลังงานคืออะไร

บทที่ 19
ลักษณะภูมิประเทศและการเคลื่อนที่ตามความลาด

ลักษณะภูมิประเทศ : เป็นรูปทรงเชิงเรขาคณิตที่นักภูมิศาสตร์สนใจเป็นอันดับแรก เพราะเป็นสิ่งที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อรูปแบบการกระทำกิจกรรมของมนุษย์ อิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมโดยตรงนั้นที่เห็นเด่นชัด เช่น แนวเทือกเขาเป็นสิ่งที่กีดขวางการติดต่อของกลุ่มชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ราบนั้น ที่ราบมักจะมีคนอาศัยอยู่หนาแน่นเนื่องจากเป็นบริเวณที่อุดมสมบูรณ์ด้วยทรัพยากรเชิงเกษตรกรรม มีวัฒนธรรมและลักษณะทางการเมืองเป็นรูปแบบเดียวกันและเป็นบริเวณที่มีโครงข่ายการคมนาคมที่ดี ซึ่งทำให้มนุษย์มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันได้อย่างสะดวกสบาย ส่วนบริเวณชายฝั่งถ้ามีลักษณะเว้าๆแหว่งๆ และเป็นร่องน้ำลึกก็เหมาะเป็นท่าเรือธรรมชาติที่ดี แต่อาจจะถูกปิดล้อมด้วยแนวชายฝั่งที่เป็นหินขรุขระ จึงเหมาะสมกับการเป็นชุมชนของชนชาติที่ชอบท่องเที่ยวทางทะเลแล้วพัฒนามาเป็นชาวประมง นักพาณิชย์นาวี ช่างต่อเรือ แต่ถ้าชายฝั่งมีร่องน้ำตื้นไม่เหมาะในการเป็นท่าเรือธรรมชาติที่ดี แต่มีที่ราบชายฝั่งที่อุดมสมบูรณ์ ดังนั้น กิจกรรมของมนุษย์ก็ต้องเปลี่ยนไปเป็นการเกษตรกรรม

ตัวอย่างของลักษณะภูมิประเทศที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อมนุษย์นั้น อาจกล่าวได้ไม่รู้จักจบสิ้น แต่ก็ยังมีอิทธิพลของภูมิประเทศที่มีผลต่อมนุษย์ในทางอ้อมที่เราจะต้องพิจารณาถึง ดังเช่นจากการศึกษาลักษณะการกระจายของฝน เทือกเขาสูงมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อลักษณะภูมิอากาศของบริเวณที่อยู่ติดกัน ถ้าเทือกเขานั้นเป็นแนวกำบังบริเวณที่ลุ่มต่ำที่อยู่ติดกันไม่ให้ได้รับความชื้นที่ลมพัดพามา ผลก็คือที่ลุ่มนั้นจะเป็นทะเลทราย ตามลาดเขาภูมิอากาศจะค่อย ๆ เย็นลงและชื้นมากขึ้นตามความสูงที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ลักษณะการเกษตรกรรมและป่าไม้มีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องกันไป ซึ่งจะมีผลต่อการเลือกชนิดของพืชที่ใช้เพาะปลูก พื้นดินที่มีความลาดชันมาก ๆ มีความสัมพันธ์อย่างยิ่งต่อความอุดมสมบูรณ์ของดิน ลาดเขาและเนินเขาจะมีดินบางและจืด มีการกัดเซาะได้ดีเมื่อมีการขุดหรือไถพรวน ที่ราบจะมีดินหนา การกัดเซาะดินเป็นไปได้ยาก แม้บริเวณนั้นจะมีการทำเกษตรกรรมที่ผิดวิธีก็ตาม

ธรณีสัณฐาน

การศึกษาระบบภูมิประเทศและกำเนิดของภูมิประเทศเราเรียกว่า ธรณีสัณฐาน (geomorphology- geo- earth, morph-form, ology -science) ลักษณะภูมิประเทศนั้นต้องจำแนกออกเป็นพวกหรือกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งรูปทรงและการกำเนิด นักธรณีสัณฐานนั้นสนใจในรูปทรง กระบวนการและลำดับขั้นของการวิวัฒนาการทางรูปทรง ซึ่งจะศึกษาถึงลักษณะภูมิประเทศนั้นว่ามีความเป็นมาอย่างไร ลักษณะภูมิประเทศจะผ่านขั้นและลำดับขั้นการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง

มนุษย์ก็อยู่ในช่วงเวลาของชีวิตมัน ถ้ารู้ลำดับขั้นเหล่านั้นเราก็จะสามารถสัมพันธ์ลักษณะภูมิประเทศบางอย่างเข้ากับปรากฏการณ์เฉพาะในลักษณะใดลักษณะหนึ่งของวัฏจักรได้

คำอธิบายภูมิประเทศกำเนิด

การบรรยายเกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศโดยเรียงตามขนาด รูปร่าง มุมของความลาด และการเปลี่ยนแปลงโดยไม่คำนึงถึงการกำเนิดหรือวิวัฒนาการของมันนั้นเราก็สามารถทำได้ วิธีการเช่นนี้เป็นการศึกษาธรรมชาติวิทยาด้วยการสังเกต (empirical approach) ซึ่งจำนวนตัวเลขและข้อมูลเท็จจริงอาจจำเป็นบ้าง เพื่อช่วยให้มีข้อมูลเพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์ง่าย ๆ ของภูมิประเทศได้

ในทางตรงกันข้าม เมื่อเราได้พิจารณาถึงวิวัฒนาการของภูมิประเทศ เราจะพบว่ารูปทรงชุดเดิมอาจเกิดซ้ำกันได้ ลักษณะเช่นนี้จะเกิดซ้ำกันครั้งแล้วครั้งเล่า ในกรณีที่ต้องการจำแนกและพรรณนารูปทรงอันสลับซับซ้อนของภูมิประเทศที่วิวัฒนาการไปตามลำดับขั้นนั้น เราจำเป็นต้องสรุปลักษณะดังต่อไปนี้ คือ (ก) โครงสร้างของหินเบื้องล่าง (ข) กระบวนการที่กัดกร่อนภูมิประเทศ และ (ค) ขั้นของการวิวัฒนาการ การอธิบายแต่ละข้อเป็นลักษณะกำเนิด (genetic) เพราะเราเน้นกำเนิดหรือการเกิดของภูมิประเทศนั้น คนที่ได้ยินหรือได้อ่านคำอธิบายนั้นจะทราบถึงรูปร่างที่ควรจะเป็นได้อย่างถูกต้อง และสามารถสัมพันธ์กับลักษณะภูมิประเทศในพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่งตามธรรมชาติได้

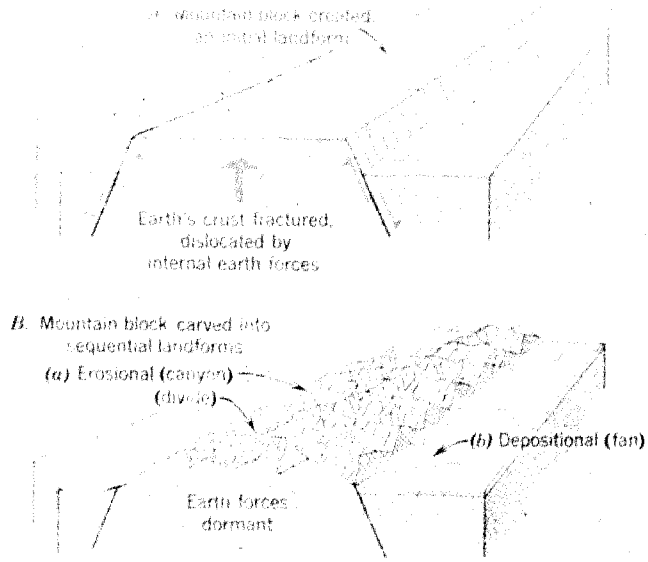
การศึกษาระบบของภูมิประเทศโดยกล่าวถึงกำเนิดและขั้นของการวิวัฒนาการนั้น ศึกษาโดยศาสตราจารย์วิลเลียม มอร์ริส เดวิส แห่งมหาวิทยาลัยฮาร์วาร์ด ในราวปี ค.ศ. 1890 ชื่อเสียงของท่านเป็นที่แพร่หลาย โดยนักธรณีสัณฐานที่พูดภาษาอังกฤษได้ ได้ยึดหลักการเบื้องต้นที่ท่านได้วางพื้นเอาไว้เป็นหลักในการอธิบายและจำแนกลักษณะภูมิประเทศ

ภูมิประเทศกำเนิดและภูมิประเทศตามลำดับขั้น

ในกระบวนการเชิงธรณีวิทยานั้นจำแนกลักษณะภูมิประเทศพื้นฐานออกเป็นสองชนิด ชนิดแรกคือลักษณะภูมิประเทศเปลือกโลกกำเนิดที่เกิดโดยการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกและภูเขาไฟจากพลังงานอันมหาศาลภายในโลก ลักษณะนี้คือภูมิประเทศกำเนิด (initial landform) ชนิดที่สอง คือ ภูมิประเทศที่เกิดจากตัวการกัดกร่อนภูมิประเทศ เนื่องจากภูมิประเทศนี้เกิดทีหลังภูมิประเทศกำเนิดและจะปรากฏเป็นขั้น ๆ ต่อเนื่องกัน เราจึงเรียกว่า ภูมิประเทศตามลำดับขั้น (sequential landforms) ภูมิประเทศบางแห่งไม่มีอะไรมากไปกว่าขั้นวิวัฒนาการที่เป็นอยู่ที่ต้องต่อต้านกับแรงที่อยู่ภายในโลก ซึ่งจะทำให้ผิวโลกในหลาย ๆ ส่วนมีระดับสูงขึ้นเป็นระยะ ๆ ทำให้เกิดภูมิประเทศกำเนิดขึ้น ส่วนตัวการภายนอก (external agent) จะกัดกร่อนมวลเปลือกโลกนี้ให้ต่ำลงและทำให้มีภูมิประเทศตามลำดับขั้นขนาดเล็กจำนวนมากมาย

ทุกลำดับขั้นของการกัดกร่อนนั้นเราจะพบได้ทั่วไปในบริเวณต่าง ๆ ของโลก ในบริเวณซึ่งมีภูเขาสูงและขรุขระนั้นเกิดจากการยกตัวโดยแรงภายในขึ้นมาใหม่ๆ ในบริเวณพื้นที่ราบต่ำที่ปรากฏอยู่ทุกวันนี้ เกิดจากตัวการกัดกร่อนได้กัดกร่อนพื้นผิวโลกไปจนถึงขั้นสุดท้ายแล้ว ลำดับขั้นตอนกลาง

ทั้งหมดก็สามารถพบได้ เนื่องจากแรงภายในโลกกระทำซ้ำแล้วซ้ำอีก ทำให้มวลพื้นดินใหม่ปรากฏออกมาตลอดเวลา ขณะที่พื้นดินเก่าก็ถูกกัดกร่อนให้ต่ำลงไป ตามสภาพที่ผ่านมาในอดีตของยุคธรณีวิทยา ขณะนี้เราอยู่ในช่วงเวลาที่ทวีปมีระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล ข้อสังเกตนี้แสดงให้เห็นว่าการกระทำของแรงภายในนั้นมีตลอดช่วงเวลาทางธรณีวิทยา



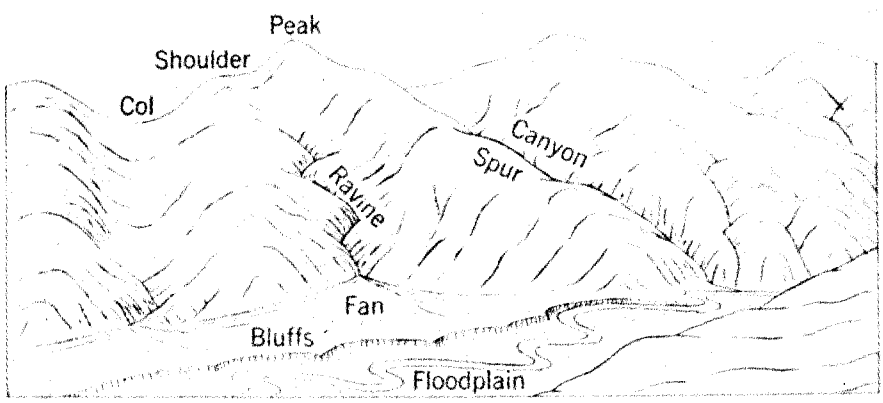
รูป 19.1 ภูมิประเทศกำเนิดและภูมิประเทศตามลำดับขั้น

ตัวการกัดกร่อนพื้นดิน

ลักษณะภูมิประเทศตามลำดับขั้นเป็นผลจากการที่ตัวการกัดกร่อนพื้นดิน (land-sculpturing agents) เช่น น้ำไหล คลื่น น้ำแข็งและลม ตัวการกัดกร่อนจะกระทำร่วมกับการพังทลายของหินและการเคลื่อนของดินและหินลงไปตามพื้นลาดโดยแรงดึงดูด กระบวนการกัดพื้นผิวดินให้ต่ำลงรวมเรียกว่า การผุพังทลาย (denudation) การผุพังทลายจะมีผลต่อมวลหินทั้งหมดบนพื้นทวีปที่มีระดับสูงขึ้นมาด้วยกระบวนการสร้างภูเขาหรือกระบวนการสร้างทวีป ไม่มีส่วนใดของเปลือกโลกที่จะไม่ถูกกัดกร่อน ทันทีที่มวลหินโผล่ออกมาสัมผัสกับอากาศหรือถูกคลื่นกระทบ มวลหินเหล่านั้นก็จะเข้าสู่กระบวนการกัดกร่อนโดยตัวการต่าง ๆ การกระทำของตัวการเหล่านั้นมีเป้าหมายอยู่อย่างหนึ่งก็คือกัดกร่อนพื้นแผ่นดินจนกระทั่งกลายเป็นพื้นที่ราบต่ำ ซึ่งพื้นที่นั้นจะตกอยู่ใต้การกระทำของคลื่นอย่างช้า ๆ และบางทีท้ายที่สุดจะมีน้ำจากมหาสมุทรปกคลุมทั้งหมด วัตถุที่แตกสลายแล้วจะกระจายไปทั่วพื้นทะเลที่อยู่รอบทวีป กระบวนการกัดกร่อนนี้จะกระทำอย่างช้ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับยุคทางธรณีวิทยาซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แสนยาวนาน การกระทำของลำน้ำและคลื่นที่เห็นอยู่ในปัจจุบันนั้นกระทำมาแล้วเป็นเวลานับล้าน ๆ ปี นักธรณีสัณฐานกล่าวว่า ภูมิประเทศตามลำดับขั้นเกิดจากกระบวนการที่กระทำดังที่เห็นอยู่ในปัจจุบัน

ภูมิประเทศที่ถูกกัดกร่อนจนต่ำลงนั้นทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศตามลำดับขั้นมากมายหลายชนิด ในบริเวณที่หินถูกพัดพาออกไป หุบเขาก็จะเกิดขึ้น พื้นที่ระหว่างหุบเขาก็คือสันเขา (ridge) เนินเขาหรือภูเขานั้นเป็นบริเวณซึ่งคงทนต่อการกัดกร่อน ภูมิประเทศตามลำดับขั้นทุกชนิดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลหินฐานนั้นเราเรียกว่าภูมิประเทศจากการกัดกร่อนและพัดพา (erosional landforms)

เศษหินเศษดินจะถูกพัดพาไปทับถมในบริเวณหนึ่ง ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกันออกไป เราเรียกว่าภูมิประเทศจากการทับถม (depositional landforms) รูปข้างล่างนี้เป็นภาพเขียนแสดงลักษณะภูมิประเทศสองกลุ่ม ช่องเขาแคบ (ravine) โกรกเขา (canyon) ยอดเขา (peak) สันเขาที่แยกมาจากเทือกเขา (spur) สันเขาแอ่น (col) และตลิ่งชัน (bluffs) เหล่านี้ล้วนเป็นภูมิประเทศที่เกิดจากการกัดกร่อนและพัดพา พื้นดินรูปพัด (fan) ที่เกิดจากเศษหินเศษดินที่ถูกพัดพามาทับถมอยู่ปากช่องเขาแคบ ที่ราบน้ำท่วมถึง (flood plain) ที่เกิดจากวัตถุที่น้ำพัดพามาเป็นภูมิประเทศจากการทับถม ภูมิประเทศจากการทับถมจะถูกกัดกร่อนต่อไป ทำให้เกิดภูมิประเทศจากการกัดกร่อนและพัดพาช่วงที่สอง (second generation) ดังเช่นภูมิประเทศแบบตลิ่งชัน เป็นต้น



รูป 19.2 ภูมิประเทศจากการกัดกร่อน และภูมิประเทศจากการทับถม

หินฐาน ดิน และเศษหินที่อยู่กับที่

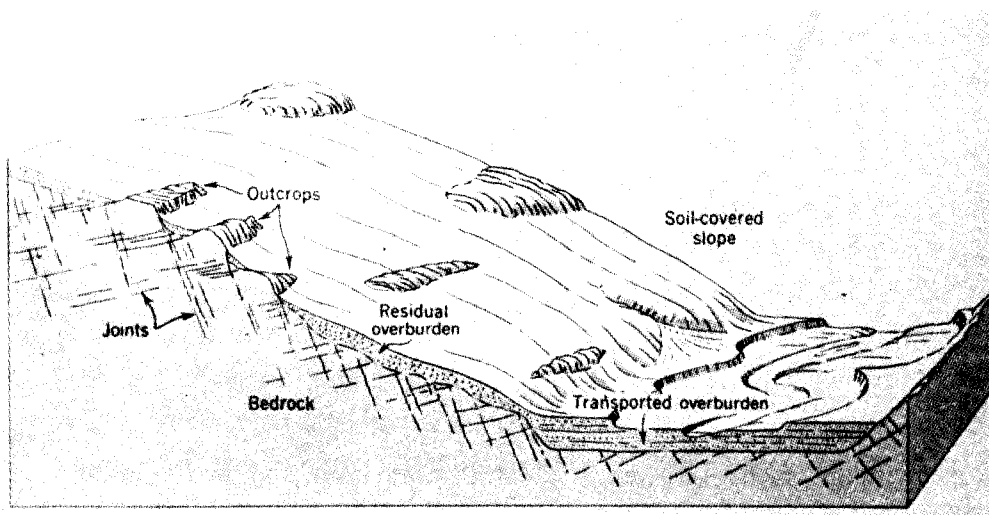
ถ้าเราไปดูหน้าผาที่ตัดใหม่ เช่น การตัดถนนผ่านภูเขาหรือบริเวณที่มีการระเบิดหินเราจะพบวัตถุผิวโลกหลายชนิด ดังที่เห็นในรูป 19.3 หินแข็งที่อยู่กับที่และค่อนข้างจะไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกว่า "หินฐาน" (bed rock) หินนี้จะแบ่งเป็นชั้น ๆ ไปจนถึงชั้นที่หินเริ่มจะผุพังและแตกสลาย

กลายเป็นอนุภาคดินเหนียว ตะกอน และทราย เรียกว่าการผุพังอยู่กับที่ (weathered overburden or residual overburden) ชั้นบนสุดเป็นชั้นดินที่แท้จริงซึ่งเกษตรกรเรียกกันว่า "ดินชั้นบน" (topsoil) คุณสมบัติของดิน กระบวนการเกิดดิน และการจำแนกดิน ได้กล่าวถึงมาแล้วในบทที่ 14 — 15 ชั้นเหนือดินเป็นชั้นหญ้าไม้พุ่มและต้นไม้ซึ่งทำหน้าที่ปกป้องดิน

ชั้นดินชั้นหนึ่งหรือชั้นสองอาจไม่มีปรากฏ บางครั้งวัตถุทุกชนิดผุพังไปจนหมดเหลือแต่เพียงหินฐาน ซึ่งจะปรากฏออกมา ณ พื้นผิวเราเรียกว่า "หินโผล่" (outcrop) บางครั้งหินนี้จะปรากฏหลังจากการเพาะปลูกหรือไฟป่าซึ่งชั้นดินที่แท้จริงพังทลายไปแล้ว เหลือแต่เพียงหินโผล่ขึ้นมาซึ่งเป็นชั้นไม่อุดมสมบูรณ์และอาจจะเต็มไปด้วยร่องน้ำลึก (gullies) ความหนาของชั้นดินและชั้นหินผุพังเบื้องล่างนั้นมีต่าง ๆ กัน แม้ว่าชั้นดินที่แท้จริงจะหนามากกว่าสองสามฟุต แต่ชั้นหินที่ผุพังและเศษหินที่แตกหักอาจหนาหลายสิบหรือหลายร้อยฟุต กำเนิดของหินผุพังเป็นการกระทำร่วมกันกับรอยแตกของหินที่เรียกว่า รอยแยก (joint) จำนวนมากมาย ซึ่งเป็นแนวที่น้ำสามารถไหลผ่านได้ง่ายช่วยทำให้หินผุพังเร็วขึ้น

การพัดพาวัตถุที่ผุพัง

วัตถุผุพังอีกชนิดหนึ่งซึ่งจะพบอยู่เหนือหินฐาน คือ วัตถุผุพังที่ถูกพัดพามา (transported overburden) ประกอบด้วยวัตถุต่าง ๆ คือ หินกรวดมน และทรายในท้องธาร ตะกอนที่ทำให้เกิดที่ราบน้ำท่วมถึง ดินเหนียวในก้นทะเลสาบ หาดทรายและเนินทราย เศษหิน (rubble) ที่เหลืออยู่หลังจากธารน้ำแข็งละลายทุกชนิด เป็นสิ่งที่ธารน้ำแข็ง คลื่นหรือลมพัดพามา



รูป 19.3 วัตถุผุพังอยู่กับที่กับวัตถุผุพังพัดพา

วัตถุผุพังอยู่กับที่เป็นวัตถุที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้นโดยหินฐานแตกออก ซึ่งเป็นการเกิดในท้องถิ่นนั้น ส่วนวัตถุผุพังที่ถูกพัดพามาจะประกอบด้วยหิน และแร่ธาตุต่างชนิดกัน ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ไกลออกไป และจะแตกต่างจากแร่ธาตุและหินเบื้องล่าง จากรูปในหน้า 56 แสดงให้เห็นถึงการทับถมในลำธารบริเวณหุบเขาเราเรียกว่า "วัตถุน้ำพา" (alluvium) ซึ่งหมายถึงวัตถุผุพังที่ถูกพัดพามาและแตกต่างจากวัตถุผุพังอยู่กับที่ในบริเวณลาดหุบเขาที่อยู่ติดกัน วัตถุน้ำพาที่มาทับถมอยู่นั้นอาจไม่ถูกรบกวนเลยเป็นเวลานับพัน ๆ ปี ในกรณีเช่นนี้จะทำให้เกิดชั้นดินที่แท้จริงขึ้นในชั้นบนสุด

เมื่อพิจารณาอย่างกว้าง ๆ แล้ววัตถุทั้งหลายที่ปรากฏในภูมิประเทศที่เกิดจากการทับถมนั้นเป็นวัตถุที่ถูกพัดพามา ในบทต่อไปจะได้พรรณนาให้ทราบถึงภูมิประเทศที่เกิดจากการทับถมและจะได้อธิบายให้ทราบถึงกระบวนการที่วัตถุถูกพัดพาด้วย

อิทธิพลของหินฐานต่อลักษณะภูมิประเทศ

หินฐานมีอิทธิพลอย่างมากต่อรูปร่าง ขนาด และวิวัฒนาการของการกัดกร่อนภูมิประเทศ ในบางแห่งที่หินเป็นชั้นบางมากและอาจวางตัวในแนวระนาบ เอียง โก่งตัวหรือแตกหักได้ บางแห่งประกอบไปด้วยชั้นหินหนามวลหินผึ้งตัวอยู่ลึกมาก หินบางชนิดอ่อนและถูกชะล้างได้ดีโดยการกระทำของลำน้ำและคลื่น บางชนิดก็เป็นหินที่ทนทานต่อการกัดเซาะของตัวการกัดกร่อนและการพัดพาทุกชนิด อัตราความอ่อนหรือความคงทนของหินนั้น พิจารณาได้จากการกำเนิดและอายุของหิน เมื่อหินชนิดต่าง ๆ วางตัวในระดับพื้นผิวสลับกันไปมา ตัวการการกัดกร่อนก็จะกัดกร่อนหินเหล่านั้นตามอัตราความคงทนของหิน บริเวณที่เป็นหินที่อ่อนมีแนวโน้มว่าจะกลายเป็นหุบเขาหรือที่ต่ำอื่น ๆ ส่วนหินที่คงทนจะคงสภาพความสูงอยู่ได้ เช่น เนินเขา ภูเขาหรือที่ราบสูง ดังนั้น ลักษณะภูมิประเทศจึงเป็นผลมาจากรูปร่างและการจัดเรียงตัวของมวลหินกำเนิด การศึกษาอิทธิพลของมวลหินที่มีต่อลักษณะภูมิประเทศจะต้องตามมาด้วยตรรกวิทยาในการศึกษาระบบของการกระทำของตัวการการกัดกร่อน

การเคลื่อนที่ของวัตถุตามพื้นลาด

คำว่า "ลาด" (slope) ที่ใช้ในเชิงธรณีสัณฐานเราใช้เรียกพื้นที่ของผิวดินที่เอียงออกไปจากระนาบ ดังนั้น ถ้าพูดว่า ลาดภูเขา ลาดเนินเขา หรือลาดหุบเขา เราหมายถึงอาการเอียงของพื้นดินจากสันปันน้ำ (divides) หรือจากยอดเขา (summit) ต่ำลงสู่หุบเขา

พื้นลาดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการไหลของน้ำผิวดินตามแรงดึงดูดของโลก ยิ่งกว่านั้นพื้นลาดยังเป็นตัวบังคับลักษณะของระบบลำน้ำด้วย น้ำที่ไหลบนพื้นผิวจะไหลไปรวมกันในร่องน้ำ น้ำในร่องน้ำนี้จะพาน้ำและเศษหินลงสู่ทะเล มหาสมุทร ซึ่งทำให้วัฏจักรของน้ำครบรอบโดยสมบูรณ์ ธรรมชาติของโลกนั้นส่วนมากมักจะมีพื้นผิวเป็นพื้นลาด บริเวณที่จะเป็นพื้นระนาบราบหรือระนาบดึงที่แท้จริงจะมีน้อยมาก

สิ่งที่เราจะกล่าวถึงในบทนี้ คือ การเคลื่อนที่ของวัตถุไปตามพื้นลาดโดยการกระทำรวมกันของกระบวนการลมฟ้าอากาศและแรงดึงดูดของโลก ความสำคัญอยู่ที่ว่ากระบวนการที่ทำให้หินผุพังสลายนั้นเป็นไปอย่างช้า ๆ และวัตถุผุพังเหล่านี้จะค่อย ๆ เคลื่อนลงสู่ลำน้ำซึ่งกระแสน้ำจะพัดพาวัตถุเหล่านั้นไปสู่ที่ต่ำที่อยู่ไกลออกไป พื้นลาดนั้นจะมีรูปร่างต่าง ๆ กันตามตัวการกระทำเช่น ธารน้ำแข็ง ลมและคลื่น ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

การผุพังและการเคลื่อนที่ตามพื้นลาด

การผุพัง (weathering) เป็นการรวมการกระทำของทุกกระบวนการ ซึ่งทำให้หินแยกออกเป็นชิ้น (decomposed) หรือแตกกระจาย (disintegrate) ออกไป เนื่องจากหินโผล่หรืออยู่ใกล้พื้นผิว การผุพังจะทำให้มวลหินแข็งแตกสลายออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ วัตถุพังทลายอยู่กับที่นี้จะกลายเป็นวัตถุกำเนิดของดิน จากเหตุผลดังกล่าวการผุพังจึงทำหน้าที่เสมือนเป็นการตระเตรียมเศษหินเพื่อการขนย้ายหรือพัดพาโดยตัวการกัดกร่อนพัดพาพื้นดิน ซึ่งได้แก่ น้ำไหล ธารน้ำแข็ง คลื่นและลม เนื่องจากแรงดึงดูดของโลกนี้ส่งแรงกระทำต่อวัตถุทั้งมวลบนพื้นโลกทั้งหินฐาน และหินที่ผุพังในลักษณะของการเลื่อน (slide) กลิ้ง (roll) ไหล (flow) หรือคืบ (creep) ลงไปตามพื้นลาด ดินและหินที่เคลื่อนที่ตามลักษณะดังกล่าวรวมเรียกว่า "การเคลื่อนที่ตามพื้นลาด" (mass wasting)

กระบวนการผุพังเราแบ่งย่อยออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ กระบวนการผุพังทางกายภาพ (physical weathering) และกระบวนการผุพังทางเคมี (chemical weathering) แม้ว่ากระบวนการเหล่านี้จะสลับซับซ้อนมากและปฏิกิริยาที่ทำร่วมกันนั้นยากที่จะแยกแยะออกได้ แต่จะได้จำแนกการเปลี่ยนแปลงแต่ละชนิดที่สำคัญที่สุด เพื่อให้เห็นว่าลักษณะภูมิประเทศหรือลักษณะพื้นของหินหรือดินมีสาเหตุมาจากแต่ละกระบวนการอย่างไร

ลักษณะการแตกเชิงเรขาคณิตของหิน

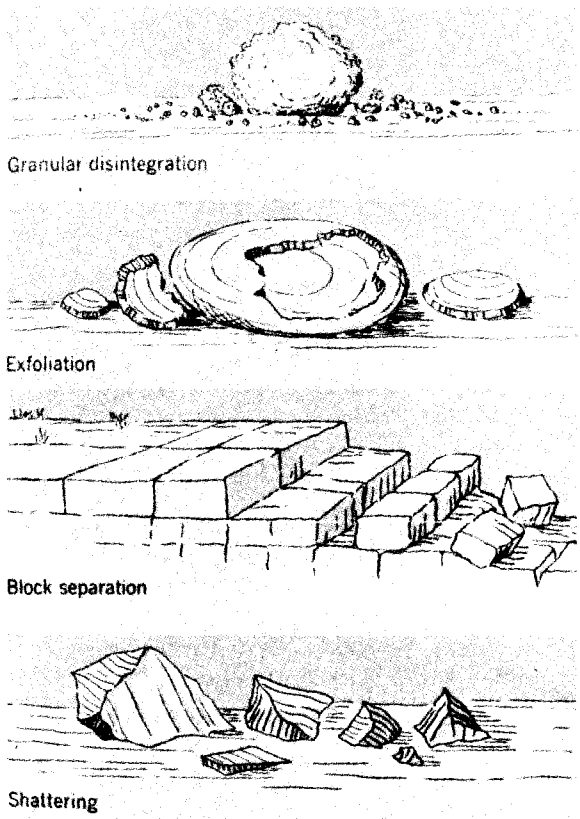
ก่อนที่จะกล่าวถึงกระบวนการผุพัง จะขอกล่าวถึงศัพท์ทางเรขาคณิตสี่คำที่นำมาประยุกต์ใช้เรียกลักษณะการแตกของหินฐานออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ในที่นี้เราจะไม่พิจารณาถึงแรงอื่น ๆ ที่มากระทำร่วม จนก้อนหินมีรูปร่างดังที่ปรากฏให้เห็น

หินประกอบไปด้วยเกล็ดแร่ธาตุหยาบ ๆ (หินอัคนีที่เย็นตัวภายใต้ผิวโลก ซึ่งมีพื้นผิวแบบแกรนิทอยด์ และหินชั้นที่ประกอบด้วยวัตถุหยาบ) ตามปกติจะแตกออกเป็นเกล็ดเล็ก ๆ เราเรียกการแตกแบบนี้ว่า "การแตกเป็นเม็ด" (granular disintegration) ผลที่ได้คือกรวดมน (gravels) หรือทรายซึ่งแต่ละเม็ดจะประกอบด้วยแร่เพียงชนิดเดียวที่แยกออกมาตามแนวผลึกกำเนิดหรือขอบเม็ด "การแตกเป็นกาบ" (exfoliation) คือ การแตกของหินที่เป็นแผ่นโค้งคล้ายเปลือกหอยแยกออกจากหินกำเนิด ทำให้หินส่วนที่เหลือเป็นก้อนกลมที่เล็กลง การแตกชนิดนี้เรียกว่า spalling ก็ได้เหมือนกัน

ในบริเวณที่หินมีรอยแยก (joint) จำนวนมากมายซึ่งเกิดจากกระบวนการสร้างภูเขาหรือการหดตัวในขณะที่หินหนืดเย็นตัวลง การแตกตามรอยแยกนี้เรียกว่า "การแตกเป็นก้อน" (block separation) ซึ่งการแตกตามรอยแยกนี้ใช้แรงไม่มากนัก ผิดกับการแตกใหม่ ๆ ที่ไม่แตกตามรอยแยกของหินแข็งจึงใช้แรงมหาศาล ในหินชั้นซึ่งระนาบของชั้นหรือระนาบชั้นหิน (ระนาบเป็นบริเวณที่อ่อนที่สุดในชั้นหินตามปกติ) จะวางตัวเป็นมุมฉากกับรอยแยก

อย่างไรก็ตาม เป็นไปได้ที่ว่าหินที่แตกเป็นก้อน ก้อนเดียวจะแตกต่อไปอีกในลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรือเป็นกาบ

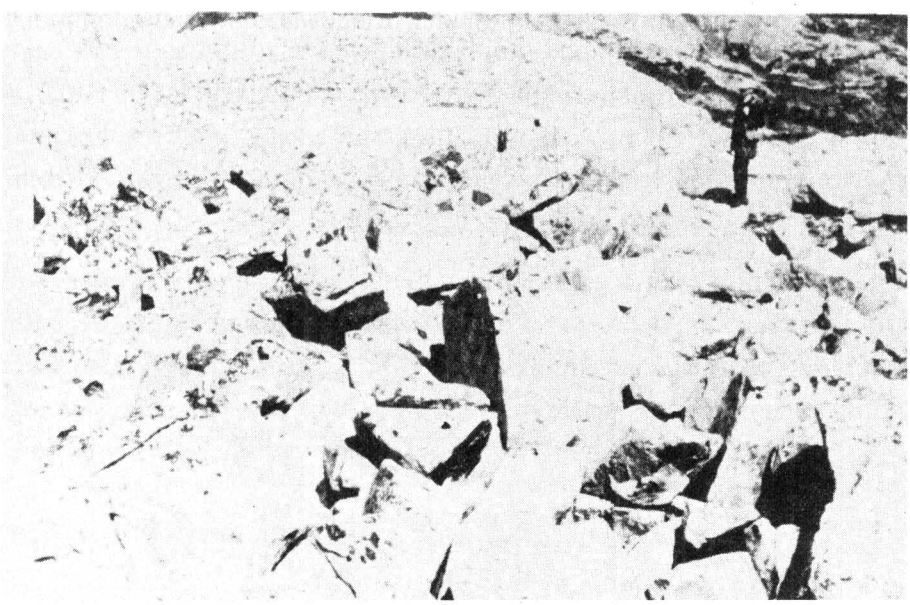
"การแตกเป็นสันคม" (shattering) คือการแตกของหินตามแนวรอยแตกใหม่ของหินแข็ง ทำให้หินก้อนใหม่มีสันมุมคมและมีขอบมากมาย (ดูรูป 19.4) ผิวของรอยแตกอาจตัดผ่านไประหว่างผลึกแร่หรือเม็ดแร่หรืออาจตัดผ่านไปเลย หินที่แตกตามรอยแยกจะแตกเป็นสันคมก้อนเล็ก ๆ ต่อไป



รูป 19.4 การแตกของหินในรูปทรงต่างกัน

การผุพังตามกระบวนการกายภาพและรูปทรง

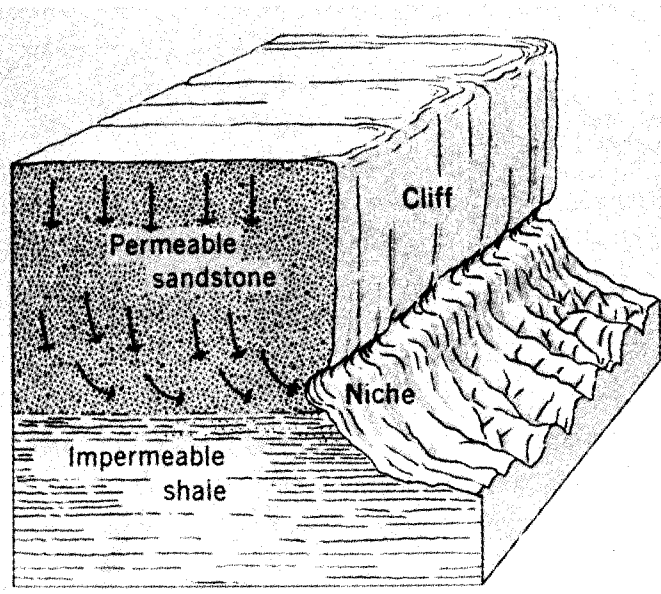
กระบวนการกายภาพหรือกระบวนการกลศาสตร์ (mechanical process) เป็นกระบวนการกัดกร่อนทำให้หินแตกออกเป็นก้อนเล็กๆ ด้วยการใช้แรงเค้น (stress) ทำให้หินแตก โดยที่คุณสมบัติทางเคมีไม่เปลี่ยนแปลง กระบวนการผุพังทางกายภาพที่สำคัญที่สุดกระบวนการหนึ่งในเขตภูมิอากาศหนาวก็คือ การกระทำของน้ำค้างแข็ง (frost action) การแข็งตัวและหลอมเหลวสลับกันไปมาบ่อย ๆ ครั้งในช่องว่างในหินหรือรอยแตกของดิน ขณะที่ผลึกน้ำแข็งขยายตัวไปตามช่องว่าง เมื่อน้ำแข็งนี้โตขึ้นจะมีแรงมหาศาลดันผนังช่องว่างทำให้รอยต่อห่างกันยิ่งขึ้น แม้แต่หินแข็งก็อาจแตกได้จากผลึกน้ำแข็งที่เกิดจากน้ำที่ชุ่มอยู่ในก้อนหิน ในดินที่มีน้ำอยู่มีแนวโน้มว่าจะทำให้เกิดชั้นน้ำแข็ง (ice layer) ขึ้นขนานกับผิวดิน ทำให้ดินชั้นบนมีลักษณะไม่สม่ำเสมอกัน



รูป 19.5 ดาดหินเหลี่ยมบนยอดเขาเมดิซินโบว์ เทือกเขาสโนวี รัฐไวโอมิง สูงถึง 12,000 ฟุต (3,650 เมตร) หินคือควอร์ตไซต์

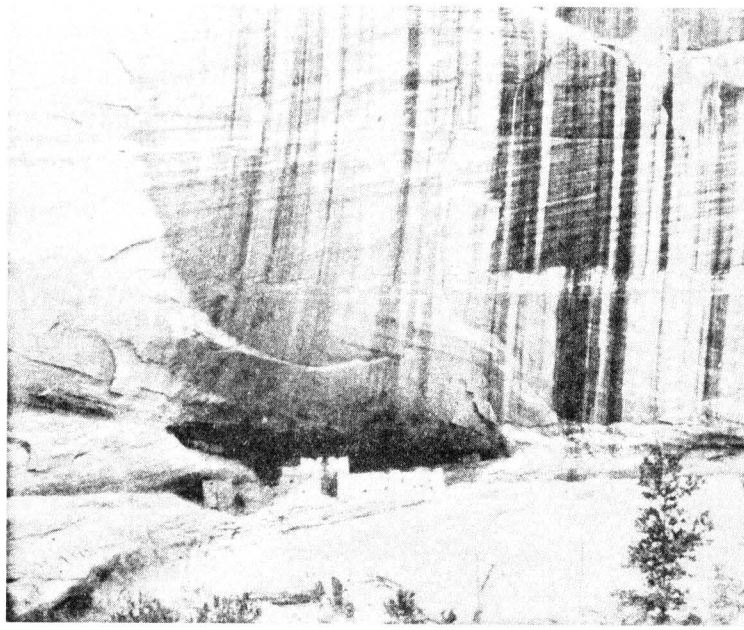
น้ำที่แข็งตัวมีอิทธิพลอย่างมากต่อหินและดินในเขตละติจูดกลางและสูงที่มีฤดูหนาวอันหนาวจัด แต่จะมีอิทธิพลมากที่สุดในเขตภูเขาสูงโดยเฉพาะบริเวณเหนือแนวป่าไม้ (timberline) ในที่นี้การแยกตามรอยต่อ และการแตกแบบสันคมจะทำให้พื้นดินบริเวณนั้นเต็มไปด้วยก้อนหินที่แตกออกเป็นสันคม พื้นผิวนั้นเราเรียกว่า "ดาดหินเหลี่ยม" (felselmeer-rock sea) หรือลานก้อนหิน (boulder field) (ดูรูป 19.5) บริเวณหน้าผาหินสูงซึ่งไม่มีสิ่งใดปกคลุม เศษหินจะตกลงมาจากหน้าผาแล้วสร้างกองหินแตกขึ้นมาเป็นรูปกรวยเราเรียกว่า ลานหินตีนผารูปกรวย (talus cone) (ดูรูปหน้า 68)

การทำให้หินแตกโดยการขยายตัวของผลึกเกลือจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการทำให้หินแตกโดยการขยายตัวของผลึกน้ำแข็ง กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นได้ดีในเขตแห้งแล้งและเป็นต้นเหตุให้เกิดโพรง (niche) ถ้ำตื้น หินโค้งและหลุมในหินทราย ในช่วงฤดูแล้งอันยาวนานน้ำใต้ดินจะซึมขึ้นมายังผิวของหินด้วยแรงซึม (capillary) เมื่อน้ำระเหยไปหมดแล้วเกลือเล็กเกลือเล็ก ๆ จะเหลืออยู่ในรูเล็ก ๆ ของหินทรายชั้นบน แรงจากการขยายตัวของผลึกเกลือนี้สามารถทำให้หินแตกเป็นเม็ดเล็ก ๆ ได้ ซึ่งจะร่วนเป็นทรายแล้วลมและฝนก็จะพัดพาไปที่อื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นหินที่วางตัวติดกับฐานของหน้าผาจะอ่อนมาก ในบริเวณนี้น้ำใต้ดินจะซึมออกไป เนื่องจากน้ำจะซึมต่อลงไปไม่ได้เพราะมีชั้นหินซึ่งไม่มีรูพรุนอยู่ข้างล่าง (ดูรูป 19.6) ทางตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐ ฯ จะมีโพรงลึกเกิดขึ้นมากมายซึ่งพวกอินเดียนแดงใช้เป็นที่อยู่อาศัยและในการป้องกันภยันตรายจากศัตรู (ดูรูป 19.7 ในหน้า 62)



รูป 19.6 การซึมซาบของน้ำไปในหน้าผาหิน และไหลออกในที่ต่ำทำให้เกิดรอยเว้าบนหน้าผา

กระบวนการที่สำคัญแต่มีการพูดถึงกันน้อย ก็คือกระบวนการผุพังทางกายภาพที่เกิดจากการที่ดินได้รับน้ำและขาดน้ำสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีผลทำให้อนุภาคตะกอนขนาดเล็ก และดินเหนียวต้องดูดน้ำหรือคายน้ำสลับกันไปตามฤดูฝนและฤดูร้อน การขาดน้ำทำให้ดินแตกระแหงในช่วงฤดูแล้ง ทำให้การไหลซึมของน้ำในช่วงที่ฝนตกใหม่ ๆ เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในหินชั้นที่มีอนุภาคดินเหนียวมาก เช่น หินดินดาน เมื่อได้รับความชื้นจะทำให้หินแตกโดยธรรมชาติ (slaking) ซึ่งหินดินดานจะหักออกเป็นสะเก็ดเล็กหรือเป็นชิ้นคล้ายดินสอเมื่อโผล่ขึ้นมาสัมผัสกับอากาศ

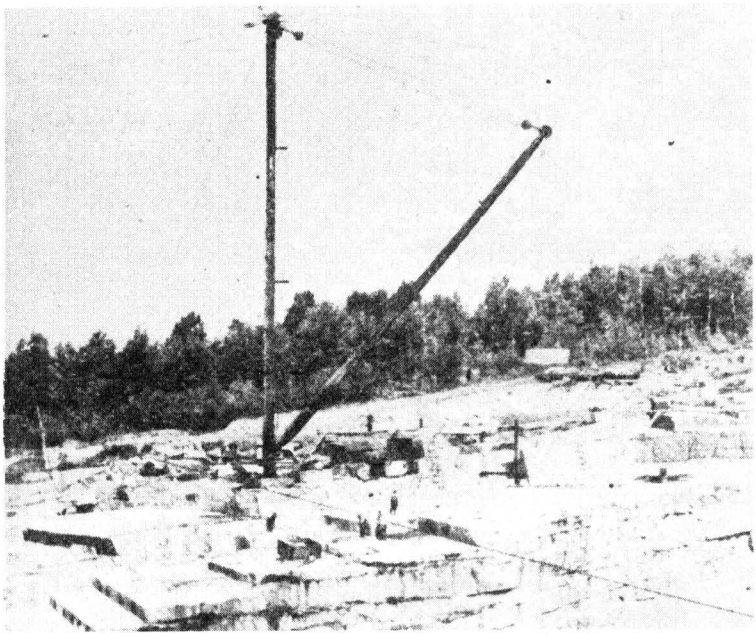


รูป 19.7 ซากโบราณวัตถุไวท์เฮาส์ รูอิน ซึ่งสร้างอยู่ในรอยเว้าในหน้าผาหินทราย บริเวณแคนยอน เดอ เชลีรัฐแอริโซนา

ผลึกแข็งทั้งมวล เช่น ผลึกของแร่ในหินมีแนวโน้มว่าจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และจะหดตัวเมื่อเย็นลง ในบริเวณที่หินพื้นผิวโผล่ขึ้นมาจะได้รับความร้อนสูงในตอนกลางวัน และเย็นลงในตอนกลางคืน เป็นผลทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัวสลับกันไปมา ทำให้เกิดแรงมหาศาลขึ้นในก้อนหิน เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ (การหดและขยายตัวสลับกันนับหลายหมื่นครั้ง) แม้แต่หินแข็ง ๆ ก็แตกได้ การแตกอาจอยู่ในรูปของการแตกเป็นกาบหรือเป็นเม็ดเล็ก ๆ

กระบวนการที่เกิดขึ้นน้อยแต่มักเกิดในกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากการไม่ถูกทับ (unloading) และความต่างระดับของความกดอันจำกัด ดังเช่น หินที่ถูกดันจนมาใกล้ผิวโลกและกระบวนการกัดกร่อนพัดพาหินเบื้องบนไปหมด นักธรณีวิทยาเชื่อว่าหินที่เกิดในระดับลึกใต้ผิวโลกลงไปมาก ๆ (โดยเฉพาะหินอัคนีและหินแปร) จะอยู่ในสภาพที่หดตัว เนื่องจากมีแรงกดดันมหาศาลกดไว้ในช่วงเกิดภูเขา เมื่อหินดังกล่าวถูกดันขึ้นใกล้ผิวโลกนั้นจะขยายตัวมีปริมาณมากขึ้น ทำให้หินขนาดใหญ่นั้นแตกออกจากมวลหินกำเนิดที่อยู่เบื้องล่าง พื้นผิวใหม่จะอยู่ในรูปของรอยแยก เรียกว่าโครงสร้างแบบแผ่น (sheeting structure) และทำให้หินมีมวลเป็นแผ่น เช่น หินแกรนิต และหินอ่อน เนื่องจากรอยแยกอยู่ชิดกันมาก การขยายตัวจะเกิดในระหว่างก้อน แผ่นหินหรือกาบหินนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากหินนั้นไม่ถูกทับ ส่วนมากจะขนานกับพื้นผิวโลกและมีแนวโน้มว่าจะเอียง

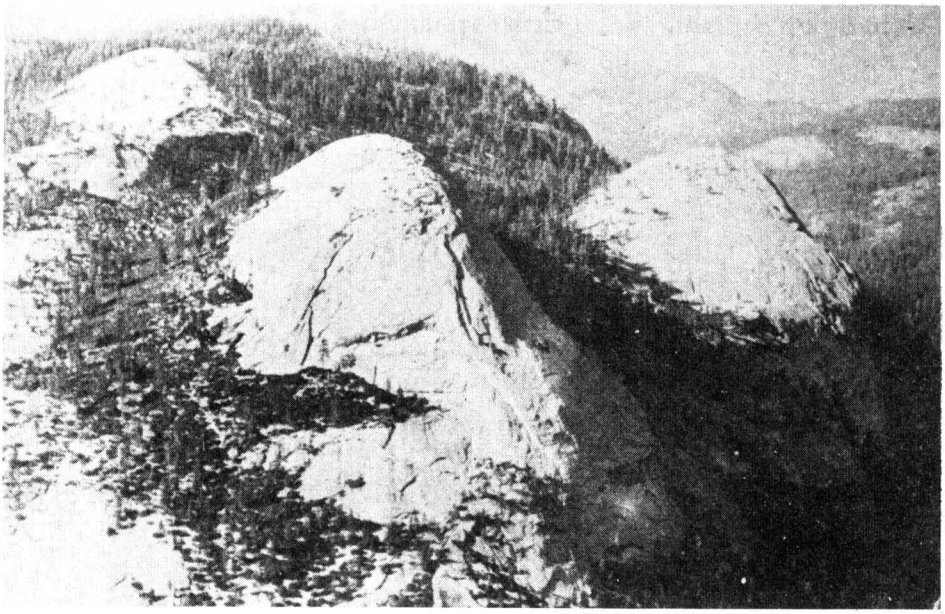
ลงสู่หุบเขา ตามชายฝั่งหินแกรนิตจะเห็นกาบหินทั้งแผ่นเอียงลงสู่ทะเล โครงสร้างแบบแผ่นนี้จะพบได้ดีในบริเวณที่มีการระเบิดหิน ซึ่งเป็นบริเวณที่จะเคลื่อนย้ายหินได้ง่าย (ดูรูป 19.8)



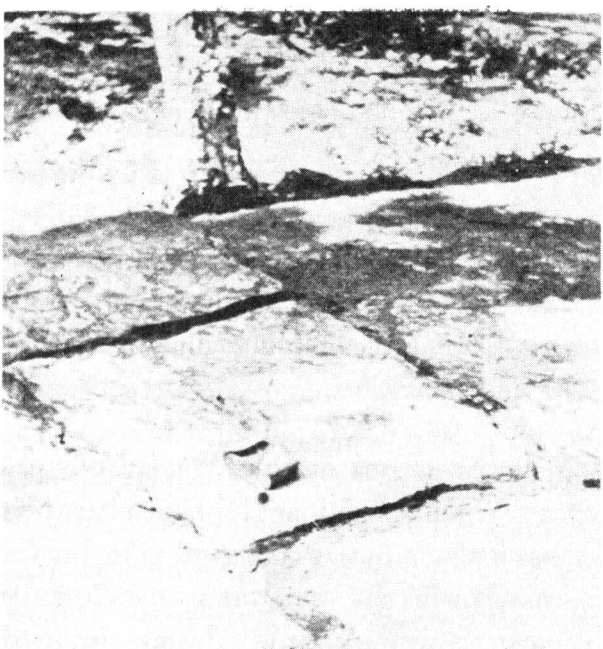
รูป 19.8 แผ่นหินแกรนิต เกิดจากการแตกเป็นกาบขนาดใหญ่

ในบริเวณที่โครงสร้างแบบแผ่นเกิดขึ้นเหนือยอดของมวลหินขนาดใหญ่ การแตกแบบกาบจะเกิดขึ้น (ดูรูป 19.9 ในหน้า 64) การแตกแบบกาบนี้เป็นภูมิประเทศที่ใหญ่ที่สุดที่เกิดจากการผุพังทลายขั้นปฐม ในหุบเขาโยเซไมท์ในรัฐแคลิฟอร์เนีย เป็นภูมิประเทศแบบโดม กาบหินที่แตกออกอาจหนา 20 ถึง 50 ฟุต (6—15 ม.)

กระบวนการสุดท้ายในกระบวนการกล คือรากไม้ที่ไชซอนเข้าไปในหิน เป็นกระบวนการกลที่ทำให้รอยต่อของหินแยกออก เราคงเคยเห็นกันมาแล้วว่าลำต้นตอนล่างของพืชหรือรากพืชจะไชซอนเข้าไปในระหว่างรอยแยกของก้อนหินก้อนใหญ่สองก้อน (ดูรูป 19.10 ในหน้า 64) ยิ่งไปกว่านั้นพืชยังสามารถทำให้ก้อนหินแยกห่างจากกันยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตของพืชเล็ก ๆ ในรอยแยกก็ทำให้หินแตกเป็นก้อนเล็ก ๆ จำนวนนับไม่ถ้วนได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่หินอ่อนซึ่งผุพังหรือแตกออกจากการกระทำของน้ำค้างแข็ง



รูป 19.9 มวลหินอัคนีขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการแตกเป็นกาบ ทำให้ส่วนที่เหลือเป็นโดม ที่เห็นนี้คือ นอร์ธโดม และบาสเก็ตโดม ในโยเซไมท์ เนชั่นแนลปาร์ค แคลิฟอร์เนีย

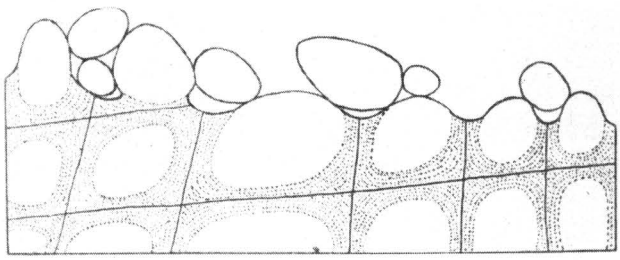


รูป 19.10 รอยแยกในหินทราย ทำให้ดูเหมือนหินบล็อกบนทางเท้า ภาพนี้คืออาร์ทิสต์วิว ภูเขาแคทสกิล นิวยอร์ก

กระบวนการพังทลายทางเคมีและรูปทรง

กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ไฮโดรไลซีส (hydrolysis) และการกระทำของกรดคาร์บอนิกนั้น เป็นกระบวนการทางเคมีที่สำคัญที่มีผลต่อหิน ผลผลิตที่คงทนนั้นส่วนใหญ่เป็นไฮดรัสออกไซด์ (hydrous oxide) ของอะลูมิเนียมและเหล็กและไฮดรัสอะลูมิโนซิลิเกตชนิดต่าง ๆ (hydrous aluminosilicate) ส่วนมากของการเปลี่ยนแปลงในหินจะทำให้หินอ่อนลง ขณะที่การดูดซึมน้ำจะทำให้ปริมาตรหินขยายตัวขึ้น และช่วยกระตุ้นให้การแตกสลายเป็นไปได้เร็วขึ้น

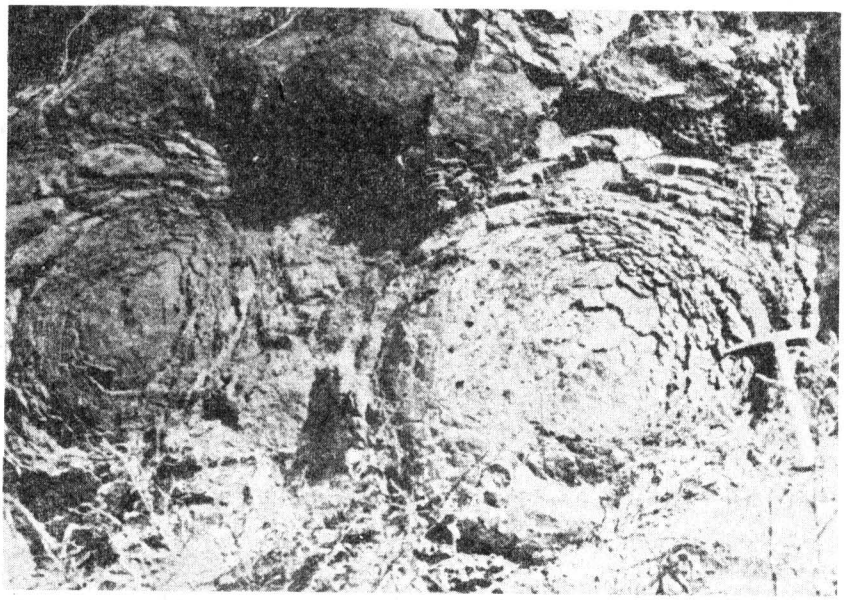
กระบวนการไฮโดรไลซิสในหินแกรนิตรวมกับการแตกเป็นเม็ด และการแตกเป็นกาบบาง ๆ ทำให้เกิดก้อนหินมน ซึ่งเกิดจากการลดเหลี่ยมของหินที่แตกจากรอยแยก (ดูรูป 19.11–19.12) รูปทรงอย่างนี้จะพบมากในเขตแห้งแล้ง ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณนั้นไม่มีผิวดินหนา ๆ หรือพืชปกคลุม



รูป 19.11 ลำดับขั้นการวิวัฒนาการของก้อนกรวดรูปไข่จากเดิมเป็นแท่งหินเหลี่ยม

รูป 19.12 หินแกรนิตรูปไข่เกิดจากแท่งหินซึ่งแตกตามรอยแยก และต่อมาแตกเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งเกิดขึ้นในเขตภูมิอากาศกึ่งแห้งแล้งใกล้กับเพรสคอทต์ รัฐแอริโซนา

แม้จะเป็นเขตแห้งแล้ง แต่ก็มีความชื้นเพียงพอที่จะทำให้กระบวนการไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นได้ กระบวนการไฮรโดรไลซิสในเม็ดเล็ก ๆ ของหินอัคนีชนิดเป็นด่าง เช่น หินบะซอลต์จะทำให้เกิดกาบหินเล็ก ๆ ชนิดหนึ่งที่เรียกว่า "การผุพังทรงกลม" (spheroidal weathering)



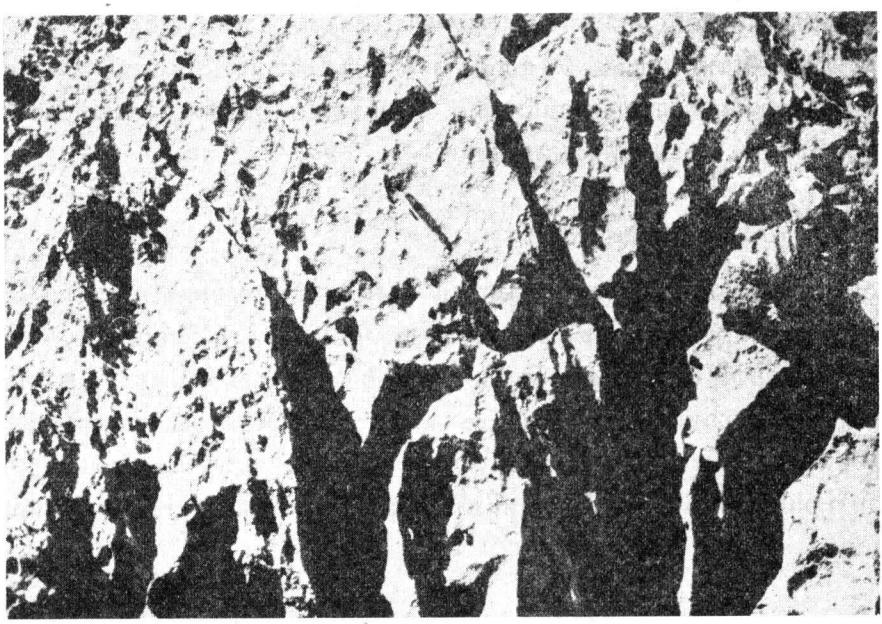
รูป 19.13 การแตกเป็นทรงกลม เกิดจากหินอัคนีบะซอลติคที่แตกเป็นกาบคล้ายเปลือกหอย เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดบริเวณเขื่อนลูเซตติ เปอร์โตริโก

ในเขตอากาศอบอุ่นและชื้น กระบวนการไฮโดรไลซิสอาจกระทำกับหินในระดับลึกจากผิวดินลงไปมาก ๆ และอาจเป็นผลทำให้หินอัคนีและหินแปรในระดับลึกลงไปถึง 100—300 ฟุต (30—90 เมตร) ผุพังได้ นักธรณีได้ศึกษาการผุพังของหินในระดับลึกเป็นครั้งแรกทางตอนใต้ของเทือกเขาแอปปาเลเชียนและเรียกชั้นหินที่ผุนั้นว่า "ชั้นผุเปื่อย" (saprolite) สำหรับวิศวกรแล้วการผุพังลงไปในระดับลึกนี้มีความสำคัญต่อการสร้างทาง เขื่อน หรืองานสร้างหนัก ๆ อื่น ๆ มาก

ปฏิกิริยาของกรดคาร์บอนิกที่กระทำกับหินปูนเป็นกระบวนการผุพังทางเคมีที่สำคัญในบริเวณที่มีหินปูนและโดโลไมท์ ผิวของหินปูนตามปกติจะถูกกัดเป็นหลุมและร่อง (ดูรูป 19.14) ยิ่งไปกว่านั้นหินปริมาณมหาศาลจะถูกพัดพาไปภายใต้พื้นผิว ทำให้เกิดระบบถ้ำซึ่งเป็นทางที่น้ำพื้นผิวไหลหายไป

มีการประมาณกันว่าในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น เช่น ทางตะวันออกของสหรัฐ ฯ บริเวณพื้นผิวที่เป็นหินปูนจะมีระดับต่ำลง 1 ฟุตในทุก ๆ 10,000 ปี ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการกัดกร่อนหินปูนเพียงอย่างเดียว

ในดินบางอย่างซึ่งอุดมไปด้วยซากเน่าเปื่อยของต้นพืช จะทำให้มีกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นในสารละลายในดิน และกรดเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับผิวแร่ทำให้เกิดการผุพังทางเคมี เกลือซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของกรดแต่ละชนิดจะถูกพัดพาซึมผ่านชั้นดินลงสู่น้ำใต้ดิน และไหลลงลำธารในที่สุด



รูป 19.14 ร่องซึ่งเกิดจากการละลายของหินปูน เป็นบริเวณทางตะวันตกของลาสเวกัส เนวาดา โปรดเปรียบเทียบขนาดของร่องกับมีดพับซึ่งอยู่กลางภาพ

กระบวนการผุพังที่กล่าวมาข้างบนนั้น ทั้งกระบวนการทางกายภาพและเคมี เป็นกระบวนการที่เกิดอย่างกว้างขวาง แต่จะสร้างลักษณะภูมิประเทศขนาดใหญ่ที่เด่นชัดขึ้นมาน้อยมากที่จะดึงดูดความสนใจของคนโดยทั่วไปได้ อย่างไรก็ตาม กระบวนการเหล่านี้มีความสำคัญต่อวิวัฒนาการของพื้นลาดมากในลักษณะของการช่วยตระเตรียมหินฐาน เพื่อให้กลายเป็นดินและเพื่อเกิดการวิวัฒนาการโดยตัวการกัดกร่อนพื้นดิน ถ้าปราศจากกระบวนการผุพังนี้แล้ว พืชก็จะไม่สามารถเจริญเติบโตอยู่ได้อย่างที่เห็นอยู่ในปัจจุบัน หรือพื้นดินบนทวีปจะไม่สามารถถูกตัวการกัดกร่อนกระทำได้ง่าย ๆ

การเคลื่อนที่ตามพื้นลาด

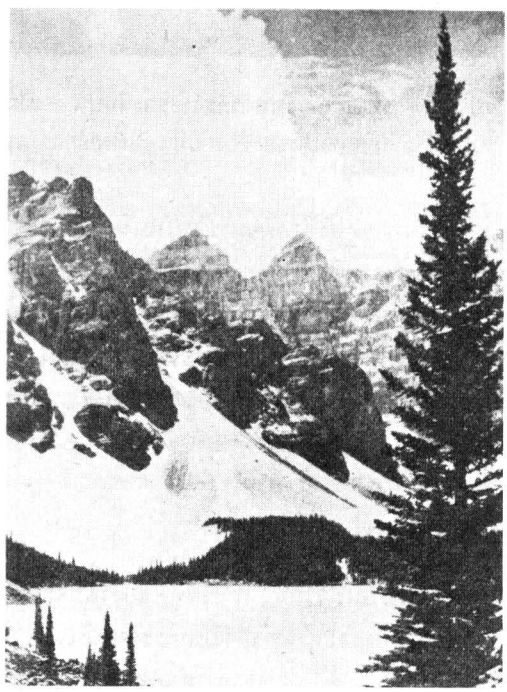
ทุกหนแห่งบนผิวโลก แรงดึงดูดของโลกจะดึงดูดวัตถุทั้งหลายให้ลงสู่ที่ต่ำ ตามปกติหินฐานจะแข็งแรงและเหมาะจะเป็นที่รองรับเนื่องจากมันจะอยู่คงที่ แต่ลาดภูเขานั้นจะชันมาก ทำให้หินเคลื่อนไปตามพื้นลาดได้ หินฐานที่หักออกจะหล่นหรือเลื่อนอย่างอิสระแล้วไปหยุดอยู่ ณ ตำแหน่ง

ใหม่ ในกรณีที่มวลหินขนาดใหญ่เคลื่อนลงมาจะเป็นผลทำให้เกิดความเสียหายแก่ทรัพย์สินและชีวิตของคนที่ตั้งบ้านเรือนอยู่ในบริเวณที่ขวางทางการเลื่อนไหล ดินและวัตถุที่ผุพังเป็นวัตถุที่จับตัวเป็นก้อนได้ยาก แต่จะเคลื่อนที่ไปตามแรงดึงดูดของโลกได้ง่าย เหตุการณ์เช่นนี้มักจะเกิดขึ้นบนพื้นลาดทุกแห่ง อย่างน้อยการร่วงหล่นไปตามลาดเขาของวัตถุเล็ก ๆ ก็จะมีอยู่เป็นประจำ ซึ่งเราอาจจะมองไม่เห็น แต่บางครั้งวัตถุที่ผุพังก็อาจเลื่อนหรือไหลอย่างรวดเร็ว

ทุกชนิดของการเคลื่อนที่ตามพื้นลาดโดยการกระทำของแรงดึงดูดของโลก เราเรียกรวมกันว่า "การเคลื่อนที่ตามพื้นลาด" (mass wasting) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้เป็นกระบวนการสำคัญในการเคลื่อนย้ายมวลวัตถุและการกัดกร่อนแผ่นดิน การเคลื่อนที่ตามแรงดึงดูดของโลกและผลที่มีต่อลักษณะภูมิประเทศจะได้อธิบายเพียงสองสามชนิด

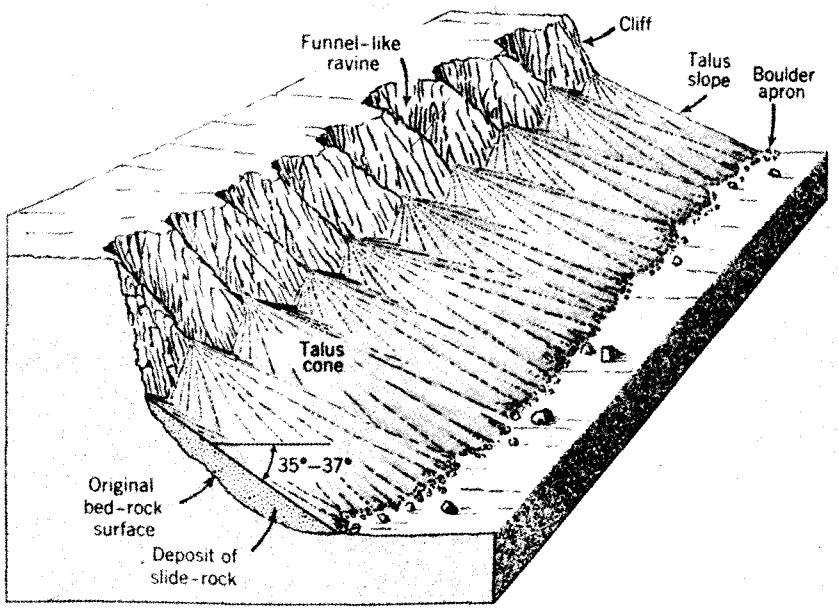
ลานหินตื้นผารูปกรวย (talus cone)

บริเวณหุบเขาแคบที่มีผนังหุบเขาอยู่ใกล้กัน และเป็นภูเขาสูงจะมีอนุภาควัตถุจำนวนมหาศาลที่หักพังตามกระบวนการทางกายภาพโดยเฉพาะการกระทำของน้ำแข็ง เมื่ออนุภาคเหล่านั้นหล่นมาทับถมในบริเวณเดียวกันจะทำให้เกิดลานหินตื้นผารูปกรวย (talus cone ดูรูป 19.15) ความลาดของลานหินหรือที่นิยมเรียกว่าลาดลานหินพัง (scree slope) นั้นมักจะรักษามุมลาดให้คงที่ประมาณ 34 องศา หรือ 35 องศาในขณะที่ลานหินเกิดขึ้นใหม่ ๆ ซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กละเอียดผสมกับอนุภาควัตถุหยาบ ๆ มุมที่คงที่นั้นจะเปลี่ยนไปราวหนึ่งหรือสององศา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของหินและรูปร่างของก้อนหิน



รูป 19.15 กรวยทาลัส เกิดขึ้นตรงฐานของเซิร์กซึ่งเกิดจากการกระทำของน้ำแข็ง เป็นบริเวณทะเลสาบมอเรน เทือกเขาแคนาเดียนรอกกี

หน้าผาส่วนมากจะมีรอยบากเป็นหุบเขาลึก (ravine) แคบ ๆ ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุโมงค์ให้เศษหินเคลื่อนที่ไปรวมกัน ทำให้เกิดลานหินตื้นผารูปเหมือนกรวยขึ้นตลอดหน้าผา ขนาดของวัตถุที่ทำให้เกิดลานหินจะมีขนาดต่าง ๆ กัน ก้อนที่มีขนาดใหญ่จะมีกำลังเคลื่อน (momentum) สูง จึงกลิ้งไปบนพื้นลาดได้ง่ายและไปได้ไกล หินขนาดใหญ่ จะทำหน้าที่เป็นฐานกรวย ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะอยู่ที่ยอดกรวย ขนาดของวัตถุจะมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จากฐานกรวยและเล็กสุดที่ยอดกรวย (ดูรูป 19.16)



รูป 19.16 ภาพตามจินตนาการแสดงการเกิดกรวยทาลัส บริเวณเชิงผา ซึ่งควรจะสูงประมาณ 200–500 ฟุต (60–150 เมตร)

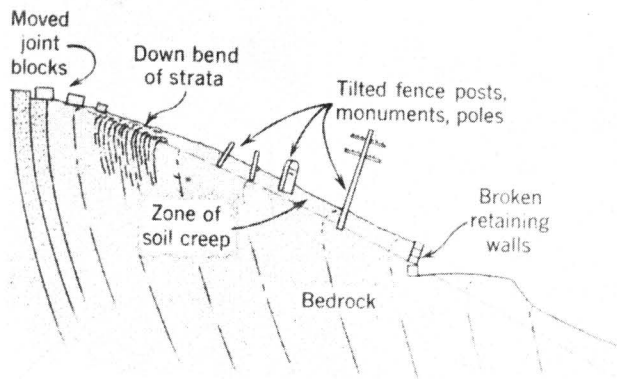
ลานหินที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ มักจะไม่คงทน ดังนั้น การรบกวนเพียงแต่เดินข้ามลานหินนั้น หรือทิ้งก้อนหินก้อนใหญ่ ๆ ลงไปจากหน้าผา ก็จะทำให้วัตถุบนลานหินนั้นเลื่อนไปได้ง่าย บนมุมที่วัตถุซึ่งหยาบ แข็ง จะคงสภาพอยู่ได้เราเรียกว่า "มุมพิง" (angle of repose) ความลาดที่ไม่คงทนของมุมพิงมักจะพบในเนินทรายด้านอับลม

ดินคืบ (soil creep)

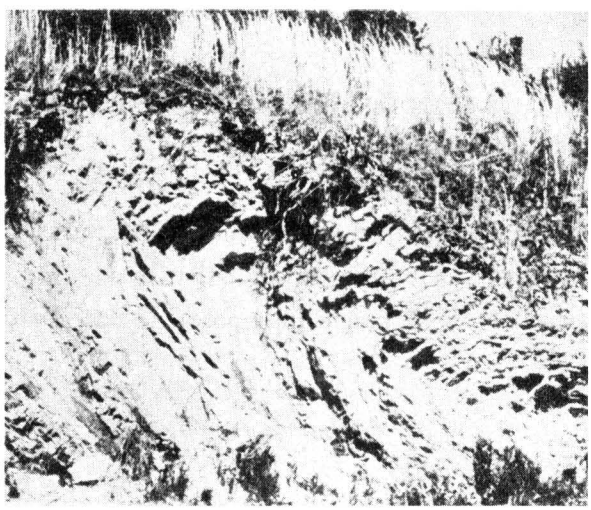
พื้นลาดที่มีความลาดปานกลางและมีดินปกคลุม จะมีปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นคือดินและวัตถุที่ผุพังจะค่อย ๆ เคลื่อนไปตามลาดชันอย่างช้า ๆ กระบวนการนี้เรียกว่า "ดินคืบ" (soil creep)

จากรูป 19.17 แสดงให้เห็นปรากฏการณ์บางอย่างของกระบวนการนี้ที่ดำเนินไป รอยแยกของหินชนิดหนึ่งจะเคลื่อนลงไปตามพื้นลาดห่างออกไปจากหินโผล่ ในหินที่เป็นชั้นบางชนิด เช่น หินดินดาน หินชนวน ขอบของชั้นหินดูเหมือนว่าจะโค้งงอไปทางต่ำของพื้นลาด ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของรอยแยกเล็ก ๆ จำนวนมากมาย (ดูรูป 19.18) เสารั้ว เสาโทรเลข จะเอียงลงไปตามพื้นลาด การเคลื่อนนี้บางทีก็เปลี่ยนที่ไปจากแนวเดิม พื้นถนนที่ตัดผ่านพื้นลาดจะเอียงและหักด้วยแรงดันจากดินคืบที่คืบมาจากด้านบน

สาเหตุที่ทำให้เกิดดินคืบ ความร้อนและความเย็นของดิน การเติบโตของแท่งน้ำแข็ง ความแห้งแล้งสลับกับความชุ่มชื้นของดิน สัตว์ที่เคยผ่านไปมาและการขุดโพรงของสัตว์ การสั่นสะเทือน



รูป 19.17 ดินคืบค่อย ๆ เคลื่อนที่ลงไปตามพื้นลาด



รูป 19.18 ดินคืบค่อย ๆ เคลื่อนที่ทำให้ชั้นหินทรายโค้งงอ

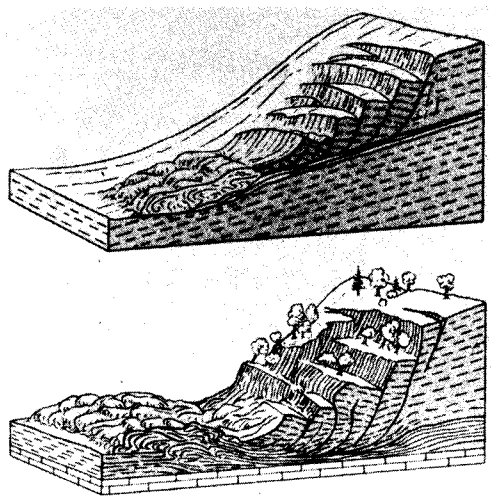
จากแผ่นดินไหว ทั้งหมดนี้จะทำให้ดินและเปลือกโลกชั้นใน (mantle) ถูกรบกวนและแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่อวัตถุทั้งมวลอยู่แล้ว จะช่วยดึงวัตถุเหล่านั้นให้เคลื่อนที่ไปตามพื้นลาดอยู่ตลอดเวลา

การคืบนี้มีผลต่อก้อนหินขนาดใหญ่ที่ฝังอยู่ในดิน หรือวางตัวอยู่บนพื้นผิวโดยไม่มีอะไรปกคลุมเลย ก้อนหินขนาดใหญ่นี้จะค่อย ๆ คืบลงไปตามลาดภูเขาเป็นจำนวนมากและไปสะสมกันอยู่ที่เชิงเขาทำให้เกิดลานก้อนหิน (boulder field) ขึ้น

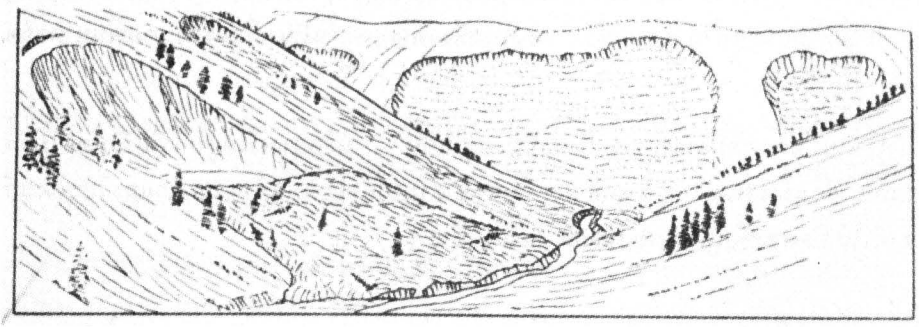
ดินไหล (earthflow)

ในเขตภูมิอากาศชื้น พื้นลาดที่ลาดมาก มวลดิน วัตถุที่ผุพัง และหินฐานที่ชุ่มไปด้วยน้ำจะค่อย ๆ ไหลลงไปตามความลาดในรูปของ "ดินไหล" เป็นเวลาสองสามชั่วโมง รูป 19.19–19.20 เป็นรูปแสดงการไหลของดินว่าทรุดต่ำลงไปได้อย่างไร ทำให้เกิดชั้นแบบขั้นบันได (steplike terrace) โดยมีผาชันโค้ง (arcuate scarp) เป็นกำแพง และการไหลลงสู่ที่ต่ำทำให้เกิดกองดินรูป "นิ้วหัวแม่เท้า" ซึ่งรอยย่นจะโค้งนูนลงไปตามพื้นลาด

ดินไหลที่เกิดตื้น ๆ อาจเกิดขึ้นกับดินและวัตถุที่ผุพังอยู่กับที่ซึ่งมีหญ้าขึ้นปกคลุมอยู่บนพื้นลาดและดินที่ชื้นด้วยน้ำในช่วงฝนตกหนัก ดินไหลนี้อาจเกิดในบริเวณแคบ ๆ ที่มีพื้นที่สองสามตารางหลา หรืออาจจะเกิดเป็นพื้นที่กว้างนับได้หลายเอเคอร์ ถ้าหินฐานนั้นอุดมไปด้วยดินเหนียว (หินดินดานหรือหินอัคนีที่ผุพังลงไปลึกมาก ๆ) ดินไหลอาจจะทำให้หินฐานเลื่อนไปนับล้านตัน การเคลื่อนนั้นมีลักษณะเหมือนโคลนขนาดมหึมาเคลื่อนที่ไป

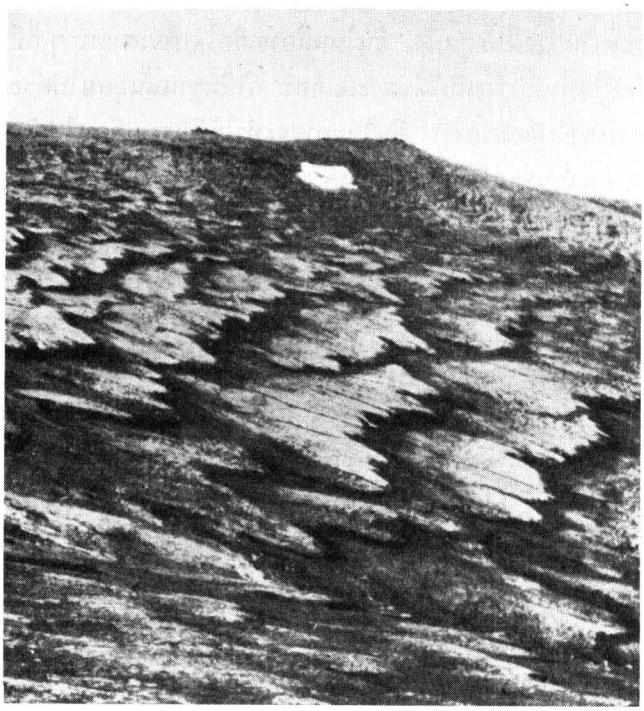


รูป 19.19 ดินไหล 2 ชนิด



รูป 19.20 ดินไหลในเขตภูเขา

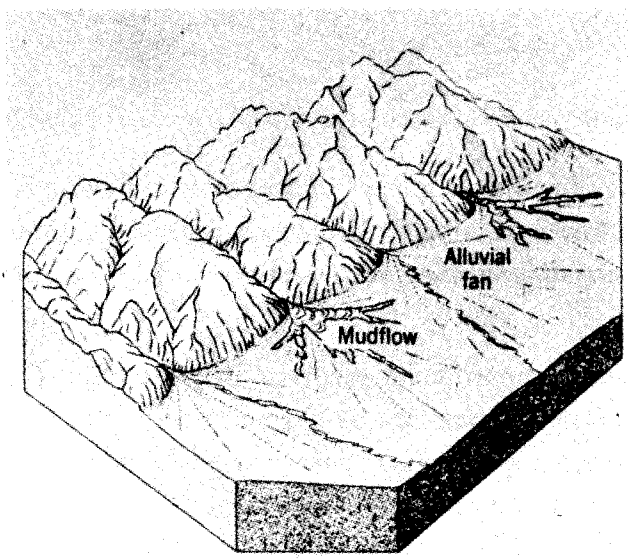
ลักษณะของดินไหลในเขตอาร์กติกนั้นมีลักษณะพิเศษ เราเรียกว่า โซลิฟลักชัน (solifluction) (มาจากคำภาษาละติน แปลว่าดินและไหล) ในช่วงตอนปลายของฤดูใบไม้ผลิและต้นฤดูร้อน เมื่อหิมะที่อยู่บนพื้นดินละลาย ดินก็จะอิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งน้ำนั้นไม่สามารถจะซึมลงไปใต้ดินได้ เพราะใต้ดินน้ำยังคงขังอยู่ ดินจึงไหลไปเกือบทั้งหมด ดินที่ชุ่มไปด้วยน้ำจะทำให้เกิดชั้นและลอน (lobe) ซึ่งจะทำให้เชิงเขามีลักษณะเป็นขั้นบันได (ดูรูป 19.21)



รูป 19.21 โคลนซึ่งเกิดจากน้ำแข็งในดินหลอมเหลวแล้วไหลไปตามพื้นลาด ภาพนี้เป็นบริเวณลาดเชิงเขาในอะแลสกาซึ่งมีภูมิอากาศแบบทุนดรา

โคลนไหล (mudflow)

การเคลื่อนที่ตามพื้นลาดอีกชนิดหนึ่งคือ "โคลนไหล" ลำธารโคลนจะไหลลงสู่โกรกเขาในเขตภูเขา (ดูรูป 19.22) ในเขตทะเลทรายบริเวณซึ่งไม่มีพืชปกคลุมดินในเขตภูเขา พายุฝนในท้องถิ่นจะทำให้เกิดฝนตกอย่างรุนแรงจนพื้นดินดูดซึมน้ำไม่ทัน ในขณะที่น้ำไหลลงไปตามลาดเขาจะทำให้เกิดน้ำโคลนบาง ๆ ขึ้น แล้วไหลต่อไปยังพื้นของโกรกเขา เมื่อไหลลงสู่ลำธารโคลนก็จะไหลต่อไปอีกจนมันหนามาก และเคลื่อนต่อไปไม่ได้มันจึงจะหยุด โคลนนี้อาจจะพัดพาก้อนหินขนาดใหญ่ ๆ ติดไปด้วย ถนนสะพาน และบ้านที่อยู่ในพื้นโกรกเขาจะถูกทำลายโดยโคลนท่วม ถ้าโคลนไหลออกมาจากโกรกธารและไหลข้ามที่ราบเชิงเขา (piedmont plain) ชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนก็จะถูกทำลายลงทั้งนี้เนื่องจากในเขตทะเลทรายที่ราบมักจะอยู่ติดกับเชิงเขา



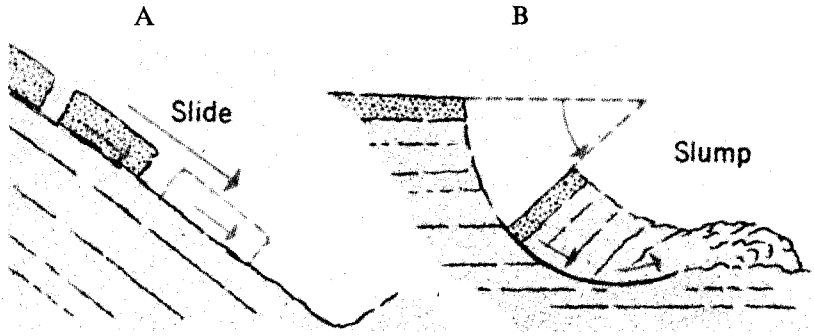
รูป 19.22 โคลนไหลเป็นแผ่นบาง ๆ คล้ายกับลำน้ำ โดยไหลลงจากหุบผาไปสู่ปากหุบเขาทำให้เกิดเนินตะกอนรูปพัด

โคลนไหลอาจเกิดได้ตามลาดภูเขาไฟที่ระเบิดขึ้นมา เถ้าและฝุ่นจากภูเขาไฟที่ตกลงถึงพื้นลาดจะกลายเป็นโคลนได้ เนื่องจากเมื่อฝนตกหนักโคลนจะไหลไปตามพื้นลาดของภูเขาไฟ เมืองเฮอร์คิวเลเนียม ซึ่งตั้งอยู่เชิงภูเขาไฟวิสุเวียสได้ถูกโคลนไหลท่วมในช่วงที่ภูเขาไฟระเบิดในปี ค.ศ. 79 ในขณะที่เมืองปอมเปอี ซึ่งอยู่ใกล้เคียงจมอยู่ใต้เถ้าถ่านภูเขาไฟ

แผ่นดินถล่ม (landslide)

แผ่นดินถล่ม คือการที่มวลดินหินถล่มลงมาอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีการไหลน้อยมากหรือไม่มีเลย แผ่นดินถล่มมีรูปแบบพื้นฐานสองรูปแบบด้วยกันคือ (A) หินถล่ม คือการที่หินฐานเลื่อนไปบน

พื้นลาดเอียงเสมอตามระนาบหินฐาน (B) แผ่นดินทรุด (slump) คือการเลื่อนแล้วมีการหมุนกลับข้างหลัง ทำให้มีผิวโค้งเกิดขึ้นด้านหลัง



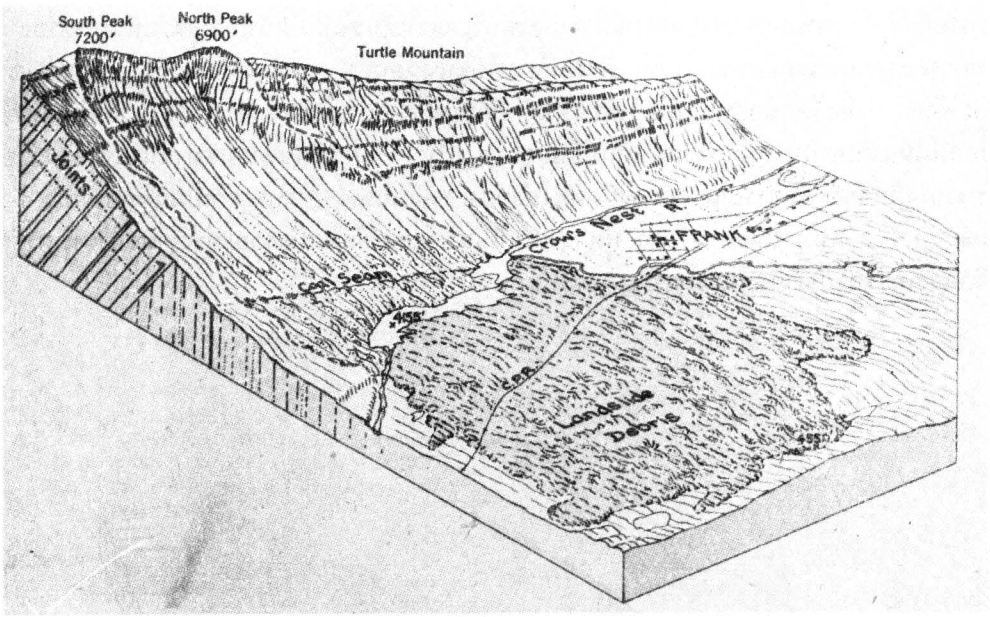
รูป 19.23 แผ่นดินถล่ม (A) เคลื่อนที่ไปตามระนาบราบ หรือ (B) ทรุดพร้อมกับหมุนกลับหลังไปตามพื้นลาดโค้ง

ในบริเวณภูเขาที่มีความลาดชันมาก ๆ หินถล่มอาจทำให้เกิดความหายนะอย่างใหญ่หลวง ในสวิตเซอร์แลนด์ นอรเว และเทือกเขารอกกีในแคนาดา หมู่บ้านที่ตั้งอยู่ในหุบเขาแคบ ๆ บางครั้งจะถูกทำลาย และประชาชนต้องเสียชีวิตจากการถล่มของหินนับล้านลูกบาศก์หลาที่ถล่มลงมา โดยไม่มีการเตือนภัย

แผ่นดินถล่มจากภูเขาเทอร์เทิลเมื่อปี ค.ศ. 1903 ในรัฐแอลเบอร์ตา ดังรูป19.24 ในหน้า 75 ซึ่งหินปูนถล่มมาจำนวนมหาศาลประมาณถึง 35 ล้านลูกบาศก์หลา (27 ล้านลูกบาศก์เมตร) ถล่มลงสู่ที่ต่ำเป็นระยะทาง 3,000 ฟุต (900 เมตร) เศษหินเหล่านั้นได้ถล่มทับเมืองแฟรงค์บางส่วน คนสูญหายไป 70 คน ความหายนะแบบเดียวกันนี้ได้เกิดขึ้นอีกเมื่อปี ค.ศ. 1956 ในรัฐมอนตานา เมื่อเกิดแผ่นดินไหว (แผ่นดินไหวที่ทะเลสาบเฮบเกน วัดตามมาตราริชเตอร์ได้ 7.1) ทำให้ด้านหนึ่งของภูเขาถล่มลงสู่ร่องน้ำในหุบเขาแมดิสัน มีคนเสียชีวิต 27 คน (ดูรูป 19.25 ในหน้า 75) การถล่มครั้งนี้ทำให้เกิดเขื่อนจากวัตถุที่ผุพังสูงถึง 200 ฟุต (60 เมตร) และทำให้เกิดทะเลสาบใหม่ หินที่ถล่มครั้งนี้มีปริมาณพอ ๆ กับการถล่มที่เขาเทอร์เทิล ทะเลสาบนั้นปัจจุบันนี้มีการปรับปรุงให้คงทน โดยทำทางน้ำล้น (spillway) เป็นทางระบายน้ำ แผ่นดินไหวเป็นสาเหตุสำคัญของแผ่นดินถล่ม รวมทั้งทำให้เกิดดินไหลและการเคลื่อนที่อื่น ๆ ด้วย

บางครั้งหินถล่มก็ไม่ทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก เพราะมักจะเกิดในบริเวณภูเขาที่มีคนอาศัยอยู่น้อย การถล่มเล็ก ๆ น้อย ๆ อาจมีผลเพียงขวางกั้นทางคมนาคม เช่น ถนนหรือทางรถไฟ

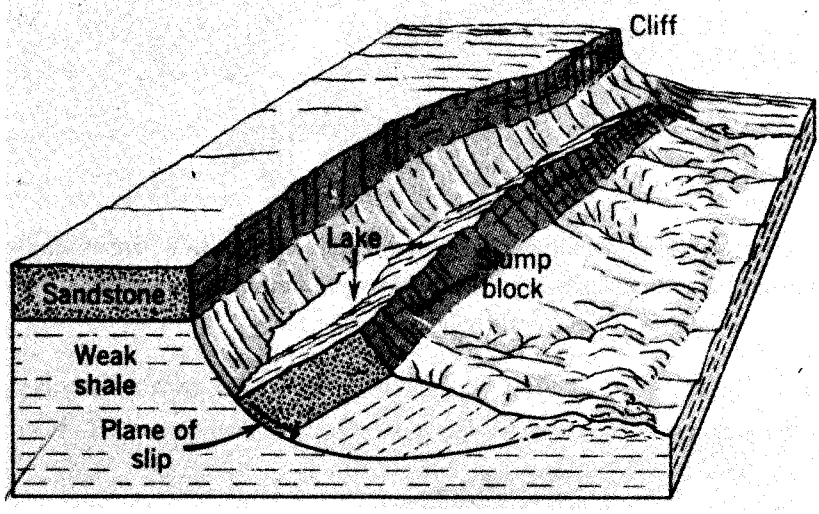
รูปแบบที่สองของแผ่นดินถล่มก็คือ เกิดการทรุดตัวเป็นแผ่น (slump block) คือ มวลหินฐานจำนวนมหึมาหรือวัตถุที่ผุพังถล่มลงมาจากหน้าผา ขณะเดียวกันก็หมุนกลับหลังรอบแกน



รูป 19.24 ตัวอย่างความหายนะจากแผ่นดินถล่ม เป็นแผ่นดินถล่มที่ภูเขาเทอร์เทิล ซึ่งเกิดขึ้นที่เมืองแฟรงค์ รัฐแอลเบอร์ตา ในปี ค.ศ. 1903 มวลหินปูนจำนวนมหึมาถล่มลงไปสู่เชิงเขา จากยอดเขาซึ่งอยู่สูงถึง 6,900–7,200 ฟุต

รูป 19.25 แผ่นดินเลื่อนแมดิสัน เกิดทางตะวันตกเฉียงใต้ของมอนตานา ภาพนี้ถ่ายทันทีที่เกิดแผ่นดินถล่ม ดินถล่มไปปิดแม่น้ำแมดิสันทำให้เกิดทะเลสาบขึ้นทางต้นน้ำ ทะเลสาบนี้ได้ชื่อว่าทะเลสาบเอิร์ทเควค ภายในสามสัปดาห์ทะเลสาบนี้ลึกเกือบ 200 ฟุต (60 เมตร)

ระนาบด้วย ตามปกติปรากฏการณ์นี้จะเกิดในบริเวณชั้นหินชั้นที่เป็นหินทรายหรือหินปูนหรือแผ่นลาวาวางตัวอยู่บนวัตถุที่อ่อนกว่า เช่น ดินเหนียวหรือชั้นหินดินดาน หน้าผาชันจะเกิดจากการกัดเซาะและพัดพา เมื่อวัตถุที่อ่อนกว่าที่อยู่ใต้ชั้นหินถูกกัดเซาะไปจากหน้าผา ทำให้เกิดโพรงใต้ชั้นหินขึ้น เมื่อแผ่นหินนั้นทานน้ำหนักของแผ่นหินที่ยื่นออกไปไม่ไหว แผ่นหินขนาดมหึมานั้นจะหักและเลื่อนลงพร้อมกับเอียงกลับข้างหลัง ทำให้เกิดพื้นโค้งของการเลื่อนขึ้น การทรุดตัวเป็นแผ่นอาจยาว 1—2 ไมล์ (1.5—3 กม.) และหนา 500 ฟุต (แผ่นหินนั้นจะกลายเป็นสันเขาอยู่ตรงฐานของหน้าผาที่ต่ำหรือแอ่งทะเลสาบจะเกิดขึ้นระหว่างแผ่นหินนั้นกับหน้าผา)

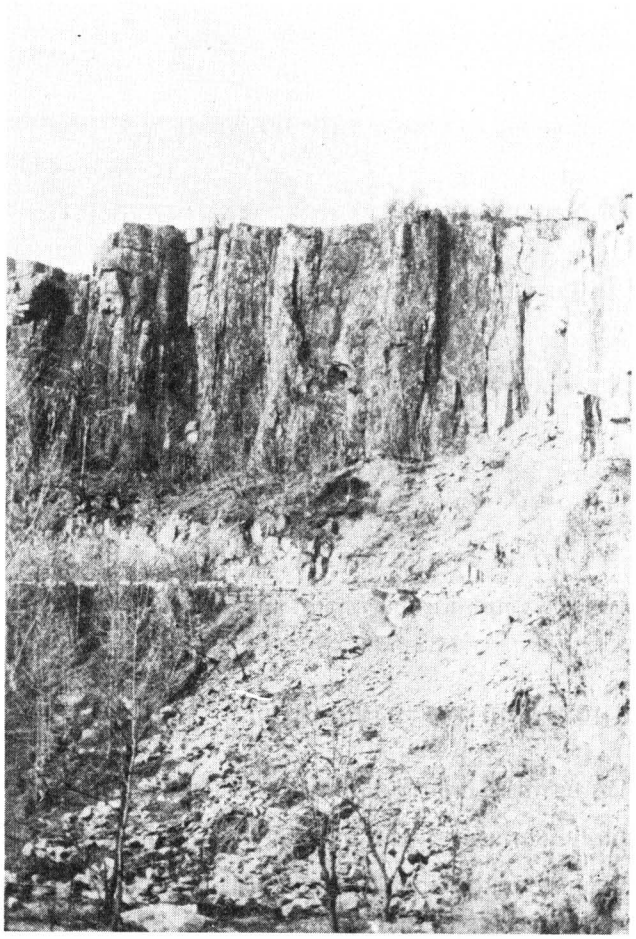


รูป 19.26 การเกิดแผ่นดินทรุด

หินตกและลานหินตีนผา

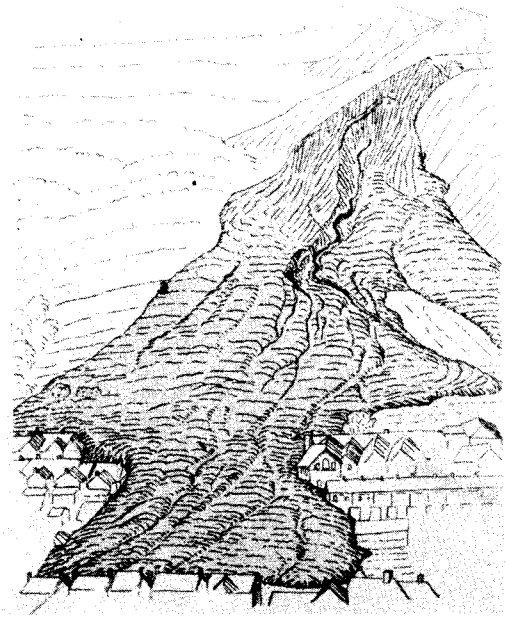
กระบวนการเคลื่อนที่ตามความลาดชันที่มีความเร็วที่สุดคือ "หินตก" (rockfall) เป็นการตกหรือกลิ้งของก้อนหินอย่างอิสระจากหน้าผา ก้อนหินก้อนหนึ่งอาจมีขนาดเล็ก ๆ จนถึงขนาดใหญ่มาก ก้อนหินใหญ่ที่แตกแล้วจะตกลงไปตามพื้นลาดลงสู่ที่ต่ำพร้อมกับเศษหินเล็ก ๆ และจะทิ้งร่องรอยไว้ให้เห็นบนหน้าผา

ปรากฏการณ์ที่เกิดในบริเวณภูเขาสูง ซึ่งการกัดกร่อนของน้ำแข็งทำให้เกิดผาชันและจะมีเศษหินจำนวนมหาศาลเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากธารน้ำแข็งอยู่ในที่สูง จึงทำให้เกิดหิมะถล่มมาพร้อมหินจากยอดเขา (alpine debris avalanche) เศษหินผสมกับน้ำแข็งที่ถล่มลงมาจะทำให้เกิดภูมิภาพรูปลิ่นของเศษหินและน้ำแข็งไหลลงสู่หุบเขา โดยมีความเร็วน้อยกว่าการกลิ้งอย่างอิสระเพียงเล็กน้อย



รูป 19.27 หินตกบริเวณผาพาริเสด ริมฝั่งแม่น้ำฮัดสัน ซึ่งอยู่ทางเหนือของสะพานยอร์ชวอชิงตัน ปรากฏการณ์นี้เกิดเมื่อเดือนพฤศจิกายน 1955 เมื่อหินเกือบ 1,200 ตันแตกและตกลงมา

ความหายนะอันเนื่องจากหิมะถล่มที่เกิดในยุคปัจจุบันนี้ คือ หิมะที่ถล่มจากยอดเขาแอนดิสในประเทศเปรู เมื่อ ค.ศ. 1970 สาเหตุเนื่องมาจากแผ่นดินไหว (มีความรุนแรงวัดตามมาตราริชเตอร์ได้ 7.7) และมีหิมะจำนวนมหึมาถล่มลงมาจากยอดเขาเฮาส์คาแรม ทำให้คนตายมากมายรวมทั้งสิ่งก่อสร้างหักพัง หลังจากที่หิมะและเศษหินกลิ้งมาอย่างอิสระ ถึง 3,000 ฟุต (900 ม.) หิมะก็ละลายทำให้ก้อนกรวดที่ติดมาด้วยเคลื่อนที่ต่อไป การหล่นลงสู่หุบเขานั้นคำนวณความเร็วได้ถึง 300 ไมล์ (480 กม.) ต่อชั่วโมง ก้อนหินและหิมะถล่มจะเคลื่อนเข้าปะทะเมือง Yungay และหมู่บ้านใกล้เมืองนั้นหลายหมู่บ้าน ทำให้คนตายจากหิมะถล่มรวมกับแผ่นดินไหวมีจำนวนหลายพันคน



รูป 19.28 ภาพนิ้สเก็ตจากภาพถ่ายเป็นปรากฏการณ์ที่เศษหินไหลลงมาที่เมืองอะเบอร์แฟน

การเคลื่อนที่ตามพื้นลาดจากการกระทำของมนุษย์

กิจกรรมของมนุษย์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตามพื้นลาดตั้งแต่ลักษณะของโคลนไหลและดินไหลจนกระทั่งถึงหินถล่มและแผ่นดินทรุดนั้น ได้แก่ (1) การกองดินกองหินให้ทับถมกันในลักษณะที่ไม่มั่นคง ซึ่งดินหินดังกล่าวจะหล่นไปเองโดยไม่ต้องมีใครกระทำ และ (2) เคลื่อนย้ายสิ่งรองรับ เช่น การทำเหมืองใต้ดินที่อยู่ใต้ผิวดินหรือวัตถุที่ผุพัง

การพังทลายของฝั่งที่เกิดจากการทำเหมืองถ่านหินเป็นแนว โดยชายฝั่งที่ไม่คงทนจะค่อย ๆ เอียงลงสู่พื้นลาดและหุบเขาเบื้องล่าง เมื่อดินเหล่านั้นชื้นไปด้วยน้ำเนื่องจากฝนตกหนักหรือหิมะละลาย ชายฝั่งนั้นจะพังทลายในรูปของดินไหลและโคลนไหลซึ่งจะไหลลงไปทับบ้าน ถนน และป่า

ความหายนะที่เกิด ณ เมืองอะเบอร์แฟน แคว้นเวลส์ เกิดเนื่องจากเนินที่เกิดจากเศษหินจากเหมืองแร่ถ่านหินที่อยู่ใกล้เคียงเอามากองไว้สูงถึง 600 ฟุต (180 เมตร) ไหลลงสู่ที่ต่ำในลักษณะของดินไหล เป็นภูมิภาพแบบลิ้นทับบางส่วนของเมืองเบื้องล่าง ทำลายโรงเรียนและคนตายถึง 50 คน

คำถามท้ายบทที่ 19

1. ลักษณะภูมิประเทศคืออะไร ธรณีสัณฐานคืออะไร ลักษณะภูมิประเทศเป็นสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญอย่างไร
2. การอธิบายลักษณะภูมิประเทศตามระบบการกำเนิดคืออะไร และแตกต่างจากการศึกษาภูมิประเทศโดยการสังเกตอย่างไร
3. การอธิบายและการจำแนกลักษณะภูมิประเทศตามโครงสร้าง กระบวนการและลำดับขั้น มีข้อดีอย่างไร จงอธิบายคำสามคำดังกล่าวนั้น
4. สิ่งใดคือสิ่งที่ใช้เป็นพื้นฐานในการจำแนกภูมิประเทศเป็นภูมิประเทศกำเนิด และภูมิประเทศตามลำดับขั้น สิ่งใดคือตัวการกัดกร่อนผิวดิน และจุดสุดท้ายของการกัดกร่อนคือสิ่งใด
5. จงอธิบายความหมายของ "ภูมิประเทศที่เกิดจากการกัดกร่อน" และ "ภูมิประเทศที่เกิดจากการทับถม"
6. จงอธิบายผลของแรงภายในโลก และแรงภายนอกโลก และกระบวนการของแรงทั้งสองที่มีต่อลักษณะภูมิประเทศ
7. จงนิยามคำว่า หินฐาน การผุพังอยู่กับที่ และดิน หินโผล่คืออะไร เศษดินหินอยู่กับที่แตกต่างจากเศษดินหินที่ถูกพัดพาอย่างไร
8. เรามีวิธีการศึกษาและทำความเข้าใจหิน และโครงสร้างของหินที่จำเป็นต่อการอธิบายลักษณะภูมิประเทศได้อย่างไร
9. คำว่า "ความลาด" มีความหมายอย่างไร
10. จงนิยามคำและจำแนกให้เห็นความแตกต่างของการผุพังและการเคลื่อนที่ตามพื้นลาด การแบ่งกระบวนการผุพังเป็นสองกลุ่มใหญ่ได้แก่อะไรบ้าง
11. จงอธิบายรูปทรงเชิงเรขาคณิตในการแตกของหิน 4 รูปทรง
12. จงกล่าวถึงกระบวนการผุพังทางกายภาพ กระบวนการนี้ต้องการน้ำหรือไม่ การผุพังที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้นได้อย่างไร กระบวนการนี้เกิดลึกลงไปในดินหรือหินฐานได้มากน้อยเพียงใด
13. ดาดหินเหลี่ยมคืออะไร ลักษณะภูมิประเทศแบบนี้เกิดขึ้นในเขตภูมิอากาศแบบใด
14. กรวยทาลัสเกิดขึ้นได้อย่างไร และโดยทั่วไปแล้วความลาดของทาลัสมีค่าเท่าใด
15. การเติบโตของผลึกหินเกลือเป็นเหตุให้หินแตกได้อย่างไร กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ดีในเขตภูมิอากาศใด รูปทรงของผลึกหินเกลือมีลักษณะเช่นไร
16. เงื่อนไขเช่นใดที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงอย่างเดียวเป็นเหตุให้หินเกิดการแตกสลาย มีหลักฐานอะไรบ้างที่แสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้เกิดขึ้นได้จริง ๆ
17. จงอธิบายลักษณะของโครงสร้างแบบแผ่น และโดมที่เกิดจากการแตกเป็นกาบ หินชนิดใดที่มีลักษณะดังกล่าว

18. จงอธิบายผลของการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่ทำให้หินผุพังทลาย
19. กระบวนการผุพังทางเคมีที่แบ่งเป็น 3 กลุ่มนั้นมีอะไรบ้าง แต่ละกลุ่มทำให้หินผุพังได้อย่างไร
20. กระบวนการไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการผุพังได้อย่างไร หินชนิดใดที่ผุพังด้วยกระบวนการนี้มากที่สุด ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากกระบวนการนี้ที่เราสามารถเห็นได้ในหินแกรนิตมีอะไรบ้าง กระบวนการไฮโดรไลซิสเกิดลึกลงไปในหินได้มากน้อยเพียงใด
21. กรดคาร์บอนิกเกิดขึ้นได้อย่างไรและมันกัดกร่อนหินได้อย่างไร หินชนิดใดที่ถูกกรดคาร์บอนิกกัดได้ดีที่สุด ลักษณะภูมิประเทศแบบใดบ้างที่เกิดจากการกัดกร่อนของกรดคาร์บอนิก มีกรดอื่น ๆ ชนิดใดบ้างที่เรามักพบอยู่ในดินเสมอ
22. การเคลื่อนที่บนพื้นลาดมีบทบาทในการกัดกร่อนภูมิประเทศอย่างไร ดินคืบมีเกิดขึ้นที่ไหนบ้าง กระบวนการกลใดบ้างที่กระตุ้นให้เกิดดินคืบ มวลหินขนาดมหึมาจะได้รับผลจากดินคืบหรือไม่ จงอธิบาย
23. จงอธิบายคำว่าดินไหล ดินไหลเพิ่มขนาดขึ้นได้อย่างไร ดินไหลจะเกิดขึ้นได้ในสภาวกาลอากาศของฤดูใดและเขตภูมิอากาศแบบใด จงอธิบายลักษณะพิเศษของดินไหลในเขตอาร์กติก
24. แผ่นดินถล่มเกิดจากการเคลื่อนไหวและวัสดุประเภทใด จงอธิบายให้เห็นความแตกต่างระหว่างหินถล่มและการทรุดตัวเป็นแผ่น
25. หินตกคืออะไร ขนาดของก้อนหินที่ตกนั้นมีขนาดเท่าใด หินถล่มคืออะไร
26. กิจกรรมของมนุษย์ทำให้เกิดดินไหลและแผ่นดินถล่มได้อย่างไร ยกตัวอย่างประกอบด้วย

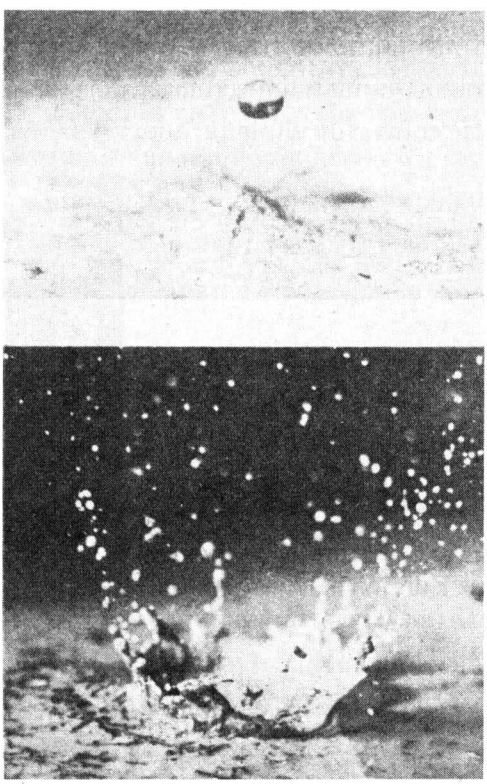
บทที่ 20
ภูมิประเทศเกิดจากการกระทำของน้ำไหล

น้ำที่ไหลบนผิวดิน (overland flow) และน้ำในลำธารเป็นสิ่งที่มีบทบาทสำคัญเชิงธรณีวิทยา กล่าวคือ เป็นตัวการกัดกร่อนภูมิประเทศที่สำคัญ น้ำไหลไม่เพียงแต่จะไหลหมุนเวียนไปตามวัฏจักรของน้ำเท่านั้น แต่ยังพัดพาแร่ธาตุจากพื้นดินลงสู่ทะเล มหาสมุทรอีกด้วย ในบทนี้จะกล่าวถึงการกระทำของน้ำไหลบนแผ่นดินในลักษณะที่ว่าน้ำไหลเป็นตัวการของการกัดกร่อนและการทับถม เราจะเริ่มศึกษาถึงการกระทำของน้ำไหลบนผิวดินแบบพื้นลาดของแผ่นดินก่อน แล้วจึงมาศึกษาถึงการกระทำของน้ำไหลในลำธารซึ่งเป็นน้ำไหลในร่องน้ำ

การกัดกร่อนพัดพาโดยน้ำไหลบนผิวดิน

น้ำที่ไหลบนผิวดินจะมีแรงกวาด (draging force) ไปตามพื้นดิน แรงนั้นจะดึงอนุภาคของแร่ธาตุซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กันขึ้นมา โดยมีขนาดตั้งแต่อนุภาคดินเหนียวจนถึงทรายหยาบหรือกรวดมน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วของการไหลของน้ำ และอัตราการยึดอนุภาคเหล่านั้นด้วยรากพืชหรือปกคลุมด้วยใบไม้

บนพื้นผิวที่ไม่มีอะไรปกคลุม ซึ่งตามปกติมักเป็นดินในเขตแห้งแล้งหรือในเขตชุ่มชื้นที่มนุษย์ทำการถางพื้นที่เพื่อการเพาะปลูกหรือการปรับระดับเพื่องานก่อสร้าง เมื่อฝนตก พื้นผิวดินจะถูกกัดกร่อนโดยร่วมกับการกระทำของน้ำไหลบนพื้นผิว แรงของหยดน้ำฝนที่ตกลงมา (ดูรูป 20.1) ทำให้ดินกระเด็นขึ้นมา อนุภาคดินที่กระเด็นขึ้นนี้จะตกลงไปอยู่ ณ ตำแหน่งใหม่ กระบวนการนี้เรียกว่า "การกัดกร่อนพัดพาแบบกระเด็น" (splash erosion) มีการประมาณกันว่าพายุฝนแรง ๆ สามารถทำให้ดินเคลื่อนที่

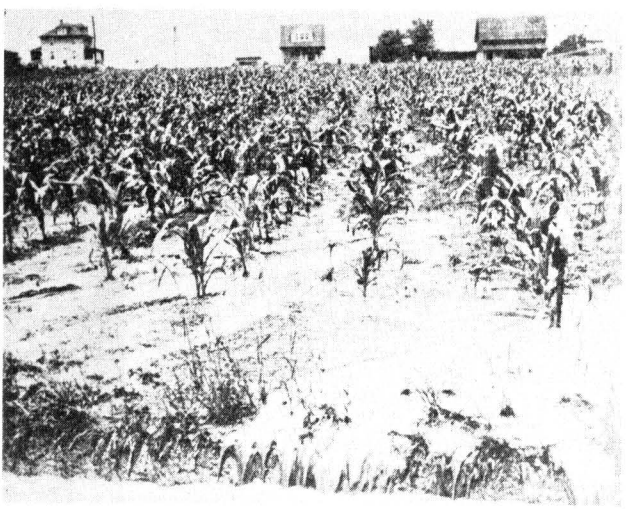


รูป 20.1 เม็ดฝนขนาดใหญ่ (บน) ตกลงไปบนดินโคลน ทำให้เกิดเป็นหลุมเล็ก ๆ (ล่าง) เม็ดโคลนกระเด็นขึ้นสู่อากาศ

ไปไกลถึง 100 ตันต่อพื้นที่หนึ่งเอเคอร์ (225 เมตริกตัน/เฮคเตอร์) บนพื้นที่ลาดชัน การกัดกร่อนในลักษณะนี้มีแนวโน้มว่าจะดึงให้ดินค่อย ๆ เคลื่อนลงไปจากเนินเขา ยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้สมรรถภาพในการดูดซึมของดินลดลง ทั้งนี้เนื่องจากรูดินตามธรรมชาติจะถูกเม็ดดินที่กระเด็นมาปิดปากรูไว้ การลดสมรรถภาพในการดูดซึมนี้มีผลทำให้อัตราความลึกและความเร็วของการไหลบนพื้นผิวจะเพิ่มขึ้น และอำนาจในการพัดพาเม็ดดินจะมีมากขึ้นด้วย

บริเวณพื้นดินที่มีพืชปกคลุมจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนพัดพาของน้ำบนผิวดิน บนพื้นที่ลาดชันที่มีพืชปกคลุม แม้ว่าน้ำไหลบนผิวดินจะแรงมากแต่ดินก็จะถูกพัดพาไปเพียงเล็กน้อย เนื่องจากพลังงานการเคลื่อนที่ของน้ำลดลงเพราะแรงฝืดที่ปะทะต้นพืชที่เอนไปมาหรือลู่ไปตามน้ำได้ ลักษณะเช่นเดียวกันนี้อาจเกิดขึ้นได้บนพื้นลาดในป่าไม้ ซึ่งจะมีเขื่อนเล็ก ๆ ที่เกิดจากใบไม้ กิ่งไม้ ราก และต้นไม้ที่ล้มลงเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นตัวการสกัดกั้นการไหลของน้ำบนพื้นดิน ถ้าบริเวณใดที่ไม่มีพืชปกคลุมเลย พื้นดินจะถูกกัดกร่อนโดยตรง ทำให้เม็ดดินหลุดออกมาได้ง่าย แล้วน้ำก็กวาดเม็ดดินเหล่านั้นลงไปตามพื้นลาด

สรุปได้ว่าสมรรถภาพของการกัดกร่อนพัดพา (eroding capacity) ของน้ำไหลบนผิวดินเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอัตราของหยาดน้ำฟ้าและความยาวของพื้นลาด แต่จะเป็นสัดส่วนผกผันกับสมรรถภาพการดูดซึม (infiltration capacity) ของดิน และการต้านทานของผิวดิน เพื่อให้สมการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น เราต้องรวมความลาดของพื้นที่ด้วย เป็นที่ปรากฏชัดว่าพื้นดินที่มีความลาดมากกว่าน้ำจะไหลได้เร็วกว่า และการกัดกร่อนพัดพาจะเป็นไปได้นานกว่า ยิ่งไปกว่านั้นเราต้องรวมสมรรถภาพการกัดกร่อนพัดพาของน้ำไหลบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นจากมุมขอฮ่งพื้นลาดโดยตรงอีกด้วย เมื่อความลาดของพื้นที่อยู่ในลักษณะใกล้ระนาบดิ่ง ความเข้มของการกัดกร่อนพัดพาจะน้อยลง เพราะพื้นดินบริเวณนั้นจะรับน้ำฝนที่ตกมาในแนวดิ่งได้น้อยลง



รูป 20.2 น้ำไหลบนผิวดินซึ่งมีความลาด 8 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำจากฝนตกหนัก และไหลลงร่องน้ำกลายเป็นกระแสน้ำไป

การเร่งการกัดกร่อนพัดพาดิน

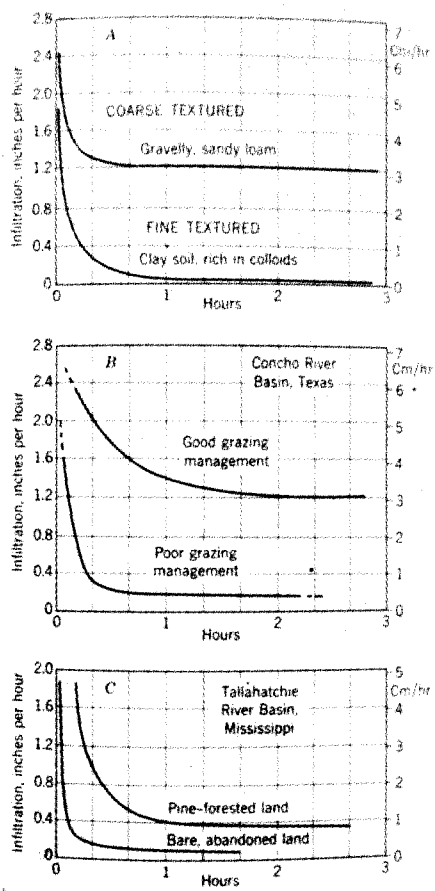
ในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้นจะมีป่าไม้ ไม้พุ่มหรือหญ้าปกคลุมพื้นดินอยู่เสมอ ทำให้การพัดพาดินซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการเชิงธรณีวิทยาในการกัดกร่อนพื้นดินเป็นไปได้ช้าลง ในสภาวะธรรมชาติอัตราการกัดกร่อนในเขตชุ่มชื้นจะเป็นไปอย่างช้า ๆ พอที่จะทำให้ดินเกิดขึ้นในแนวระนาบและคงสภาพอยู่ตลอดไปได้ ทำให้พืชสามารถเลี้ยงตัวมันเองได้ นักปฐพีวิทยาเรียกสถานภาพอย่างนี้ว่า "ภาวะปกติเชิงธรณีวิทยา" (geologic norm)

ในทางตรงกันข้าม การกัดกร่อนพัดพาดินอาจเพิ่มอัตราขึ้นมากจากการกระทำของมนุษย์หรือเมื่อปรากฏการณ์ตามธรรมชาติได้รับผลจากการเร่งการกัดกร่อนพัดพา (accelerated erosion) ซึ่งการพัดพาดินจะเป็นไปได้รวดเร็วกว่าดินที่จะเกิดขึ้นใหม่ สภาวะอย่างนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของพืชคลุมดิน และสถานภาพเชิงกายภาพของผิวดิน การโค่นถางป่าเพื่อใช้พื้นที่ทำการเกษตรกรรม หรือการเกิดไฟไหม้ป่าเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซึมต่อการไหลของน้ำบนผิวดิน เพราะทำให้หยดน้ำฝนตกปะทะพื้นดินโดยตรงโดยไม่มีเรือนยอดของต้นไม้ปะทะไว้ การปกป้องผิวดินจากใบไม้ที่หล่นทับถมพื้นดิน หรือต้นไม้ที่ล้มลงได้ถูกขนย้ายออกไป เป็นเหตุให้ฝนตกลงสู่ผิวดินได้โดยตรง

ลักษณะสำคัญของดินที่อยู่ในสถานะที่ยังไม่ถูกรบกวนก็คือ ในช่วงที่ฝนเริ่มต้นตก อัตราการดูดซึมจะสูง ทั้งนี้เนื่องจากมีช่วงแล้งมาก่อน แต่สมรรถภาพนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฝนตกต่อเนื่องกันไป และดินชุ่มชื่นไปด้วยน้ำ หลังจากฝนตกต่อไปสักสองสามชั่วโมงสมรรถภาพการดูดซึมจะคงที่ เหตุที่สมรรถภาพการดูดซึมมีมากในช่วงฝนตกใหม่ ๆ และลดลงอย่างรวดเร็วก็เพราะว่ารูเปิดในดินจะมีอนุภาคดินไหลมาปิดอย่างรวดเร็ว หรือมีแนวโน้มว่าจะปิดเนื่องจากสารในดินเหนียวซึ่งมีลักษณะคล้ายวุ้นเมื่อถูกน้ำ จากที่กล่าวมาเราคงให้เหตุผลได้ง่ายว่าทำไมดินทรายที่มีดินเหนียวน้อยหรือไม่มีเลย สมรรถภาพจึงไม่ลดลงรวดเร็ว แต่จะปล่อยให้น้ำซึมผ่านไปได้ในอัตราหนึ่ง ซึ่งตรงข้ามกับดินที่มีดินเหนียวมาก รูดินจะถูกปิดอย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการดูดซึมลดลงอย่างรวดเร็ว กฎนี้เราจะดูได้จากกราฟในรูป 20.3 นี้ ซึ่งแสดงให้เห็นเส้นกราฟของการดูดซึมของดินทั้งสองชนิด คือ ชนิดหนึ่งเป็นดินทราย อีกชนิดหนึ่งเป็นดินที่มีดินเหนียวมาก

เรากล่าวได้ว่า ดินทรายนั้นสามารถจะดูดซึมน้ำได้ดีแม้ว่าฝนจะตกหนักและตกต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน โดยที่ไม่มีน้ำไหลเกิดขึ้นบนพื้นดินนั้นเลย ในขณะที่บนพื้นดินเหนียวจะมีลักษณะตรงกันข้าม คือจะทำให้ฝนที่ตกลงมากลายเป็นน้ำไหลได้มาก กระบวนการนี้จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการกัดเซาะผิวดินให้เป็นร่อง ตัวการกีดกันสมรรถภาพการดูดซึมของพื้นดินนั้นมีหลายลักษณะ ซึ่งทำให้ดินมีสมรรถภาพการดูดซึมน้อยลงและเพิ่มปริมาณของน้ำไหลบนผิวดิน การถางพื้นที่เพื่อการเพาะปลูกทำให้ผิวดินมีสิ่งปกคลุมน้อยลง ดินจะถูกฝนชะโดยตรง ทำให้รูดินปิดอย่างรวดเร็ว ไฟป่าจะทำลายพืชคลุมดินและพื้นผิวดินขาดสิ่งปกคลุมเช่นเดียวกัน พวกสัตว์ต่าง ๆ ก็มีส่วนช่วยทำให้ดินแน่นและแข็งโดยการเหยียบย่ำดิน ทำให้ดินซึ่งโปร่งพรุนถูกอัดจนแน่นและแข็ง นอกจากนี้ การ

เกษตรกรรมและเก็บเกี่ยวผลผลิตเป็นปัจจัยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของการดูดซึมกับน้ำไหลในบางส่วน ช่วยลดอัตราการกัดกร่อนพัดพา และขณะเดียวกันก็ช่วยให้การดูดซึมความชื้นได้มากขึ้น เป็นผลให้ต้นไม้เจริญเติบโตได้และมีน้ำไหลในลำน้ำ



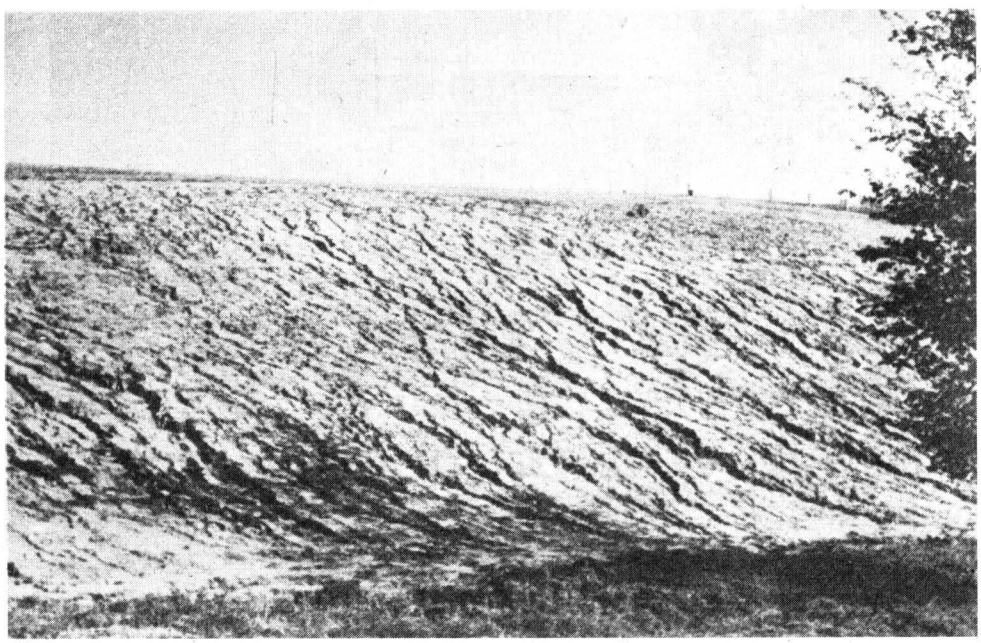
รูป 20.3 อัตราการดูดซึมจะสัมพันธ์กับเนื้อดินและการใช้ที่ดิน

รูปแบบของอัตราเร่งการกัดกร่อนและพัดพา

เมื่อพื้นดินถูกโค่นถางใหม่ ๆ และมีการไถพรวนเพื่อทำการเพาะปลูก การกัดกร่อนพัดพาจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อฝนตกกระทบพื้นดินเม็ดดินก็จะไหลไปรวมกัน รูพรุนของดินก็จะปิด ปรากฏการณ์ต่อมาก็คือน้ำไหลบนผิวดินจะเริ่มต้นพัดพาดินไปเป็นแผ่นบาง ๆ การกัดกร่อนแบบนี้เรียกว่า "การกัดกร่อนพัดพาแบบแผ่น" (sheet erosion) เนื่องจากการเพาะปลูกเป็นไปตามฤดูกาล

การกัดกร่อนพัดพาแบบแผ่นมักจะสังเกตเห็นไม่ชัด จนกระทั่งดินชั้นบน (ชั้น A – B) ถูกพัดพาไปหมด เมื่ออนุภาคดินเคลื่อนไปถึงเชิงลาด ซึ่งมุมของพื้นลาดจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงก้นหุบเขาอนุภาคดินจะทับถมกันอยู่ที่นั้นจนเป็นชั้นหนาเราเรียกว่า "ดินลาดเชิงผา" (colluvium) หรือเรียกง่าย ๆ ว่า "ดินเซาะพื้นลาด" (slope wash) ซึ่งดินนี้ก็เหมือนกับการกัดกร่อนพัดพาแบบแผ่น คือสังเกตเห็นได้ไม่ชัด แต่อาจจะสังเกตได้จากกำแพงหรือต้นไม้ที่ดินค่อย ๆ ทับถมสูงขึ้น

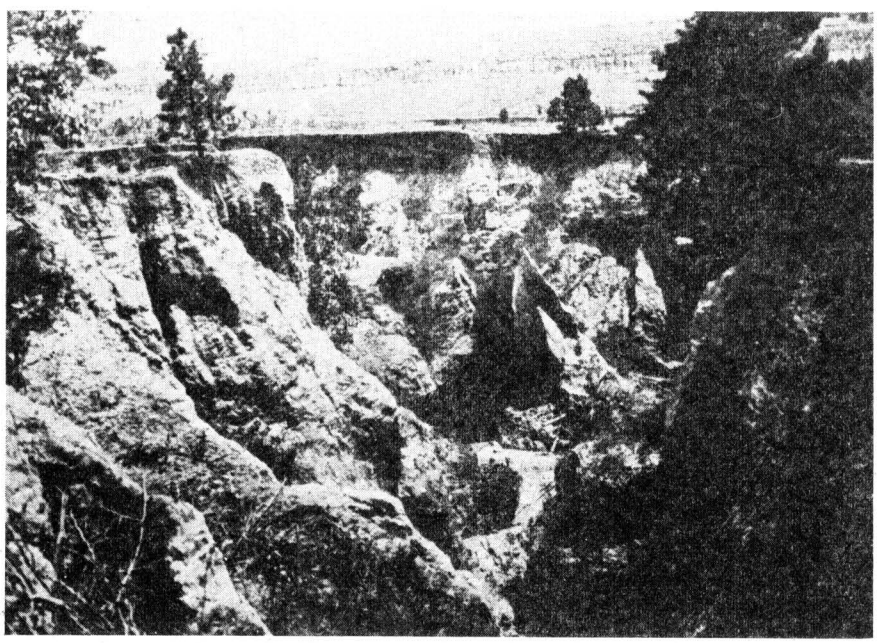
อนุภาควัตถุนั้นจะถูกน้ำไหลบนผิวดินพัดพาต่อไปจนถึงลำธารที่อยู่กึ่งกลางหุบเขา และจะถูกพัดพาต่อไปอีกจนกระทั่งถึงหุบเขาแล้วจะทับถมกันเป็นชั้น ๆ ในพื้นหุบเขา ดินนั้นก็จะกลายเป็น "วัตถุน้ำพา" (alluvium) ซึ่งคำนี้เราใช้เรียกวัตถุที่ลำน้ำพัดพามาทับถมกันไว้ ดินลาดเชิงผาและวัตถุน้ำพารวมกันนี้เป็นผลจากการทับถมของวัตถุ (sedimentation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ตรงข้ามกับการกัดกร่อนพัดพา ผลของการทับถมจะทำให้ชั้นของดินถูกฝังอยู่ใต้บริเวณที่ไม่อุดมสมบูรณ์ เช่น สันทราย และบางทีอาจทำให้ร่องน้ำในหุบเขาตื้นเขินได้ ในบริเวณที่มีความลาดมาก ๆ และน้ำไหลเกิดจากพายุฝนตกหนัก การกัดกร่อนพัดพาแบบแผ่นจะมีความรุนแรงมากขึ้นจนกลายเป็นการกัดกร่อนพัดพาแบบร่อง (rill erosion or rilling) (ดูรูป 20.4) ซึ่งเป็นการกัดกร่อนผิวดินที่ทำให้เกิดร่องน้ำเล็ก ๆ อยู่ติด ๆ กันเป็นจำนวนมากมาย เราเรียกว่าร่องแบบเชือกผูกรองเท้า (shoestring rills) เป็นระบบของทางน้ำเล็ก ๆ กัดกร่อนลงไปในดินเป็นระบบทางยาว ในบางกรณีร่องแบบเชือกผูกรอง



รูป 20.4 ร่องน้ำแบบเชือกผูกรองเท้าซึ่งเกิดบนพื้นลาดที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุม

เท้าจะมีลักษณะตามฤดูกาล คือ พัฒนาขึ้นในช่วงที่ฝนตกในฤดูร้อนและฤดูใบไม้ผลิ และจะเลื่อนไปในช่วงที่มีน้ำแข็งปกคลุมดินในฤดูหนาว ร่องน้ำนี้จะมีต่อไปอีกเมื่อหิมะละลายไปแล้ว ซึ่งระบบร่องน้ำเล็ก ๆ ชุดใหม่จะเริ่มกระบวนการใหม่ต่อไป

ร่องน้ำเล็ก ๆ ที่ไม่ถูกทำลายโดยการไถคราด ก็จะขยายมารวมกันเป็นร่องน้ำขนาดใหญ่ที่เรียกว่า "ร่องธาร" (gullies) การเปลี่ยนสภาพอย่างนี้เกิดขึ้นจากการที่ร่องน้ำเล็ก ๆ ร่องน้ำหนึ่งกัดเซาะได้เร็วกว่าร่องน้ำใกล้เคียงและรวมเอาร่องน้ำเล็กอื่น ๆ เข้าด้วยกัน ดังนั้น การกัดกร่อนพัดพาจึงทำให้เกิดร่องน้ำใหญ่ขึ้น และเมื่อลึกลงไปจะมีลักษณะเหมือนโกรกธารและด้านต้นน้ำจะขยายตัวตามความลาดขึ้นไปเรื่อย ๆ (ดูรูป 20.5) ในที่สุดจะทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศที่ขรุขระขึ้น เช่น ที่ทุรกันดาร (badland) ในเขตแห้งแล้ง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากอัตราเร่งการกัดกร่อนพัดพา การป้องกันการพังทลายโดยวิธีนี้ทำได้โดยการสร้างขั้นบันไดเพื่อลดมุมของพื้นลาด และระยะทางของการไหลของน้ำ ปลูกพืชปกคลุมพื้นลาด ทำเขื่อนดินในพื้นที่ที่มีร่องน้ำ เพื่อทำให้การกัดเซาะพัดพามีน้อยลงจนเข้าสู่สภาวะปกติเชิงธรณีวิทยา



รูป 20.5 ร่องธารขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนพัดพา เป็นปรากฏการณ์ในเขตบีดมองด์ รัฐแคโรไลนาใต้และจอร์เจีย ก่อนที่จะมีการปรับปรุงที่ดิน

การกระทำเชิงธรณีวิทยาของลำน้ำ

การกระทำเชิงธรณีวิทยาของลำน้ำ ประกอบด้วยการกระทำที่สัมพันธ์กัน 3 ประการ คือ การกัดเซาะ(erosion) การพัดพา (transportation) และการทับถม (deposition) การกัดเซาะโดยลำน้ำเป็นการขนย้ายวัตถุแร่ธาตุจากท้องธารและสองฝั่งของลำธาร ซึ่งอาจกัดกร่อนเข้าไปในหินฐานหรือวัตถุผุพังอยู่กับที่หรือวัตถุที่ถูกพัดพามา การพัดพาประกอบด้วยกระบวนการเคลื่อนย้ายวัตถุที่ถูกกัดเซาะโดยการครูด (dragging) ไปตามท้องลำธาร ในลักษณะของการแขวนลอยไปในน้ำหรือพัดพาไปในลักษณะของสารละลาย การทับถม คือการที่วัตถุที่ถูกพัดพามาสะสมอยู่ในท้องลำธารและบริเวณที่ราบน้ำท่วมถึง หรือบนพื้นที่ที่มีน้ำขังอยู่

การกัดกร่อนโดยลำน้ำ

การกัดกร่อนโดยลำน้ำนั้นเกิดได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะธรรมชาติของวัตถุที่น้ำพัดพามา ร่องน้ำและเครื่องมือที่กระแสน้ำใช้ในการกัดกร่อน เฉพาะกำลังของน้ำไหลอย่างเดียวจะกระทบและครูดไปตามท้องน้ำ รวมกับการกระทำของวัตถุน้ำพา เช่น หินกรวด ทราย ตะกอน และอนุภาคดินเหนียว การกระทำจากสิ่งเหล่านั้นเราเรียกว่า "การกระทำเชิงชลศาสตร์" (hydraulic action) อนุภาคหินที่กระแสน้ำพัดพามากระทบกับท้องน้ำหรือข้างตลิ่ง เศษหินก้อนเล็ก ๆ จะแตกออก และกลิ้งไปตามท้องน้ำ ซึ่งอาจจะมีการเสียดสีกันเองหรือครูดถูเล็กลง กระบวนการกลเหล่านี้เราเรียกว่า "การเสียดสี" (abrasion) ซึ่งเป็นกระบวนการเชิงชลศาสตร์ที่สำคัญในการกัดกร่อนท้องน้ำ กระบวน

รูป 20.6 หลุมรูปหม้อเกิดขึ้นบนพื้นหินแกรนิต อันเป็นท้องน้ำของแม่น้ำเจมส์ เมืองเฮนริโก เวอร์จิเนีย

การสุดท้ายเป็นกระบวนการเคมี ซึ่งเกิดจากการกระทำของกรดและสารละลายซึ่งเราเรียกว่า **"การผุกร่อน" (corrosion)** ผลของการผุกร่อนจะเห็นอย่างเด่นชัดในเขตหินปูน ซึ่งการเสียดสีในบริเวณนั้นเป็นไปได้ยาก การกระทำส่วนใหญ่เกิดจากกรดคาร์บอนิกและสารละลายในกระแสน้ำ

ลักษณะที่น่าสนใจอย่างหนึ่งของการเสียดสีของกระแสน้ำก็คือ การเกิด **กุมภลักษณ์ (Pothole)** เป็นบ่อกลม ๆ รูปหม้อที่เจาะลึกลงไปในหินแข็ง ซึ่งเกิดจากฝนหลากหรือน้ำในธารพัดเอาหินกลมมาหมุนวนอยู่ (ดูรูป 20.6) หินกลมที่เป็นเครื่องมือในการกัดเซาะนี้เรียกว่า **หินลับ (Grinder)** จะเสียดสีให้บ่อรูปหม้อลึกเข้าทุกที น้ำที่ไหลในบ่อรูปหม้อจึงเป็นสาเหตุสำคัญทำให้หินลับเคลื่อนที่เป็นวงอยู่ก้นบ่อ หินนั้นจึงเสียดสีคว้านลึกลงไปในหินฐาน เส้นผ่าศูนย์กลางของบ่อรูปหม้อมีตั้งแต่สองสามนิ้วจนถึงหลาย ๆ ฟุต บ่อขนาดใหญ่อาจลึกหลาย ๆ ฟุต ลักษณะภูมิประเทศจากการเสียดสียังมีอีกหลายอย่าง เช่น รางเท (chute) ร่องตัดผ่านหิน

การพัดพาโดยลำน้ำ

กระแสน้ำจะพัดพาวัตถุมากับน้ำได้ 3 ลักษณะ สารละลายจะถูกพัดพาในลักษณะ เคมิคอลอิออน (chemical ion) ซึ่งเราไม่สามารถจะมองเห็น แม่น้ำทุกสายจะพัดพาสารละลายที่เกิดจากการผุพังทลายของหิน อนุภาคดินเหนียวและตะกอนจะถูกพัดพามาในลักษณะของสารแขวนลอย (suspension) ซึ่งแขวนมาในกระแสน้ำด้วยแรงดันของน้ำวนและน้ำพลุ่งพล่าน (eddies) การพัดพาแบบนี้เราเรียกว่า การพัดพาแบบแขวนลอย (suspended load) ทราย กรวดมนและหินก้อนใหญ่ ๆ จะเคลื่อนไปบนพื้นลำธาร (bed load) ในลักษณะกลิ้ง เลื่อนหรือบางครั้งก็ลอยไปในช่วงสั้น ๆ

ปริมาณและขนาดของวัตถุที่กระแสน้ำพัดพามานั้นจะมีขนาดต่างๆกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและลำดับขั้นของลำน้ำ ในช่วงน้ำท่วมขณะที่น้ำไหลด้วยความเร็ว 20 ฟุต/วินาที หรือความเร็วมากกว่านี้ที่เกิดขึ้นในลำน้ำขนาดใหญ่ น้ำจะขุ่นข้นไปด้วยสารแขวนลอย ก้อนหินขนาดมหึมาอาจถูกดันให้เคลื่อนไปตามท้องน้ำที่มีความลาดมาก ๆ ได้ เฟรดเดอริค เอส เดลเลนบอก เคยล่องเรือตามแม่น้ำโคโลราโด ผ่านหุบเขาแกรนด์แคนยอนเมื่อปี ค.ศ. 1871 และ 1872 บันทึกไว้ว่า ขณะที่หยุดพักอยู่ริมฝั่งแม่น้ำในตอนกลางคืน ได้ยินเสียงราวกับฟ้าร้องเมื่อก้อนหินขนาดมหึมากลิ้งลงมาและตกกระทบกับท้องน้ำในช่วงที่กระแสน้ำไหลเชี่ยวรุนแรง

การกระทำเชิงชลศาสตร์ในขณะน้ำท่วมนั้นสามารถทำให้ดินแตกกระจายออกเป็นจำนวนมากมายภายในเวลาอันสั้น ช่วงน้ำท่วมนั้นไม่เพียงแต่ทำให้เกิดร่องน้ำลึกขึ้นเท่านั้น ยังเซาะแผ่นดินริมตลิ่งให้ทรุดตัวลงในแม่น้ำ เป็นเหตุให้กรวดทรายถูกกระแสน้ำพัดกระจายไปอย่างรวดเร็วและกลายเป็นวัตถุที่กระแสน้ำพัดพาต่อไป กระบวนการดังกล่าวเราเรียกว่า "การกัดเซาะชายผึ่ง" (bank caving) ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของการทับถมในช่วงน้ำขึ้นสูง และมีส่วนทำให้เกิดการกัดกร่อนด้านนอกของโค้งน้ำได้อย่างรวดเร็วด้วย

สารแขวนลอยในแม่น้ำขนาดใหญ่

การพัดพาวัตถุโดยแม่น้ำขนาดใหญ่เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้างเขื่อนและการขุดคลองระบบชลประทาน เพราะตะกอนอาจจะตกทับถมอยู่ในอ่างเก็บน้ำจนเต็มอ่างเก็บน้ำทำให้อ่างเก็บน้ำนั้นไม่สามารถที่จะเก็บน้ำไว้ได้ ในขณะเดียวกันการกั้นแม่น้ำทำให้ตะกอนที่ตกใต้เขื่อนเปลี่ยนไปซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลงการกระทำของลำน้ำด้วย การขุดร่องน้ำให้ลึกและการปรับระดับลำน้ำให้ต่ำลงจะส่งผลต่อระดับของระบบชลประทาน ในการวางแผนการขุดระบบลำคลอง รูปร่างของคลองที่ขุดขึ้นต้องพอเหมาะกับขนาดและปริมาณของตะกอนที่น้ำพัดพามาเพื่อป้องกันการทับถมและการกัดร่องน้ำให้ลึกยิ่งขึ้น

จากตารางที่ 20.1 เป็นตารางเปรียบเทียบตัวเลขการตกตะกอนในแม่น้ำในลำดับขั้นต่าง ๆ กัน

ตารางที่ 20.1 สารแขวนลอยของแม่น้ำบางสาย

	สารแขวนลอย ส่วน/ล้าน	อัตราส่วน โดยน้ำหนัก
แม่น้ำมิสซิสซิปปี เฉลี่ยรายปี	500—600	1/1800—1/1660
ช่วงน้ำท่วมปริมาณน้ำเพิ่มถึง 2,000,000 ลบ.ฟุต (56,660 ลบ.ม.)	2,600	1/400
ช่วงน้ำน้อย 70,000 ลบ.ฟุต (2,000 ลบ.ม.)	50 (น้ำมีสีฟ้าสะอาด)	1/2000
แม่น้ำมิสซูรี (ช่วงน้ำท่วม)	20,000	1/50
แม่น้ำโคโลราโด (ก่อนสร้างเขื่อนฮูเวอร์) ช่วงน้ำท่วม 50,000—70,000 ลบ.ฟุต (1,400—2,000 ลบ.ม.)	40,000	1/25
แม่น้ำเหลือง, จีน ช่วงน้ำท่วม	น้ำหนักของแข็งบางทีก็มากกว่าน้ำหนักของน้ำ	

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลนี้ยังขาดปริมาณของวัตถุที่ท้องลำธาร อัตราส่วนของสารแขวนลอยตามปกติจะสูง สำหรับแม่น้ำมิสซิสซิปปีวัตถุที่น้ำพัดพามาอยู่ในรูปของสารแขวนลอยถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ตารางที่ 20.1 แสดงให้เห็นถึงแม่น้ำที่ไหลผ่านเขตกึ่งแห้งแล้งและเขตแห้งแล้ง (มิสซูรีและโคโลราโด) เป็นแม่น้ำที่มีสารแขวนลอยสูงเนื่องจากเป็นพื้นดินที่ปราศจากพืชพรรณปกคลุม ทำให้ตะกอนพัดพาลงสู่แม่น้ำได้ง่าย

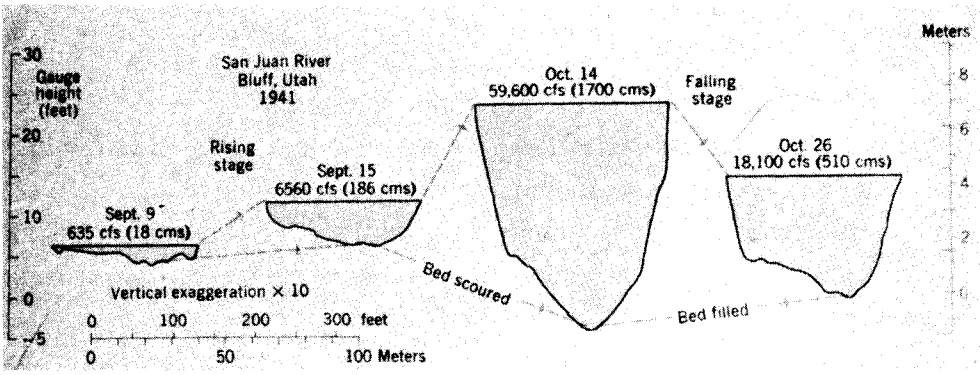
แม่น้ำเหลือง (ฮวงโห) ในประเทศจีนเป็นแม่น้ำที่มีตะกอนแขวนลอยในน้ำไหลมาแต่ละปีจำนวนมหาศาล เนื่องจากเป็นแม่น้ำที่มีขนาดกว้างใหญ่มาก อัตราการกัดกร่อนดินเขตที่สูงนั้นมีมากในพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกเพื่อยังชีพ ในบริเวณพื้นแผ่นดินที่ลมพัดพาฝุ่นมาตกทับถมกันในมณฑลเซนสีและชานสี (ดูบทที่ 24) พื้นที่ของการระบายน้ำส่วนใหญ่อยู่ในเขตกึ่งแห้งแล้งซึ่งแล้งจัดในฤดูหนาว มีพืชขึ้นอยู่ห่าง ๆ และน้ำจะไหลอย่างรุนแรงจากฝนตกหนักในช่วงฤดูร้อนจึงทำให้เกิดตะกอนจำนวนมหาศาล

อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะประเมินถึงความสำคัญของการกระทำของมนุษย์ ที่ทำให้เกิดตะกอนในแม่น้ำสายสำคัญๆ คนโดยทั่วไปเห็นพ้องกันว่าการเพาะปลูกทำให้มีตะกอนจำนวนมหาศาลไหลลงแม่น้ำทางตะวันออกและตะวันออกเฉียงใต้ของเอเชีย ยุโรปและอเมริกาเหนือ การเพิ่มของตะกอนเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์นั้นมีมากกว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดสภาวะปกติเชิงธรณีวิทยาถึง $2\frac{1}{2}$ เท่าในพื้นดินทั้งหมดของโลก ในบางแม่น้ำนั้นผลจากการกระทำของมนุษย์มีมากกว่าภาวะปกติเชิงธรณีวิทยาถึง 10 เท่า หรือมากกว่านั้น ผลที่มีต่อสภาวะแวดล้อมในรูปแบบนี้ได้รับความสนใจน้อยมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดต่อเนื่องกันมาหลายศตวรรษแล้ว นับจากมีการพัฒนาการเกษตรกรรมขึ้น

แม่น้ำเปลี่ยนเป็นน้ำท่วมได้อย่างไร

เรามักจะคิดกันว่าน้ำท่วมนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงในการเพิ่มความสูงของผิวน้ำในลำน้ำ ทำให้น้ำในลำน้ำเอ่อล้นขึ้นมาและท่วมพื้นที่ที่อยู่ติดกับลำน้ำ เนื่องจากน้ำในแม่น้ำที่ไหลมานั้นขุ่น เราจึงไม่สามารถมองเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นลำธารได้ แต่เราสามารถตรวจสอบได้จากการวัดความลึกของลำน้ำในขณะที่มีการวัดลำน้ำ ตอนแรกท้องลำธารอาจจะเกิดจากการกระทำของวัตถุที่น้ำพัดพาในลักษณะของการกลิ้งมา ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงที่ฝนตกหนักเป็นครั้งแรก การกระทำณ ท้องลำน้ำจะลึกขึ้นโดยการเสียดสีในขณะที่ลำดับขั้นของลำธารดำเนินต่อไป ดังนั้น ในช่วงที่ลำดับขั้นสูงสุดร่องน้ำก็จะมีระบบต่ำที่สุด เมื่อปริมาณน้ำเริ่มลดลงระดับของกระแสน้ำก็จะลดลง และร่องลำธารก็จะถูกทับถมเพิ่มขึ้นโดยการทับถมของดินตะกอน จากตัวอย่างในรูปที่ 20.7 หน้า 91 ตะกอนซึ่งหนา 10 ฟุต (3 เมตร) จะถูกกัดกร่อนใหม่ ทำให้วัฏจักรของลำดับขั้นน้ำเพิ่มน้ำลดดำเนินต่อไปจนสมบูรณ์

การเสียดสีทำให้ท้องธารลึกสลับกับการทับถมของตะกอนทำให้ท้องธารตื้น เป็นสาเหตุให้สมรรถภาพในการพัดพาตะกอนของลำน้ำเปลี่ยนไป ปริมาณสูงสุดของตะกอนหรือการพัดก้อนกรวดที่ลำน้ำสามารถพัดพาไปได้เราเรียกว่า "สมรรถภาพของลำน้ำ" (stream capacity) การพัดพาตามปกติเราวัดในอัตราน้ำหนักของวัตถุเคลื่อนที่ผ่านภาคตัดขวางของลำน้ำช่วงที่กำหนดให้ในหนึ่งหน่วยเวลา ตามปกติก็ใช้ตันต่อวัน การพัดพาของวัตถุทั้งมวลนั้นได้รวมถึงการเคลื่อนที่ไปตามท้องธารและการถูกพัดพาไปในลักษณะสารแขวนลอย



รูปที่ 20.7 การเปลี่ยนแปลงรูปร่องน้ำของแม่น้ำซานฮวนใกล้ ๆ กับบลัฟพ์รัฐยูตาห์ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเกิดภาวะน้ำท่วม

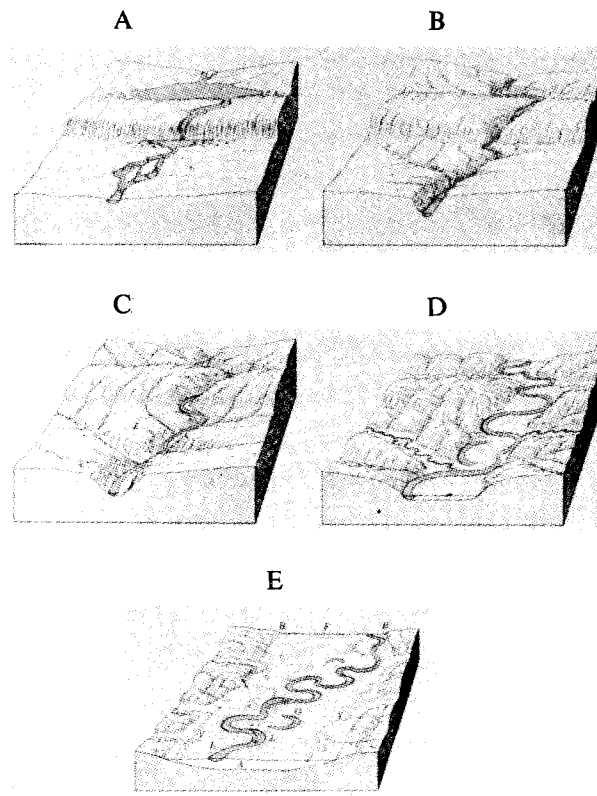
ถ้าลำน้ำไหลในร่องน้ำที่ตัดผ่านหินฐานที่แข็ง มันอาจจะไม่สามารถกัดเซาะให้ได้ตะกอนจำนวนเพียงพอกับสมรรถภาพในการพัดพาไปตามท้องน้ำได้ เช่น ลำน้ำที่เกิดขึ้นในหุบเขาลึกและมีผาชันมาก ดังนั้น เมื่อเกิดภาวะน้ำท่วม ร่องน้ำจึงไม่ถูกกัดเซาะให้ลึกลงไปได้อย่างรวดเร็ว ในร่องน้ำที่มีตะกอน ทราย และกรวดมนทับกันจนเป็นชั้นหนาและบางทีก็มีเนินทรายอยู่ในร่องน้ำ น้ำที่เพิ่มขึ้นจะกัดกร่อนร่องน้ำอย่างรวดเร็วทำให้วัตถุเหล่านั้นเคลื่อนไหวได้อย่างเต็มที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งการเพิ่มสมรรถภาพของลำน้ำจะทำให้การพัดพาวัตถุนั้นเป็นไปได้ง่ายขึ้น

สมรรถภาพการพัดพาของลำน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วของกระแสน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสน้ำที่ไหลอย่างรุนแรงนั้นจะทำให้มีน้ำวน และน้ำพลุ่งพล่านและมีความรุนแรงมากขึ้น ทำให้มีแรงครูด (dragging force) กับพื้นลำธารได้มากขึ้น สมรรถภาพการพัดพาของลำน้ำจะมีพลังเป็นสามหรือสี่เท่าของความเร็ว ดังนั้น ถ้าความเร็วทำให้มีน้ำท่วมได้สองเท่า สมรรถภาพในการพัดพาของลำน้ำจะเพิ่มขึ้นเป็นแปดหรือสิบหกเท่า ดังนั้น จึงไม่น่าแปลกใจเลยที่จะมีปรากฏการณ์บางอย่างเกิดขึ้น เช่น การกัดกร่อนชายฝั่งที่เกิดขึ้นมากในช่วงน้ำท่วม ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นน้อยมากในช่วงน้ำน้อย

เมื่อช่วงน้ำท่วมสูงสุด (flood crest) ผ่านไปแล้ว และปริมาณน้ำไหลเริ่มลดน้อยลง สมรรถภาพในการพัดพาของลำน้ำก็จะลดลงด้วย ยิ่งไปกว่านั้นอนุภาคของวัตถุบางส่วนที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ก็เริ่มจะหยุดอยู่กับที่บริเวณท้องลำธารในรูปของกองทรายหรือกองกรวดมน ตอนแรกก้อนหินขนาดใหญ่จะหยุดกลิ้ง ตามด้วยกรวดมน ทราย ทรายละเอียด และตะกอนที่อยู่ในลักษณะสารแขวนลอยก็จะถูกพัดมาให้เคลื่อนที่ช้าลงจนในที่สุดก็จะตกตะกอนลงสู่ท้องลำธาร ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ลำน้ำก็ปรับสมรรถภาพในการพัดพาให้ลดลง เมื่อถึงขั้นที่น้ำอยู่ระดับต่ำน้ำก็จะหยุดนิ่ง จะมีเพียงเกล็ดทรายเล็ก ๆ เท่านั้นที่ยังคงกลิ้งไปตามท้องลำธารในบางบริเวณที่ยังมีกระแสน้ำอยู่

ชีวประวัติของลำน้ำ

ตลอดช่วงชีวิตของลำน้ำ ลำน้ำจะผ่านลำดับขั้น (series of stage) ต่าง ๆ แต่ละลำดับขั้นจะมีลักษณะอันแน่นอน (ดูรูปที่ 20.8) ในขั้นกำเนิด (initial stage) จะเกิดขึ้นทันทีทันใดในบริเวณพื้นผิวแผ่นดินแห่งใหม่ซึ่งเกิดขึ้นโดยการยกตัว (uplift) และการเคลื่อนไหวในบางส่วนของเปลือกโลก เพื่อความสะดวกในการอภิปรายปัญหานี้เราสมมติกันว่าพื้นผิวนั้นเกิดอยู่ใต้ระดับมหาสมุทรและขณะนี้ได้โผล่ออกมาเหนือผิวน้ำเป็นครั้งแรก ดังนั้น ลักษณะภูมิประเทศจึงเป็นลักษณะภูมิประเทศกำเนิดทั้งหมด ฝนที่ตกลงมาบนแผ่นดินนั้นจะทำให้เกิดน้ำไหล และน้ำนี้จะไหลลงไปตามพื้นลาดกำเนิด น้ำจะไหลไปรวมกันในบริเวณแอ่งต่ำที่อยู่ระหว่างพื้นลาด ดังนั้น สาเหตุของวิวัฒนาการของลำน้ำนั้นเกิดจากการกัดกร่อนของน้ำซึ่งทำให้ลำน้ำลึกลงไปอย่างรวดเร็ว และหิน – กรวดที่หลุดออกมาก็จะถูกกระแสน้ำพัดพาไป ที่แอ่งต่ำจะมีน้ำไหลลงไปจนเต็มทำให้เกิดเป็นทะเลสาบ การไหลของน้ำ ณ จุดต่ำสุดตรงบริเวณขอบของทะเลสาบจะเป็นช่วงเชื่อมต่อระบบการไหลของน้ำจากบริเวณที่สูงกว่าสู่บริเวณทะเลสาบที่ต่ำกว่า ตอนนี้ระบบของลำน้ำจึงอยู่ใน "ขั้นกำเนิด" ลักษณะประจำของลำน้ำขั้นกำเนิดจะมีน้ำตก น้ำไหลเชี่ยว และทะเลสาบตลอดแนวลำน้ำ



รูป 20.8 ลำดับขั้นในชีวประวัติของลำน้ำ

A ขั้นกำเนิด มีทะเลสาบ น้ำตก และวังน้ำเชี่ยว

B วัยหนุ่มตอนกลาง ทะเลสาบหายไป แต่ยังมีน้ำตกและน้ำเชี่ยวอยู่ตามโกรกธาร

C วัยกลางตอนต้น ลำน้ำเริ่มปรับระดับน้ำตก น้ำเชี่ยวหายไป เริ่มต้นมีที่ราบน้ำท่วมถึง

D ก่อนถึงวัยกลางเต็มที่ ที่ราบน้ำท่วมถึงกว้างขึ้น มากพอที่จะทำให้เกิดลำน้ำโค้งตวัด

E วัยกลางเต็มที่จะมีที่ราบน้ำท่วมกว้างมาก และมีลำน้ำโค้งตวัดเกิดขึ้นอย่างอิสระ L = เขื่อนธรรมชาติ O = ทะเลสาบรูปแอก Y = ธารยาซู A = ที่ราบดินตะกอน B = ผาตุ้ง F = ที่ราบน้ำท่วมถึง

จากนั้นลำน้ำจะเข้าสู่ "ขั้นหนุ่ม" (youth) กิจกรรมหลักของลำน้ำในวัยหนุ่มก็คือ ร่องน้ำจะมีความลึกเพิ่มขึ้นทุกที สมรรถภาพในการพัดพาจะเพิ่มมากขึ้น ทะเลสาบที่เป็นที่รองรับน้ำจะถูกกัดเซาะจนมีทางน้ำไหลผ่าน กลายเป็นทะเลสาบที่มีทางน้ำไหลออก และมีแนวโน้มว่าจะมีลำน้ำตัดผ่านพื้นทะเลสาบเก่า บริเวณที่เป็นน้ำตกจะถูกกัดเซาะให้ต่ำลงจนกระทั่งกลายเป็นบริเวณน้ำไหลเชี่ยว ลักษณะภูมิประเทศเด่นอย่างหนึ่งในลำน้ำวัยหนุ่มก็คือ มีโกรกธารลึก (gorge or canyon) โกรกธารนี้จะมีหุบผาลึกชันเป็นรูปตัววี เมื่อมองในด้านตัดขวางกันของโกรกธารจะเป็นลำธารทั้งหมด หินที่ผุพังจากผาชันนี้จะพังทลายไหลลงสู่กันโกรกธาร แผ่นดินถล่มมักจะเกิดขึ้นบ่อย กองหินและดินที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเกิดจากแผ่นดินถล่มนี้จะกลายเป็นเขื่อนชั่วคราวขวางลำน้ำไว้ ความลาดของลานหินตีนผาที่เกิดจากเศษหินอาจจะมีเกิดขึ้นและขยายฐานลงไปในน้ำ เนื่องจากหุบผาชันนี้ถูกกัดกร่อนเร็วมาก หินฐานจึงโผล่ขึ้นมาอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดผาเรียบ (bold cliffs) ขึ้น

ความสำคัญเชิงสิ่งแวดล้อมของแม่น้ำวัยหนุ่มนั้นเป็นสิ่งที่เราจินตนาการได้ คือ ไม่มีที่ที่จะสร้างถนนหรือทางรถไฟในบริเวณระหว่างลำน้ำกับพื้นลาดของหุบเขาเลย การสร้างถนนต้องมีการขุดและระเบิดเขาอย่างมากและยังมีอันตรายจากหุบผานั้นด้วย และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษานั้นก็สูงมาก เพราะถนนหนทางจะถูกน้ำเซาะอยู่เบื้องล่าง รวมทั้งแผ่นดินถล่มซึ่งจะทำให้ถนนพังทลายได้

ลักษณะเชิงสิ่งแวดล้อมที่น่าพิจารณาอีกประการหนึ่งของแม่น้ำวัยหนุ่มก็คือ ไม่สามารถจะใช้เป็นเส้นทางสัญจรทางเรือได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำไหลมากพอก็ตาม

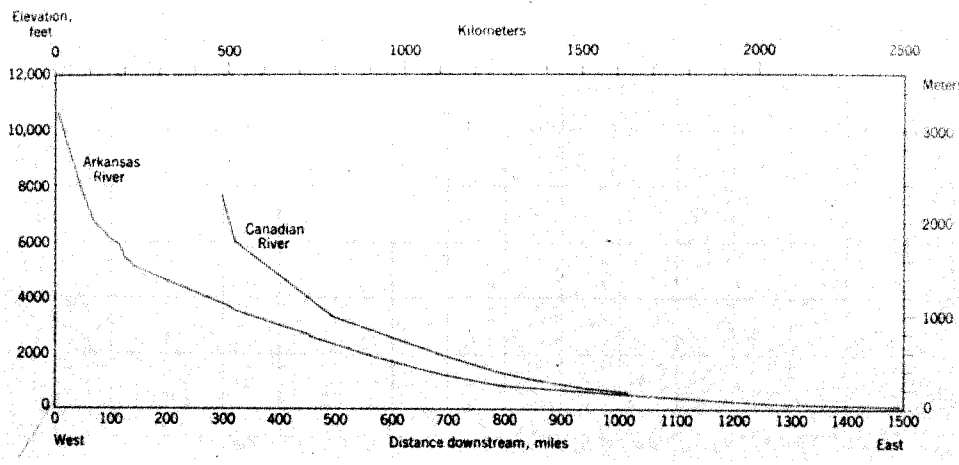
บริเวณที่ลาดชันของลำน้ำวัยหนุ่มโดยเฉพาะบริเวณน้ำตก บางครั้งอาจทำให้บริเวณนั้นเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าพลังน้ำได้เป็นอย่างดี แม่น้ำวัยหนุ่มขนาดใหญ่ส่วนมากน้ำจะไม่ตกบนพื้นลาดชันมาก จึงจำเป็นต้องสร้างเขื่อนเพื่อทำให้เกิดน้ำตกประดิษฐ์เพื่อไปหมุนกังหันเทอร์ไบ

เมื่อลำน้ำค่อย ๆ พัฒนาผ่านวัยหนุ่มไป น้ำตกและบริเวณน้ำไหลเชี่ยวจะค่อย ๆ หายไป จะมีความราบเรียบมากขึ้น ความลึกของหุบเขาจะลดลงและผนังหุบเขาก็จะมีความลาดชันน้อยลงด้วย

สมดุลลำน้ำ

ลำน้ำจะถึงวัยตอนกลาง (maturity) ก็ต่อเมื่อลำน้ำได้เข้าสู่สภาพการกัดเซาะทางดิ่งอย่างรวดเร็วโดยสมบูรณ์แล้ว และก็จะมาถึงระยะที่ลำน้ำปรับระดับ ซึ่งช่วงนี้ลำน้ำจะถึงสภาวะสมดุล (equilibrium or balance) ซึ่งเป็นช่วงที่อัตราโดยเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของหินจากลำน้ำทุก ๆ สาขาที่ถูกพัดพาลงสู่ลำน้ำนั้นเท่ากันกับอัตราการพัดพาโดยเฉลี่ยซึ่งลำน้ำจะพัดพาเศษดินเศษหินนั้นออกไปได้ หรือกล่าวโดยอีกนัยหนึ่งได้ว่าสมรรถภาพของลำน้ำซึ่งจะพัดพาเศษดินเศษหินที่ไหลมาให้พัดพาออกไปได้พอดี

ภาพตัดตามยาว (longitudinal profile) ที่สร้างตามลำน้ำจากต้นน้ำถึงปากน้ำเป็นภาพตัดตามยาวของลำน้ำที่สมดุล เราเรียกลำน้ำลักษณะนี้อีกอย่างหนึ่งได้ว่าเป็นลำน้ำที่ "ปรับระดับแล้ว" (graded)



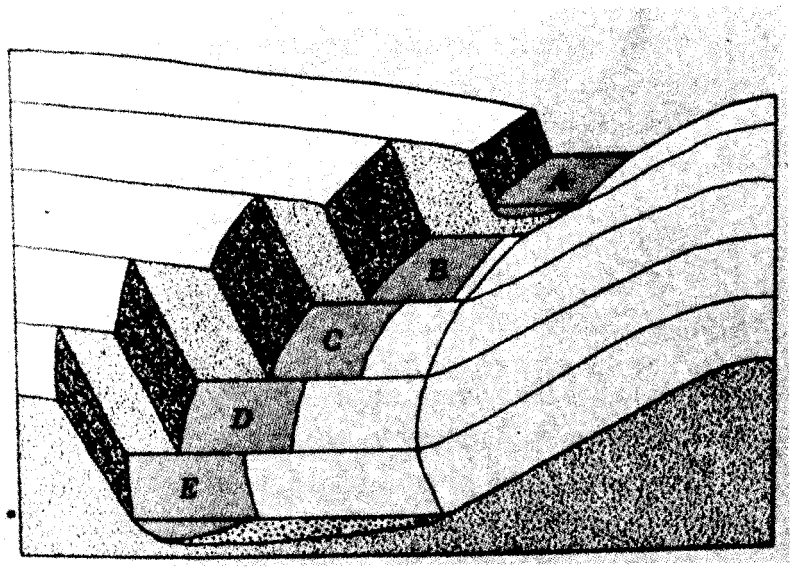
รูปที่ 20.9 ภาพตัดตามยาวของแม่น้ำอาร์แคนซัส และแม่น้ำแคนาเดียน ภาพตัดตามยาวตอนกลางและตอนล่างจะค่อนข้างราบเรียบ ซึ่งเป็นช่วงที่ปรับระดับแล้ว ส่วนตอนบนความลาดชันยังมีมาก

สภาพความสมดุลระหว่างวัตถุที่ต้องพัดพากับสมรรถภาพของลำน้ำจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อเป็นค่าเฉลี่ยที่คิดจากเวลาหลาย ๆ ปีเท่านั้น ซึ่งอธิบายได้ว่าลำน้ำจะกัดเซาะร่องน้ำในช่วงน้ำท่วมและทับถมวัตถุลงก้นลำธารในช่วงน้ำน้อย ซึ่งสภาวการณ์เคลื่อนไหวของลำน้ำนี้จะไม่เกิดภาวะสมดุลเลยในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ แต่จะเกิดในช่วงเวลาอันยาวนานเท่านั้น แม่น้ำที่ปรับระดับแล้วจะรักษาระดับไว้ได้ก็โดยการทับถมลงสู่ก้นลำธารในตอนต้น ต่อมาเมื่อเกิดช่วงน้ำท่วมวัตถุต่าง ๆ ก็จะถูกพัดพาไป

ลักษณะหนึ่งที่จะสังเกตเห็นได้ในลำน้ำสมดุลก็คือ มีการกัดเซาะด้านข้างทำให้ลำน้ำกว้างขึ้น การกัดเซาะของลำน้ำที่ดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จะทำลายสภาวะสมดุล แต่การกัดเซาะเพียงชั่วคราวจะไม่มีผลต่อสภาวะสมดุล

วิวัฒนาการของที่ราบน้ำท่วมถึง

ทันทีที่ลำน้ำเริ่มเข้าสู่วัยตอนกลางตอนต้นปรากฏการณ์เกิดขึ้น คือ การเริ่มวิวัฒนาการของก้นหุบเขาที่แบนราบขึ้น ในขณะที่โค้งแม่น้ำขยายใหญ่ขึ้น ร่องน้ำก็จะค่อย ๆ เลื่อนตัวไปทางส่วนนอกของโค้งน้ำ ทำให้ส่วนเดิมกลายเป็นแนวที่แบนราบ หรือที่ราบน้ำท่วมถึง (floodplain) ซึ่งอยู่ทางด้านในของโค้งน้ำ (ดูรูป 20.10 ในหน้า 95) ที่ราบน้ำท่วมถึงเป็นเนินดินที่ประกอบด้วยเม็ดทรายขนาดใหญ่ และหินกรวดมนที่กลิ้งมาตามท้องธารจากด้านนอกของโค้งน้ำ เมื่อเวลาผ่านเป็นปี ๆ ตะกอนดินและอนุภาคดินเหนียวที่ละเอียดกว่าจะมาทับถมเหนือพื้นผิวบริเวณน้ำท่วมถึงนั้น ทำให้ที่ราบน้ำท่วมถึงมีระดับสูงขึ้นโดยตะกอนที่หยาบกว่าจะอยู่เบื้องล่าง



รูปที่ 20.10 ลำน้ำที่ปรับระดับแล้ว การกัดกร่อนทางด้านข้างจะมีมากขึ้น ทำให้ลำน้ำคดโค้งมากขึ้น และทำให้มีที่ราบน้ำท่วมในร่องน้ำ

ขณะที่การกัดกร่อนด้านข้างของลำน้ำดำเนินต่อไป แนวที่ราบน้ำท่วมถึงจะขยายใหญ่ขึ้น จนกระทั่งไปเชื่อมกับแนวทั้งสองข้างของลำน้ำ ตอนนี้โค้งลำน้ำจะใหญ่ขึ้นและมีโค้งเรียบยิ่งขึ้น เมื่อโค้งน้ำพัฒนาไปเป็นโค้งเรียบ ส่วนโค้งนั้นเราเรียกว่า "คุ้งน้ำ" (meander) ขณะที่หุบเขาวิวัฒนาการต่อไปจนที่ราบน้ำท่วมถึงกว้างขึ้นพอที่จะทำให้เกิดคุ้งน้ำโดยที่ไม่ทำลายรูปร่างเดิมของที่ราบนั้น ถึงตอนนี้ลำน้ำก็ผ่านจากวัยกลางตอนต้นเข้าสู่วัยกลางที่สมบูรณ์ (full maturity)

แม่น้ำวัยกลางตอนต้นเป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ แม้ที่ราบน้ำท่วมถึงจะแคบแต่ก็สามารถที่จะสร้างถนนหรือทางรถไฟผ่านได้ ภาพตัดตามยาวของลำน้ำจะต่ำ และปรับระดับเรียบพอที่จะทำเป็นฐานสร้างถนนได้ การเกษตรกรรมซึ่งทำไม่ได้ในหุบเขาวัยหนุ่มเพราะมีผาชัน แต่จะสามารถเพาะปลูกได้บนที่ราบน้ำท่วมถึง เมื่อลำน้ำวิวัฒนาการต่อไป ที่ราบน้ำท่วมถึงจะเพิ่มความสำคัญมากขึ้นจนกลายเป็นแหล่งของผลผลิตทั้งหลาย และจะมีผู้คนมาอาศัยกันอยู่หนาแน่นมากกว่าพื้นดินในหุบเขาที่อยู่สูงขึ้นไป ยิ่งกว่านั้นลำน้ำวัยนี้จะไม่มีบริเวณที่น้ำไหลเชี่ยว ซึ่งจะเป็นอุปสรรคต่อการสัญจรทางเรือ

หลังจากที่ลำน้ำเข้าสู่วัยตอนกลางที่สมบูรณ์แล้ว กิจกรรมหลักของมันก็คือทำให้ที่ราบน้ำท่วมถึงกว้างยิ่งขึ้นไปอีก จนในที่สุดที่ราบน้ำท่วมถึงนั้นจะกว้างกว่าแนวคุ้งน้ำหลายเท่า จากแนวคุ้งน้ำที่ลากไปตามลำน้ำที่เป็นคุ้งน้ำในทางใดทางหนึ่งไปเชื่อมกับจุดนอกสุดของโค้งน้ำ นักวิศวชลศาสตร์เรียกลำน้ำที่เป็นคุ้งน้ำโดยตลอด และมีที่ราบน้ำท่วมกว้างขวางนี้ว่า "แม่น้ำตะกอน" (alluvial river)

ภาพตัดตามยาวลำดับสุดท้ายของลำน้ำที่จะมีระดับลดลงไปอีกนั้นเป็นเพียงภาพที่เกิดขึ้นในจินตนาการเท่านั้น เมื่อภาพตัดตามยาวลดระดับลงเช่นนั้น พื้นต่ำกว่าระดับนั้นนักธรณีวิทยาเรียกว่า "ระดับฐาน" (base level) ซึ่งเป็นระดับที่หุบเขาจะไม่กัดในทางดิ่งลงไปมากกว่านี้อีกแล้ว ปากน้ำของลำน้ำทุกสายที่น้ำไหลลงสู่ทะเลนั้นอยู่ ณ ระดับฐานแล้ว อย่างไรก็ตาม ตามทฤษฎีแล้วลำน้ำส่วนที่เหลือต้องมีระดับถึงระดับฐานทั้งหมด แม่น้ำดินตะกอนทุกสายมักจะมีความลาดเอียงเล็กน้อย เนื่องจากข้อเท็จจริงที่ว่าพื้นดินที่อยู่ในแอ่งรับน้ำแต่ละแห่งจะต้องสูงกว่าระดับน้ำทะเล และเป็นตัวทำให้เกิดตะกอนที่ลำน้ำจะต้องพัดพาไป

คุ้งน้ำของลำน้ำดินตะกอน

ที่ราบน้ำท่วมของแม่น้ำดินตะกอนขนาดใหญ่ มีลักษณะภูมิประเทศพิเศษหลายอย่างที่น่าสนใจสำหรับนักภูมิศาสตร์ ส่วนโค้งของคุ้งน้ำจะเติบโตขึ้น ขณะที่ลำน้ำกัดเซาะโค้งน้ำด้านนอกแล้ว น้ำก็จะพัดพาตะกอนที่ถูกกัดเซาะนั้นไปทับถมด้านในของโค้งน้ำ ทั้งสองด้านของโค้งน้ำนี้เรียกว่า "ตลิ่งชัน" (undercut) และตลิ่งลาด (slipoff slope) ตามลำดับ เนินดินตะกอนที่เกิดขึ้นทางด้านตลิ่งลาดเราเรียกว่า "การทับถมปลายเนิน" (point-bar deposits)

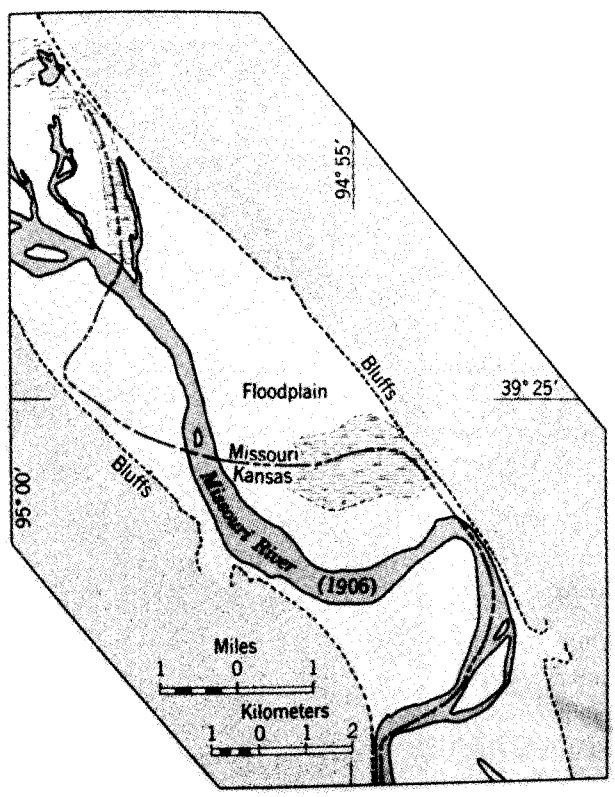
โค้งแม่น้ำจะโตขึ้นจนกระทั่งมาบรรจบกับร่องน้ำ เป็นสาเหตุให้คุ้งน้ำถูกตัดเป็นวงกลมมีเกาะอยู่ตรงกลาง ปรากฏการณ์ชนิดนี้เราเรียกว่า "ส่วนตัดขาด" (cutoff) แม่น้ำขนาดใหญ่ ๆ ส่วนที่ถูกตัดขาดนี้มีความสำคัญเชิงภูมิศาสตร์มาก โดยบริเวณที่เป็นเส้นกั้นอาณาเขตของรัฐ ซึ่งถือร่องน้ำลึกเป็นเกณฑ์ การตัดขาดเป็นสาเหตุให้แผ่นดินส่วนที่อยู่บนโค้งน้ำที่ถูกตัดออกเปลี่ยนรัฐไปโดยอัตโนมัติ ซึ่งประชาชนที่อาศัยในแผ่นดินส่วนที่ถูกตัดออกไปนั้น จะต้องเข้าไปอยู่ภายใต้กฎหมายและเสียภาษีให้กับอีกรัฐหนึ่ง

โค้งของคุ้งน้ำที่ถูกตัดออก จะทำให้เกิดร่องน้ำใหม่ จากการที่มีดินตะกอนมาปิดร่องน้ำเดิม จึงทำให้เกิดทะเลสาบรูปโค้งขึ้น เรียกว่า "ทะเลสาบรูปแอก" (oxbow lake)

รูปที่ 20.11 ภาพถ่ายดิ่ง ถ่ายจากความสูงประมาณ 20,000 ฟุต (6,100 ม.) แสดงให้เห็นคุ้งน้ำ ส่วนตัดขาด ทะเลสาบรูปแอก บึง และที่ราบน้ำท่วมของแม่น้ำเฮย์ รัฐแอลเบอร์ตา

เขื่อนธรรมชาติ

ที่ราบน้ำท่วมถึงที่ได้กล่าวถึงมานั้นมักจะมีน้ำไหลบ่าเข้าไปในช่วงน้ำท่วม ตามปกติที่ราบน้ำท่วมถึงจะมีน้ำท่วมปีละครั้งในฤดูที่น้ำหลากสูงสุด อย่างไรก็ตาม ที่ราบทั้งหมดจากด้านหนึ่งของหุบเขาหรือผาชันริมน้ำ (bluff) ไปยังอีกด้านหนึ่งจะไม่ถูกน้ำท่วมพร้อมกันในเวลาเดียวกัน กระแสน้ำจะไหลแรงที่สุดไปตามแนวร่องน้ำลึก น้ำที่มีตะกอนทรายซึ่งไหลกระจายออกและไหลไปปะปนกับน้ำซึ่งไหลท่วมบริเวณริมฝั่งทั้งสอง ความเร็วของกระแสน้ำนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้โคลนและตะกอนตกทับถมอยู่บริเวณนั้น เนื่องจากมีตะกอนจำนวนมหาศาลตกทับถมอยู่ที่ริมฝั่งติดกับร่องน้ำ เมื่อน้ำท่วมทุกปี ๆ ริมฝั่งก็จะค่อย ๆ สูงขึ้นกว่าพื้นดินทั้งสองข้าง ทำให้เกิดเป็นเขื่อนธรรมชาติ (natural levees) ขึ้นทั้งสองข้างของลำน้ำ พื้นผิวของเขื่อนธรรมชาตินี้จะค่อย ๆ เอียงลาดลงจากบริเวณซึ่งติดกับลำน้ำไปสู่บริเวณที่ราบน้ำท่วมถึงที่อยู่ต่ำกว่า บริเวณที่สูงสุดของที่ราบน้ำท่วมถึงจึงทอดเป็นแนวยาวไปตามแนวสันเขื่อนธรรมชาติที่อยู่ติดลำน้ำ แนวพื้นที่แคบ ๆ นี้จะอยู่สูงกว่าระดับน้ำตลอดเวลา แม้แต่ในช่วงที่น้ำขึ้นสูงสุดและจะเป็นที่ที่ปลอดภัยที่สุดจากน้ำท่วม



รูป 20.12 เขตรัฐมิสซูรีและแคนซัส เดิมนั้นกำหนดตามร่องน้ำมิสซูรี (เส้น — - - — - - —) แต่ปัจจุบันลำน้ำได้เปลี่ยนทางเดินไปจากแนวนั้นเสียแล้ว

ลำน้ำที่ไหลผ่านที่ราบน้ำท่วมถึงไม่สามารถจะไหลลงสู่ลำน้ำสายหลักได้โดยตรง เพราะมีเขื่อนธรรมชาติขวางกั้นอยู่ ลำน้ำนั้นจึงต้องไหลขนานไปกับแม่น้ำสายหลักไประยะหนึ่งก่อนจนกระทั่งถึงจุดที่สามารถจะไหลตัดผ่านได้ ลำน้ำที่ไหลในลักษณะนี้เราเรียกว่า "ธารยาซู" (Yazoo river)

บริเวณพื้นราบอันกว้างใหญ่ที่เกิดจากที่ราบน้ำท่วมจะเหมาะสำหรับเป็นแหล่งเกษตรกรรม ซึ่งจะให้ผลผลิตที่สูง บริเวณนี้จะมีคนอาศัยอยู่หนาแน่น มีเขื่อนธรรมชาติซึ่งเป็นแหล่งระบายน้ำตามธรรมชาติอยู่ห่างจากชายฝั่งออกไป ยิ่งกว่านั้นบริเวณที่ต่ำของที่ราบน้ำท่วมถึง ในทะเลสาบรูปแอกและจากร่องน้ำอื่น ๆ ซึ่งเป็นที่ลุ่มทำให้มีต้นไม้ขึ้นหนาแน่นและเป็นผลให้อากาศมีความชุ่มชื้นอยู่ตลอดเวลา

มาตรการบรรเทาอุทกภัย

ในสภาวะที่เกิดน้ำท่วมอย่างรุนแรง ย่อมนำมาซึ่งความเสียหายอย่างใหญ่หลวง หนังสือเล่มนี้มิได้มีจุดมุ่งหมายที่จะกล่าวถึงการบรรเทาภัยพิบัติทางด้านเศรษฐกิจ สังคมและการเมือง แต่เราจะกล่าวถึงเพียงหลักการทางกายภาพที่จะนำมาประยุกต์เพื่อการแก้ปัญหาเท่านั้น มีกฎเกณฑ์เบื้องต้นอยู่ 2 ประการ คือ (ก) ถ่วงและหน่วงเหนี่ยวน้ำที่ไหลบนพื้นดินและลำน้ำสาขาด้วยวิธีต่าง ๆ (ข) ดัดแปลงบริเวณที่ต่ำที่คาดว่าน้ำจะท่วมในบริเวณที่ราบน้ำท่วมถึงนั้น

รูป 20.13 ภาพถ่ายทางอากาศ ถ่ายเมื่อเดือนเมษายน 1952 แสดงให้เห็นว่าเขื่อนริมน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้นริมฝั่งแม่น้ำมิสซูรีพังทลายลงมา ทำให้น้ำไหลข้ามไปสู่ที่ราบน้ำท่วมที่อยู่ติดกับแม่น้ำ

หลักเกณฑ์เบื้องต้นประการแรกในการป้องกันน้ำท่วมก็คือ การสร้างป่าขึ้นใหม่หรือการปลูกพืชคลุมดิน เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการดูดซึมน้ำและลดอัตราการไหลของน้ำบนผิวดิน รวมทั้งการสร้างเขื่อนกั้นน้ำขนาดเล็ก ๆ ในหุบเขาด้วย ซึ่งอาจจะช่วยลดสันน้ำได้มาก และทำให้ปริมาณน้ำไหลลงสู่แม่น้ำใช้ช่วงเวลานานขึ้น

การป้องกันน้ำท่วมวิธีที่สอง โดยการควบคุมพื้นที่น้ำท่วมถึงโดยตรง มีทฤษฎีที่ควรนำมาปฏิบัติสองวิธี ประการแรก คือ การสร้างเขื่อนหรือพนังกั้นน้ำ (dyke) ขนานไปทั้งสองฝั่งของร่องน้ำ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมน้ำไหลล้นฝั่งได้ เป็นการป้องกันพื้นที่น้ำท่วมถึงมิให้ถูกน้ำท่วม เขื่อนแต่ละเขื่อนต้องใช้ดินจำนวนมากมาถม และต้องได้รับการออกแบบอย่างดี ไม่เพียงแต่ให้มีโครงสร้างทางกายภาพที่ทนต่อแรงดันของน้ำได้เท่านั้น แต่ต้องสูงพอที่จะควบคุมช่วงน้ำท่วมสูงสุดได้อีกด้วย

เนื่องจากเขื่อนธรรมชาติและเขื่อนที่มนุษย์สร้างขึ้น ร่องน้ำ จะค่อย ๆ ตื้นเขินขึ้นมากกว่าที่ราบน้ำท่วมถึง กระบวนการนี้เรียกว่า "พื้นดินกันธาร" (bottom land) เป็นผลให้เกิดน้ำท่วมใหญ่ทำให้สูญเสียชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมหาศาล ที่ราบน้ำท่วมถึงของแม่น้ำใหญ่ ๆ ของโลก มักมีปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้น ประเทศจีนเมื่อปี ค.ศ. 1887 แม่น้ำฮวงโหไหลล้นฝั่งท่วมพื้นที่ถึง 50,000 ตารางไมล์ (130,000 ตร.กม.) ทำให้คนตายเป็นจำนวนล้าน ๆ คน

วิธีที่ 2 ได้นำมาปฏิบัติเมื่อไม่นานมานี้ในแม่น้ำมิสซิสซิปปีโดยหน่วยทหารวิศวกรรมแห่งสหรัฐฯ คือ ทำให้แม่น้ำสั้นลงโดยการตัดเชื่อมบริเวณคุ้งน้ำใหญ่ ๆ เพื่อให้น้ำได้ไหลตรงขึ้น การที่ลำน้ำมีระยะสั้นลงจะทำให้ความลาดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้น้ำไหลเร็วขึ้นด้วย ความเร็วของกระแสน้ำที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้น้ำไหลอยู่ได้ภายในร่องน้ำที่มีพื้นที่ภาพตัดขวางที่แคบลงได้ ช่วงน้ำท่วมก็จะลดลง การปรับปรุงร่องน้ำได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1930 ตอนแรกช่วยป้องกันสันน้ำท่วมตามร่องน้ำมิสซิสซิปปีตอนปลายได้ และเขื่อนสองฝากฝั่งไม่ได้รับอันตรายจากน้ำท่วมมากนัก อย่างไรก็ตาม มีคุ้งน้ำใหม่ ๆ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและยากที่จะควบคุม ในหลายส่วนของที่ราบน้ำท่วมถึงได้มีการวางแผนให้เป็นแอ่งรับน้ำชั่วคราว ทั้งนี้เพื่อช่วยลดสันน้ำท่วม ในบริเวณดินดอนสามเหลี่ยม มีการกำหนดให้น้ำไหลจากลำน้ำลงสู่มหาสมุทรสลับทางกันไป

การเพิ่มระดับลำน้ำและลำน้ำเกลียวเชือก

เมื่อลำน้ำมีเศษหินไหลลงร่องน้ำมากเกินกว่าที่กระแสน้ำจะพัดพาไปได้ วัตถุที่มากขึ้นนี้จะกระจายไปตามร่องน้ำ การทับถมของวัตถุที่กลิ้งมาตามท้องธารทำให้ร่องน้ำมีความลาดเพิ่มขึ้น อันเป็นผลให้มีกำลังการพัดพาสูงขึ้น กระบวนการที่ทำให้ร่องน้ำมีระดับเพิ่มขึ้นนี้เราเรียกว่า "กระบวนการเพิ่มระดับ" (aggradation) ซึ่งตรงข้ามกับ "กระบวนการลดระดับ" (degradation) เป็นกระบวนการกัดกร่อนทางลึกที่ปรากฏขึ้นในแม่น้ำวัยหนุ่ม

การปรับระดับทำให้ลำน้ำกว้างขึ้นและตื้นเขิน แม่น้ำจะแยกสายและแยกย่อยออกไปเป็นสองสายสามสาย หรือมากกว่า แล้วไหลมารวมกันแล้วแยกจากกันใหม่เป็นเช่นนี้สลับกันไปดูคล้าย ๆ กับเกลียวเชือก รูปแบบของแม่น้ำปรับระดับที่เป็นลักษณะนี้เรียกว่า "แม่น้ำเกลียวเชือก" (braided stream) เหตุผลสำคัญที่ทำให้เกิดลำน้ำเกลียวเชือกและแม่น้ำเลื่อนทางเดินก็เนื่องจากมีทรายและเนิน

กรวดทรายตกทับถมอยู่บนพื้นลำธาร ทำให้ทางน้ำต้องแยกเป็นสองหรือมากกว่า ซึ่งจะเลื่อนไปทางด้านข้างที่ต่ำกว่าซึ่งอยู่ติดกัน ทำให้ลำน้ำแยกออกไปจากร่องน้ำเดิม แม่น้ำที่มีการปรับระดับนั้นเป็นปรากฏการณ์ธรรมดาในเขตแห้งแล้ง ซึ่งมีน้ำไหลในแม่น้ำน้อยแต่มีเศษหินจำนวนมากถูกพัดพามาจากหุบเขาที่เคลื่อนที่มาจากลาดเขาโดยไม่มีสิ่งใดกีดขวางทางเลย

ลำน้ำเพิ่มระดับมักเกิดร่วมกับการกระทำของธารน้ำแข็ง โดยลำน้ำจะได้รับน้ำจากการละลายของน้ำแข็ง และจะมีเศษหินแตกหักจำนวนมหาศาลไหลลงมาด้วย และสิ่งนี้จะกระจายไปตามหุบเขาในลักษณะของลำน้ำเกลียวเชือก

การเพิ่มระดับและการตกตะกอนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์

การเพิ่มระดับของลำน้ำเป็นรูปแบบธรรมดาของสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการที่มนุษย์ทำลายผิวดิน การเร่งอัตราการกัดเซาะพัดพาจากการเพาะปลูก การตัดไม้และไฟป่า ซึ่งเป็นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการตกตะกอนทับถมเป็นการเพิ่มระดับในหุบเขา ในทางตรงข้ามการเพิ่มระดับแบบนี้มีคนกล่าวถึงน้อยกว่าการเพิ่มระดับแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีผลกระทบเฉพาะชั้นบนสุดของดินเท่านั้น ผลนั้นก็คือจะมีทรายเชิงเขาและวัตถุน้ำพามาสะสมกันอยู่ในหุบเขาที่เล็กกว่า ทำให้ดินที่มีเนื้อละเอียดกว่าถูกฝังอยู่เบื้องล่าง และทำให้คุณภาพของดินบริเวณหุบเขาไม่เหมาะสำหรับทำการเกษตร ตะกอนอนุภาคดินเหนียว และอนุภาควัตถุสาร (ฮิวมัส) จะแขวนลอยอยู่ในน้ำที่ไหลลงมาและน้ำจะพัดพาสิ่งเหล่านั้นไปทับถมในที่ที่ไกลออกไป ในบางบริเวณที่มีการกัดกร่อนพื้นดินอย่างรุนแรง พื้นดินจะถูกกัดเป็นร่องธารลึก การเพิ่มระดับที่ก้นหุบเขาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าบริเวณนั้นน้ำไม่ท่วมพื้นที่ที่มีตะกอนมาทับถมกันอยู่ คนก็จะไปทำลายบริเวณนั้นเพื่อเพาะปลูกต่อไป

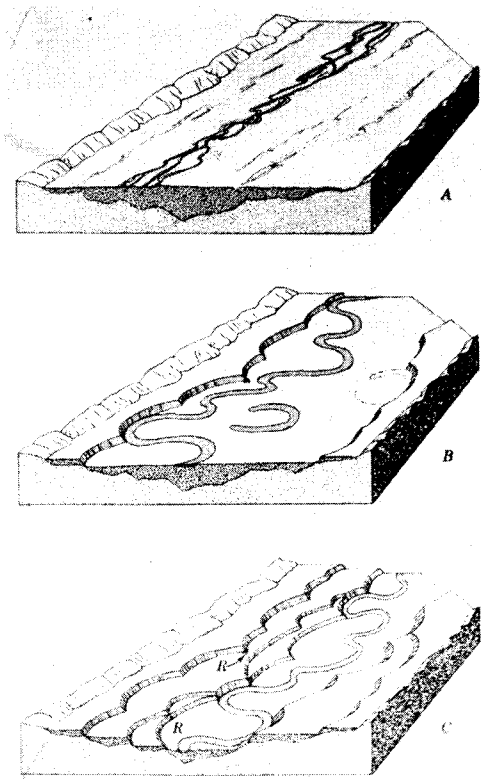
การเพิ่มระดับในร่องน้ำเป็นรูปแบบของสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากมนุษย์ทำลายผิวดินที่สำคัญในเหมืองถ่านหิน จึงมีน้ำเสียไหลไปตามร่องน้ำนั้น (เป็นน้ำที่มีกรดจากเหมือง) เหมืองแร่ที่ขุดเป็นแถบ ๆ จะทำให้การเพิ่มระดับในหุบเขาเป็นไปอย่างรวดเร็ว เพราะเศษหินที่ปรักหักพังจะไหลมารวมกันได้จากการกระทำของน้ำไหล

ชุมชนเมืองและการสร้างทางหลวงเป็นแหล่งสำคัญอีกแหล่งหนึ่งของตะกอน ที่ทำให้ร่องน้ำเพิ่มระดับ โครงการขนย้ายดินเพื่อนำมาถมสร้างทางหลวง หรือการถมเพื่อเตรียมสร้างโรงงานอุตสาหกรรมและการพัฒนาที่อยู่อาศัย ขณะที่พื้นผิวนี้ถูกอัดแน่นดินก็ยังไม่มั่นคงพอที่จะทนต่อการกัดเซาะได้ ภายในโครงการเหล่านี้จะทำให้ร่องน้ำเปลี่ยนทางเดิน ทำให้น้ำไหลในหลายทางขึ้น และทำให้มีร่องน้ำในพื้นที่นั้นมากขึ้น

เหมืองแร่ ชุมชนเมือง และการสร้างทางหลวง ไม่เพียงแต่เป็นตัวการเพิ่มการเคลื่อนที่ตามร่องน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มระดับในร่องน้ำเท่านั้น แต่ยังเป็นการเพิ่มสารแขวนลอยขึ้นในแม่น้ำสายเดียวกันอีกด้วย สารแขวนลอยจะไหลไปตามน้ำ ในที่สุดก็จะไปทับถมอยู่ในทะเลสาบอ่างเก็บน้ำ และปากน้ำที่ไกลไปจากบริเวณกำเนิดของสารเหล่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นการสะสมของตะกอนที่ละเอียดอ่อนนั้นยังทำให้สมรรถภาพของอ่างเก็บน้ำลดลงด้วย และมีผลทำให้ปากน้ำตื้นเขินอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องมีการขุดลอกร่องน้ำบ่อย ๆ

ที่ราบขั้นบันได

ถ้าลำน้ำเพิ่มระดับในหุบเขาเป็นระยะเวลาอันยาวนาน วัตถุน้ำพาจะทับถมกันหนานับสิบฟุต จากภาพ A ในรูป 20.14 สาเหตุของการเพิ่มระดับซึ่งเกิดมาได้เป็นเวลานานก็เนื่องจากบริเวณนั้นมีภูมิอากาศแห้งแล้งขึ้น ทำให้มีน้ำไหลในแม่น้ำนั้นน้อยลง จึงจำเป็นที่ลำน้ำต้องมีความลาดเพิ่มขึ้นโดยการสร้างร่องน้ำขึ้นมา สาเหตุที่มีการเพิ่มระดับของลำน้ำในอเมริกาเหนือก็เนื่องจากการละลายของแผ่นน้ำแข็งและธารน้ำแข็งในหุบเขา น้ำแข็งที่ละลายจะทำให้กระแสน้ำมีแรงพัดพาก้อนหินมาได้ ทำให้มีก้อนหินมาทับถมอยู่มากมายในลำน้ำใกล้กับด้านหน้าของธารน้ำแข็ง



รูป 20.14 การเกิดที่ราบขั้นบันได เมื่อลำน้ำค่อยๆ ปรับระดับทีละชั้นลงไปบนตะกอนน้ำพาที่ไหลลงไปเต็มหุบเขา

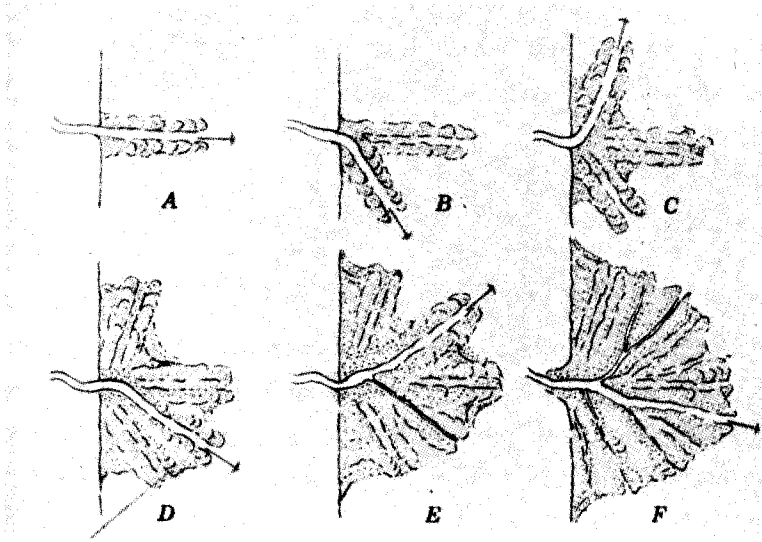
เมื่อสภาวกาลอากาศกลับเข้าสู่ภาวะปกติ วัตถุที่ถูกพัดพามีน้อยลง ลำน้ำก็จะตัดผ่านไปในตะกอนที่เคยทับถมมาก่อน และในที่สุดก็จะกวาดเอาตะกอนดังกล่าวออกไปจากหุบเขานั้นทั้งหมด ในระหว่างที่น้ำลดระดับ ที่ราบดินตะกอนขั้นบันได (alluvial terrace) ก็จะเกิดขึ้น ที่ราบขั้นบันไดนี้จะเป็นพื้นดินแบนราบเป็นแนวโดยมีผาชันที่ปิดอยู่ทั้งสองด้าน ด้านที่อยู่ติดลำน้ำผาชันจะลาดลง ส่วนด้านที่อยู่ห่างลำน้ำผาชันจะลาดขึ้น ที่ราบขั้นบันไดคล้ายกับการทอดบันไดไปยาว ๆ และมีขั้นที่ต่ำ ดังที่ปรากฏในรูป B และ C เป็นที่ราบขั้นบันไดที่เกิดจากลำน้ำไหลตวัดจากด้านหนึ่งของหุบเขาไปอีกด้านหนึ่ง และกัดลึกลงไปในดินอย่างช้า ๆ ในแต่ละขั้นที่ถัดลงไปความกว้างของที่ราบก็จะลดลงเรื่อยๆ

ที่ราบขั้นบันไดเก่าแก่ทั้งหลายถูกทำลายไปหมดแล้ว ส่วนที่ยังไม่ถูกทำลายก็เป็นหินฐานที่เคยเป็นลาดหุบเขาบริเวณนั้นมาก่อน กระแสน้ำจะกัดลึกลงไปในดินตะกอนน้ำพาและทิ้งที่ราบขั้นบันไดที่สูงกว่าไว้ ในภาพ C ดินตะกอนน้ำพาจะถูกพัดพาไปจำนวนมาก แต่ที่ราบที่เป็นหินที่คงทนกว่าจะยังคงสภาพอยู่ตามชายหุบเขาได้ มีหินซึ่งโผล่ขึ้นมาคอยกันมิให้บริเวณนั้นถูกน้ำเซาะ ซึ่งหินนั้นจะโผล่ขึ้นมาบริเวณตัว R ให้สังเกตว่าผาชันนั้นจะแยกที่ราบขั้นบันไดเป็นรอยโค้งซึ่งเว้าเข้าไปยังหุบเขา ความโค้งนี้อธิบายการเกิดได้ง่าย ๆ ว่าเกิดจากคุ้งน้ำที่กัดเซาะลงไปในตะกอนน้ำพาเป็นทางโค้งนั่นเอง

ที่ราบขั้นบันไดเป็นสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญเช่นเดียวกับที่ราบน้ำท่วมถึงริมฝั่งน้ำ ที่ราบขั้นบันไดที่ค่อนข้างแบนราบเหมาะที่จะทำการเพาะปลูก เป็นที่ตั้งเมืองหรือนคร และเหมาะที่จะสร้างทางหลวงและทางรถไฟ ในการใช้ประโยชน์ทุกชนิดที่ราบขั้นบันไดจะดีกว่าที่ราบน้ำท่วมถึง กล่าวคือที่ราบขั้นบันไดจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำสูงสุดมากกว่า ในขณะที่ที่ราบน้ำท่วมถึงจะมีน้ำท่วมอยู่บ่อย ๆ

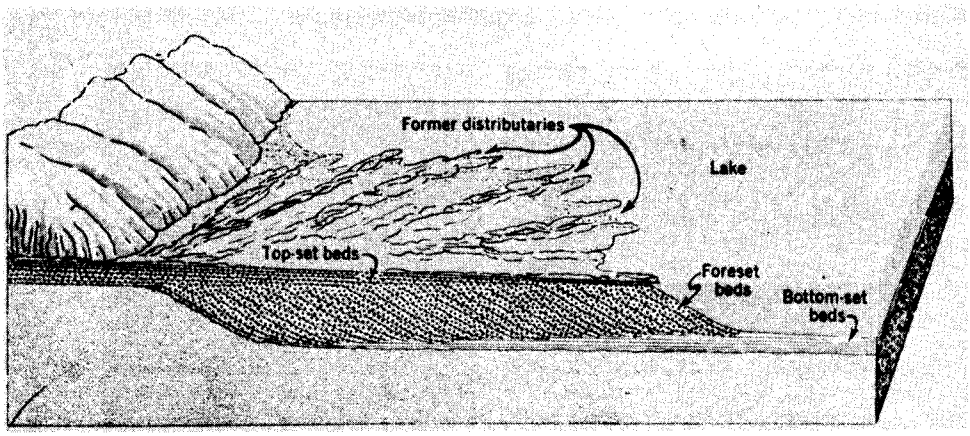
ดินดอนสามเหลี่ยม

การตกตะกอนของโคลน ทราย หรือทรายหินที่เกิดจากการกระทำของลำน้ำที่ไหลลงแหล่งที่มีน้ำอยู่เสมอ ทำให้เกิดดินดอนสามเหลี่ยม (delta) ขึ้น (ดูรูป 20.15) การตกตะกอนเป็นผลเนื่องมาจากความเร็วของกระแสน้ำในลำน้ำที่ไหลลงสู่แหล่งน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว อนุภาคหยาบ ๆ จะตก



รูป 20.15 ลำดับขั้นการเกิดของดินดอนสามเหลี่ยมอย่างง่าย

ตะกอนเป็นอันดับแรก อนุภาคดินเหนียวที่ละเอียดจะถูกพัดพาไปได้ไกลที่สุดและจะตกตะกอนเมื่อไปถึงบริเวณน้ำลึก (ดูรูป 20.16) การที่น้ำจืดมาปะทะกับน้ำเค็มทำให้ตะกอนดินเหนียวเกาะกันเป็นก้อนโตขึ้นแล้วตกลงสู่ก้นทะเล

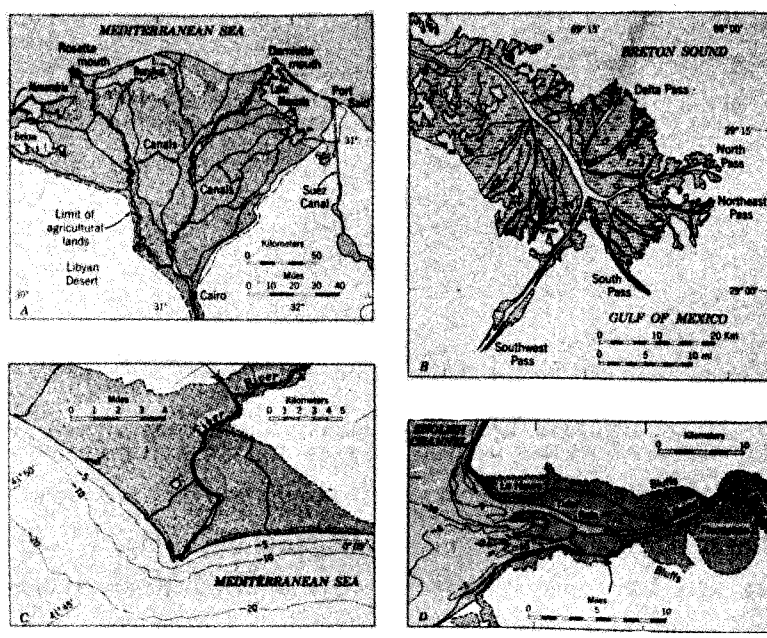


รูป 20.16 โครงสร้างของดินดอนสามเหลี่ยมอย่างง่าย

ดินดอนสามเหลี่ยมจะมีรูปร่างต่าง ๆ กัน ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำไนล์มีลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอักษร delta ในภาษากรีก เราจึงเรียกชื่อภูมิประเทศที่มีรูปร่างดังกล่าวว่า เดลตา ซึ่งในดินดอนสามเหลี่ยมดังกล่าวมีสาขาของลำน้ำไหลแผ่กระจายออกไปในลักษณะของรัศมี (ดูรูป 20.17 A) เนื่องจากบริเวณนี้มีชายฝั่งโค้งกว้าง ทำให้มีลักษณะเหมือนขอบของดินตะกอนรูปพัด เราเรียกดินดอนสามเหลี่ยมแบบนี้ว่า "ดินดอนสามเหลี่ยมรูปโค้ง" (arcuate delta) ดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำมิสซิสซิปปีจะมีรูปแบบที่ต่างไป (ดูรูปใน 20.17 B) คือเป็นแบบ "ตีนกา" (birdfoot) ซึ่งจะแผ่รูปนิ้วกระจายออกไปไกลและไปยุติ ณ แต่ละสาขา ปากน้ำที่ไหลลงสู่ชายฝั่งมีรูปร่างค่อนข้างตรงและมีคลื่นเคลื่อนมาปะทะค่อนข้างแรงทั้งสองฝากฝั่งของลำน้ำ ทำให้เกิดดินดอนสามเหลี่ยมเป็นแหลมยื่นออกไปและโค้งเว้าเข้าทั้งสองด้าน เนื่องจากดินดอนสามเหลี่ยมนี้คล้ายฟันจึงเรียกว่า "ดินดอนสามเหลี่ยมปลายแหลม" (cuspate delta—ดูรูป 20.17 C) บริเวณปากน้ำที่ไหลลงสู่อ่าวลึกแคบ (estury) ทำให้เกิดดินดอนสามเหลี่ยมแคบยาว (estuarine delta — ดูรูป 20.17 D)

ดินดอนสามเหลี่ยมของแม่น้ำใหญ่เป็นสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญนับจากยุคเริ่มต้นของประวัติศาสตร์ เพราะบริเวณนี้เป็นที่แบนราบกว้างใหญ่ทำให้มีเกษตรกรอาศัยอยู่หนาแน่น เมืองตามชายฝั่งที่สำคัญ ๆ ซึ่งเป็นตัวเชื่อมการจราจรในมหาสมุทรและตามลำน้ำมักจะตั้งอยู่ใกล้หรืออยู่บนดินดอนสามเหลี่ยม เช่น เมืองอเล็กซานเดรีย ซึ่งตั้งอยู่บนฝั่งแม่น้ำไนล์ เมืองกัลกัตตาบนฝั่งแม่น้ำคงคา—พรหมบุตร เมืองอัมสเตอร์ดัม และรอตเตอร์ดัมบนฝั่งแม่น้ำไรน์ เมืองเซี่ยงไฮ้บนฝั่งแม่น้ำแยงซีเกียง

เมืองมาเซลส์บนฝั่งแม่น้ำโรน และเมืองนิวออลีนส์บนฝั่งแม่น้ำมิสซิสซิปปี ดินดอนสามเหลี่ยมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณ 10 ฟุต (3 ม.) ต่อปีในแม่น้ำไนล์ และ 200 ฟุต (60 ม.) ต่อปี ในแม่น้ำโปและมิสซิสซิปปี ดังนั้น บางเมืองหรือบางนครที่สร้างบริเวณปากน้ำเมื่อหลายร้อยปีมาแล้ว ปัจจุบันนี้จะอยู่ห่างจากปากแม่น้ำออกไปหลายไมล์ จึงเป็นปัญหาทางวิศวกรรมที่สำคัญที่ต้องคอยเปิดลำน้ำเพื่อให้เรือเดินสมุทรเข้าไปตามลำน้ำในดินดอนสามเหลี่ยมสู่เมืองท่าได้

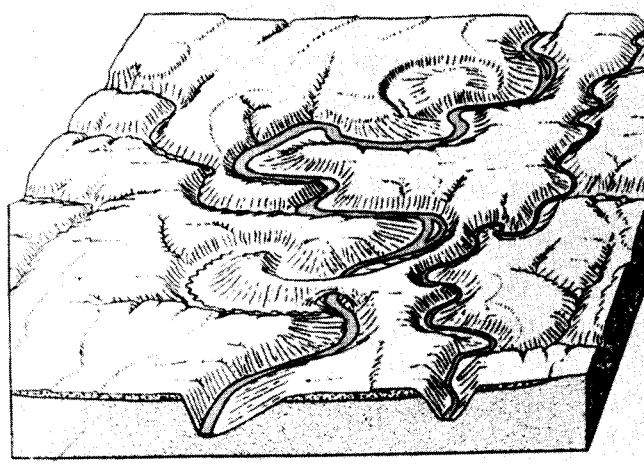


รูป 20.17 ดินดอนสามเหลี่ยม
A. ดินดอนสามเหลี่ยมรูปโค้งของแม่น้ำไนล์
B. ดินดอนสามเหลี่ยมแบบตีนกา ของแม่น้ำมิสซิสซิปปี
C. ดินดอนสามเหลี่ยมปลายแหลมของปากน้ำไทเบอร์อิตาลี
D. ดินดอนสามเหลี่ยมแคบยาว ของปากแม่น้ำซีน

ลำน้ำวัยกลับและโค้งน้ำตวัดอยู่ตัว

ลำน้ำวัยตอนกลางที่ได้พัฒนาเป็นแม่น้ำปรับระดับแล้วจนปากน้ำอยู่ ณ ระดับน้ำทะเลพอดีนั้น อาจมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นถ้าแผ่นดินยกตัวขึ้นหรือระดับน้ำทะเลลดลง ทั้งสองกรณีท้องลำธารจะถูกกัดให้ต่ำลงไปอีก ทำให้การกัดกร่อนทางดิ่งเป็นไปอย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น เพื่อให้ท้องน้ำมีภาพตัดขวางอยู่ในลักษณะปรับระดับ ณ ระดับต่ำอีกครั้งหนึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่า "กระบวนการลำน้ำวัยกลับ" (rejuvenation) จะเริ่มจากปากลำน้ำเก่าไหลลงสู่ระดับน้ำทะเลที่อยู่ต่ำลงไปซึ่งน้ำจะไหลเร็วขึ้นเป็นช่วงแรก ความเร็วนี้จะค่อย ๆ เคลื่อนไปทางต้นน้ำ และในไม่ช้าก็จะเพิ่มความเร็วตลอดลำน้ำในหุบเขา ทำให้แม่น้ำกลับเข้าสู่วัยหนุ่มอีกครั้งหนึ่ง

ถ้ากระบวนการลำน้ำวัยกลับเกิดขึ้นเมื่อลำน้ำเข้าสู่วัยตอนกลาง จะเป็นผลทำให้เกิดชายผั่งสูงชันในหุบเขาทั้งสองข้างซึ่งวางตัวตามแนวที่ราบน้ำท่วมที่เคยเกิดมาก่อน ตอนนี้ที่ราบขั้นบันไดจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำในแม่น้ำมาก (ดูรูป 20.18 และ 20.19) คุ้งน้ำซึ่งแม่น้ำเคยสร้างมาก่อนบนที่ราบน้ำท่วมถึงตอนนี้จะกัดลึกลงไปในหินฐาน และทำให้เกิดคุ้งโกรกธารลึกอยู่ภายใน ลำน้ำที่คดเคี้ยวนี้เรียกว่า "โค้งน้ำตวัดอยู่ตัว" (entrench meander) ซึ่งแตกต่างจากคุ้งน้ำที่เกิดในที่ราบน้ำท่วมถึง



รูป 20.18 การเกิดลำน้ำโค้งตวัดอยู่ตัวและสะพานธรรมชาติ

รูป 20.19 กูซเนคค์ของแม่น้ำซานฮวน รัฐยูตาห์ เป็นลำน้ำโค้งตวัดอยู่ตัว ซึ่งเกิดบนชั้นหินชั้นที่วางตัวในแนวราบ

แม้ว่าโค้งน้ำตวัดอยู่ตัวจะไม่เลื่อนไปได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับคุ้งน้ำบนที่ราบน้ำท่วมถึง แต่โค้งน้ำนี้ก็จะกัดเซาะพื้นดินอย่างช้าๆ การกัดกร่อนในโค้งน้ำตวัดอยู่ตัวนี้จะทำให้เกิดเนินเขาสูงกลมมีลำน้ำลึกล้อมรอบอยู่สามด้าน ส่วนด้านที่สี่จะเป็นสันดินแคบ ๆ ขวางทางน้ำอยู่

ในบางสภาวะที่หินฐานเป็นมวลชั้นหินทรายแข็ง คุ้งน้ำจะกัดส่วนที่เหลือให้กลายเป็นสะพานธรรมชาติโดยการตัดผ่านคอแคบ ๆ ของคุ้งน้ำนั้นไป (ดูจากรูป 20.18 ในหน้า 105) ตัวอย่างสะพานธรรมชาติที่รู้จักกันดี ได้แก่ Rainbow Bridge ในภูเขานาวาโฮทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐยูตาห์ National Monument ที่ไวท์แคนยอน เมืองซานฮวน ในรัฐยูตาห์

โค้งน้ำตวัดอยู่ตัวไม่ใช่บริเวณซึ่งจะสร้างทางรถไฟหรือทางหลวงผ่าน แต่ว่าจะเป็นเส้นทางสายสำคัญในการเดินทางผ่านได้ ตัวอย่างลักษณะของเส้นทางเช่นนี้จะเห็นได้จากแม่น้ำโมเซลที่คดเคี้ยวไปตามโค้งน้ำตวัดอยู่ตัว บริเวณที่สูงของอาร์เดนนีส ในเบลเยียมและเยอรมนีตะวันตก (ดูรูป 20.19 ในหน้า 105) บริเวณนี้วิศวกรได้เจาะอุโมงค์ผ่านคอคอดของโค้งน้ำนั้นทำให้ย่นระยะในการเดินทางไปได้มาก

คำถามทบทวนบทที่ 20

1. จงอธิบายกระบวนการกัดกร่อนพัดพาด้วยน้ำที่ไหลบนผิวดิน มีสิ่งใดบ้างที่ทำให้เราทราบถึงความรุนแรงของการกัดกร่อน การกัดกร่อนพัดพาแบบกระเด็นคืออะไร
2. จงอธิบายให้เห็นความแตกต่างระหว่างภาวะปกติของการกัดกร่อนพัดพากับการเร่งการกัดกร่อนพัดพา สมรรถภาพในการดูดซึมมีความสัมพันธ์กับสิ่งที่ปกคลุมผิวดิน เนื้อดิน และการใช้ที่ดินอย่างไร
3. จงอธิบายสิ่งที่เป็นตัวเร่งการกัดกร่อน จะมีอะไรเกิดขึ้นกับดินที่ถูกกัดกร่อน จงอธิบายความแตกต่างระหว่าง ดินลาดเชิงผา วัตถุน้ำพา การตกตะกอนทำความเสียหายให้แก่หุบเขาได้อย่างไร
4. กิจกรรมทางธรณีวิทยาของลำน้ำ 3 ประการ ได้แก่อะไรบ้าง จงอธิบายวิธีการกัดกร่อนพัดพาของลำน้ำ กุมภลักษณ์ (บ่อรูปหม้อ) คืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร
5. จงอธิบายวิธีการพัดพาของลำน้ำ วิธีการพัดพาแต่ละวิธีสามารถพัดพาวัตถุขนาดใดไปได้บ้าง การกัดกร่อนชายผึ่งน้ำจะเกิดได้มากที่สุดเมื่อไร
6. ตะกอนแขวนลอยจำนวนมหาศาลแขวนลอยไปในกระแสน้ำได้อย่างไร และทำไมแม่น้ำขนาดใหญ่จึงพัดพาตะกอนไปได้ต่างกัน
7. จงอธิบายการเปลี่ยนภาพตัดด้านข้างของลำน้ำดินตะกอนในช่วงวัฏจักรของน้ำมากและน้ำน้อย จงนิยามคำว่าสมรรถภาพของลำน้ำ สิ่งใดเป็นเหตุที่ทำให้สมรรถภาพของลำน้ำเปลี่ยนแปรไป
8. จงอธิบายถึงปรากฏการณ์สำคัญในการเกิดของลำน้ำใหม่
9. ลักษณะภูมิประเทศใดบ้างซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของลำน้ำวัยหนุ่ม สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของลำน้ำวัยหนุ่มมีอะไรบ้าง
10. ลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญของลำน้ำวัยตอนกลางมีอะไรบ้าง ภาพตัดตามยาวของลำน้ำที่มีภาวะสมดุล ลำน้ำที่ปรับระดับแล้วคืออะไร ลำน้ำปรับระดับแล้วมีภาพตัดตามยาวของลำน้ำเป็นเช่นใด
11. จงอธิบายคำว่าที่ราบน้ำท่วมถึง และคุ้งน้ำของแม่น้ำตะกอน ที่ราบน้ำท่วมถึงมีความสำคัญอย่างไร
12. จงอธิบายความหมายของคำต่อไปนี้ ตลิ่งชัน ตลิ่งลาด การทับถมปลายเนิน ส่วนตัดขาดทะเลสาบรูปแอก เขื่อนธรรมชาติ ธารยาซู
13. ขีดจำกัดต่ำสุดที่ลำน้ำสามารถกัดร่องน้ำได้ลึกที่สุดคืออะไร ลำน้ำที่เราพบบนพื้นที่เกือบราบ คือลำน้ำอะไร
14. หลักการบรรเทาอุทกภัยที่ใช้กันอยู่มีกี่วิธี แต่ละวิธีมีหลักการอย่างไร การสร้างเขื่อนสองฝั่งลำน้ำเพื่อป้องกันอุทกภัยมีข้อดีและข้อเสียอย่างไร เราสามารถดัดแปลงร่องน้ำเพื่อลดระดับน้ำท่วมได้อย่างไร
15. การทับถมในลำน้ำจะเกิดขึ้นเมื่อใด การทับถมร่องน้ำทำให้ความลาดของร่องน้ำเปลี่ยนแปลงหรือไม่ จงอธิบายลักษณะของลำน้ำเกลียวเชือก

16. จงกล่าวถึงการทับถมและการตกตะกอนที่มนุษย์มีส่วนทำให้เกิดได้มากขึ้น เหมืองแร่ทำให้เกิดการทับถมในแม่น้ำได้อย่างไร สิ่งแวดล้อมใดบ้างที่มีผลทำให้เกิดการตกตะกอน
17. จงอธิบายการเกิดที่ราบขั้นบันได แผ่นน้ำแข็งในทวีปที่ขยายตัวและหดตัวทำให้เกิดที่ราบขั้นบันไดทางตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกาได้อย่างไร
18. จงอธิบายลำดับขั้นการเติบโตของดินดอนสามเหลี่ยมชนิดธรรมดา โครงสร้างของดินดอนสามเหลี่ยมชนิดธรรมดามีลักษณะเป็นอย่างไร
19. จงอธิบายดินดอนสามเหลี่ยมปากน้ำที่สำคัญ ๆ ในโลก รวมทั้งอธิบายถึงอัตราการเติบโต
20. แม่น้ำวัยตอนกลาง แม่น้ำที่ปรับระดับแล้ว กลายเป็นลำน้ำวัยกลับได้อย่างไร ลำน้ำโค้งตวัดอยู่ตัวเกิดขึ้นได้อย่างไร

บทที่ 21
วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดิน

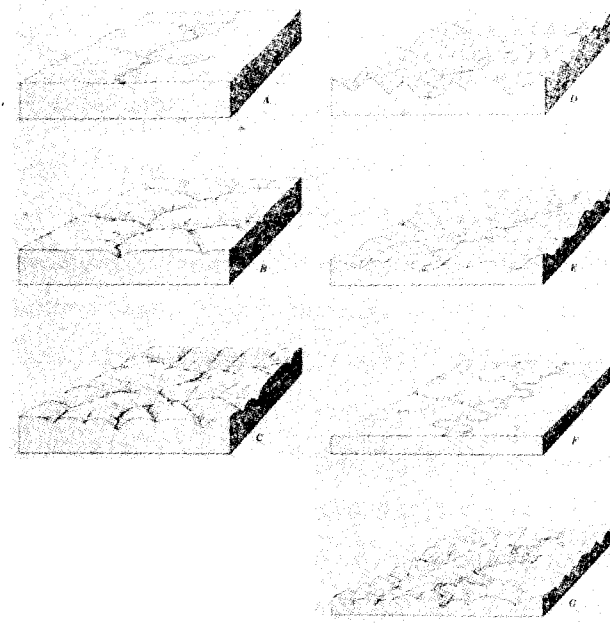
เราได้กล่าวถึงการเกิดลักษณะภูมิประเทศโดยการผุพังทลาย การเคลื่อนที่ตามพื้นลาด น้ำไหลเหนือผิวดินและลำน้ำมาแล้ว ในบทนี้เราจะได้พิจารณาถึงการกัดกร่อนในบริเวณกว้าง โดยการกระทำของตัวการต่าง ๆ ดังกล่าวร่วมกัน ให้จินตนาการพื้นที่ขึ้นมาบริเวณหนึ่ง เช่น ทวีปหรือบริเวณอันกว้างใหญ่บริเวณหนึ่งของพื้นทวีป ซึ่งยกตัวสูงขึ้นโดยการกระทำของแรงภายในโลกที่กระทำให้เกิดแผ่นดินใหม่ขึ้น แผ่นดินที่ถูกยกตัวขึ้นใหม่นี้กำหนดให้เป็น "ขั้นกำเนิด" (initial stage) ของวัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดิน (cycle of landmass denudation) เพื่อให้ง่ายแก่การเข้าใจเราต้องตั้งข้อตกลงเบื้องต้นว่า แผ่นดินนั้นยกระดับขึ้นมาอย่างรวดเร็ว และต่อจากนั้นแผ่นดินนั้นจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งเกิดจากการกระทำของตัวการกัดกร่อนตลอดระยะเวลาอันยาวนานตราบเท่าที่การกระทำนั้นไม่ถูกรบกวน

แนวความคิดเกี่ยวกับการกัดกร่อนพื้นแผ่นดินเพียงแนวความคิดเดียวนั้น ไม่สามารถจะอธิบายทุกปรากฏการณ์ได้ เพราะมีความแตกต่างกันระหว่างวิวัฒนาการของพื้นดินในเขตชุ่มชื้นและเขตแห้งแล้ง จึงจำเป็นต้องอธิบายทั้งสองวัฏจักรทั้งในเขตชุ่มชื้นและเขตแห้งแล้ง ยิ่งไปกว่านั้นแผ่นดินกำเนิดนั้นต้องค่อนข้างราบเรียบ ซึ่งมีลักษณะคล้ายพื้นทะเลที่ถูกยกตัวด้วยกระบวนการสร้างทวีป (epeirogenic) ทำให้แผ่นดินยกตัวขึ้นเป็นบริเวณกว้าง อีกลักษณะภูมิประเทศหนึ่งเป็นพวกสันเขา เกิดขึ้นเนื่องจากการหักและการโก่งของหินจากกระบวนการสร้างภูเขา (orogenic) ในจุดประสงค์ของบทนี้จะได้อธิบายทั้งสองอย่างรวมกัน คือ (1) คือพื้นดินที่ราบเรียบในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น (2) ลักษณะภูมิประเทศขรุขระเป็นภูเขาในเขตแห้งแล้ง

วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดินในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น

พื้นแผ่นดินที่เกิดจากท้องทะเลที่ราบเรียบได้รับการยกตัวขึ้นนั้น จะมีอาการลาดเอียงน้อย ๆ จากพื้นดินเบื้องหลังลงสู่ทะเล อาการเอียงของพื้นดินแสดงได้ตามรูปที่ 21.1 ในหน้า 110 ในบล็อค A จากรูปข้างบนกำหนดให้เป็น "ขั้นกำเนิด" น้ำที่ไหลบนผิวดินใหม่นี้จะระบายออกไปตามทิศที่พื้นดินลาดเอียงลงไป ทำให้เกิดลำน้ำกำเนิด (initial stream) ในกรณีที่ต้องการอธิบายให้ต่อเนื่องกับชีวประวัติลำน้ำ ลำน้ำนี้ก็คือลำน้ำวัยหนุ่มซึ่งมีหุบเขาเป็นรูปตัว V กัดลึกลงไปในพื้นดิน หนองน้ำและทะเลสาบที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ต่ำบนพื้นผิวกำเนิดนั้น เมื่อมีทางน้ำเกิดขึ้นน้ำนั้นก็จะถูกระบายออกไป

บล็อค B แสดงให้เห็นถึงขั้นวัยหนุ่มตอนต้น (early youth) ในวัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดิน ความสูงของพื้นที่ คือ ความต่างระดับระหว่างกันหุบเขากับยอดสันปันน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในวัยนี้ เนื่องจากลำน้ำกัดกร่อนในทางดิ่งอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันพื้นที่ระหว่างลำน้ำยังคงมีส่วนของ



รูป 21.1 วัฏจักรการกัดกร่อนแผ่นดินในเขตชุ่มชื้น
(A) ขั้นกำเนิด ความต่างระดับมีน้อย การระบายน้ำไม่ดี
(B) วัยหนุ่มตอนต้น มีหุบเขาแคบ ที่สูงยังคงแบนราบ
(C) วัยหนุ่มตอนปลาย มีหุบเขามากขึ้น ที่ราบสูงลดจำนวนลง
(D) วัยตอนกลาง มีหุบเขามากที่สุด มีสันเขาแคบๆ ไม่มีที่ราบสูง
(E) วัยกลางตอนปลาย ความต่างระดับลดลง หุบเขากว้างขึ้น
(F) วัยแก่ มีพื้นที่เกือบราบพร้อมกับเขาโดด
(G) พื้นที่เกือบราบถูกยกตัวขึ้น เกิดลำน้ำวัยกลับ เริ่มวัฏจักรการผัดกร่อนในช่วงที่ 2

พื้นดินกำเนิดที่แบนราบเหลืออยู่ ในขณะที่หุบเขาลึกลงตลอดเวลา หุบเขานั้นก็จะกว้างขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเศษหินที่ปรักหักพังจะถูกกวาดลงไปตามหุบเขาลงสู่ลำน้ำ ทำให้อัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างลำน้ำน้อยลงขณะที่ลาดหุบเขาขยายตัวเพิ่มขึ้น สาขาเล็ก ๆ ของหุบเขาจะเริ่มแยกออกจากลำน้ำใหญ่และกัดลึกเข้าไปในพื้นดินกำเนิดมากขึ้นทุกที

บล็อก C แสดงให้เห็นถึงส่วนที่เหลือของผิวดินกำเนิด ซึ่งอยู่ระหว่างหุบเขาที่ได้พัฒนาอย่างดีแล้ว โดยพื้นที่ส่วนที่เหลือนี้จะมีพื้นที่ลดน้อยลงแต่พื้นที่ของหุบเขามีมากขึ้น ในขั้นนี้เราเรียกว่า "วัยหนุ่มตอนปลาย" (late youth) ความต่างระดับของพื้นที่ยังคงเพิ่มขึ้นขณะที่ลำน้ำยังคงกัดกร่อนในทางดิ่งอยู่ต่อไป เมื่อลำน้ำใหญ่เริ่มที่จะปรับระดับและเริ่มจะมีที่ราบน้ำท่วมถึง ความต่างระดับที่เคยเพิ่มขึ้นก็จะยุติลง ถึงตอนนี้พื้นราบจากพื้นดินกำเนิดก็จะหมดไป และลาดหุบเขาจะตัดกันเป็นแนวสันเขาแคบ ๆ

เมื่อความต่างระดับถึงจุดสูงสุดแล้ว "วัยตอนกลาง" (maturity) ของการกัดกร่อนพื้นดินก็เริ่มขึ้น (ดูบล็อก D) ถึงตอนนี้พื้นหุบเขาจะมีระดับต่ำลงไปอย่างช้า ๆ ขณะที่พื้นที่ระหว่างลำน้ำ (interstream) จะลดระดับต่ำลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ความต่างระดับจะลดลงอย่างคงที่ ความลาดก็จะมีมุมน้อยลง การกัดกร่อนตามพื้นลาดและการเคลื่อนที่ตามพื้นลาดจะเป็นไปได้น้อยกว่าขั้นก่อนหน้านี้

ระดับฐานและพื้นเกือบราบ

เมื่อช่วงเวลาเนิ่นนานต่อไปจากวัยตอนกลาง ภูมิประเทศจะต่ำลงมีพื้นผิวเป็นลอนคลื่น และอาจกล่าวได้ว่าพื้นดินนั้นเข้าสู่ "วัยแก่" (old stage) แล้ว (ดูบล็อก F) ในช่วงนี้ลำน้ำเกือบทั้งหมดมีความลาดน้อยมากและมีที่ราบน้ำท่วมถึงมาก วาระสุดท้ายที่จะเกิดขึ้นถ้ามีช่วงเวลาไม่จำกัดก็คือ พื้นดินจะมีระดับพื้นผิวเท่ากับระดับน้ำทะเล สำหรับพื้นผิวจินตนภาพนี้เราเรียกว่า "ระดับฐาน" (base level) ซึ่งใช้เรียกพื้นผิวที่มีฐานที่เกิดจากการกัดกร่อนและการกัดกร่อนนั้นก็ยังคงมีต่อไป ขณะเดียวกันระดับนั้นก็อยู่ในระดับเดียวกับระดับน้ำทะเลด้วย ถึงแม้ว่าระดับฐานนี้เป็นเพียงระดับพื้นผิวในทางทฤษฎี แต่ก็อาจเกิดเป็นจริงได้ในส่วนต่าง ๆ ของโลก ตลอดยุคทางธรณีวิทยาที่ผ่านไป คำว่า "พื้นเกือบราบ" (peneplain) เราใช้เรียกพื้นผิวดินที่มีความต่างระดับน้อยมากที่เกิดขึ้นในวัยแก่ของวัฏจักรการกัดกร่อน

พื้นเกือบราบนี้มิใช่พื้นราบที่สมบูรณ์แต่ว่าจะมีความลาดน้อย ๆ เนื่องจากลำน้ำไหลช้ามากและความลาดของพื้นดินมีน้อย การกัดกร่อนในช่วงนี้จึงมีน้อยมาก ไม่เป็นการง่ายนักที่จะประมาณจำนวนปีได้ว่าต้องใช้เวลานานเท่าใด พื้นดินจึงจะผ่านช่วงพื้นดินกำเนิดมาสู่วัยแก่ได้ เนื่องจากจำนวนปีนี้ขึ้นอยู่กับความสูงของพื้นดินที่ถูกยกตัวขึ้นในตอนเริ่มต้น และความแข็งของหินที่จะผุกร่อน และการถูกกัดเซาะ แต่อาจกล่าวได้ว่าจากกรณีที่ทราบได้จากข้อมูลทางธรณีวิทยานั้น ต้องใช้เวลานับหลายล้านปีกว่าที่ภูเขาจะถูกกัดกร่อนเป็นพื้นที่เกือบราบได้

บางบริเวณมีแนวหรือสายหินที่แข็งเกินกว่าที่จะผุกร่อน และกัดเซาะได้เร็วเท่าบริเวณอื่น ๆ ขณะที่วัฏจักรดำเนินไปจนถึงวัยตอนกลางเลยไปสู่วัยแก่ หินแข็งนี้จะยังคงเหลืออยู่ซึ่งสูงเด่นตระหง่านท่ามกลางพื้นผิวเกือบราบ เป็นภูเขาหรือเนินเขาที่แยกตัวออกไป เนินเขาหรือภูเขาที่เหลืออยู่นี้เราเรียกว่า "เขาโดด" (monadnock) ซึ่งเป็นชื่อที่ได้จากภูเขาโมแนดน็อคในภาคใต้ของรัฐนิวแฮมป์เชียร์

พื้นดินวัยกลับ

วิธีการหนึ่งที่พื้นที่เกือบราบจะยกตัวขึ้นมาใหม่ก็ด้วยการเคลื่อนไหวของเปลือกโลก ซึ่งเป็นไปตามหลักการที่ได้กล่าวถึงในบทที่แล้ว ซึ่งเกิดจากแรงภายในของโลกที่กระทำเป็นระยะ ๆ และในช่วงที่เปลือกโลกบางส่วนมีเสถียรภาพอย่างเต็มที่ ก็จะสิ้นสุดลงด้วยการถูกทำลายลงอย่างช้า ๆ

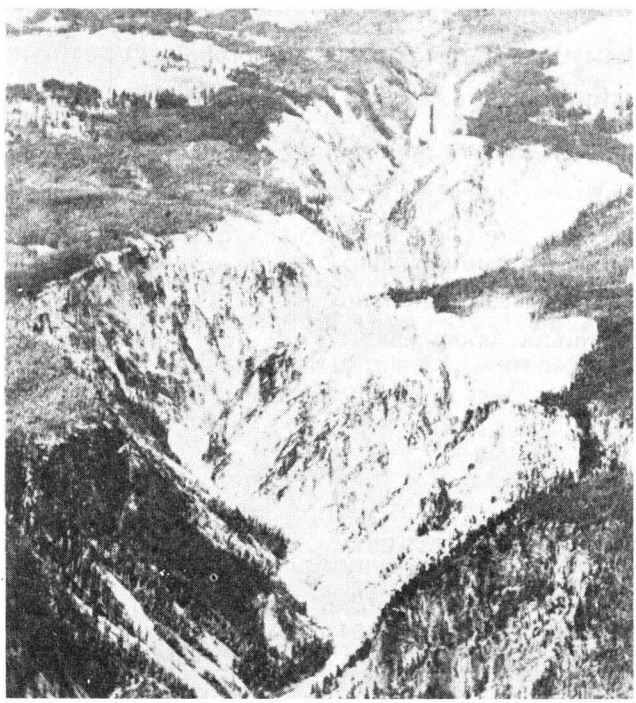
พื้นผิวเกือบราบจะโก่งตัวหรือหักอย่างรุนแรงในขณะเกิดกระบวนการสร้างภูเขาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้วัฏจักรการกัดเซาะเกิดขึ้นอีก ถ้าการยกตัวนั้นเกิดจากกระบวนการสร้างทวีปที่ยกระดับพื้นที่เกือบราบให้สูงขึ้นนับร้อยหรือนับพันฟุต สภาพพื้นผิวเกือบราบจะคงสภาพอยู่ได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง ในบล็อก G เป็นปรากฏการณ์ที่กำลังกล่าวถึงนี้ซึ่งมีลักษณะคล้าย ๆ กันกับในบล็อก C ความแตกต่างระหว่างทั้งสองบล็อกนี้ก็คือ พื้นดินกำเนิดของบล็อก C นั้นเดิมเป็นพื้นทะเล ในขณะที่พื้นผิวกำเนิดในบล็อก G เป็นพื้นเกือบราบที่ยกตัวขึ้นมา การระบายน้ำในพื้นเกือบราบที่ยกตัวขึ้นนั้นพัฒนามาอย่างดีอยู่แล้ว ดังนั้น ลำน้ำก็จะเข้าสู่วัยกลับด้วย และกัดกร่อนทางดิ่งให้เกิดหุบเขารูปตัว V ขึ้นในลำน้ำเก่า เมื่อวัฏจักรที่สองของพื้นดินนี้ถึงวัยตอนกลาง พื้นผิวเกือบราบจากวัฏจักรแรกก็จะหมดไป แต่จะมองเห็นอิทธิพลของมันอยู่ได้จากยอดเขาในบริเวณนั้นทั้งหมด จำนวนของวัฏจักรในพื้นที่หนึ่ง ๆ นั้นจะเกิดขึ้นได้โดยไม่จำกัดจำนวนวัฏจักร ในบางแห่ง เช่น บริเวณเทือกเขาแอปปาเลเชียนทางตะวันออกของอเมริกาเหนือ เคยมีวัฏจักรดังกล่าวเกิดมาแล้วสามหรือสี่รอบ ซึ่งสามารถตีความได้จากการศึกษาธรณีสัณฐาน

ลักษณะของสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรการกัดกร่อน

ความสำคัญของสิ่งแวดล้อมในขั้นต่าง ๆ ของวัฏจักรการกัดกร่อนแผ่นดินนั้นมีมากมาย พื้นที่ในขั้นกำเนิดของวัฏจักรจะมีลักษณะค่อนข้างราบ ซึ่งทำให้การระบายน้ำเป็นไปได้ไม่ดี จึงมีที่ชื้นแฉะและหนองบึงอยู่มาก หาดทรายที่เกิดจากการทับถมจะมีหลงเหลืออยู่จากการกระทำของคลื่นที่พัดเข้าสู่พื้นดินที่ค่อย ๆ ยกตัวขึ้นจากใต้ทะเล ตามปกติจะเป็นดินที่ไม่อุดมสมบูรณ์ ตัวอย่างที่ดีที่สุดก็คือชายฝั่งในรัฐจอร์เจียและทางเหนือของรัฐฟลอริดา จะมีหนองน้ำขนาดใหญ่ชื่อ โอกีฟีโนคี (Okefenokee) อยู่ในบริเวณที่ต่ำที่เคยเป็นท้องทะเลมาก่อน ขณะที่ตามแนวสันทรายในบริเวณที่สูงจะวางตัวขนานไปกับชายฝั่ง ทรายซึ่งมีรูพรุนเหล่านี้ทำให้ธาตุอาหารพืชถูกชะล้าง (leach) ไปจากเนื้อดินหมด

พื้นดินในขั้นกำเนิดมิใช่ว่าจะยกตัวขึ้นมาจากทะเลทั้งหมด บางแห่งเช่นที่ราบสูงทางตะวันออกของโคโลราโด ตะวันตกของแคนซัสและภาคเหนือของเทกซัสนั้น เกิดจากการทับถมในลำน้ำ และแม้ว่าจะเป็นบริเวณที่ค่อนข้างราบ ก็ยังมีการระบายน้ำได้ดี ทำให้ไม่มีที่ชื้นแฉะมากนัก ที่ราบสูงนี้จึงเป็นแหล่งผลิตข้าวสาลี ทั้งนี้มิใช่จะเกิดจากมีดินและอากาศเหมาะสมเท่านั้น แต่ยังเนื่องมาจากความราบเรียบของพื้นดินด้วย ทำให้การปลูกและเก็บเกี่ยวธัญพืชด้วยเครื่องจักรทำได้สะดวก

พื้นที่อื่น ๆ ของพื้นดินกำเนิดนั้น พื้นผิวเกิดจากลาวาที่ไหลออกมาทับไปบนภูมิประเทศที่เคยถูกน้ำท่วมมาก่อน ทำให้พื้นที่สูงขึ้นและเป็นที่ราบสูงที่เป็นลอนคลื่น ลักษณะเช่นนี้เป็นต้นกำเนิดของที่ราบสูงที่มีลักษณะเช่นเดียวกับที่แม่น้ำเยลโลสโตน ได้กัดกร่อนให้เกิดโกรกธารขึ้น (ดูรูป 21.2 ประกอบ) ที่ราบลุ่มแม่น้ำสเนคในภาคใต้ของไอดาโฮก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่ง บริเวณที่อยู่ในวัยหนุ่มและเป็นบริเวณที่ค่อนข้างราบเรียบซึ่งอยู่ระหว่างหุบเขารูปตัว V จะมีประชากรอาศัยอยู่ เนื่องจากหุบเขานี้ยังอยู่ในวัยหนุ่มจึงไม่มีที่ราบน้ำท่วมถึง ดังนั้น ทางรถไฟ ถนน เมืองและฟาร์มจึงตั้งอยู่บนที่ราบสูง บริเวณวัยตอนกลางเป็นบริเวณที่ไม่มีที่ราบในระดับสูงหลงเหลืออยู่แล้ว ที่สูงจึงไม่เหมาะสมกับการตั้งถิ่นฐาน การเกษตรกรรมหรือการคมนาคม บริเวณภูเขาของโลกหลายแห่งอยู่ในวัยตอนกลางของวัฏจักรการกัดกร่อน บริเวณที่มีความสูงมาก ๆ และมีความลาดชันสูง เป็นผลมาจากการยกตัวของเปลือกโลกในส่วนนั้นที่เกิดขึ้นในยุคปัจจุบัน บริเวณชายฝั่งที่ยกตัวขึ้นในระดับ 200 หรือ 300 ฟุต (60–90 ม.) เหนือระดับน้ำทะเลไม่มีทางที่จะเป็นภูเขาที่แท้จริงไปได้ เพราะลำน้ำสามารถกัดลงไปในเนื้อดินได้มากกว่าที่บริเวณนั้นจะยกตัวขึ้นมาได้ ในบางพื้นที่ซึ่งแม่น้ำที่กัดกร่อนพื้นที่นั้นได้วิวัฒนาการมาในช่วงวัฏจักรหนึ่งจนถึงวัยตอนกลาง ซึ่งลำน้ำสายหลักนั้นได้วิวัฒนาการมาจนถึงวัยตอนกลางเต็มวัยแล้ว บริเวณท้องน้ำจะมีที่ราบเกิดขึ้นกว้างขวางพอสมควร ขณะเดียวกันพื้นที่ที่ล้อมรอบร่องน้ำนั้นยังคงขรุขระอยู่มาก ภายใต้สภาวการณ์เช่นนี้ กิจกรรมของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นการตั้งถิ่นฐาน การทำมาหากินจะกระทำกันอยู่ในหุบเขา



รูป 21.2 แกรนด์แคนยอนของแม่น้ำเยลโลว์สโตน เป็นการกัดกร่อนไปบนพื้นผิวกำเนิดของที่ราบสูงลาวา

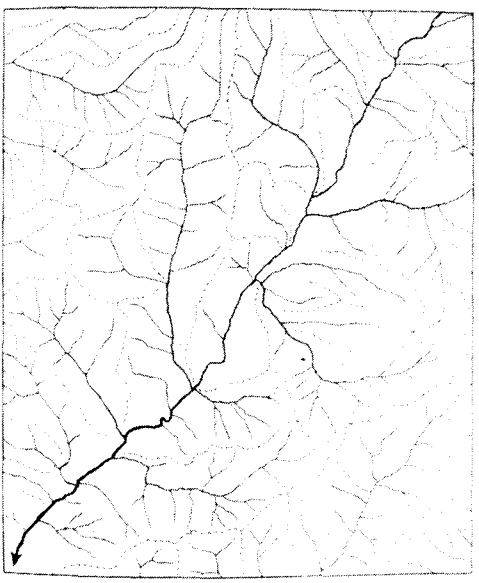
พื้นที่ที่อยู่ในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้นในวัยกลางตอนปลาย หรือวัยแก่ของวัฏจักรจะเหมาะแก่การเพาะปลูก ความลาดมีปานกลางหรือต่ำและการระบายน้ำเป็นไปได้ดี ดินมีแนวโน้มว่าจะหนา การทำลายดินด้วยการกัดเซาะพัดพาสามารถป้องกันได้ สามารถสร้างถนน ทางรถไฟตัดผ่านพื้นที่ที่เป็นลอนคลื่นได้ไม่ยาก และยังทำให้เกิดที่ราบน้ำท่วมถึงที่วิวัฒนาการมาอย่างดีแล้ว

ส่วนใหญ่ของพื้นที่ในลุ่มแม่น้ำอะเมซอนเป็นพื้นผิวเกือบราบ แต่เนื่องจากมีฝนตกชุกจึงมีป่าไม้หนาทึบ ทำให้บริเวณนั้นยากแก่การที่จะแผ้วถางนอกจากต้องใช้แรงงานจำนวนมหาศาล บริเวณที่ราบน้ำท่วมถึงที่ต่ำ ๆ จะมีหนองน้ำเป็นอุปสรรคสำคัญในการที่จะบุกรุกเข้าไป

พื้นผิวเกือบราบที่ยกตัวขึ้นและมีหุบเขาลึกเกิดขึ้นในวัฏจักรใหม่นั้น เปรียบได้กับลักษณะของสิ่งแวดล้อมในวัยหนุ่มของวัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดิน

โครงข่ายการระบายน้ำ

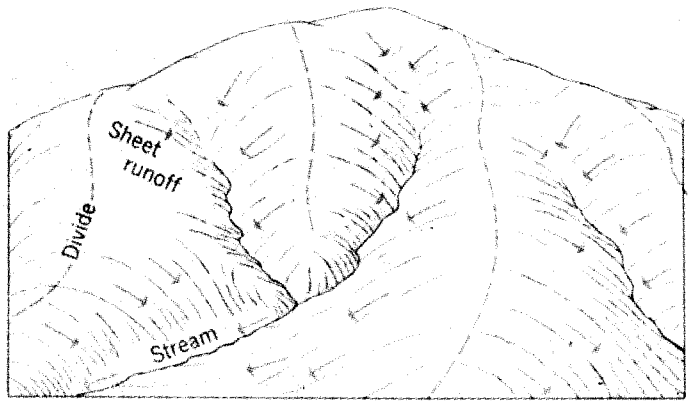
พื้นผิวดินของโลกส่วนมากประกอบด้วยภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของวัฏจักรการกัดกร่อนในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น แม้ว่าจะมีพื้นที่บางบริเวณที่อยู่ในยุคกำเนิดหรือวัยหนุ่ม ซึ่งเป็นวัยที่มีช่วงสั้น ดังนั้น พื้นที่ส่วนใหญ่ของทวีปจึงประกอบไปด้วยลักษณะระบบการระบายน้ำที่วิวัฒนาการดีแล้ว แม้แต่ในทะเลทรายซึ่งมีวัฏจักรแตกต่างไปจากพื้นที่ทั้งหลาย เพราะจะประกอบไปด้วยภูเขาและที่ราบสูง แต่ก็มีระบบการระบายน้ำที่เหมือนกับวัฏจักรในเขตชื้น จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรสนใจถึงวิวัฒนาการของรูปทรง (form) หรือสัณฐาน (morphology) ของโครงข่ายลำน้ำ ระบบพื้นลาดที่สัมพันธ์กันและพื้นที่ลุ่มน้ำ



รูป 21.3 ระบบการระบายน้ำประกอบด้วยพื้นที่รับน้ำขนาดเล็กมากมาย พื้นที่รับน้ำแต่ละแห่งจะมีขนาดพอเหมาะกับร่องน้ำที่ไหลในพื้นที่นั้น เส้นทึบ คือลำน้ำ เส้นประคือขอบพื้นที่รับน้ำ

จากรูปนี้เป็นแผนที่แสดงลำน้ำที่เกิดขึ้นอย่างถาวรพร้อมกับแสดงสันเขาของพื้นที่ลุ่มน้ำใหญ่ รูปนี้เป็นตัวอย่างหนึ่งของโครงข่ายระบายน้ำของพื้นที่ในวัยตอนกลาง

ความลาดของพื้นดินจะลาดสอบเข้าหากันไปสู่ต้นลำน้ำของแต่ละสาย น้ำน้ำจำนวนที่เพียงพอซึ่งไหลในช่วงที่มีฝนตกชุกมารวมกัน ทำให้เกิดน้ำไหลในลำน้ำ และทำให้ร่องน้ำเป็นทางน้ำที่ดี ปราศจากดินและพืชพรรณไม้ต่างๆ ซึ่งอาจจะขัดขวางทางน้ำหรือทำให้ทางน้ำเปลี่ยนทางเดินได้ (ดูรูป 21.4 ประกอบ) ในช่วงระยะเวลาอันยาวนาน ขณะที่วัฏจักรของพื้นดินผ่านจากวัยหนุ่มเข้าสู่วัยตอน



รูป 21.4 น้ำไหลบนผิวดินจากพื้นลาดในบริเวณต้นลำน้ำของระบบลำน้ำ จะเป็นแหล่งน้ำและกรวดทรายที่ไหลไปตามลำน้ำ

กลาง พื้นดินจะถูกแบ่งเป็นส่วน ๆ ด้วยลำน้ำเล็ก ๆ ซึ่งแต่ละลำน้ำจะรับปริมาณน้ำจากพื้นที่นั้น ทำให้ลำน้ำนั้นคงสภาพอยู่ได้ ความลาดของพื้นดินและอาการเอียงของลำน้ำต่างก็จะปรับตัว ดังนั้น อัตราการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นช้าลง ทำให้ลำน้ำไม่ยาวขึ้นจนไปเชื่อมกับลำน้ำข้างเคียง หรือไม่ก็ไม่มีพื้นที่น้ำไหลเพียงพอที่มันจะกลายเป็นลำน้ำที่ตื้นเขินด้วยเศษหินที่ยังไม่หลุดออกจากห้วงลำธาร การกัดกร่อนทางดิ่งของลำน้ำช้าลง และอาการลาดเอียงของพื้นลาดที่ต่ำลงจะเป็นไปได้ช้า และสันเขาก็จะต่ำลงอย่างช้า ๆ แต่ก็ยังจะต่ำลงเรื่อย ๆ ต่อไป แต่โดยทั่วไปแล้วตลอดบริเวณนั้นจะเป็นรูปแบบเดียวกัน

ลำน้ำสาขาแต่ละสาขาจะไหลไปเชื่อมกับสาขาอื่น ๆ หรือไหลลงสู่ลำน้ำที่ใหญ่กว่า หรือกล่าวได้ในอีกนัยหนึ่งว่าพื้นที่รับน้ำจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ลำน้ำใหญ่ขึ้นทั้งมิติของลำน้ำและปริมาณน้ำที่ไหล ลำน้ำทั้งหลายที่มาเชื่อมกันมักจะเชื่อมกันเป็นมุมแหลม ดังนั้น น้ำที่ไหลลงลำน้ำใหญ่จึงมาจากหลายทิศทาง และลำน้ำสายใหญ่ก็จะไหลไปในทิศทางที่จะเป็นไปได้ และมีลำน้ำน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ขณะเดียวกันระบบโครงข่ายลำน้ำก็ต้องตระเตรียมองค์ประกอบพื้นที่ลำน้ำของน้ำไหลบนพื้นผิวให้เป็นการเพียงพอด้วย

กฎของเพลย์แฟร์

ก่อนปี ค.ศ. 1800 นักธรรมชาติวิทยาเชื่อกันอย่างกว้างขวางว่า ลำน้ำในหุบเขาและภูมิประเทศอื่น ๆ เกิดจากการยกตัวหรือแผ่นดินแยกอย่างรุนแรง เชื่อกันว่าลำน้ำที่เกิดขึ้นจนเต็มหุบเขานั้นเกิดโดยวิธีนี้ ดังนั้น จึงเชื่อกันว่ามีหุบเขาเกิดขึ้นมาก่อน และมิได้เกิดจากการกระทำของลำน้ำแต่อย่างใด

นักธรณีวิทยาชาวอังกฤษชื่อ จอห์น เพลย์แฟร์ ได้ให้เหตุผลอย่างแจ่มแจ้งในครั้งแรก และได้ให้หลักการที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับของคนทั่วโลกในปัจจุบันนี้ ในเรื่องที่เกี่ยวกับลำน้ำและหุบเขาของลำน้ำ เขาได้พิมพ์หลักการออกเผยแพร่ในปี ค.ศ. 1802 เป็นที่รู้จักกันในปัจจุบันนี้ว่า "กฎของเพลย์แฟร์" (Playfair's Law) มีใจความดังนี้

"ลำน้ำทุกลำน้ำปรากฏว่าประกอบด้วยลำน้ำสายหลัก ซึ่งได้รับน้ำจากลำน้ำสาขา ซึ่งแต่ละลำน้ำจะไหลไปในหุบเขาที่เป็นอัตราส่วนกับขนาดของลำน้ำ และลำน้ำทุกลำน้ำจะมาเชื่อมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดระบบหุบเขาที่เชื่อมต่อระหว่างกัน และมีการปรับความลาดเป็นอย่างดี ทำให้ไม่มีลำน้ำใด ๆ ที่จะนำมาเชื่อมกับลำน้ำใหญ่ในระดับที่สูงหรือต่ำเกินไป จากกรณีแวดล้อมจำนวนมากมายจึงไม่น่าจะเป็นไปไม่ได้ที่หุบเขาแต่ละหุบเขานี้จะไม่ได้เกิดจากการกระทำของลำน้ำที่ไหลอยู่ในหุบเขานั้น"

ประเด็นสำคัญของกฎนี้มีอยู่ 3 ประการที่เราจะนำมาเขียนย่อเสียใหม่ คือ

(1) หุบเขาจะมีขนาดเป็นอัตราส่วนกับขนาดของลำน้ำที่ไหลอยู่ในหุบเขานั้น

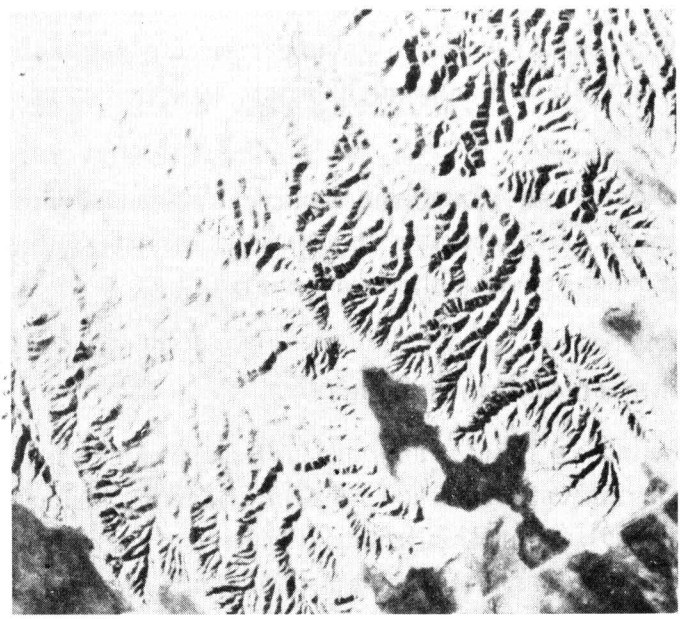
(2) รอยต่อเชื่อมของลำน้ำจะมีระดับใกล้เคียงกัน

(3) หุบเขานั้นเกิดจากการกัดเซาะของลำน้ำที่ไหลในหุบเขานั้น ข้อยกเว้นตามธรรมชาติก็คือ บางทีลำน้ำสาขาจะไหลผ่านน้ำตกก่อนที่จะไหลลงสู่ลำน้ำใหญ่ บางครั้งลำน้ำเล็ก ๆ ก็เกิดอยู่ในหุบเขาใหญ่ ๆ แต่ว่าข้อยกเว้นเหล่านี้เมื่อศึกษาอย่างใกล้ชิดแล้วพบว่า เป็นกรณีที่ผิดปกติหรือกรณีพิเศษที่เกิดขึ้นเฉพาะถิ่น บริเวณที่มีหินฐานเป็นเนื้อเดียวกัน และผ่านการกัดกร่อนโดยลำน้ำมาเป็นเวลานาน จะมีลักษณะเป็นจริงตามกฎของเพลย์แฟร์

ความหยาบและความละเอียดของภูมิประเทศ

ถ้าเราศึกษาพื้นที่ในเขตทุรกันดาร ลักษณะการกัดกร่อนที่สลับซับซ้อนจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นดินเหนียวอ่อนในเขตแห้งแล้งที่ปราศจากพืชปกคลุม (ดูรูป 21.5 ในหน้า 117) เราจะเห็นว่าลักษณะภูมิประเทศบริเวณนั้นประกอบขึ้นด้วยภูเขาขนาดเล็กมากมาย มีลำน้ำเล็ก ๆ จำนวนนับไม่ถ้วนกัดลงไปในหุบเขาเล็ก ๆ ในจำนวนเท่ากัน เหมือนกับที่มีโกรกเขาและสันเขาที่เกิดในเทือกเขาที่ขรุขระ ดังเช่นเทือกเขาซานกราเบรียลเรนจ์ในแคลิฟอร์เนีย หรือภูเขาเกรตสโมกกีในแคโรไลนาเหนือ "ปรากฏการณ์ธรรมชาตินั้นจะเป็นไปตามกฎทางเรขาคณิต ไม่ว่าสิ่งนั้นเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของพื้นที่ระบายน้ำ ซึ่งเล็กจนคนสามารถยืนคร่อมร่องน้ำได้หรือว่าร่องน้ำนั้นจะกว้างเป็นไมล์ก็ตาม แม้ว่า

กฎทางเรขาคณิตนั้นจะใช้ได้ดีกับวัฏจักรการกัดกร่อนที่วิวัฒนาการมาจนถึงวัยตอนกลางก็ตาม เราก็จำเป็นที่จะต้องหาคำอธิบายกลาง ๆ เพื่อใช้เป็นมาตราอธิบายถึงขนาดของรูปทรงภูมิประเทศ



รูป 21.5 ภาพถ่ายดิงในพื้นที่ 1 ตร. ไมล์ บริเวณ Big Badland ดาโกตาใต้ เป็นพื้นที่ที่มีผิวละเอียดมาก

ในบริเวณที่ลำน้ำอยู่ห่างกันมาก ๆ ตีเสียว่าโดยเฉลี่ยแล้วห่างกัน $\frac{1}{4}$ ถึง $\frac{1}{2}$ ไมล์ เราเรียกลักษณะภูมิประเทศนั้นว่า "ภูมิประเทศหยาบ" (Coarse texture) อีกนัยหนึ่งว่าลักษณะภูมิประเทศแต่ละส่วนนั้นมีขนาดใหญ่มาก

ตรงข้ามกับภูมิประเทศหยาบคือ "ภูมิประเทศละเอียด" (fine texture) เป็นภูมิประเทศที่พัฒนาขึ้นในบริเวณหินชั้นที่ผุพังทลายง่าย และมีพืชปกคลุมอยู่เพียงเบาบางหรือไม่มีเลย ดินแดนทุรกันดาร (Badland) จัดอยู่ในภูมิประเทศที่เรียกว่า "ละเอียดมาก" (ultrafine texture) ดังเช่นรูปที่ 21.5 ภูมิประเทศที่อยู่ระหว่างกลางคืออยู่ระหว่างสองลักษณะที่กล่าวถึงมาแล้ว เราเรียกว่า "ภูมิประเทศละเอียดปานกลาง" (medium texture)

"อะไรคือปัจจัยในการควบคุมความหมายของความละเอียดของพื้นผิวระบายน้ำ ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ ชนิดของหิน หินแข็งและคงทน เช่น หินแกรนิตที่เย็นตัวภายในเปลือกโลก หินทรายและควอร์ตไซต์ มีแนวโน้มว่าจะทำให้เกิดภูมิประเทศที่หยาบ ทั้งนี้เนื่องจากการกัดกร่อนของลำน้ำเป็นไปได้ยาก และจะมีลำน้ำอยู่บ้างก็เฉพาะลำน้ำขนาดใหญ่เท่านั้น ส่วนลำน้ำขนาดเล็กนั้นเกิดได้น้อย ใน

หินอ่อน เช่น หินดินดานและดินเหนียว แม้แต่น้ำเพียงเล็กน้อยก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนในร่องน้ำได้

ปัจจัยที่สอง คือ ความยากง่ายของการไหลซึมของหยาดน้ำฟ้าลงสู่พื้นผิวดิน และไหลลึกลงไปสู่ระดับน้ำใต้ดิน วัตถุที่น้ำซึมผ่านได้ง่าย เช่น ทรายหรือทรายหิน มีแนวโน้มว่าจะทำให้มีทางระบายน้ำหรือทำให้เกิดร่องน้ำน้อย เพราะการไหลซึมมีอัตราสูงจึงมีน้ำไหลบนพื้นผิวน้อย ดินเหนียวและหินดินดานเป็นวัตถุที่ทำให้มีน้ำไหลบนพื้นผิวให้อัตราสูง ผลนี้ร่วมกับความอ่อนแอของหินทำให้มีพื้นภูมิประเทศละเอียด

ปัจจัยประการที่สาม คือ ปริมาณพืชที่ปกคลุมผิวดิน หินอ่อนจะมีภูมิประเทศละเอียดปานกลางเมื่ออยู่ในเขตชุ่มชื้น ซึ่งเป็นเขตที่มีพืชขึ้นปกคลุมพื้นผิวเบื้องล่างอย่างหนาแน่น ในเขตแห้งแล้งซึ่งปราศจากพืชปกคลุม ลักษณะภูมิประเทศจะทุรกันดาร

กระบวนการน้ำไหลในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง

ปรากฏการณ์โดยทั่ว ๆ ไปในเขตภูมิอากาศแห้งแล้งจะแตกต่างจากเขตชุ่มชื้น โดยจะแตกต่างกันทั้งพืชพรรณธรรมชาติและภูมิประเทศ แต่ทว่าฝนที่ตกในเขตภูมิอากาศแบบแห้งแล้งนั้นจะเหมือนกับในเขตชื้น และกล่าวได้ว่าลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เกิดจากการกระทำของน้ำไหล โดยเฉพาะบางท้องถิ่นที่มีฝนตกหนักเพียงครั้งเดียวในรอบหลาย ๆ ปี เมื่อฝนเริ่มตก ลำน้ำก็จะเต็มไปด้วยน้ำและกระแสน้ำจะทำงานเช่นเดียวกับน้ำที่ไหลในเขตชื้น น้ำจะไหลจากลาดหุบเขาลงสู่ลำน้ำ จะชะล้างเศษหินลงสู่ลำน้ำเช่นเดียวกับลำน้ำในเขตชื้น แม้ว่าปรากฏการณ์น้ำไหลในเขตทะเลทรายจะมีน้อย แต่เมื่อมีน้ำไหลแต่ละครั้งจะกัดเซาะได้มาก สิ่งนี้อธิบายได้เนื่องจากในเขตทะเลทรายมีพืชน้อยมีแต่พวกไม้เตี้ย และพวกไม้เลื้อยที่มีจำนวนไม่มากพอที่จะป้องกันดินหรือหินฐานได้ เมื่อปราศจากต้นไม้ที่หนาแน่นปกคลุมดินและยึดดินจากการถูกน้ำที่ไหลไปตามพื้นลาดกัดเซาะ ทำให้มีเศษหินหยาบถูกพัดพาลงสู่ลำน้ำ ลำน้ำที่เคยแห้งแล้งจะเปลี่ยนสภาพภายในเวลาเพียงไม่กี่นาทีโดยจะมีน้ำโคลนข้นไหลลงมาพร้อมกับเศษหิน

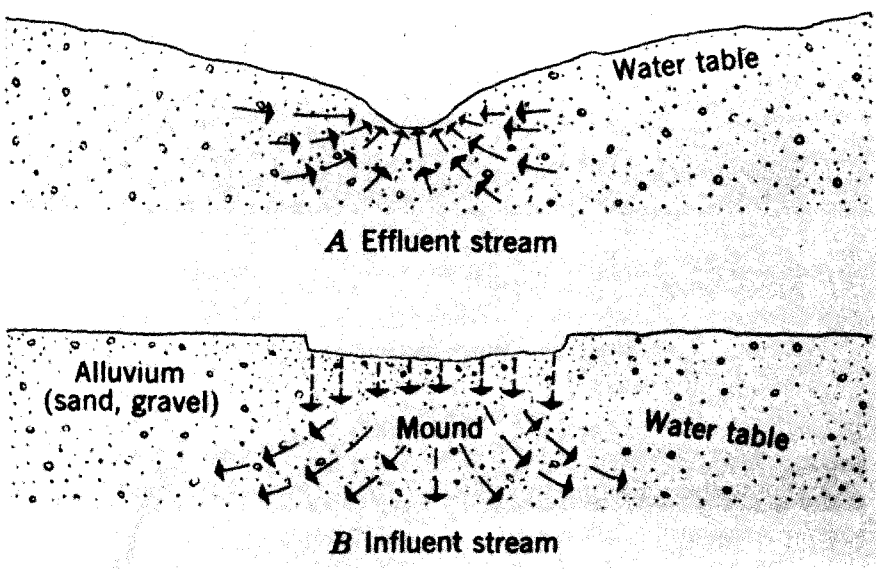
จากที่กล่าวมานี้อาจลงความเห็นว่า ฝนในทะเลทรายจะตกหนักและรุนแรงกว่าในเขตชื้น แต่คำกล่าวนี้ไม่เป็นความจริง ในทะเลทรายที่แห้งแล้ง ฝนที่ตกเกือบทั้งหมดเป็นฝนจากพายุฝนฟ้าคะนอง ซึ่งตกเป็นบริเวณแคบ ๆ แต่มีความเข้มสูง ซึ่งจะมีผลเฉพาะบริเวณแคบ-ๆ ที่อยู่ใต้ฐานเมฆฝนนั้นโดยตรง ในเขตชื้นแถบละติจูดกลางจะมีพายุฝนฟ้าคะนองเกิดขึ้นบ่อยและแรงกว่า และยังมีฝนตกเบา ๆ และตกสม่ำเสมออีกด้วย ทำให้ดินได้รับความชื้นและอิ่มตัวด้วยความชื้น ยิ่งไปกว่านั้นอากาศในเขตชื้นมีการระเหยน้อย สภาวะเช่นนี้ทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างหนาแน่นและช่วยป้องกันพื้นดินไว้ได้ เป็นความจริงที่ว่าในภูมิอากาศชุ่มชื้น เขตศูนย์สูตรส่วนใหญ่ของฝนที่ตกเป็นแบบพายุฝนฟ้าคะนองที่เกิดขึ้นบ่อยมากจนมีพืชขึ้นหนาแน่น ในทะเลทรายที่แห้งแล้งช่วงเวลาระหว่างที่จะมีฝนตกนั้นยาวนานมาก จึงมีพืชขึ้นอยู่เบาบางมาก

ลำน้ำซึมและลำน้ำซับ

มีความแตกต่างระหว่างธรรมชาติของลำน้ำในเขตภูมิอากาศเขตแห้งแล้งและชุ่มชื้น สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาก็คือ ลักษณะที่น้ำไหลเข้าสู่ลำน้ำหรือไหลออกจากลำน้ำ

ในเขตอากาศชุ่มชื้นซึ่งมีระดับน้ำใต้ดินสูงมากจนถึงร่องน้ำ น้ำใต้ดินจะไหลซึมลงสู่ลำน้ำ ทำให้ลำน้ำนั้นมีน้ำไหลอยู่ตลอดเวลา ลำน้ำลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่า "ลำน้ำซึม" (effluent stream) ในช่วงอากาศชุ่มชื้นน้ำจะไหลทั้งบนผิวดินและซึมไปใต้ดิน โดยไหลจากระดับน้ำใต้ดินลงสู่ร่องน้ำและไหลไปตามร่องน้ำลงสู่ทะเลในที่สุด ในลำน้ำแต่ละสายจะมีสารละลาย (ไอออนและคอลลอยด์) ที่ถูกพัดพามา สารละลายนี้จะมาจากดินในบริเวณนั้น และจะไหลมากับน้ำตลอดปี

ในเขตแห้งแล้งบริเวณที่ลำน้ำไหลผ่านที่ราบที่ประกอบไปด้วยทรายหินและทราย น้ำจะไหลออกจากลำน้ำโดยดินใต้ร่องน้ำดูดซับลงไปสู่ระดับน้ำใต้ดินที่อยู่ต่ำกว่าระดับของร่องน้ำ ลำน้ำลักษณะเช่นนี้เราเรียกว่า "ลำน้ำซับ" (influent stream) ระดับน้ำใต้ดินที่อยู่ใต้ร่องน้ำนี้มีแนวโน้มว่าจะสูงกว่าบริเวณข้าง ๆ ทำให้เกิดระดับน้ำใต้ดินนูนสูงขึ้นมา (water-table mound)



รูป 21.6 ลำน้ำซึมและลำน้ำซับ

การสูญเสียปริมาณน้ำไหลโดยการซึมลงใต้ระดับท้องน้ำ และการระเหยจะเกิดขึ้นมากในเขตภูมิอากาศแห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง บริเวณหุบเขาที่มีตะกอนน้ำพามาทับถม การเพิ่มระดับท้องลำธารจะเกิดขึ้น และลำน้ำแบบเกลียวเชือกจะเกิดขึ้นอย่างเห็นเด่นชัด ลักษณะทั่ว ๆ ไปที่สำคัญประการหนึ่งของลำน้ำในเขตทะเลทรายก็คือ ลำน้ำจะสั้นกว่าระยะพื้นลาดของพื้นดิน ตามปกติลำน้ำมักจะยาวและไหลลงสู่ทะเล แต่ลำน้ำในเขตทะเลทรายจะสั้นและมักไหลลงบริเวณที่ดินตะกอนถูกพัดมาทับถมกันหรือลงสู่ทะเลสาบที่แห้งแล้ง

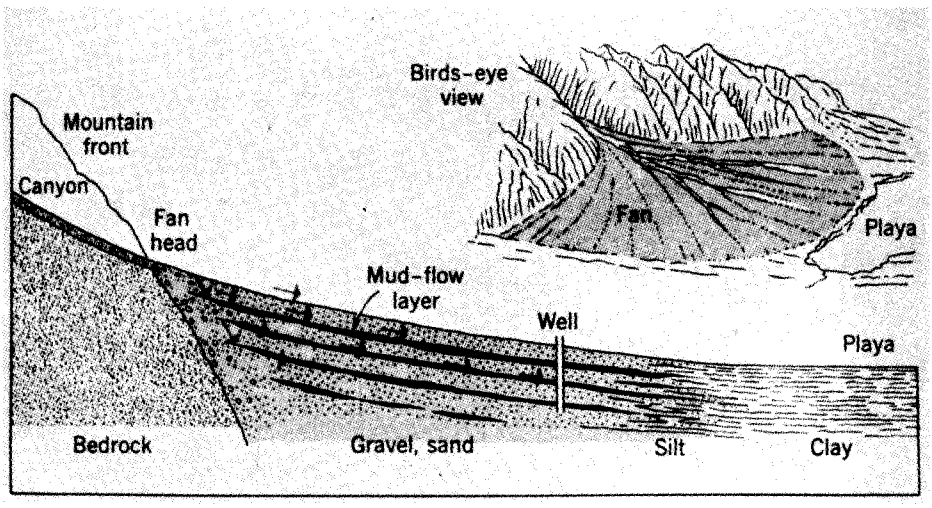
ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากลำน้ำเกลียวเชือกที่มีการปรับระดับ คือ เนินตะกอนรูปพัด (alluvial fan) เป็นเนินรูปกรวยต่ำของทรายและทรายหิน ซึ่งมากองรวมกันมีรูปร่างคล้ายพัดญี่ปุ่น

รูป 21.7 เนินตะกอนรูปพัดขนาดใหญ่ ณ ปากหุบเขาเดทแวลเลย์ เกิดจากกรวดทรายที่น้ำพัดพามาตามหุบเขา โปรดสังเกตลำน้ำเกลียวเชือก

เนินตะกอนรูปพัดนี้เกิดจากเศษหินหยาบ ๆ ที่ลำน้ำวัยหนุ่มพัดพามาจากภูเขาและที่สูง ลำน้ำเกลียวเชือกนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นลงอย่างคงที่ แต่เนื่องจากเนินตะกอนรูปพัดนี้จะอยู่บริเวณปากหุบเขาอย่างมั่นคง ยอดของกรวยจะล้อมรอบด้วยเนินทรายรูปครึ่งวงกลม และมีความลาดเป็นรัศมีออกไปจากยอดกรวยในทุกทิศทาง

น้ำใต้ดินในเนินตะกอนรูปพัด

เนินตะกอนรูปพัดขนาดใหญ่และสลับซับซ้อน จะมีโคลนไหลปนมาด้วย โคลนจะวางตัวเป็นชั้นอยู่ระหว่างชั้นของทรายกับหินทราย น้ำที่ไหลซึมลงสู่เนินตะกอนบริเวณยอดกรวยจะไหลไปตามชั้นของทราย ทำให้ชั้นนั้นเป็นชั้นที่ให้น้ำได้หรือชั้นที่มีรูพรุน (water conductor or aquifer) ชั้นดินโคลนทำหน้าที่เป็นตัวกั้นน้ำมิให้ซึมลงไปในระดับลึก เราเรียกว่า "ชั้นกันน้ำซึม" (aquiclude) น้ำจะถูกกักอยู่ใต้ชั้นกันน้ำซึมด้วยแรงดันของน้ำจากน้ำที่อยู่ระดับสูงขึ้นไปจนกระทั่งถึงหัวพัด เมื่อขุดบ่อลงไปจะมี "น้ำบาดาลไหลออกมา" (artesian flow) บ่อนั้นเราเรียกว่า "บ่อบาดาล" (artesian well)



รูป 21.8 ภาพตามจินตนาการแสดงโครงสร้างของเนินตะกอนรูปพัด

การสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้ในการชลประทานมาก ๆ ทำให้ระดับน้ำในเนินตะกอนรูปพัดลดลงไปทั่วบริเวณ อัตราของน้ำไหลจะช้าลงอย่างมาก อย่างไรก็ตาม เราสามารถเพิ่มปริมาณน้ำได้โดยสูบน้ำปล่อยลงไปบนเนินตะกอนรูปพัด ปัญหาสำคัญประการหนึ่งของการสูบน้ำบาดาลมาใช้มากเกินไปก็คือ ระดับพื้นผิวดินจะทรุดต่ำลง

สิ่งแวดล้อมในเนินตะกอนรูปพัด

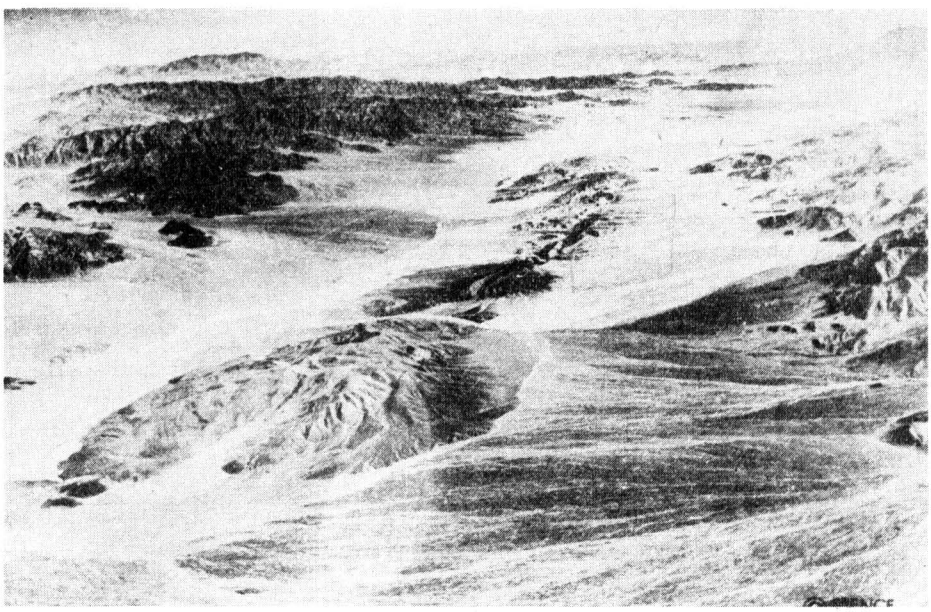
เนินตะกอนรูปพัดเป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ในเขตภูมิอากาศแห้งแล้งบริเวณเขตภูเขา ประชาชนและชุมชนเมืองจะรวมตัวกันอยู่บริเวณขอบของเนินตะกอนที่มีความลาดน้อย ซึ่งเป็นบริเวณเชิงเขา น้ำสำหรับการชลประทานได้มาจากลำน้ำที่ไหลมายังปากโกรกธารหรือได้จากบ่อ

ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากเนินตะกอนรูปพัดมีในแอ่งลอสแอนเจลิส ทางภาคใต้ของแคลิฟอร์เนีย ที่ราบกว้างนั้นเป็นที่ตั้งของเมืองสำคัญ ๆ เช่น เบอร์แบงค์ เกลนเดล มองต์โรส และทาซา-

เดนา ซึ่งที่อยู่อาศัยชั้นดีจะอยู่ทางตอนในของเนินตะกอน น้ำบ่าอย่างแรง (debris flood) ซึ่งเป็นคำที่วิศวกรใช้เรียกนั้นคือน้ำท่วมที่มีกำลังแรงมาก ซึ่งจะพาตะกอนมากมายรวมทั้งเนินทรายดินตะกอนและดินเหนียวให้เคลื่อนที่ไป เมื่อความเร็วของน้ำลดลง ตะกอนเหล่านั้นจะตกกองอยู่ ระดับน้ำท่วมจะสูงถึงลาดชันของสันบันน้ำ ซึ่งไฟป่าได้ทำลายพืชที่คอยป้องกันน้ำท่วมไปเสียสิ้นแล้ว

วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดินในเขตแห้งแล้ง

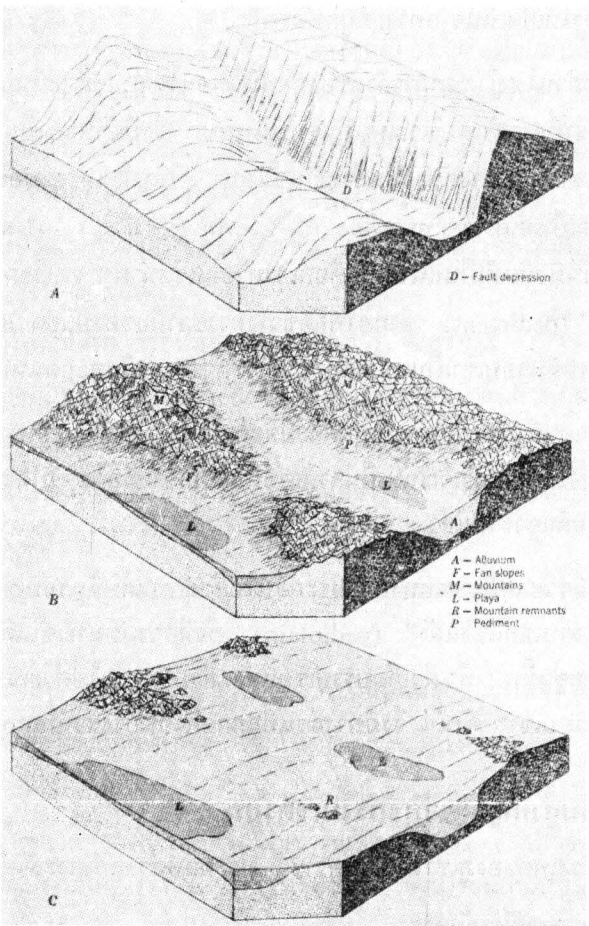
ภูเขาในทะเลทรายดังที่แสดงในรูปนี้ จะอยู่ในสภาวะการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศที่แตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงภูมิประเทศในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้นที่มีปริมาณน้ำเหลือมาก



รูป 21.9 ภาพถ่ายทางอากาศของเดทแวลเลย์ แคลิฟอร์เนีย แสดงให้เห็นลักษณะภูมิประเทศทะเลทรายวัยตอนกลาง

วัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดินในเขตแห้งแล้งมีลักษณะดังรูปที่ 21.10 ในหน้า 123 จากวัฏจักรในจินตนภาพนี้บริเวณภูเขาเกิดขึ้นจากการโก่งตัวหรือการแตกแยกของเปลือกโลก และวางตัวอยู่ภายในทวีป (บล็อค A) ระดับของภูมิประเทศจะสูงสุดในยุคกำเนิด และจะค่อยๆ ลดระดับในยุคต่อๆ มา แอ่งต่ำขนาดใหญ่จะเกิดอยู่ระหว่างสันเขา บริเวณนี้จะไม่มีน้ำไหลมาจึงไม่เกิดเป็นทะเลสาบเหมือนในเขตชุ่มชื้น แต่จะคงสภาพแห้งอยู่เช่นนั้นเพราะมีอัตราการระเหยสูงมาก บริเวณตรงกลางแอ่งที่แบนราบจะทำหน้าที่เป็นทะเลสาบชั่วคราวเราเรียกว่า "พลายา" (playa) ทะเลสาบพลายาจะตื้นและมีระดับขึ้น ๆ ลง ๆ อยู่ตลอดเวลา แต่มีแนวโน้มว่าจะหายไปในช่วงระยะเวลาอันยาวนาน เนื่องจากไม่มีทางระบายน้ำออก พลายาจึงเต็มไปด้วยน้ำเกลือซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าน้ำในมหาสมุทร

ตลอดชั่วระยะวัฏจักร ที่ราบระหว่างภูเขานี้จะมีหินไหลลงมาในลักษณะของเนินตะกอนรูปพัด ซึ่งเกิดจากภูเขาที่อยู่ติดกันมากมาย เมื่อแอ่งต่ำเต็มไปด้วยตะกอนและภูเขาถูกกัดจนเป็นโกรกเขาสลับซับซ้อน มีสันเขาและยอดเขาบริเวณดังกล่าวเราเรียก "วัยตอนกลาง" (บล็อค B) เมื่อวัยตอนกลางดำเนินต่อไปภูเขาก็จะถูกกัดให้มีระดับต่ำลง ขณะเดียวกันขนาดของภูเขาก็ลดลงด้วย พร้อมกันนั้นเนินตะกอนรูปพัดจะขยายตัวใหญ่ยิ่งขึ้นไปตามเชิงเขา



รูป 21.10 วัฏจักรการกัดกร่อนภูเขาในเขตทะเลทราย

A. ขั้นกำเนิด ระดับความสูงซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลกจะมีค่าสูงสุด

B. วัยตอนกลาง ภูเขาถูกกัดกร่อนไปทั้งหมด ที่ราบจะเต็มไปด้วยเนินตะกอนรูปพัดและพลายา

C. วัยแก่ ระดับลดต่ำลงมาก พื้นที่ถูกปกคลุมด้วยตะกอนน้ำพา ภูเขาที่เหลือดูเหมือนเป็นเกาะเล็กๆ

เมื่อถึง "ขั้นแก่" ลักษณะภูเขาจะคล้ายกับเกาะเล็ก ๆ ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากเนินเขาก่อนหน้านั้น (บล็อค C) อย่างไรก็ตาม ส่วนที่เหลือนี้อาจเปรียบได้กับเขาโดดในพื้นผิวเกือบราบ ถ้าเนินเขานี้ถูกกัดกร่อนไปหมดก็จะเหลือแต่ที่ราบกว้างใหญ่ พื้นผิวนี้เป็นชนิดเดียวกับพื้นผิวเกือบราบ แต่ไม่ได้วิวัฒนาการโดยอ้างอิงกับระดับน้ำทะเลเป็นระดับฐาน เนื่องจากไม่มีลำน้ำไหลลงสู่ทะเล และอาจเป็นไปได้ว่าพื้นผิวทะเลทรายอยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลนับร้อยฟุต พื้นราบนี้จะมีที่ต่ำที่เป็นพลายามากกว่าจะเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงที่เกิดจากคุ้งน้ำ การกระทำของลมในเขตอากาศแห้งแล้งจะมีผลต่อการกัดกร่อนที่ต่ำ และทำให้เกิดเนินจากทรายที่ถูกพัดพา

ในทะเลทรายส่วนใหญ่ อาการลาดของก้อนหินก้อนใหญ่ ทรายหินและทราย จะขยายวงกว้างออกไปจากเชิงเขาที่ลาดชันสู่บริเวณพื้นดินราบในพลายา ซึ่งมีลักษณะเป็นเนินตะกอนรูปพัด จะมีดินตะกอนที่ไหลมาจากภูเขาวางตัวอยู่ชั้นล่างเป็นชั้นหนา ในบางแห่งตะกอนเหล่านี้จะโผล่ออกมาเป็นเนินตะกอนรูปพัดเป็นชั้นบาง ๆ หนาเพียง 10—20 ฟุต (3—6 ม.) วางตัวอยู่เหนือพื้นลาดของหินฐานที่ราบเรียบ พื้นผิวหินที่เป็นแนวรอบเทือกเขาหรือแนวหน้าผา เราเรียกภูมิประเทศดังกล่าวว่า "ลานเศษหินรอบเขา" (pediment) จากภาพตัดขวางทางขวามือของบล็อค B และ C จะเห็นภาพตัดตามยาวของลานเศษหินรอบเขาเป็นแนวแคบ ๆ อยู่ระหว่างแอ่งดินตะกอนหนากับภูเขาที่ขรุขระ

เนื่องจากลานเศษหินรอบภูเขาตามปกติจะมีตะกอนเล็ก ๆ เคลือบอยู่บาง ๆ ขณะที่เกิดลานหินรอบผา วิธีเดียวที่เราจะรู้ได้ว่าบริเวณนั้นเป็นลานเศษหินรอบเขาหรือไม่ ก็โดยดูจากหินฐานที่โผล่ขึ้นมาหลังจากตะกอนถูกกัดเซาะไปแล้ว

เนื่องจากพื้นผิววัยแก่ในเขตแห้งแล้งประกอบไปด้วยลานเศษหินรอบเขา เราจึงเรียกพื้นผิวนั้นว่า "พื้นผิวเกือบราบเขตแห้งแล้ง" (pediplain) ซึ่งมีความหมายเช่นเดียวกับพื้นผิวเกือบราบ (peneplain) ในเขตชุ่มชื้น พื้นผิวเกือบราบเขตแห้งแล้งประกอบไปด้วยเนินตะกอนรูปพัดพลายาพอ ๆ กับลานเศษหินรอบเขา ดังนั้น จึงมีบางส่วนที่ถูกกัดกร่อนบางส่วนก็ถูกทับถม

ลักษณะสิ่งแวดล้อมสำคัญของวัฏจักรในเขตร้อน

ลักษณะภูมิประเทศของภูเขาในทะเลทราย ประกอบด้วยลักษณะสำคัญสามประการ คือ

(1) พื้นที่ขรุขระและภูเขาที่ทุรกันดาร

(2) พื้นลาดลานเศษหินเชิงผากว้างใหญ่รวมกับเนินตะกอนรูปพัดที่มีทางน้ำตื้นๆและแห้งจำนวนมาก

(3) พลายาที่มีพื้นราบเรียบ อาจมีน้ำอยู่บ้างหรือไม่ก็เป็นผลึกเกลือ ในภูเขาที่ขรุขระนั้นจะมีแร่ธาตุที่มีค่าทางเศรษฐกิจอยู่มาก เนินตะกอนรูปพัดเป็นพื้นที่ที่ไร้ประโยชน์ในการเกษตร ยกเว้นบางบริเวณที่มีน้ำใต้ดินเพียงพอที่จะหล่อเลี้ยงให้เกิดชุมชนที่โดดเดี่ยวขึ้นมาได้ พลายาเป็นแหล่งแร่ธาตุที่สำคัญ เช่น เกลือ แคลเซียม โซเดียมและโพแทสเซียม

คำถามทบทวนบทที่ 21

1. จงอธิบายความคิดรวบยอดของวัฏจักรการกัดกร่อนแผ่นดิน การร่วมกันระหว่างภูมิประเทศกำเนิดกับภูมิอากาศที่เราอาจจะพิจารณาได้นั้นมีลักษณะอย่างไร
2. จงอธิบายลำดับขั้นต่าง ๆ ของวัฏจักรการกัดกร่อนแผ่นดินในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น รวมทั้งอภิปรายถึงพัฒนาการของระบบการระบายน้ำ พื้นลาดหุบเขาและสันปันน้ำ และลักษณะภูมิประเทศลำดับขั้นใดที่มีภูมิประเทศสูงที่สุด
3. จงอธิบายถึงปรากฏการณ์ของพื้นที่เกือบราบ เขาโดดคืออะไร เมื่อแผ่นดินยกระดับสูงขึ้นทำให้วัฏจักรการกัดกร่อนเริ่มต้นขึ้นใหม่ อะไรจะเกิดขึ้นกับพื้นที่เกือบราบ
4. จงอธิบายถึงลักษณะสิ่งแวดล้อมของวัฏจักรการกัดกร่อนแผ่นดินในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น ยกตัวอย่างพื้นที่ต่าง ๆ ที่มีลำดับขั้นการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน
5. จงอธิบายปรากฏการณ์ของโครงข่ายการระบายน้ำ น้ำไหลบนผิวดินเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลและการพัดพาตะกอนได้อย่างไร
6. จงกล่าวถึงกฎของเพลย์แฟร์ กฎนี้มีข้อยกเว้นอย่างไร จงอธิบาย
7. ลักษณะพื้นผิวของภูมิประเทศหมายถึงอะไร จงอธิบายช่วงของพื้นผิวที่มีอยู่ตามธรรมชาติ อะไรคือสิ่งที่ทำให้พื้นผิวของภูมิประเทศต่างกัน
8. น้ำไหลมีบทบาทในเขตแห้งแล้งต่างจากเขตชุ่มชื้นอย่างไร จงอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างร่องน้ำในเขตแห้งแล้งและชุ่มชื้น
9. จงอธิบายลักษณะของลำน้ำซึมและลำน้ำซับ และความสัมพันธ์ของลำน้ำทั้งสองกับระดับน้ำใต้ดิน
10. จงอธิบายถึงพัฒนาการของเนินตะกอนรูปพัด ทำไมเนินตะกอนรูปพัดจึงมีความสำคัญต่อมนุษย์
11. จงอธิบายเงื่อนไขของการเกิดน้ำบาดาลใต้ดินในบริเวณเนินตะกอนรูปพัด เมื่อมีการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้จะมีผลต่อน้ำใต้ดินอย่างไร
12. จงอธิบายลำดับขั้นของวัฏจักรการกัดกร่อนภูเขาในเขตแห้งแล้ง เปรียบเทียบวัฏจักรลำดับขั้นแต่ละขั้นกับวัฏจักรการกัดกร่อนพื้นดินในเขตชุ่มชื้น จงเปรียบเทียบพื้นผิวเกือบราบในเขตชุ่มชื้นและเขตแห้งแล้ง
13. จงอธิบายลักษณะของลานเศษหินรอบเขา มันเหมือนกับเนินตะกอนรูปพัดอย่างไร และต่างจากเนินตะกอนรูปพัดอย่างไร
14. จงอธิบายถึงคุณค่าในทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมของเทือกเขาในทะเลทราย มีปัจจัยทางกายภาพใดบ้างที่จำกัดมนุษย์ในการเข้าไปอาศัยอยู่ในบริเวณนั้น

บทที่ 22
ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็ง

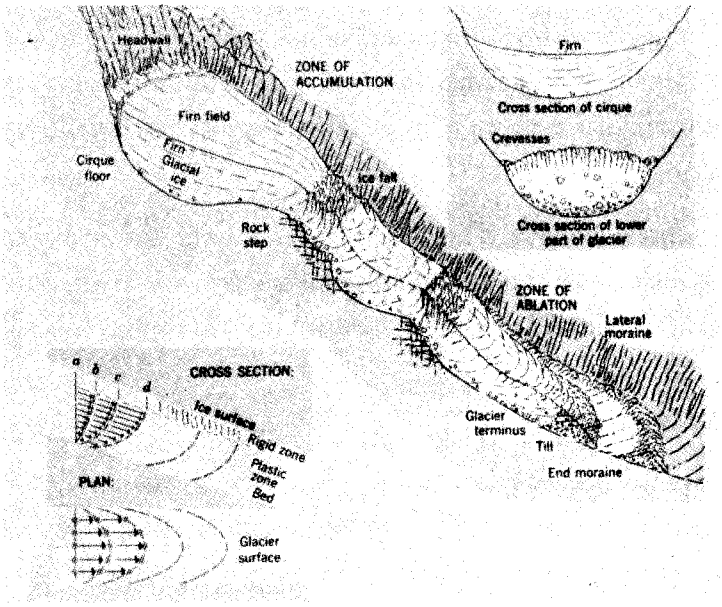
น้ำแข็งส่วนใหญ่ที่เรารู้จักจะมีลักษณะเป็นแผ่นเปราะ ๆหรือผลึกแข็ง เนื่องจากเราเห็นน้ำแข็งในปริมาณน้อย ในบริเวณที่มีน้ำแข็งหนา ๆ ประมาณ 200—300 ฟุต หรือหนามากกว่านี้ น้ำแข็งที่อยู่ในระดับลึกจะมีลักษณะคล้ายพลาสติกและจะไหลอย่างช้า ๆ ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเป็นบริเวณกว้าง ๆ ในบางกรณีมันอาจจะเคลื่อนไปตามลาดภูเขา ปรากฏการณ์เช่นนี้เป็นลักษณะของธารน้ำแข็ง (glacier) ซึ่งอาจนิยามได้ว่า เป็นการเคลื่อนที่ในอดีตหรือปัจจุบันของมวลน้ำแข็งตามธรรมชาติที่สะสมกันเป็นจำนวนมหาศาล

การที่น้ำแข็งจะสะสมได้นั้น ปริมาณหิมะที่ตกในฤดูหนาวจะต้องมีปริมาณมากกว่าปริมาณน้ำแข็งที่ละลายและระเหยในฤดูร้อน (นักธารน้ำแข็งวิทยา เรียกการระเหยและการละลายของหิมะและน้ำแข็งว่า อะเบลชัน (ablation) ในแต่ละปีชั้นของหิมะจะมีการสะสมเพิ่มขึ้น ขณะที่หิมะจับตัวกันแน่นเนื่องจากการละลายและการแข็งตัวใหม่ หิมะจะกลายเป็นเม็ดน้ำแข็ง เมื่อถูกแรงกดจากน้ำแข็งชั้นบนเม็ดน้ำแข็งก็จะกลายเป็นผลึกน้ำแข็ง เมื่อน้ำแข็งหนามาก ๆ น้ำแข็งชั้นล่าง ๆ จะมีลักษณะคล้ายพลาสติก และไหลลงไปตามลาดภูเขากลายเป็นธารน้ำแข็งที่มีการเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ในบริเวณที่สูงทั้งในเขตละติจูดต่ำและละติจูดสูง จะมีธารน้ำแข็งเกิดขึ้นทั้งสองแห่งเนื่องจากอากาศบริเวณที่สูงมีอุณหภูมิต่ำและมีหยาดน้ำฟ้าตกหนักจากการที่อากาศวิ่งปะทะหน้าผา ธารน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในภูเขาสูงจะมีลักษณะยาวและเป็นแนวแคบ ๆ เนื่องจากธารน้ำแข็งที่ปกคลุมหุบเขามาก่อนและมีน้ำแข็งที่มีลักษณะคล้ายพลาสติกจากการสะสมของน้ำแข็งในพื้นที่แคบ ๆ ที่อยู่สูงขึ้นไป และมักจะมีอากาศอุ่นพัดมาเป็นประจำ ทำให้น้ำแข็งลดน้อยลงจากการหลอมละลาย เราเรียกธารน้ำแข็งชนิดนี้ว่า "ธารน้ำแข็งในหุบเขา หรือธารน้ำแข็งภูเขา" (valleys glacier or alpine glacier)

ในเขตอาร์กติกและขั้วโลก อุณหภูมิประจำจะต่ำมากจนน้ำแข็งสะสมกันเป็นบริเวณกว้าง ในที่สูงทุกแห่งจะมีหิมะตกหนัก ทำให้พื้นที่หลายพันตารางไมล์จมอยู่ใต้แผ่นน้ำแข็งขนาดมหึมาที่มีความหนานับพัน ๆ ฟุต คำว่า "พืดน้ำแข็ง" (ice cap) เราใช้เรียกแผ่นของน้ำแข็งที่วางตัวอยู่บนภูเขาและมีพื้นที่เป็นที่ราบสูง ในช่วงเวลาที่เกิดธารน้ำแข็งแผ่นน้ำแข็งนี้จะเคลื่อนลงมาสู่ที่ต่ำปกคลุมภูมิประเทศที่อยู่โดยรอบ แผ่นน้ำแข็งจะยุติการขยายตัวเมื่ออัตราของการหลอมละลายสมดุลกับอัตราการขยาย ตัวมวลน้ำแข็งขนาดมหึมานี้เราเรียกว่า "ธารน้ำแข็งในทวีป หรือแผ่นน้ำแข็ง" (continental glacier or ice sheet)

รูปที่ 22.1 นี้แสดงให้เห็นลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากธารน้ำแข็งภูเขา รูปกลางแสดงให้เห็นรูปแบบของธารน้ำแข็งอย่างง่ายที่ปกคลุมลาดหุบเขา ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นหินชัน หิมะจะสะสมอยู่ตอนบนสุดในหุบเขาที่มีรูปร่างเหมือนชามอ่าง เราเรียกว่า "เซิร์ก" (cirque) และเรียกปลายบนสุดว่า



รูป 22.1 โครงสร้างและการเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็งภูเขา

"เขตการสะสม" (zone of accumulation) ชั้นของหิมะในกระบวนการอัดแน่นและการเปลี่ยนสภาพเป็นผลึกเรียกว่า "หิมะน้ำแข็ง" (firn or névé) ชั้นหิมะน้ำแข็งที่ราบเรียบนั้นจะโค้งเว้าเข้าเล็กน้อย การไหลของธารน้ำแข็งชั้นล่างจะนำเอาน้ำแข็งจำนวนมากไหลออกจากเซิร์กลงไปยังหุบเขา การปรับระดับตามพื้นลาดเทมาก ๆ อย่างทันทีทันใดทำให้เกิด "บันไดหิน" (rock step) ซึ่งทำให้น้ำแข็งไหลเร็วขึ้นและทำให้เกิดรอยแตกในพืดน้ำแข็ง พืดน้ำแข็งจึงกลายเป็น "น้ำแข็งตก" (ice fall) ตอนล่างของธารน้ำแข็งเป็น "เขตหลอมละลาย" (zone of ablation) บริเวณนี้อัตราการเคลื่อนที่ตามพื้นลาดของธารน้ำแข็งจะเร็วมาก และทำให้น้ำแข็งเดิมโผล่ขึ้นมาถึงพื้นผิวของธารน้ำแข็งซึ่งขรุขระมากและรอยแตกยิ่งลึกยิ่งขึ้น "ตอนปลายล่างสุด" (terminus or snout) ของธารน้ำแข็งจะมีเศษหินที่ถูกพัดพาติดมาด้วยมากมาย ภาพตามยาวของธารน้ำแข็งชั้นล่าง ๆ จะโค้งนูนขึ้น ตอนกลางจะสูงกว่าด้านข้าง

ชั้นบนสุดของธารน้ำแข็ง ซึ่งบางทีอาจหนาถึง 200 ฟุต (60 ม.) จะแตกหักเป็นร่องลึกแท้จริง ขณะที่น้ำแข็งข้างล่างยังมีสภาพคล้ายพลาสติกและจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ถ้ามีการวางหมุดเป็นแนวตัด

ขวางผิวธารน้ำแข็ง ธารน้ำแข็งจะดันให้หมุดนั้นไหลตามและเปลี่ยนสภาพจากแนวตรงเป็นรูปโค้งพาราโบลิก แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็งจะเร็วที่สุดบริเวณตอนกลาง และน้อยที่สุดบริเวณด้านข้าง

แม้ว่ารูปแบบอย่างง่ายของธารน้ำแข็งจะมีการสมดุลการเปลี่ยนแปลง (dynamic equilibrium) ในกรณีที่อัตราการสะสมตอนบนสุดจะสมดุลกับอัตราการหลอมละลายตอนปลายล่างสุด น้ำแข็งจะส่งถ่ายกันไปโดยการไหลเป็นธารน้ำแข็งในความยาวและพื้นที่หน้าตัดตามเหมาะสม สภาวะสมดุลนั้นอาจจะสูญเสียไปได้ง่าย ๆ จากการเปลี่ยนอัตราเฉลี่ยของน้ำแข็งที่จะมีเพิ่ม หรืออัตราการเคลื่อนที่ตามพื้นลาด

ตามความเป็นจริงแล้วอัตราการไหลของธารน้ำแข็งภูเขาและธารน้ำแข็งภาคพื้นทวีปนั้นช้ามาก แผ่นน้ำแข็งขนาดใหญ่เคลื่อนที่ได้เพียงวันละสองหรือสามนิ้วเท่านั้น สำหรับธารน้ำแข็งหุบเขาจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่านี้ อาจเป็นวันละ 2–3 ฟุต โดยเฉพาะในธารน้ำแข็งหุบเขาที่ไม่อยู่นิ่ง

การกัดกร่อนของธารน้ำแข็ง

ธารน้ำแข็งส่วนมากจะพัดพาเศษหินมาด้วยเป็นจำนวนมหาศาลมีขนาดตั้งแต่หินที่เป็นผงฝุ่นถึงก้อนหินขนาดมหึมาที่เพิ่งแตกมาใหม่ ๆ วัตถุพวกนี้แตกออกมาจากหินพื้นผิวที่น้ำแข็งเคลื่อนที่ผ่าน หรือในธารน้ำแข็งหุบเขาจะมีหินที่เลื่อนหรือตกมาจากสองข้างหุบเขาเคลื่อนมาด้วย ธารน้ำแข็งสามารถกัดกร่อนพื้นผิวได้มาก ทั้งการครูดไถ (abrasion) ซึ่งมีสาเหตุจากเศษหินที่น้ำแข็งพามาครูดไปและการบด (grind) ไปบนพื้นหินฐานและการดึง (plucking) โดยน้ำแข็งที่เคลื่อนที่ดึงแผ่นหินฐานให้หลุดลอยเพราะมีน้ำไปแข็งอยู่ในรอยแยกของหิน

ในที่สุดเศษหินจะถูกดันไปอยู่ทางด้านข้างและตอนล่างสุดของธารน้ำแข็งเมื่อน้ำแข็งได้ละลายไป ดังนั้น การกระทำของธารน้ำแข็งที่จะพิจารณาจึงมีสองประการ คือ การกัดกร่อนและการทับถม ทั้งสองประการนี้จะมีผลต่อภูมิประเทศ ทำให้มีภูมิประเทศแตกต่างกันไปตามชนิดของธารน้ำแข็ง ทั้งธารน้ำแข็งพื้นทวีปกับธารน้ำแข็งภูเขา

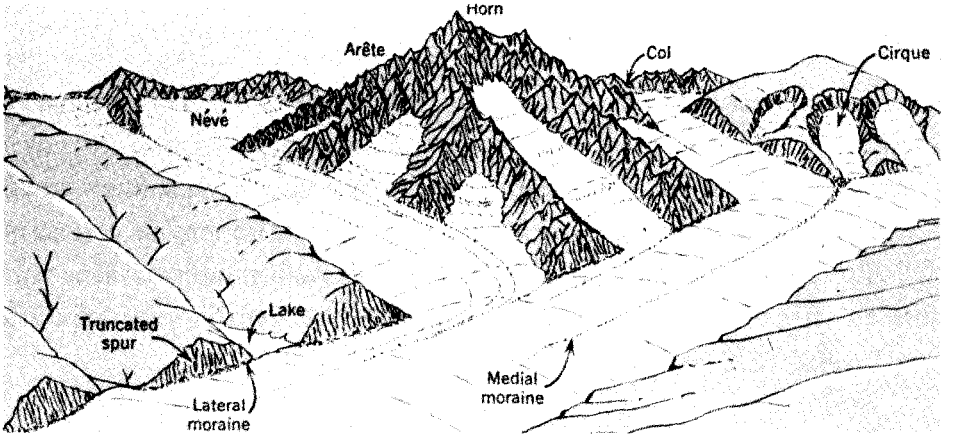
ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งภูเขา

ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งภูเขา จะศึกษาได้อย่างดีจากภาพที่ผ่านมา จากภูเขาดั้งเดิมซึ่งไม่มีธารน้ำแข็งปกคลุม สมมติว่าต่อมามีธารน้ำแข็งปกคลุม จากนั้นธารน้ำแข็งได้เคลื่อนที่ไป ลักษณะภูมิประเทศที่เหลือจะปรากฏให้เห็น

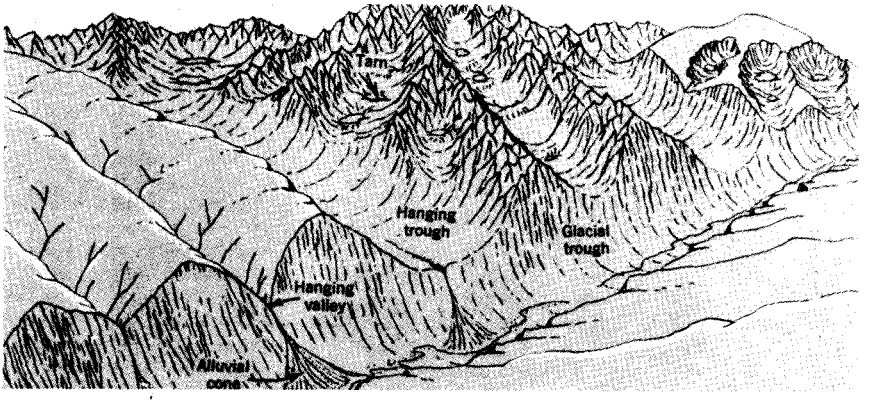
บล็อค A แสดงให้เห็นภูเขาถูกกัดกร่อนโดยการผุพังอยู่กับที่ การเคลื่อนที่ตามพื้นลาดและลำน้ำ ภูเขาจะเรียบและมีรูปร่างปรากฏให้เห็นทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยสันเขาโค้งมน อย่างไรก็ตาม

รูป 22.2 ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งภูเขา

(A) ก่อนที่จะมีธารน้ำแข็งเกิดขึ้น ภูมิประเทศจะเรียบมนกลม และมีหุบเขารูปตัว V แคบ ๆ



(B) หลังจากที่มีธารน้ำแข็งเกิดขึ้นเป็นเวลาหลายพันปี การกัดกร่อนทำให้ภูมิประเทศมีลักษณะเปลี่ยนไป

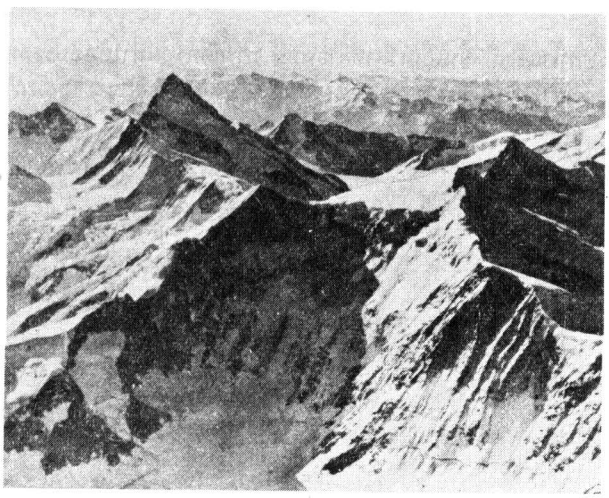


(C) เมื่อธารน้ำแข็งสลายตัวไปแล้ว ภูมิประเทศก็จะปรากฏออกมาให้เห็น

ที่กล่าวมานี้มิใช่จะเป็นเช่นนี้เสมอไป ที่กล่าวถึงนี้เป็นชนิดของภูเขาในเขตชุ่มชื้น ตัวอย่างเช่น ภูเขาเกรตสโมกกี ทางตอนใต้ของเทือกเขาแอปปาเลเชียน ขณะนี้ขอให้จินตนาการว่ามีการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศเกิดขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยรายปีลดลงเป็นผลให้มีน้ำแข็งสะสมมากขึ้นในตอนบนของหุบเขาขั้นแรก ๆ ธารน้ำแข็งมีลักษณะดังที่ได้แสดงไว้ทางตอนขวาของบล็อค B ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำแข็งสะสมและมีเซิร์กเกิดขึ้นจากการกระทำของน้ำแข็งที่เคลื่อนที่ลงข้างล่าง และการกระทำของน้ำค้างแข็งต่อหินที่อยู่ใกล้กับแผ่นหิมะ

ในบล็อค B มีธารน้ำแข็งอยู่เต็มหุบเขาและธารน้ำแข็งสาขาที่ไหลไปรวมกันเป็นธารน้ำแข็งสายใหญ่เหมือนกับระบบลำน้ำ ตามปกติธารน้ำแข็งจะหนากว่าธารน้ำธรรมดามาก เพราะน้ำแข็งเคลื่อนที่ได้ช้ามาก ถ้าธารน้ำแข็งได้รับปริมาณน้ำแข็งเท่ากับน้ำที่ไหลในลำธารแล้ว จะต้องมีพื้นที่หน้าตัดกว้างมาก ธารน้ำแข็งสาขาจะมาเชื่อมกับธารน้ำแข็งสายหลักในระดับที่เกือบเท่ากัน แต่ว่าก้นของธารน้ำแข็งจะมีระดับต่างกันมาก

การแข็งตัวอย่างทันทีทันใดและการละลายของหิมะ มีผลทำให้ผนังของเซิร์กแตกออกเป็นเหลี่ยมๆ ได้มาก ซึ่งจะตกไปตามลานหิมะและรวมอยู่ในธารน้ำแข็ง น้ำค้างแข็งที่แตกออกจะมีผลต่อกำแพงหินที่น้ำค้างแข็งเกาะอยู่ ทำให้เซิร์กขยายกว้างขึ้นตลอดเวลา ภูเขาซึ่งเดิมโค้งมนจะกลายเป็นสันเขาที่ขรุขระและมีผาชัน บริเวณที่เซิร์กสองแห่งขยายมาพบกัน ทำให้เกิดสันเขาคมเหมือนคมมีด เราเรียกว่า "อาแรต" (arete) บริเวณที่เซิร์กตั้งแต่สามแห่งหรือมากกว่าขึ้นไปขยายมาพบกัน ทำให้เกิดสันอาแรตตัดกันเราเรียกว่า "ฮอร์น" (horn) ดังเช่นสันเขาในเทือกเขาสวิสแอลป์ ที่มีชื่อเสียงที่สุด ก็คือ แมตเตอร์ฮอน ถ้าเซิร์กที่ขยายต่อไปเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดช่องเขาขึ้น เรียกว่า "คอดเขา" (col)



รูป 22.3 ภูเขาสวิสแอลป์ แสดงให้เห็น ฮอร์น เซิร์ก และ อาแรต

ธารน้ำแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจะทำให้ร่องธารลึกและใหญ่ขึ้น ดังนั้น เมื่อน้ำแข็งละลายไปหมดแล้วจึงเหลือแต่ร่องลึกที่มีผาชัน เรียกว่า "ร่องธารน้ำแข็ง" (glacial trough) ซึ่งส่วนมากจะเป็นร่องตรงมีภาพตัดขวางเป็นรูปตัวยู (ดูบล็อค C) ธารน้ำแข็งสาขาก็จะทำให้เกิดร่องเขารูปตัวยูได้เช่นกัน แต่ว่ามีขนาดเล็กกว่า และมีท้องร่องอยู่สูงจากท้องร่องหลัก เรียกว่า "หุบเขาลอย" (hanging trough) น้ำที่ไหลในท้องร่องเล็กนี้ก็จะไหลลงสู่ร่องหลัก ทำให้เกิดน้ำตกและบริเวณน้ำไหลเชี่ยว ในบริเวณที่น้ำไหลผ่านขอบของหุบเขาลอยลงไปสู่ร่องหลัก ลำน้ำนี้จะถูกกัดกร่อนให้เป็นรูปตัววีต่อไป

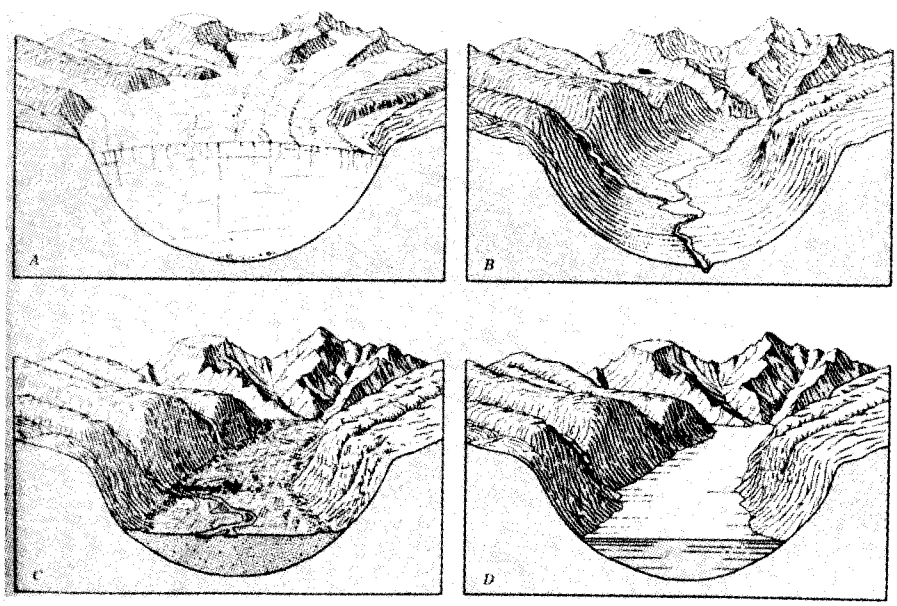
แนวสันเขาที่วางตัวไปตามลำน้ำซึ่งเกิดขึ้นก่อนธารน้ำแข็งจะปรากฏ จะเปลี่ยนเป็นสันเขาปลายหัก ซึ่งเกิดจากการครูดไถของธารน้ำแข็งเรียกว่า "สันเขาปลายตัด" (truncated spurs) ใต้ธารน้ำแข็งลงไปหินฐานอาจไม่ถูกกัดเสมอไป ดังนั้น พื้นร่องและเซิร์กอาจมีแอ่งหิน (rock basin) และบันไดหิน (rock steps) เกิดขึ้น เซิร์กและตอนบนของร่องจะเต็มไปด้วยทะเลสาบเล็ก ๆ มากมาย เรียกว่า "แอ่งน้ำบนเขา" (tarn) ร่องธารน้ำแข็งสายหลักจะมีทะเลสาบใหญ่และยาวเรียกว่า "ทะเลสาบร่องธารน้ำแข็ง" (trough lake) บางครั้งเรียกว่า "ทะเลสาบนิ้วมือ" (finger lake) จะมีแผ่นดินถล่มเกิดขึ้นเสมอ เพราะธารน้ำแข็งจะทำให้เกิดหุบผาชัน ประเทศที่เคยมีธารน้ำแข็งปกคลุม เช่น สวิตเซอร์แลนด์และนอรเว มักจะได้รับภัยธรรมชาติจากแผ่นดินถล่มเสมอ เพราะว่านครและเมืองสำคัญ ๆ มักตั้งอยู่ในพื้นร่องธารน้ำแข็ง จึงอาจจะถูกโคลนไหลและแผ่นดินถล่มทำลายทั้งเมือง

รูป 22.4 มอเรนของธารน้ำแข็งหุบเขาที่เกิดมาก่อน แสดงให้เห็นถึงขอบเขตของธารน้ำแข็งยุคนั้น

ธารน้ำแข็งภูเขาอาจพาก้อนหินปนมากับน้ำแข็งหรืออาจจะลาดมาตามน้ำแข็ง ครูดไปกับด้านข้างหุบเขา ทำให้เกิด "สันกองหินข้างธาร" (lateral moraine) ในบริเวณที่ธารน้ำแข็งสองสายไหลมาพบกัน ธารน้ำแข็งจะพัดพาหินมากองรวมกันเป็น "กองหินกลางธาร" (medial moraine) ตอนปลายของธารน้ำแข็งหินส่วนหนึ่งจะถูกดันมากองรวมกันเรียกว่า "กองหินปลายธาร" (terminal moraine or end moraine) กองหินชนิดนี้จะเป็นกองมีสันโค้งตัดผ่านพื้นหุบเขา แล้วโค้งเรียบขึ้นไปตามด้านข้างของร่องธารแต่ละข้างจนไปเชื่อมกับกองหินข้างธาร ตอนที่ธารน้ำแข็งถอยตัวขึ้นไปจะทิ้งเศษหินกระจายอยู่ทั่วไป อันเกิดจากธารน้ำแข็งละลายแล้วปล่อยให้หินหล่นกองอยู่ เรียกว่า "กองหินจากธารน้ำแข็งถอยตัว" (recession moraine)

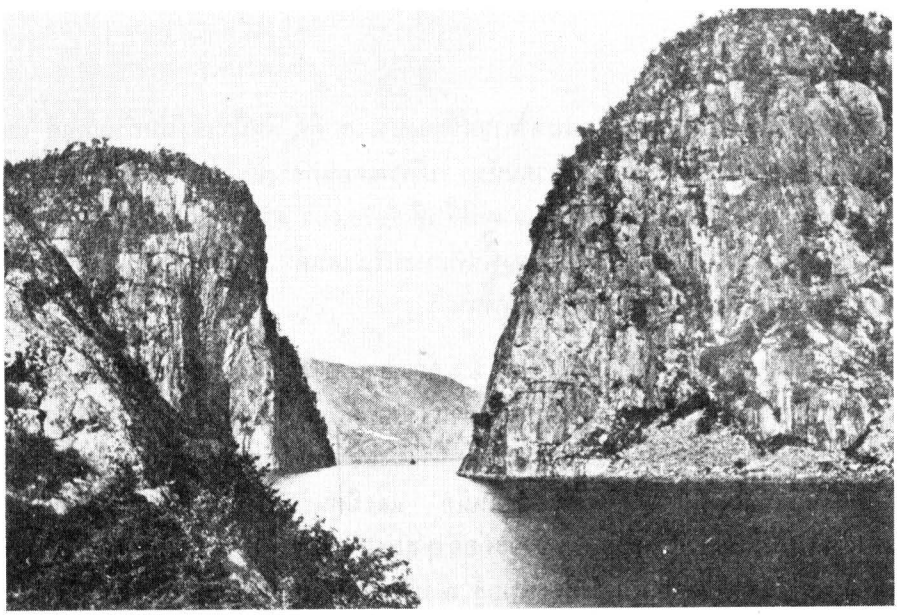
ร่องธารน้ำแข็งและฟยอร์ด

ร่องธารน้ำแข็งขนาดใหญ่ที่ปรากฏอยู่ในปัจจุบันมักจะมีพื้นเกือบแบนราบ เนื่องจากการเพิ่มระดับของลำน้ำที่ไหลออกมาจากธารน้ำแข็งที่ถอยตัวกลับไป ซึ่งจะมีเศษหินทับถมกันอยู่เป็นจำนวนมาก การทับถมของวัตถุน้ำพาตามหุบเขา ที่เกิดจากการละลายของน้ำแข็งเราเรียกว่า "กระบวนสิ่งทับถมจากการละลายของธารน้ำแข็ง" (valley train) รูปที่ 22.5 แสดงให้เห็นร่องธารน้ำแข็งที่ไม่มีสิ่งใดไหลลงไปเลยกับร่องซึ่งมีวัตถุน้ำพาจำนวนมากไหลลงไปที่ก้นร่องนั้น



รูป 22.5 วิวัฒนาการของร่องธารน้ำแข็ง (A) ระหว่างที่มีธารน้ำแข็งมากที่สุด หุบเขารูปตัวยูจะมีน้ำแข็งบรรจุอยู่เต็ม (B) เมื่อธารน้ำแข็งสลายตัวไปแล้วหุบเขาก็จะมีลำน้ำและทะเลสาบเกิดขึ้น (C) ถ้าลำน้ำสายหลักพัดพาตะกอนมามาก ลำน้ำจะพาตะกอนมาทับถมก้นหุบเขา (D) ถ้าหุบเขานี้จมตัวลงใต้ระดับน้ำทะเล น้ำทะเลจะไหลเข้ามาในหุบเขา ทำให้เกิดเป็นฟยอร์ด

เมื่อพื้นร่องธารน้ำแข็งนี้เปิดสู่ทะเลและวางตัวอยู่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเล น้ำทะเลก็จะไหลเข้าร่องนั้นไปจนถึงบริเวณที่น้ำแข็งถอยตัว ทำให้เกิดอ่าวลึกแคบเรียกว่า ฟยอร์ด (fiord) ฟยอร์ดนี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งสองกรณี คือ เกิดจากการทรุดตัวของชายฝั่ง หรือไม่ก็เกิดจากการกัดกร่อนของธารน้ำแข็งลึกลงไปจนต่ำกว่าระดับน้ำทะเล ฟยอร์ดส่วนใหญ่มักเกิดตามวิธีหลังเพราะความหนาแน่นของน้ำแข็ง ทำให้น้ำแข็งสามในสี่หรือเก้าในสิบจมอยู่ใต้ระดับน้ำทะเลเมื่อน้ำแข็งไหลลงทะเล ยิ่งไปกว่านั้นธารน้ำแข็งที่หนานับพันๆ ฟุตสามารถกัดลึกลงไปได้ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลอย่างเห็นได้ชัด ก่อนที่สมรรถภาพการกัดกร่อนของมันจะลดลงเมื่อมันไหลลงสู่ทะเลกว้าง



รูป 22.6 ฟยอร์ดในนอรเว มีผนังหุบเขาสูงชัน

ปัจจุบันนี้สังเกตพบว่าฟยอร์ดตามชายฝั่งอะแลสกาจะเกิดในบริเวณที่น้ำแข็งละลายถอยตัวไปอย่างรวดเร็ว และฟยอร์ดก็จะมีน้ำไหลเข้าไปแทนที่ เราจะพบเห็นฟยอร์ดได้มากในเขตภูเขาในละติจูด 50—70 องศาเหนือใต้

สิ่งแวดล้อมของธารน้ำแข็งภูเขา

โดยทั่วไปภูเขาที่เคยถูกธารน้ำแข็งปกคลุมจะขรุขระ เช่น เทือกเขาแอลป์ เทือกเขาปีเรนิส เทือกเขาหิมาลัย หรือเทือกเขาเซียร์รา เนวาดา ทำให้มีประชากรตั้งถิ่นฐานอยู่น้อยและยากแก่การที่จะเข้าไปถึง พื้นดินที่อยู่เหนือระดับเส้นขอบป่าไม้ (timber line) เป็นพื้นที่ไม่ค่อยมีประโยชน์ ทั้งนี้ยกเว้นในฤดูร้อนที่อาจใช้เป็นที่เลี้ยงสัตว์ได้ และบางแห่งอาจมีแร่ธาตุฝังอยู่ในหิน นอกจากนั้นก็อาจใช้เป็นที่พักผ่อนประจำท้องถิ่น เช่น เป็นที่สำหรับปีนเขา ที่แข่งขันกีฬาฤดูหนาว เป็นต้น

ใต้เส้นขอบป่าไม้ลงมาจะเต็มไปด้วยป่าไม้ ร่องธารน้ำแข็งรูปตัวยู ทำให้เกิดแนวพื้นดินแบนราบเป็นทางกว้าง สามารถที่จะใช้เดินทางผ่านได้ บริเวณนี้เหมาะสำหรับการสร้างตัวเมือง เป็นที่เลี้ยงสัตว์ในฤดูหนาวและเป็นเส้นทางหลวงสายสำคัญ ตามเทือกเขาแอลป์ในอิตาลีมีร่องธารน้ำแข็งแบนราบอยู่หลายแห่งที่วางตัวจากใจกลางของเทือกเขาแอลป์ลงไปทางใต้ถึงที่ราบทางตอนเหนือของอิตาลี สิ่งนี้เป็นปัจจัยทางภูมิศาสตร์ที่สำคัญเพราะทำให้มนุษย์เดินทางเข้าสู่ใจกลางของเทือกเขาแอลป์ได้ง่าย และเป็นช่องเขาที่สำคัญ ช่องเขาเบรนเนอร์ (Brenner Pass) เป็นช่องเขาที่วางตัวอยู่ตอนบนของร่องธารน้ำแข็งหุบเขาแม่น้ำอะดิธ ผนังที่ลาดชันของร่องธารน้ำแข็งจะมีน้ำตกและเป็นบริเวณที่น้ำไหลเชี่ยวมาก จึงเป็นแหล่งกำเนิดของไฟฟ้าพลังน้ำอย่างดี

พืดน้ำแข็งในยุคปัจจุบัน

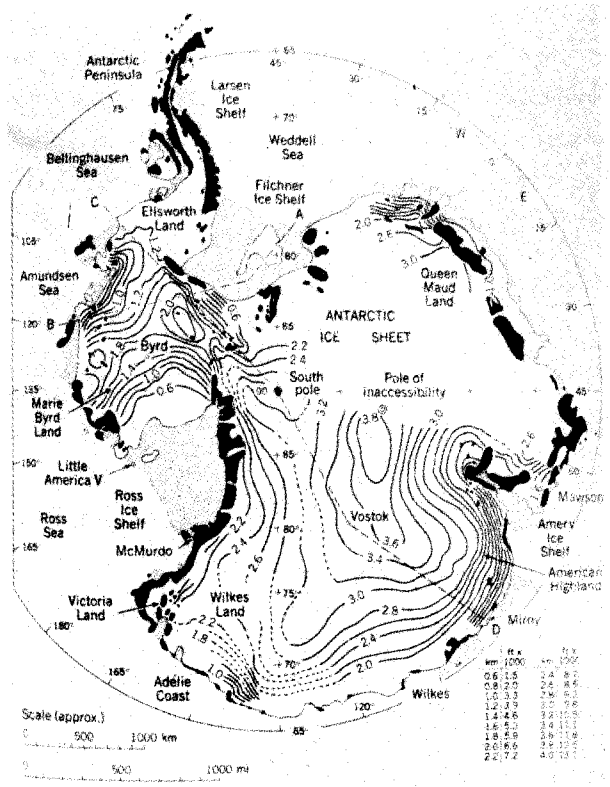
ในโลกนี้มีน้ำแข็งสะสมจำนวนมหาศาลอยู่สองบริเวณ คือ พืดน้ำแข็งในกรีนแลนด์ และแอนตาร์กติก ทั้งสองแห่งนี้เป็นพืดน้ำแข็งขนาดมหึมา บริเวณตอนกลางหนาหลายพันฟุต วางตัวอยู่เหนือพื้นดินที่มีขนาดกึ่งทวีป พืดน้ำแข็งกรีนแลนด์มีพื้นที่ 670,000 ตารางไมล์ (1,740,000 ตารางกิโลเมตร) และปกคลุมพื้นที่ถึงเจ็ดในแปดของพื้นที่เกาะกรีนแลนด์ บริเวณที่เป็นภูเขาที่โผล่เหนือน้ำแข็งนั้นจะมีเพียงแนวแคบ ๆ บริเวณชายฝั่งเท่านั้น

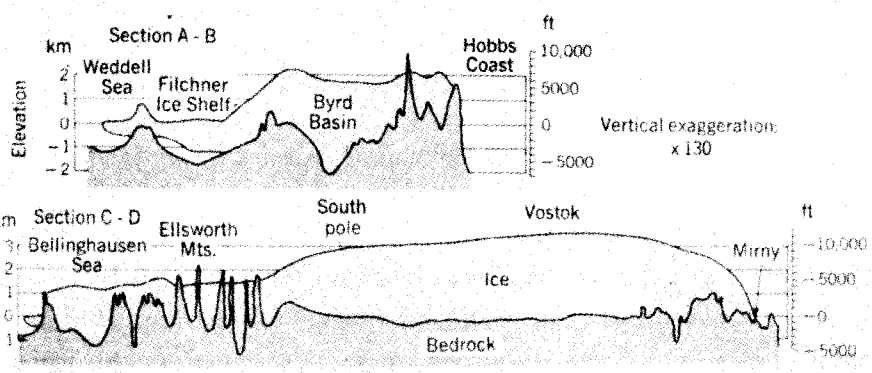
พืดน้ำแข็งแอนตาร์กติกปกคลุมพื้นที่ถึง 5,000,000 ตารางไมล์ (13,000,000 ตร.กม.) และมีบางส่วนกระจายลงสู่มหาสมุทร ทำให้เกิดพืดน้ำแข็งลอยน้ำ ความแตกต่างระหว่างพืดน้ำแข็งในสองบริเวณนี้ก็คือตำแหน่งของพืดน้ำแข็ง ขณะที่พืดน้ำแข็งแอนตาร์กติกปกคลุมอยู่เหนือขั้วโลกใต้ แต่พืดน้ำแข็งกรีนแลนด์จะอยู่แถบบริเวณขั้วโลกเหนือ และมีศูนย์กลางอยู่ประมาณละติจูด 75 องศาเหนือ ตำแหน่งนี้เป็นบริเวณที่สูงซึ่งน้ำแข็งจะค่อย ๆ สะสมจนเป็นพืดน้ำแข็งขนาดใหญ่ได้ บริเวณขั้วโลกเหนือไม่มีพื้นแผ่นดินเลย น้ำแข็งที่สะสมอยู่ ณ บริเวณนั้นจึงเป็นเพียงน้ำแข็งในทะเล

เส้นชั้นความสูงที่ลากลงบนพืดน้ำแข็งกรีนแลนด์ แสดงให้เห็นรูปทรงของพืดน้ำแข็งซึ่งเป็นรูปโดมกว้างและเรียบ จากจุดสูงสุดประมาณ 10,000 ฟุต (3,000 ม.) อยู่ทางตะวันออกของศูนย์กลางและลาดลงไปในทุกทิศทาง พื้นหินใต้พืดน้ำแข็งมีระดับใกล้เคียงกับระดับน้ำทะเล บริเวณตรงกลางจะต่ำกว่าระดับน้ำทะเล แต่บริเวณขอบจะสูงกว่า หิมะที่ตกทับถมกันอยู่ทำให้พื้นผิวสูงขึ้น ขณะที่หิมะในระดับลึกจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ออกไปสู่บริเวณขอบของแผ่นดิน ณ ขอบนอกของแผ่นน้ำแข็ง น้ำแข็งจะบางลงจนมีความหนาเพียงสองสามร้อยฟุต และใต้ระดับน้ำลงไปน้ำแข็งจะละลาย น้ำแข็งที่อยู่ติดผิวน้ำจะถูกกัดเซาะเร็วกว่าน้ำแข็งที่อยู่บนพื้นแผ่นดิน น้ำแข็งที่แผ่ขยายลงไปในมหาสมุทรนั้นแผ่ขยายไปได้ในระยะที่จำกัด แต่จะแผ่ไปได้ไกลในเขตอ่าวตื้น ๆ และไหล่ทวีป

ความหนาของน้ำแข็งในแอนตาร์กติกนั้นจะหนากว่าน้ำแข็งในกรีนแลนด์ ตัวอย่างเช่น พืดน้ำแข็งที่ปกคลุมบริเวณ มารี เบิด แลนด์ มีความหนาถึง 13,000 ฟุต (4,000 เมตร) พื้นหินจมอยู่ใต้ระดับน้ำทะเลถึง 6,500 ฟุต (2,000 เมตร)

ลักษณะสำคัญของพื้นน้ำแข็งแอนตาร์กติกอีกประการหนึ่งก็คือ มีลักษณะเป็นแผ่นขนาดใหญ่ลอยอยู่เหนือน้ำเรียกว่า หิ้งน้ำแข็ง (ice shelves) (ดูรูปที่ 22.7) หิ้งน้ำแข็งที่ใหญ่ที่สุด คือ หิ้งน้ำแข็งรอสส์ (ross ice shelf) ซึ่งมีพื้นที่ประมาณ 200,000 ตารางไมล์ (520,000 ตร. กม.) ความสูงเฉลี่ยประมาณ 225 ฟุต (70 ม.) เหนือระดับน้ำทะเล หิ้งน้ำแข็งจะได้รับน้ำแข็งจากพื้นน้ำแข็ง แต่ว่าอาจมีน้ำแข็งมาทับถมใหม่ได้เช่นกันจากหิมะที่ตกลงมาอัดตัวกันเหนือน้ำแข็งเดิม

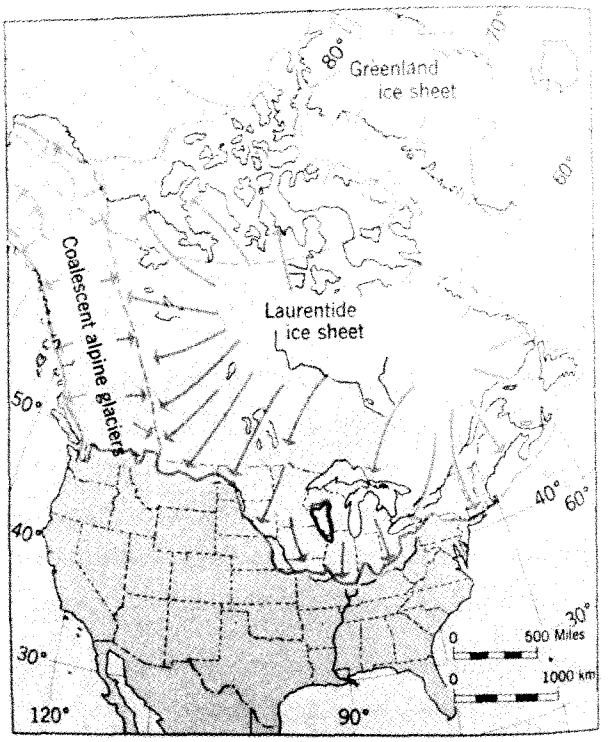




รูป 22.7 แผนที่ทวีปแอนตาร์กติก แสดงให้เห็นระดับผิวพื้นด้วยเส้นชั้นความสูง ซึ่งมีช่วงต่างเส้นชั้นความสูง 0.2 กม. (600 ฟุต) บริเวณที่มีหินฐานโผล่ขึ้นมาจะแสดงด้วยพื้นสีดำ ไหล่น้ำแข็งแสดงด้วยเส้นประ

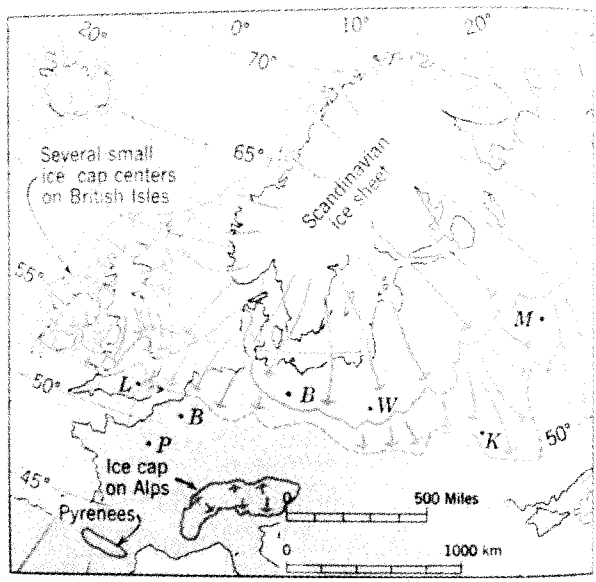
พืดน้ำแข็งยุคไพลสโตซีน

ส่วนใหญ่ของพื้นที่ในอเมริกาเหนือ ยุโรป และหลายบริเวณทางตอนเหนือของเอเชียและตอนใต้ของอเมริกาใต้ จะมีพืดน้ำแข็งขนาดมหึมาปกคลุมอยู่ในยุคไพลสโตซีน พืดน้ำแข็งเหล่านี้ได้สิ้นสุดลงเมื่อราว 10,000—15,000 ปีมาแล้ว โดยการที่พืดน้ำแข็งเคลื่อนที่ห่างออกไป ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการขยายตัวและถอยกลับของธารน้ำแข็งครั้งหลังสุดนั้น ได้รับการกระทำจากตัวการกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย



รูป 22.8 พืดน้ำแข็งยุคไพลสโตซีนในอเมริกาเหนือ ยุคที่ขยายตัวมากที่สุดนั้นขยายมาถึงแม่น้ำโอไฮโอและมิสซูรี

จากภาพที่ 22.8–22.9 แสดงให้เห็นถึงแนวการเคลื่อนที่ไกลสุดของน้ำแข็งในอเมริกาเหนือและยุโรปยุคหลังสุด ในสหรัฐอเมริกา ส่วนใหญ่ของพื้นดินที่อยู่ตอนเหนือของแม่น้ำมิสซูรีและโอไฮโอจะถูกปกคลุมด้วยพืดน้ำแข็งเช่นเดียวกับภาคเหนือของเพนซิลเวเนีย และทั้งหมดของนิวยอร์กและนิวอิงแลนด์ในยุโรป พืดน้ำแข็งมีศูนย์กลางอยู่ที่ทะเลบอลติก พืดน้ำแข็งปกคลุมคาบสมุทรสแกนดิเนเวียและเคลื่อนที่ลงมาทางใต้ถึงตอนกลางของเยอรมนี เกาะอังกฤษเกือบทั้งหมดอยู่ใต้พืดน้ำแข็งซึ่งมีศูนย์กลางอยู่ในเขตที่สูงและขยายตัวออกไปจนเชื่อมกับพืดน้ำแข็งในคาบสมุทรสแกนดิเนเวีย ขณะ



รูป 22.9 แผ่นน้ำแข็งสแกนดิเนเวียในภาคเหนือของยุโรป เกิดในยุคไพลสโตซีน เส้นทึบแสดงให้เห็นอาณาเขตของธารน้ำแข็งยุคสุดท้าย เส้นประแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ซึ่งบางครั้งธารน้ำแข็งก็ขยายตัวไปถึง

เดียวกันเทือกเขาแอลป์ก็จะมีธารน้ำแข็งปกคลุมอยู่บนภูเขา ซึ่งแยกตัวเป็นพืดน้ำแข็งเดี่ยว ขณะที่โลกมีพืดน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดนั้นยอดเขาสูงทุกยอดในโลกจะมีธารน้ำแข็งภูเขาปกคลุมอยู่ ปัจจุบันนี้ธารน้ำแข็งภูเขามีเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ยอดเขาที่มีลักษณะไม่เหมาะสมจะไม่มีธารน้ำแข็งเหลืออยู่เลย

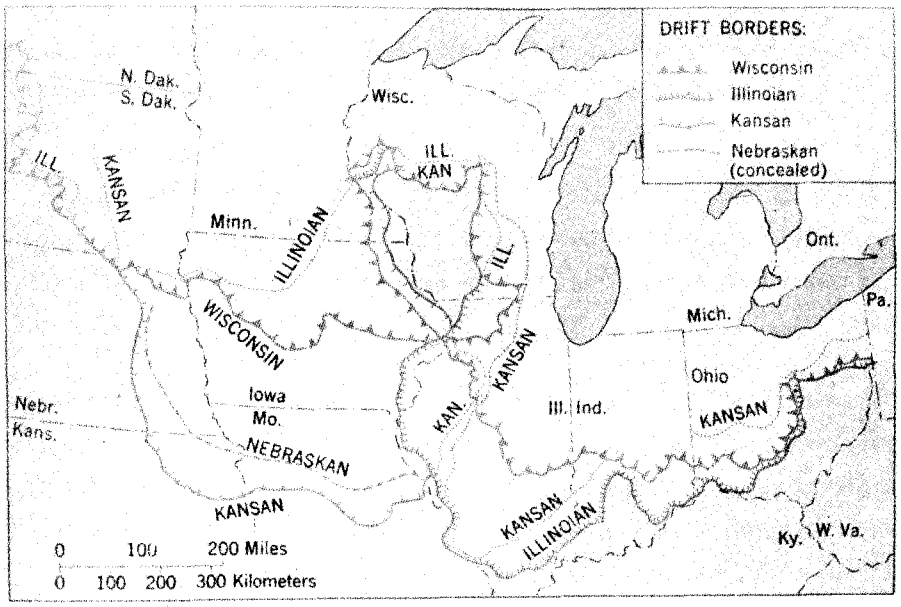
ในกลางคริสต์ศตวรรษที่ 19 นักธรรมชาติวิทยาชื่อ หลุยส์ อกัสซีส ได้ประกาศทฤษฎีที่ได้พิสูจน์แล้วว่าพืดน้ำแข็งมีการขยายตัวมาก่อนหน้านั้นแล้ว จากการศึกษาสิ่งทับถมที่น้ำแข็งพามาทิ้งไว้แสดงให้เห็นว่าน้ำแข็งไม่ได้ขยายตัวมาเพียงครั้งเดียว แต่ขยายตัวมาและถอยกลับครั้งสำคัญ ๆ ถึงสี่ครั้ง โดยทิ้งช่วงห่างกันราวหนึ่งล้านปี สิ่งหลงเหลือของพืดน้ำแข็งที่ขยายตัวมาครั้งสุดท้ายเราเรียกว่ายุควิสคอนซิน ทำให้เกิดภูมิประเทศใหม่และมองเห็นเด่นชัด

ยุคน้ำแข็ง

ยุคน้ำแข็งสำคัญ ๆ มีอยู่สี่ยุค ยุคในอเมริกาเหนือจะเข้าคู่กับยุคในยุโรป เช่น หลักฐานที่ปรากฏอยู่บนเทือกเขาแอลป์ เมื่อพิจารณารวมกับยุคที่ไม่มีน้ำแข็งที่แทรกตัวอยู่ระหว่างยุคน้ำแข็ง (interglacial stage – เป็นช่วงที่มีภูมิอากาศไม่หนาวจัด ซึ่งน้ำแข็งได้สลายตัวไป) เราจัดเรียงลำดับยุคน้ำแข็งตามช่วงอายุได้ดังนี้

ยุคในทวีปอเมริกา (ตอนกลางทางเหนือของสหรัฐ ฯ)	ยุคในยุโรป (แอลป์)
Wisconsin glacial	Würm glacial
Sangamon interglacial	Riss-Würm interglacial
Illinoian glacial	Riss glacial
Yarmouth interglacial	Mindel-Riss interglacial
Kansan glacial	Mindel glacial
Aftonian interglacial	Günz-Mindel interglacial
Nebraskan glacial	Günz glacial

จากรูป 22.10 นี้แสดงให้เห็นขอบการขยายตัวลงมาทางใต้ของธารน้ำแข็งแต่ละยุค ในตอนกลางทางเหนือของสหรัฐ ฯ ขอบอันเก่าจะถูกอันใหม่ขยายมาทับ ทำให้ขอบเก่านั้นเลื่อนไป ให้สังเกตพื้นที่ในรัฐวิสคอนซิน จะมีน้ำแข็งล้อมรอบอยู่แต่ไม่เคยทับบริเวณนั้น



รูป 22.10 แสดงให้เห็นอาณาเขตที่ธารน้ำแข็งขยายตัวไปถึงในยุคน้ำแข็งแต่ละยุค

อายุที่สมบูรณ์และระยะเวลาของยุคไพลสโตซีนและยุคน้ำแข็งนั้นยากที่จะกำหนดลงไปได้ ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์สัมพันธ์ที่เห็นอยู่จะมีอย่างชัดเจนก็ตาม น้ำแข็งยุคสุดท้ายสลายตัวจากตอนเหนือของสหรัฐฯ เมื่อราว 10,000–15,000 ปีมาแล้ว ยุควิสคอนซินอาจอยู่นานถึง 60,000 ปี การขยายตัวครั้งแรกของธารน้ำแข็งเนบราสกา อาจเกิดเมื่อ 300,000–600,000 ปีมาแล้ว อย่างไรก็ตามยุคไพลสโตซีนซึ่งเป็นยุคทางธรณีวิทยานั้น นักธรณีวิทยาเชื่อว่ามีอายุราวหนึ่งล้านปีมาแล้ว

สาเหตุของการเกิดธารน้ำแข็งในทวีป

เราไม่สามารถจะลงความเห็นได้ว่า การเกิดน้ำแข็งบนโลกเป็นปรากฏการณ์เชิงธรณีประวัติที่ชี้ให้เห็นว่าโลกเราเป็นดาวเคราะห์ที่เย็นลง ยังมีหลักฐานอื่น ๆ ที่ดีกว่าที่อยู่ในรูปของหินที่มาทับถมในยุคเดียวกับธารน้ำแข็ง เป็นหลักฐานเชิงธรณีประวัติของโลกที่ดี ซึ่งนอกเหนือจากข้อเท็จจริงที่ว่าธารน้ำแข็งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นบางโอกาสแล้ว ความรู้เกี่ยวกับสาเหตุของการเกิดธารน้ำแข็งนั้นเป็นเรื่องที่เราคาดหมายทั้งนั้น ที่แน่ ๆ ก็คือต้องมีช่วงภูมิอากาศหนาวเย็นอันยาวนานที่ทำให้มีหิมะตกหนักจนพัดน้ำแข็งมีขนาดโตขึ้น

สาเหตุประการหนึ่งที่จะเป็นไปได้ของการเกิดธารน้ำแข็งก็คือ การลดปริมาณรังสีของแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังผิวโลก อาจมีเหตุผลบางประการชี้ให้เห็นว่าปริมาณพลังงานนี้ลดลงในช่วงเริ่มต้นยุคไพลสโตซีน ทำให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของบรรยากาศของโลกมีระดับลดต่ำลง ปรากฏการณ์นี้นอกจากจะไม่ทำให้ปริมาณหิมะลดลงแล้ว การละลายของน้ำแข็งบนผิวโลกยังลดลงด้วย ทำให้มีหิมะตกลงบนธารน้ำแข็งมากขึ้น เป็นผลให้ธารน้ำแข็งแผ่กว้างออกไปทุกที สาเหตุประการที่สองเป็นสาเหตุที่ต่อเนื่องกับสาเหตุประการแรก กล่าวคือ ส่วนใหญ่ของตัวทวีปจะมีระดับเพิ่มขึ้นในระหว่างยุคไพล-โอซีนกับตอนต้นของยุคไพลสโตซีน ทั้งนี้เป็นผลมาจากกระบวนการสร้างภูเขา (orogeny) พร้อม ๆ กับการยกระดับภายในทวีป (epeirogenic uplift) ภูเขาเหล่านั้นเป็นตัวการทำให้เกิดหยาดน้ำฟ้าแบบปะทะภูเขา ผลร่วมกันระหว่างการลดปริมาณแสงอาทิตย์และการเพิ่มระดับของตัวทวีป เป็นผลทำให้ภูมิอากาศเย็นลง ซึ่งเป็นเหตุทำให้หิมะตกเพิ่มขึ้นในพื้นที่ที่เหมาะสมในภาคพื้นทวีป เช่น ที่สูงลอเรนเชียน ทางตะวันออกของแคนาดา และบริเวณแหลมสแกนดิเนเวีย ทฤษฎีว่าด้วยสาเหตุของการเพิ่มปริมาณธารน้ำแข็งที่กล่าวโดยรวม ๆ กันนี้เรียกว่า ทฤษฎีโซลาร์–โทโปกราฟิก (solar-topographic theory)

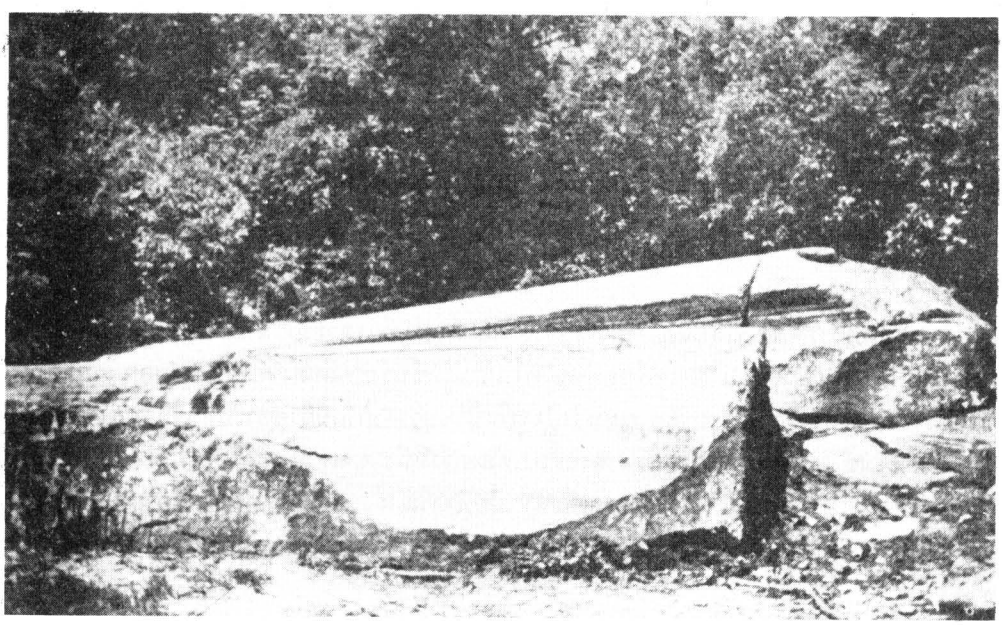
ทฤษฎีที่สำคัญและใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ ทฤษฎีที่ว่าด้วยการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีหน้าที่ในการดูดซึมรังสีคลื่นยาวที่โลกคายออก และเป็นผลทำให้บรรยากาศอบอุ่น มีการประมาณกันว่าปัจจุบันนี้ในบรรยากาศมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ 0.03 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ถ้าปริมาตรลดลงเพียงครึ่งหนึ่ง อุณหภูมิระดับพื้นผิวของโลกจะลดลงประมาณ 7 องศาฟาเรนไฮต์ (4 องศาเซลเซียส) เมื่อพิจารณาถึงหลักฐานการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมกับการเพิ่มระดับของพื้นทวีปแล้ว สองสิ่งนี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีพืดน้ำแข็งเพิ่มขึ้น

ทฤษฎีอื่น ๆ ที่กล่าวถึงเรื่องนี้และมีกระบวนการที่แตกต่างออกไป คือ ทฤษฎีที่ว่าด้วยการเพิ่มปริมาณฝุ่นภูเขาไฟสู่บรรยากาศ เป็นสาเหตุหนึ่งของการก่อให้เกิดยุคน้ำแข็ง เพราะฝุ่นจะทำให้แสงอาทิตย์สะท้อนกลับได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงผิวโลกมีน้อยลง นอกจากฝุ่นจะช่วยลดอุณหภูมิของโลกแล้ว ฝุ่นยังทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการกลั่นตัว (condensation nuclei) ของความชื้นอีกด้วย ทำให้มีหยาดน้ำฟ้าเพิ่มขึ้น ทฤษฎีอีกกลุ่มหนึ่งกล่าวถึงการเคลื่อนตัว

ของทวีปจากขั้วโลก ทำให้ส่วนต่าง ๆ ของทวีปไปอยู่ ณ ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมกับการเพิ่มปริมาณของน้ำแข็ง บางทฤษฎีก็กล่าวถึงการเปลี่ยนทิศทางของกระแสน้ำ โดยเฉพาะการปิดกั้นหรือทำให้กระแสน้ำอุ่นเปลี่ยนทางเดิน เช่น กระแสน้ำอุ่นกัลฟ์สตรีม จึงเป็นเหตุให้ภูมิอากาศในเขตกึ่งอาร์กติกเย็นลงไปอีก ความแปรปรวนในการโคจรของโลกเป็นสาเหตุสำคัญอีกประการหนึ่งที่ทำให้โลกได้รับปริมาณพลังงานจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนไป ซึ่งน่าจะพิจารณาว่าอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดยุคน้ำแข็งได้

การกัดกร่อนโดยแผ่นน้ำแข็ง

แผ่นน้ำแข็งนี้จะเหมือนกับธารน้ำแข็งบนภูเขา คือ แผ่นน้ำแข็งเป็นตัวการหนึ่งของการกัดกร่อน การเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ของแผ่นน้ำแข็งอาจขูดและบดลงไปในหินฐาน ทำให้หินแตกออกเป็นก้อนเล็ก ๆ กลม ๆ จำนวนมากมาย รอยขูด (scratches or striation) จะมีทิศทางไปในทางเดียวกับที่น้ำแข็งเคลื่อนที่ไป แต่น้ำแข็งอาจเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ได้ตลอดเวลา ทั้งนี้เกิดจากแนวที่น้ำแข็งเคลื่อนที่มาพบกัน หินบางก้อนอาจถูกขูดออกเป็นร่องลึก (ดูรูป 22.11)



รูป 22.11 แท่งหินปูนที่มีผิวเรียบผิดปกติ เกิดจากการครูดของก้อนน้ำแข็ง ไปบนก้อนหินบนเกาะเคลลี อยู่ใกล้ฝั่งด้านใต้ของทะเลสาบอีรี

บริเวณที่เป็นหินแข็งและมียอดแหลมจะมีน้ำแข็งเกาะอยู่ และถูกกวาดลงบนผิวของหินฐาน เป็นผลทำให้เกิดแนวหินแตกโค้งไปตามแนวที่น้ำแข็งเคลื่อนที่ พื้นผิวของหินแข็งบางชนิดจะถูก

ครูดอย่างหนักด้วยอนุภาคอันละเอียดอ่อนของดินเหนียว การกัดกร่อนจากธารน้ำแข็งที่กล่าวถึงมานี้เป็นปรากฏการณ์ปกติที่เกิดขึ้นทางตะวันออกเฉียงเหนือของสหรัฐอเมริกา ซึ่งจะพบเห็นได้จากหินเกือบทั้งหมดที่โผล่ออกมาจากผิวดิน

รูป 22.12 การขัดสีของธารน้ำแข็งไปบนเนินหิน

การเสียดสีของธารน้ำแข็งที่เคลื่อนที่มาจะทำให้หินแข็งมีรูปร่างโค้งนูนได้ (ดูรูป 22.12) ด้านหนึ่งเป็นด้านที่หันเข้าหาทิศที่น้ำแข็งเคลื่อนตัวมา จะมีลักษณะโค้งเรียบ ด้านนี้เรียกว่า "ด้านสตอสส์" (stoss side) อีกด้านหนึ่งเรียกว่า ด้านลี (lee side) เป็นด้านที่น้ำแข็งดันให้หินแตกออกตามรอยแยก มีสันคม เป็นด้านที่ชันกว่าด้านสตอสส์ เนินหินชนิดนี้นักธรณีวิทยาเรียกว่า หินรูปหลังแกะ (roches moutonnées)

การเสียดสีขนาดมหึมาที่พืดน้ำแข็งกระทำต่อหินในบางท้องถิ่น ซึ่งมีหินฐานที่อ่อนและกระแสธารน้ำแข็งนั้นมีน้ำหนักมาก และน้ำแข็งเคลื่อนที่ขนานไปกับหุบเขา ธารน้ำแข็งจะครูดหุบเขาให้ลึกลงเป็นรูปตัว U ตัวอย่างที่ดีในกรณีนี้ก็คือ ทะเลสาบรูปนิ้วมือ (finger lakes) ซึ่งอยู่ทางตะวันตกของรัฐนิวยอร์ก บริเวณนี้เคยมีร่องน้ำอยู่ก่อนแล้ว โดยวางตัวขนานไปกับการเคลื่อนที่ไปทางใต้ของธารน้ำแข็ง ทำให้หุบเขาเดิมถูกครูดเป็นร่องลึก ทางตอนเหนือมีก้อนหินที่ธารน้ำพัดพามาขวางกั้นอยู่ ทำให้ร่องลึกกลายเป็นทะเลสาบยาว มีทะเลสาบหลายร้อยแห่งทั้งในทวีปยุโรปและอเมริกา ซึ่งเกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งดังที่กล่าวมาแล้ว ทะเลสาบเล็ก ๆ จำนวนนับไม่ถ้วนในรัฐมินน์ ในประเทศแคนาดาและฟินแลนด์ ที่ท้องทะเลสาบจะมีหินที่น้ำแข็งครูดมาจำนวนมากมาย ก้อนหินที่น้ำแข็งพัดพามานี้เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดทะเลสาบ

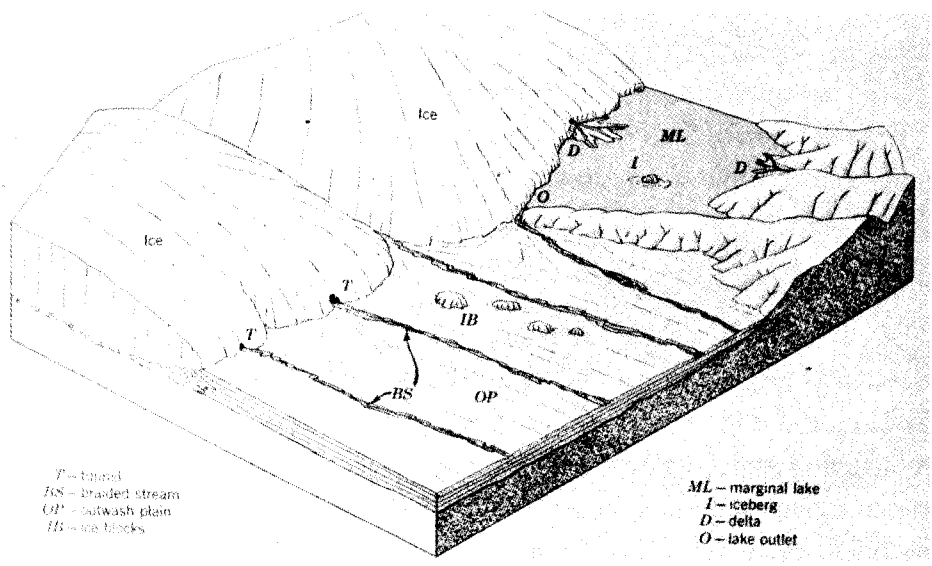
การทับถมที่เหลือจากพืดน้ำแข็ง

คำว่า "แนววัตถุธารน้ำแข็ง" (glacial drift) เราใช้เรียกสิ่งต่าง ๆ รวมทั้งก้อนหินที่ถูกธารน้ำแข็งพัดพามาทับถมด้วย แนววัตถุนั้นแบ่งออกเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ (1) แนววัตถุที่วางตัวเป็นชั้น (stratified drift) ประกอบด้วยชั้นของดินเหนียว ดินตะกอน ทราย และก้อนกรวด ซึ่งทับถมโดยการละลายของน้ำแข็งในลำธาร หรือแหล่งน้ำที่อยู่ติดกับน้ำแข็ง (2) ดินหินคละธารน้ำแข็ง (till) เป็นกองวัตถุผสมกันของหินที่แตกออกมามีขนาดต่าง ๆ กัน ตั้งแต่อนุภาคของดินเหนียวจนถึงก้อนหินขนาดมหึมา การทับถมนี้เกิดจากน้ำแข็งโดยตรง ไม่ได้เกิดจากการพัดพาของน้ำที่ละลายจากน้ำแข็ง มอเรนที่เกิดจากธารน้ำแข็งในหุบเขานั้น ประกอบด้วยดินหินคละธารน้ำแข็งขนาดใหญ่ขณะที่ตามแนวหุบเขาประกอบด้วยแนววัตถุที่วางตัวเป็นชั้น

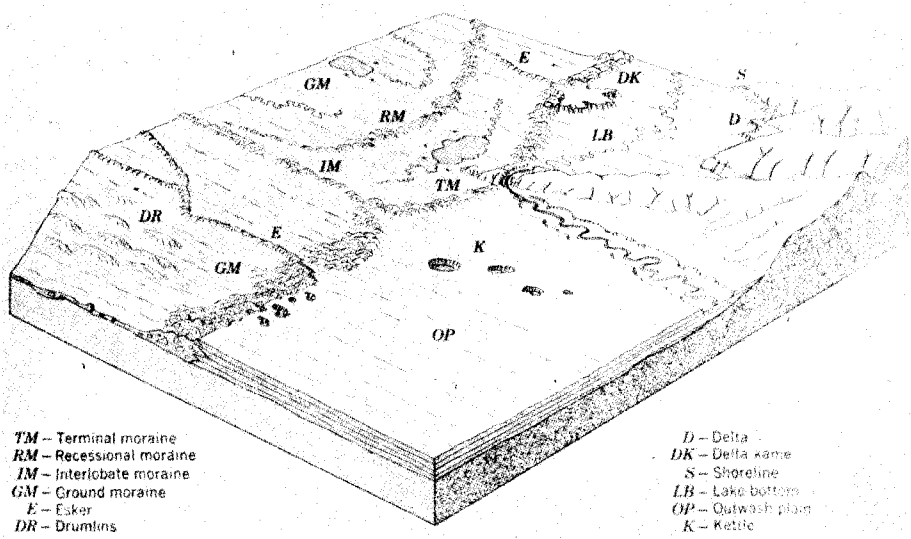
ในหลายบริเวณของสหรัฐอเมริกาที่เคยถูกธารน้ำแข็งยุคไพลสโตซีนปกคลุมมาก่อน จะมีแนวกองวัตถุธารน้ำแข็งโดยเฉลี่ยหนาถึง 20 ฟุต (6 เมตร) วางตัวอยู่บนเทือกเขา เช่น ในนิวอิงแลนด์ ส่วนบริเวณที่ต่ำในตอนกลางทางเหนือของสหรัฐอเมริกา แนวกองวัตถุธารน้ำแข็งจะหนาประมาณ 50 ฟุต (15 เมตร) ในรัฐไอโอวา แนวกองวัตถุอาจหนาถึง 150—200 ฟุต (45—60 เมตร) ในรัฐอิลลินอยส์ โดยเฉลี่ยหนามากกว่า 100 ฟุต (30 เมตร) ในบางท้องที่ที่ธารน้ำแข็งเคลื่อนตัวลงไปในร่องน้ำลึก แนวกองวัตถุอาจหนาหลายร้อยฟุต

เพื่อให้เกิดความเข้าใจรูปทรง และส่วนประกอบของวัตถุที่น้ำแข็งพามาทับถม จำเป็นที่จะต้องพิจารณาเงื่อนไขที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่น้ำแข็งคงตัวอยู่ ดังที่แสดงในรูป 22.13 บล็อค A แสดงให้เห็นพื้นที่ที่บางส่วนมีแผ่นน้ำแข็งปกคลุมพร้อมทั้งมีขอบเขตที่ค่อนข้างจะคงที่ เงื่อนไขนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการละลายของน้ำแข็งเท่ากับปริมาณน้ำแข็งที่จะไหลไปข้างหน้า โดยการเคลื่อนที่ของแผ่นน้ำแข็ง การเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำแข็งทำให้น้ำแข็งเคลื่อนที่ปกคลุมพื้นที่ได้มากขึ้น เป็นผลทำให้มีการเคลื่อนที่ของวัตถุตามพื้นลาดมากขึ้น และเป็นเหตุให้ขอบของแผ่นน้ำแข็งขยายออกไป และพื้นผิวน้ำแข็งจะค่อย ๆ ต่ำลง ถึงแม้ว่าขอบของน้ำแข็งยุคไพลสโตซีนจะขยายออกไปและถอยกลับหลายครั้งก็ตาม เราถือเอาช่วงที่ขอบของแผ่นน้ำแข็งคงที่มากที่สุดเป็นเกณฑ์ เงื่อนไขนี้ได้แสดงไว้ในบล็อค A

รูป 22.13 บริเวณขอบของธารน้ำแข็งตัวทวีป



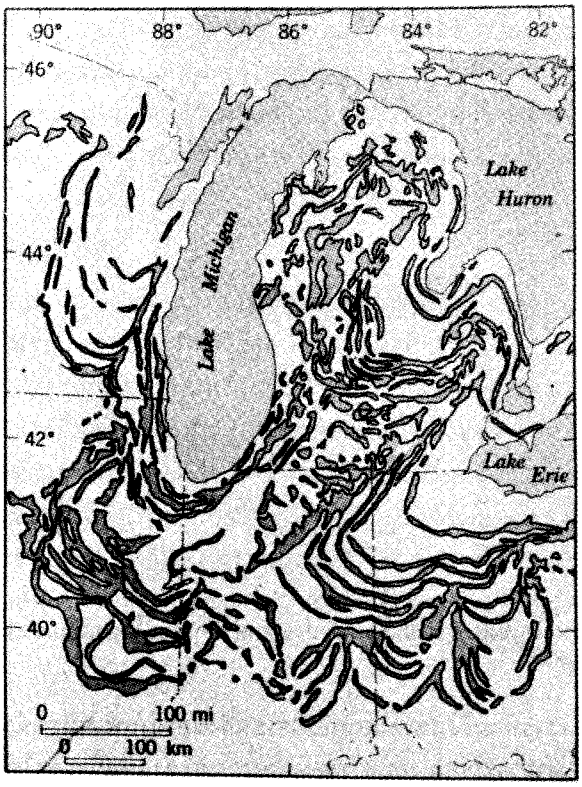
(A) เมื่อขอบน้ำแข็งยังคงสภาพอยู่ และน้ำแข็งเคลื่อนที่ไปตามพื้นลาด เมื่อน้ำแข็งละลาย น้ำแข็งจะทิ้งภูมิประเทศแบบต่าง ๆ ไว้มาก



(B) หลังจากน้ำแข็งละลายไปแล้ว ภูมิประเทศต่าง ๆ ที่อยู่ใต้น้ำแข็งก็จะปรากฏให้เห็น

การพัดพาของธารน้ำแข็งนั้นเหมือนกับการขนส่งของยานพาหนะขนาดมหึมาที่ขนวัตถุมาวางเป็นแนว วัตถุที่ถูกพัดพามาจะถูกกองอยู่ทางตอนปลาย และถ้าแผ่นน้ำแข็งไม่เคลื่อนที่แล้ว กองวัตถุนั้นก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เศษก้อนหินที่อยู่ภายในก้อนน้ำแข็งจะมาทับถมตรงขอบของแผ่นน้ำแข็ง บริเวณที่น้ำแข็งระเหยหรือละลาย และวัตถุเหล่านี้จะหยุดอยู่กับที่โดยไม่มีทางถูกขนกลับไปได้เลย

วัตถุที่น้ำแข็งพัดพามาทับถมอยู่ตรงขอบของพืดน้ำแข็ง จะทำให้เกิดกองวัตถุขึ้นเรียกว่า "เศษหินธารน้ำแข็งตอนปลาย" (terminal moraine) หลังจากที่น้ำแข็งสลายตัวไป ดังเช่น ในไดอะแกรม B เศษหินธารน้ำแข็งจะปรากฏให้เห็นเป็นแนวเนินปุ่ม (knobby hills) โดยมีลักษณะคล้ายแอ่งบางแห่งจะมีทะเลสาบอยู่ด้วย เราเรียกลักษณะภูมิประเทศนี้ว่า "ภูมิประทศแบบเนินปุ่มและหลุมแอ่งรูปกาต้มน้ำ" (knob and kettle topography) เศษหินธารน้ำแข็งตอนปลายมักจะวางแนวเป็นรูปโค้ง ส่วนโค้งนูนของเศษหินธารน้ำแข็งนั้นมักมีทิศทางไปทางใต้ และแสดงให้เห็นว่าการขยายตัวของแผ่นน้ำแข็งจะเป็นลอน ๆ ต่อเนื่องกัน แต่ละลอนจะวางตัวเป็นแนวโค้ง (ดูรูป 23.14) ในบริเวณที่ลอนตั้งแต่สองลอนมาพบกันมันจะต่อกันเป็นแนวเดียว แนวเศษหินธารน้ำแข็งจะโค้งมาข้างหลังและรวมกันเป็นแนวเดียวกันแล้วชี้ไปทางเหนือ เราเรียกเศษหินธารน้ำแข็งนี้ว่า "เศษหินธารน้ำแข็งตอนกลาง" (interlobate moraine) เมื่อพิจารณาถึงการถอยตัวของธารน้ำแข็งร่วมด้วยแล้ว จะเห็นว่าธารน้ำแข็งจะหยุดถอยตัวเป็นช่วง ๆ เป็นเหตุให้เกิดแนวเศษหินธารน้ำแข็งคล้ายกับตอนปลาย เราเรียกแนวเศษหินธารน้ำแข็งนั้นว่า "เศษหินธารน้ำแข็งถอยหลัง" (recession moraine) ซึ่งจะวางตัวเป็นแนวขรุขระขนานกับเศษหินธารน้ำแข็งตอนปลาย แต่จะบางกว่าและขาดออกเป็นช่วง ๆ

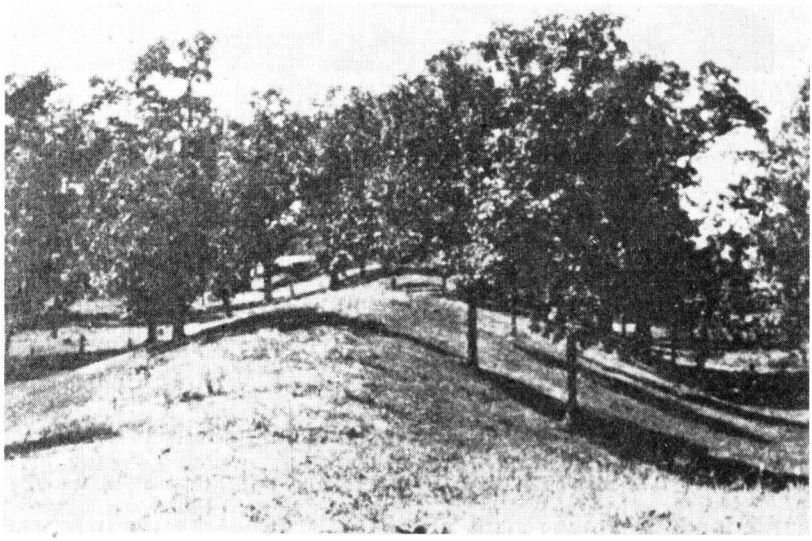


22.14 แนวมอเรนทางเหนือและตอนกลางของสหรัฐอเมริกามีรูปแบบคล้ายกับพู่ห้อยระย้า

จากรูป 22.13 ในหน้า 142 ในบล็อค A แสดงให้เห็นพื้นที่ราบเอียงซึ่งวางตัวอยู่ด้านหน้าของขอบแผ่นน้ำแข็ง เราเรียกว่า "ที่ราบเศษหินธารน้ำแข็ง" (outwash plain) เกิดจากแนววัตถุวางตัวเป็นชั้นซึ่งหลงเหลือจากลำน้ำเกลียวเชือก โดยที่แผ่นน้ำแข็งทำให้เกิดขึ้น การทับถมในบริเวณนี้จะทำให้เกิดเนินตะกอนรูปพัดขนาดมหึมาแผ่กว้างเป็นชั้น ๆ ทับชั้นทรายและก้อนหิน สำหรับลำน้ำที่ไหลผ่านแนววัตถุในชั้นนี้เราเรียกว่า "ท้องน้ำพื้นธารน้ำแข็ง" (glaciofluvial)

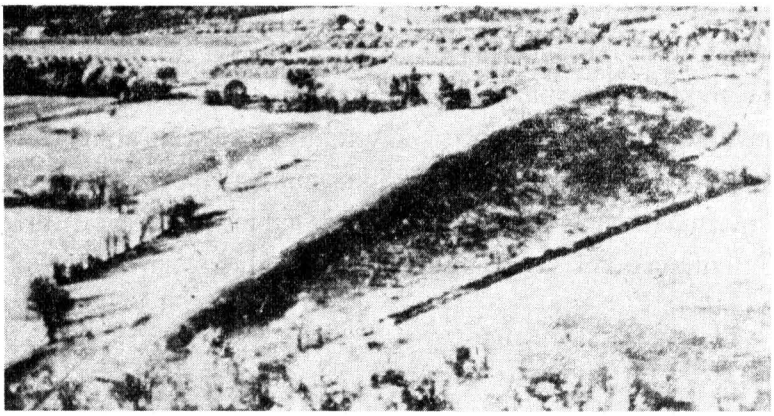
ลำน้ำขนาดใหญ่จะได้น้ำจากอุโมงค์น้ำแข็ง โดยเฉพาะเมื่อน้ำแข็งบริเวณที่ห่างจากขอบเข้าไปหลายๆ ไมล์หยุดอยู่เฉยๆ โดยไม่มีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า อุโมงค์จะพัฒนาขึ้นผ่านแผ่นน้ำแข็ง เพื่อระบายน้ำที่ละลายออกไป หลังจากที่น้ำแข็งละลายไปหมดแล้ว ที่ราบเศษหินธารน้ำแข็งจะคงอยู่เช่นเดิมในสภาพที่มันกำเนิดขึ้นมา แต่อาจจะมีขอบเกิดขึ้นทางด้านที่น้ำแข็งถอยตัวไปโดยมีพื้นลาดชันซึ่งเป็นชั้นของน้ำแข็งที่อยู่ติดที่ราบเศษหินธารน้ำแข็งสร้างขึ้น พื้นลาดนั้นเราเรียกว่า "พื้นลาดสัมผัสน้ำแข็ง" (ice contact slope) ลึกเข้าไปด้านในซึ่งอยู่หลังเศษหินธารน้ำแข็งตอนปลาย เราจะทราบ

ตำแหน่งของอุโมงค์น้ำแข็งที่เกิดขึ้นได้จากแนวสันที่ยาวและคดเคี้ยวซึ่งเรียกว่า "เนินกรวดท้ายธารน้ำแข็ง" (esker) เนินกรวดท้ายธารน้ำแข็งเป็นการทับถมของทราย และก้อนหินซึ่งวางตัวตามแนวอุโมงค์น้ำแข็ง ทันทีที่มีผนังและหลังคาอุโมงค์น้ำแข็งเกิดขึ้น การทับถมของตะกอนใต้ท้องธารก็จะหยุดและวางตัวเป็นสันเกิดขึ้น (ดังรูป 22.15) เนินกรวดท้ายธารน้ำแข็งตามปกติจะยาวมากกว่า 100 ไมล์ (160 กม.) บางแห่งอาจจะมีสาขาแยกไปเช่นเดียวกับลำน้ำ เนื่องจากเนินกรวดท้ายธารน้ำแข็งประกอบด้วยทรายและกรวดที่พรุนมาก น้ำที่ระบายออกจากสันเนินกรวดท้ายธารน้ำแข็งอย่างรวดเร็วทำให้ต้นไม้ขึ้นบนสันนั้นได้ยาก จึงดูเหมือนว่าบริเวณนั้นเป็นที่โล่ง



รูป 22.15 เนินกรวดท้ายธารน้ำแข็งที่มีดินและพืชปกคลุม เนินนี้ประกอบด้วยกรวดหยาบ อยู่ที่เมืองดอดล์ รัฐวิสคอนซิน

ลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งของภูมิประเทศที่เกิดจากธารน้ำแข็งคือ "เนินกรวดจากธารน้ำแข็ง (drumlin) เป็นเนินเขารูปวงรีผิวเรียบดูคล้าย ๆ กับช้อนชาคว่ำ เนินกรวดจากธารน้ำแข็งจะวางตัวอยู่หลายบริเวณ โดยอยู่ด้านหลังของเศษหินธารน้ำแข็งตอนปลายหรือเศษหินธารน้ำแข็งถอยหลัง ตามปกติจะเกิดเป็นกลุ่ม ๆ บางทีอาจมีถึงกลุ่มละหลายร้อยเนิน แกนตามแนวยาวของเนินกรวดลาดธารน้ำแข็ง จะขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็ง และเนินกรวดจากธารน้ำแข็งจะชี้ตรงไปยังเศษหินธารน้ำแข็งตอนปลาย เนินนี้ทำหน้าที่เป็นเครื่องชี้ทิศทางการเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็งได้เป็นอย่างดี จากการศึกษาส่วนประกอบและโครงสร้างของเนินกรวดจากธารน้ำแข็ง จะพบว่าเนินกรวดนี้เกิดขึ้นขณะที่ธารน้ำแข็งกำลังเคลื่อนที่ ซึ่งมีลักษณะคล้ายการไหลของแป้งเหลวเป็นชั้น ๆ บนชั้นของเนินดินเหนียว ซึ่งกระจายไปทั่วเนินกรวดจากธารน้ำแข็ง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อน้ำหนักของน้ำแข็งกระทบลงบนก้อนหิน ซึ่งธารน้ำแข็งทิ้งไว้ก่อนหน้านี้



รูป 22.16 เนินกรวดจากธารน้ำแข็งอยู่ทางตอนใต้ของเมืองโซดูส รัฐนิวยอร์ก แสดงให้เห็นว่าน้ำแข็งเคลื่อนที่จากส่วนบนขวาลงมาด้านล่างซ้าย

ระหว่างเศษหินธารน้ำแข็งตอนปลาย เศษหินธารน้ำแข็งถอยหลังและเศษหินธารน้ำแข็งลอนตอนกลาง พื้นผิวที่น้ำแข็งถอยตัวกลับไปแล้ว จะมีวัตถุที่น้ำแข็งพัดพามาหลงเหลืออยู่เราเรียกว่า "สิ่งตกจมพื้นธารน้ำแข็ง" (ground moraine) เศษหินธารน้ำแข็งชนิดนี้ไม่เป็นที่สนใจของคนมากนัก เพราะเป็นเศษหินธารน้ำแข็งที่ไม่ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศที่น่าสนใจได้ อย่างไรก็ตาม สิ่งตกจมพื้นธารน้ำแข็งอาจหนามาก ซึ่งอาจจะฝังเนินเขา และหุบเขาที่เกิดขึ้นก่อนธารน้ำแข็งจะเคลื่อนตัวมาถึงให้อยู่เบื้องล่างได้ ถ้าเศษหินธารน้ำแข็งแผ่กระจายเป็นผิวเรียบและมีขนาดใหญ่พอเราเรียกที่ราบนั้นว่า "ที่ราบดินคละหินธารน้ำแข็ง" (till plain) ภูมิประเทศแห่งนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพื้นที่เดิมเป็นที่ราบมาก่อน

การทับถมลงในแหล่งน้ำถาวร

ในบริเวณที่พื้นดินลาดลงมาสู่ด้านหน้าของแผ่นน้ำแข็ง แอ่งต่ำตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นระหว่างขอบหน้าของธารน้ำแข็งและผิวดินที่ลาดชันขึ้น หุบเขานั้นอาจจะถูกน้ำแข็งปิดกั้นไว้ จากการกระทำอันนี้จะทำให้เกิด "ทะเลสาบขอบธารน้ำแข็ง" (marginal glacial lakes) ตามแนวขอบของธารน้ำแข็ง (ดูรูป 22.13 ในหน้า 142 บล็อค A ประกอบ) น้ำในทะเลสาบนี้จะไหลไปตามแนวที่ต่ำที่สุด ซึ่งอยู่ระหว่างธารน้ำแข็งกับพื้นดินที่ชันขึ้น หรืออาจจะไหลไปตามพื้นลาดหรือช่องต่ำที่ตัดผ่านสันดิน น้ำแข็งที่ละลายและไหลลงสู่ลำน้ำทะเลสาบที่อยู่ข้าง ๆ จะทำให้เกิด "ดินดอนสามเหลี่ยมธารน้ำแข็ง" (glacial delta) ซึ่งเป็นดินดอนสามเหลี่ยมที่มีลักษณะเหมือนกับดินดอนสามเหลี่ยมที่เกิดจากลำน้ำไหลลงทะเลสาบ โดยทั่ว ๆ ไป เมื่อธารน้ำแข็งถอยตัวไปและน้ำในทะเลสาบไหลไปหมด ท้องทะเลสาบที่โผล่ขึ้นมาจะมีชั้นของอนุภาคดินเหนียวและตะกอนทับถมกันอยู่มาก ชั้นดินที่มีเม็ดละเอียดนี้เกิดจาก

สารแขวนลอยในน้ำขุ่นข้นในทะเลสาบตกตะกอนเราเรียกว่า "ดินตะกอนก้นทะเลสาบจากธารน้ำแข็ง" (glaciolacustrine) ซึ่งจะมีชั้นต่างๆ กัน แต่ละชั้นจะปรากฏให้เห็นเป็นแถบ โดยมีสีทึบสีจางสลับกัน เราเรียกว่า "ชั้น" (varves) ที่ราบก้นทะเลสาบมักแบนราบ และมีลำน้ำโค้งตวัดไหลผ่านและมักเป็นบริเวณที่มีหนองบึงมาก

ดินดอนสามเหลี่ยมจะก่อให้เกิดเนินดินยอดแบน ซึ่งเดิมเคยเป็นพื้นทะเลสาบมาก่อนและเป็นเนินดินที่อยู่โดดเดี่ยวออกไป ลักษณะภูมิประเทศนี้เราเรียกว่า "เนินดินเตี้ยยอดแบน" (delta kame) การทับถมในดินดอนสามเหลี่ยมและร่องน้ำที่อยู่ระหว่างแผ่นน้ำแข็งถาวรและผนังของหุบเขาจะทำให้เกิด "ที่ราบขั้นบันไดไหล่เตี้ย" (kame terrace) ด้านชันของที่ราบขั้นบันไดจะเป็นด้านที่เคยอยู่ติดกับแผ่นน้ำแข็ง ที่ราบขั้นบันไดไหล่เตี้ยนั้นเราจำแนกออกจากที่ราบขั้นบันไดตอนบนที่เกิดจากดินตะกอนได้ยาก แต่ว่าที่ราบขั้นบันไดไหล่เตี้ยจะไม่มีทางน้ำไหล หรือหลุมที่เกิดจากการละลายของน้ำแข็ง เนื่องจากที่ราบขั้นบันไดไหล่เตี้ยเกิดจากเม็ดทรายและกรวด

สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากธารน้ำแข็ง

เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่ของทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือเคยถูกแผ่นน้ำแข็งยุคไพลสโตซีนปกคลุม ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของน้ำแข็ง จึงเป็นสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อกิจกรรมของมนุษย์ ภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งมีอิทธิพลต่อการเกษตรกรรม คือ ทำให้ดินมีทั้งอุดมสมบูรณ์และไม่อุดมสมบูรณ์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศที่จะถูกน้ำแข็งปกคลุม และการกระทำของธารน้ำแข็งว่าพัดพาหรือทับถม ในบริเวณเนินเขาหรือภูเขา เช่น บริเวณเขตนิวอิงแลนด์ วัตถุที่น้ำแข็งพัดพามาส่วนมากจะเป็นก้อนหินกระจายเป็นผิวบางๆ การเพาะปลูกจึงทำได้ลำบาก เพราะก้อนหินใหญ่น้อยนี้จะฝังอยู่ในดินจำนวนนับไม่ถ้วนตามแนวของเศษหินธารน้ำแข็ง ลักษณะภูมิประเทศที่ชันและมีก้อนหินใหญ่น้อยเช่นนี้ จึงไม่เหมาะแก่การเพาะปลูก เนินเขาและทะเลสาบหรือแนวเศษหินธารน้ำแข็งนั้นจะเหมาะมากสำหรับที่จะพัฒนาเป็นย่านที่พักอาศัยชานเมือง

พื้นราบที่เกิดจากวัตถุที่น้ำแข็งพัดพามา ที่ราบเศษหินธารน้ำแข็งและที่ราบก้นทะเลสาบ เป็นบริเวณที่ให้ผลผลิตทางการเกษตรสูงที่สุดในโลก พื้นที่ประเภทนี้ ได้แก่ ทุ่งแพรรีในรัฐอินเดียนา อิลลินอยส์ ไอโอวา เนแบรสกา และมินนิโซตา

สิ่งทับถมท้องน้ำพื้นธารน้ำแข็งเป็นสิ่งที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจอย่างยิ่ง ทรายและกรวดบริเวณที่ราบเศษหินธารน้ำแข็ง เนินเขายอดแบนและเนินกรวดท้ายธารน้ำแข็ง มีวัตถุที่จำเป็นสำหรับการผสมคอนกรีตและงานก่อสร้างอื่นๆ ทรายบริสุทธิ์และดินร่วนใช้ทำแบบพิมพ์โลหะ น้ำใต้ดินจำนวนมหาศาลที่มีอยู่ในท้องน้ำพื้นธารน้ำแข็ง หุบเขาลึกที่เกิดก่อนธารน้ำแข็งจะเคลื่อนตัวมาถึง จะมีวัตถุต่างๆ จำนวนมหาศาลที่ธารน้ำแข็งพัดพามาทับถม เมื่อเจาะลึกลงไปในดินเราก็สามารถสูบน้ำขึ้นมาใช้ได้จากแหล่งน้ำนี้เองที่สนองความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมในรัฐโอไฮโอและรัฐนิวยอร์กได้

คำถามทบทวนบทที่ 22

1. ธารน้ำแข็งคืออะไร มีเงื่อนไขใดบ้างที่จำเป็นต่อการเกิดธารน้ำแข็ง จงนิยามคำว่า อะเบลชัน (ablation) และชั้นหิมะน้ำแข็ง ธารน้ำแข็งภูเขาและธารน้ำแข็งตัวทวีปแตกต่างกันอย่างไร
2. จงอธิบายลักษณะของธารน้ำแข็งภูเขาแบบธรรมดา และอธิบายว่ามันเคลื่อนที่ได้อย่างไร ภาวะสมดุลของธารน้ำแข็งคืออะไร ธารน้ำแข็งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าใด
3. ธารน้ำแข็งกัดกร่อนร่องธารน้ำแข็งได้อย่างไร จงเปรียบเทียบการกัดกร่อนและการพัดพาของธารน้ำแข็งกับลำน้ำ
4. ธารน้ำแข็งภูเขาเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิประเทศได้อย่างไร จงอธิบายลักษณะภูมิประเทศดังต่อไปนี้ เซิร์ก คอดเขา ฮอร์น ร่องธารน้ำแข็ง หุบเขาลอย แอ่งหิน บันไดหิน แอ่งน้ำบนเขา ทะเลสาบนิ้วมือ
5. รูปร่างของร่องธารน้ำแข็งมีลักษณะเช่นใด ร่องนี้มีวิธีการเกิดแตกต่างจากร่องน้ำธรรมดาอย่างไร จงอธิบายการเกิดของฟยอร์ด เราพบฟยอร์ดได้ที่ไหน
6. จงอธิบายการทับถมชนิดต่างๆ ที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็งภูเขา สิ่งต่อไปนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร และเราจะพบได้ที่ไหน มอเรน ตอนกลาง ด้านข้างและตอนปลาย และมอเรนถอยหลัง กระบวนสิ่งที่ทับถมจากการละลายของธารน้ำแข็งคืออะไร
7. แผ่นน้ำแข็งของโลกปัจจุบันมีอยู่ที่ไหนบ้าง แผ่นน้ำแข็งเหล่านี้หนาเท่าไร จงอธิบายว่าแผ่นน้ำแข็งเหล่านี้คงสภาพอยู่ได้อย่างไร และเคลื่อนไหวได้อย่างไร หิ้งน้ำแข็งคืออะไร
8. จงอธิบายถึงการขยายตัวของธารน้ำแข็งในยุคไพลสโตซีนในทวีปอเมริกาเหนือและยุโรป มีหลักฐานอะไรแสดงให้นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าธารน้ำแข็งในยุคไพลสโตซีนขยายตัวไปถึงไหน
9. จงเขียนชื่อยุคน้ำแข็ง และช่วงเวลาระหว่างยุคน้ำแข็งในอเมริกาเหนือ ธารน้ำแข็งยุคสุดท้ายในอเมริกาสลายตัวไปนานเท่าใด
10. จงวิจารณ์ทฤษฎีที่อธิบายการเกิดธารน้ำแข็งของธารน้ำแข็งยุคต่าง ๆ
11. ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกัดกร่อนพื้นผิวของธารน้ำแข็ง ให้หลักฐานแสดงการเกิดธารน้ำแข็งยุคปัจจุบันได้อย่างไร เราทราบทิศทางการเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็งได้อย่างไร
12. เราสามารถทราบทิศทางการเคลื่อนที่ของธารน้ำแข็งจากการกัดกร่อนของธารน้ำได้อย่างไร ทะเลสาบรูปนิ้วมือในอเมริกาเหนือเกิดขึ้นได้อย่างไร
13. แนววัตถุธารน้ำแข็งคืออะไร แนววัตถุที่วางตัวเป็นชั้นแตกต่างจากดินหินคละธารน้ำแข็งอย่างไร
14. จงอธิบายการทับถมที่เกิดเกี่ยวเนื่องกับขอบของแผ่นน้ำแข็ง
15. แผ่นน้ำแข็งจะทำให้เกิดมอเรนชนิดใดบ้าง ที่ราบเศษหินธารน้ำแข็งคืออะไร จงอธิบายลักษณะภูมิประเทศพื้นผิวของที่ราบเศษหินธารน้ำแข็ง
16. เนินกรวดท้ายธารน้ำแข็งเกิดขึ้นได้อย่างไร เนินกรวดนี้ยาวเท่าใด เนินกรวดนี้ประกอบด้วยวัตถุใดบ้าง

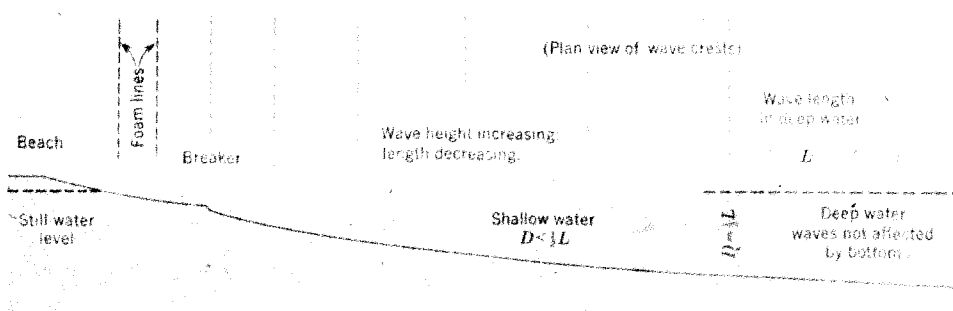
17. เนินกรวดจากธารน้ำแข็งคืออะไร เนินกรวดนี้ประกอบไปด้วยวัตถุใดบ้าง เนินกรวดจากธารน้ำแข็งที่เกิดเกี่ยวเนื่องกับมอเรนตอนปลายมีพบที่ไหนมากที่สุด
18. ที่ราบดินคละหินธารน้ำแข็งคืออะไร มันเกิดขึ้นได้อย่างไร
19. จงอธิบายว่าทะเลสาบของธารน้ำแข็งเกิดขึ้นได้อย่างไร มีการตกตะกอนชนิดใดบ้างที่พบในทะเลสาบนั้น เนินดินเตี้ยยอดแบนคืออะไร ที่ราบขั้นบันไดไหล่เตี้ยคืออะไร ชั้นคืออะไร
20. จงอภิปรายลักษณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติของภูมิประเทศที่เกิดจากธารน้ำแข็ง

บทที่ 23

ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ

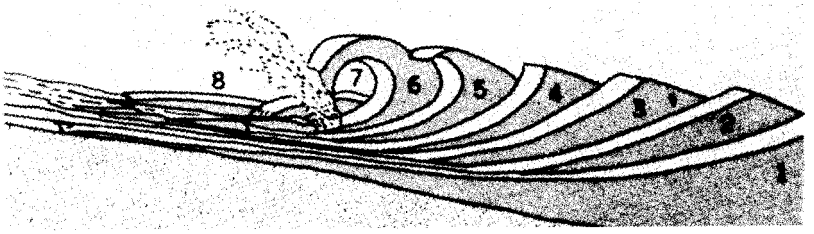
การกระทำของคลื่นในมหาสมุทร จะทำให้ชายฝั่งของทวีปและเกาะเปลี่ยนรูปไป คลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านทะเลลึกนั้นจะสูญเสียพลังงานไปน้อยมาก แต่เมื่อไปถึงบริเวณน้ำตื้น รูปร่างของคลื่นจะเปลี่ยนไปมาก และลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำจะวิวัฒนาการขึ้นใหม่ การเคลื่อนที่นี้จะอยู่ในรูปของระลอกคลื่นและกระแสน้ำที่มีกำลังมหาศาลที่สามารถกัดกร่อนและพัดพาวัตถุได้อย่างมาก

ชายฝั่งส่วนใหญ่จะราบเรียบ ลาดเทลงไปสู่ก้นทะเลจนอยู่ใต้ระดับน้ำทะเล ในขณะที่คลื่นเคลื่อนตัวมาถึงบริเวณน้ำตื้นนี้ ความเร็วของคลื่นจะลดลงและสันคลื่นจะบีบตัวแคบเข้า (ดูรูป 23.1) ความสูงและความชันของคลื่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งสันคลื่นม้วนตัวเป็นคลื่นหัวแตก



รูป 23.1 เมื่อคลื่นเคลื่อนเข้าสู่เขตน้ำตื้น รูปร่างจะเปลี่ยนไปจนกระทั่งแตกตัว

(breaker) (ดูรูป 23.2) หลังจากคลื่นหัวแตกสลายตัวลง น้ำที่เป็นฟองและเชี่ยวจนจะซัดกระเซ็นขึ้นไปบนชายหาด น้ำที่ซัดลง (swash) หรือซัดขึ้น (uprush) เป็นระลอกคลื่นที่มีกำลังมากทำให้เม็ดทรายและก้อนกรวดเคลื่อนที่ไปบนหาดทราย เมื่อกำลังของระลอกคลื่นนั้นหมดลง เพราะปะทะกับชายหาด น้ำก็จะไหลกลับ (backwash) ลงสู่ทะเล แต่ส่วนมากน้ำจะซึมลงชั้นทรายที่มีรูพรุน เม็ดทรายและก้อนกรวดจะถูกน้ำที่ไหลกลับกวาดกลับมาด้วย



รูป 23.2 คลื่นหัวแตก

การกัดกร่อนพัดพาโดยคลื่น

ในช่วงเวลาที่ลมสงบหรือลมพัดปานกลาง การกัดกร่อนของคลื่นจะเกิดขึ้นได้น้อย แต่จะทำให้มีชายหาดเนินทรายและก้อนกรวดเกิดขึ้น ในช่วงเวลาที่มีพายุ เมื่อมีคลื่นหัวแตกขนาดมหึมาและหอบน้ำนับตันพัดปะทะกับชายฝั่ง การกัดกร่อนพัดพาจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว การที่คลื่นวิ่งปะทะฝั่งจะหอบเอาก้อนกรวดก้อนหินกระทบกับหินฐานชายฝั่งที่โผล่ออกมา ทำให้ก้อนหินเหล่านั้นแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก้อนหินเล็ก ๆ เหล่านี้จะกระทบและเสียดสีกับชายฝั่งต่อไป ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ก้อนหินอยู่รวมกันตามขนาด หินที่มีขนาดเล็กและละเอียดจะถูกพัดพาลงสู่ทะเลและไปหยุดอยู่กับที่ ณ บริเวณทะเลลึกซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำหยุดนิ่ง ทำให้ดินตะกอนและอนุภาคดินเหนียววางตัวเป็นชั้น ๆ ทรายและก้อนหินจะอยู่ใกล้กับชายฝั่ง ซึ่งทำให้เกิดหาดทรายและสันดอน

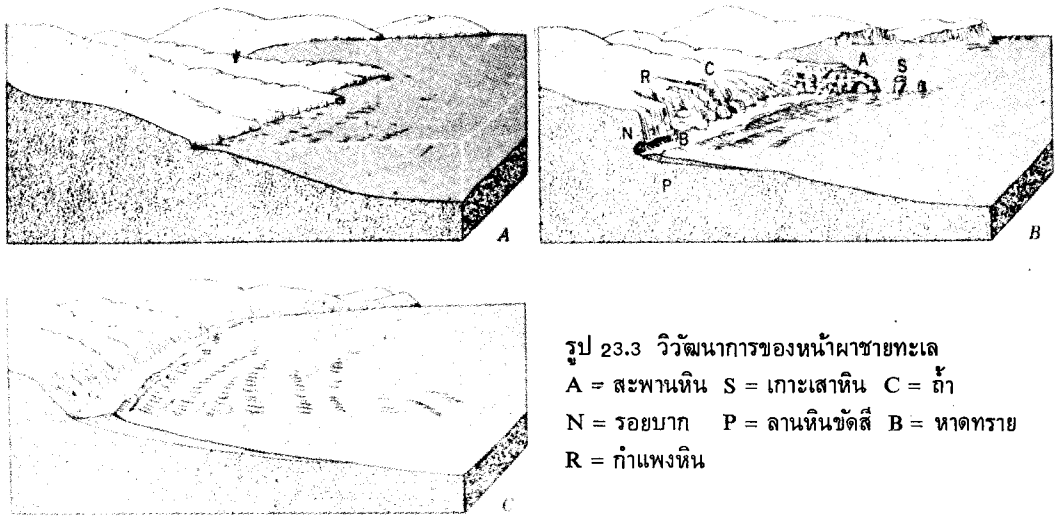
แม้ว่าหาดทรายจะประกอบด้วยหินแข็ง การกัดกร่อนก็จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และพายุที่พัดกระหน่ำชายฝั่งเป็นปี ๆ จะทำให้สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งได้อย่างช้า ๆ ในบริเวณชายฝั่งที่เป็นวัตถุอ่อน เช่น เศษหินธารน้ำแข็งหรือที่ราบเศษหินธารน้ำแข็ง การกัดกร่อนจะเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว พลังงานจากน้ำเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอที่จะกัดกร่อนวัตถุทับถมนั้นได้ และพายุสามารถทำให้หน้าผาชายทะเลถอยตัวได้หลายฟุต

วิวัฒนาการของหน้าผาชายทะเล

บริเวณที่เหมาะสมที่จะเกิดหน้าผาชายทะเลนั้นเป็นบริเวณที่พื้นดินลาดชันมาก ๆ พุ่งลงสู่ใต้ระดับน้ำทะเล เงื่อนไขที่จะเกิดสภาวะการดังกล่าวได้อาจเกิดจากการที่พื้นดินทรุดต่ำลงหรือไม่ก็ระดับน้ำทะเลยกตัวขึ้นสู่แนวชายฝั่งลาดชันของเนินเขาหรือภูเขา

จากรูปที่ 23.3 ในหน้า 152 แสดงให้เห็นวิวัฒนาการของหน้าผาชายทะเล บล็อค A แสดงให้เห็นขั้นเริ่มต้นของวิวัฒนาการ ซึ่งเรียกว่า "ขั้นถากถาง' (nip stage) ซึ่งคลื่นจะกระทบหินฐานชายฝั่งให้เป็นกระพุ้งเข้าไป ณ บริเวณฐานของหน้าผาจะมีแท่นหินลาดลงสู่ทะเลและวางตัวอยู่ใต้ระดับน้ำ

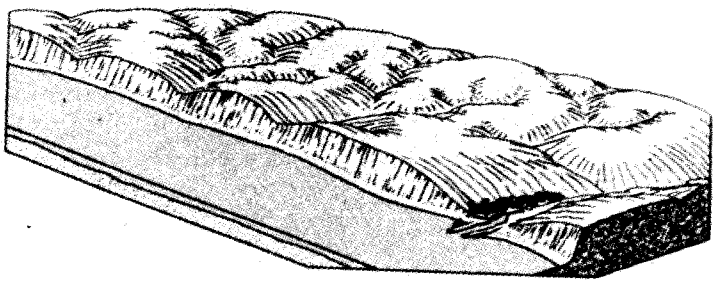
ทะเล หินที่แตกสลายและถูกคลื่นกวาดลงสู่ทะเล เนื่องจากกำลังของคลื่นมีมากจึงทำให้ก้อนกรวดและทรายไม่สามารถคงอยู่ที่ชายหาดได้



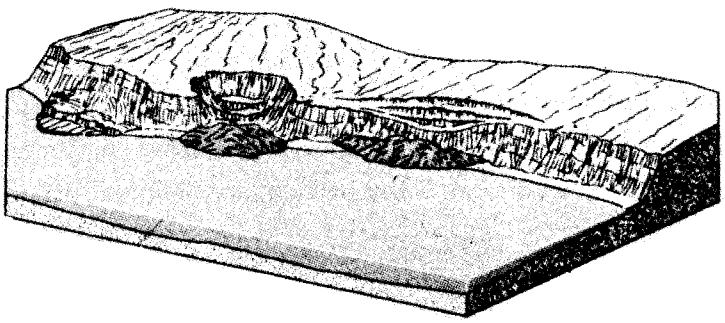
รูป 23.3 วิวัฒนาการของหน้าผาชายทะเล
A = สะพานหิน S = เกาะเสาหิน C = ถ้ำ
N = รอยบาก P = ลานหินขัดสี B = หาดทราย
R = กำแพงหิน

บล็อค B แสดงให้เห็นวิวัฒนาการของหน้าผาที่มีความสูงมากขึ้น ขณะที่หน้าผาถูกกัดลึกเข้าไป ความลาดของพื้นดินจะทำให้หน้าผาสูงยิ่งขึ้น คลื่นจะกัดกร่อนลึกเข้าไปในเนื้อหินที่อ่อนกว่าหินที่อยู่โดยรอบ ทำให้เกิดกำแพงหิน (crevice) และโพรงหินชายฝั่ง (sea cave) ส่วนบริเวณที่เป็นหินแข็งก็จะยื่นลงสู่ทะเล ขณะที่คลื่นโถมเข้าสู่ชายฝั่งนั้นอาจทำให้เกิด "สะพานหินธรรมชาติ" (sea arches) ส่วนคลื่นที่ปะทะฝั่งแล้วไหลกลับ จะทำให้เกิด "เกาะเสาหิน" (stacks) ในขั้นนี้แนวหน้าผาจะสมบูรณ์แบบมากที่สุด อย่างไรก็ตาม หน้าผานั้นก็ยังคงถูกกัดกร่อนต่อไป โดยคลื่นจะกระทบเข้าไปใน "รอยบาก" (notch) ที่อยู่ ณ ฐานของหน้าผา ลานหินเชิงผาที่เอียงลาดลงสู่ทะเลนั้น เราเรียกว่า "ลานหินขัดสี" (abrasion platform) ซึ่งตอนนี้จะกว้างมากยิ่งขึ้น ตอนในของลานหินจะมีน้ำท่วมอยู่เฉพาะช่วงที่น้ำขึ้นสูง หรือช่วงที่มีพายุ หาดทรายหรือหาดที่มีก้อนกรวดนั้นอาจเกิดขึ้นได้แต่ก็อาจจะเปลี่ยนไปหรือสลายตัวไประหว่างที่มีพายุพัดกระหน่ำเพียงครั้งเดียว และการจะเกิดขึ้นได้ใหม่นั้นก็เป็นไปได้ช้าเต็มที

ลำน้ำเดิมที่เคยไหลลงทะเลมาก่อน โดยไหลมาตามหุบเขาซึ่งมีปากหุบเขาอยู่ ณ ระดับน้ำทะเลพอดีนั้น ต่อมาลำน้ำนั้นอาจจะสั้นลงและทำให้เกิด "หุบเขาลอย" (hanging valley) ซึ่งลำน้ำไม่สามารถจะกัดหุบเขาให้ลึกลงไปได้เร็วเท่ากับการกระทำของคลื่นที่ทำให้เกิดหน้าผา ถ้าหินที่อยู่บริเวณหน้าผาเป็นหินที่ไม่คงทน คลื่นอาจทำให้หินจำนวนมหึมาทรุดต่ำ (slump) หรือเลื่อนไหลลงจากหน้าผาได้ (ดูรูป 23.5 ในหน้า 153)



รูป 23.4 เมื่อหน้าผาชายฝั่งถูกกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว หุบเขาลอยจะเปลี่ยนเป็นรอยบากฝังอยู่บนหน้าผา ลำน้ำทางด้านขวายังคงสภาพอยู่ได้ และไหลลงทะเลโดยมีระดับน้ำต่างกันอยู่บ้าง และทำให้เกิดอ่าวเล็ก ๆ



รูป 23.5 แผ่นดินถล่มบริเวณชายฝั่ง เมื่อชั้นหินชั้นซึ่งอ่อนและหักลงไป เพราะหน้าผาถูกคลื่นเซาะลึกเข้าไป

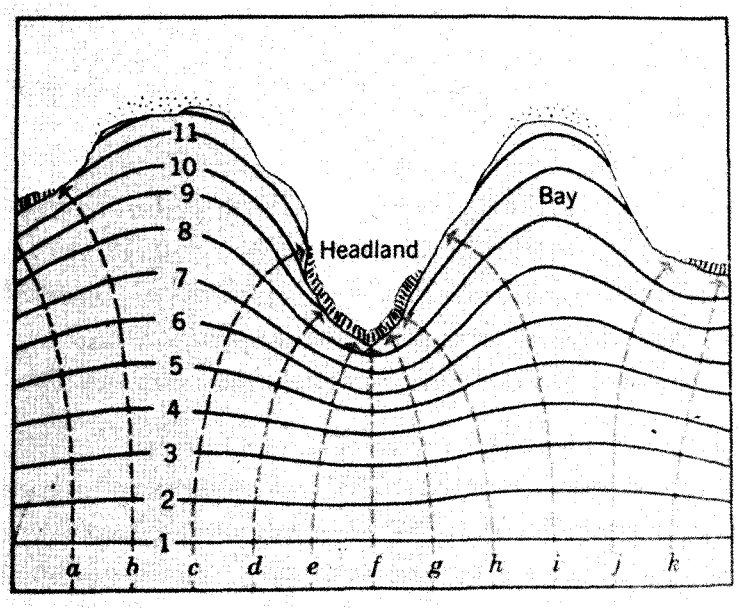
ขั้นตอนปลายในวิวัฒนาการของหน้าผาชายทะเล ดังปรากฏในบล็อค B เราเรียกว่า "ขั้นปลาย" (mature stage) ลานหินขัดสีจะกว้างมาก ทำให้คลื่นที่โถมเข้าสู่ชายฝั่งมีน้อยลง เพราะกำลังคลื่นที่โถมมาบนแท่นหินจะเคลื่อนที่ช้าลงเนื่องจากแรงฝืด คลื่นนี้จึงพัดพาเอาทรายมาทับถมอยู่บริเวณชายหาด ขณะเดียวกันคลื่นที่เคยซัดเข้าสู่ฐานของหน้าผาก็จะมีน้อยลงมากด้วย กระบวนการผุกร่อนและการชะของฝนจะมีมากทางหน้าผาด้านที่หันลงสู่ด้านต่ำ ลักษณะอื่น ๆ เช่น โพรงหินชายฝั่ง และกำแพงหินจะสลายตัวไป ตอนนี้ชายหาดจะกว้างและลึกโดยมีหินฐานโผล่ให้เห็นน้อยมาก

อิทธิพลของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อหน้าผาชายฝั่งนั้นมีหลายทางด้วยกัน ทำให้การเดินทางไปสู่ทะเลเป็นไปไม่ได้เนื่องจากความสูงของหน้าผา ในแง่การทหารก็มีความสำคัญมาก เพราะการยกพลขึ้นบกทำได้ลำบาก และการรุกคืบหน้าเข้าไปก็ทำได้ยากถ้าหน้าผาขนานกับชายฝั่ง และถ้าร่องน้ำเป็นแบบหุบเขาลอย หนทางที่จะไปถึงชายหาดก็ยิ่งยากขึ้นไปอีก ตามแนวชายฝั่งที่ค่อนข้างตรงซึ่งจะเป็นท่าเรือธรรมชาติได้จะอยู่บริเวณปากแม่น้ำขนาดใหญ่ที่กัดกร่อนชายฝั่งลงสู่ระดับน้ำทะเลเท่านั้น ลักษณะเช่นนี้เราจะพบเห็นได้มากตามชายฝั่งของฝรั่งเศส

ชายหาดที่มีหน้าผาสูงขวางกั้นอยู่นี้ เป็นสิ่งจำกัดคุณค่าของชายหาดเพื่อตากอากาศในฤดูร้อน ทั้งนี้เพราะการจะเดินทางไปสู่ชายหาดนั้นเป็นไปไม่สะดวก และหาดทรายบริเวณนั้นอาจจะแคบและเต็มไปด้วยก้อนหิน ในขณะที่น้ำขึ้นสูงบางทีน้ำอาจท่วมแท่นหินขัดสีไปจนถึงฐานเชิงผา ทำให้ชายหาดบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่มีอันตรายมาก เพราะถ้ามีคลื่นขนาดใหญ่โถมเข้าสู่หน้าผา ผู้ที่เล่นน้ำอยู่อาจกระแทกกับหน้าผาถึงอันตรายได้

การหันเหของคลื่น

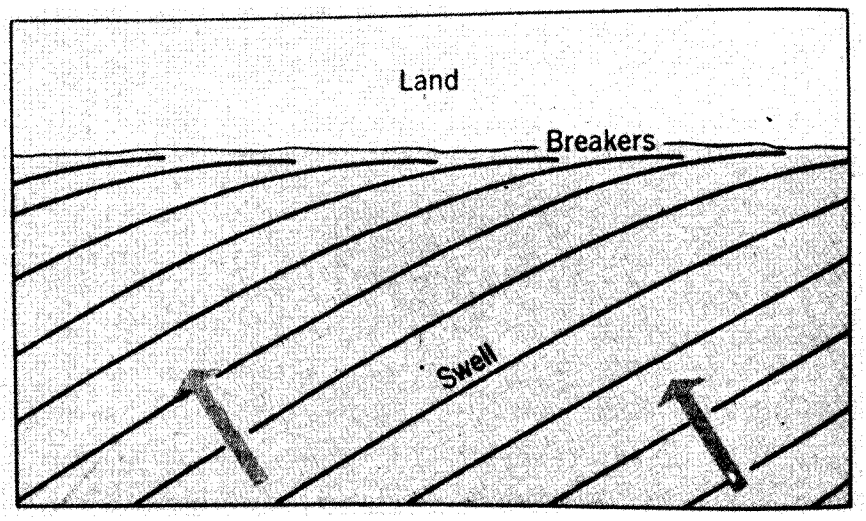
ปรากฏการณ์การเปลี่ยนทิศทางหรือการหักเหของแนวคลื่น ขณะที่คลื่นวิ่งเข้าปะทะชายฝั่ง เราเรียกว่า "การหันเหของคลื่น" (wave refraction) จากรูป 23.6 แสดงให้เห็นถึงลักษณะชายฝั่งที่มีอ่าวและแหลม (promontory) ตำแหน่งที่แท้จริงของคลื่นนั้นแสดงด้วยเลข 1 2 3 ฯลฯ ในบริเวณน้ำลึกแนวของคลื่นจะขนานกันไป ขณะที่คลื่นใกล้ชายฝั่งเข้ามา บริเวณน้ำตื้นที่คลื่นจะปะทะก่อนก็ได้แก่บริเวณโดยรอบแหลม น้ำที่ตื้นลงนี้จะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นลดลง แต่ว่าในบริเวณน้ำลึกที่อยู่ในอ่าว ปฏิกิริยาจากแรงผืดจะยังไม่เกิดขึ้น ขณะเดียวกันนี้แนวของคลื่นจะหันเห เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของชายฝั่ง ถ้าชายฝั่งประกอบด้วยชายหาดโค้งกว้างคลื่นจะขาดเป็นตอน ๆ ตลอดแนวชายฝั่งในเวลาพร้อม ๆ กัน แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวมักไม่ค่อยปรากฏ เพราะคลื่นจะขาดออกจากกันเสียก่อน เมื่อเคลื่อนที่มาปะทะแหลมและจะเคลื่อนต่อไปในอ่าว ดังแสดงให้เห็นในรูป 23.6



รูป 23.6 การหักเหของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในอ่าว

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งในการเข้าใจวิวัฒนาการในบริเวณชายฝั่งที่เป็นอ่าวก็คือ การกระจายของพลังงานคลื่นตลอดแนวชายฝั่ง จากรูปที่ 23.6 เส้นประ (อักษร a b c d ฯลฯ) เป็นเส้นแบ่งคลื่น ณ ตำแหน่งเลข 1 ออกเป็นส่วน ๆ เท่า ๆ กัน ซึ่งเราอาจประมาณได้ว่ามีพลังงานเท่ากัน ตลอดชายฝั่งของแหลมพลังงานจะไปรวมกันบริเวณชายฝั่งสั้น ๆ แต่ตามแนวชายฝั่งของอ่าวพลังงานจะกระจายออกไปตามชายฝั่งที่ยาวกว่า จึงทำให้คลื่นที่แตกออกจากกันกัดกร่อนบริเวณแหลมที่ยื่นออกมาได้เร็วกว่า แต่การกัดกร่อนในอ่าวจะเกิดได้น้อยกว่า ซึ่งผลที่เกิดขึ้นก็คือแหลมที่ยื่นออกมาจะถูกกัดกร่อนลึกเข้าไป ทำให้ชายฝั่งนั้นโค้งกว้างขึ้นและจะคงรูปอยู่เช่นนั้น

การหันเหของคลื่นจะเกิดขึ้น ขณะที่คลื่นวิ่งเข้าปะทะชายฝั่งตรงในลักษณะมุมเฉียง (ดูรูป 23.7) คลื่นนั้นจะหันเหและขาดออกเป็นตอน ๆ แล้ววางตัวเกือบขนานกับชายฝั่ง เราจะศึกษารูปแบบการหันเหของคลื่นได้จากภาพถ่ายทางอากาศ และรายละเอียดทั้งหลายเราจะได้จากก้นทะเลบริเวณใกล้เคียงกับชายหาด

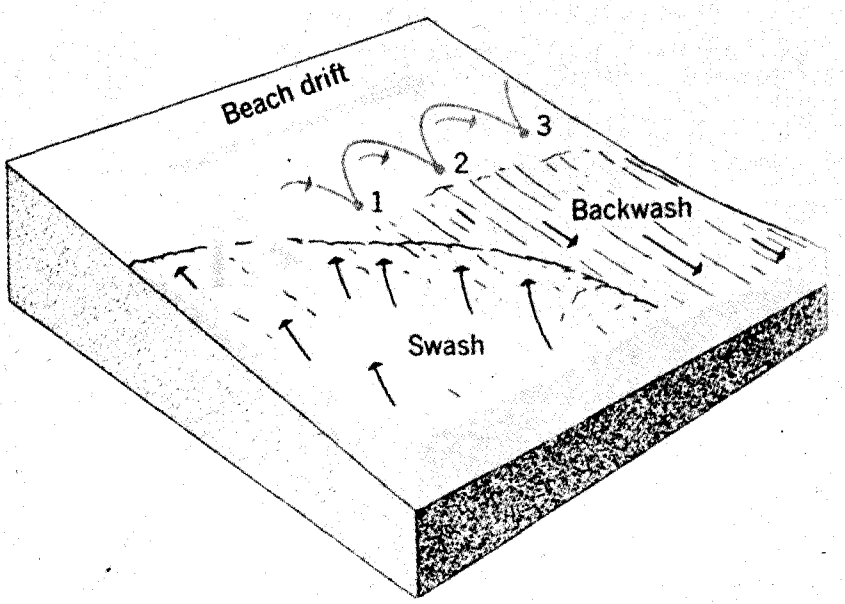


รูป 23.7 การหักเหของคลื่นบนชายฝั่งตรง

การพัดพาเลียบชายฝั่ง

คลื่นหัวแตกที่พัดพาเอาวัตถุเข้าสู่ชายหาดและกวาดออกไปจากชายหาดสลับกันไปมาอยู่ตลอดเวลานั้น ไม่เพียงแต่จะทำให้วัตถุถูกพัดเข้ามาสู่ชายหาดและกวาดออกไปเท่านั้น แต่ยังทำให้วัตถุเคลื่อนไปตามด้านข้างของชายหาดด้วย เราเรียกปรากฏการณ์นั้นว่า การพัดพาตามชายหาด (beach drifting) (ดูรูป 23.8 ในหน้า 156) ตามปกติแนวคลื่นจะวิ่งเข้าปะทะฝั่งเป็นมุมเฉียงมากกว่าเป็นมุมตรง วัตถุที่น้ำซัดเข้าสู่ฝั่งจึงวิ่งเข้าเป็นมุมเฉียง และทราย ก้อนกรวด ก้อนหิน ก็จะเคลื่อนที่ไปบนชายหาดที่ลาดชันเป็นมุมเฉียง หลังจากที่น้ำหมดพลังคลื่นแล้ว น้ำก็จะไหลกลับมาตามพื้น

ลาดของชายหาดตามแรงดึงดูดของโลกในทุก ๆ ทิศทาง ดังนั้น อนุภาคของวัตถุบางส่วนจะถูกกวาดกลับลงสู่ทะเลมาหยุดอยู่ ณ ตำแหน่งที่มันถูกกวาดขึ้นไป ในรอบหนึ่งวันนั้นแนวคลื่นจะพัดในทิศทางเดิมได้หลาย ๆ ครั้ง ในวันหนึ่งหินก้อนหนึ่ง ๆ จึงเคลื่อนที่ไปตามชายหาดได้เป็นระยะทางมากพอดูเมื่อหลาย ๆ วันเข้าวัตถุต่าง ๆ ก็มาสะสมกันอยู่บริเวณชายหาดนับจำนวนไม่ถ้วน กระบวนการขนย้ายวัตถุเช่นนี้เป็นกระบวนการสำคัญในการวิวัฒนาการของชายหาด

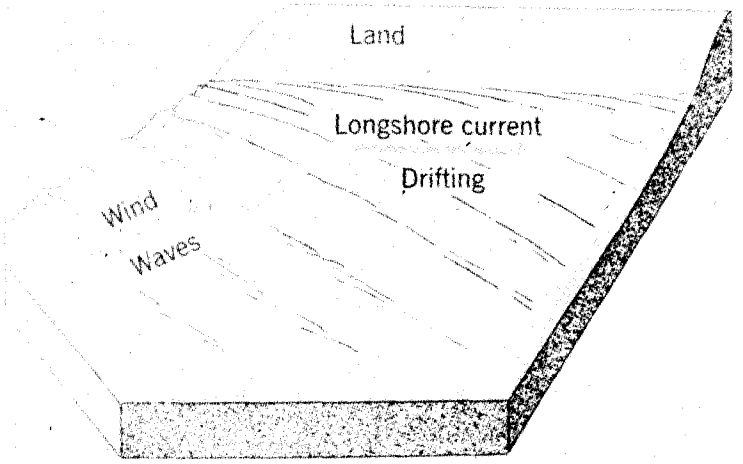


รูป 23.8 น้ำซัดและน้ำไหลกลับ

อย่างไรก็ตาม คำว่า "หาดทราย" (beach) นั้นเป็นภาษาธรรมดาที่ใช้กันโดยทั่วไป ณ ที่นี้เรานิยามคำ "หาดทราย" ว่าเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของทราย ก้อนกรวด ก้อนหินมาทับถมกันอยู่ใกล้ฝั่งในบริเวณที่มีคลื่นหัวแตกจากการที่คลื่นพัดเข้าหาฝั่ง และไหลกลับออกไป ถ้าคลื่นหอบเอาทรายมาทับถมบริเวณหนึ่งได้มากกว่าที่จะถูกกวาดออกไป หาดทรายจะกว้างขึ้นและทำให้มีชายฝั่งมากขึ้น เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การสร้างเสริมชายหาด" (progradation) ถ้าอนุภาคของทรายถูกกวาดออกไปมากกว่าที่จะนำมาทับถม ทำให้ชายหาดแคบลง และชายฝั่งจะเคลื่อนเข้าสู่ตัวแผ่นดินเราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การกัดกร่อนชายหาด" (retrogradation)

กระบวนการที่สัมพันธ์กับการพัดพาตามชายหาดก็คือ การพัดพาตามชายฝั่ง (longshore drifting) เมื่อคลื่นซัดชายฝั่งจากการกระทำของลมที่พัดแรง ๆ ระดับน้ำจะสูงขึ้นไปใกล้ชายฝั่งโดยกระแสน้ำจะไหลไปตามชายฝั่ง กระแสน้ำตามชายฝั่งจะไหลขนานไปกับชายฝั่งในทิศทางซึ่งหักเหไปจากทิศ

ทางลม (ดูรูป 23.9) เมื่อสภาวะของลมและคลื่นเหมาะสม กระแสน้ำนี้สามารถพัดพาทรายจากพื้นทะเลไปในทิศทางขนานกับชายฝั่งได้



รูป 23.9 กระแสน้ำพัดตามชายฝั่ง

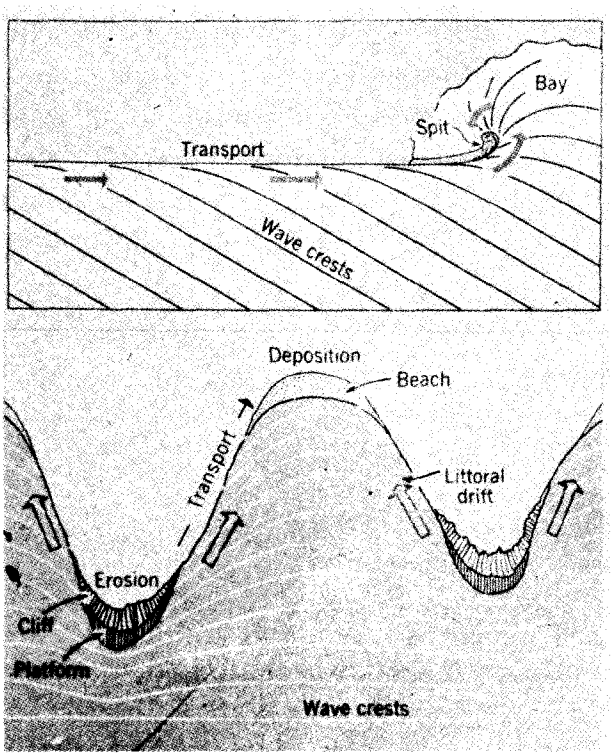
ทั้งการพัดพาตามชายหาด และการพัดพาตามชายฝั่งนั้นเป็นการพัดพาไปในทิศทางเดียวกัน โดยการกระทำของลมชนิดเดียวกัน ซึ่งแนวคลื่นพัดเป็นมุมเฉียงกับชายหาดและการพัดพาแต่ละชนิดต่างก็อาศัยซึ่งกันและกัน ปรากฏการณ์ทั้งสองอย่างเราเรียกรวมกันว่า "การพัดพาเลียบชายฝั่ง" (littoral drift)

สันดอน สันดอนจะงอย และชายหาดขนาดเล็ก

ในบริเวณที่มีการขัดสีหน้าผาชายทะเลต่อเนื่องกันทำให้มีทรายเกิดขึ้นจำนวนมาก หรือบริเวณดินดอนสามเหลี่ยม ซึ่งได้รับทรายจากแม่น้ำ ทรายนี้จะเคลื่อนที่เลียบไปตามชายฝั่งห่างจากแหล่งกำเนิดไปอยู่ ณ บริเวณที่มีคลื่นน้อยอันเป็นบริเวณที่อยู่ในที่กำบัง

ในกรณีที่เป็นชายฝั่งก้นอ่าว (ดูรูป 23.10 ในหน้า 158) การพัดพาเลียบชายฝั่งจะพัดพาตะกอนจากหน้าผาเลียบชายฝั่งไปสู่ก้นอ่าว ณ บริเวณนี้ตะกอนจะมาตกทับถมกันเป็น "ชายหาดขนาดเล็ก" (pocket beach) ชายหาดขนาดเล็กที่เกิดจากก้อนกรวด ก้อนหิน เราเรียกว่า "หาดกรวด" (shingle beaches)

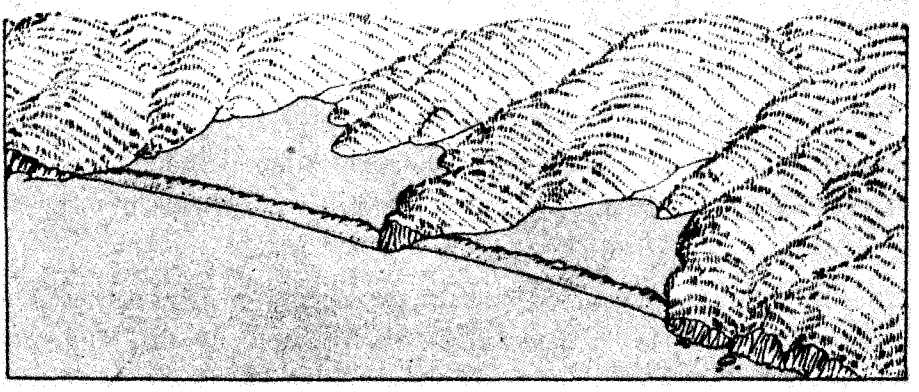
ในกรณีที่เป็นชายฝั่งตรงและมีอ่าวลึกเว้าเข้าไป (ดังรูป 23.10) การพัดพาตามชายฝั่งจะทำให้ชายฝั่งขยายตัวเป็นแนวตรงไม่มากก็น้อย และสันทรายจะพุ่งตรงไปสู่แหล่งน้ำเปิดในอ่าว ทำให้เกิดสันดอนจะงอย (sand spit) ตามปกติสันดอนจะงอยจะโค้งงอเข้าหาพื้นดิน เราเรียกตรงนั้นว่า "จะงอยโค้ง" (recurved spits) ตอนปลายของสันดอนจะงอยจะขยายตัวออกไปในด้านตรงข้ามกันและจะฟอร์มตัวเป็นสันทรายหรือสันทรายปากอ่าวยาวต่อเนื่องกันไป ทำให้อ่าวตัดขาดออกจากแหล่งน้ำในทะเลเปิด (ดูรูป 23.11 ในหน้า 158)



บน ภาพแสดงลักษณะภูมิประเทศตอนสิ้นสุดภายในอ่าว

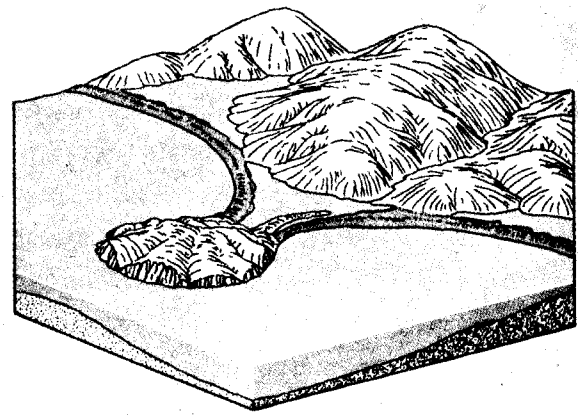
ล่าง แนวของชายฝั่งกันอ่าว

รูป 23.10 กระแสน้ำเลียบชายฝั่งที่เป็นแนวตรงและมีกันอ่าว (ล่าง) และชายฝั่งที่เป็นอ่าว (บน)

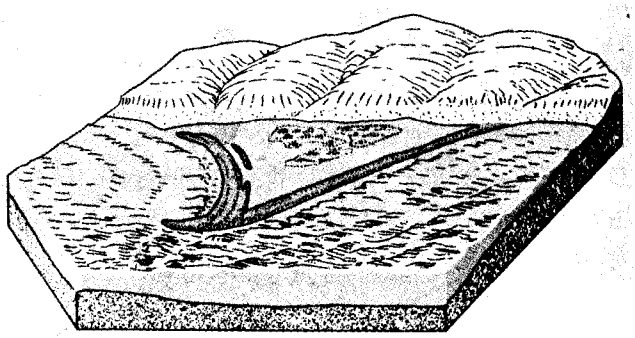


รูป 23.11 สันดอนปากอ่าว ปิดปากอ่าวสองอ่าว

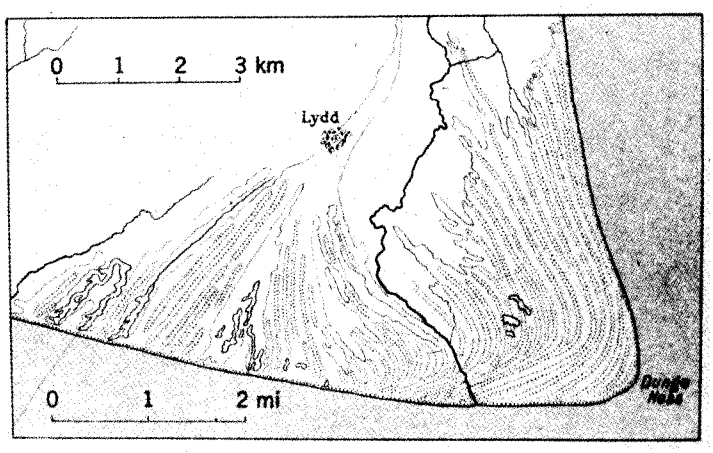
การพัดพาเลียบชายฝั่งออกจากเกาะ ตามปกติจะทำให้เกิด"สันดอนเชื่อมเกาะ" (tombolo) ซึ่งเป็นสันทรายที่เชื่อมเกาะกับแผ่นดินใหญ่ (ดูรูป 23.12) การพัดพาของทราย ไปตามชายฝั่งในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เกิดสันทรายปลายแหลม (cuspate bar ดูรูป 23.13) การทับถมบริเวณนั้นถ้ามีต่อไปทำให้เกิดหาดทรายซ้อน ๆ กันเป็นแถบ ทำให้เกิดแผ่นดินปลายแหลมยื่นลงทะเล (cuspate foreland ดูรูป 23.14)



รูป 23.12 สันดอนเชื่อมเกาะสองแนว เชื่อมเกาะกับแผ่นดินใหญ่



รูป 23.13 สันทรายปลายแหลม (cuspate bar) ยื่นลงทะเลสาบน้ำเค็ม ที่เป็นเช่นนี้เพราะได้รับตะกอนจากทะเลทั้งสองด้าน

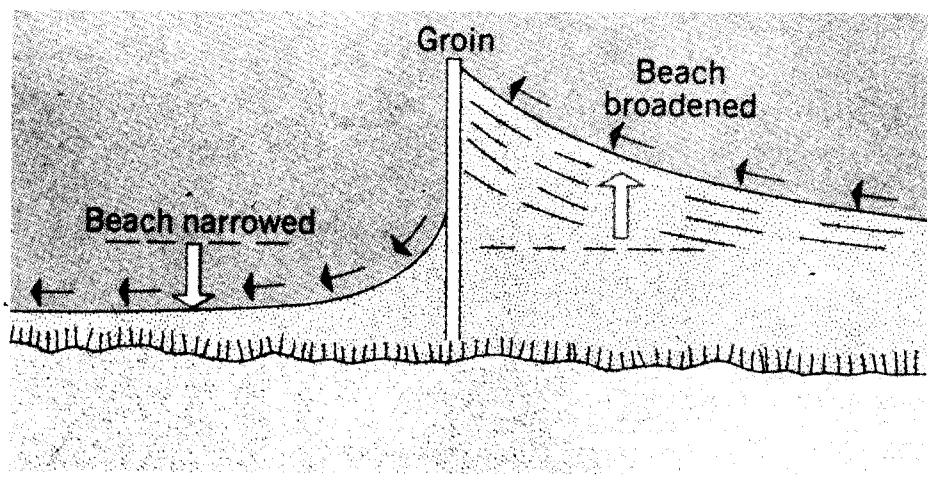


รูป 23.14 แผ่นดินปลายแหลม ดังกีเนสส์บริเวณช่องแคบโดเวอร์ ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ เป็นสันดอนปลายแหลม พร้อมกับสันหาดทรายรูปโค้ง

การพัดพาเลียบชายฝั่งและการป้องกันชายฝั่ง

ผลของการกัดกร่อนชายหาดจะทำให้ชายฝั่งที่ขยายตัวออกจากวัตถุที่น้ำพัดพามาตกตะกอนโดยการพัดพาเลียบชายฝั่งซึ่งทำให้เม็ดทรายถูกพัดพาไปมากกว่าที่จะทับถม ชายหาดจะแคบลงอย่างรวดเร็วหรืออาจถูกทำลายไปในที่สุด เมื่อปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้น การกัดกร่อนทำให้เกิดผาชันชายทะเลได้อย่างรวดเร็วในบริเวณที่เป็นวัตถุอ่อน ซึ่งเป็นการทำลายชายฝั่งไปในอัตราเดียวกัน การป้องกันโดยใช้การก่อสร้างเชิงวิศวกรรม เช่น การสร้างกำแพงนั้นออกแบบเพื่อป้องกันการกระทบของแนวคลื่นโดยตรง ซึ่งกำแพงนั้นนอกจากจะแพงแล้วยังอาจพังได้ง่ายอีกด้วย วิธีการที่จะใช้แทนการสร้างกำแพงได้อย่างดีก็คือ สร้างสิ่งที่ก่อให้เกิดกระบวนการสร้างเสริมชายหาด ซึ่งช่วยป้องกันชายหาดได้อย่างกว้างขวาง หลักการก็มีอยู่ว่าพลังจากคลื่นที่มีมากเกินไปจะเป็นตัวทำลายการทับถมสร้างเสริมชายหาด การกัดกร่อนลึกเข้าไปในชายหาดในการเกิดพายุครั้งหนึ่งนั้นต้องได้รับการสร้างเสริมในช่วงเวลาระหว่างการเกิดพายุแต่ละครั้ง

กระบวนการสร้างเสริมชายหาดนั้น ต้องทำให้วัตถุที่ถูกพัดพาเลียบชายฝั่งตกตะกอนโดยการทำกะบัง (baffles) กั้นทางเดินของการพัดพาเลียบชายฝั่ง เพื่อให้ได้ผลดังกล่าวจึงมีการติดตั้ง "รอ" (groin) ตามชายหาดเป็นช่วง ๆ ไป รอเป็นกำแพงที่สร้างอย่างง่าย ๆ หรือเป็นเขื่อนดินที่สร้างยื่นลงไปในทะเลและให้ตั้งฉากกับชายฝั่ง รออาจจะสร้างด้วยก้อนหินขนาดใหญ่จำนวนมาก สร้างด้วยคอนกรีต หรือสร้างด้วยเข็มไม้ตอกลึกลงไปในท้องทะเล รูปที่ 23.15 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งที่เกิดจากการสร้างรอ ทรายจะมาทับถมด้านหน้ารอที่ปะทะทางเดินของวัตถุพัดพาเลียบชายฝั่งทำให้เกิดชายฝั่งโค้งเว้า ส่วนด้านหลังรอ ชายหาดจะแคบลงเนื่องจากทรายที่จะพัดพาทับถมมีน้อยลงกว่าปกติ ผลที่ได้อาจทำให้มีการกัดกร่อนชายหาด และกัดลึกเข้าไปจนเป็นหน้าผา จากเหตุผลนี้ รอที่



รูป 23.15 การสร้างรอทำให้รูปร่างของชายหาดเปลี่ยนไป

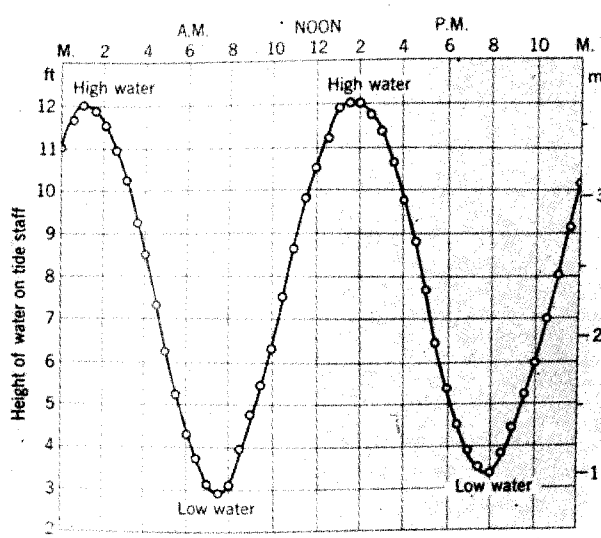
สร้างขึ้นจึงต้องมีช่วงถี่ที่จะทำให้รออันหนึ่งสร้างเสริมชายหาดจนไปถึงรออีกอันหนึ่ง ซึ่งในที่สุดชายหาดก็จะได้รับการสร้างเสริมจนมีขนาดเท่ากับชายหาดเดิม อย่างไรก็ตาม อาจมีสาเหตุหลายประการที่จะทำลายกระบวนการสร้างเสริมชายหาดที่เกิดจากรอ โดยเฉพาะด้านหน้ารออันแรกที่ไม่มีการสร้างสิ่งใดป้องกัน

ในบางกรณีต้นกำเนิดของทรายชายหาดนั้นมาจากปากแม่น้ำ การสร้างเขื่อนในลำน้ำจะทำให้วัตถุที่ถูกพัดพามาทับถมมีน้อยลง และยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นการลดต้นกำเนิดของทรายที่จะถูกพัดพาเลียบชายฝั่งอีกด้วย ต่อมากระบวนการกัดกร่อนชายหาดก็จะเกิดขึ้นตลอดแนวชายฝั่ง ชายฝั่งทะเลเมดิเตอร์เรเนียนบริเวณดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำไนล์ มีลักษณะเป็นการกัดกร่อนชายหาดเพราะตะกอนมีปริมาณลดลงเนื่องจากมีการสร้างเขื่อนกั้นแม่น้ำไนล์

กระแสน้ำขึ้น–น้ำลง

ชายฝั่งทะเลส่วนมากมักจะมีการเกิดน้ำขึ้น–น้ำลง หรือการขึ้นลงของระดับน้ำทะเลอย่างต่อเนื่องกัน ทั้งนี้เพราะอยู่ภายใต้การควบคุมของแรงดึงดูดของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อโลกขณะที่หมุนรอบตัวเอง ผลของการเปลี่ยนระดับน้ำและกระแสน้ำที่เคลื่อนไหวเป็นปัจจัยสำคัญต่อรูปร่างลักษณะของภูมิประเทศชายฝั่ง

เมื่อเราไม่พิจารณาถึงสาเหตุของน้ำขึ้นน้ำลงและความแปรปรวนอื่น ๆ ก็ยังมีกฎสำคัญบางประการจากปฏิกิริยาของน้ำขึ้นน้ำลงบางสิ่งที่เราควรเข้าใจ โดยให้พิจารณาจากกราฟน้ำขึ้น–น้ำลงชนิดธรรมดา ซึ่งเป็นวัฏจักรของการขึ้น–ลง กึ่งรอบวัน (semidaily) ซึ่งจะห่างกันโดยประมาณ $12\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ถ้าเราสังเกตระดับน้ำจากไม้ระดับทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง เราสามารถนำค่าการเปลี่ยนแปลงระดับมาทำเป็นกราฟได้ จากรูปที่ 23.16 เป็นกราฟแสดงน้ำขึ้น–น้ำลงในบริเวณอ่าวบอสตันตลอดวัน



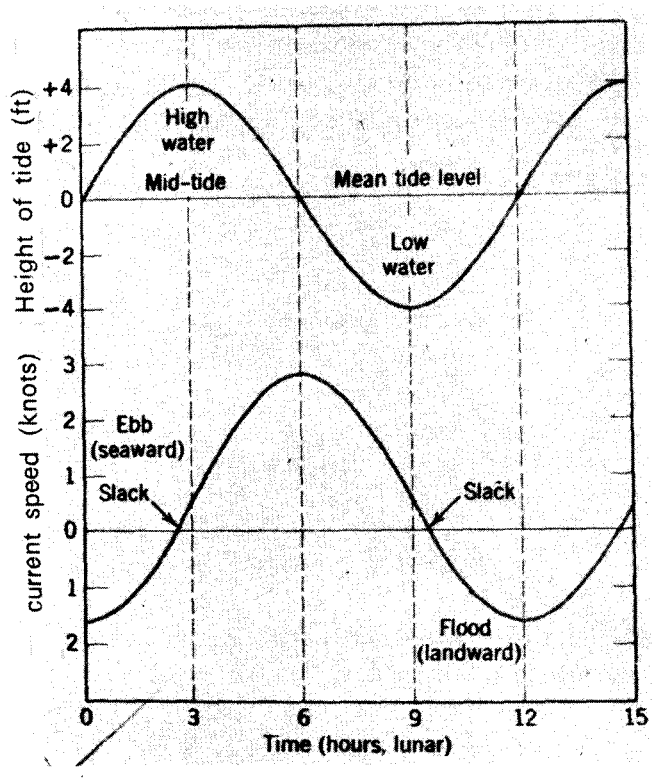
รูป 23.16 ระดับความสูงของน้ำในอ่าวบอสตันที่ทำการวัดทุก ๆ ครึ่งชั่วโมง

น้ำขึ้นสูงสุดในระดับ 12 ฟุต (3.7 ม.) แล้วลดลงถึงระดับต่ำสุดในช่วงเวลา $6\frac{1}{4}$ ชั่วโมงถัดมา น้ำขึ้นสูงสุดครั้งที่สองจะปรากฏหลังจากน้ำขึ้นสูงสุดครั้งแรกในเวลา $12\frac{1}{2}$ ชั่วโมงถัดมา ซึ่งครบรอบวัฏจักรของน้ำขึ้นน้ำลงกึ่งรอบวัน

ความต่างระดับ (range of tide) ระหว่างน้ำขึ้นสูงสุดและลงต่ำสุดประมาณ 9 ฟุต (2.7 ม.) ดังตัวอย่างในรูปที่ 23.16 ความแตกต่างระดับของน้ำขึ้นน้ำลงและรูปร่างของเส้นกราฟน้ำขึ้น–น้ำลงจะแปรเปลี่ยนไปตลอดเดือนตาราคติ ช่วงที่น้ำขึ้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยนั้นจะมีเดือนละสองครั้ง ซึ่งเราเรียกว่า"น้ำเกิด"(spring tides) ช่วงหนึ่งสัปดาห์หลังจากนั้นน้ำจะลดลงต่ำกว่าค่าเฉลี่ยซึ่งเรียกว่า"น้ำตาย" (neap tide)

ความสำคัญของน้ำขึ้นน้ำลงตามแนวชายฝั่งก็คือ จะทำให้เกิดกระแสน้ำจากการเปลี่ยนระดับของน้ำ และจากข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อน้ำขึ้นสูง คลื่นที่ขาดตอนจะพัดพาวัตถุเข้าสู่ชายฝั่งได้ในระดับสูง ขณะที่ช่วงน้ำลงคลื่นจะกระทำต่อชายฝั่งได้เพียงตื้นฝั่งเท่านั้น

ขณะที่น้ำขึ้นจะทำให้มีกระแสน้ำเคลื่อนไหวในอ่าวและปากแม่น้ำลึก เราเรียกว่า กระแสน้ำขึ้น–น้ำลง (tidal current) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระแสน้ำขึ้น–น้ำลง และเส้นกราฟน้ำขึ้น–น้ำลง ดังแสดงในรูปที่ 23.17 เมื่อน้ำขึ้นสูงสุดเริ่มลดระดับลง กระแสน้ำลง (ebb tide)



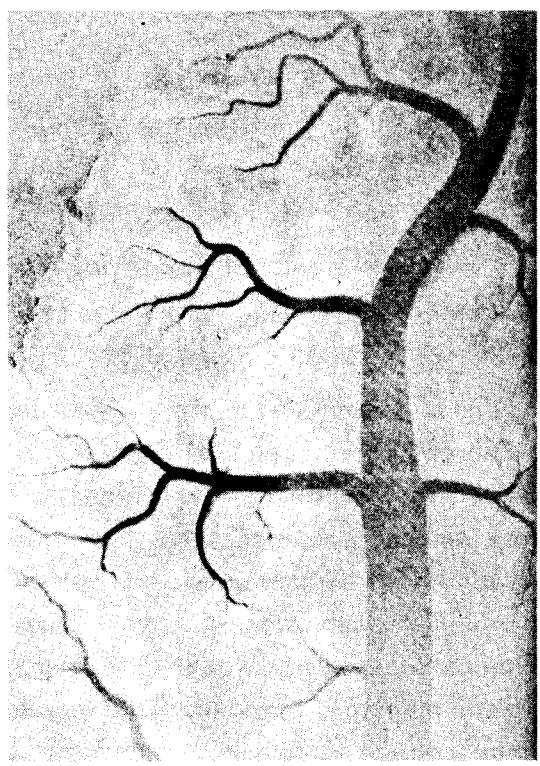
รูป 23.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของกระแสน้ำขึ้น–ลง และเส้นแสดงการขึ้นลงของกระแสน้ำ

จะเริ่มขึ้นและจะมีความเร็วสูงสุดประมาณช่วงกลางน้ำลง (midtide) การไหลจะยุติลงเมื่อน้ำลงถึงจุดต่ำสุด สภาวะเช่นนี้เราเรียกว่า "น้ำนิ่ง" (slack water) ขณะที่น้ำเริ่มจะขึ้น กระแสน้ำเริ่มพัดเข้าสู่ฝั่ง กระแสน้ำขึ้น (flood current) จะเริ่มไหลและมีความเร็วสูงสุดประมาณช่วงตอนกลางน้ำขึ้น ให้สังเกตว่ากระแสน้ำลงจะแรงมากกว่ากระแสน้ำขึ้น สภาวะนี้เราอธิบายได้จากข้อเท็จจริงที่ว่าแม่น้ำจะมีน้ำไหลจากแผ่นดินออกสู่ทะเลอยู่ก่อนแล้ว น้ำจืดนี้จะช่วยดันกระแสน้ำลงแต่จะต้านกระแสน้ำขึ้น

การตกตะกอนจากกระแสน้ำขึ้น–น้ำลง

กระแสน้ำลงและกระแสน้ำขึ้น จะทำให้เกิดปรากฏการณ์สำคัญบางประการตลอดแนวชายฝั่ง ประการแรก กระแสน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจากอ่าวโดยผ่านช่องแคบ ๆ นั้น น้ำจะไหลเชี่ยวและสามารถเสียดสีกับปากอ่าวอย่างรุนแรง ทำให้ปากอ่าวเปิดกว้างขึ้น แม้ว่าตามแนวชายฝั่งจะมีกระแสน้ำพัดพาทรายเคลื่อนที่เลียบชายฝั่งก็ตาม ประการที่สอง กระแสน้ำขึ้นน้ำลง จะพัดพาอนุภาคตะกอนที่เล็กละเอียดและอนุภาคดินเหนียวที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งตะกอนเหล่านี้เกิดจากการกัดเซาะหน้าผาชายทะเลจากลำน้ำที่ไหลลงสู่อ่าว หรือโคลนจากก้นอ่าวที่เกิดจากพายุคลื่น ตะกอนอันละเอียดอ่อนเหล่านี้จะเกาะกันเป็นก้อนเล็ก ๆ (flocculation) ในบริเวณที่น้ำจืดผสมกับน้ำเค็ม ในที่สุดตะกอนเหล่านั้นก็จะตกลงสู่ก้นอ่าวและปากน้ำเป็นชั้น ๆ จนเต็มอ่าวในที่สุด อินทรียสารทั้งหลายจะฝังอยู่ในตะกอนนั้นด้วย

ในช่วงที่ตะกอนจากน้ำขึ้นน้ำลง ตกลงสู่ก้นอ่าวจะทำให้เกิดลานโคลน (mud flats) ลานโคลนนี้จะปรากฏให้เห็นในช่วงน้ำลงและน้ำจะท่วมปิดมิดในช่วงน้ำขึ้น (ดูรูป 23.18) ต่อมาในบริเวณลานโคลนเหล่านี้จะมีพืชที่ขึ้นในน้ำเค็มได้เจริญเติบโตขึ้น (เช่นพืชตระกูล spartina) ลำต้นของพืชจะช่วยให้ตะกอนตกได้มากขึ้นในช่วงน้ำขึ้น จนในที่สุดลานโคลนนี้จะมีระดับสูงเกือบเท่ากับระดับน้ำขึ้น บริเวณนั้นจึงกลายเป็นบึงน้ำเค็ม (salt marsh) กระแสน้ำขึ้นน้ำลงยังคง



รูป 23.18 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงที่ราบดินโคลนจากน้ำลงใกล้กับยาร์เมาท์ โนวาสโกเชีย แสดงระบบโครงข่ายลำน้ำของลำธารน้ำขึ้น–ลง ซึ่งพื้นที่ในภาพมีบริเวณกว้าง 1.5 ไมล์

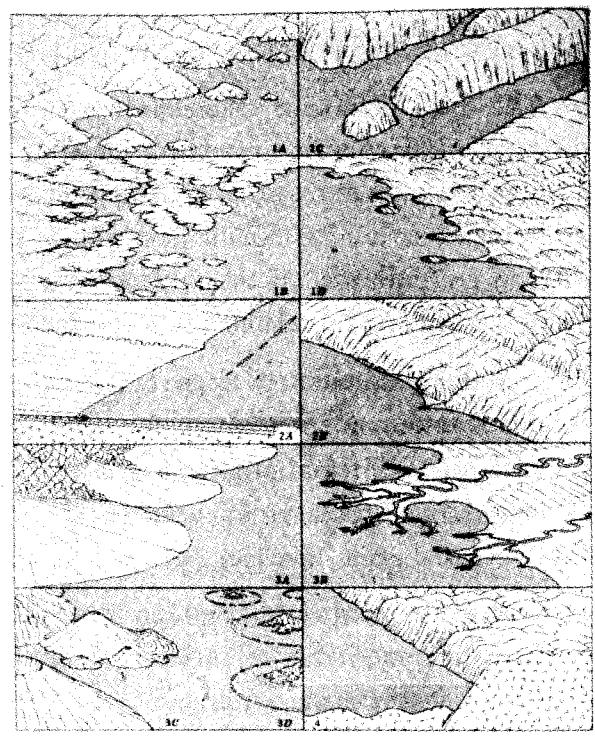
ไหลผ่านบึงน้ำเค็มนี้อยู่ทำให้เกิดโครงข่ายลำน้ำจากน้ำขึ้นน้ำลง (tidal stream) ที่สลับซับซ้อนเพราะจะมีน้ำไหลเข้าสู่แผ่นดินสลับกับไหลลงสู่ทะเล

รูป 23.19 บึงน้ำขึ้นน้ำลงกว้างใหญ่ บริเวณชายฝั่งตะวันออกของฟลอริดามีลำน้ำคดเคี้ยวเหมือนงูเลื้อย

บึงน้ำเค็มเป็นพื้นที่ที่นักภูมิศาสตร์สนใจมาก เพราะเป็นพื้นดินที่เราสามารถระบายน้ำออกได้ และเปลี่ยนเป็นพื้นที่เพื่อการเกษตรกรรม ตอนแรกต้องกั้นพื้นที่บึงน้ำเค็มจากทะเล โดยการสร้างเขื่อนดินที่มีประตูระบายน้ำจืดออกได้ในช่วงที่เกิดภาวะน้ำท่วม ซึ่งน้ำเค็มที่หลงเหลืออยู่จะถูกละลายไปด้วย ทำให้ดินในบึงน้ำเค็มค่อย ๆ จืดลง พื้นดินหลังเขื่อนนี้มีการพัฒนากันมากในประเทศเนเธอร์แลนด์ที่เรียกว่า โปลเดอร์ (polders) และตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ ในหลายทศวรรษผ่านไป พื้นดินของบึงน้ำเค็มที่ได้รับการปรับปรุงนี้จะทรุดตัวลง เนื่องจากชั้นซากพืชเบื้องล่างอัดตัวกันแน่นขึ้น และอาจมีระดับต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางก็ได้ น้ำเค็มที่ไหลบ่าเข้ามาเมื่อเกิดพายุคลื่นเป็นสิ่งที่น่ากลัวมาก เพราะจะเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ตั้งถิ่นฐานอยู่หลังเขื่อน ในยุคการขยายตัวของอุตสาหกรรม การขยายตัวเข้าไปในบึงน้ำเค็มทำได้โดยการถมดิน ซึ่งมักจะถูกขัดขวางจากกฎหมายยุคใหม่

การจำแนกชายฝั่ง

เนื่องจากชายฝั่งมีลักษณะแตกต่างกันหลายแบบ จึงจำเป็นต้องจำแนกเป็นกลุ่ม ๆ ตามลักษณะการกำเนิดและวิวัฒนาการ ซึ่งจะแบ่งชายฝั่งชนิดสำคัญ ๆ ออกเป็น 5 ชนิด ดังนี้ คือ



รูป 23.20 การจำแนกชายฝั่ง (1) ชายฝั่งยุบจมลง 1A ชายฝั่งที่ภูเขายุบจมตัว 1B ชายฝั่งจากที่ราบชายฝั่งยุบจมตัวลง 1C ชายฝั่งฟยอร์ด 1D ชายฝั่งที่มีเนินดินจากธารน้ำแข็งจมตัวลง (2) ชายฝั่งโผล่เหนือน้ำ 2A ชายฝั่งราบต่ำยกตัวขึ้น 2B ชายฝั่งลาดชันมากยกตัวขึ้น (3) ชายฝั่งปานกลาง 3A ชายฝั่งดินตะกอนน้ำพา 3B ชายฝั่งดินดอนสามเหลี่ยม 3C ชายฝั่งภูเขาไฟ 3D ชายฝั่งปะการัง (4) ชายฝั่งรอยเลื่อน

1. ชายฝั่งยุบจมลง (shoreline of submergence) ในบริเวณที่ขอบของพื้นดินทรุดตัวลงหรือระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ชายฝั่งใหม่จะเกิดขึ้นโดยมีตำแหน่งประมาณความสูงของแผ่นดินเดิมใต้ระดับนี้ลงไปซึ่งเดิมเป็นพื้นที่สัมผัสกับอากาศ ตอนนี้จะจมอยู่ใต้ระดับน้ำทะเล เราจึงเรียกชายฝั่งประเภทนี้ว่า "ชายฝั่งยุบจมลง"

เราสามารถแบ่งชายฝั่งน้ำท่วมออกเป็นกลุ่มย่อย ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศที่เกิดขึ้นก่อนจะจมอยู่ใต้น้ำ ในบริเวณที่พื้นดินถูกลำน้ำกัดลึกลงไปเป็นระบบของหุบเขาและสันเขา การจมตัวจะทำให้เกิดชายฝั่งขรุขระเป็นชายฝั่งที่มีอ่าวมาก เรียกว่า "ชายฝั่งรีอา" (ria shoreline) หุบเขาที่เกิดขึ้นก่อนจะกลายเป็นอ่าวแคบลึก เนินเขาเดิมจะกลายเป็นเกาะ สันเขาเดิมที่อยู่ระหว่างหุบเขาจะกลายเป็นแหลมหรือคาบสมุทร ชนิดต่าง ๆ ของชายฝั่งรีอานั้น ขึ้นอยู่กับลำดับขั้นของการกัดกร่อนและระดับความสูงของภูมิประเทศก่อนที่จมตัว ลักษณะที่พอจะเป็นไปได้ คือ (1) บริเวณที่เป็นภูเขา (ดูรูป 23.20 1 A) (2) ที่ราบชายฝั่งที่มีระดับต่ำมาก (1 B)

ชายฝั่งบางแห่งถูกกัดกร่อนไปมากโดยธารน้ำแข็งในหุบเขา ทำให้เกิดร่องน้ำใต้ระดับน้ำทะเล หลังจากที่ธารน้ำแข็งสลายตัวไปจะทำให้เกิดชายฝั่งฟยอร์ด (fiord shoreline – รูป 1C) ชายฝั่งชนิดนี้มีลักษณะเดิมอยู่คือ ชายฝั่งของฟยอร์ดจะชันมาก มีน้ำลึกมากและเป็นร่องที่ลึกเข้าไปในพื้นดินเป็นระยะไกล

ชนิดย่อยอีกชนิดหนึ่งของชายฝั่งยุบจมลง เป็นผลมาจากการจมตัวของลักษณะภูมิประเทศที่เคยมีธารน้ำแข็งภาคพื้นทวีปปกคลุมมาก่อน (รูป 1 D)

2. ชายฝั่งโผล่เหนือน้ำ (shoreline of emergence) ในบริเวณที่แผ่นดินยกตัวใกล้ ๆ กับขอบของทวีปหรือเป็นบริเวณที่ระดับน้ำทะเลลดต่ำลง ทำให้เกิดชายฝั่งโผล่เหนือน้ำขึ้น ระดับน้ำจะอยู่ในตำแหน่งความลาดของบริเวณที่เป็นลาดพื้นทะเลมาก่อน เหนือแนวชายฝั่งขึ้นไปจะมีลักษณะภูมิประเทศฝั่งทะเลใหม่เกิดขึ้นเป็นแนวฝั่งทะเลที่โผล่ขึ้นมาจากใต้ทะเล ในการถอยตัวของน้ำทำให้เกิดแผ่นน้ำแข็งบนพื้นทวีป เป็นสาเหตุให้ระดับน้ำทะเลลดต่ำลง ลักษณะชายฝั่งโผล่เหนือน้ำจึงเกิดขึ้นมากในช่วงที่โลกมีธารน้ำแข็งปกคลุมมากที่สุดในยุคไพลสโตซีน

พื้นทะเลส่วนมากเคยจมตัวมาแล้วในช่วงธรณีวิทยากาลอันยาวนาน ทำให้บริเวณขอบของตัวทวีปมีวัตถุมาทับถมเป็นชั้น ๆ ได้แก่ โคลน ทราย และก้อนกรวดซึ่งได้มาจากการกัดกร่อนพัดพามาจากพื้นดิน และกระจายไปตามกระแสน้ำในมหาสมุทร เมื่อไหล่ทวีปโผล่ขึ้นมาจากการยกตัวทำให้เกิดที่ราบต่ำชายฝั่งเรียบและลาดน้อย ๆ ลงสู่ทะเล เราเรียกชายฝั่งประเภทนี้ว่า "ที่ราบชายฝั่งทะเล" (coastal plain shoreline) (รูป 2A)

ตามแนวชายฝั่งบางแห่ง ลักษณะภูมิประเทศใต้สมุทรจะมีความลาดชันมาก เมื่อยกตัวสูงขึ้นแนวชายฝั่งจึงแตกต่างไปจากที่ราบชายฝั่งทะเลตรงที่ว่าบริเวณน้ำลึกจะอยู่ติดกับชายฝั่ง และภูเขาจะอยู่ไม่ลึกจากชายทะเลเข้าไปมากนัก (รูป 2 B) ลักษณะชายฝั่งกลุ่มย่อยนี้ยังไม่มีชื่อง่าย ๆ ที่เหมาะสมใช้เรียก แต่เราอาจจะเรียกว่า "ชายฝั่งโผล่เหนือน้ำลาดชัน" (steeply sloping shoreline of emergence) หน้าผาเก่าที่เกิดจากการกัดกร่อนของคลื่นจะเป็นชั้น ๆ และมีหลายระดับแสดงว่าการยกตัวนั้นเกิดเป็นช่วง ๆ

3. ชายฝั่งปานกลาง (neutral shoreline) ในบริเวณชายฝั่งที่เกิดจากวัตถุใหม่ที่ทับถมอยู่ในน้ำเราเรียกว่าชายฝั่งปานกลาง คำว่า "ปานกลาง" (neutral) นั้นหมายถึงว่าไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ระหว่างระดับน้ำทะเลและบริเวณชายฝั่งของทวีป

ชายฝั่งปานกลางที่เรารู้จักมีหลายชนิด แต่ละชนิดเราสามารถเข้าใจได้ง่าย ๆ เมื่อดูถึงตัวการที่มีผลต่อการสร้างสมวัตถุลงไปในน้ำ (รูป 3A, 3B, 3C, 3D) ชายฝั่งดินตะกอนรูปพัด (alluvial fan shoreline) เป็นชายฝั่งที่มีขอบโค้ง ซึ่งเกิดจากลำน้ำเกลียวเชือกสร้างเนินดินตะกอนรูปพัดขึ้น ลักษณะชายฝั่งที่คล้าย ๆ กันนี้ได้แก่ ชายฝั่งที่เกิดจากการกระทำของธารน้ำแข็ง ซึ่งทำให้เกิดที่ราบเศษหินธารน้ำแข็ง ขอบของธารน้ำแข็งจะอยู่ใกล้ชายฝั่ง ชายฝั่งดินดอนสามเหลี่ยม (delta shoreline) เป็นชายฝั่งที่เกิดจากวัตถุที่ระบบลำน้ำพัดพามา ในบริเวณที่มีการระเบิดของภูเขาไฟ ความลาดของ

ภูเขาไฟหรือขอบของธารลาวา (lava flow) อาจเป็นส่วนประกอบของชายฝั่งทะเลด้วย เราจึงเรียกชายฝั่งประเภทนี้ว่าชายฝั่งภูเขาไฟ (volcano shoreline) ชายฝั่งแนวหินปะการัง (coral-reef shoreline) เกิดจากอินทรียสารในทะเลน้ำตื้นในเขตร้อน

4. ชายฝั่งรอยเลื่อน (fault shoreline) เป็นชายฝั่งเกิดจากการเลื่อนตัวของเปลือกโลก ด้านทรุดต่ำของรอยเลื่อนเป็นด้านหันออกทะเล ส่วนด้านที่อยู่ทางพื้นดินยังคงความสูงเหมือนเดิม ถ้าด้านต่ำทรุดลงจนต่ำกว่าระดับน้ำทะเล ชายฝั่งทะเลจะเกิดขึ้นตรงบริเวณที่ติดกับด้านลาดชันของพื้นดินซึ่งเป็นระนาบของแนวเลื่อน เราเรียกชายฝั่งนี้ว่า "ชายฝั่งรอยเลื่อน" ชายฝั่งลักษณะนี้อาจเกิดได้จากพื้นทะเลยกตัวขึ้นมาจากใต้ทะเล

5. ชายฝั่งแบบผสม (compound shoreline) เป็นชายฝั่งที่มีชายฝั่งดังที่ได้อธิบายมาแล้วตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปอยู่รวมกัน

ชีวประวัติของชายฝั่งยุบจมลง

ชายฝั่งยุบจมลงชนิดชายฝั่งรีอาจะผ่านลำดับขั้นของวิวัฒนาการดังได้แสดงในรูปที่ 23.21 ในขั้นกำเนิด การจมตัวเพิ่งจะเกิดขึ้น ทำให้ชายฝั่งเปลี่ยนไป ชายฝั่งจะมีอ่าวลึกพร้อมกับมีแหลมหรือคาบสมุทรยาว มีเกาะมากมายวางตัวเรียงรายอยู่รอบชายฝั่ง

ในขั้นเริ่มแรกตอนต้น คลื่นจะซัดเข้าสู่แผ่นดินที่ยื่นออกมาและรอบ ๆ เกาะด้านที่หันลงสู่ทะเลลึก การหันเหของคลื่นจะทำให้เกิดแรงกระทบชายฝั่งนี้มากที่สุด หน้าผาที่เกิดจากการกัดเซาะของคลื่นจะเกิดขึ้นเหมือนกับภูมิประเทศอื่น ๆ เช่น โพรงหินชายทะเล เกาะเสาหินและสะพานธรรมชาติ คาบสมุทรที่มีหน้าผาเราเรียกว่า "หัวแหลมผาชัน" (cliffed headland) แท่นหินชัดสีจะวิวัฒนาการบริเวณฐานของหน้าผาและชายหาดจะแคบหรือไม่มีเลย

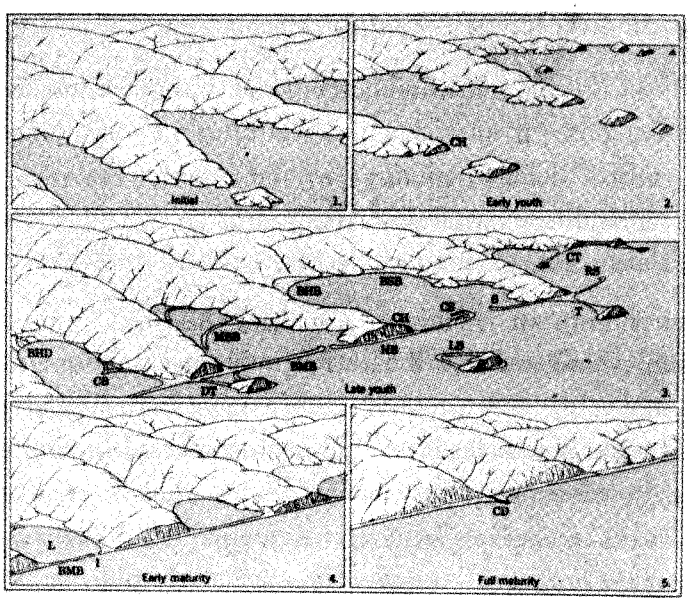
ในขั้นเริ่มแรกตอนปลาย หน้าผาจะมีความสูงเพิ่มขึ้นและมีการกัดกร่อนพอที่จะสังเกตเห็นได้ การซัดเซาะของคลื่นจะทำให้เกาะเล็ก ๆ บางเกาะมียอดแบนและเกาะใหญ่ ๆ อาจมีพื้นที่ลดลง ในขั้นนี้จะไม่มีการทับถมเป็นปริมาณมาก จะมีก็แต่การทับถมของทรายที่เกิดจากกระบวนการพัดพาตามชายหาดและชายฝั่ง และทำให้เกิดภูมิประเทศตามลำดับขั้น (sequential landform) ซึ่งเกิดจากวัตถุที่พังทลายจากการที่คลื่นซัดเซาะหน้าผา

ทางด้านหน้าของหัวแหลมผาชันเป็นหาดทรายหัวแหลม (headland beaches) จากหาดทรายหัวแหลมนี้เป็นแหล่งของทรายที่จะถูกพัดพาข้ามปากอ่าวไปสร้างเป็นสันดอนจะงอยที่ขยายตัวยื่นลงไปในทะเลลึก สันดอนจะงอยนี้จะโค้งกลับเข้าหาแผ่นดิน และถ้าจะงอยนี้ขยายตัวต่อไปจะทำให้เกิดสันดอนโค้งอันใหม่ต่อกับปลายของสันดอนจะงอย ทำให้เกิดสันดอนจะงอยโค้งกลับแบบผสม (compound recurved spit) คลื่นที่เคยวิ่งเข้ามาในอ่าวก็จะแตกออก และปะทะสันดอนจะงอย ทำให้เกิดสันดอนจะงอยอันใหม่จากวัตถุที่ถูกพัดพาเลียบชายสันดอนมา ทำให้เกิดสันดอนจะงอยสลับซับซ้อนขึ้น

ขณะที่ชายฝั่งวิวัฒนาการต่อไป สันดอนจะงอยจะมาเชื่อมต่อกันทำให้เกิดสันดอนปิดปากอ่าว (baymouth bar) ซึ่งทำให้น้ำจากทะเลเปิดไม่สามารถไหลเข้ามาในอ่าวได้ นอกจากนี้ยังมีสันดอนอื่น ๆ ที่จะเกิดตามแนวชายฝั่งได้อีกหลายชนิด เช่น สันดอนเชื่อมเกาะ (tombolo) จะเชื่อมเกาะกับแผ่นดินใหญ่ บริเวณระหว่างเกาะกับแผ่นดินใหญ่จะเป็นท่าจอดเรือขนาดเล็กได้เป็นอย่างดี บางทีอาจมีสันดอนเชื่อมเกาะสองแนวเกิดขึ้น ทำให้เกิดทะเลสาบน้ำเค็ม (lagoon) ขึ้นระหว่างเกาะกับแผ่นดินใหญ่ สันดอนล้อมเกาะ (looped bar) จะเกิดขึ้นรอบเกาะทางด้านหันเข้าหาแผ่นดิน ทั้งนี้เป็นผลมาจากวัตถุที่ถูกพัดพามาตกโดยรอบด้านอับลมของเกาะ ซึ่งถูกพัดพามาจากหน้าผาด้านรับลมที่ยื่นลงสู่ทะเล

ตลอดแนวชายฝั่งและก้นอ่าวจะมีหาดทรายเรียบชายอ่าว (bayside beaches) และหาดทรายก้นอ่าว (bayhead beaches) เกิดขึ้น หาดทรายเหล่านี้เกิดจากการที่ทรายซึ่งน้ำพัดพามาเลียบชายฝั่งจากแหลมที่ยื่นออกมา เนื่องจากก้นอ่าวเป็นบริเวณที่คลื่นปะทะน้อย ทรายจึงไปตกตะกอนกันอยู่ตรงนั้น ถ้าอ่าวนั้นแคบและยาวจะมีสันดอนโค้งเกิดขึ้นขวางปากอ่าวเรียกว่า สันดอนกลางอ่าว (midbay bars) แต่ถ้าเกิดใกล้ก้นอ่าวเรียกว่า สันดอนก้นอ่าว (bayhead bar) สันดอนนี้ตามปกติจะโค้งเรียบ ด้านโค้งเว้าจะหันหน้าออกสู่ทะเลและจะโค้งไปทางหาดทรายเรียบชายอ่าว บริเวณก้นอ่าวอาจมีดินดอนสามเหลี่ยมเกิดขึ้นยื่นลงไปในน้ำ ทำให้อ่าวตื้นเร็วยิ่งขึ้น

เมื่อขั้นเริ่มแรกตอนปลายใกล้จะสิ้นสุดลง เกาะที่อยู่ใกล้ชายฝั่งจะพังทลายไปหมดสิ้น และหน้าผาของแหลมต่าง ๆ จะถูกกัดกร่อนจนเป็นแนวเดียวกัน สันดอนปากอ่าวจะเชื่อมต่อระหว่างแหลมเป็นชายฝั่งเรียบ



รูป 23.21 วิวัฒนาการของชายฝั่งยุบจมตัวลง T = สันดอนเชื่อมเกาะ S = สันดอนจะงอย RS = สันดอนจะงอยโค้งกลับ CS = สันดอนจะงอยผสม CT = สันดอนเชื่อมเกาะผสม LB = สันดอนบรรจบ CH = ผาหัวแหลม DT = สันดอนเชื่อมเกาะคู่ HB = หาดทรายหัวแหลม BMB = สันดอนปิดปากอ่าว CB = แผ่นดินปลายแหลมยื่นลงทะเล BHB = หาดทรายก้นอ่าว BSD = หาดทรายชายอ่าว BHD = ดินดอนสามเหลี่ยมก้นอ่าว L = ลากูน I = ปากทางน้ำเข้า CD = ดินดอนสามเหลี่ยมแผ่นดินปลายแหลมยื่นลงทะเล

เมื่อชายฝั่งถูกตัดเป็นแนวเรียบแล้ว วิวัฒนาการของชายฝั่งจึงถึงขั้นกลางตอนต้น ชายฝั่งในขั้นนี้จะมีหน้าผาของแหลมสลับกับสันดอนปากอ่าว ชายฝั่งซึ่งเคยเว้า ๆ แหว่ง ๆ มาก่อนเมื่อผ่านวิวัฒนาการมาถึงขั้นนี้ชายฝั่งก็เกือบจะเป็นเส้นตรง บริเวณที่เคยเป็นอ่าวจะมีวัตถุที่เป็นดินดอนสามเหลี่ยมไหลลงมาจนเต็ม โดยลำน้ำเป็นตัวพัดพามาและโดยการพัดพาจากกระแสน้ำขึ้นลง น้ำขึ้นน้ำลงก่อให้เกิดกระแสน้ำไหลเข้าไหลออกผ่านทางน้ำแคบ ๆ ที่ตัดผ่านสันดอน

ตลอดขั้นกลางตอนต้นชายฝั่งยังคงถอยเข้าไปในแผ่นดิน หน้าผายังคงถูกกัดลึกเข้าไป สันดอนปากอ่าวจะถูกคลื่นซัดจนเป็นเส้นตรง ในที่สุดชายฝั่งจะอยู่ในแนวเดียวกับก้นอ่าว สันดอนปากอ่าวและภูมิประเทศที่เกิดจากการทับถมอื่น ๆ จะสลายตัวไป ยกเว้นเฉพาะหาดทราย และหน้าผาของหินฐานจะปรากฏให้เห็นตลอดแนวชายฝั่ง กระบวนการกัดกร่อนชายฝั่งนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ขณะที่แผ่นดินสูงขึ้น หน้าผาก็จะเพิ่มความสูงขึ้นด้วย และจะมีเศษหินทับถมชายฝั่งมากขึ้น

สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของชายฝั่งยุบจมลง

ชายฝั่งเป็นภูมิประเทศที่มีอิทธิพลต่อกิจกรรมของมนุษย์อย่างมาก โดยเฉพาะชายฝั่งยุบจมลง อ่าวลึกในแนวชายฝั่งตอนต้นเหมาะที่จะเป็นท่าเรือธรรมชาติมาก ชายฝั่งหลายแห่งของสแกนดิเนเวีย ฝรั่งเศสและเกาะอังกฤษเป็นชายฝั่งที่เหมาะแก่การสร้างท่าเรือ ประชาชนที่อาศัยใกล้ชายฝั่งจะมีความชำนาญในการประมงและการต่อเรือ บริเวณภูเขาสูงตามชายฝั่งรีอาและฟยอร์ดเป็นบริเวณที่ทำการเกษตรกรรมได้น้อยหรือทำไม่ได้เลย จึงเป็นแรงผลักดันให้ประชากรหันความสนใจมาสู่ทะเลเพื่อการดำรงชีวิต ถ้าเป็นชายฝั่งที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยป่าและเป็นแหล่งไฟฟ้าพลังน้ำก็จะเป็นสิ่งที่กระตุ้นให้ประชาชนสนใจในการทำอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในเขตนิวอิงแลนด์และมณฑลชายทะเลของแคนาดาเป็นชายฝั่งยุบจมลงที่มีประโยชน์มากเพราะเป็นท่าเรือที่ดี ลักษณะของชายฝั่งยุบจมลงนี้มีผลต่อการพัฒนา การประมง การจับปลาวาฬ การพาณิชย์นาวี การต่อเรือ อุตสาหกรรม ซึ่งจะเห็นได้จากประเทศอังกฤษและกลุ่มประเทศสแกนดิเนเวีย

วิวัฒนาการของชายฝั่งเกาะขวางกั้น

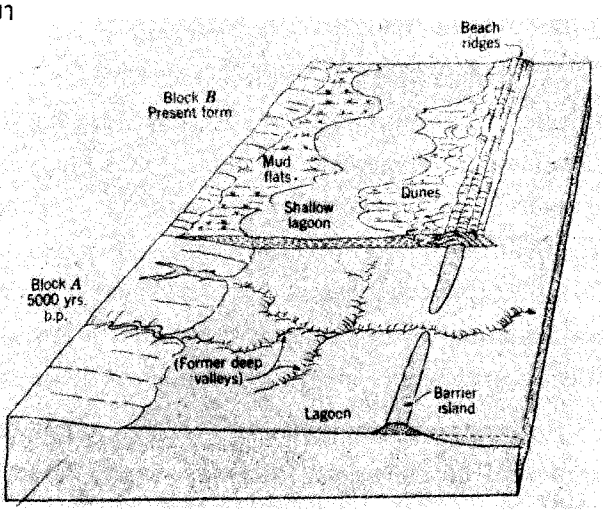
ลักษณะที่ตรงข้ามกับชายฝั่งรีอาและฟยอร์ดซึ่งมีระดับแผ่นดินสูงและมีอ่าวลึก ก็คือชายฝั่งที่มีระดับต่ำซึ่งแผ่นดินมีความลาดเอียงสม่ำเสมอลงสู่ใต้ระดับน้ำทะเล เช่น ที่ราบชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติกและชายฝั่งตามอ่าวของสหรัฐฯ ชายฝั่งประเภทนี้มีตะกอนที่ตกใหม่ๆซึ่งเดิมตะกอนเหล่านี้เคยตกทับถมอยู่ใต้ทะเลในบริเวณไหล่ทวีปมาก่อน การยกตัวของชายฝั่งซึ่งเป็นผลมาจากการยกตัวของเปลือกโลกในกระบวนการสร้างทวีป (epeirogenic) ทำให้เกิดที่ราบชายฝั่งซึ่งเกิดขึ้นตอนปลายของยุคไดโนโซอิกจนถึงปัจจุบัน การยกตัวของชายฝั่งทะเลนี้ยังทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศขึ้นอีกหลายชนิด เช่น หน้าผาจากการซัดเซาะของคลื่น แท่นลานดิน หาดทราย และการทับถมในทะเลสาบน้ำเค็มในขณะที่น้ำขึ้น ซึ่งทะเลสาบนี้จะอยู่ลึกเข้าไปในพื้นดินหลายไมล์และมีระดับสูงหลายสิบฟุต

แนวชายฝั่งบางตอนของมหาสมุทรแอตแลนติกและที่ราบรอบอ่าวเป็นเหมือนชายฝั่งที่เกิดจากการยกตัว แต่เมื่อศึกษาดูอย่างละเอียดถี่ถ้วนแล้ว จะพบว่าบริเวณตอนล่างของลำน้ำหุบเขาตลอด

แนวชายฝั่งนั้นจมลง เนื่องจากการเพิ่มระดับของน้ำทะเลและลำน้ำขึ้นลง และบึงน้ำขึ้น–น้ำลงในหลาย ๆ บริเวณซึ่งกว้างนับเป็นไมล์อยู่ในก้นหุบเขา จึงกล่าวได้ว่าปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเพิ่มระดับของน้ำทะเลจากการละลายของแผ่นน้ำแข็งยุคไพลสโตซีน และทำให้เกิดลักษณะชายฝั่งแบบจมตัวหลายชนิด

ตลอดแนวชายฝั่งในมหาสมุทรแอตแลนติก และชายฝั่งรอบอ่าวที่น้ำทะเลยกตัวสูงขึ้นจะมีเกาะขวางกั้น (barrier island) ซึ่งจะมีสันทรายต่ำ ๆ ที่เกิดจากการกระทำของคลื่น และต่อมาจะมีความสูงเพิ่มขึ้นเป็นสันทรายที่โตขึ้นจากหาดทรายโดยการกระทำของลม ทางเบื้องหลังของเกาะขวางกั้นก็คือ "ทะเลสาบน้ำเค็ม" (lagoon) ซึ่งเป็นแอ่งน้ำตื้น ๆ กว้างหลายไมล์ และในแอ่งนั้นจะมีตะกอนทับถมจากน้ำขึ้นน้ำลง

เกาะขวางกั้นอาจเกิดใกล้ ๆ ชายฝั่งที่ลาดน้อย ๆ ได้ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นบริเวณสิ้นสุดของยุคธารน้ำแข็ง ดังที่แสดงไว้ในรูป 23.22 เช่น ชายฝั่งในอ่าวเทกซัส ในช่วงเวลาที่แผ่นน้ำแข็งขยายตัวครอบคลุมตัวทวีปมากที่สุด ระดับน้ำทะเลอาจลดระดับต่ำกว่าปัจจุบันถึง 330 ฟุต (100 เมตร) ชายฝั่งจึงขยายตัวลงไปในทะเลไกลกว่าชายฝั่งปัจจุบันหลายไมล์ และจะมีที่ราบเอียงลาดกว้างใหญ่ปรากฏให้เห็น ทางน้ำที่ไหลมาจากตัวทวีปจะไหลผ่านที่ราบนี้และกัดที่ราบจนเป็นร่องลึก เมื่อน้ำแข็งเริ่มต้นละลายเมื่อ 10,000–20,000 ปีมาแล้ว ระดับน้ำทะเลก็เริ่มเพิ่มระดับขึ้น ชายฝั่งจึงถอยตัวเข้าสู่ตัวทวีปอย่างรวดเร็ว จากภาพ 23.22 บล็อกหน้าสุดจะแสดงให้เห็นเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อ 5,000 ปีมาแล้ว เกาะขวางกั้นต่าง ๆ จะมีหาดทรายเกิดขึ้น เป็นทรายที่พัดมาจากพื้นทะเลตื้นและกระแสน้ำที่ไหลเลียบชายฝั่งทะเล ขณะที่ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น คลื่นจะพัดพาวัตถุมาทับถมที่ยอดเกาะขวางกั้น ทำให้ทราบลักษณะการเพิ่มระดับของน้ำทะเล ขณะเดียวกันทะเลสาบน้ำเค็มก็จะมีความกว้างเพิ่มขึ้น และชายฝั่งด้านในจะถอยตัวลึกเข้าไปในผืนแผ่นดิน ในภาพ 23.22 บริเวณท้ายสุดแสดงให้เห็นถึงเกาะขวางกั้นในปัจจุบันซึ่งมีโครงสร้างที่สลับซับซ้อน ประกอบด้วยสันหาดทรายที่เกิดจากคลื่นและมีเนินทรายที่ทำให้เกาะทางด้านติดแผ่นดินกว้างขึ้น ส่วนใหญ่ของทะเลสาบน้ำเค็มจะถูกทับถมด้วยวัตถุตะกอนที่กระแสน้ำขึ้น–น้ำลงพัดพามา

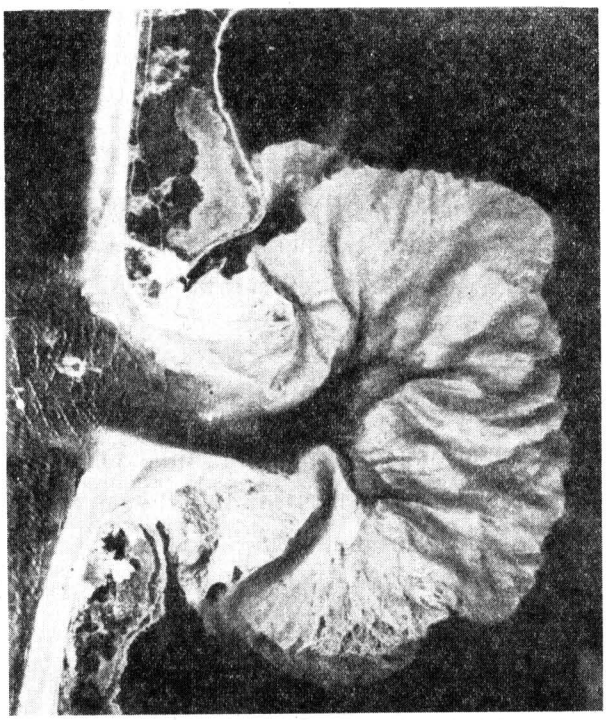


รูป 23.22 การยกตัวของเกาะปะการังระหว่างหลังยุคที่ระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของอ่าวเทกซัส

เกาะขวางกั้นชายฝั่งอีกแบบหนึ่ง จะพบได้ตามที่ราบเศษหินธารน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในทะเล ทำให้เป็นที่ราบลาดเล็กน้อย หลังจากน้ำแข็งละลายแล้วระดับน้ำทะเลจะสูงขึ้น ส่วนใหญ่ของที่ราบเศษหินธารน้ำแข็งนี้จะจมตัวลง ในขณะเดียวกัน หาดทรายขวางกั้นก็จะเกิดขึ้น ทำให้มีทะเลสาบน้ำเค็มเกิดขึ้น ตัวอย่างของเกาะขวางกั้นแบบนี้จะพบได้ตามชายฝั่งตอนใต้ของเกาะลองไอแลนด์ นครนิวยอร์ก ซึ่งเกาะไฟร์จะแยกอ่าวเกรตเซาท์ออกไป ทะเลสาบน้ำเค็มนี้กว้างถึง 5 ไมล์ (8 กม.) จากมหาสมุทรแอตแลนติก

ปากทางน้ำเข้าและดินดอนสามเหลี่ยมน้ำขึ้นน้ำลง

ลักษณะสำคัญอีกประการหนึ่งของเกาะขวางกั้น และสันดอนปากอ่าว ก็คือจะทำให้เกิดทางน้ำผ่านที่เรียกว่า "ปากทางน้ำเข้าจากน้ำขึ้นน้ำลง" (tidal inlet) ซึ่งกระแสน้ำที่ไหลแรงจะไหลผ่านเข้า–ออก สลับกันไปเมื่อน้ำขึ้นหรือน้ำลง ทำให้เกิดดินดอนสามเหลี่ยมจากน้ำขึ้นน้ำลง



รูป 23.23 ปากทางน้ำเข้าอีสต์ มอริส ตัดผ่านไปทางเกาะไฟร์ เกาะปะการังของชายฝั่งลองไอแลนด์ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างพายุพัดจัดเมื่อเดือนมีนาคม 1931 ภาพนี้ถ่ายหลังจากเกิดปากทางน้ำเข้านี้ 2–3 วัน

ช่องของปากทางน้ำเข้าในหาดทรายขวางกั้นนี้จะกว้างหรือแคบ ขึ้นอยู่กับอัตราเฉลี่ยของผลต่างของน้ำขึ้นน้ำลงตามชายฝั่งนั้น ช่วงนี้จะแคบถ้าความต่างระดับของน้ำขึ้นน้ำลงมีมาก ในช่วงที่มีพายุจัดแนวขวางกั้นนั้นอาจหักเป็นช่องใหม่ (ดูรูป 23.23) กระแสน้ำขึ้นน้ำลงจะมีส่วนช่วยให้ช่องนี้เปิดได้ต่อไป แต่ช่องนี้อาจปิดได้จากการกระทำของทรายที่ไหลเลียบชายฝั่ง ขณะที่ปฏิกิริยาตรงข้ามกันนี้ดำเนินอยู่อย่างสมดุลนั้น จะทำให้เกิดปากทางน้ำเข้าไม่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป

สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของเกาะขวางกั้นแนวชายฝั่ง

เกาะขวางกั้นตามแนวชายฝั่ง ปกติจะเป็นอ่าวที่มีน้ำตื้น จึงเป็นท่าเรือธรรมชาติที่ไม่ดี โดยตัวของทะเลสาบน้ำเค็มเองอาจใช้เป็นท่าเรือได้ถ้ามีร่องน้ำและท่าเทียบเรือที่ลึกพอ เรือจะแล่นเข้าออกโดยผ่านช่องทางเดียวกันในระหว่างเกาะขวางกั้น แต่อาจจำเป็นต้องสร้างเขื่อนชายทะเลและให้เขื่อนยื่นออกไปในทะเลเพื่อกักกันกระแสน้ำและให้มีร่องน้ำลึกเพียงพอ มีเมืองท่าสำคัญอยู่หลายเมืองซึ่งตั้งอยู่บริเวณที่แม่น้ำใหญ่ไหลลงทะเลสาบน้ำเค็ม บริเวณปากแม่น้ำนั้นจะเป็นแม่น้ำขนาดใหญ่ที่ร่องน้ำเกิดจากการกระทำของน้ำขึ้นน้ำลง เรือขนาดใหญ่สามารถผ่านเข้าออกได้และทำให้เมืองท่าอยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดินได้หลายไมล์

บริเวณตามชายฝั่งอ่าวเทกซัส เป็นตัวอย่างที่ดีที่สุดตัวอย่างหนึ่งของเกาะขวางกั้น และทะเลสาบน้ำเค็ม เพราะมีเกาะขวางกั้นยาวต่อเนื่องติดต่อกันถึง 100 ไมล์ (160 กม.) มีเพียงส่วนน้อยที่ขาดออกจากกัน ทะเลสาบน้ำเค็มกว้าง 5—10 ไมล์ (8—16 กม.) แสดงว่าพื้นลาดกำเนิดของกั้นทะเลมีน้อยมาก มีการสร้างเมืองแกลเวสตันบนเกาะขวางกั้นที่อยู่ติดกับทางน้ำผ่านซึ่งเชื่อมอ่าวแกลเวสตันกับทะเล เมืองท่าอื่น ๆ ของเทกซัสจะตั้งอยู่บนชายฝั่งของแผ่นดินใหญ่ การจมตัวลงเป็นเหตุให้ชายฝั่งในอ่าวมีชะวากทะเลมากมาย ซึ่งจะเห็นได้ตามบริเวณปากน้ำใหญ่ ๆ เมืองคอร์ปัสคริสติ รอคปอร์ต เทกซัส ซิตี ลาวาคา และเมืองท่าอื่น ๆ ที่ตั้งอยู่ตามแนวชายฝั่งด้านใน

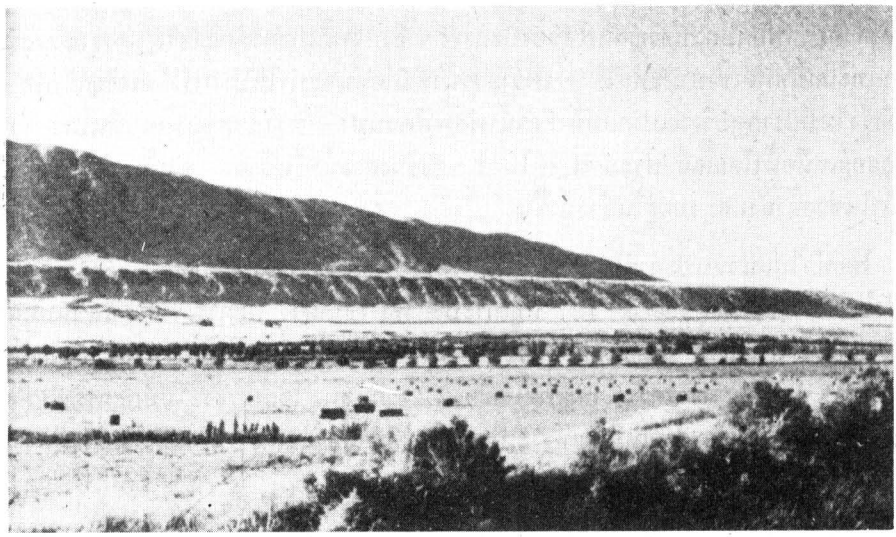
ลักษณะสำคัญเชิงภูมิศาสตร์อื่น ๆ ของเกาะขวางกั้นจะพบได้ตามชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติก บริเวณนิวเจอร์ซี เดลาแวร์ แมริแลนด์ เวอร์จิเนีย และแคโรไลนาเหนือ ตลอดแนวชายฝั่งตั้งแต่แซนดี ฮุค ไปจนถึงแหลมลุคเอาท์ จะมีปะการังเป็นแนวกั้นชายฝั่ง การจมตัวอย่างรุนแรงหลังยุคน้ำแข็งเป็นเหตุให้มีอ่าวเกิดขึ้น เช่น อ่าวเชสปีก และอ่าวเดลาแวร์ เมืองท่าขนาดใหญ่ เช่น บัลติมอร์ วิลมิงตัน และฟิลาเดลเฟีย, มักจะตั้งอยู่ตรงหัวของชะวากทะเลที่เกิดจากน้ำขึ้นน้ำลงตามแนวชายฝั่งนิวเจอร์ซี ชายฝั่งเก่าด้านในของทะเลสาบน้ำเค็มจะเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นถึงร่องรอยการกัดเซาะของคลื่น ในทะเลสาบน้ำเค็มจะมีตะกอนลงไปทับถมอยู่มากและทำให้เกิดที่ราบตลอดแนวที่น้ำขึ้นถึง หาดทรายขวางกั้นนั้นเป็นแหล่งที่สวยงาม และอำนวยประโยชน์ในการสร้างเมืองอย่างมาก เช่น เมืองแอตแลนติก และแอสเบอรีปาร์ค เป็นต้น

ชายฝั่งยกตัว

ชายฝั่งหนึ่ง ๆ นั้น จะอยู่ในลำดับขั้นหนึ่งของวิวัฒนาการ อาจจะยกตัวสูงเหนือระดับน้ำทำให้กลายเป็นลักษณะภูมิประเทศของแผ่นดินขึ้น ในขณะเดียวกันก็มีชายฝั่งใหม่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นชายฝั่งโผล่เหนือน้ำ (emerge) ที่แท้จริง ทำให้แนวระดับน้ำชายฝั่งต้องเปลี่ยนไปจากเดิม ตามข้อเท็จจริงแล้วชายฝั่งยกตัว (raised shoreline or elevated shoreline) ไม่ใช่ชายฝั่งโผล่เหนือน้ำ เพราะมันไม่ใช่ชายฝั่งที่แท้จริงไปทั้งหมด เนื่องจากไม่ได้มีส่วนสัมพันธ์กับการกระทำของคลื่นและกระแสน้ำ จะมีบางบริเวณของชายฝั่งยกตัวเกิดจากการกระทำของการผุกร่อนเหนือพื้นดิน การไหลตามพื้นลาดและลำน้ำ

ชายฝั่งยกตัวเป็นผลมาจากการยกตัวของเปลือกโลกตามแนวชายฝั่งทะเล เช่น ตามชายฝั่งในอะแลสกา แคลิฟอร์เนีย ซึ่งเกิดจากการเลื่อนตัวและแผ่นดินไหวหรือเกิดจากการลดระดับของน้ำทะเลและทะเลสาบ

ทะเลสาบบอนเนวิลล์ เป็นทะเลสาบเก่าแก่ของทะเลสาบซอลต์เลค ในรัฐยูตาห์ปัจจุบัน ซึ่งยกตัวขึ้นสูงสุดในยุคไพลสโตซีนเมื่อมีฝนตกมากกว่าและการระเหยน้อยกว่าในปัจจุบัน ภูมิภาคที่ดีที่สุดของชายฝั่งยกตัวจะพบได้ตามตอนล่างของลาดเทือกเขาในเขตซอลต์เลค (ดูรูป 23.24 ประกอบ) จากการศึกษารอยกัดเซาะของคลื่นดึกดำบรรพ์ รวมกับการศึกษาหาดทราย สันดอนจะงอยและสันดอน จะทำให้เราศึกษาประวัติศาสตร์ของทะเลสาบและอ้างอิงไปถึงลักษณะภูมิอากาศในอดีตได้



รูป 23.24 ชั้นแนวระนาบอยู่เชิงภูเขา เป็นชั้นหน้าผาคลื่นเซาะที่เกิดจากการกระทำของคลื่น สัมพันธ์กับการทับถมของหินกรวดมน แสดงว่าทะเลสาบโบราณชื่อมอนเนวิลล์มีระดับน้ำสูงถึงระดับดังกล่าว ทะเลสาบแห่งนี้รวมเอาทะเลสาบเกรตเลคไว้ทั้งหมด ในยุคน้ำแข็งนั้น

ในบริเวณที่ระดับของทะเลสาบลดระดับลงเรื่อย ๆ หรือบริเวณชายฝั่งยกตัวขึ้นเรื่อย ๆ ชายฝั่งยกตัวนี้จะกลายเป็นแนวสแตรนด์ไลน์ (strand line) ซึ่งเป็นแนวเส้นชั้นความสูงที่เกิดตามธรรมชาติ การยกตัวของเปลือกโลกที่เกิดต่อเนื่องกันนี้และค่อนข้างจะเป็นรูปแบบจะมีปรากฏให้เห็นในทะเลบอลติกและตามแนวมหาสมุทรอาร์กติกในอเมริกาเหนือ ซึ่งเป็นผลมาจากการมีแผ่นน้ำแข็งยุคไพลสโตซีนปกคลุมอยู่ น้ำหนักของน้ำแข็งทำให้บางส่วนของเปลือกโลกทรุดตัวลง

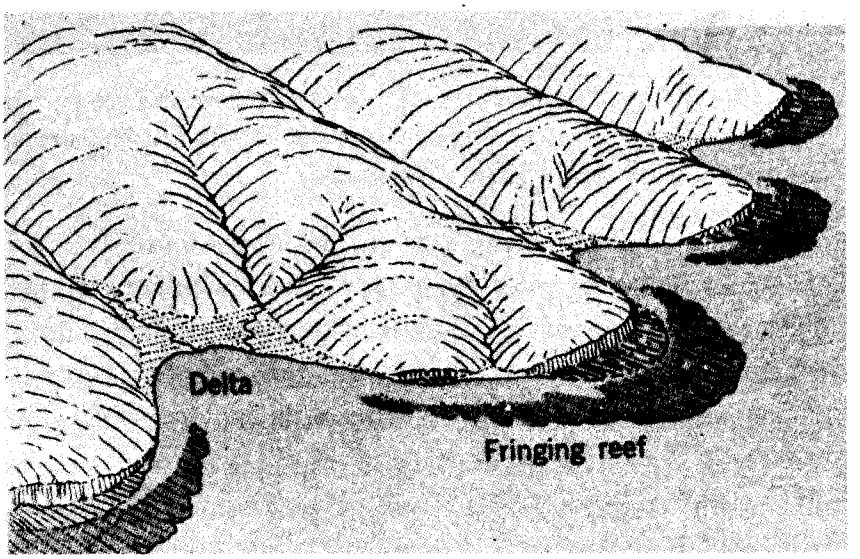
ชายฝั่งปะการัง

ชายฝั่งธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด ชายฝั่งปะการัง (coral reef) เป็นชายฝั่งอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดแผ่นดินเพิ่มขึ้นจากอินทรียสาร ปะการัง (coral) จะขับหินปูนออกมาเพื่อสร้างที่อยู่อาศัย

และพืชพวกสาหร่าย (algae) จะสร้างสิ่งห่อหุ้มเหมือนปูน ปะการังเป็นสัตว์ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งกลุ่มหนึ่ง ๆ จะมีปะการังจำนวนมากมาย เมื่อปะการังกลุ่มหนึ่งตายลง กลุ่มใหม่ก็จะสร้างรังเหนือพวกที่ตายแล้ว ดังนั้น หินปูนจึงวิวัฒนาการขึ้นจากรังปะการังที่เป็นหินปูนแข็ง ปะการังที่แตกหักจากการกระทำของคลื่น เมื่อขัดสีเป็นเม็ดเล็ก ๆ แล้วมันอาจจะไปตกทับถมเป็นหาดทราย สันดอนจะงอย และสันดอน ซึ่งต่อมาจะเชื่อมกันเป็นหินปูน

ชายฝั่งปะการังจะเกิดในเขตอบอุ่น ในน่านน้ำเขตร้อนระหว่างละติจูด 30 องศาเหนือ – 25 องศาใต้ อุณหภูมิของน้ำจะสูงกว่า 68 องศาฟาเรนไฮต์ (20 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอเหมาะทำให้มีปะการังเกิดขึ้นอย่างหนาแน่น ยิ่งไปกว่านั้นแนวหินปะการังจะเกิดอยู่ใกล้ ๆ กับผิวน้ำในความลึกประมาณ 200 ฟุต (60 เมตร) น้ำบริเวณนี้จะต้องพัดพาตะกอนไปได้อย่างอิสระและต้องมีอากาศมากพอกับการเจริญเติบโตของปะการัง ยิ่งกว่านั้นปะการังจะเจริญงอกงามในบริเวณที่มีคลื่นจากทะเลเปิดพัดเข้ามาปะทะได้ เพราะว่าน้ำที่มีโคลนจะทำให้ปะการังไม่เจริญเติบโต แนวปะการังจึงไม่มีปรากฏบริเวณปากแม่น้ำที่ลำน้ำพัดพาโคลนมา ตรงยอดของแนวหินปะการังจะแบนและลอยอยู่เหนือน้ำโดยเฉลี่ยประมาณ 1 ใน 3 ของช่วงต่างน้ำขึ้นน้ำลง ดังนั้น หินปะการังจะโผล่เหนือน้ำในช่วงน้ำลงและจมอยู่ในช่วงน้ำขึ้น

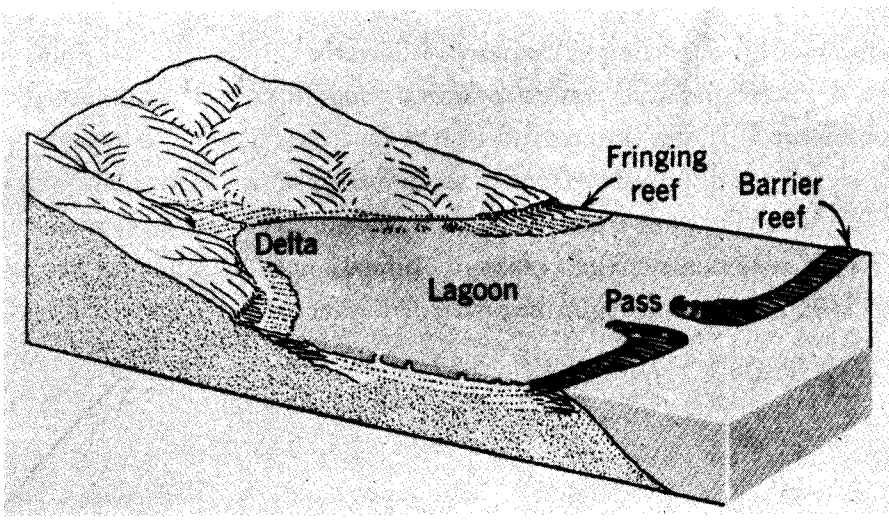
โดยทั่วไปแนวหินปะการังจะมี 3 ชนิด (1) ปะการังริมฝั่ง (fringing reef) (2) แนวปะการังใกล้ฝั่ง (barrier reef) (3) หมู่เกาะปะการัง (atoll) ปะการังริมฝั่งเกิดขึ้นบนลานที่อยู่ติดกับชายฝั่ง บริเวณแหลมที่ยื่นออกไปจะมีปะการังริมฝั่งกว้างที่สุดทั้งนี้เพราะเป็นบริเวณที่คลื่นซัดเข้ามากที่สุด ทำให้ปะการังได้รับน้ำสะอาดและอาหารมากที่สุด โดยปกติจะไม่มีปะการังริมฝั่งปรากฏบริเวณปากน้ำและดินดอนสามเหลี่ยมเพราะเป็นบริเวณที่น้ำมีแต่โคลน ซึ่งบริเวณนี้จะมีความสำคัญ



รูป 23.25 ปะการังริมฝั่ง บริเวณใกล้หัวแหลมจะกว้าง และค่อย ๆ แคบลงเมื่อใกล้ปากน้ำ

ทางด้านการทหาร เพราะบริเวณที่ไม่มีปะการังนั้นจะเหมาะแก่การยกพลขึ้นบกและการส่งกำลังช่วยเหลือ ปะการังริมฝั่งจะกว้างประมาณ 0.25—1.5 ไมล์ (0.4—2.5 กม.) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาวิวัฒนาการของปะการังนั้น

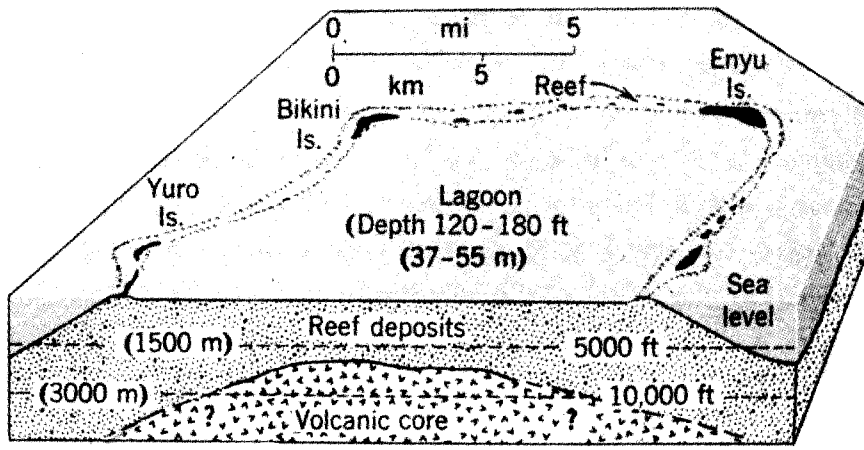
แนวปะการังใกล้ฝั่ง จะวางตัวอยู่ห่างชายฝั่งและจะแยกจากแผ่นดินใหญ่ โดยมีทะเลสาบน้ำเค็มกว้าง 0.5—10 ไมล์ (0.8—16 กม.) หรือกว้างกว่านี้ขวางกั้น แนวหินปะการังอาจกว้าง 20—3,000 ฟุต (6—900 เมตร) ทะเลสาบน้ำเค็มจะตื้นและกันทะเลสาบค่อนข้างราบ ตามปกติจะลึก 120—240 ฟุต (35—75 เมตร) บางที่อาจมีแท่งหินปะการังรูปคล้ายหอคอยจำนวนมากตั้งอยู่ในทะเลสาบน้ำเค็ม ช่องน้ำผ่าน (passes) ที่มีปรากฏตามแนวปะการังชนิดนี้จะแคบ ทำให้น้ำจากคลื่นที่กระเซ็นเข้าไปในทะเลสาบไหลออกสู่ทะเลเปิดได้ บางครั้งอาจมีดินดอนสามเหลี่ยมเกิดขึ้นตามชายฝั่งของแผ่นดินใหญ่ได้ เพราะปะการังที่เติบโตขึ้นจะคอยกั้นโคลนนั้นไว้ ทางน้ำผ่านนั้นมีความสำคัญทั้งในด้านสิ่งแวดล้อมและการทหาร เพราะเป็นทางเดียวเท่านั้นที่เรือจะผ่านเข้าออกได้



รูป 23.26 แนวหินปะการังจะแยกจากแผ่นดินใหญ่โดยมีทะเลสาบน้ำเค็มคั่นกลาง

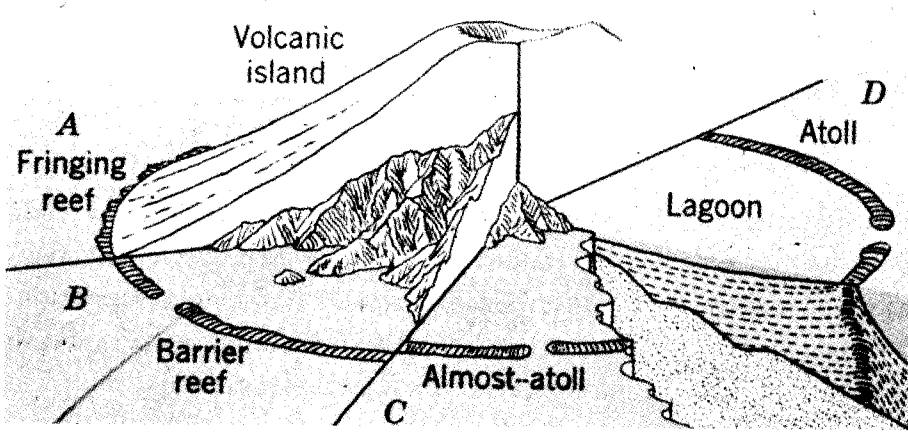
หมู่เกาะปะการัง จะเป็นแนวปะการังรูปวงกลมล้อมรอบทะเลสาบ แต่ไม่มีแผ่นดินอยู่ภายในเกาะ ลักษณะหลาย ๆ อย่างคล้าย ๆ กับแนวปะการังใกล้ฝั่ง ตามหมู่เกาะปะการังขนาดใหญ่ส่วนใหญ่ของแนวปะการังเกิดจากการกระทำของคลื่นและลมทำให้เกิดเป็นแนวหมู่เกาะเตี้ย ๆ โดยเชื่อมต่อกับแนวปะการัง ภาพตัดขวางของหมู่เกาะปะการังแสดงให้เห็นว่าทะเลสาบนั้นมีพื้นแบนราบและตื้น แต่ขอบด้านนอกจะชันมากและลึกลงไปในก้นมหาสมุทรหลายพันฟุต

ทฤษฎีหลายทฤษฎีได้กล่าวถึงวิวัฒนาการของการกำเนิดของหมู่เกาะปะการังและแนวปะการังใกล้ฝั่ง โดยได้อภิปรายถึงข้อดีและข้อเสียของแต่ละทฤษฎีไว้มาก ทฤษฎีที่กล่าวถึงการกำเนิดที่น่า



รูป 23.27 หมู่เกาะปะการังบิกินี ในมหาสมุทรแปซิฟิก เป็นเกาะที่มีปะการังหนามาก เพราะเกิดบนภูเขาไฟที่ค่อย ๆ จมตัวลง

สนใจทฤษฎีหนึ่งซึ่งเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางตั้งแต่เริ่มต้น เป็นของนักวิทยาศาสตร์ผู้ยิ่งใหญ่ คือ ชาร์ล ดาร์วิน ซึ่งเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1842 เรียกว่า "ทฤษฎีการรวมตัว" (subsidence theory) เขาสมมติว่ามีเกาะเล็ก ๆ เช่น เกาะภูเขาไฟค่อย ๆ จมตัวลงบนเปลือกโลกเหนือก้นสมุทร ตอนแรกแนวปะการังจะเกิดขึ้นเป็นแบบปะการังริมฝั่งซึ่งอยู่ติดกับฝั่งของเกาะ แนวหินปะการังจะเจริญเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่เกาะค่อย ๆ จมตัวลง ดังนั้น พื้นที่ของเกาะค่อย ๆ น้อยลงและทะเลสาบน้ำเค็มค่อย ๆ เกิดขึ้น โดยมีแนวปะการังใกล้ฝั่งล้อมรอบ ในที่สุดเมื่อเกาะจมไปหมดแล้ว แนวหินปะการังยังคงอยู่ โดยยังมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลเพราะปะการังและกัลปังหา (สาหร่าย) เจริญเติบโตอยู่เสมอ



รูป 23.28 ทฤษฎีการจมตัวของแนวหินปะการัง และวิวัฒนาการของหมู่เกาะปะการัง 4 ลำดับขั้น เริ่มจากปะการังริมฝั่ง รอบเกาะภูเขาไฟ และจบลงด้วยแนวหินปะการังวงกลม

สิ่งแวดล้อมอันสำคัญของเกาะปะการังมีบางสิ่งที่เราต้องกล่าวถึง คือ บนเกาะปะการังไม่มีหินอื่นอยู่เลยนอกจากหินปูนปะการัง (coral limestone) ซึ่งประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต พืชจึงไม่สามารถจะขึ้นได้เพราะพืชต้องการสารอื่นๆ อีก เช่น ซิลิกา การเพาะปลูกจึงทำไม่ได้ ถ้าไม่ใส่ปุ๋ยหรือไม่มีหินจากการระเบิดของภูเขาไฟหรือหินอัคนีมาใส่ลงไป ต้นปาล์มเป็นพืชดั้งเดิมของเกาะปะการัง เพราะมันสามารถเจริญเติบโตในเขตน้ำกร่อยได้ และเมล็ดของปาล์มสามารถกระจายพันธุ์ไปได้ไกลๆ โดยลอยน้ำจากเกาะหนึ่งไปสู่อีกเกาะหนึ่งได้ ชาวพื้นเมืองจะปลูกมะพร้าวเพื่อใช้เป็นอาหาร เสื้อผ้า เส้นใย และวัสดุก่อสร้าง น้ำจืดเป็นสิ่งที่หาได้ยากบนเกาะปะการังเล็กๆ เพราะเกาะไม่มีพื้นที่มากพอที่จะสะสมน้ำจากฝนไว้ได้ และระดับพื้นดินต่ำ ระดับน้ำจืดใต้ดินจึงสูงเกินกว่าที่จะทำให้เกิดน้ำพุ ลำน้ำหรือบ่อน้ำได้ จึงต้องใช้เรือเปิดโล่งเพื่อรองน้ำฝนหรือขุดบ่อรองน้ำฝน ปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ เป็นอาหารสำคัญของมนุษย์บนเกาะปะการัง น้ำที่ราบเรียบในทะเลสาบน้ำเค็มเป็นแหล่งหาปลาและจอดเรือแคนูได้อย่างดี เกาะปะการังทางตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิกเป็นหมู่เกาะที่ได้รับอันตรายจากพายุโซนร้อน (ไต้ฝุ่น) อยู่เป็นประจำ คลื่นหัวแตกจะซัดเข้าสู่พื้นผิวเกาะแล้วกวาดเอาต้นมะพร้าว บ้านเรือน และผู้คนลงสู่ทะเล เนื่องจากไม่มีที่สูงพอที่จะเป็นที่ป้องกันภัยได้ ส่วนคลื่นใต้น้ำก็อาจทำให้น้ำท่วมเกาะปะการังได้เช่นกัน

หมู่เกาะปะการังในเขตร้อนและเขตศูนย์สูตรจะมีป่าชายเลนขึ้นเป็นแนวยาว ทำให้ตะกอนเล็กๆ ตกลงสู่ท้องน้ำได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ขัดขวางการเจริญเติบโตของปะการัง

คำถามทบทวนบทที่ 23

1. ทำไมคลื่นหัวแตกจึงต้องเกิดในเขตน้ำตื้น คำว่า น้ำซัดและน้ำไหลกลับหมายความว่าอย่างไร กระแสน้ำนี้ทำให้วัตถุชายหาดเคลื่อนที่หรือไม่
2. ภายใต้เงื่อนไขใดบ้างที่ทำให้คลื่นกัดกร่อนพัดพาบริเวณชายฝั่งได้มากที่สุด และเมื่อไรจึงจะมีการสร้างเสริมชายหาด
3. จงอธิบายถึงวิวัฒนาการของหน้าผาชายทะเล เริ่มจากการทรุดตัวของพื้นลาดชายฝั่งทะเลลงไปใหม่ๆ จนถึงหน้าผาวิวัฒนาการเต็มที่ จงอธิบายคำต่อไปนี้ การถากถาง โพรงหิน ชายฝั่งสะพานหินธรรมชาติ เกาะเสาหิน รอยบากจากคลื่น ลานหินขัดสี ที่ราบขั้นบันได ริมฝั่งทะเลหุบเขาลอย
4. จงอธิบายปรากฏการณ์การหันเหของคลื่น ทำไมคลื่นต้องมีการหันเห เมื่อคลื่นเกิดการหันเหเข้าไปในชายฝั่งเว้า พลังงานจากคลื่นจะไปรวมกันบริเวณใด บริเวณใดที่ได้รับพลังงานน้อยที่สุด สิ่งนี้มีผลต่อการสร้างชายฝั่งอย่างไร
5. จงอธิบายการพัดพาตามชายหาดและการพัดพาตามชายฝั่ง มีสิ่งใดบ้างที่เกิดจากการพัดพานี้ กระแสน้ำตามชายฝั่งคืออะไรและมันเกิดขึ้นได้อย่างไร

6. สันดอนจะงอยคืออะไร มันเกิดขึ้นได้อย่างไรและเกิดที่ไหน ปลายของสันดอนเกิดขึ้นได้จากอะไร ชายหาดขนาดเล็กเกิดขึ้นได้อย่างไร
7. การพัดพาเลียบชายฝั่งนำทรายหายไปจากชายฝั่งได้อย่างไร การทำรอช่วยป้องกันการพังทลายของชายฝั่งได้อย่างไร
8. จงอธิบายการเกิดสันดอนปากอ่าว สันดอนเชื่อมเกาะ และสันทรายปลายแหลม แผ่นดินปลายแหลมยื่นลงทะเลเกิดขึ้นได้อย่างไร และเกิดต่างจากสันทรายปลายแหลมอย่างไร
9. จงอธิบายระดับน้ำขึ้นและน้ำลงของวัฏจักรน้ำขึ้นน้ำลงกึ่งรอบวัน น้ำเกิดน้ำตายคืออะไร
10. กระแสน้ำขึ้น–น้ำลง เกิดขึ้นได้อย่างไร จงนิยามคำว่า กระแสน้ำขึ้น น้ำนึง กระแสน้ำลง
11. การตกตะกอนของตะกอนต่าง ๆ เกี่ยวพันกับกระแสน้ำขึ้นในอ่าวและชะวากทะเลอย่างไร จงอธิบายกระบวนการและส่วนประกอบของการตกตะกอนดังกล่าว มนุษย์สามารถนำบึงน้ำเค็มมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไร
12. เราจำแนกชายฝั่งได้อย่างไร จงบอกชื่อชายฝั่งทั้งห้าชนิดมาให้ครบ
13. ชายฝั่งยุบจมลงมีกี่ชนิด จงบอกชื่อและอธิบายชายฝั่งดังกล่าว
14. จงอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเลประเภทชายฝั่งยุบจมลง ตามลำดับขั้นวิวัฒนาการของชายฝั่ง
15. ชายฝั่งแนวหินปะการังคืออะไร เกาะปะการังเกิดขึ้นได้อย่างไร
16. ชายฝั่งยุบจมลง มีอิทธิพลต่อมนุษย์อย่างไร
17. จงอภิปรายถึงสิ่งแวดล้อมสำคัญของชายฝั่งเกาะปะการัง จงเปรียบเทียบความสะดวกปลอดภัยในการเดินทางไปตามชายฝั่งเกาะปะการังกับชายฝั่งยุบจมลง
18. จงบอกชื่อของชายฝั่งปานกลางมาทั้งหมด
19. ชายฝั่งยกตัว (elevated shoreline) หมายความว่าอย่างไร แตกต่างจากชายฝั่งโผล่เหนือน้ำอย่างไร เราพบชายฝั่งยกตัวซึ่งมีลักษณะดีที่สุดได้ที่ไหนในปัจจุบันนี้
20. หินโสโครกปะการังเกิดขึ้นได้อย่างไร ปะการังจะสร้างหินโสโครกได้มากที่สุดในสภาวะเช่นใด

บทที่ 24

ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากการกระทำของลม

ลมเป็นตัวการกัดกร่อนอันดับที่สี่ที่เราจะกล่าวถึง ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศตามลำดับขั้นที่น่าสนใจหลายชนิด ทั้งภูมิประเทศกัดกร่อนและทับถม การเคลื่อนที่ของมวลวัตถุนั้นจะมีทั้งการไหลไปตามพื้นลาด การกระทำของน้ำไหล คลื่น และน้ำแข็ง ยกเว้นในเขตทะเลทรายเท่านั้นที่มีการกระทำของลมมาก ในเขตชุ่มชื้น ซึ่งพื้นดินชื้นและมีพืชปกคลุมมาก การกระทำของลมจะมีผลน้อย โดยจะมีเฉพาะตามเนินทรายชายฝั่งเท่านั้น

การกัดกร่อนโดยลม

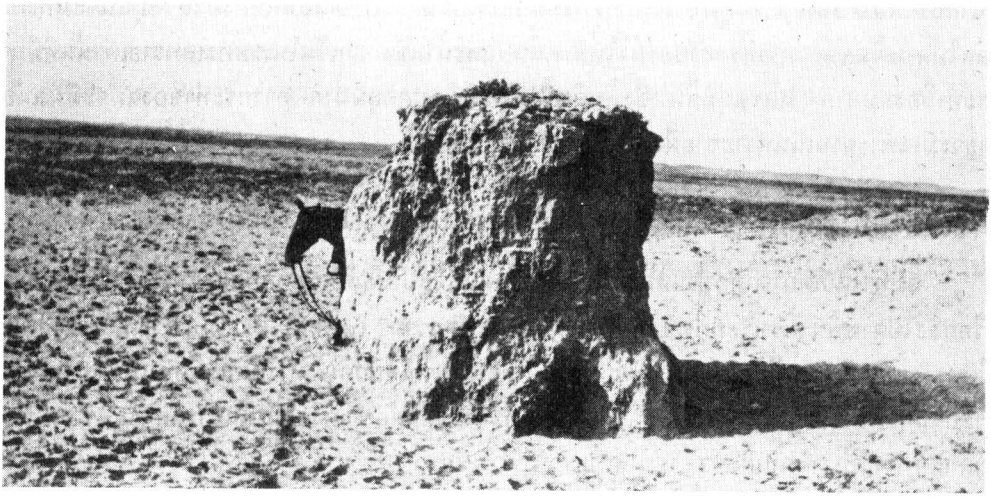
ลมทำให้เกิดการกัดกร่อนสองชนิด ทำให้วัตถุที่อยู่บนผิวดินหลุดออกและลอยขึ้นไปในอากาศหรือกลิ้งไปตามพื้น เราเรียกกระบวนการนี้ว่า "การพัดกวาด" (deflation) ในบริเวณที่ลมพัดพาเอาเม็ดทรายและอนุภาคฝุ่นไปปะทะหินหรือดินที่โผล่ขึ้นมาเหนือผิวดิน ทำให้ดินหรือหินนั้นถูกกัดกร่อน กระบวนการนี้เราเรียกว่า "การขัดสี" (abrasion) การขัดสีต้องมีเครื่องมือในการกัดกร่อนซึ่งลมหอบมา *แต่การพัดกวาดนั้นเกิดจากกระแสลมเพียงอย่างเดียว*

การพัดกวาดจะเกิดบนพื้นที่ค่อนข้างแห้งแล้ง และต้องมีวัตถุร่วนซุยที่เกิดจากการผุกร่อนโดยกาลอากาศ หรือการทับถมที่เกิดจากการกระทำของน้ำ น้ำแข็ง หรือคลื่น

ดังนั้น ลำน้ำที่แห้งขอด หาดทรายและพื้นที่ซึ่งเกิดจากการทับถมของวัตถุที่ธารน้ำแข็งพัดพามาจะถูกพัดกวาดโดยลมได้มาก ในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง การพัดกวาดจะเกิดขึ้นได้ทั่วพื้นผิวดิน เนื่องจากดินหรือหินไม่มีสิ่งใดปิดบัง การพัดกวาดของลมจะจำแนกไปตามขนาดของอนุภาควัตถุ อนุภาคที่ละเอียด เช่น ผิวดินเหนียวและดินตะกอนจะปลิวไปได้ง่ายและลอยสูงเข้าไปในอากาศ เม็ดทรายจะเคลื่อนที่ไปได้ก็ต่อเมื่อลมพัดด้วยความแรงปานกลางขึ้นไป และจะเคลื่อนที่ไปไม่สูงจากผิวดินมากนัก อนุภาคของหินทรายและก้อนกรวดกลม ๆ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 หรือ 3 นิ้ว (5–8 ซม.) อาจกลิ้งไปบนพื้นดินราบ ๆ ได้ถ้าลมมีความแรงพอ แต่จะกลิ้งไปได้ไม่ไกลนัก เมื่อตกลงในแอ่งมันอาจหยุดกลิ้งได้ง่าย ๆ เป็นผลให้มีอนุภาคขนาดต่าง ๆ กองนิ่งอยู่บนพื้นดิน อนุภาคที่เล็กมาก ๆ จะพัดต่อไป ส่วนก้อนใหญ่กว่าจะหยุดอยู่กับที่

ลักษณะภูมิประเทศสำคัญๆ ที่เกิดจากการพัดกวาดคือแอ่งตื้น ๆ เราเรียกว่า "แอ่งลม" (blowout) หรือแอ่งพัดกวาด (deflation hollow) แอ่งนี้อาจมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่สองสามหลาจน*กระทั่งกว้างเป็นไมล์หรือกว้างกว่านั้น แต่ตามปกติจะลึกเพียงสองสามฟุต แอ่งลมมักจะเกิดบนที่*ราบในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง แอ่งขนาดเล็กบางแอ่งที่อยู่ตามผิวพื้นราบโดยเฉพาะบริเวณที่ไม่มีหญ้า

ปกคลุม อาจจะพัฒนาไปเป็นแอ่งลมได้ น้ำฝนที่ไหลลงไปในแอ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดบ่อหรือทะเลสาบตื้นๆ เมื่อน้ำระเหยไปหมดแล้ว โคลนที่อยู่ก้นหลุมจะแห้งและแตกเป็นระแหง ทำให้เกิดเป็นแผ่นดินโคลน บางๆ ชิ้นเล็กๆ ซึ่งลมสามารถพัดให้แผ่นดินโคลนนั้นปลิวว่อนไปได้ ในทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์วัวอาจเหยียบย่ำขอบแอ่งลมจนดินละเอียดเป็นอนุภาคโคลน และทำให้แรงยึดของรากพืชถูกทำลายลง สิ่งเหล่านี้อาจเคลื่อนย้ายไปได้เมื่อแห้งลง ทำให้แอ่งลมขยายใหญ่ยิ่งขึ้น แอ่งลมนี้เราอาจพบได้บนหินเช่นกัน ถ้าหินนั้นผุพังด้วยกาลอากาศมาแล้ว



รูป 24.1 แอ่งลมบนที่ราบเนบราสกา จะปรากฏแท่งวัตถุต้นกำเนิด วัตถุที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งเป็นตัวชี้ให้เห็นถึงความหนาของชั้นวัตถุที่ลมพัดกวาดไป

ในทะเลทรายทางตะวันออกเฉียงใต้ของรัฐแคลิฟอร์เนีย แอริโซนา และนิวเม็กซิโก พื้นดินที่อยู่ระหว่างแอ่งจะเป็นบริเวณที่ถูกพัดกวาดมาก พื้นผิวที่แบนราบและตื้นเขินของพลายาซึ่งกว้างใหญ่อาจถูกลมพัดกวาดให้ลึกมากขึ้นหลายฟุตและเป็นบริเวณกว้างหลายตารางไมล์

การพัดกวาดที่กระทำบนพื้นผิวดินที่มีวัตถุแตกสลายอยู่แล้วแต่มีขนาดต่าง ๆ กัน ก้อนกรวดที่หลงเหลืออยู่อาจสะสมกันมากขึ้นจนกระทั่งปกคลุมทั่วพื้นผิวนั้น จากการที่ลมพัดพาเอาทรายออกจากทรายปนกรวดในทะเลทราย จนเหลือแต่ก้อนกรวด ซึ่งก้อนกรวดเหล่านี้จะมากองรวมกันทำให้เกิด "ลานกรวดทะเลทราย" (desert pavement) ในแอฟริกาเหนือเรียกพื้นผิวที่มีก้อนกรวดปกคลุมนี้ว่า "เร็ก" (reg) การตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนต ยิปซัมและเกลือชนิดอื่นๆ ใกล้ผิวดิน เมื่อน้ำซึมขึ้นมาและระเหยไปหมด เกลือเหล่านี้จะเชื่อมก้อนกรวดเข้าด้วยกัน ทำให้ก้อนกรวดเหล่านั้นมีคุณสมบัติที่จะป้องกันผิวดินจากการพัดกวาดของลม

การที่ทรายถูกลมพัดกระทบหินที่โผล่สูงเหนือผิวพื้น ลมจะพัดทรายให้สูงเหนือระดับผิวพื้นเพียงสองสามฟุตเท่านั้น เพราะเม็ดทรายไม่ลอยขึ้นไปในอากาศ การขัดสีของลมทำให้เกิดหลุม

(pits) ร่อง (grooves) และแอ่ง (hollow) ในหินบริเวณซึ่งมวลหินเล็ก ๆ ดันตัวขึ้นมาเหนือพื้นผิว ตรงฐานอาจถูกขัดสีจนกลายเป็น "เสาหินสลัก" (pedestral rock) โดยมีตอนล่างเป็นเสาคอดเสาสลักหิน หรือ "แท่นหินรูปเห็ด" (mushroom rock) ซึ่งอาจผุพังด้วยกระบวนการกาลอากาศได้

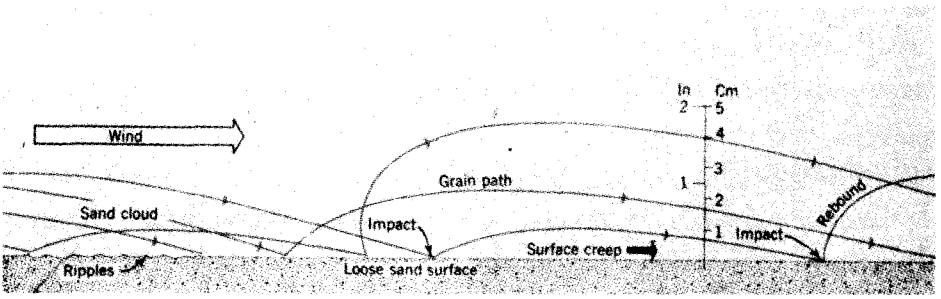
พายุฝุ่นและพายุทราย

ในฤดูแล้ง เหนือบริเวณที่ราบ ลมพายุที่พัดรุนแรงจะหอบเอาอนุภาคฝุ่นจำนวนมหาศาลลอยเข้าไปในอากาศ ทำให้เกิดเมฆฝุ่นหนาแน่นลอยสูงขึ้นไปเราเรียกว่า "พายุฝุ่น" (dust storm) พายุฝุ่นจะเกิดขึ้นในบริเวณที่ไม่มีพืชปกคลุมเพราะพืชถูกตัดไปหมด หรือถูกทำลายจากการเลี้ยงสัตว์ และบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่แห้งแล้งอย่างรุนแรง พายุฝุ่นมีลักษณะเป็นเมฆดำมืดก้อนมหึมาอยู่ตั้งแต่ติดพื้นขึ้นไปจนสูงหลายพันฟุต ภายในมวลพายุฝุ่นนั้นมืดสนิท ทัศนวิสัยลดลงเหลือเพียงสองสามหลา และมีอนุภาคฝุ่นปนอยู่ทุกหนทุกแห่ง

อาจประมาณได้ว่าในหนึ่งลูกบาศก์ไมล์มีฝุ่นถึง 4,000 ตัน (875 เมตริกตันต่อหนึ่งลูกบาศก์กิโลเมตร) จากข้อมูลเบื้องต้นนี้จึงกล่าวได้ว่าพายุฝุ่นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 ไมล์ (500 กม.) จะหอบฝุ่นลอยขึ้นไปได้มากกว่า 100 ล้านตัน (90 ล้านเมตริกตัน) เป็นปริมาณฝุ่นที่มากพอที่จะสร้างเนินเขาสูง 100 ฟุต (30 เมตร) และมีฐานกว้าง 2 ไมล์ (3 กม.) ในบริเวณที่มีพายุฝุ่นเกิดขึ้นนับพันครั้งในช่วงเวลานับพันปีทำให้บริเวณนั้นสูญเสียวัตถุผิวดินไปจำนวนมหาศาล ซึ่งอาจมีมากกว่าการกระทำของลำน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่เดียวกันเสียอีก

ฝุ่นจะล่องลอยไปในอากาศเป็นระยะทางไกลมาก อนุภาคฝุ่นหนึ่งอนุภาคที่ปลิวว่อนไปในพายุฝุ่นจะลอยไปไกลถึง 2,500 ไมล์ (4,000 กม.) การระเบิดของภูเขาไฟจะทำให้มีฝุ่นปลิวว่อนเข้าสู่บรรยากาศ การระเบิดของภูเขาไฟกรากะตัวในอินโดนีเซียเมื่อปี ค.ศ. 1883 ทำให้มีฝุ่นจำนวนมหาศาลปลิวสู่บรรยากาศ บางส่วนก็เข้าไปปนอยู่ในกระแสอากาศระดับสูงและปลิวไปรอบโลก กล่าวกันว่าทำให้แสงสีของพระอาทิตย์ตกในปี ค.ศ. 1883 ในประเทศอังกฤษทั้งประเทศผิดไปจากปกติ ซึ่งเป็นผลจากฝุ่นละอองจากภูเขาไฟกรากะตัวที่ปลิวเข้าสู่บรรยากาศ เราเรียกปรากฏการณ์นั้นว่า "ตะวันตกดินตำบลเซลซี" (เซลซีเป็นตำบลในภาคตะวันออกเฉียงใต้ของกรุงลอนดอน เป็นที่อยู่อาศัยของช่างเขียนและนักประพันธ์—ผู้แปล) และเป็นภาพที่ชื่นชอบในการเขียนภาพของศิลปินชาวอังกฤษในยุคนั้น

พายุทราย (sandstorm) ในทะเลทรายที่แท้จริง มีลักษณะเป็นหมู่เมฆทรายที่ลอยเคลื่อนไปในระดับต่ำ ตามปกติทรายจะถูกหอบสูงขึ้นไปเพียงสองสามฟุต โดยมีความสูงจากพื้นผิวมากที่สุดประมาณ 6 ฟุต พายุทรายประกอบไปด้วยอนุภาคเม็ดทรายที่ลมแรงพัดพาไป ผู้ที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับพายุทรายได้รายงานว่าถ้าให้คนยืนอยู่ ไหล่และศีรษะจะอยู่สูงกว่ามวลพายุทราย เหตุผลที่ว่าทำไมอนุภาคทรายจึงไม่ถูกหอบให้สูงขึ้นกว่านั้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าแต่ละอนุภาคของทรายจะเคลื่อนที่แบบโดดไปเป็นช่วง ๆ เรียกว่า "ทรายโดด" (saltation) เม็ดทรายจะลอยเข้าสู่กระแสลมโดยลอยเป็นแนวโค้งแล้วตกกระทบกับพื้นเป็นมุมแคบ การตกกระทบพื้นเป็นเหตุให้เม็ดทรายกระดอนเข้าสู่กระแสลมอีก ในขณะเดียวกัน พื้นผิวชั้นเม็ดทรายที่อยู่ใต้ลมจะค่อย ๆ คืบไป ทั้งนี้เป็นผลมาจากการตกกระทบของเม็ดทรายที่ลอยมา

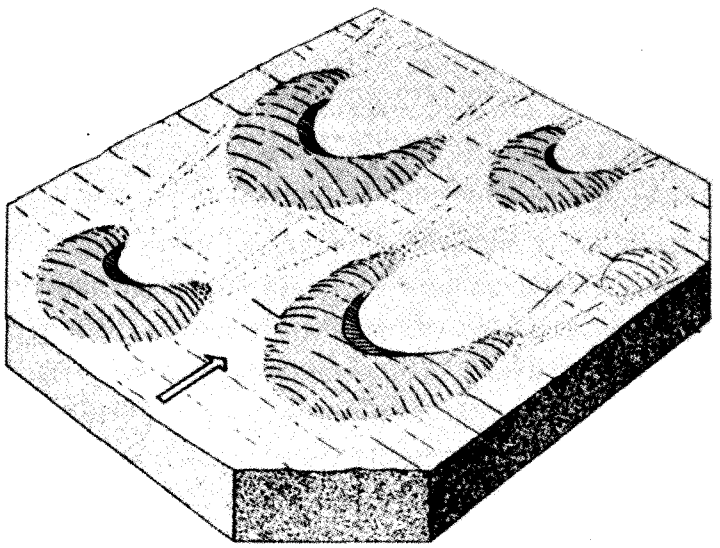


รูป 24.2 การเคลื่อนที่ของเม็ดทรายเป็นแบบการกระโดดต่อเนื่องกันไป

ผลในการกัดกร่อนของทรายที่ถูกลมพัดนี้ จะมีมากเฉพาะผิวที่โผล่ขึ้นมาเหนือระดับพื้นผิวน้อยกว่า 1–2 ฟุต (0.3–0.6 ม.) เสาโทรเลขที่อยู่ในเขตพายุทรายนั้น บริเวณโคนจะถูกทรายกัดอย่างรวดเร็วโดยไม่มีโลหะใดจะใช้เป็นที่กำบังได้

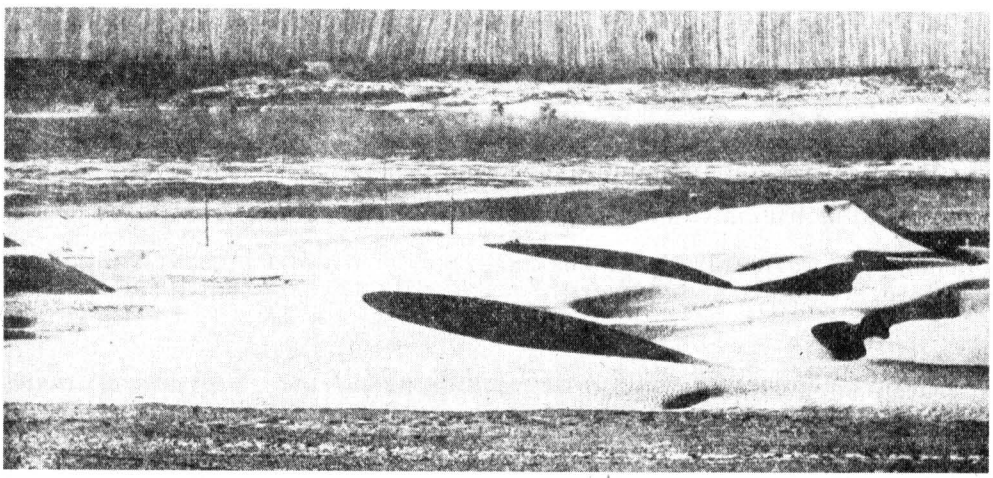
เนินทราย

"เนิน" เป็นกองทรายหรือบริเวณที่ลมพัดทรายมารวมกัน เนินอาจเคลื่อนที่อยู่เรื่อย ๆ ถ้าบริเวณนั้นไม่มีพืชปกคลุม และเนินทรายจะเปลี่ยนรูปร่างอยู่เสมอทั้งนี้เพราะกระแสลมพัดอยู่ตลอดเวลา เนินทรายบางเนินอาจไม่มีการเคลื่อนที่ ถ้าเนินทรายนั้นมีพืชปกคลุม ทั้งนี้เพราะรากพืชจะช่วยป้องกันการเคลื่อนที่ของทราย



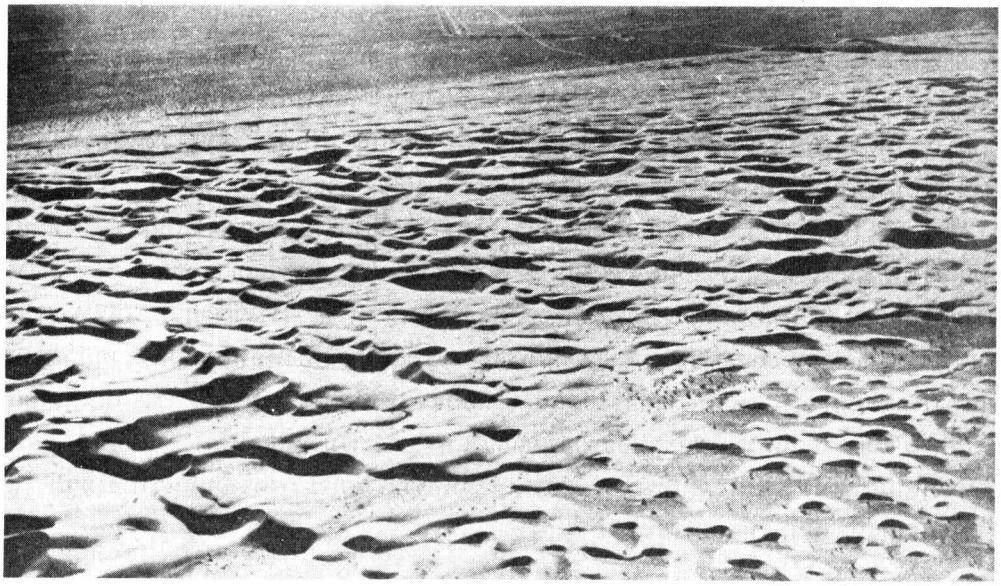
รูป 24.3 เนินทรายรูปพระจันทร์เสี้ยว ลูกศรแสดงทิศทางการพัดของลม

เนินทราย (sand dune) มีอยู่หลายชนิด เช่น เนินทรายรูปพระจันทร์เสี้ยว (crescentic dune or barchan) เป็นเนินทรายโดด ๆ แยกกัน เมื่อมองดูจากด้านบนจะเห็นเป็นรูปพระจันทร์เสี้ยว (ดูรูป 24.3) ด้านเสี้ยวของเนินทรายจะหันไปตามลม ซึ่งแสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของเนินทรายและทิศทางการพัดของลม ความลาดของเนินทรายด้านรับลมจะมีน้อย ทั้งนี้เพราะลมจะพัดให้ทรายเคลื่อนที่ขึ้นไป ทางด้านอับลมซึ่งอยู่ในวงล้อมของโค้งพระจันทร์เสี้ยว จะเป็นโค้งที่มีความชันมากเราเรียกว่า "ด้านชัน" (slip face) ซึ่งจะมีมุมเงยจากพื้นระนาบราว 35 องศา (ดูรูป 24.4) เม็ดทรายจะตกหรือเลื่อนลงไปทางด้านชันหลังจากที่ลมพัดให้มันปลิวมาตกบนเนินพระจันทร์เสี้ยว เมื่อมีลมพัดแรงจัดทรายที่ลอยมาทำให้มองเห็นเหมือนเมฆหมุนอยู่ในเสี้ยวของเนินทราย เราจึงเรียกว่า "เนินพระจันทร์พ่นควัน" (smoking crest) เนินทรายพระจันทร์เสี้ยวจะมีอยู่ในพื้นผิวเรียบที่มีก้อนกรวดปกคลุมอยู่ เนินทรายอาจเกิดขึ้นในขณะที่ทรายลอยไปตกอยู่ด้านอับลมของสิ่งกีดขวางทางลม เช่น เนินหินเล็ก ๆ หรือพุ่มไม้เตี้ย ๆ เมื่อมีทรายไปสะสมอยู่มากพอแล้ว ทรายก็จะเริ่มไหลลงไปทางด้านอับลม และจะก่อตัวขึ้นเป็นเนินทรายรูปพระจันทร์เสี้ยว ดังนั้น เนินทรายจึงมักจะวางตัวเป็นแนวไปตามลม โดยมีจุดเริ่มจากแหล่งที่มีทรายพัดพามา



รูป 24.4 เนินทรายรูปพระจันทร์เสี้ยวที่บิทท์ รัฐออรีกอน

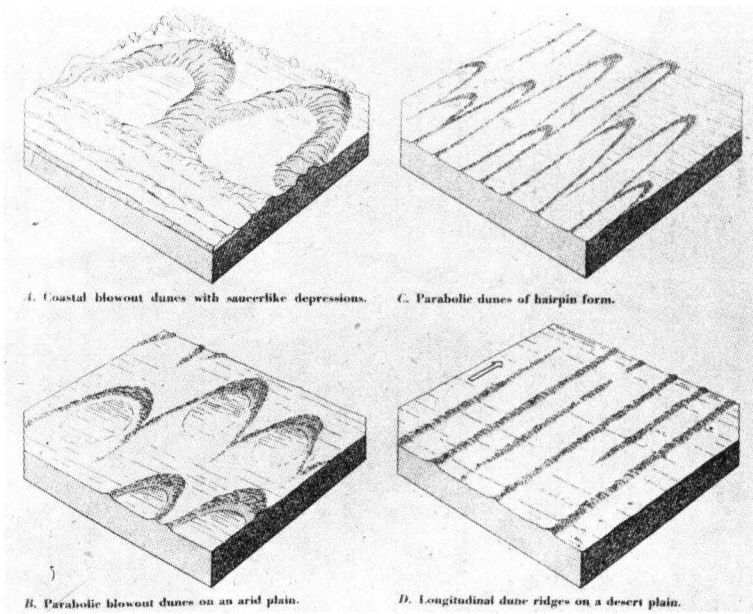
ในบริเวณที่มีทรายจำนวนมหาศาลปกคลุมพื้นที่ทั้งหมด เนินทรายจะมีลักษณะคล้ายสันคลื่น โดยมีร่องอยู่ระหว่างสันคลื่น เราเรียกเนินทรายแบบนี้ว่า "เนินทรายตามขวาง" (transverse dune) ทั้งนี้เพราะด้านเสี้ยวจะหันตั้งได้ฉากกับทิศทางลม (ดูรูป 24.5 ในหน้า 184) พื้นที่ทั้งหมดเราเรียกว่า "ทะเลทราย" (sand sea) ทั้งนี้เพราะมันคล้ายกับผิวทะเลที่โยนตัวขึ้นลงเมื่อถูกพายุ คำว่า "เอิร์ก" (erg) เราใช้เรียกเนินทรายขนาดใหญ่ในทะเลทรายสะฮารา ซึ่งนักภูมิศาสตร์ได้นำมาใช้เรียกภูมิประเทศ



รูป 24.5 ภาพถ่ายทางอากาศแสดงเนินทรายรูปต่าง ๆ บริเวณระหว่างยูมา รัฐแอริโซนา กับคาเล็กซิโก รัฐแคลิฟอร์เนีย แสดงให้เห็นเนินทรายตามขวาง เนินทรายพระจันทร์เสี้ยว (ด้านหน้า)

ที่มีลักษณะอย่างเดียวกัน เนินทรายเดี่ยว ๆ ซึ่งมีเสี้ยวชัดเจนและสมมาตรกัน ด้านลาดน้อยมักอยู่ทางด้านรับลม ส่วนทางด้านอับลมมักเป็นด้านชัน แอ่งลึกมักเกิดอยู่ระหว่างเสี้ยวพระจันทร์ ทะเลทรายจะต้องมีทรายมาก ตามปกติจะได้ทรายจากการผุพังของหินทรายที่อยู่ใต้พื้นผิวนั้นหรือได้จากที่ราบลุ่มน้ำที่อยู่ติดกัน เนินทรายตามขวางอาจเกิดอยู่ใกล้ ๆ หาดทราย ทั้งนี้เพราะมีทรายจำนวนมหาศาลและมีลมแรงพัดเข้าปะทะฝั่ง

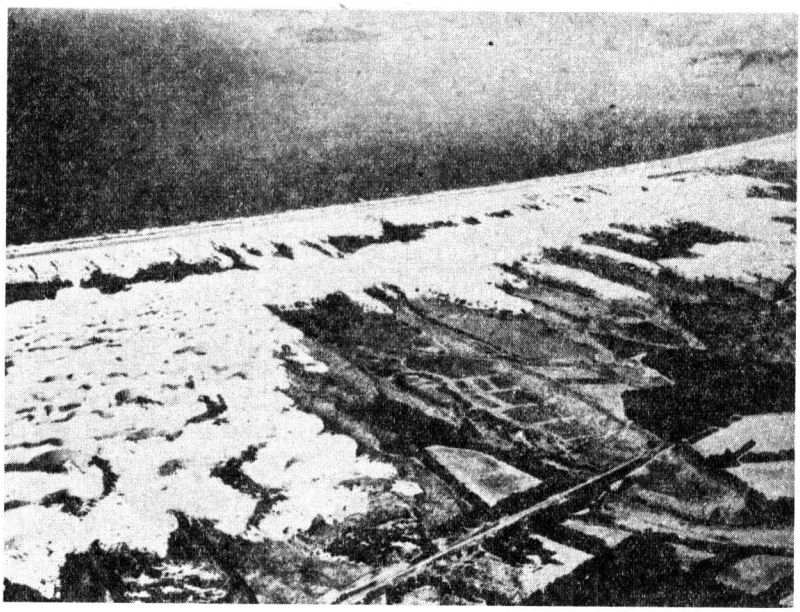
เนินทรายอีกพวกหนึ่ง เป็นเนินทรายซึ่งจะหันด้านเว้าไปตามลม ซึ่งการหันลักษณะนี้จะตรงกันข้ามกับความโค้งของเนินทรายรูปพระจันทร์เสี้ยว และเนินทรายตามขวาง เนินทรายแบบนี้จะมีรูปร่างแบบพาราโบลิก (parabolic) ชนิดธรรมดาที่สุดของเนินทรายประเภทนี้ก็คือ "เนินทรายแอ่งลมชายฝั่ง" (coastal blowout dune) มักเกิดขึ้นในบริเวณชายหาด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีทรายจำนวนมากและมีลมพัดเข้าสู่แผ่นดินเป็นประจำ แอ่งต่ำซึ่งมีรูปร่างคล้ายจานรองถ้วยนั้นเกิดจากการพัดกวาดของลมออกจากแอ่งนั้น โดยทรายจะไปทับถมกันเป็นสันโค้งคล้ายรูปเกือกม้า ด้านที่หันหน้าเข้าสู่แผ่นดินจะเป็นด้านชัน ซึ่งจะเคลื่อนที่เหนือพื้นดินไปเรื่อย ๆ และฝังต้นไม้ไว้ใต้เนินทราย เนินทรายแอ่งลมชายฝั่งมีมากตามชายฝั่งด้านตะวันออกและทางใต้ของทะเลสาบมิชิแกน ชายฝั่งด้านใต้นั้นใช้เป็นสวนสาธารณะ เช่น indiana dunes state park



รูป 24.6 เนินทราย 4 แบบ ทิศทางลมประจำแสดงด้วยลูกศร ทุกภาพมีทิศทางเหมือนกัน
(A) แอ่งลมชายฝั่งทะเล มีแอ่งคล้ายไส้กรอก
(B) แอ่งลมพาราโบลิกในเขตแห้งแล้ง
(C) เนินทรายรูปพาราโบลิก
(D) เนินทรายตามยาวในทะเลทราย

ที่ราบและที่ราบสูงในเขตแห้งแล้ง อันเป็นบริเวณที่มีพืชขึ้นน้อยจะมีเนินทรายแอ่งลมรูปพาราโบลิกเกิดขึ้น ต้นไม้พุ่มเตี้ยจะดักทรายเอาไว้ ทำให้ทรายมาสะสมกันเป็นบริเวณกว้างและมีสันต่ำ เนินทรายนี้ไม่มีด้านชันและอาจจะไม่เคลื่อนที่ในบางกรณี สันของเนินทรายจะเคลื่อนที่ไปตามลม ทำให้โค้งพาราโบลายาวออกไปจนทำให้เกิดสันทรายขนานกันขึ้น รูปทรงแบบนี้จะคล้าย ๆ กับมองปีนปักผมจากด้านบน เราจึงเรียกว่า "เนินทรายรูปปีนปักผม" (hairpin dune) อย่างไรก็ตาม เนินทรายแบบนี้ก็ยังอยู่ในตระกูลพาราโบลิก เนินทรายรูปปีนปักผมจะคงรูปร่าง เพราะมีพืชขึ้นปกคลุมไว้ (ดูรูป 24.7 ในหน้า 186)

อีกชนิดหนึ่งของเนินทรายเป็นแบบเนินทราย "ตามยาว" (longitudinal dune) ทั้งนี้เพราะสันเนินทรายจะวางตัวขนานกับทิศทางของลม บริเวณที่ราบในทะเลทรายและที่ราบสูงที่มีทรายน้อย แต่ว่ามีลมพัดแรงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งจะทำให้เกิดเนินสันทรายตามยาวขึ้น ตามปกติเนินทรายนี้จะ



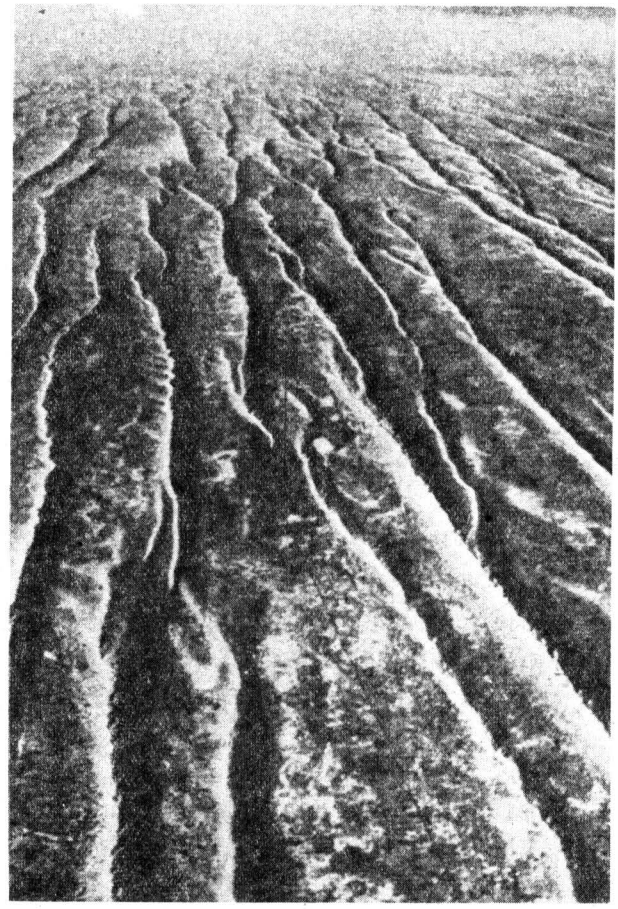
รูป 24.7 ที่ปลายลูกศรในภาพนี้ แสดงให้เห็นเนินทรายรูปปีนปีกผม ซึ่งเกิดต่อเนื่องมาจากชายหาด และคงสภาพอยู่ได้ด้วยต้นไม้ที่ขึ้นบนเนินทรายนั้น เนินทรายตามขวางซึ่งยังคงเคลื่อนที่อยู่ จะเคลื่อนที่เข้าไปในแอ่งลม ภาพนี้เป็นบริเวณอ่าวซันลุยส์ โอบิสโป รัฐแคลิฟอร์เนีย

สูงเพียงสองสามฟุต แต่อาจมีความยาวนับไมล์ ในบางบริเวณเนินทรายตามยาวอาจมาจากเนินทรายรูปปีนปีกผม ทั้งนี้ถ้าสันเนินที่ขนานกันเป็นลักษณะเด่นของเนินทรายนั้น

สันเนินทรายตามยาวจะหันแนวจนขนานกับทิศทางลม เนินทรายชนิดนี้ปกคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างในตอนกลางของออสเตรเลีย (ดูรูป 24.8 ในหน้า 187) ความสูงของสันเนินทรายโดยเฉลี่ย 30–50 ฟุต (10–15 ม.) และช่วงกลางระหว่างแนวประมาณ 0.25–1.5 ไมล์ (0.4–2.4 กม.) ความยาวของเนินทรายนี้ยาวตั้งแต่ 25–50 ไมล์ (40–80 กม.)

ในท้องทะเลทรายอันกว้างใหญ่ในแอฟริกาเหนือ คาบสมุทรอาหรับ และอิหร่านภาคใต้จะมีเนินทรายเกิดขึ้นอย่างสลับซับซ้อน ชนิดหนึ่งของเนินทรายเหล่านี้คือ "เนินสันทรายรูปกริด "(seif dune or sword dune) ซึ่งมีทรายมาสะสมกันจำนวนมหาศาลและรูปโค้งพระจันทร์เสี้ยวจะมีหลายเนินต่อเนื่องกันไป โดยด้านโค้งจะอยู่สลับกันและสันเนินก็จะมีส่วนยอดและส่วนแอ่นสลับกันไป เนินทรายรูปกริดสูงเพียงไม่กี่ฟุตและจะยาวนับสิบไมล์ เนินทรายชนิดอื่น ๆ ในทะเลทรายสะฮารา ได้แก่ เนินทรายรูปดาว เนินทรายพีระมิด เป็นเนินทรายขนาดมหึมา เมื่อมองจากด้านบนจะเห็นฐานคล้ายดาว

หลาย ๆ ดวง สันทรายจะอยู่รวมกัน ณ จุดยอดของเนินทราย แล้วกระจายออกไปจากศูนย์กลางในทุกทิศทุกทาง ยอดเนินเมื่อวัดจากฐานอาจสูงถึง 300 ฟุต (100 ม.) หรือสูงมากกว่านี้ เนินทรายรูปดาวจะอยู่กับที่เป็นเวลาหลายศตวรรษ และใช้เป็นที่อาศัยสำหรับนักท่องเที่ยวผ่านทะเลทรายได้อย่างดี



รูป 24.8 ภาพถ่ายเฉียงแสดงให้เห็นเนินทรายตามยาว สันทรายนี้ทอดแนวไปจนสุดสายตา เป็นเนินทรายในทะเลทรายซิมสัน ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอลิส สปริง ออสเตรเลีย

เนินทรายชายหาดกับมนุษย์

หาดทรายที่อยู่ติดแผ่นดินนั้นตามปกติจะมีเนินทรายแคบ ๆ โดยเป็นเนินทรายและแอ่งที่มีรูปร่างแปลกประหลาด ซึ่งสิ่งนี้ทำให้เกิด "เนินทรายส่วนหน้า" (foredune) ตามปกติจะมีพืชชายหาดขึ้นปกคลุมอยู่ ซึ่งก็มีเพียงไม่กี่ชนิดเท่านั้นที่จะขึ้นได้ เราจึงเรียกเนินทรายประเภทนี้อีกชื่อหนึ่งว่า "เนินทรายพฤกษา" (phytogenic dune)

ตามเนินทรายชายหาดส่วนหน้า ซึ่งมีพืชชายหาดและพืชขนาดเล็กอื่น ๆ ขึ้นอยู่ พืชเหล่านั้นจะช่วยดักเม็ดทรายจากชายหาดที่กระเด็นลึกเข้าไปในพื้นดิน เป็นผลให้สันเนินทรายส่วนหน้าอยู่สูงกว่าระดับน้ำขึ้นหลายฟุต ตัวอย่างเช่น ยอดสูงสุดของเนินทรายแลนเดอของฝรั่งเศสสูงถึง 250—300 ฟุต (80—90 ม.) และมีความกว้าง 2—6 ไมล์ (3—10 กม.)

คลื่นที่ซัดเข้าสู่ชายหาดที่เกิดจากพายุในขณะที่น้ำขึ้นสูง เมื่อน้ำลดลง น้ำที่ค้างอยู่บนเนินทรายจะไหลลงทะเลอย่างรวดเร็ว น้ำจะกัดเซาะส่วนบนของเนินทรายและหาดทรายลงไป น้ำที่กระทบชาย

ฝั่งก็จะกัดเซาะชายฝั่งให้เป็นโพรง ทำให้ทรายกระจายไปทั่วชายหาดเป็นบริเวณกว้าง ในขณะที่น้ำขึ้นตลอดแนวชายฝั่ง กำลังของคลื่นจะทำให้ชายฝั่งเกิดการพังทลายมากขึ้น ชายฝั่งจะชันขึ้น และกำลังการกระทำของพายุนั้นก็จะกระจายไปทั่วชายฝั่งเช่นกัน ในช่วงที่เกิดพายุชายฝั่งจะมีทรายมาทับถมเพิ่มขึ้น และในช่วงเวลานั้น สันทรายจะมีทรายเพิ่มขึ้น ถ้าสันทรายนั้นมีพืชขึ้นอยู่บ้าง ในกรณีเช่นนี้หาดทรายส่วนหน้าจะก่อตัวเป็นคันกั้นน้ำขึ้นโดยให้น้ำขังอยู่ในแอ่งด้านติดพื้นดินใหญ่

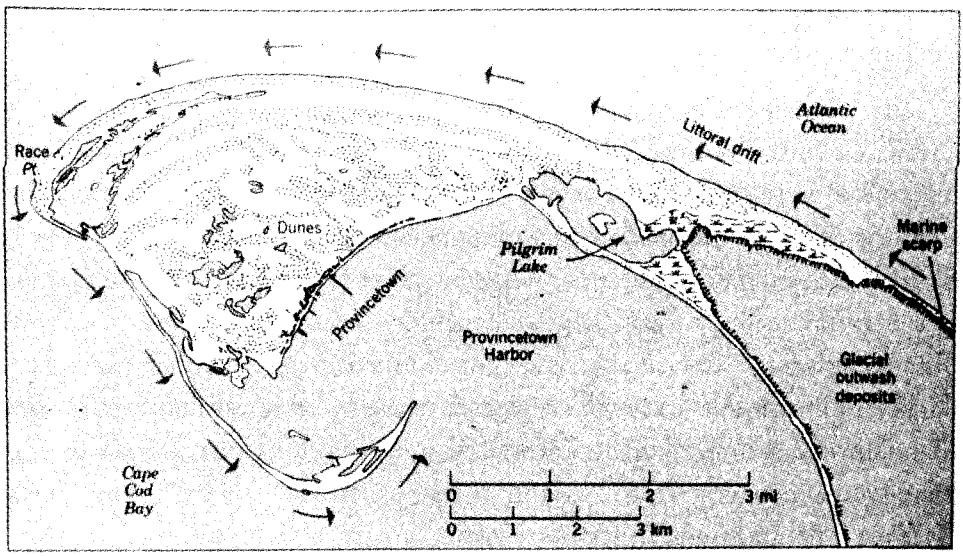
ถ้าพืชที่ปกคลุมสันเนินทรายถูกทำลายลงจากยานพาหนะหรือการสัญจรทางเท้าหรือการถากถางเพื่อใช้พื้นที่สำหรับทำถนนหรือก่อสร้างอาคาร จะมีส่วนทำให้แอ่งลมวิวัฒนาการขึ้นอย่างรวดเร็ว แอ่งที่เกิดขึ้นจะยาวตัดสันทรายไป ในขณะที่มีพายุเกิดขึ้นในช่วงน้ำขึ้น น้ำไหลผ่านช่องแคบ ๆ จะไหลเชี่ยวเข้าสู่บึงหรือที่ชื้นแฉะหรือทะเลสาบน้ำเค็มที่อยู่ตอนหลังเนินทราย ทรายที่ไหลผ่านช่องแคบจะกระจายไปทั่วบริเวณที่น้ำขึ้นถึง เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การพัดพามาจากที่สูง" (overwash) แอ่งน้ำขึ้นอาจจะเกิดได้โดยวิธีการนี้ แต่มีอยู่เพียงไม่กี่แห่งเท่านั้นที่คงสภาพอยู่ได้

ชุมชนชายฝั่งทางตะวันออกของสหรัฐฯ เป็นชุมชนที่ตั้งอยู่บนสันเนินทรายซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการทำลายสิ่งแวดล้อมในบึงและชวากทะเล แต่สิ่งนี้นับเป็นผลเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการแตกตัวของเนินทรายตามแนวชายฝั่งของทะเลเหนือ ซึ่งเป็นระบบการกั้นน้ำทะเลออกไปจากพื้นที่ที่ชาวบ้านเข้าไปถือครอง การป้องกันชายฝั่งของเนเธอร์แลนด์นั้นต้องทำอย่างแข็งแรง ทั้งนี้เพื่อป้องกันชีวิตและทรัพย์สินมหาศาลของประชาชน ทั้งนี้เพราะพายุสามารถทำให้สันเนินทรายหักได้

การทำลายสิ่งแวดล้อมอีกรูปแบบหนึ่งที่สัมพันธ์กับเนินทรายคือ การเคลื่อนที่ของทรายอย่างรวดเร็วไปตามลม ซึ่งจะเกิดเมื่อสถานภาพของเนินทรายนั้นถูกเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบที่คงที่อยู่แล้วหรือจากที่เคยมีต้นไม้ปกคลุมอยู่ เมื่อต้นไม้ถูกทำลายไปทรายที่ปลิวว่อนไปตามลมจะทำให้รูปร่างของเนินทรายเปลี่ยนไปทำให้เกิดสันและด้านชัน เนินทรายแอ่งลม (blowout dune) จะเกิดขึ้น จากการสังเกตจะเห็นว่าเม็ดทรายจะไปตกเป็นพื้นลาดอยู่ตามแนวพืชพรรณ ถนน อาคาร และพื้นที่เกษตรกรรมในเขตแลนเดอของฝรั่งเศส เนินทรายชายฝั่งตะวันตกเฉียงใต้ของฝรั่งเศส จะก่อเนินเข้าไปในพื้นดินจนทับถมบ้านและโบสถ์ และเป็นสาเหตุที่ทำให้คนทิ้งเมืองไปทั้งหมดก็มี

ตัวอย่างที่ดีตัวอย่างหนึ่งที่มนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้องกับเนินทรายก็คือบริเวณโปร์วินซ์แลนด์ในแหลมคอดในสหรัฐอเมริกา เป็นเมืองที่ตั้งอยู่ปลายสุดของแหลมทำให้เกิดแหลมลักษณะคล้ายกำปั้นมือ เขตโปรวินซ์แลนด์นี้ตั้งอยู่บนชายหาดทรายที่กระแสน้ำเลียบชายฝั่งพัดพามาจากทางด้านเหนืออันเป็นชายฝั่งที่เกิดจากการทับถมของวัตถุที่ธารน้ำแข็งพัดพามาทับถม โครงสร้างของพื้นดินบริเวณปลายแหลมรูปกำปั้นมือนั้นประกอบด้วยสันหาดทราย และรูปร่างได้เปลี่ยนไปโดยมีความสูงเพิ่มขึ้นจากการกระทำของเนินทราย คนได้มาตั้งถิ่นฐานในเมืองโปรวินซ์ทาวน์เป็นแห่งแรก ปัจจุบันนี้เมืองนี้ได้ขยายตัวคลุมบริเวณชายฝั่งตอนใต้ของโปรวินซ์แลนด์ สันทรายมีพืชขึ้นปกคลุม โดยมีหญ้าและต้นไม้เล็กๆ ขึ้นคลุมบริเวณสูงสุดของเนินทราย ต้นสนและป่าไม้อื่นขึ้นอยู่ในบริเวณที่ต่ำและในบริเวณร่องระหว่างสันเนินทราย ทำให้สันทรายคงรูปตามธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตาม เนินทรายอาจจะพัง

ทลายได้ โดยเฉพาะสันเนินทรายที่อยู่ตามชายฝั่งทางเหนือ ซึ่งประชาชนได้ทำเป็นคอกปศุสัตว์ให้สัตว์กินหญ้าบนสันเนินทรายและได้ถางป่าไม้ลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เนินทรายเริ่มพังทลายและไหลตามกระแสน้ำไปทางใต้



รูป 24.9 แผนที่สเกตบริเวณโปรวินซ์แลนด์ ในเคปคอด รัฐแมสซาชูเซตส์ แผนที่นี้สเกตเมื่อปี ค.ศ. 1887 แสดงให้เห็นเนินทรายเป็นแถบ ๆ

ราวปี ค.ศ. 1725 เมืองโปรวินซ์ทาวน์มีทรายมาทับถมมากขึ้น อาคารบางส่วนถูกฝังอยู่ใต้ทราย ต้องมีการขนทรายออกจากถนนเป็นจำนวนมาก ราวต้นปี ค.ศ. 1800 สันทรายหลัก ๆ ค่อย ๆ เคลื่อนตัวลงทางใต้ ในอัตราโดยประมาณปีละ 90 ฟุต และในปี ค.ศ. 1825 ได้มีการปลูกพืชชายหาดและออกกฎหมายห้ามเลี้ยงสัตว์และตัดต้นไม้ เป็นผลทำให้บริเวณนั้นคงสภาพอยู่ได้เกือบทั้งหมด ยกเว้นเฉพาะด้านเหนือสุด แม้แต่ในปัจจุบันนี้ด้านชันของเนินทรายก็ค่อย ๆ เคลื่อนเข้าไปในบริเวณทางหลวงสายหลักและในทะเลสาบพิลกริม ปัจจุบันพื้นที่นี้เป็นส่วนหนึ่งของอุทยานแห่งชาติชายฝั่งเคปคอด (Cape Cod National Seashore) เจ้าหน้าที่ได้ปลูกต้นไม้ขึ้นมาใหม่และให้มีการสัญจรโดยยวดยานให้น้อยที่สุดเพื่อควบคุมไม่ให้ทรายเกิดการเคลื่อนที่

ดินเลิสส์

ในหลายส่วนของโลกมีผิวดินที่เกิดจากลมพัดพาวัตถุมาทับถมไว้ โดยพายุฝุ่นได้หอบเอาฝุ่นมาทับถมไว้เป็นเวลานับพันปี วัตถุที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า **"ดินเลิสส์" (loess)** โดยทั่วไปแล้วดินจะมีสีคล้ายคลึงกันแต่การวางตัวของผิวดินไม่เป็นชั้นมากนัก ดินเลิสส์มีแนวโน้มว่าจะแตกหรือกระเทาะในแนวดิ่ง ซึ่งจะเห็นได้ตามหน้าผาหรือตามร่องน้ำทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น รอยกระเทาะนั้นอาจจะเกิดจากการหดตัวของมวลดินในขณะที่มันถูกอัดแน่นหลังจากที่ตกลงบนพื้นดิน

อาจเป็นไปได้ว่าแหล่งดินเลิสส์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดนั้นอยู่ในประเทศจีน ปกติมีความหนาเกินกว่า 100 ฟุต (30 ม.) บริเวณที่ดินเลิสส์หนามากที่สุดนั้นมีความหนาถึง 300 ฟุต (90 ม.) ดินเลิสส์ปกคลุมพื้นที่ทางภาคเหนือของจีนหลายพันตารางไมล์ ดินนี้ถูกหอบมาจากตอนในของทวีปเอเชีย ซึ่งลมแห้งในฤดูหนาวพัดพามา ดินเลิสส์ยังมีอยู่ในยุโรปตอนกลาง ในอาร์เจนตินา และนิวซีแลนด์ แต่ไม่กว้างและหนาเหมือนในประเทศจีน

ในสหรัฐอเมริกามีแหล่งดินเลิสส์ที่สำคัญอยู่ในหุบเขาแม่น้ำมิสซูรี-มิสซิสซิปปี ส่วนใหญ่ของที่ราบแพรรีในอินเดียนา อิลลินอยส์ ไอโอวา มิสซูรี เนแบรสกาและแคนซัส มีชั้นดินเลิสส์ปกคลุมอยู่มีความหนาตั้งแต่ 3—100 ฟุต (1—30 เมตร) นอกจากนี้ยังมีอยู่ตามแนวพื้นดินริมฝั่งแม่น้ำมิสซิสซิปปีตอนล่าง ซึ่งเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำ ตลอดไปจนถึงแม่น้ำเทนเนสซีและมิสซิสซิปปี แหล่งดินเลิสส์อื่นๆมีอยู่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของรัฐวอชิงตันและทางตะวันตกของรัฐไอดาโฮ การทับถมของดินเลิสส์ในทวีปอเมริกาและยุโรปมีความสัมพันธ์โดยตรงกับธารน้ำแข็งภาคพื้นทวีปในยุคไพลสโตซีน ในช่วงเวลาที่น้ำแข็งปกคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของทวีปอเมริกาเหนือและยุโรป เป็นไปได้ว่ามีภูมิอากาศหนาวและแห้งแล้งอยู่ตามบริเวณแผ่นดินโดยรอบของแผ่นน้ำแข็ง ซึ่งจะมีลมพัดแรงไปทางใต้และทางตะวันออกเหนือพื้นดินที่ว่างเปล่า และได้หอบเอาอนุภาคฝุ่นจากที่ราบน้ำท่วมถึงของแม่น้ำเกลียวเชือกซึ่งได้น้ำมาจากการละลายของน้ำแข็ง ฝุ่นนี้จะไปตกอยู่บนพื้นดินระหว่างลำน้ำ ทำให้เกิดพื้นดินราบเรียบและได้ระดับ ทางด้านตะวันออกของลำน้ำดินเลิสส์จะหนาเนื่องจากมีลมตะวันตกพัดประจำและปรากฏให้เห็นตลอดแนวลำน้ำที่ไหลอยู่ในปัจจุบัน

ดินเลิสส์มีความสำคัญต่อการเกษตรกรรมอยู่มาก ที่ราบและที่ราบสูงดินเลิสส์จะเป็นดินสีดำที่อุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การปลูกธัญพืชมาก ดินดังกล่าวได้แก่ ดินแพรรี ดินเชอโนเซม ดินเชสต์-นัทและดินสีน้ำตาล พื้นที่ที่ให้ผลผลิตธัญพืชสูงในภาคใต้ของรุสเซีย บริเวณทุ่งหญ้าปัมปัสในอาร์เจนตินา ทางเหนือของประเทศจีนนั้นเป็นบริเวณที่เป็นดินเลิสส์ หลายรัฐของสหรัฐอเมริกาที่เป็นแหล่งปลูกข้าวโพดที่สำคัญก็อยู่ในบริเวณที่เป็นดินเลิสส์ เช่น รัฐไอโอวาและอิลินอยส์ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีฝนตกเพียงพอ ข้าวสาลีก็ปลูกมากทางตะวันตกต่อจากที่ราบดินเลิสส์ ได้แก่ ในรัฐแคนซัส เนแบรสกา และในเขตพาลุยส์ ทางตะวันออกของวอชิงตัน

เนื่องจากดินเลิสส์จะวางตัวเป็นแนวดิ่งตามแนวหุบเขาและมันสามารถคงตัวอยู่ได้โดยไม่เลื่อนหรือไหลลงมา แต่ในขณะเดียวกันมันก็สามารถขุดลึกลงไปได้ง่าย จึงมีการขุดทำเป็นถ้ำเพื่ออยู่อาศัยทั้งในประเทศจีนและยุโรปตอนกลาง ในประเทศจีนนั้นมีทางและถนนเก่าที่ตัดผ่านเข้าไปในบริเวณดินเลิสส์ ทั้งนี้เป็นผลของการร่วนของดินเลิสส์ที่อยู่ในท้องถนนซึ่งถูกลมและน้ำพัดพาไป

มนุษย์เป็นตัวการที่ทำให้เกิดการพัดพาฝุ่น

เกษตรกรรมบริเวณพื้นราบที่กว้างใหญ่และมีสภาพภูมิอากาศบางฤดูกาลขาดแคลนน้ำ ซึ่งจะมีหญ้าขึ้นได้เพียงเบาบาง จึงเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดการพัดพาฝุ่นได้เป็นอย่างดี ส่วนใหญ่ของที่ราบเกรตเพลน บางส่วนของรัฐนิวเม็กซิโก เทกซัส โอกลาโฮมา แคนซัส โคโลราโด เนแบรสกา และ

ดาโกตา เป็นบริเวณที่เกิดพายุฝุ่นขึ้นหลายครั้งเป็นเวลานับศตวรรษ แนวปะทะอากาศเย็นชนิดรุนแรงจะกวาดไปบนพื้นที่นี้ แล้วหอบฝุ่นให้ลอยสูงขึ้นไปในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ในช่วงเวลาที่บรรยากาศมีความชื้นต่ำ อย่างไรก็ตาม การพัดพาฝุ่นและการหอบฝุ่นนั้นได้สร้างความเสียหายอย่างมากในช่วงแห้งแล้งราว ๆ กลางปี ค.ศ. 1930 ซึ่งเป็นปีที่มีการขยายพื้นที่การปลูกข้าวสาลีอย่างกว้างขวาง เดิมบริเวณนี้เป็นทุ่งหญ้ามีดินสีน้ำตาลอันอุดมไปด้วยฮิวมัสและดินเชสต์นัท ในช่วงแห้งแล้งนั้นได้เกิดพายุฝุ่นขึ้นหลายครั้ง มีเมฆสีดำปกคลุมอยู่ทั่วท้องฟ้า ทัศนวิสัยไม่ดี ปรากฏการณ์เช่นนี้เราเรียกว่า "ชามฝุ่น" (dust bowl) ดินชั้นบนจะถูกพัดพาออกไปจากบริเวณนั้นลึกหลายนิ้วโดยพัดพาออกในลักษณะของฝุ่นที่ลอยไปกับลม ในขณะที่ตะกอนซึ่งหยาบกว่าและทรายจะตกทับถมตลอดแนวรั้วและรอบ ๆ อาคารบ้านเรือน การที่ลมพัดพาดินชั้นบนออกไป ทำให้การปลูกพืชไม่ได้ผล ผู้คนจึงทิ้งฟาร์มไปเป็นจำนวนมาก และอพยพไปทางตะวันตกเพื่อตั้งถิ่นฐานใหม่อยู่ในแคลิฟอร์เนีย

นักวิทยาศาสตร์ที่ทำการศึกษาปรากฏการณ์ชามฝุ่น ได้แสดงความคิดเห็นต่าง ๆ กันถึงผลของการเพาะปลูกและการทำปศุสัตว์เป็นเหตุให้เกิดการพัดพาฝุ่น ความแห้งแล้งนั้นเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่มนุษย์ไม่สามารถควบคุมได้ แต่ทุ่งหญ้าธรรมชาติที่ไม่ถูกทำลายโดยการไถพรวนจะช่วยป้องกันการสูญเสียหน้าดินและลดการพัดพาฝุ่นให้น้อยลง

อย่างไรก็ตาม มนุษย์ไม่สามารถจะป้องกันวัฏจักรของความแห้งแล้งบริเวณที่ราบเกรตเพลนได้ ทำได้แต่เพียงป้องกันไม่ให้เกิดการพัดพาฝุ่นและการหอบฝุ่นไปเป็นจำนวนมากๆ เท่านั้น ฟาร์มบางแหล่งได้มีการปรับปรุงโดยทำร่องลึก (listed furrow) เพื่อดักฝุ่นที่ลอยขึ้นมา การคลุมพื้นดินด้วยซังข้าวที่เกี่ยวแล้วจะช่วยลดการพัดพาฝุ่นให้น้อยลงได้ แนวต้นไม้จะช่วยลดการพัดกวาดไปบนผิวดินของลมได้มาก

กิจกรรมของมนุษย์ในเขตทะเลทรายที่ร้อนและแล้งมีส่วนช่วยให้เกิดเมฆฝุ่นได้อย่างมาก ในทะเลทรายทางตะวันตกเฉียงเหนือของอินเดียและปากีสถาน (เป็นทะเลทรายที่อยู่ตามพรมแดนแม่น้ำสินธุ) การทำปศุสัตว์และการเดินทางของมนุษย์เป็นเหตุให้ดินแตกเป็นเม็ดละเอียด ทำให้เกิดแผ่นเมฆฝุ่นลอยอยู่เหนือบริเวณนั้นเป็นเวลานานและอาจสูงขึ้นไป 30,000 ฟุต (9 กิโลเมตร) ในทะเลทรายอื่น ๆ เช่น ทางเหนือของแอฟริกา และทางตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐ ฯ ตามปกติพื้นดินจะไม่มีฝุ่นมีแต่เพียงก้อนหินทรายหยาบ เพราะฝุ่นที่ละเอียดอ่อนถูกพัดไปหมดแล้ว พื้นผิวนี้จะถูกทำลายอย่างรวดเร็วจากล้อของยานพาหนะ ทำให้ดินแตกละเอียดและการพัดพาฝุ่นจะเกิดขึ้น กล่าวกันว่ายุทธภูมิรถถังกลางทะเลทรายแอฟริกาเหนือในสงครามโลกครั้งที่สอง เป็นเหตุให้เกิดเมฆฝุ่นขนาดมหึมาและพายุฝุ่นนั้นลอยไปถึงทะเลแคริบเบียน

คำถามทบทวนที่ 24

1. จงอธิบายกระบวนการพัดกวาดและการขัดสีซึ่งเกิดจากการกระทำของลม
2. การพัดกวาดจะเกิดได้ดีที่สุดในสภาวะใด การพัดกวาดทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศแบบใด
3. ลานกรวดทะเลทรายคืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร ทะเลทรายหินกรวดคืออะไร
4. การขัดสีของลมทำให้เกิดภูมิประเทศแบบใด
5. พายุฝุ่นเกิดขึ้นได้อย่างไร พายุฝุ่นครั้งหนึ่ง ๆ จะพัดพาอนุภาควัตถุไปได้มากน้อยเพียงใด และฝุ่นนั้นล่องลอยไปในอากาศได้ไกลเพียงใด
6. เม็ดทรายเคลื่อนที่ไปพร้อมกับพายุทรายได้อย่างไร เม็ดทรายแต่ละเม็ดจะลอยตามลมไปได้สูงเพียงใด การขัดสีจากลมจะเกิด ณ ระดับใดมากที่สุด
7. เนินทรายคืออะไร เนินทรายเคลื่อนไหวกับเนินทรายหยุดนิ่งต่างกันอย่างไร
8. จงอธิบายเนินทรายรูปพระจันทร์เสี้ยว เนินทรายนี้จะเคลื่อนที่ไปในทิศใด
9. เนินทรายตามขวางคืออะไร ทะเลทรายในเนินทรายตามขวางคืออะไร สถานที่เช่นใดที่เหมาะที่สุดที่จะมีเนินทรายเกิดขึ้น ภูมิประเทศที่เรียกว่าเอิร์กคืออะไร
10. จงอธิบายเนินทรายแอ่งลมชายฝั่ง เนินทรายแอ่งลมรูปพาราโบลิกและเนินทรายรูปบีนปักผม
11. จงอธิบายเนินทรายตามยาว เนินทรายนี้ชี้บอกทิศทางลมประจำได้อย่างไร
12. เราจะพบสันทรายรูปกริดและเนินทรายรูปดาวได้ที่ไหน
13. กิจกรรมของมนุษย์ทำลายสิ่งแวดล้อมของเนินทรายส่วนหน้าของชายฝั่งได้อย่างไร และเนินทรายนี้เป็นคันดินกั้นหนองบึงชายฝั่งกับทะเลได้อย่างไร สิ่งใดคือตัวการควบคุมการขยายตัวของเนินทรายเข้าไปในแผ่นดิน
14. ดินเลิสส์คืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร ดินเลิสส์มีโครงสร้างอย่างไร
15. จงอธิบายถึงลักษณะการกระจายของดินเลิสส์ในโลก ดินเลิสส์ทางตอนเหนือของจีนมีกำเนิดจากสิ่งใด
16. ดินเลิสส์ที่ปรากฏอยู่ในบริเวณลุ่มแม่น้ำมิสซิสซิปปี–มิสซูรี มีลักษณะเช่นไร ดินเลิสส์มีความสำคัญด้านเศรษฐกิจอย่างไร
17. กิจกรรมของมนุษย์มีส่วนทำให้เกิดการพัดกวาดเป็นบริเวณกว้างได้อย่างไร

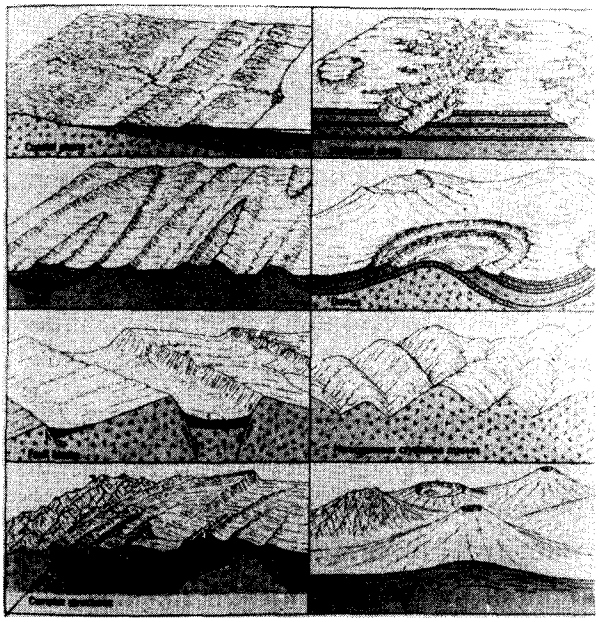
บทที่ 25

ที่ราบชายฝั่ง ชั้นหินระนาบ โดม

ในบทก่อน ๆ ที่กล่าวถึงการเกิดลักษณะภูมิประเทศจากการผุกร่อนโดยกาลอากาศ การไหลตามพื้นลาด ลำน้ำ น้ำแข็ง คลื่นและลม ซึ่งได้กล่าวถึงลักษณะต่าง ๆ ในส่วนประกอบและโครงสร้างของหินน้อยมาก ทั้งที่สิ่งนี้เป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมรูปร่างและขนาดของภูมิประเทศ จากการที่สมมติว่าหินฐานมีส่วนประกอบเป็นอย่างเดียวกันหมด จึงสามารถอธิบายถึงแนวความคิดง่าย ๆ เกี่ยวกับการกัดกร่อน ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากตัวการกัดกร่อน ตามความเป็นจริงแล้ว อาจเป็นไปได้ที่ในบริเวณอันกว้างใหญ่ที่หินฐานมีรูปแบบอันเดียวกันตลอด การกัดกร่อนของตัวการทั้งหลายจะทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศตามจินตนาการได้ ส่วนบริเวณอื่นๆ หินชั้นอาจเอียง (tilted) โก่งตัว (folded) เป็นโดม (domed) หรือเป็นรอยเลื่อน (faulted) หินแปรอาจจะจัดเรียงตัวเป็นแนว หินอัคนีชนิดเย็นตัวภายใน (intrusive igneous rock) จะแข็งตัวอยู่ในหินหลาย ๆ ชนิด ในแต่ละโครงสร้างและลักษณะภูมิประเทศของหินฐานดังกล่าวจะได้กล่าวถึงหัวข้อต่อไปนี้

การจำแนกลักษณะภูมิประเทศ

จากภาพที่แสดงให้เห็นข้างล่างนี้ (25.1) เราจำแนกลักษณะภูมิประเทศออกเป็นหลายกลุ่ม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและส่วนประกอบของหินฐานที่ประกอบกันเป็นภูมิประเทศนั้น



รูป 25.1 มวลแผ่นดินสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่ม ๆ ได้ดังภาพนี้

ก. โครงสร้างที่ไม่ถูกรบกวน

1. ที่ราบชายฝั่ง (coastal plains) ปัจจุบันนี้แนวชายฝั่งที่ยกตัวขึ้นจะถูกรองรับโดยชั้นของหินชั้นซึ่งวางตัวทาบอยู่บนหินเก่าของตัวทวีป

2. ชั้นหินแนวระนาบ (horizontal strata) เป็นชั้นของหินชั้นที่ส่วนมากวางตัวอยู่ในแนวนอน ซึ่งได้รับการยกตัวขึ้นเป็นบริเวณกว้าง แต่ขณะเดียวกันก็ไม่ถูกรบกวนมากนัก ธารลาวาที่ไหลบนพื้นระนาบมีความหนามากและไหลกระจายไปเป็นบริเวณกว้าง

ข. โครงสร้างที่ถูกรบกวน

3. โดมและแอ่งแผ่นดิน (domes and basins) บริเวณที่ถูกยกตัวหรือทรุดลงไปเป็นวงกลมหรือรูปไข่ ทำให้หินชั้นโค้งนูนขึ้นหรือโค้งเว้าลง

4. รอยโค้ง (folds) ชั้นของหินชั้นที่เกิดจากกระบวนการสร้างภูเขา การเคลื่อนไหวของชั้นหินจะเป็นแนวยาวคล้ายคลื่น รอยโค้งอาจกว้างและปรากฏให้เห็นบนเปลือกโลกหรือจมอยู่ใต้เปลือกโลก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการดันตัวใต้เปลือกโลก

5. รอยเลื่อน (fault blocks) มวลเปลือกโลกของหินบางชนิด หรือโครงสร้างบางอย่างเกิดการแตกหักจากการเลื่อนตัวเป็นรอยตัด โดยชั้นหินชั้นเดียวกันจะอยู่ต่างระดับกัน การเลื่อนตัวของชั้นหินอาจทำให้ชั้นหินเอียงได้ด้วย

6. ผลึกหินต่อเนื่อง (homogeneous crystalline) มวลหินอัคนีที่เย็นตัวภายในหรือหินแปรซึ่งมีรูปแบบอย่างเดียวกันตลอดมวล เป็นมวลหินที่คงทนต่อการผุพังและกัดกร่อน

7. แนวหินแปร (belted metamorphics) เป็นแนวหินแปรแคบ ๆ ที่เกิดขนานกับแนวภูเขาหรือหุบเขา

8. โครงสร้างแบบผสม (complex structure) มวลเปลือกโลกที่เกิดการรวมกันระหว่างการโค้งงอ การเลื่อนหรือหินอัคนีที่เย็นตัวภายใน ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศที่ผิดปกติออกไปและสลับซับซ้อน

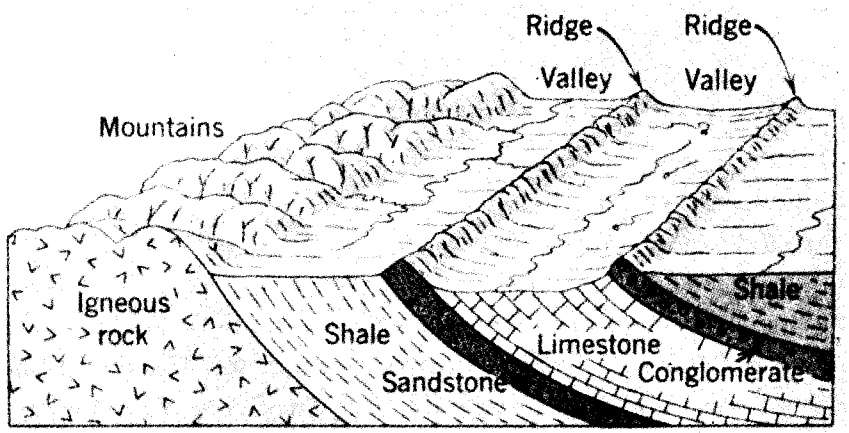
ค. ภูเขาไฟและลักษณะที่สัมพันธ์กัน (volcanoes and related forms) มวลหินทุกชนิดเป็นผลมาจากการดันตัวของหินเหลวออกมานอกเปลือกโลก ลักษณะภูมิประเทศชนิดนี้รวมถึงภูเขาไฟชนิดต่าง ๆ และธารลาวา

ลักษณะภูมิประเทศชนิดที่ถูกรบกวนและชนิดที่ไม่ถูกรบกวนจะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ภูมิประเทศชนิดที่ไม่ถูกรบกวนจะมีความต่างระดับของพื้นผิวน้อย (ที่ราบหรือที่ราบสูง) ทั้งนี้ก่อนที่จะมีการกัดกร่อนพัดพาเกิดขึ้นในบริเวณนั้น โครงสร้างภูมิประเทศที่ถูกรบกวนและภูเขาไฟจะมีความต่างระดับของพื้นผิวมากมาตั้งแต่กำเนิด ในตอนกำเนิดความต่างระดับจะมีมากที่สุดในช่วงประวัติการกัดกร่อนพื้นผิวนั้น จนระยะสุดท้ายภูมิประเทศนั้นจะปรับระดับจนพื้นผิวมีความต่างระดับน้อย

โครงสร้างแต่ละอย่างที่อธิบายมานั้นจะต้องผ่านลำดับขั้นของการกัดกร่อนตามรูปแบบกระบวนการกัดกร่อนแผ่นดินที่ได้เคยกล่าวถึงมาแล้ว สำหรับบริเวณที่เป็นชั้นหินแนวระนาบหรือผลึกหินที่เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ลักษณะของวัฏจักรการกัดกร่อนจะคล้ายคลึงกับวัฏจักรการกัดกร่อนในจินตนภาพมาก เนื่องจากมวลเนื้อหินดังกล่าวมีส่วนประกอบและโครงสร้างเป็นแบบเดียวกันในทุก ๆ ทิศทาง โดยจะอยู่ในแนวระนาบ ส่วนรอยโค้ง รอยเลื่อน โดมและภูเขาไฟ จะมีชีวประวัติการกัดกร่อนแตกต่างกันออกไป ไม่เพียงแต่แตกต่างไปจากรูปแบบในจินตนภาพเท่านั้น แต่ยังแตกต่างซึ่งกันและกันด้วย

โครงสร้างของชั้นหินเป็นปัจจัยควบคุมลักษณะภูมิประเทศ

คำอธิบายในบทที่ 18 ได้อธิบายถึงวิวัฒนาการของภูเขาแอปปาเลเชียน กระบวนการปรับระดับจะกัดกร่อนพื้นผิวให้ต่ำลง บริเวณที่เป็นหินอ่อนจะถูกกัดกร่อนได้รวดเร็วกว่าบริเวณที่เป็นหินแข็งและคงทน ผลที่ได้ก็คือพัฒนาการความต่างระดับของพื้นผิวจะสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับรูปแบบของหินฐานทั้งส่วนประกอบและโครงสร้าง

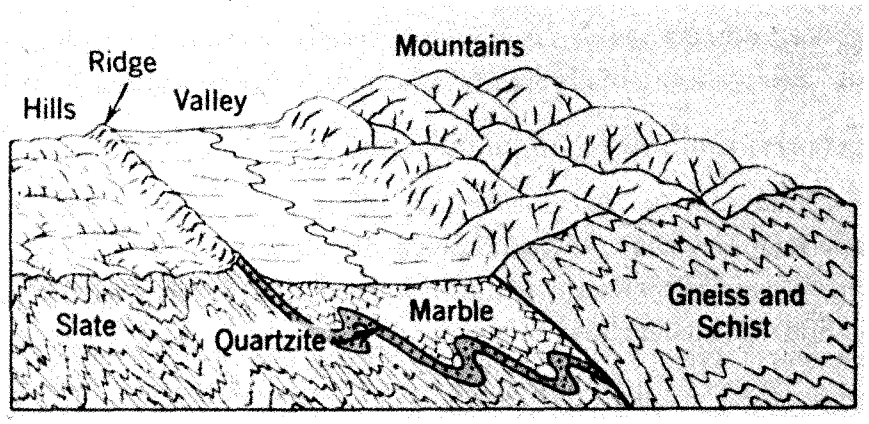


รูป 25.2 ลักษณะภูมิประเทศส่วนมากมีกำเนิดจากการกัดกร่อนพัดพาหินที่อ่อนแอไปอย่างช้า ๆ และทิ้งให้บริเวณที่เป็นหินแข็งกลายเป็นสันเขาและภูเขา

จากรูป 25.2 แสดงให้เห็นหินชั้นห้าชนิดอยู่รวมกันและวางตัวทาบกับหินอัคนีเก่า ลักษณะภูมิประเทศตามปกติจะเกิดเป็นหุบเขาหรือภูเขานั้นดูได้จากสัญลักษณ์หินที่แสดงไว้ตามภาพตัดขวาง ชั้นหินเหล่านี้มีลักษณะเอียงอย่างมากและมีอัตราการกัดกร่อนสูง

หินดินดาน (shale) ตามปกติเป็นหินอ่อนและจะถูกกัดกร่อนจนมีระดับต่ำสุดลึกลงไปในกันหุบเขา หินปูนเป็นหินที่กรดคาร์บอนิกกัดกร่อนได้ง่าย จึงมักจะเกิดเป็นหุบเขาได้ในเขตชุ่มชื้น ในทางตรงกันข้ามหินปูนเป็นหินที่คงทนมากในเขตร้อน และจะคงสภาพความสูงอยู่ได้ หินทราย (sandstone) และหินกรวดมน (conglomerate) จะเป็นหินแข็งและคงทนจึงคงสภาพเป็นสันเขาและที่สูง

หินแปรเป็นกลุ่มหินที่ทนทานต่อการกัดกร่อนมากกว่าหินชั้นซึ่งเป็นต้นกำเนิดของหินแปร รูปที่ 25.3 แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างหินแปรที่ต่างชนิดกัน



รูป 25.3 หินแปรมีแนวโน้มว่าจะเกิดเป็นแนวขนานไปกับแนวของหุบเขาและภูเขา

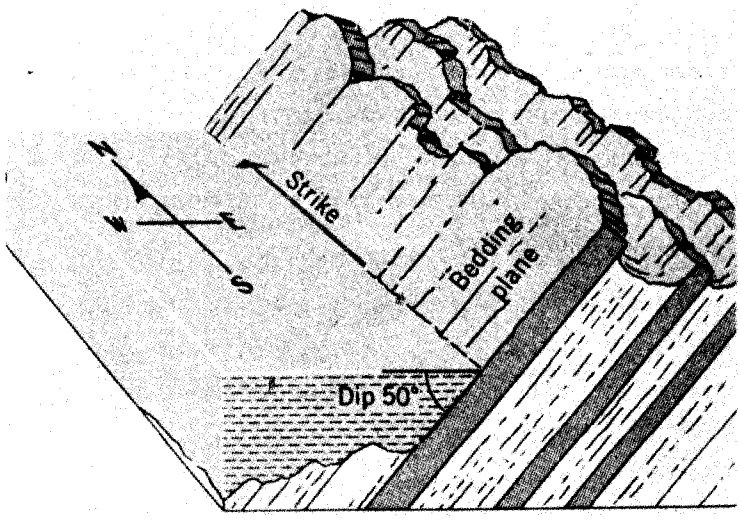
หินชนวน (slates) และหินชิสต์ (chists) เป็นหินที่ค่อนข้างคงทนและมีแนวโน้มว่าจะคงสภาพเป็นเนินเขาและที่สูง แต่ถ้าเปรียบเทียบกับหินแกรนิต หินชนิดนี้จะมีความคงทนน้อยกว่า ดังนั้น หินแกรนิตจึงมักคงสภาพเป็นมวลภูเขาสูงอยู่

หินปูนและหินอ่อนเป็นหินที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกกรดคาร์บอนิก บริเวณภูมิประเทศที่ประกอบด้วยหินดังกล่าวจึงมักเป็นหุบเขาหรือที่ต่ำ หินควอร์ตไซต์เป็นหินที่แข็งมากและคงทนต่อการทำลายของสารเคมี จึงเป็นหินที่คงทนกว่าหินทุกชนิด สันเขาและยอดเขาสูงที่อยู่ในเขตหินแปรมักเป็นสันเขาและยอดเขาที่เกิดจากหินควอร์ตไซต์ หินไนส์เป็นหินที่คงทนคล้ายกับหินแกรนิต โดยทั่วไปจึงมักคงสภาพเป็นที่สูงและแนวเทือกเขา

แนวเทและแนวสันหิน

เนื่องจากระนาบธรรมชาติเป็นลักษณะสำคัญของโครงสร้างของหินแต่ละชนิด นักธรณีวิทยาจึงได้คิดระบบเชิงเรขาคณิตขึ้นมาเพื่อใช้วัดและอธิบายระนาบธรรมชาตินี้ และเพื่อแสดงลักษณะดังกล่าวในแผนที่ ตัวอย่างของระนาบที่เป็นระนาบของชั้นหินชั้น เช่น ด้านของไดค์ ด้านบน และด้านล่างของพื้นผิว รอยแยกของหินชนวนและรอยต่อของหินแกรนิต ระนาบที่กล่าวมานี้มีน้อยมากที่จะอยู่ในแนวระนาบ

ค่ามุมระหว่างระนาบหินธรรมชาติและระนาบในจินตนภาพเราเรียกว่า "แนวเท" (dip) การบอกค่าเราบอกเป็นองศาจาก 0 องศา ซึ่งถือเป็นระนาบราบจนถึง 90 องศา ซึ่งเป็นระนาบดิ่ง รูปที่ 25.4 แสดงให้เห็นค่ามุมแนวเทของชั้นหินทรายที่โผล่ออกมาเปรียบเทียบกับระนาบของผิวน้ำ



รูป 25.4 แนวเทและแนวสันหิน

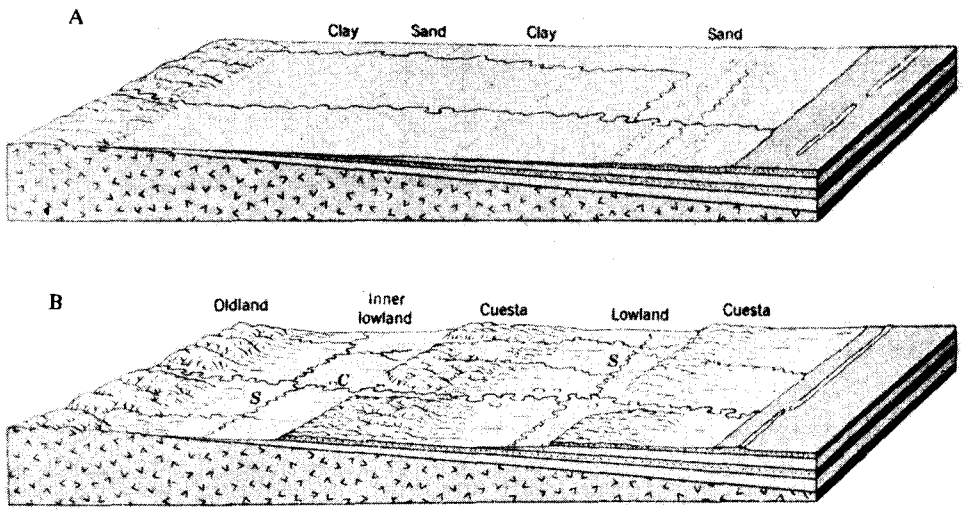
เมื่อเราวัดทิศของแนวเส้นตรงที่เกิดจากระนาบหินเอียงตัดกับระนาบในจินตนภาพ เราเรียกว่าแนวสันหิน (strike) จากรูปที่ 25.4 แนวสันหินคือ "เหนือ"

ที่ราบชายฝั่ง

ที่ราบชายฝั่งนั้นมีวิวัฒนาการตามวัฏจักรการกัดกร่อนดังได้แสดงให้เห็นในรูป 25.5 ในหน้า 198 ในบล็อค A เป็นบริเวณที่ยกตัวขึ้นมาจากใต้ระดับน้ำทะเลใหม่ ๆ เดิมบริเวณนี้เป็นไหล่ทวีป ซึ่งเป็นบริเวณที่มีดินตะกอนตกทับถมกันอยู่ ตะกอนเหล่านี้แม่น้ำได้พัดพามาจากทวีปและกระแสน้ำพัดให้ตะกอนกระจายไปทั่วบริเวณไหล่ทวีป ในพื้นผิวกำเนิด ลำน้ำจะไหลตรงลงสู่ทะเล ลำน้ำที่เกิดบนที่ราบกำเนิดนี้เรียกว่า "แม่น้ำตามแนวเท" (consequent river) ซึ่งนิยามได้ว่าเป็นลำน้ำที่ถูกควบคุมโดยพื้นผิวกำเนิด แม่น้ำตามแนวเทจะปรากฏในหลายลักษณะภูมิประเทศ เช่น ภูเขาไฟ รอยเลื่อน หรือก้นทะเลสาบที่น้ำไหลออกไปหมดแล้ว ลำน้ำซึ่งแต่เดิมมีน้ำไหลภายในพื้นแผ่นดินจากชายฝั่งลงสู่ทะเล แต่ขณะนี้น้ำได้ไหลแผ่กว้างไปถึงแนวชายฝั่งใหม่เราเรียกแม่น้ำนี้ว่า "แม่น้ำตามแนวเทขยายตัว" (extended consequent stream) คำว่า "แผ่นดินเก่า" (oldland) เราใช้เรียกพื้นที่ที่มีหินเก่าวางตัวลึกจากชายฝั่งเข้าไปในแผ่นดิน

ในช่วงที่ที่ราบชายฝั่งวิวัฒนาการถึงขั้นโตเต็มที่ จะมีลำน้ำและลักษณะภูมิประเทศวิวัฒนาการขึ้นมาใหม่ (บล็อค B) บริเวณที่ชั้นหินที่กัดกร่อนง่าย (ตามปกติเป็นดินเหนียวและดินดาน) โผล่ขึ้น

มา การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วทำให้บริเวณนั้นเกิดเป็นที่ต่ำ พื้นที่ระหว่างที่ต่ำจะเป็นสันเขากว้างเตี้ยหรือเป็นแนวเนินเขาประกอบด้วยภูมิภาพแบบเขาอีโต้ (cuestas) ที่ต่ำที่วางตัวอยู่ระหว่างพื้นดินเก่าและแนวเขาอีโต้แนวแรก เรียกว่า "ที่ต่ำตอนใน" (inner lowland) ภูมิภาพแบบเขาอีโต้มักจะเกิดอยู่เหนือบริเวณดินทราย หินทราย หินปูน หรือหินชอล์ก เขาอีกด้านหันเข้าสู่แผ่นดินจะมีความชันมากเรียกว่า "ด้านหน้าใน" (inface) เนื่องจากเป็นด้านที่พื้นผิวที่โผล่ขึ้นมามีการผุพัง ด้านหันออกทะเลหรือ "ด้านลาดหลัง" (back-slope) มีความลาดน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพื้นผิวด้านบนของหินที่เอียงน้อย ๆ นั้นเป็นส่วนที่แข็งกว่า ในบริเวณที่ชั้นหินคงทนและแข็งมากและมีชั้นหินที่อ่อนกว่าอยู่ข้างใต้ ด้านหน้าเขาอีโต้มักจะชันมากบางครั้งอาจมีสภาพเป็นหน้าผา เช่น ภูเขาอีโต้หินปูนใกล้กับ Rheims ในประเทศฝรั่งเศส ลักษณะปกติของเขาอีโต้อีกอย่างหนึ่งก็คือเป็นบริเวณที่เป็นแนวเนินเขาเตี้ยต่อเนื่องกัน



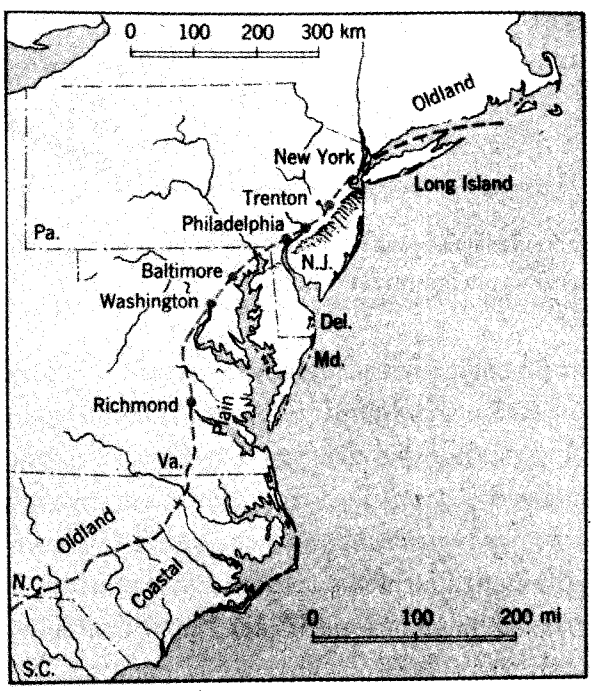
รูป 25.5 วิวัฒนาการของที่ราบชายฝั่งทะเล
A – ขั้นกำเนิด : ที่ราบเพิ่งจะยกตัวขึ้น
B – ขั้นตอนกลาง : เขาอีโต้และวิวัฒนาการของที่ราบต่ำ
S = ลำน้ำตามแนวระดับ C = ลำน้ำตามแนวเท

ลำน้ำที่ไหลไปตามแนวระดับของชั้นหินและไหลขนานไปกับชายฝั่งเราเรียกว่า "แม่น้ำตามแนวระดับ" (subsequent stream) ลำน้ำนี้จะเกิดตามแนวหินที่อ่อนและมักไหลไปตามแนวสันหินที่โผล่ขึ้นมา ลำน้ำตามแนวระดับมีปรากฏในหลายบริเวณ ซึ่งจะขอกล่าวถึงในเรื่องการโค้งตัว โดมและการเลื่อนตัว แนวการระบายน้ำที่กัดลึกลงไปในที่ราบชายฝั่งที่โตเต็มที่แล้วเมื่อไหลมาพบกันจะทำให้เกิดลำน้ำรูปแบบ "พบกันเป็นมุมฉาก" (trellis)

ที่ราบชายฝั่งในสหรัฐอเมริกาและอังกฤษ

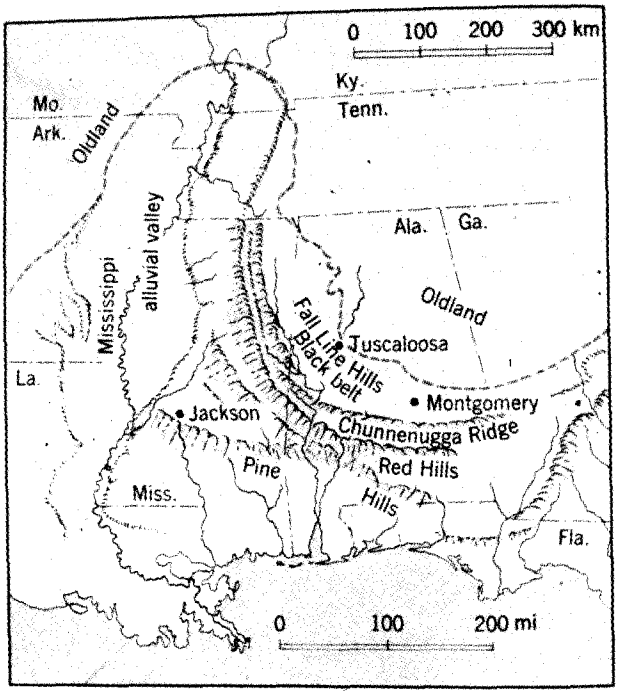
ตัวอย่างที่ดีของที่ราบชายฝั่งนั้นจะเห็นได้บริเวณชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติก บริเวณอ่าวของสหรัฐฯ ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษและที่ราบลุ่มปารีสทางภาคกลางตอนเหนือของฝรั่งเศส

ที่ราบชายฝั่งของสหรัฐฯ เป็นที่ราบชายฝั่งที่ใหญ่ที่สุด มีความกว้างตั้งแต่ 100—300 ไมล์ (160—500 กม.) และยาวไปตามแนวชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติกและรอบอ่าวถึง 2,000 ไมล์ (3,000 กม.) หินชั้นมีอายุอยู่ในยุคครีเตเชียสและเทอร์เชียรี ชั้นหินยุคครีเตเชียสโผล่ตัวใกล้กับขอบด้านในของที่ราบชายฝั่ง ทั้งนี้เนื่องจากมันวางตัวอยู่ตามแนวหินแผ่นดินเก่าซึ่งเป็นหินยุคพาลีโอโซอิก และพรีแคมเบรียน ที่ราบชายฝั่งเริ่มต้นจากเกาะลองไอร์แลนด์ ซึ่งเป็นเกาะอันเกิดจากเขาอีโต้จมตัวลงแล้วขยายตัวกว้างลงไปทางใต้รวมพื้นที่ส่วนใหญ่ของนิวเจอร์ซี เดลาแวร์ แมริแลนด์ และเวอร์จิเนีย (ดูรูป 25.6) ตลอดบริเวณชายฝั่งนี้มีเขาอีโต้หลายลูกซึ่งประกอบกันเป็นที่สูงแอตแลนติก ภูเขาลอเรลเนินเขาไพน์ และกลุ่มเนินเขาอื่น ๆ ที่คล้าย ๆ กัน ใต้ภูมิประเทศแบบเขาอีโต้จะเป็นชั้นหินทรายยุคเทอร์เชียรี และครีเตเชียสที่มีรูพรุน ซึ่งเป็นหินที่มีความคงทนต่อการกัดกร่อนโดยการดูดซึมน้ำฝนได้อย่างรวดเร็ว และมีน้ำไหลบนพื้นผิวดินน้อยมาก ที่ต่ำภายในเป็นหุบเขากว้างติดต่อกัน เป็นหุบเขาที่วิวัฒนาการมาจากดินเหนียวที่อ่อนในยุคครีเตเชียส



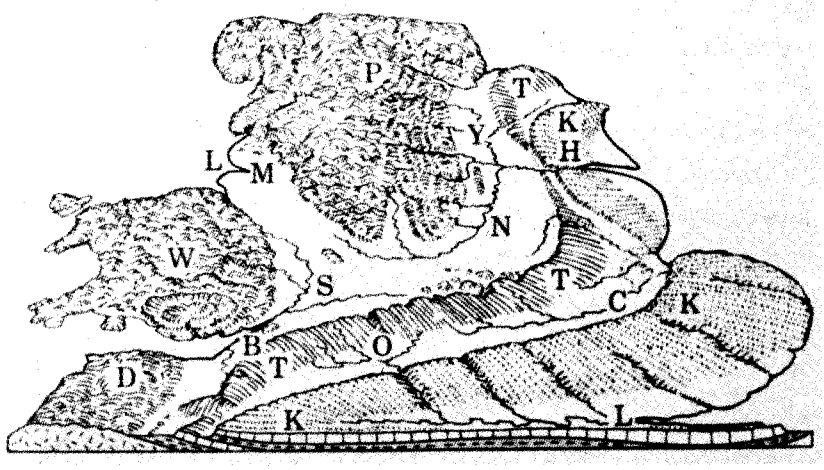
รูป 25.6 ที่ราบชายฝั่งบริเวณรัฐริมฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติกแสดงให้เห็นบริเวณเขาอีโต้

ในรัฐแอละแบมาและมิสซิสซิปปีที่ราบชายฝั่งได้ถูกกัดกร่อนแล้ว แต่เป็นพื้นที่ชายฝั่งที่เพิ่งยกตัวขึ้นมาจากระดับน้ำทะเล เขาอีโต้และที่ต่ำวางแนวขนานกับชายฝั่ง (ดูรูป 25.7) เราเรียกว่า "แนวที่ราบชายฝั่ง" (belted coastal plain) ใต้เขาอีโต้จะเป็นชั้นหินทราย ซึ่งทำให้ปลูกสนได้ดี หินปูนทำให้ที่ต่ำอุดมสมบูรณ์ เช่น ที่ "แบลกเบลท์" ในรัฐแอละแบมา



รูป 25.7 ที่ราบชายฝั่งบริเวณรัฐแอละบามา และมิสซิสซิปปี เป็นที่ราบที่มีภูเขาอีโต้หินทราย บริเวณดินดานหรือดินมาร์ลจะเป็นที่ราบต่ำ

ตลอดบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษเป็นที่ราบชายฝั่ง (ดูรูป 25.8) มีเขาอีโต้สองลูก ด้านในสุดเป็นหินปูนยุคยูแรสสิก มีชื่อพื้นเมืองว่า "เนินเขาคอตส์โวลด์" (cotswold hill) ในภาษาอังกฤษ คำว่า wold ใช้เรียกเขาอีโต้ ที่ต่ำซึ่งอยู่ระหว่างเขาอีโต้เรียกว่า "เวล" (vale) เขาอีโต้ด้านนอกหรือทางตะวันออกเฉียงใต้ รวมทั้งเนินเขาชิลเทอร์นเป็นพวกหินชอล์กสีขาวอยู่ในยุคครีเตเชียส ระหว่างเขาอีโต้เป็นที่ต่ำซึ่งวางตัวอยู่บริเวณออกฟอร์ดและเคมบริจ์ ที่ต่ำตอนในวางตัวระหว่างเขาอีโต้ตอนในกับบริเวณแผ่นดินเก่าในคอร์นวอล เวลส์และเทือกเขาเพนไนน์ ที่ต่ำตอนในเป็นที่ตั้งของเมืองสำคัญ ๆ เช่น บริสตอล กลอสเตอร์ เบอร์มิงแฮม นอตติงแฮม ลินคอล์น และยอร์กรวมทั้งเป็นพื้นที่เกษตรที่อุดมสมบูรณ์ด้วย ในที่ต่ำนี้จะมีการระบายน้ำออกตามแม่น้ำเซฟเวิน อะวอน เทรนต์ และอูซ



รูป 25.8 ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ มีที่ราบชายฝั่งโค้ง L = ลอนดอน K = เขาอีโต้หินชอล์ก ยุคครีเตเชียส C = เคมบริดจ์ O = ออกฟอร์ด H = แม่น้ำยัมเมอร์ Y = ยอร์ก N = นอตติงแฮม S = แม่น้ำเซเวิร์น B = บริสตอล D = ดาร์ทมัวร์ W = เวลส์ M = แมนเชสเตอร์ L = ลิเวอร์พูล P = เทือกเขาเพนไนน์ T = เขาอีโต้หินปูนยุคยูแรสสิก

ลักษณะสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของที่ราบชายฝั่ง

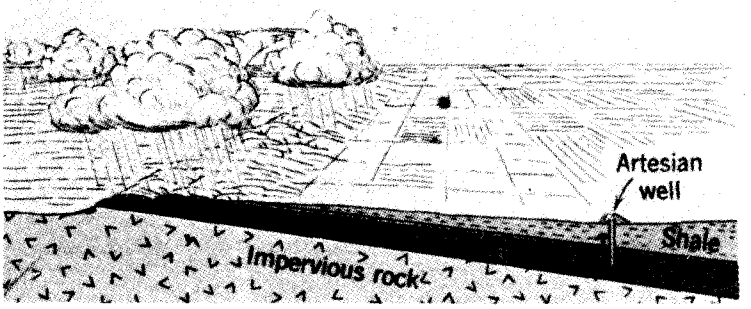
ที่ราบชายฝั่งอันกว้างใหญ่ เช่น ทางตะวันออกของสหรัฐฯ และตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ เป็นแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญ เพราะเป็นบริเวณที่มีดินอุดมสมบูรณ์ และพื้นที่เพื่อการเกษตรกรรมก็มักจะเป็นแปลงขนาดใหญ่ แม้ว่าจะมีเมืองท่าสำคัญอยู่ตามที่ราบชายฝั่ง แต่ก็ไม่สำคัญเท่ากับเมืองท่าที่มีภูเขาล้อมรอบและเป็นชายฝั่งจมตัวลง

เขาอีโต้ทำให้เกิดแหล่งป่าไม้ที่มีคุณค่า เช่น ในอังกฤษ ยุโรปและทางใต้ของสหรัฐอเมริกา บริเวณที่เป็นดินทรายที่มีรูพรุน เช่น ที่ราบชายฝั่งในรัฐนิวเจอร์ซี จะเป็นแหล่งปลูกต้นสนและต้นโอ๊กได้อย่างดี

เส้นทางคมนาคมจะวางตัวอยู่ในบริเวณที่ต่ำและเชื่อมเมืองสำคัญ ๆ ที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่ราบนั้น ตัวอย่างเช่น ถนนและทางรถไฟสายสำคัญที่เชื่อมเมืองนิวยอร์กกับเมืองเทรนตัน ฟิลาเดลเฟีย บัลติมอร์และวอชิงตัน เมืองเหล่านี้จะตั้งอยู่ในที่ต่ำตอนใน ลักษณะภูมิประเทศแบบเขาอีโต้บางทีอาจขรุขระและเป็นอุปสรรคสำคัญในการสร้างเส้นทางคมนาคม

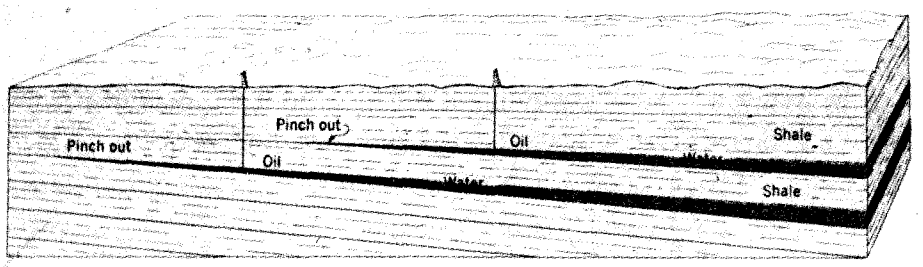
ด้านลาดของชั้นหินที่หันออกทะเลในที่ราบชายฝั่ง จะเป็นแหล่งที่เหมาะสมกับการขุดบ่อน้ำบาดาล น้ำที่ไหลซึมไปรวมกันในชั้นหินทราย ซึ่งจะมีชั้นหินดินดานหรือดินเหนียวทับอยู่ด้านบน ทำให้น้ำใต้ดินไหลซึมขึ้นมาไม่ได้ เมื่อขุดบ่อลงไปถึงชั้นหินทราย แรงดันของน้ำจะดันให้น้ำไหลขึ้นมา

ได้ แหล่งน้ำบาดาลจำนวนมากมีอยู่หลายบริเวณของที่ราบชายฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติกและรอบอ่าว อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำคงไม่เพียงพอที่จะใช้ในเมืองที่มีประชาชนหนาแน่นและเมืองอุตสาหกรรมได้



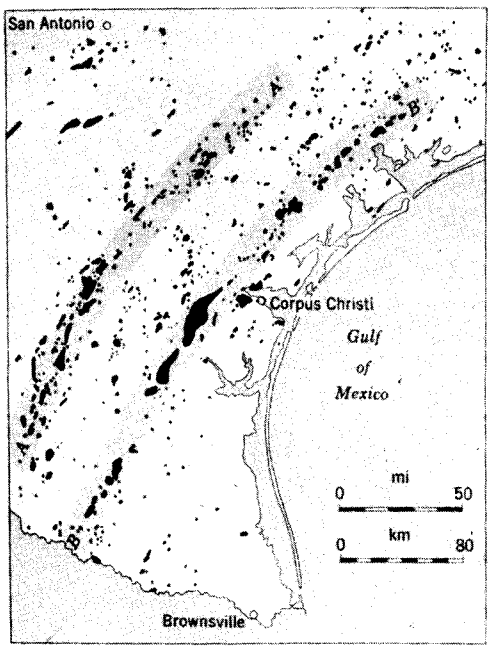
รูป 25.9 บ่อบาดาลจะขุดได้ในชั้นหินทรายที่เอียงลาด

ที่ราบชายฝั่งอ่าว (the gulf coastal plain) ของสหรัฐอเมริกามีน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติสะสมอยู่ซึ่งมีมูลค่าทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล น้ำมันจะสะสมอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นหิน (stratigraphic traps) ซึ่งเป็นชั้นหินทรายที่มีรูพรุนและมีชั้นหินดินดานหรือดินเหนียวซึ่งไม่มีรูพรุนปิดอยู่ตอนบน ช่องว่างระหว่างชั้นหินชนิดหนึ่ง คือ pinch out ได้แสดงในรูป 25.10 ชั้นหินทรายในที่ราบชายฝั่งจะค่อย ๆ บางลงเมื่อเอียงเข้าสู่แผ่นดิน และหายไปในที่สุดเพราะเป็นบริเวณที่มีการทับถมน้อยลง และอาจมีการกัดกร่อนก่อนที่จะมีการทับถมของชั้นหินที่ใหม่กว่า ชั้นหินที่ปิดด้านบนเป็นชั้นหินที่ไม่มีรูพรุน หินทรายจึงกลายเป็นแหล่งสะสมของน้ำมัน ซึ่งลอยตัวมาจากชั้นหินที่อยู่เบื้องล่าง จากภาพ 25.11 ในหน้า 203 แสดงให้เห็นบริเวณแหล่งน้ำมันในที่ราบชายฝั่งอ่าวเทกซัส

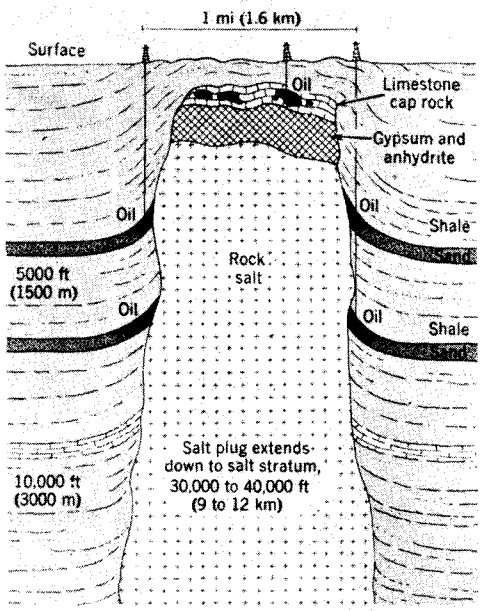


รูป 25.10 น้ำมันจะไปสะสมกันอยู่บริเวณที่ว่างตอนบนของแนวเอียงของชั้นหิน

แหล่งน้ำมันอีกชนิดหนึ่งที่มักจะเกิดตามที่ราบชายฝั่งและบริเวณอื่น ๆ ที่มีชั้นตะกอนทับถมกันจนหนาก็คือน้ำมันที่ปรากฏอยู่บนโดมเกลือ (salt dome) หรือแท่งเกลือ (salt plug) แท่งของเกลือหินจะดันตัวขึ้นมาในชั้นหินของที่ราบชายฝั่ง แรงดันนี้จะเกิดการไหลคล้าย ๆ พลาสติกจากชั้นเกลือหินหนาซึ่งวางตัวอยู่ในชั้นที่ลึกลงไปของที่ราบชายฝั่ง รอบ ๆ ชั้นหินจะมีรอยคดโค้งและรอยเลื่อนอยู่ติดกับแท่งเกลือ ทำให้มีช่องว่างที่น้ำมันจะเข้าไปขังอยู่ได้ แท่งเกลือหินตามปกติจะมีชั้นหินบีดอยู่ด้านบนเป็นหินปูนวางตัวอยู่บนแผ่นยิปซัมและแอนไฮไดรต์ เป็นแร่ซึ่งมีสูตรทางเคมี $CaSO_4$ น้ำมันอาจจะสะสมอยู่ในโพรงหินปูน โดมเกลือนี้อย่านำไปสับสนกับโดมของหินชั้นที่จะอธิบายต่อไปในบทนี้



รูป 25.11 แนวที่มีน้ำมันในชั้นหินทรายยุคอีโอซีน

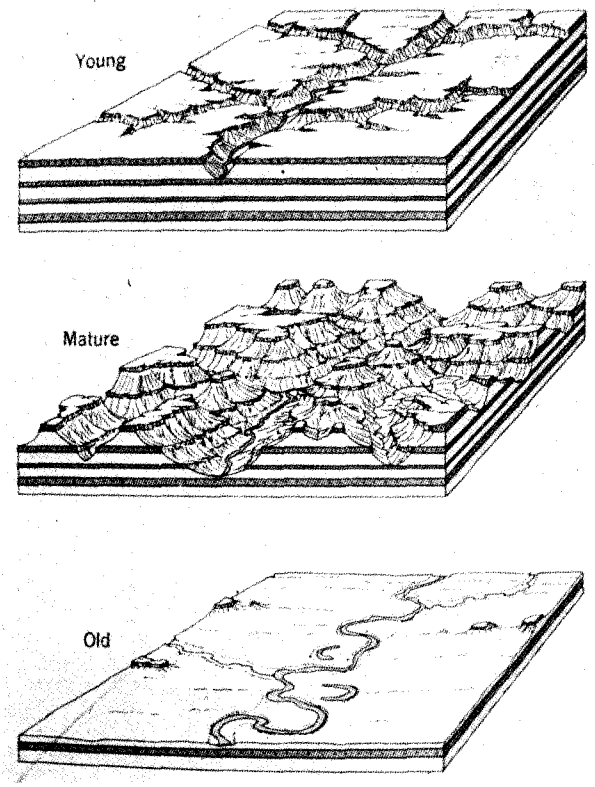


รูป 25.12 ภาพจินตนาการแสดงโครงสร้างของโดมเกลือ

แร่อื่น ๆ ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจที่สะสมอยู่ตามที่ราบชายฝั่งนั้นรวมถึงทำมะถัน ซึ่งจะมีอยู่ตามชายฝั่งของหลุยส์เซียนา และเทกซัส ฟอสเฟต มีพบในฟลอริดา ลิกไนต์ (คุณภาพต่ำเป็นพวกถ่านไม้) ใช้เป็นเชื้อเพลิงมีในรัฐแอละแบมา มิสซิสซิปปี และเทกซัส และดินเหนียวที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้องและอิฐ มีพบในนิวเจอร์ซี และแคโรไลนา

ชั้นหินระนาบ

บริเวณหินเก่าภาคพื้นทวีปบางบริเวณจะมีชั้นหินตะกอนปกคลุมอยู่ แสดงว่าช่วงหนึ่งในธรณีกาล บริเวณดังกล่าวเป็นแอ่งของทะเลภายในทวีปที่มีการทับถมของตะกอน หรือเป็นการทับถมตามที่ราบชายฝั่งเป็นบริเวณกว้าง ชั้นหินดังกล่าวมักเกิดในยุคก่อนยุคพรีแคมเบรียน เมื่อมีการยกตัวขึ้นโดยมีการรบกวนเพียงเล็กน้อย ชั้นหินนี้ก็จะผ่านลำดับขั้นของกระบวนการกัดกร่อนดังที่แสดงในรูป 25.13

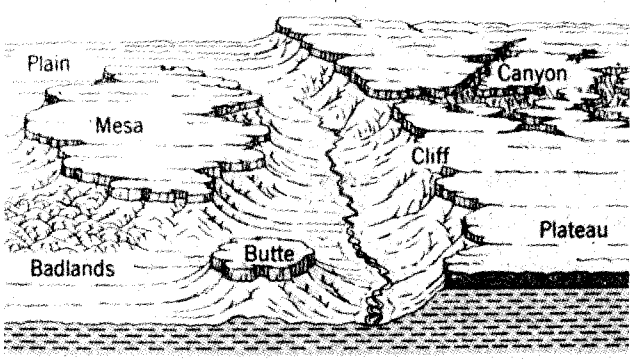


รูป 25.13 วิวัฒนาการการกัดกร่อนผัดพาของชั้นหินชั้นที่วางตัวในแนวระนาบ การเกิดหน้าผาที่ปรากฏในภาพนี้เป็นลักษณะหนึ่งของภูมิประเทศในเขตแห้งแล้ง

ในขั้นกำเนิดแผ่นดินจะราบเรียบ และน้ำจะไหลไปตามลำน้ำตามแนวเท ซึ่งพื้นผิวนั้นจะเอียงน้อย ๆ ถ้าที่ราบกำเนิดมีความสูงมาก ลำน้ำนี้จะกัดลึกลงไปในชั้นหินอย่างรวดเร็วกลายเป็นโกรกธาร พื้นดินเดิมจะกลายเป็นที่ราบสูงอยู่ระหว่างโกรกธาร ถ้าบริเวณนั้นมีระดับพื้นดินกำเนิดต่ำ ระนาบฐานจะช่วยป้องกันไม่ให้ลำน้ำกัดลึกลงไป และความต่างระดับที่พัฒนาขึ้นในบริเวณนั้นจะมีไม่มาก ตลอดวัยหนุ่มไม่ว่าบริเวณนั้นจะมีความต่างระดับมากหรือน้อย ลำน้ำก็จะกัดชั้นหินเป็นโครงข่ายของหุบเขา - โดยมีพัฒนาการไปตามพื้นผิวกำเนิด

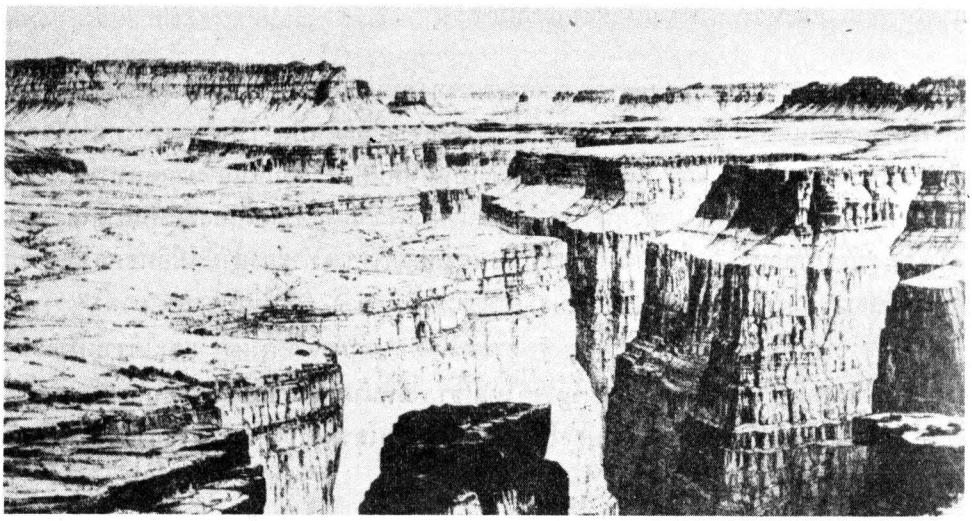
เมื่อพื้นผิวกำเนิดถูกกัดกร่อนไปจนหมดหรือเกือบหมด พื้นที่บริเวณนั้นจะมีลักษณะขรุขระที่สุด เมื่อมาถึงขั้นโตเต็มที่ หลังจากนั้นจะผ่านวิวัฒนาการการกัดกร่อนต่อไป ระดับความสูงของพื้นที่จะค่อย ๆ ลดลงและความลาดก็จะลาดชันน้อยลง ในวัยแก่บริเวณนั้นจะมีลักษณะเป็นลอนคลื่น ลำน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้น และที่ราบน้ำท่วมถึงจะแบนราบมากขึ้น

ชั้นหินแนวระนาบเป็นปัจจัยสำคัญต่อลักษณะของภูมิประเทศ ถ้าบริเวณนั้นมีชั้นหินอ่อนและคงทนวางตัวสลับกัน ชั้นที่คงทนตามปกติจะเป็นชั้นหินทรายและหินปูน (หินปูนจะคงทนในเขตแห้งแล้ง) จะทำให้เกิดหน้าผา ชั้นหินที่อ่อนซึ่งปกติจะเป็นหินดินดาน ดินเหนียวหรือดินมาร์ลจะถูกพัดพาไปได้ง่ายจากบริเวณใต้ชั้นหินที่คงทน ทำให้มีหน้าผาเกิดขึ้นเหนือชั้นนั้นและมีพื้นลาดใต้ฐานหน้าผา ในเขตภูมิอากาศแห้งแล้งซึ่งเป็นบริเวณที่มีพืชน้อยและการกระทำของน้ำฝนมีอิทธิพลต่อการเกิดลักษณะภูมิประเทศมาก ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศที่เรียกว่า "ไหล่เขาลาดผาตั้ง" (scarp slope shelf) ทั้งนี้เนื่องจากตามปกติการกัดกร่อนทำให้เกิดหน้าผาหรือผาตั้ง และใต้ฐานผาจะมีพื้นลาดเสมอ พื้นลาดนี้จะเปลี่ยนสภาพ ทำให้เกิดไหล่เขา มีหน้าผาเป็นขอบล้อมรอบอยู่บริเวณชั้นหินชั้นใต้ ตามขอบโกรกธารของบริเวณที่ราบสูงโคโลราโดในรัฐโคโลราโด ยูตาห์ แอริโซนาและนิวเม็กซิโกจะปรากฏลักษณะภูมิประเทศดังกล่าว



รูป 25.14 ในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดขึ้นบนชั้นหินชั้นมักจะมียอดแบน

ในเขตที่ราบสูงที่ชั้นหินเบื้องล่างวางตัวอยู่ในแนวระนาบ กระบวนการกัดกร่อนจะกัดชั้นหินเป็นแนวลงไปนับจากพื้นผิวของที่ราบสูง หินแข็งจะกลายเป็นหน้าผาทับอยู่ด้านบนของที่ราบสูง หน้าผานี้เกือบตั้งฉากกับพื้นผิว เนื่องจากชั้นหินดินดานหรือดินเหนียวที่อ่อน ซึ่งวางตัวอยู่ใต้ฐานผาถูกกัดกร่อนพัดพาไปอย่างรวดเร็วโดยการกระทำของพายุและลำน้ำ ทำให้แผ่นดินชั้นบนหักตามรอยต่อแนวดิ่ง หน้าผาจึงถอยห่างจากโกรกธารออกไป ส่วนที่อยู่ใกล้โกรกธารเป็นลานขอบหิน ซึ่งเกิดจากชั้นหินที่อยู่ต่ำถัดไป บริเวณลานขอบหินนี้เรียกว่า "เอสเพลเนด" (esplanade) (ดูรูป 25.15 ประกอบ) ผิวที่ราบสูงเกิดขึ้นจนสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อเศษหินที่แตกหักพังถูกพัดพาไปหมด ทิ้งไว้แต่เพียงชั้นหินที่คงทนเป็นแผ่นวางตัวอยู่บนที่สูง ที่ราบสูงนี้เรียกว่า "ที่ราบชั้นหิน" (stripped surface or stratum plain)



รูป 25.15 ภาพวาดโดยนักศิลปินธรณีวิทยาชื่อ ดับบลิว เอช โฮล์ม ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1882 แสดงให้เห็นแกรนด์ แคนยอน ณ บริเวณปากหุบเขาโทโรวีป

ในขั้นปลาย ๆ ของวัฏจักรในเขตแห้งแล้งจะมี "เนินเมซา" (mesa) มากมาย มีลักษณะเป็นเนินเขายอดแบน หรือเป็นภูเขาที่มีหน้าผาล้อมรอบยอดเขา ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือของชั้นหินคงทนชั้นบน มีอยู่เหมือนกันที่เนินเมซามีธารลาวาไหลมาปกคลุมอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปลาวาจะคงทนกว่าหินชั้นที่มันไหลลงมาทับถม ขณะที่พื้นที่ของเมซาลดลงโดยที่ขอบหน้าผาหักลงไปเรื่อย ๆ เนินเขานั้นก็ยังคงรักษาระดับความสูงและความแบนราบของยอดเนินเมซาไว้ ก่อนที่เนินเมซาจะถูกกัดกร่อนไปจนหมดในขั้นสุดท้าย เนินนั้นจะเป็นเนินเขาที่มียอดเล็ก ๆ โดยมีขอบตั้งชันเราเรียกว่า "เนินยอดป้าน" (butte)

ในบริเวณที่ชั้นหินดินดานหรือดินเหนียวที่อ่อนมากและไม่มีพืชปกคลุม ในเขตแห้งแล้งฝนจะกัดเซาะบริเวณนี้ให้เป็นร่อง ลักษณะภูมิประเทศจะขรุขระมาก คล้าย ๆ กับเป็นภูเขาเล็ก ๆ มากมาย เราเรียกพื้นที่นั้นว่า "บริเวณทุรกันดาร" (badland)

ในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น ลักษณะต่าง ๆ ดังที่กล่าวแล้ว ซึ่งได้แก่ ไหล่เขาลาดผาตั้ง พื้นที่ราบชั้นหิน เนินเมซาและเนินยอดป้านอาจมีเกิดเป็นบางแห่งเท่านั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพืชที่ปกคลุมพื้นดินนั้น ซึ่งจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนอย่างรวดเร็วของน้ำฝน ช่วยให้หินที่ผุพังอยู่กับที่และช่วยปกคลุมหินฐาน แต่กระนั้นก็ตามอาจมีหน้าผาและภูเขาคล้ายเมซาเกิดขึ้นได้บ้าง บริเวณอันกว้างใหญ่ในรัฐเพนซิลเวเนีย นิวยอร์ก โอไฮโอ เวอจิเนียตะวันตก เคนทักกี เทนเนสซี และแอละแบมา ประกอบด้วยลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากชั้นหินแนวระนาบที่กัดกร่อนเต็มที่ ส่วนใหญ่ของพื้นที่นี้เป็นภูเขาและป่าไม้

ในบริเวณชั้นหินแนวระนาบที่ถูกกัดกร่อนเต็มที่ ระบบการระบายน้ำจะเป็นแบบกิ่งไม้ (dendritic drainage pattern) ซึ่งลำน้ำเล็กในระบบจะไหลอย่างไม่มีทิศทาง รูปแบบนี้คล้ายกับกิ่งก้านของต้นแอปเปิล

เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่ที่เบื้องล่างเป็นหินชั้นแนวระนาบ อาจรวมถึงบริเวณที่มีธารลาวาไหลมาสะสมอยู่จำนวนมาก ในบางส่วนของโลก เช่น ที่ราบสูงโคลัมเบีย ซึ่งอยู่ทางตะวันออกของวอชิงตันและออรีกอน หรือที่ราบสูงเดคข่าน มีลาวาหินบะซอลต์ไหลลงมาทับถมเป็นบริเวณกว้างหลายพันตารางไมล์และหนาถึงสองสามร้อยฟุต ระหว่างชั้นของลาวาเป็นทะเลสาบและร่องน้ำซึ่งมีทรายกรวดและดินเหนียวมาทับถม ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดขึ้นตามวัฏจักรการกัดกร่อนเหมือนกับลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากชั้นหินแนวระนาบที่ได้อธิบายมาแล้ว

สิ่งแวดล้อมของชั้นหินแนวระนาบ

โดยทั่วไปแล้วเราใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่เบื้องล่างเป็นชั้นหินแนวระนาบไม่ค่อยได้ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความต่างระดับของพื้นผิวมากและต่างๆกัน บนพื้นผิวกำเนิดและพื้นผิวเก่าซึ่งลักษณะภูมิประเทศคล้ายที่ราบมักใช้เป็นที่เพาะปลูก บนที่ราบสูงทางตะวันตกของแคนซัสและเนแบรสกาทางตะวันออกของไวโอมิง และโคโลราโด นิวเม็กซิโกและเทกซัส มีการปลูกข้าวสาลีเป็นส่วนมาก ในบริเวณนี้มีที่ราบเป็นพื้นดินในขั้นกำเนิดหรือยุคเริ่มต้นมาก ๆ ของกระบวนการกัดกร่อน แม้ว่าพื้นที่นี้จะสูง 3,000—5,000 ฟุต (900—1,500 ม.) แต่ที่ราบนั้นก็มีร่องน้ำสำคัญ ๆ ไม่กี่สาย

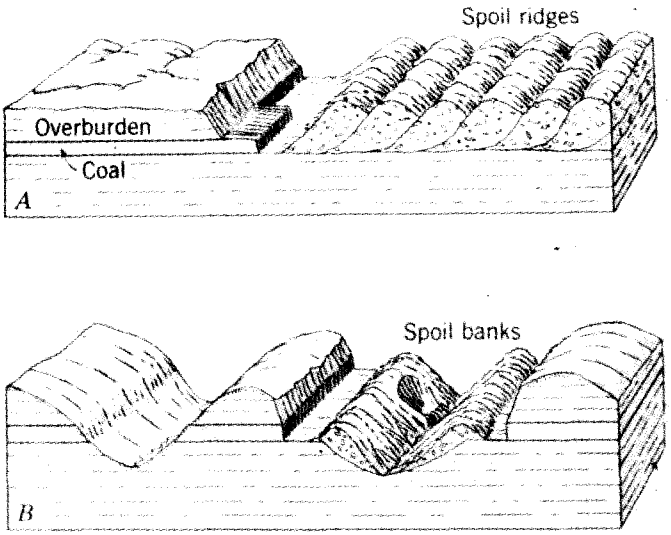
บริเวณชั้นหินแนวระนาบบางบริเวณที่อยู่ภายในของสหรัฐฯรวมทั้งส่วนใหญ่ของรัฐอิลลินอยส์ อินเดียนา โอไฮโอ มิสซูรี มอนตานา แคนซัส และไอโอวา เป็นบริเวณที่ถูกกัดกร่อนเต็มที่ แต่กระแสธารน้ำแข็งทำให้ระดับของบริเวณนั้นลดลงและความลาดก็มีน้อย จึงเป็นบริเวณที่มีการกสิกรรมมาก บริเวณที่มีความต่างระดับมาก เช่น บริเวณภูเขาในเขตแอลเลเกนี หรือภูเขาคัมเบอร์-แลนด์ การกสิกรรมจะจำกัดอยู่ในบางบริเวณเท่านั้น เช่น บริเวณที่ราบริมฝั่งแม่น้ำขนาดใหญ่และต้องเป็นบริเวณที่มีภูมิอากาศเหมาะสมด้วย ในบริเวณโกรกธารของที่ราบสูงโคโลราโดเป็นบริเวณที่มีประชากรอยู่เบาบางมาก ทั้งนี้มิใช่เพียงแต่เป็นบริเวณที่มีความสูงมากและแห้งแล้ง ซึ่งไม่เหมาะแก่การเพาะปลูกเท่านั้น แต่ยังเนื่องจากการสร้างระบบคมนาคมข้ามโครงข่ายของโกรกธารนั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปไม่ได้อีกด้วย

ทรัพยากรแร่ในชั้นหินแนวระนาบ

บริเวณชั้นหินแนวระนาบมีแร่และหินที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจคล้าย ๆ กับบริเวณที่ราบชายฝั่ง ทั้งนี้เป็นแร่ที่สัมพันธ์กับหินชั้น (หรือลาวา) หินก่อสร้าง เช่น หินปูนเบดฟอร์ด ในรัฐอินเดียนา หรือหินทรายบีเรีย ในรัฐโอไฮโอ เป็นวัตถุที่มีคุณค่ามาก หินปูนนั้นใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือใช้เป็นวัตถุช่วยหลอมในการถลุงเหล็ก บางบริเวณเป็นแหล่งทับถมของตะกั่ว สังกะสีและเหล็ก ซึ่งทับถมอยู่ในหินชั้น ตัวอย่างเช่น เหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสีในเขตไทรสเตท (Tristate – ซึ่งมีมิสซูรี แคนซัส โอกลาโฮมา) เป็นแหล่งแร่สำคัญในชั้นหินปูนแนวระนาบ แร่ยูเรเนียมเป็นสินแร่สำคัญในเขตที่ราบสูงโคโลราโด

สินแร่ที่สำคัญที่สุดในชั้นหินชั้น ได้แก่ ถ่านหินและน้ำมันดิบ ในบริเวณชั้นหินที่ไม่ถูกรบกวน ถ่านหินจะเป็นชนิดไบทูมินัส หรือถ่านหินอ่อน ซึ่งจะวางตัวเป็นชั้นหนาตั้งแต่สองสามนิ้วจนถึงหลาย ๆ ฟุตและกินบริเวณกว้างหลายร้อยตารางไมล์ ในบริเวณซึ่งมีความต่างระดับมาก ถ่านหินจะโผล่ออกมาตามผนังหุบเขา ซึ่งสามารถเจาะเป็นอุโมงค์เข้าไปเอาถ่านหินได้ ลักษณะของเหมืองนี้จะมีทางตะวันตกของเพนซิลเวเนีย ทางตะวันออกของโอไฮโอและเวอร์จิเนียตะวันตก ในบริเวณซึ่งถ่านหินไม่โผล่ออกมาเราขุดได้โดยเจาะปล่องลงไป เช่น เหมืองถ่านหินในอิลลินอยส์

ในบริเวณที่ชั้นถ่านหินวางตัวอยู่ใกล้พื้นผิว หรือโผล่ออกมาตามด้านข้างของภูเขาวิธีการทำเหมืองใช้แบบขุดเป็นแถบ (strip method) วิธีการนี้ต้องมีเครื่องจักรขนย้ายดินที่ปกคลุมชั้นหินอยู่ เหมืองแร่แบบขุดเป็นแถบมีสองชนิด แต่ละชนิดปรับให้สัมพันธ์กับลักษณะของพื้นดินกับแนวถ่านหิน เหมืองแร่แบบเปิดหน้าเหมืองเป็นแถบ (area strip mining) ใช้ในบริเวณพื้นดินค่อนข้างแบน ซึ่งแนวถ่านหินวางตัวในแนวระนาบ (ดังรูป 25.16 A) หลังจากทำเหมืองแนวแรกไปแล้ว และได้ขนถ่านหินออกไปหมดแล้วก็เปิดหน้าเหมืองแถบต่อไปให้ขนานกับแถบเดิม ดิน หินที่



รูป 25.16 A พื้นที่ที่มีการทำเหมืองขุดเป็นแถบ B เหมืองขุดตามแนวระดับ

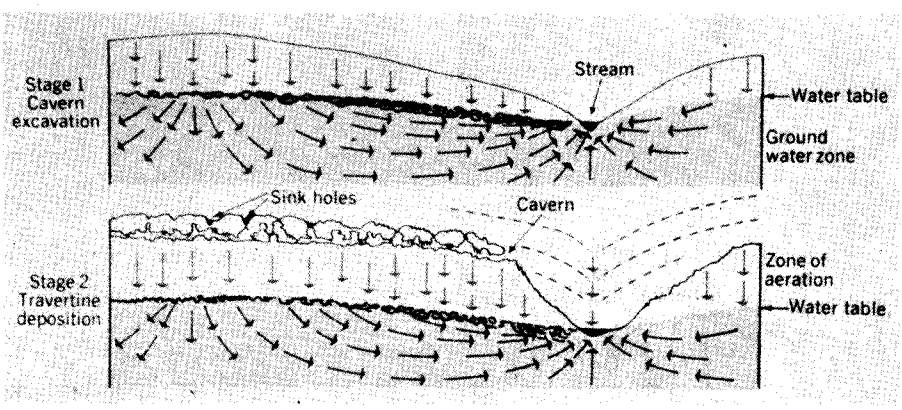
ขุดขึ้นมาก็ถมลงไปในแนวแรก ดังนั้น ตลอดแนวเหมืองแร่จะถูกขุดหมดและส่วนที่เหลือจะเป็นสันคันดินวางตัวขนานกัน วิธีการทำเหมืองแร่แบบนี้ยังใช้ในการขุดแร่ฟอสเฟตในรัฐฟลอริดาและยังใช้ขุดชั้นดินเหนียวอีกด้วย

เหมืองแถบแนวระดับ (contour strip mining) ใช้ในบริเวณที่แผ่นถ่านหินโผล่ออกมาตามข้าง ๆ ภูเขา (รูป 25.16 B ในหน้า 208) การขุดถ่านหินจะขุดให้ลึกเข้าไปในภูเขาเท่าที่จะทำได้และดินหินที่ขุดขึ้นมาก็ถมลงไปตามด้านข้างของภูเขา ผลที่ได้ก็คือเขาด้านหนึ่งจะถูกขุดเป็นลานราบตรงโดยมีผนังด้านหนึ่งเป็นหินที่ถูกตัดไปใหม่ ๆ ส่วนอีกข้างหนึ่งเป็นสันเนินดินที่เทลงไปในหุบเขา เหมืองแร่ชนิดขุดเป็นแถบจะขุดลึกลงไปใต้พื้นผิวประมาณ 100 ฟุต ลักษณะเหมืองแร่ที่สัมพันธ์กับเหมืองแถบตามแนวระดับ ได้แก่ เหมืองเจาะ (auger mining) โดยใช้เครื่องเจาะขนาดใหญ่เจาะตามแนวระนาบ จนถึงบริเวณที่มีแนวถ่านหินโผล่ขึ้นมาหลังจากที่ได้ทำเหมืองแบบแถบเสร็จสิ้นไปแล้ว สว่านเจาะจะมีหัวซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางยาวหลายฟุตและสามารถที่จะเจาะให้ลึกเข้าไปในชั้นถ่านหินได้ถึง 200 ฟุต

น้ำมันดิบจะปรากฏในชั้นหินทรายที่มีรูพรุน ซึ่งมีชั้นหินที่ไม่มีรูพรุนปิดอยู่ด้านบน เนื่องจากชั้นหินไม่ได้อยู่ในแนวระนาบเสียทีเดียวแต่จะมีรอยโค้งงอเล็ก ๆ หรือรอยเลื่อนเช่นเดียวกับความหนาที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ และลักษณะของชั้นหินทราย ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างหลายอย่างที่น้ำมันดิบจะสะสมกันอยู่ ช่องว่างในชั้นหินคล้าย ๆ กับที่เกิดในที่ราบชายฝั่งทำให้เกิดแหล่งน้ำมันสำคัญ ช่องว่างในชั้นหินอาจเกิดจากรอยเลื่อนที่ตั้งได้ฉากกับขอบของชั้นหิน

ถ้ำหินปูน

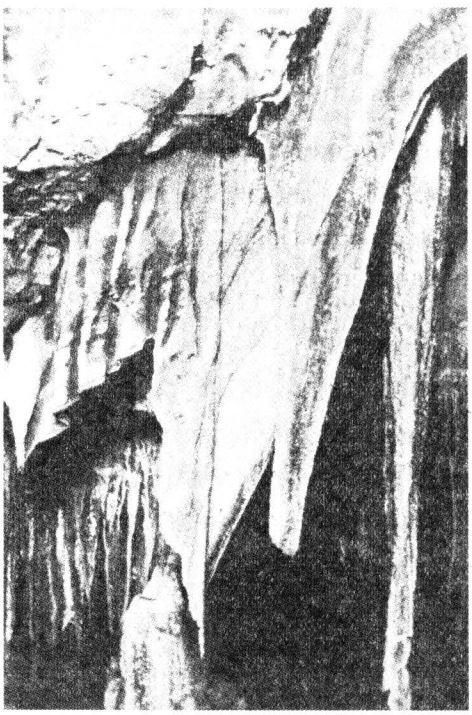
คนส่วนมากคุ้นเคยกับชื่อของถ้ำที่มีชื่อเสียง เช่น ถ้ำแมมมอท หรือถ้ำคาร์ลส์แบด ในสหรัฐอเมริกา แม้ว่าถ้ำอาจจะเกิดในบริเวณรอยคดโค้ง รอยเลื่อนและบริเวณหินปูนซึ่งมีมุมเทสูงมาก แต่ถ้ำส่วนมากก็เกิดในชั้นหินที่วางตัวแบนราบ

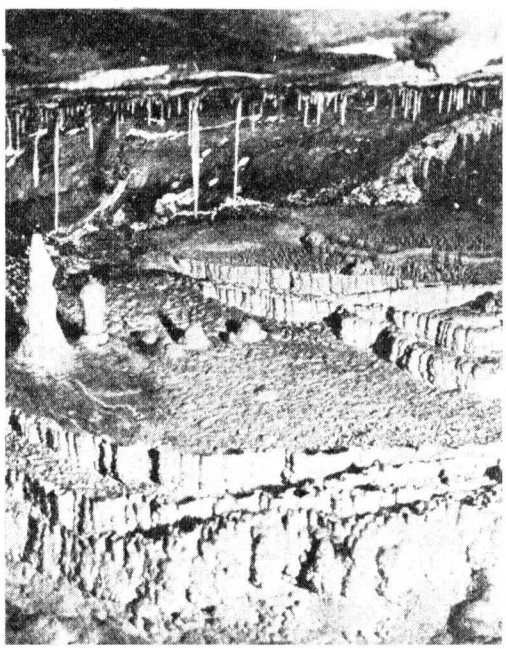


รูป 25.17 การเกิดถ้ำในเขตน้ำใต้ดิน ตามมาด้วยการทับถมในชั้นดินที่มีอากาศแทรกอยู่

นักธรณีเห็นพ้องกันว่า ระบบถ้ำส่วนมากจะเกิดขึ้นในเขตที่มีน้ำใต้ดิน จากรูป 25.17 ในหน้า 209 แสดงให้เห็นว่าถ้ำเกิดขึ้นได้อย่างไร ในไดอะแกรมบนปฏิกิริยาของกรดคาร์บอนิกจะกระทำต่อแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะเกิดมากในบริเวณใต้ระดับน้ำใต้ดิน สารละลายนั้นน้ำใต้ดินจะพัดพาไหลไปตามทางน้ำใต้ดินไหลลงสู่ลำธารและสารละลายนั้นก็ไหลไปกับลำน้ำ ในไดอะแกรมล่างแสดงให้เห็นขั้นต่อมา ลำน้ำจะลึกมากขึ้นและระดับน้ำใต้ดินจะลดลงตามไปอยู่ ณ ตำแหน่งใหม่ ระบบของถ้ำที่เกิดขึ้นก่อนนี้ ตอนนี้จะไปเกิดในบริเวณที่มีอากาศ การระเหยของน้ำที่ซึมไปอยู่ในหินที่โผล่เหนือพื้นผิวในถ้ำเริ่มต้นที่จะสะสมคาร์บอเนต เรียกว่า "คราบปูน" (travertine) การที่คราบปูนพอกหนาขึ้นนั้นทำให้เกิดรูปแบบที่สวยงามหลายอย่าง เช่น หินย้อย (stalactite) หินงอก (stalamite) เสาหินย้อย (columns) ม่านระย้า (drip curtains) และระเบียงหิน (terrace)

รูป 25.18 ม่านระย้าจากคราบหินปูนในถ้ำจีโนลัน นิวเซาท์เวลล์ ออสเตรเลีย





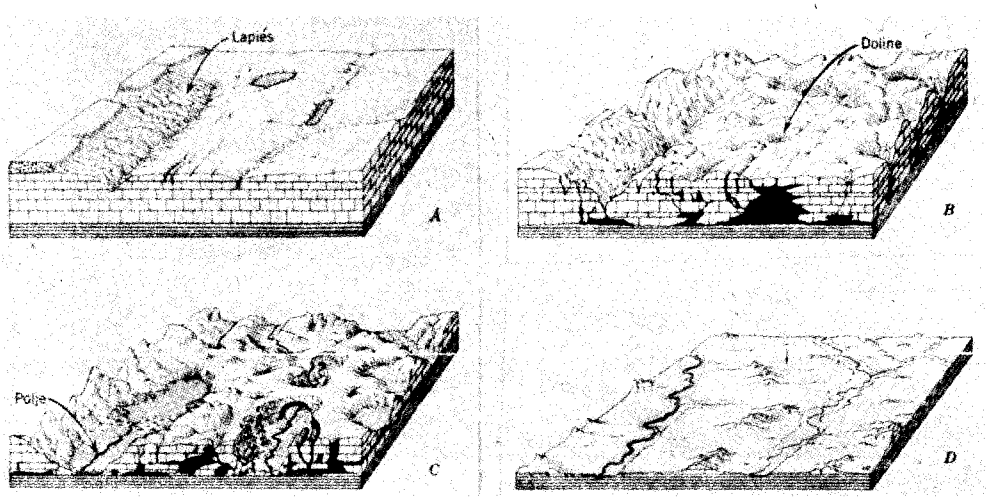
รูป 25.19 ระเบียงหินคราบหินปูนในถ้ำจีโนลัน

ความสำคัญของถ้ำมีอยู่หลายอย่าง ตลอดวิวัฒนาการของมนุษย์ในยุคเริ่มต้น ถ้ำนับเป็นที่อยู่อาศัยอันสำคัญ ในปัจจุบันนี้เราพบโครงกระดูกของคนเหล่านั้น รวมทั้งเครื่องมือและภาพวาดตามผนังถ้ำ ซึ่งถ้ำหลายแห่งของโลกได้ดำรงรักษาไว้มาหลายศตวรรษแล้ว ปัจจุบันนี้แม้ว่าถ้ำจะหมดความสำคัญจากการป้องกันอาวุธสงคราม แต่ถ้ำก็ยังคงมีความสำคัญสำหรับเก็บวัตถุที่มีค่าและเป็นแหล่งผลิตภัณฑ์ชนิดสำคัญ

ถ้ำเป็นแหล่งสะสมอันสำคัญของกัวโน (guano-phosphatic deposit) ซึ่งได้จากมูลนกหรือค้างคาว เป็นสารที่มีไนเตรทสูงและใช้ในอุตสาหกรรมทำปุ๋ยและวัตถุระเบิด มูลค้างคาวที่นำมาจากถ้ำแมมมอธใช้ทำดินปืนในสงครามเมื่อปี ค.ศ. 1812 มูลค้างคาวที่มีคุณค่าในปัจจุบันจะสะสมอยู่ในถ้ำหินปูนตามผนังของโกรกธารแกรนด์แคนยอนของแม่น้ำโคโลราโด ซึ่งได้มีการทำเหมืองและนำขึ้นมาโดยใช้รถเคเบิล

ลักษณะภูมิประเทศคาร์สต์

ในบริเวณที่หินปูนละลายไปมาก ๆ จะเป็นผลให้เกิดลักษณะภูมิประเทศขึ้นหลายรูปแบบ ลักษณะดังกล่าวมีเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดตามแนวชายฝั่งแดลเมเทียของยูโกสลาเวีย เป็นบริเวณที่มีภูมิประเทศที่เรียกว่าคาร์สต์ (karst) คำนี้เราใช้กับภูมิประเทศที่หินปูนถูกกระทำจนมีหลุมยุบ (sinkhole) จำนวนมาก และมีลำน้ำระดับพื้นผิวสายเล็ก ๆ ที่ไม่มีน้ำไหล หลุมยุบเป็นแอ่งต่ำที่มีผนังชันมาก มักเกิดในถ้ำหินปูน



25.20 ลำดับขั้นวิวัฒนาการของภูมิประเทศแบบหินปูน ภาพจะแสดงให้เห็นการเพิ่มความต่างระดับและถ้ำจะเกิดขึ้นเมื่อความต่างระดับค่อย ๆ ลดลง และเมื่อมวลหินปูนถูกพัดพาไป

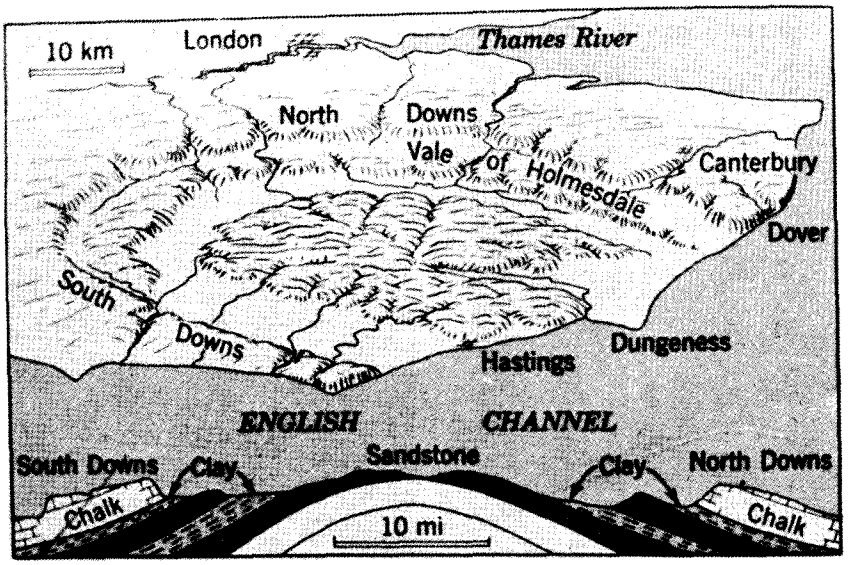
จากรูปที่ 25.20 แสดงให้เห็นถึงวิวัฒนาการของลักษณะภูมิประเทศแบบคาร์สต์ ซึ่งมีสี่ลำดับขั้น ภาพ A ชั้นหินปูนที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุมถูกกัดเป็นร่องและเมื่อหลาย ๆ ร่องขยายตัวเป็นร่องเดียวกันก็กลายเป็น "ทางดาดหินปูน" (Lapiés = Limestone pavement) ภาพ B เป็นหลุม

ยุบลึกมีผนังชันลักษณะคล้ายปล่อง เรียกว่า "แอ่งหินปูน" (doline) ซึ่งมีจำนวนมาก ภาพ C เมื่อแอ่งหินปูนขยายใหญ่จนต่อเนื่องกันทำให้เกิดที่ราบหินปูน (polje) ในหุบเขา มีพื้นแบนราบ ในบริเวณนี้จะมีลำน้ำไหลผ่านและดินก็เหมาะสมที่จะทำการเกษตรกรรม

ในบางแห่งภูมิประเทศแบบคาร์สต์หรือคล้ายคาร์สต์ก็มีเช่นกัน เช่น บริเวณถ้ำแมมมอธในรัฐเคนตัคกี และบริเวณคอสเซสของฝรั่งเศส บริเวณแหลมยูคะตาน และในหลายส่วนของคิวบาและเปอร์โตริโก

โดมและแอ่ง

โครงสร้างของชั้นหินชั้นหลายแห่งมีลักษณะโค้งอคล้ายโดมหรือกะละมัง โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 100—200 ไมล์ (160—325 กม.) แต่จะไม่มีบริเวณใดเลยที่เอียงจากระนาบเกิน 1—2 องศา โดมและแอ่งนี้เมื่อสร้างภาพตัดขวางแล้วจะได้ภูมิภาคแบบเขาอีโต้ซ้อน ๆ กัน ตัวอย่างเช่น บริเวณเวลด์ อัปลีฟ ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ บริเวณตรงกลางของโดมจะถูกกัดกร่อนพัดพาไป ชั้นหินที่เก่ากว่าจะโผล่ขึ้นมาในขณะที่แต่ละชั้นถูกตัดออก การกัดกร่อนจะเริ่มจากศูนย์กลาง

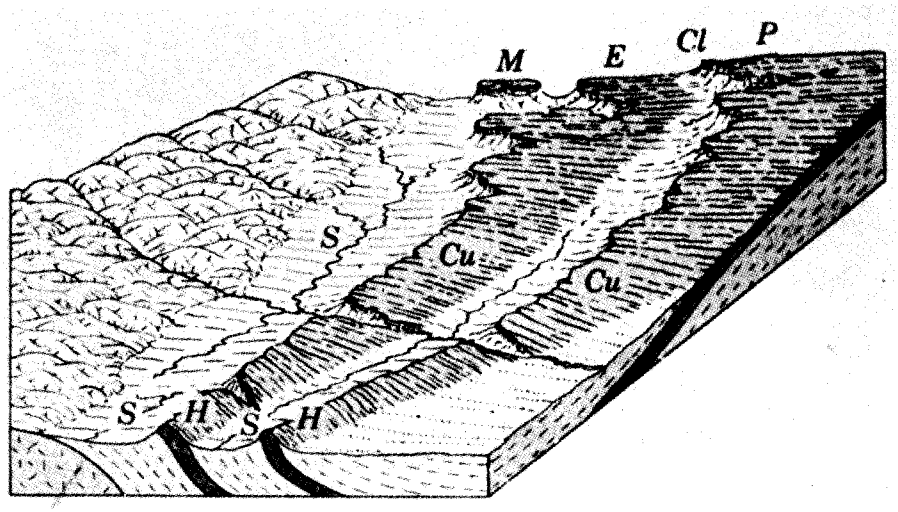


รูป 25.21 เขตเวลด์อยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ มีโดมหินชั้นขนาดใหญ่ ซึ่งยอดโดมถูกกัดกร่อนพัดพาไปแล้ว

ออกมา ตัวอย่างของโครงสร้างที่เป็นแอ่งต้นกว้างก็คือแอ่งปารีส ภูมิภาพแบบเขาอีโต้จะมีหน้าชันอยู่ด้านนอก เมื่อการกัดกร่อนพัดพาดำเนินต่อไป ภูมิภาพแบบเขาอีโต้จะถอยเข้าสู่ศูนย์กลางของแอ่ง

โดมอาจมีด้านชันและความสูงแตกต่างไปจากชั้นหินชนิดกว้างและต่ำ มุมเทด้านนอกมีมุมสูงถึง 25 องศาหรือมากกว่า ดังนั้น โดมจึงทำให้เกิดเนินเขาหรือภูเขา และเมื่อการกัดกร่อนถึงขั้นเต็มที่แล้วอาจทำให้เกิดยอดเขาขรุขระ ภูเขาชนิดนี้เราเรียกว่า "แนวภูเขาโดม" (mountainous dome)

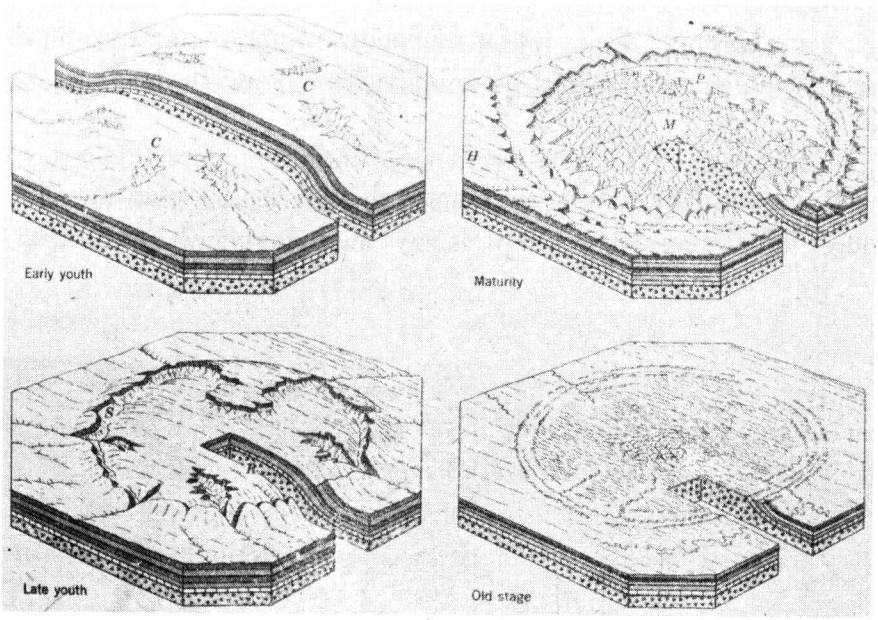
ขอบโดมของชั้นหินด้านชันที่ถูกกัดกร่อนกลายเป็นสันคมเรียก "สันเขาหนอกวัว" (hog-back ridge) สลับกับหุบเขาแคบ ๆ (ดังรูป 25.22) สันเขาเกิดจากชั้นหินที่คงทน เช่น หินทราย



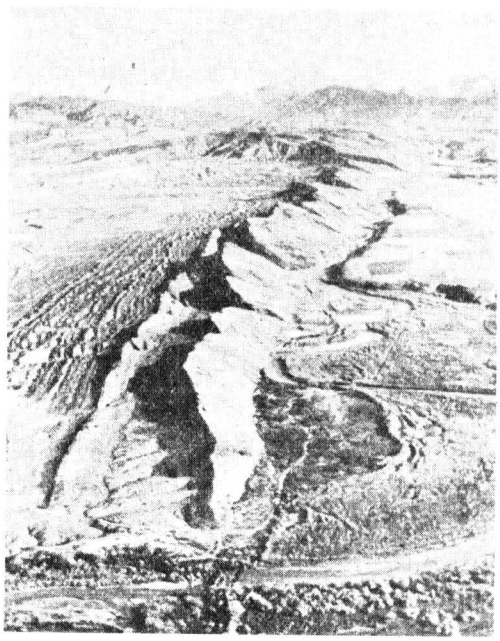
รูป 25.22 เขาหนอกวัวอาจเปลี่ยนสภาพเป็นเขาอีโต้ และเขาอีโต้เปลี่ยนเป็นที่ราบสูงเอสปลาเนด ถ้าชั้นหินนี้มีอาการเอียงน้อยกว่าชั้นหินอื่น ๆ H = สันเขาหนอกวัว S = ลำน้ำตามแนวระดับ Cu = เขาอีโต้ M = เนินเมซา E = เอสปลาเนด Cl = หน้าผา P = ที่ราบสูง

ส่วนหุบเขานั้นจะเกิดขึ้นในชั้นหินดินดาน ลำธารที่ไหลในหุบเขาเป็นชนิดลำน้ำตามแนวระดับ เมื่อมีลำน้ำสาขาที่ไหลมาจากด้านข้างของสันเขามารวมด้วย ทำให้เกิดระบบลำน้ำแบบมุมฉาก

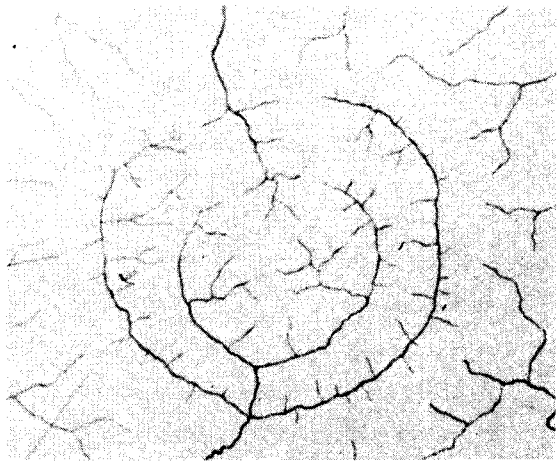
การกัดกร่อนพัดพาของภูเขาโดมดังแสดงในรูป 25.23 ในหน้า 214 นั้นเริ่มจากวัยหนุ่มตอนต้น ซึ่งมีแม่น้ำตามแนวเทไหลลงมาในรูปแบบทางระบายน้ำแบบรัศมี (radial drainage pattern) ลำน้ำนี้จะกัดเซาะด้านข้างของภูเขาโดมลึกลงไปทำให้หินชั้นล่าง ๆ โผล่ขึ้นมาอย่างรวดเร็ว ขณะที่การกัดกร่อนดำเนินต่อไปนั้น ชั้นหินที่ทนทานก็เริ่มที่จะเป็นสันแหลมคมหรือเป็นเขาหนอกวัวล้อมรอบโดม (ดูรูป 25.24 ในหน้า 214) สันเขาและหุบเขาจะวางตัวเป็นวงซ้อนกันล้อมรอบโดมที่ถูกกัดกร่อนเต็มที่ ลำน้ำที่ไหลผ่านหุบเขาบริเวณชั้นหินอ่อนในตอนแรก จะทำให้เกิดระบบลำน้ำแบบวงแหวน (concentric or annular drainage pattern) (ดูรูป 25.25 หน้า 215)



รูป 25.23 ลำดับขั้นวิวัฒนาการของภูเขาโดม C = แม่น้ำตามแนวเท S = แม่น้ำตามแนวระดับ F = ภูเขารูปหน้าจั่ว P = ที่ราบสูงซึ่งอยู่ตรงกลางโดม M = ภูเขาหินผลึก H = ชั้นหินระนาบที่อยู่ล้อมรอบโดม R = แม่น้ำย้อนแนวเท



รูป 25.24 ทิวเขาหนอกวัวบนขอบโค้งกระทะคว่ำเวอร์จินอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ของรัฐยูตาห์



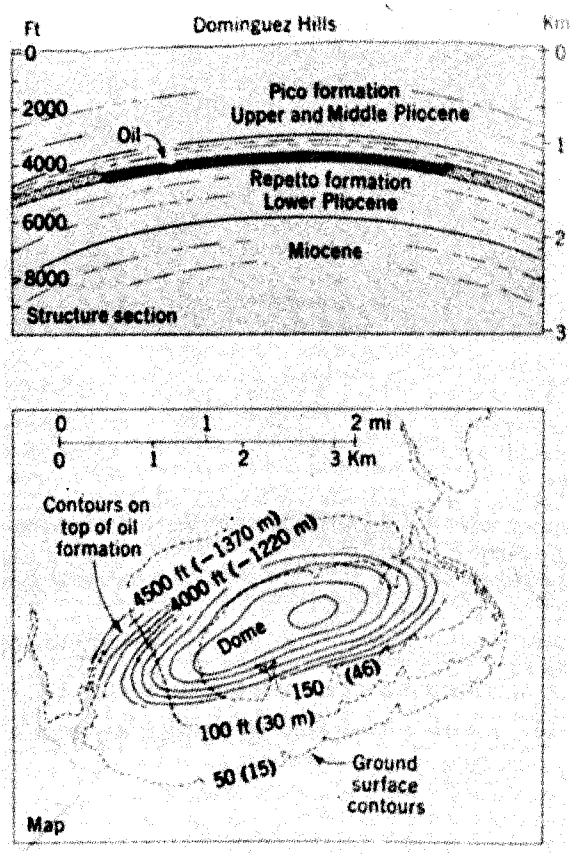
รูป 25.25 รูปแบบการระบายน้ำที่มีลักษณะเป็นวงกลม และเป็นรัศมีของโดมที่มีอายุวัยตอนกลาง

ขณะที่การกัดกร่อนพัดพาของโดมดำเนินต่อไป หินที่เก่ากว่าและอยู่ลึกกว่าจะโผล่ขึ้นมาที่ศูนย์กลาง ถ้าสภาวะทางธรณีวิทยาเหมาะสม การกัดกร่อนพัดพาอาจจะเกิดขึ้นในแกนกลางของหินอัคนีที่เย็นตัวภายใน ซึ่งเป็นหินที่ถูกแรงดันขึ้นมาทำให้เปลือกโลกกลายเป็นโดม ในปรากฏการณ์นี้หินอัคนีจะมีอายุน้อยกว่าหินชั้นของโดม

ในโดมบางลูกหินแกนกลางเป็นหินเก่าแก่มาก เก่ามากกว่าหินชั้นนั้นและเป็นฐานรองรับให้มีการตกตะกอนเป็นหินชั้น หินนี้จะเห็นอยู่ตรงกลางโดมเนื่องจากชั้นหินไม่หนาพอที่จะปิดหินเก่าได้เมื่อโดมถูกกัดกร่อนเต็มที่

ชั้นหินชั้นสุดท้ายจะเป็นแถบจากหินผลึกที่เป็นแกนกลางเกาะติดกับด้านข้างของหินแกนกลางเป็นทางรูปสามเหลี่ยมเรียกว่า แฟลติรอน (flatirons) แฟลติรอนจะบีดปลายทิวเขาและมีโกรกธารรูปตัววีเป็นตัวแบ่งแยก

ในขั้นที่มีอายุมากภูเขาโดมจะมีระดับลดลงจนเป็นพื้นเกือบราบ (peneplain) ซึ่งเขาหนอกวัวจะเปลี่ยนสภาพเป็นลอนเนินเขาเตี้ย ๆ บริเวณแกนกลางจะมีเขาโดดตั้งเด่นอยู่เหนือพื้นเกือบราบ



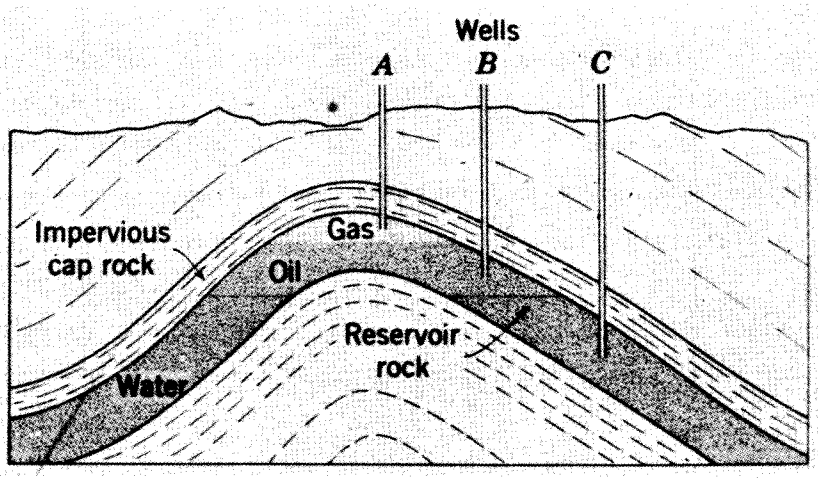
รูป 25.26 เนินเขาโดมิเกวซเป็นโดมต่ำมีอายุในตอนต้นของการผุกร่อนพัดพา ลึกลงไปข้างใต้จะเป็นแอ่งน้ำมันขนาดใหญ่

สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรที่สำคัญของโดม

โดมเป็นแหล่งที่มีน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติสะสมอยู่จำนวนมาก โดมหลายลูกในเทือกเขารอกกีเป็นแหล่งผลิตน้ำมันที่สำคัญ ตัวอย่างเช่น รอกกี สปริงโดม และทีพอทโดม ในไวโอมิง น้ำมันจะสะสมอยู่ในชั้นหินทรายของโดมซึ่งมีชั้นหินดินดานทับอยู่เบื้องบน ตัวอย่างของโดมเตี้ย ๆ ซึ่งอยู่ในวิวัฒนาการขั้นเริ่มต้นเป็นแหล่งผลิตน้ำมันที่มีมูลค่ามหาศาลคือ โดมิงกูเอซ ฮิลล์ ในลอสแอนเจลิส เบซิน (ดูรูป 25.26) รูปที่ 25.27 ในหน้า 217 แสดงให้เห็นถึงการวางตัวของน้ำมัน ก๊าซ และน้ำใต้ดินในหินชั้นบนโดม

ภูเขาโดมมีสิ่งแวดล้อมบางอย่างที่แตกต่างออกไป ดูตัวอย่างได้จากเขาแบล็คฮิลล์ ซึ่งเป็นภูเขาโดมในดาโกตาใต้ และทางตะวันออกของรัฐไวโอมิง

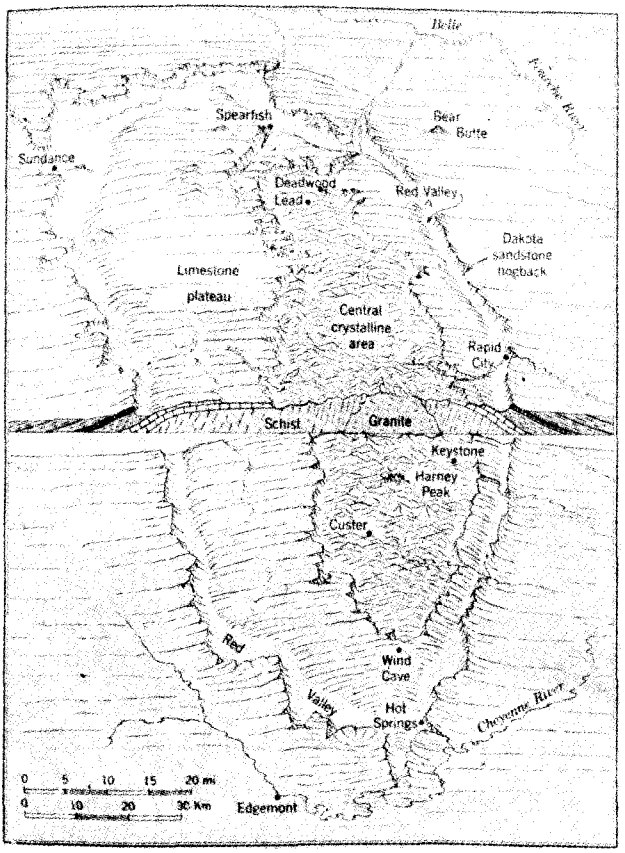
มีหุบเขาตามแนวระดับเป็นวงแหวนล้อมรอบโดม ซึ่งเป็นแหล่งที่เหมาะสมแก่การสร้างทางรถไฟและทางหลวง จากธรรมชาติดังกล่าวนี้ ทำให้มีเมืองมากมายเกิดขึ้นในบริเวณหุบเขา ในภูเขาแบล็ค ฮิลล์ มีหุบเขารูปวงแหวนโดยเฉพาะหุบเขาเรดแวลเลย์ เป็นหุบเขาที่วิวัฒนาการขึ้นรอบโดม จึงเรียกว่า เรซแทรค ตามรูปร่างของมัน บริเวณหุบเขาเป็นหินอ่อนจึงถูกกัดเซาะได้ง่าย ในหุบเขาเรดแวลเลย์มีเมืองหลายเมืองตั้งอยู่เรียงรายกัน เช่น ราปีดซิตี สเปียร์ฟิช และสเตอร์กิช ทางด้านนอกของหุบเขาเรดแวลเลย์เป็นเนินเขาหนอกวัวสูงและเป็นสันคม เป็นสันเขาหินทรายดาโกตา เราเรียกว่า ฮ็อกแบ็คริดจ์ บางแห่งสูงกว่าระดับหุบเขาเรดแวลเลย์ 400--500 ฟุต (120—150 ม.) ด้านนอกไกลออกไปเป็นขอบของโดม ความลาดชันของชั้นหินลดลงและมีแนวเขาอีโต้เกิดขึ้น ที่ราบโดยรอบโดมนั้นเราสามารถขุดบ่อน้ำขึ้นมาใช้ได้



รูป 25.27 ภาพในจินตนาการการแสดงแหล่งน้ำมันในโดมหินชั้น หลุม A เป็นหลุมก๊าซ หลุม B เป็นหลุมน้ำมัน และหลุม C เป็นบ่อน้ำมัน หินหมวกโดมเป็นหินดินดาน แหล่งน้ำมันเป็นหินทราย

บริเวณตะวันออกของตอนกลางเขาแบล็ค ฮิลล์ ประกอบด้วยแกนภูเขาประเภทหินเย็นตัวภายในและหินแปร ภูเขาเหล่านั้นอุดมไปด้วยป่าไม้ ในขณะที่หุบเขาระหว่างกลางเป็นอุทยานที่งดงาม ทำให้บริเวณนั้นกลายเป็นสถานที่พักผ่อนในฤดูร้อน วนอุทยานฮาร์นี เป็นวนอุทยานที่ตั้งอยู่บนแกนยอดเขาสูงสุดที่มีระดับสูงถึง 7,242 ฟุต (2,207 ม.) ทางเหนือของแกนกลาง อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับเมืองลีดและเล็ดวูด เป็นแหล่งแร่ที่มีมูลค่ามหาศาล ที่เมืองลีดมีเหมืองแร่ชื่อเหมืองโฮมสเตด

ซึ่งมีแร่มากมาย เป็นเหมืองแร่ที่ผลิตทองได้มากที่สุดแห่งหนึ่งของโลก ด้านใต้ของผลึกหินแกนกลางที่เมืองเพนนิงตัน มีเมืองเอ็ดตา ซึ่งเป็นที่รู้กันว่าเป็นแหล่งแร่เปกมาไทต์อันเป็นผลึกของไพรอกซีนจำนวนมาก ปรากฏการณ์นี้แสดงว่าแกนในของโดมที่ถูกกัดกร่อนเต็มที่น่าจะเป็นแหล่งแร่มูลค่ามหาศาล



รูป 25.28 แบล็ค ฮิลล์ ประกอบด้วยโดมยอดแบนกว้าง เป็นโดมที่ถูกกัดกร่อนไปลึกมากแล้ว ทำให้หินผลึกโผล่ขึ้นมา

บริเวณตะวันตกของตอนกลางเขาแบล็ค ฮิลล์ ประกอบด้วยที่ราบสูงหินปูนที่ถูกลำน้ำกัดกร่อนเป็นร่องลึก โดมตันกำเนิดมียอดแบนราบ ที่ราบสูงหินปูนเป็นสิ่งแสดงให้เห็นส่วนที่เหลือของชั้นหินชั้นที่ค่อย ๆ หลุดออกไปจากแกนโดม

คำถามทบทวนบทที่ 25

1. โครงสร้างทางธรณีชนิดใดบ้างที่เป็นตัวสร้างหินฐานของแผ่นดินโลก จงบอกชื่อมาทั้งหมด และอธิบายแต่ละชื่ออย่างสั้น ๆ
2. ส่วนประกอบและโครงสร้างของหินฐานเป็นตัวควบคุมลักษณะภูมิประเทศได้อย่างไร จงเปรียบเทียบลักษณะภูมิปรุะเทศที่เกิดบนหินชั้น หินแปรและหินอัคนี
3. จงนิยามคำว่า แนวเทและแนวสันหิน หินชนิดใดบ้างที่เราจะใช้คำสองคำนี้อธิบายได้
4. ที่ราบชายฝั่งทะเลเกิดขึ้นได้อย่างไร มีหินชนิดใดวางตัวอยู่ใต้ที่ราบนั้น ลำน้ำตามแนวเทคืออะไร มันเกิดขึ้นได้อย่างไร และเกิดที่ส่วนไหนของที่ราบชายฝั่งทะเลที่เกิดขึ้นใหม่
5. จงอธิบายถึงลักษณะภูมิประเทศของที่ราบชายฝั่งทะเลวัยตอนกลาง จงบอกชื่อส่วนประกอบของที่ราบชายฝั่งตามแนวภาพตัดตามยาวตั้งแต่บริเวณแผ่นดินเก่าไปจนถึงทะเล ลำน้ำตามแนวระดับคืออะไร
6. จงอธิบายลักษณะของที่ราบชายฝั่งทะเลของมหาสมุทรแอตแลนติกและรัฐชายฝั่งริมอ่าว (ของสหรัฐ ฯ) รูปแบบการระบายน้ำของรัฐชายฝั่งริมอ่าวมีลักษณะเช่นไร ลักษณะชายฝั่งประเภทใดที่เกิดสัมพันธ์กับชายฝั่งริมอ่าวนั้น
7. จงอธิบายสั้น ๆ เกี่ยวกับลักษณะที่ราบของที่ราบชายฝั่งทะเลทางภาคตะวันออกเฉียงใต้ของอังกฤษ
8. ภูมิประเทศที่ราบชายฝั่งมีอิทธิพลต่อการเกษตรและการขนส่งอย่างไร จงอธิบายว่าบ่อน้ำบาดาลเกิดขึ้นบริเวณที่ราบชายฝั่งได้อย่างไร
9. มีแร่ธาตุอะไรบ้างซึ่งเป็นผลผลิตของที่ราบชายฝั่งทะเล แร่ธาตุดังกล่าวแร่ชนิดใดเป็นแร่ที่สำคัญที่สุดในสหรัฐอเมริกา น้ำมันปิโตรเลียมจะเกิดขึ้นในโครงสร้างแบบใดที่อยู่ใต้ที่ราบชายฝั่งทะเลโดมเกลือคืออะไร
10. จงอธิบายลำดับขั้นของวิวัฒนาการการกัดกร่อนพัดพาบนชั้นหินระนาบ อะไรเป็นตัวชี้ให้เห็นว่ามีความต่างระดับสูงสุดเกิดขึ้นในภูมิประเทศนั้น
11. มีลักษณะภูมิประเทศพิเศษชนิดใดที่เกิดขึ้นระหว่างการกัดกร่อนของชั้นหินระนาบของหินดินดานและหินทรายในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง จงอธิบายคำต่อไปนี้ เนินเมซา เนินยอดบ้าน เอสเพล-เนด ที่ราบชั้นหิน บริเวณทุรกันดาร
12. รูปแบบการระบายน้ำแบบกิ่งไม้คืออะไร รูปแบบการระบายน้ำแบบนี้วิวัฒนาการขึ้นบนหินชนิดใด
13. ภูมิประเทศลำดับขั้นต่าง ๆ ของวิวัฒนาการบนชั้นหินที่วางตัวในแนวระนาบมีอิทธิพลต่อการเกษตรและการตั้งถิ่นฐานของมนุษยชาติอย่างไร แร่ทางเศรษฐกิจที่สำคัญ ๆ ที่เป็นผลผลิตจากชั้นหินระนาบได้แก่อะไรบ้าง
14. ถ้ำหินปูนเกิดขึ้นได้อย่างไร หลุมยุบคืออะไร คราบปูนคืออะไร กัวโนคืออะไร

15. ภูมิประเทศแบบคาร์สต์คืออะไร คำนี้มีกำเนิดมาจากที่ใด จงอธิบายคำว่า ทางดาดหินปูน แอ่งหินปูนและที่ราบหินปูน จงบอกชื่อสถานที่ที่มีภูมิประเทศแบบคาร์สต์ที่ท่านรู้จัก
16. จงอธิบายภูมิประเทศแบบโดม และแอ่งที่เกิดขึ้นบนชั้นหินชั้น
17. จงอธิบายระบบการเปลี่ยนแปลงของภูมิประเทศที่เกิดขึ้นบนภูเขารูปโดม กล่าวถึงการกัดกร่อนพัดพาตั้งแต่วัยหนุ่ม วัยกลาง วัยแก่ รูปแบบการระบายน้ำบนภูมิประเทศภูเขารูปโดมเป็นรูปแบบใด เปรียบเทียบกับรูปแบบการระบายน้ำกับที่ราบชายฝั่งทะเล
18. เนินเขาหนอกวัวคืออะไร เกิดขึ้นได้อย่างไร ภูเขารูปหน้าจั่วคืออะไร
19. ภูมิประเทศรูปโดมเป็นแหล่งกักเก็บน้ำมันดิบได้อย่างไร จงยกตัวอย่างภูมิประเทศแบบโดมที่เป็นแหล่งผลิตน้ำมันสำคัญ
20. จงอธิบายอย่างสั้นๆ ถึงความสำคัญของโครงสร้างและลักษณะภูมิประเทศของแบล็ค ฮิลล์ เนินเขานี้มีคุณค่าในทางเศรษฐกิจในทางใด

บทที่ 26

รอยโค้ง รอยเลื่อน และภูเขารอยเลื่อน

บริเวณชั้นหินชั้นที่ถูกแรงอัดทำให้โก่งเป็นลอนคลื่นแนวขนาน และพื้นที่ดังกล่าวต้องผ่านลำดับขั้นการกัดกร่อน ดังรูป 26.1 ลำน้ำตามแนวเทสายสั้นๆ จะไหลตามด้านข้างของรอยโค้งเพื่อไปเชื่อมลำน้ำตามแนวเทสายใหญ่ที่ไหลตามแกนของร่องรอยโค้ง

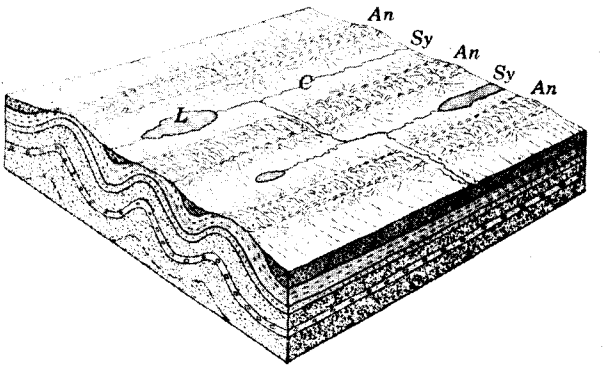
คำนิยามธรณีวิทยาเรียกอาการโค้งหงายว่า "โค้งกระทะหงาย" (syncline) และโค้งคว่ำว่า "โค้งกระทะคว่ำ" (anticline) เพื่อช่วยในการจดจำคำนี้ได้ง่ายขึ้นจึงควรทราบความหมายของรากศัพท์ด้วย คำว่า "clino" แปลว่า "เอียง" (lean) คำ "syn" แปลว่า "เข้าหากัน" (together) ดังนั้น คำว่า syncline ในแง่ของโครงสร้างของชั้นหินจึงหมายถึงการเอียงของชั้นหินไปยังกึ่งกลางของร่อง anti แปลว่าต่อต้านหรือตรงกันข้ามเมื่อไปใช้กับ anticline จึงหมายถึงชั้นหินเอียงออกจากเส้นกลาง ในขั้นกำเนิดของวิวัฒนาการของรอยโค้ง โค้งกระทะคว่ำเราจะตีความหมายว่าเป็นภูเขาหรือสันเขา โค้งกระทะหงายเป็นหุบเขา

บล็อก A (รูป 26.1) แสดงให้เห็นถึงการกัดกร่อนพัดพาของโค้งกระทะคว่ำซึ่งเกิดขึ้นในช่วงสุดท้ายของการโก่งตัว บริเวณโค้งกระทะหงายจะมีวัตถุเนินตะกอนรูปพัดไหลลงมาจากโค้งกระทะคว่ำที่อยู่ติดกัน หลังจากวัตถุที่อ่อนและไม่มั่นคงถูกพัดพาไปจากรอยโค้งจนหมดดังที่แสดงในบล็อก B ชั้นหินทรายที่เชื่อมตัวเองดีแล้วก็จะโผล่ขึ้นมาให้เห็นรูปแบบอันสมบูรณ์ของการโก่งตัว สิ่งที่เกิดคู่กับโค้งกระทะหงายคือ "หุบเขาโค้งกระทะหงาย" (synclinal valleys) และโค้งกระทะคว่ำคือ "ภูเขาโค้งกระทะคว่ำ" (anticlinal mountains)

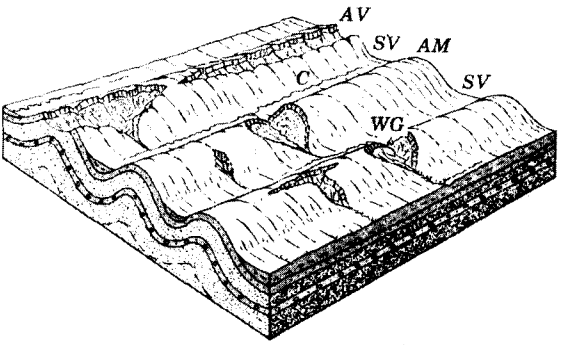
ลำธารที่ไหลตามด้านข้างของโค้งกระทะคว่ำ จะกัดเซาะชั้นหินอย่างรวดเร็วจนเป็น "ห้วยลึก" (ravine) ทำให้ชั้นหินเบื้องล่างโผล่ออกมา รอยแตกตามสันโค้งกระทะคว่ำจะขยายตัวไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเป็นหุบเขาแคบๆ เป็นแนวยาวตามสันของโค้งกระทะคว่ำ (บล็อก B) หุบเขานี้จะเต็มไปด้วยลำน้ำตามแนวระดับที่กัดลึกลงไปในชั้นหินที่อ่อน เราเรียกว่า "หุบเขากระทะคว่ำ" (anticlinal valley) เพราะเป็นหุบเขาที่วางตัวตามแนวเส้นแกนกลางของโค้งกระทะคว่ำ เมื่อหุบเขาขยายใหญ่ขึ้น ยาวขึ้นและแตกแยกมากขึ้น ในที่สุดก็จะแทนที่ภูเขาโค้งกระทะคว่ำซึ่งเป็นภูมิประเทศกำเนิด และมีลักษณะภูมิประเทศตรงกันข้าม หุบเขาโค้งกระทะหงายซึ่งเมื่อเกิดมาจะมีลำน้ำใหญ่ไหลผ่านแกนกลาง และเมื่อถึงระยะนี้ก็จะอยู่ระหว่างหุบเขาโค้งกระทะคว่ำซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นทุกทีอยู่ทั้งสองข้าง ยิ่งไปกว่านั้นหุบเขาโค้งกระทะคว่ำจะถูกกัดลึกลงไปได้เร็วกว่า เนื่องจากหินแกนกลางของโค้งกระทะคว่ำเป็นชั้นหินที่อ่อน จนในที่สุดบริเวณที่เคยเซาะเป็นโค้งกระทะหงายจะเปลี่ยนเป็นสันเขาเรียกว่า "ภูเขาโค้งกระทะหงาย" (synclinal mountains) การเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิประเทศ

รูป 26.1 ลำดับขั้นวิวัฒนาการของชั้นหินโก่งตัว

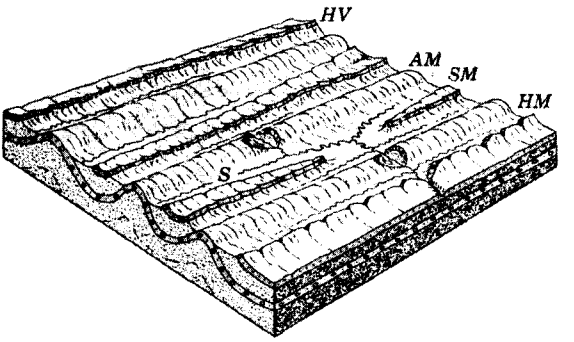
A – ขณะที่ชั้นหินกำลังโก่งตัวอยู่ การกัดกร่อนก็จะกัดกร่อนโค้งกระทะคว่ำ ทำให้มีตะกอนน้ำพาไปทับถมในโค้งกระทะหงาย ทำให้ความต่างระดับมีน้อย An = โค้งกระทะคว่ำ Sy = โค้งกระทะหงาย C = ลำน้ำตามแนวเท L = ทะเลสาบ



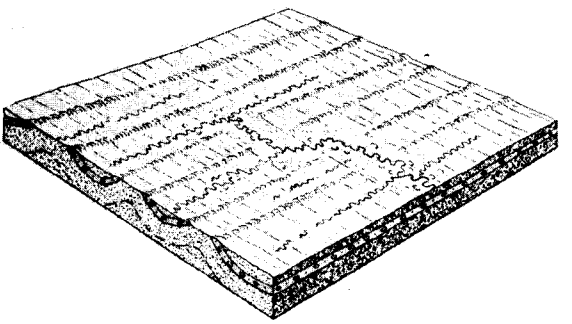
B – หลังจากการโก่งตัวยุติลง การกัดกร่อนจะทำให้หินที่คงทนโผล่ขึ้นมา เช่น หินทรายหรือ ควอร์ตไซต์ AV = หุบเขาโค้งกระทะคว่ำ SV = หุบเขาโค้งกระทะหงาย C = ลำน้ำตามแนวเท WG = ช่องเขาน้ำกัด



C – การกัดกร่อนพัดพาต่อเนื่องกัน ทำให้หินแข็งถูกกัดกร่อนพัดพาไป และหินชั้นล่างปรากฏออกมาให้เห็น AM = ภูเขาโค้งกระทะคว่ำ SM = ภูเขาโค้งกระทะหงาย HM = สันเขาไหล่เรียบ HV = หุบเขาผ่าเขาไหล่เรียบ S = ลำน้ำตามแนวเท

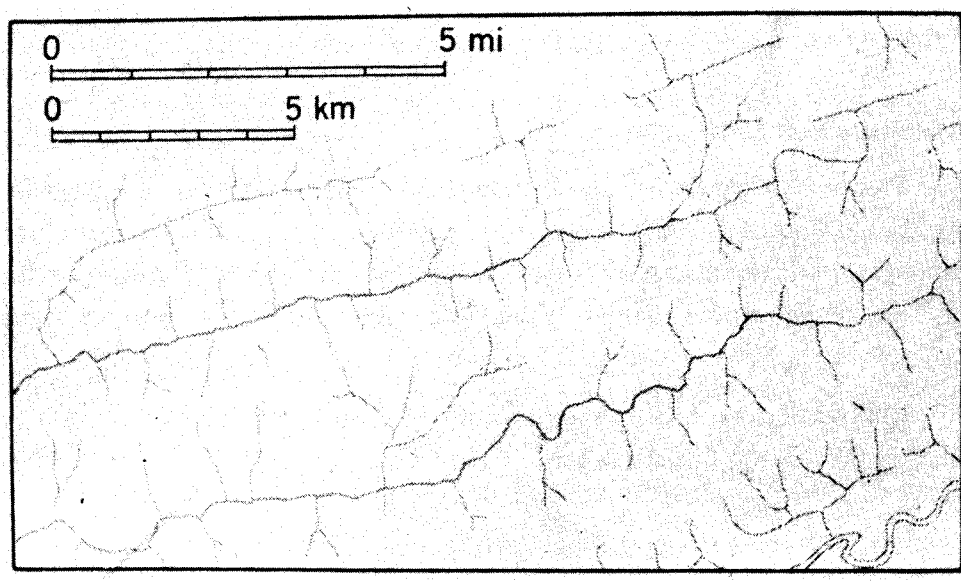


D – ความต่างระดับลดลงเป็นพื้นที่เกือบราบแต่ว่ายังคงสังเกตเห็นแนวหินแข็งอยู่



เช่นนี้ ทำให้นึกถึงคำของพระผู้เป็นเจ้า Isaiah ที่กล่าวว่า "หุบเขาทั้งหลายจะถูกยกให้สูงและภูเขาและเนินเขาทั้งหลายจะต้องถูกทำให้ต่ำ" เมื่อถึงขั้นนี้ ซึ่งเป็นขั้นโตเต็มที่ของการกัดกร่อนตามรอยโค้งลักษณะภูมิประเทศกำเนิดที่เคยเป็นมาจะมีลักษณะกลับกันหมด ระบบการระบายน้ำจะเป็นแบบบรรจบกันเป็นมุมฉาก มีลักษณะคล้ายกับระบบลำน้ำในที่ราบชายฝั่งขั้นที่ถูกกัดกร่อนเต็มที่ แต่จะต่างกันตรงที่ว่าลำน้ำตามแนวระดับสายใหญ่จะอยู่ชิดกันมากและมีสาขาต่าง ๆ สั้นกว่า

ในบริเวณแนวของรอยโค้งที่อยู่ใกล้กัน ลำน้ำสายหลักอาจตัดผ่านรอยโค้งไปได้หลายแนวโดยตัดผ่านสันเขาเกือบเป็นมุมฉากเป็น "ช่องเขาน้ำกัด" (watergaps) แคบ ๆ ลำน้ำนี้มีลักษณะคล้ายกับว่าเคยมีอยู่ก่อนจะมีการโก่งตัว และรักษาสภาพไว้ได้ในขณะที่มีการโก่งตัว เราใช้คำว่า "แม่น้ำบรรพกาล" (antecedent-หรือแม่น้ำมีมาก่อน) กับแม่น้ำดังกล่าวนั้น



รูป 26.2 รูปแบบการระบายน้ำแบบมุมฉากบนโครงสร้างแบบโก่งตัว

ขณะที่การกัดกร่อนชั้นหินในรอยโค้งดำเนินต่อไป ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงและตำแหน่งของสันเขาและหุบเขาชนิดต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ลักษณะต่าง ๆ จะเป็นตรงกันข้ามดังแสดงในบล็อก C สันเขาโค้งกระทะหงายจะถูกกัดกร่อนพัดพาไปหมด ขณะเดียวกันก็จะมีสันเขาใหม่เกิดขึ้นในแนวแกนกลางของหุบเขาโค้งกระทะคว่ำ รูปทรงนี้เป็นผลมาจากชั้นหินคงทนที่เก่าแก่กว่าและโค้งตัวนั้นไม่มีสิ่งใดปกคลุม สันเขาใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นการกำเนิดครั้งที่สองของสันเขาโค้งกระทะคว่ำ จะเกิดขึ้นเป็นแนวทั้งสองข้างของสันหินที่อ่อน ในช่วงเวลาที่สันเขาโค้งกระทะคว่ำคล้ายกับโค้งกระทะคว่ำต้นกำเนิดของพื้นผิวต้นกำเนิด ซึ่งจะแตกแยกออกโดยการกระทำของธารน้ำ และในที่สุดก็จะเปลี่ยน

สภาพเป็นหุบเขาโค้งกระทะคว่ำ ดังนั้น จึงเห็นได้ว่ารูปทรงที่กลับกันของภูมิประเทศได้เกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ในบริเวณที่ชั้นหินในสันเขาเอียงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเพียงทิศทางเดียวโดยแสดงให้เห็นเพียงด้านข้างด้านหนึ่งของโค้งกระทะคว่ำหรือโค้งกระทะหงายเท่านั้น เราเรียกสันเขานั้นว่า "สันเขาไหล่เรียบ" (homoclinal ridge-บล็อก C) เช่นเดียวกับหุบเขาที่เกิดบนหินดินดานหรือหินบู่นที่อ่อนและเอียงไปเพียงทิศทางเดียว ที่เรียกว่า "หุบเขาผ่าเขาไหล่เรียบ" (homoclinal valleys)

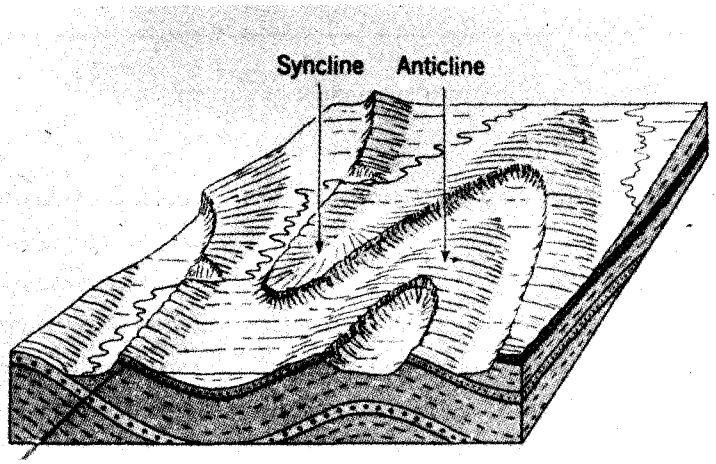
สรุปได้ว่า ลักษณะภูมิประเทศที่วิวัฒนาการมาเต็มที่บนพื้นที่ซึ่งมีชั้นหินที่แข็งแกร่งทนทานวางตัวสลับกับชั้นหินที่อ่อนนั้นจะมีสันเขาหรือภูเขาอยู่สามชนิด คือ โค้งกระทะคว่ำ โค้งกระทะหงายและเขาไหล่เรียบ และมีหุบเขาอยู่สามชนิดเช่นกัน คือ โค้งกระทะคว่ำ โค้งกระทะหงายและผ่าเขาไหล่เรียบ

ในวาระสุดท้ายรอยโค้งจะลดระดับลงจนเป็นพื้นที่เกือบราบ (บล็อก C) ในระยะนั้นสันเขาหรือเนินต่ำ ๆ และลำน้ำยังคงรักษารูปแบบพบกันเป็นมุมฉากไว้

สันเขาคดเคี้ยวและรอยโค้งดึงตัว

ภาพรอยโค้งที่แสดงในรูป 26.1 เป็นแบบต่อเนื่อง (continuous) และเป็นแบบสันเสมอ (even crested) เป็นรอยโค้งที่มีแนวโดยประมาณขนานกันและยาวต่อเนื่องกันเป็นระยะทางไกลมาก บางบริเวณรอยโค้งไม่ได้เป็นแบบต่อเนื่องหรือเป็นสันเสมอกัน แต่จะมีสันสูงในที่หนึ่งและต่ำลงในอีกที่หนึ่ง เมื่อมีการกัดกร่อนถึงขั้นเต็มที่รอยโค้งแต่ละแนวจะปรากฏให้เห็นเป็นสันเขาคดเคี้ยว (zigzag ridge)

รูปทรงภูมิประเทศแบบโค้งกระทะหงายซึ่งร่องทรุดต่ำลงหรือถูกดึง (plunge) จะแตกต่างจากโค้งกระทะคว่ำที่ถูกดึงลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อโค้งทั้งสองนั้นถูกกัดกร่อนจนเต็มที่ รูปที่ 26.3

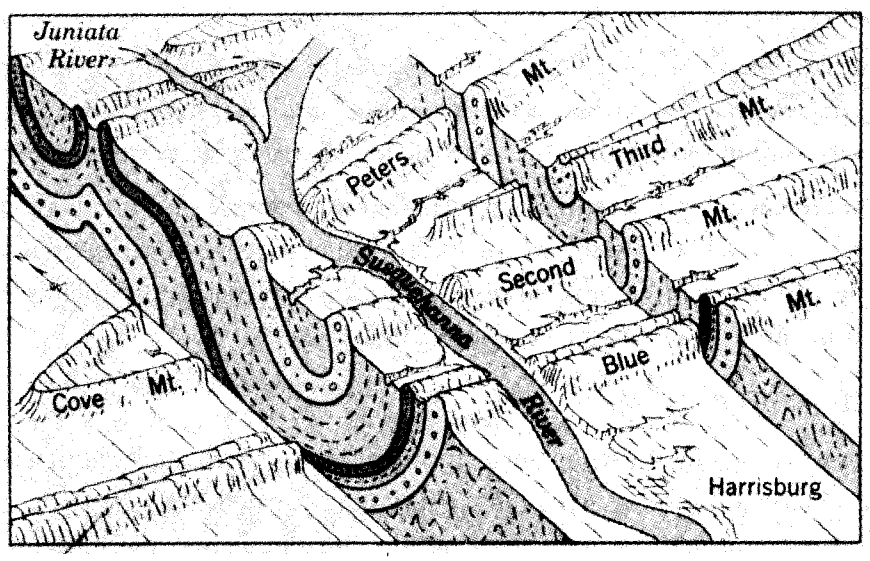


รูป 26.3 การโก่งตัวโดยที่สันถูกดึงไปมา ทำให้เกิดเป็นสันเขาคดเคี้ยว เมื่อถูกกัดกร่อนพัดพามาถึงวัยตอนกลาง

เปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างของรอยโค้งทั้งสอง รอยโค้งกระทะหงายดึงตัว (plunging syncline) จะปรากฏให้เห็นเป็นสันเขาซึ่งมีบริเวณสูงสุดของสันเว้าน้อยๆ แต่จะมีหน้าผาลาดลงไปทางด้านปลายและด้านข้างอย่างรวดเร็ว ตามทิศทางของการดึงตัวของเส้นแกนกลางของรอยโค้ง หรือ "แกน" (axis) สันเขานี้จะวิวัฒนาการขึ้นและมีรอยเว้ามากขึ้น และแยกเป็นสันเขาไหล่เรียบสองสัน โค้งกระทะคว่ำดึงตัวจะปรากฏให้เห็นเป็นสันเขา ที่มีทิศทางของจุดหลายจุดอยู่ตรงข้ามกับภูเขาโค้งกระทะหงาย ตรงปลายจะโค้งเรียบและเอียงต่ำลงอย่างสม่ำเสมอสู่ระดับหุบเขาในทิศทางที่ถูกดึง ในทิศทางตรงกันข้ามภูเขาจะแยกตัวออกเป็นสันเขาไหล่เรียบสองแนว โดยหุบเขานี้จะถูกขนาบด้วยหน้าผาชัน ปลายสุดของหุบเขานี้ที่ซึ่งแนวหน้าผาจะเหวี่ยงตัวโค้งมน เราเรียกว่า "รอยเว้าโค้งกระทะคว่ำ" (anticlinal cove) เมื่อเปรียบลักษณะภูมิประเทศทั้งสองรูปนี้แล้วจะเห็นว่าด้านหน้าผาชันจะหันออกไปทางโค้งกระทะหงายดึงตัว อีกด้านหนึ่งจะหันเข้าหาโค้งกระทะคว่ำดึงตัว

สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรในเขตรอยโค้ง

สิ่งแวดล้อมและคุณค่าเชิงเศรษฐกิจของบริเวณรอยโค้งนั้นจะดูได้จากบริเวณเทือกเขา แอปปาเลเชียน ทางแถบกลางตอนใต้และตะวันออกของเพนซิลเวเนีย สันเขาที่เกิดจากชั้นหินทรายที่คงทนและหินกรวดมนจะสูงจากชั้นหินดินดานและหินปูนที่อ่อนถึง 500–2,000 ฟุต (150–600 ม.) ทางหลวงสายสำคัญ ๆ สร้างผ่านไปในหุบเขาที่ตัดผ่านหุบเขาหนึ่งสู่หุบเขาหนึ่งโดยผ่านไปตามลำธารช่องเขาน้ำกัดซึ่งตัดผ่านสันเขาไป ตัวอย่างเช่น เมืองแฮริสเบอร์ก ซึ่งมีแม่น้ำซัสเกวแฮนนา ไหลผ่านช่อง



รูป 26.4 รอยโก่งตัวโค้งกระทะหงายประกอบด้วยชุดหินแข็ง 3 ชุด คือ ควอร์ตไซต์-กรวดมน และหินดินดานชั้นหนา เมื่อถูกกัดกร่อนทำให้เกิดสันเขา โดยมีลำน้ำซัสเกวแฮนนาตัดผ่านเป็นช่องน้ำกัด

เขาน้ำกัดที่ตัดผ่านภูเขาบลู ภูเขาเซกันต์ และภูเขาบีเตอร์ ในบริเวณที่ไม่มีช่วงเขาน้ำกัดต้องตัดถนนไปบนสันเขา สันเขาที่เต็มไปด้วยป่าไม้ หุบเขานั้นจะเป็นแหล่งที่เหมาะแก่การเพาะปลูก หอสังเกตการณ์ไฟฟ้าจะตั้งอยู่บนสันเขาและสังเกตการณ์ไปไกลจนถึงสันเขาที่อยู่ถัดไป

ในรอยโค้งตามบริเวณต่างๆ ของโลก เช่น เพนซิลเวเนียแอปปาเลเชียนเป็นแหล่งถ่านหินแอนทราไซต์หรือถ่านหินแข็งที่สำคัญ ถ่านหินนี้จะเกิดในชั้นที่หินโก่งตัวและถูกบีบ แรงอัดจะทำให้ถ่านหินบิทูมินัสเปลี่ยนเป็นแอนทราไซต์เนื่องจากบริเวณนั้นมีอัตราการกัดกร่อนสูงมาก ถ่านหินส่วนมากจึงเคลื่อนที่ ยกเว้นเฉพาะถ่านหินที่อยู่ในแนวแกนกลางของโค้งกระทะหงาย ซึ่งแนวถ่านหินจะเอียงมากทำให้ต้องขุดเปลือกโลกลงไปลึกมากจนถึงถ่านหินที่อยู่บริเวณก้นของโค้งกระทะหงาย ถ่านหินที่อยู่ใกล้กับพื้นผิวเราทำเหมืองได้โดยวิธีเปิดเหมืองเป็นแถบ

รอยโค้งกระทะหงายที่แผ่เป็นบริเวณกว้างและมีลาดน้อย อาจเป็นแหล่งสะสมน้ำมันดิบที่สำคัญ หลักการก็คล้ายๆ กับหินชั้นที่โก่งเป็นโดมต่ำที่กล่าวถึงมาแล้วในบทที่ 25 น้ำมันจะซึมจากชั้นหินทรายที่มีรูพรุนไปสะสมอยู่ที่สันของโค้งกระทะคว่ำซึ่งมีชั้นหินดินดานที่ไม่มีรูพรุนปกปิดอยู่อีกทีหนึ่ง แหล่งน้ำมันและก๊าซหลายแห่งในรัฐเพนซิลเวเนียที่มีการขุดขึ้นมาครั้งแรกนั้นมีอยู่ตามโค้งกระทะคว่ำต่ำ

แรงกดดันที่กระทำต่อรอยโค้งทำให้หินดินดานเปลี่ยนเป็นหินชนวนซึ่งเป็นหินที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากกว่า แหล่งหินดินดานในรัฐเพนซิลเวเนียจะมีมากในสันเขาหินทรายที่วางตัวขนานกัน หินปูนที่มีคุณภาพดีพอที่จะใช้ในอุตสาหกรรมซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีอยู่เป็นแนวแคบๆ ตามแนวเขาที่มีความชันสูงและมีชั้นหินปรากฏที่พื้นผิว

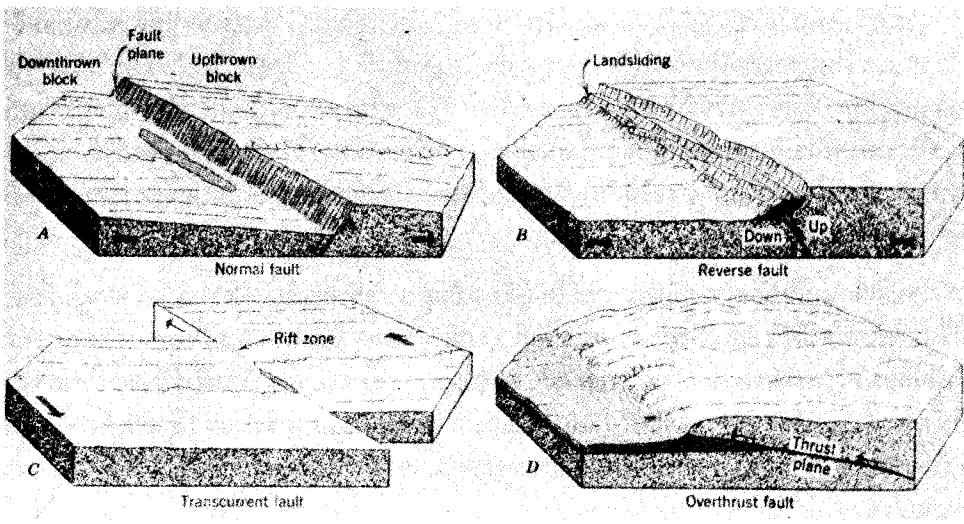
บริเวณที่มีการโก่งตัวไม่จำเป็นต้องมีหุบเขาที่มีประโยชน์ต่อการเกษตรกรรมเหมือนกับในรัฐเพนซิลเวเนียแอปปาเลเชียนเสมอไป ในหลายส่วนของแมริแลนด์ เวอร์จิเนียตะวันตกและเวอร์จิเนีย พื้นที่ส่วนมากจะเป็นสันเขาที่ขรุขระยากที่จะเดินทางผ่าน จึงเป็นบริเวณที่มีประชากรเบาบางมาก

รอยโค้งอื่นๆ ที่มีลักษณะคล้ายกับแอปปาเลเชียนคือ ภูเขาควอชิตา ในรัฐอาร์คันซอ และภูเขาจูรา ในสวิตเซอร์แลนด์และบริเวณเฟรนช์แอลป์ เกือบทั้งหมดของภูเขาจูราเป็นโค้งกระทะคว่ำหินปูน บริเวณรอยโค้งที่มีลักษณะดังกล่าวยังมีอยู่ในแอฟริกาเหนือด้วย ส่วนใหญ่อยู่ในประเทศตูนิเซีย แอลจีเรีย และสหภาพแอฟริกาใต้ ซึ่งไม่ไกลจากเคปเทาน์มากนัก

รอยเลื่อนและภูเขารอยเลื่อน

รอยเลื่อน (fault) เป็นรอยแตกของหินพื้นผิวเปลือกโลกซึ่งเป็นผลมาจากบริเวณนั้นได้รับแรงเค้น (stresses) ไม่เท่ากัน การเลื่อนตัวมักเกิดรวมกับอาการเลื่อนไหล (slippage) หรือการเคลื่อนที่ (displacement) ไปตามระนาบของรอยแตก รอยเลื่อนมักแผ่ยาวออกไปตามแนวระนาบเป็นระยะทางไกล ดังนั้น จึงจะสามารถลากเส้นแสดงแนวรอยเลื่อน (fault line) ได้เป็นระยะทางหลายไมล์ บางครั้งอาจมากกว่า 100 ไมล์ ปรากฏการณ์ในระดับลึกของรอยเลื่อนนั้นเรายังมีความรู้น้อยมาก แต่ที่น่าจะเป็นไปได้ก็คือรอยเลื่อนอาจลึกลงไปอย่างน้อยหลายพันฟุต

รอยเลื่อนจะเกิดขึ้นจากการเลื่อนไหลของเปลือกโลกอย่างฉับพลันอันเป็นผลจากแผ่นดินไหว การเคลื่อนไหวของพื้นดินในลักษณะคลื่นใต้ดินจะเกิดในเขตที่มีการเคลื่อนไหวมากที่สุด การเคลื่อนไหวของรอยเลื่อนที่เป็นผลจากการเลื่อนไหวของเปลือกโลกอาจมีขนาดเพียงนิ้วเดียว (2.5 ซม.) หรืออาจเคลื่อนมากถึง 25 หรือ 50 ฟุต (8 หรือ 15 ม.) ผิวเปลือกโลกที่เคลื่อนไหวมาแล้ว อาจเกิดมานานเป็นหลายสิบปีหรือหลายร้อยปีมาแล้ว ซึ่งทำให้เปลือกโลกเลื่อนไปนับหลายร้อยหรือหลายพันฟุต ในบางแห่งรอยเลื่อนทำให้ชั้นหินชั้นตั้งฉากกับด้านตรงข้ามของรอยเลื่อน และปริมาณของการเลื่อนนั้นเราสามารถวัดได้อย่างละเอียด



รูป 26.5 รอยเลื่อนสี่ชนิดและลักษณะภูมิประเทศที่เกิดบนรอยเลื่อนแต่ละชนิด

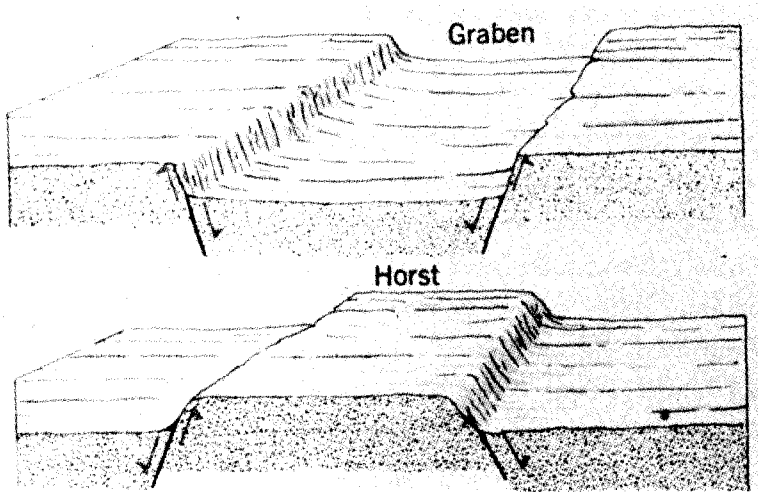
เมื่อพิจารณาถึงธรรมชาติและทิศทางสัมพันธ์ของการเลื่อนไหลเราสามารถจำแนกรอยเลื่อนได้เป็นหลายชนิด (ดูรูป 26.5) รอยเลื่อนปกติ (normal fault) เป็นการเลื่อนที่ระนาบรอยเลื่อนชันมากจนอยู่ในแนวดิ่งหรือเกือบดิ่ง การเคลื่อนที่ส่วนมากจะมีทิศทางแนวดิ่ง ดังนั้น ด้านหนึ่งจะถูกยกตัวขึ้น (upthrown) สัมพันธ์กับอีกด้านหนึ่งซึ่งทรุดตัวลง (downthrown) รอยเลื่อนปกตินี้จะทำให้เกิดหน้าผารอยเลื่อน (fault scarp) แนวตรง ความสูงนั้นประมาณได้จากการเลื่อนตัวในแนวดิ่ง หน้าผารอยเลื่อนอาจสูงตั้งแต่สองสามฟุตจนถึงหลายพันฟุต ความยาวเราวัดเป็นไมล์ ส่วนมากจะยาว 100–200 ไมล์ (160–320 กม.) รอยเลื่อนปกติเกิดจากแรงดันของเปลือกโลกชั้นนอก จากการสังเกตการณ์เชิงเรขาคณิตพบว่าการเลื่อนตัวไปตามผิวเอียงของรอยเลื่อนดังในรูป 26.5 A เป็นผลมาจากการขยายตัวของหลายแห่งบนฝั่งตรงข้ามกับรอยเลื่อน

รอยเลื่อนย้อน (reverse fault) อาการเอียงของระนาบรอยเลื่อนเป็นผลมาจากด้านหนึ่งเลื่อนขึ้นสูงกว่าอีกด้านหนึ่งและเปลือกโลกปรากฏให้เห็นเป็นแนวแคบ ๆ รอยเลื่อนย้อนทำให้เกิดหน้าผารอยเลื่อนคล้าย ๆ กับรอยเลื่อนปกติ แต่การเกิดแผ่นดินถล่ม (landsliding) มีโอกาสมากกว่าเนื่องจากหน้าผาจะสูงกว่า

รอยเลื่อนแนวระนาบ (transcurrent fault) เป็นรอยเลื่อนที่เปลือกโลกมีทิศทางการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ไปในแนวระดับ จึงไม่มีหน้าผาเกิดขึ้นหรือถ้ามีก็ต่ำมาก รอยเลื่อนจะปรากฏเป็นเส้นบาง ๆ ตัดผ่านพื้นผิว บางครั้งลำน้ำอาจเคลื่อนที่ไปตามรอยเลื่อนด้วยเป็นระยะทางสั้น ๆ บางครั้งอาจมีร่องตื้น ๆ หรือรอยแตกตามแนวรอยเลื่อน

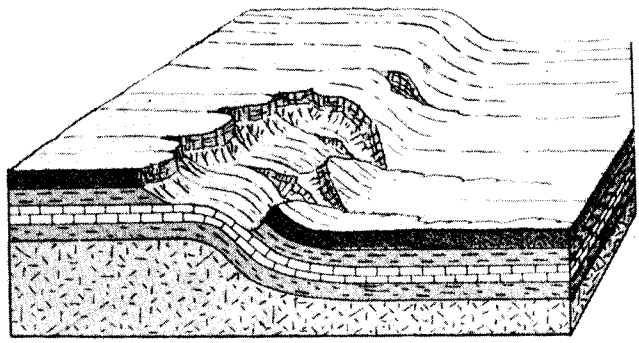
รอยเลื่อนไถลกลับมุมต่ำ (low-angle overthrust fault) การเคลื่อนที่ส่วนใหญ่จะมีทิศทางไปในแนวราบและแนวหินด้านหนึ่งจะไถลตัวขึ้นไปบนพื้นผิวที่อยู่ติดกัน การไถลขึ้นไปนี้อาจหนาเพียงไม่กี่ร้อยฟุต แต่อาจกว้างถึง 25 หรือ 50 ไมล์ (40 หรือ 80 กม.) การเลื่อนไถลกลับแบบนี้โดยทั่วไปจะสัมพันธ์กับการกดดันเปลือกโลกอย่างแรง ซึ่งอาจมีการโก่งตัวเกิดขึ้นด้วยก็ได้ หน้าผาที่เกิดจากรอยเลื่อนไถลกลับมุมต่ำจะไม่เป็นเส้นตรงหรือเรียบเหมือนกับรอยเลื่อนปกติและรอยเลื่อนย้อน แต่ด้านบนอาจจะขรุขระ

รอยเลื่อนเป็นลักษณะภูมิประเทศที่โดดเดี่ยว มีอยู่เสมอที่รอยเลื่อนจัดวางตัวอย่างสลับซับซ้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเม็ดหรือรูปแบบโครงสร้างของหินและภูมิประเทศ บล็อกแคบๆ ที่ทรุดต่ำลงระหว่างรอยเลื่อนปกติสองข้างเราเรียกว่า "แอ่งกราเบน" (graben) บล็อกแคบ ๆ ที่ยกตัวขึ้นระหว่างรอยเลื่อนปกติทั้งสองข้างเราเรียกว่า "ฮอร์สต์" (horst) แอ่งกราเบนมีลักษณะภูมิประเทศที่เด่น คือ มีผนังทั้งสองข้างตรงและขนานกัน ฮอร์สต์จะมีลักษณะคล้ายภูเขาหรือที่ราบสูงมียอดเรียบแต่ด้านข้างจะชันและเป็นเส้นตรง



รูป 26.6 แอ่งกราเบนและฮอร์สต์

สิ่งสัมพันธ์กับรอยเลื่อนปกติคือ "สันเขาผ่าเขาไหล่เรียบ" ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณที่ชั้นหินชั้นโค้งเป็นสันระหว่างส่วนที่ยกตัวขึ้นและทรุดตัวลง เมื่อสันเขาผ่าเขาไหล่เรียบผ่านลำดับของการกัดกร่อนจะมีกระบวนการคล้าย ๆ โค้งกระทะคว่ำแต่จะมีลักษณะเพียงครึ่งหนึ่งของรอยโค้งกระทะคว่ำ

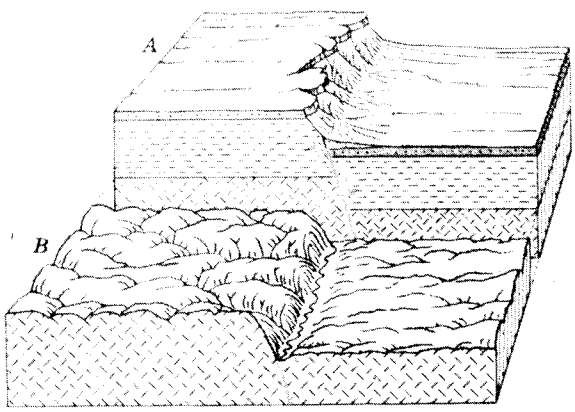


รูป 26.7 รอยโค้งแนวเทเดี่ยว

วิวัฒนาการการกัดกร่อนของหน้าผารอยเลื่อน

ลักษณะภูมิประเทศที่เกิดจากรอยเลื่อนปกติ ได้ผ่านช่วงเวลาของการกัดกร่อนไปตามขั้นหินต่าง ๆ นั้น เราแสดงได้ดังรูป 26.8 ส่วนหลังของภาพ เป็นผารอยเลื่อนกำเนิดซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวของเปลือกโลก ลักษณะภูมิประเทศนี้จัดอยู่ในประเภทภูมิประเทศกำเนิด ในบล็อก A เป็นผารอยเลื่อน หน้าผานี้เรียบและตรง มีลำน้ำตัดผ่านเป็นหุบผาชันอยู่ไม่กี่แห่ง บางแห่งเป็นลานหินตีนผาและเนินตะกอนรูปพัดเกิดตลอดแนวตีนผา

ในบล็อก B เป็นหน้าผาที่ถูกกัดกร่อนไปเกือบหมดทำให้เกิด "แนวผารอยเลื่อน" (fault-line scarp) แนวผานี้เกิดขึ้นเพราะชั้นหินดินดานที่อ่อนถูกกัดออกไปทั้งสองข้างของรอยเลื่อน ชั้นล่างเป็นหินฐานอัคนีซึ่งเป็นที่ตกตะกอนของดินดานมาก่อน

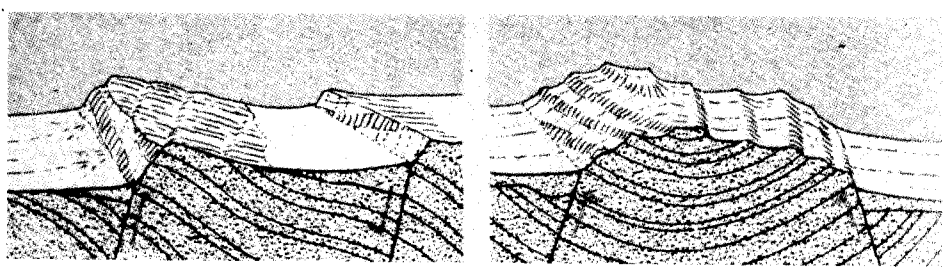


รูป 26.8 หน้าผารอยเลื่อน (A) และแนวผารอยเลื่อน (B)

รูป 26.9 แนวผารอยเลื่อนแมกโดนัลด์เลคใกล้กับเกรเสเลฟเลค นอร์ตเวสต์ แทร์ริทอรี่ แคนาดา

ภูเขารอยเลื่อน

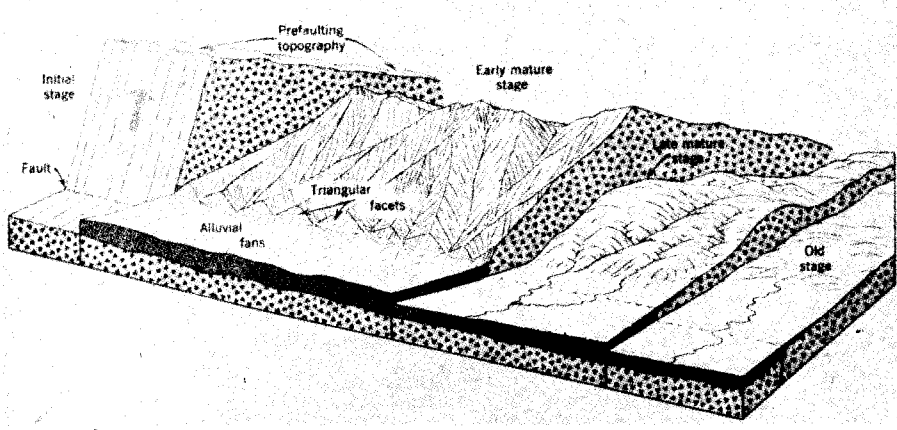
ในบริเวณที่ลอยเลื่อนปกติเกิดเป็นบริเวณกว้างและมีรอยเลื่อนสูงนับพันฟุต เป็นผลทำให้เกิดภูเขาขนาดใหญ่ โดยทั่วไปแล้วภูเขารอยเลื่อนสามารถจำแนกได้เป็นสองชนิด คือ ภูเขาเอียง (tilted) กับภูเขายกตัว (lifted) (ดูรูป 26.10) ภูเขาเอียงด้านหนึ่งเป็นด้านชัน ซึ่งเป็นด้านหน้าผารอยเลื่อน และอีกด้านหนึ่งเป็นด้านลาด สันปันน้ำกำเนิดจะวางแนวอยู่ใกล้กับยอดของหน้าผารอยเลื่อน ดังนั้นสันปันน้ำจึงอยู่ด้านหนึ่งของภูเขา ภูเขายกตัวเป็นฮอร์สต์ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีด้านชันทั้งสองด้าน



รูป 26.10 ภูเขาบล็อกรอยเลื่อนอาจเป็นชนิดเอียง (ซ้าย) หรือชนิดยกตัว (ขวา)

จากรูป 26.11 เป็นรูปที่แสดงถึงลำดับขั้นในประวัติชีวิตของภูเขารอยเลื่อนแบบเอียง ตัวอย่างของภูเขารอยเลื่อนนี้มักมีอยู่ในทะเลทรายทางตะวันตกของสหรัฐ ฯ เขตนี้เราเรียกว่า basin and range province กระบวนการทางธรณีสัณฐานและลักษณะภูมิประเทศของเขตนี้ ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 21

ในช่วงวัยหนุ่มภูเขารอยเลื่อนจะมีลักษณะไม่สมมาตรและโดยทั่วไปจะมีด้านเรียบสม่ำเสมอ จะมีบ้างก็แต่เพียงลำน้ำสายเล็ก ๆ จำนวนมากที่เกิดขึ้นขณะภูเขารอยเลื่อนยกตัวขึ้น



รูป 26.11 ลำดับขั้นการกัดกร่อนบนรอยเลื่อนเอียง

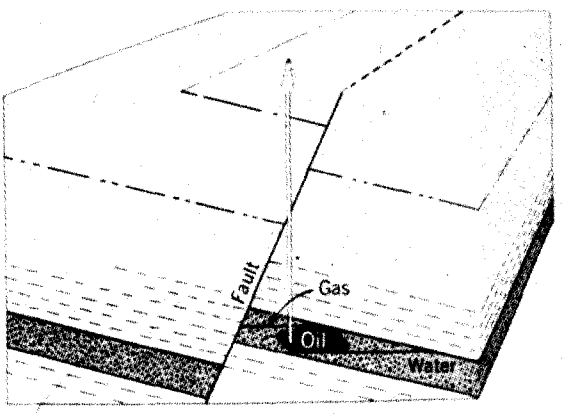
ในขั้นถูกกัดกร่อนเต็มที่ สันเขาจะถูกกัดกร่อนเป็นสันปันน้ำ บึกเขาและยอดเขาจำนวนมากซึ่งมีโกรกธารเป็นตัวแบ่งแยก ตอนนี้แนวสันเขาหลักจะถูกผลักให้เคลื่อนไปอยู่เกือบกึ่งกลางและลักษณะที่เป็นภูเขาบล็อกดั้งเดิมจะหายไป ตามแนวฐานของหน้าผารอยเลื่อนซึ่งอยู่ระหว่างปากของโกรกธารจะมีส่วนของหน้าผากำเนิดเหลืออยู่บ้าง สิ่งนี้ทำให้เกิด "หน้าสามเหลี่ยม" (triangulation facets) ขึ้น ซึ่งเกิดตลอดแนวฐานผา ในช่วงนี้เนินดินรูปพัดจะมีมากกว่าในช่วงวัยหนุ่มตอนต้น แอ่งที่อยู่ติดกันจะมีตะกอนไหลลงไปจนเต็มหมด ในเขตภูมิอากาศชุ่มชื้น ลักษณะภูมิประเทศที่เป็นลอนคลื่นมีความต่างระดับปานกลางจะพัฒนาขึ้นในช่วงถูกกัดกร่อนเต็มที่ตอนปลาย ในวัยแก่ระดับของทิวเขาจะลดลงจนมีลักษณะเป็นพื้นที่เกือบราบ

สิ่งแวดล้อมและทรัพยากรในบริเวณรอยเลื่อนและภูเขารอยเลื่อน

รอยเลื่อนมีความสำคัญในแง่สิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจทั้งทางด้านธรณีและภูมิประเทศ ระนาบรอยเลื่อนตามปกติเป็นแนวตามแนวหินซึ่งถูกบดเป็นผงหรือตามรอยแตก สิ่งนี้มีผลทำให้สินแร่ที่เกิดในรูปสารละลายไหลแทรกไปตามระนาบรอยเลื่อน สินแร่สำคัญ ๆ จะสะสมอยู่ตามระนาบรอยเลื่อนหรือในหินที่รอยเลื่อนแตกผ่านไป

ปรากฏการณ์ที่สัมพันธ์กับรอยเลื่อนอีกอย่างหนึ่งคือน้ำใต้ดินจะไหลมาตามระนาบรอยเลื่อนได้ง่าย น้ำพุทั้งร้อนและเย็นจะมีแหล่งอยู่ตามแนวรอยเลื่อน โดยจะปรากฏตามฐานภูเขารอยเลื่อนวัยหนุ่ม ตัวอย่างเช่น น้ำพุแอโรเฮด สปริง ซึ่งเกิดตามแนวฐานทิวเขาซาน เบอร์นดีโน เรนจ์ และน้ำพุปาล์ม สปริง เกิดตามเชิงเขาซาน จาซินโต ทั้งสองแห่งอยู่ทางใต้ของแคลิฟอร์เนีย

น้ำมันดิบก็เช่นกันมีพบตามระนาบรอยเลื่อนในบริเวณที่หินมีลักษณะเป็นรูพรุน หรือน้ำมันอาจจะสะสมในชั้นหินพรุนซึ่งรอยเลื่อนทำให้ชั้นหินนั้นมาอิงกับชั้นหินดินดานชั้นเดิม การค้นหาน้ำมันนั้นมักทำในเขตรอยเลื่อนของชั้นหินชั้น เพราะผลผลิตจำนวนมหาศาลได้จากแหล่งน้ำมันชนิดนี้



รูป 26.12 แหล่งน้ำมันในชั้นหินทรายโดยมีชั้นหินทึบปิดอยู่ด้านบน เป็นพวกหินดินดาน

หน้าผารอยเลื่อนและแนวหน้าผารอยเลื่อน เป็นลักษณะภูมิประเทศที่เป็นอุปสรรคต่อการเดินทางผ่าน ซึ่งยากแก่การสร้างถนนหรือทางรถไฟ เฮอริเคน เลดล์ ทางตอนใต้ของรัฐยูตาห์ ก็เป็นลักษณะภูมิประเทศชนิดนี้ เป็นรอยเลื่อนที่มีผาชันสูงถึง 2,500 ฟุต (760 ม.)

แอ่งกราเบนเป็นที่ราบต่ำกว้างที่มีขนาดต่าง ๆ กัน ตัวอย่างเช่น แอ่งกราเบนไรน์ในเยอรมนี ตะวันตกเป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สมบูรณ์มีความกว้าง 20 ไมล์ (32 กม.) และยาว 150 ไมล์ (240 กม.) วางตัวอยู่ระหว่างป่าโวสและแบล็ค ป่าทั้งสองเป็นภูเขารอยเลื่อนซึ่งยกตัวสูงขึ้นตรงกันข้ามกับไรน์กราเบนที่ทรุดต่ำลง

แผ่นดินไหว—สิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดโศกนาฏกรรม

ทุก ๆ คนคงเคยอ่านข่าวเกี่ยวกับความหายนะจากแผ่นดินไหวและคงเคยเห็นภาพสิ่งปรักหักพังจากแผ่นดินไหว ในหลายบริเวณของทวีปอเมริกาเหนือเคยได้รับภัยจากแผ่นดินไหวครั้งร้ายแรงมาแล้ว แต่ที่แคลิฟอร์เนียเพิ่งเคยได้รับภัยจากแผ่นดินไหวที่ร้ายแรงเป็นครั้งแรก แผ่นดินไหว คือ

การเคลื่อนไหวของพื้นผิวโลก โดยมีแรงสั่นสะเทือนตั้งแต่สั่นเบา ๆ จนกระทั่งถึงไหวอย่างรุนแรง สามารถทำให้ตึกสั่นและพื้นดินแตกออกเป็นช่องได้

แผ่นดินไหวเป็นรูปหนึ่งของพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของคลื่นที่ส่งพลังงานไปบนพื้นผิวโลกเป็นวงจากจุดศูนย์กลางที่มีพลังงานเกิดขึ้น ซึ่งเรียกว่า โฟกัส (focus) ได้เป็นระยะทางไกล เหมือนกับการที่เราโยนก้อนหินลงสู่ผิวน้ำที่ราบเรียบกลางสระ คลื่นจะเคลื่อนที่ออกไปทุกทิศทุกทาง การสูญเสียพลังงานจะมีขึ้นจากแรงฝืดที่เกิดจากชั้นหินโค้งขึ้นลงขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านไป

จากการสังเกตจนเป็นที่เชื่อถือว่า แผ่นดินไหวเป็นผลจากการเคลื่อนไหวอย่างฉับพลันตามแนวรอยเลื่อน ซึ่งโดยมากจะเป็นรอยเลื่อนปกติหรือรอยเลื่อนเหลื่อมข้าง ความหายนะจากแผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1906 เป็นผลมาจากการเลื่อนตัวตามแนวที่ตัดบริเวณอ่าวแซน แฟรนซิสโก รอยเลื่อนแซนแอนดรีส ซึ่งเป็นรอยเลื่อนชนิดรอยเลื่อนเหลื่อมข้าง รอยเลื่อนยาว 600 ไมล์ (965 กม.) และยาวไปถึงแคลิฟอร์เนีย รอยเลื่อนนี้ตัดผ่านแผ่นดินเขตเมืองลอสแอนเจลิสยาวถึง 40 ไมล์ (60 กม.) ซึ่งเป็นบริเวณที่รอยเลื่อนมีสภาพเป็น "หุบเขารุด" (rift valley) นอกจากนี้แนวรอยเลื่อนสาขาของรอยเลื่อนซาน แอนดรีส ทั้งหมดมีส่วนทำให้เกิดแผ่นดินไหวอย่างร้ายแรง

รูป 26.13 ภาพถ่ายดึงเป็นบริเวณรอยเลื่อนแซนแอนดรีส เป็นภาพถ่ายใกล้เมืองซานเบอร์นาดิโน แคลิฟอร์เนีย

เราจะไม่กล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการกลของรอยเลื่อนและสิ่งนี้ทำให้เกิดแผ่นดินไหวได้อย่างไร เราจะกล่าวแต่เพียงการโค้งงออย่างช้า ๆ ของหินทั้งสองข้างของรอยเลื่อน ซึ่งการโค้งงอนี้เกิดขึ้นเป็นเวลาหลายปี ในขณะที่มีพลังงานในแนวระนาบมากระทำกับแผ่นเปลือกโลก พลังงาน

จะสะสมในชั้นหินที่โค้งงอเหมือนกับพลังงานที่สะสมอยู่ในคันธนู เมื่อจุดวิกฤติมาถึงกำลังดึงจะถูกปล่อยออกมาโดยการเลื่อนไปบนรอยเลื่อนและพลังงานจำนวนมหาศาลจะถูกปล่อยออกมาในลักษณะของ "คลื่นแผ่นดินไหว" (seismic wave) การโค้งตัวของหินนั้นจะเกิดขึ้นหลายทศวรรษ เมื่อพลังงานนี้ถูกปล่อยออกมาจะทำลายสิ่งก่อสร้างที่สร้างตัดกับรอยเลื่อนเป็นเส้นตรง เช่น ถนน รั้ว รอยเลื่อนชนิดนี้จะค่อย ๆ เคลื่อนไหว เราเรียกว่า "รอยเลื่อนคืบ" (fault creep) ซึ่งทำให้พลังงานที่สะสมอยู่ค่อย ๆ ลดลง

มาตราริชเตอร์ (Richter scale) เป็นมาตราที่ใช้วัดความแรงของแผ่นดินไหว เป็นเครื่องมือที่ได้รับการประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1935 โดยชาร์ล เอฟ ริชเตอร์ (Charles F. Richter) เครื่องมือนี้จะบอกให้ทราบปริมาณของพลังงานที่แผ่นดินไหวครั้งหนึ่ง ๆ ปล่อยออกมา ค่าของมาตราริชเตอร์ มีตั้งแต่ 0—9 แต่ว่าไม่เคยมีขีดจำกัดสูงสุด กล่าวคือ อาจจะมีพลังงานสูงกว่าค่าสูงสุดของมาตราริชเตอร์ได้ แต่ที่ผ่านมายังไม่เคยมีเพราะพลังงานที่ปล่อยออกมาตามธรรมชาติจะจำกัดเอง ค่าพลังงานตามธรรมชาติที่เคยวัดได้สูงสุดคือ 8.6 วัดไนปี ค.ศ. 1900 และ ค.ศ. 1950

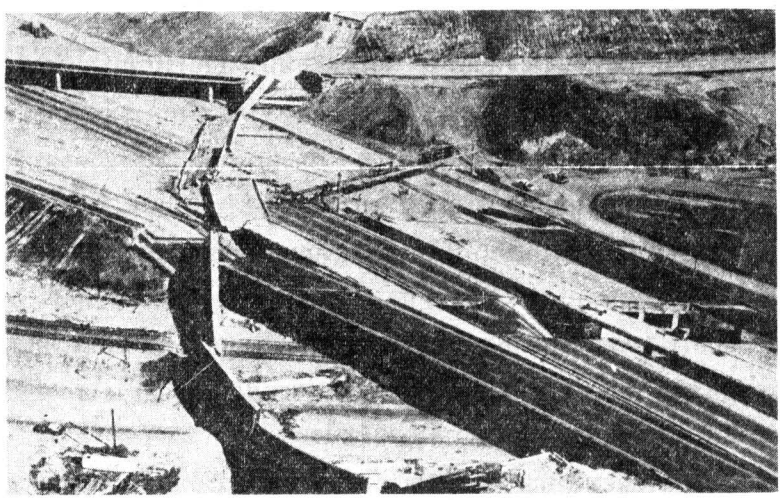
แผ่นดินไหวครั้งร้ายแรงที่สุดในยุคปัจจุบันคือ แผ่นดินไหวในวันกูด ไฟรเดย์ เมื่อวันที่ 27 มีนาคม ค.ศ. 1964 จุดศูนย์กำเนิดของแผ่นดินไหวอยู่ห่างเมืองแองเคอเรจ ในอะแลสกาไป 75 ไมล์ (120 กม.) ความแรงตามมาตราริชเตอร์มีค่า 8.4—8.6 ซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดเท่าที่เคยพบ โศกนาฏกรรมอันเกิดจากแผ่นดินไหวที่ทำลายสิ่งแวดล้อมนั้นเกิดจาก "ผลทุติยภูมิ" (secondary effect) ที่เมืองแองเคอเรจ การหักพังของสิ่งก่อสร้างเป็นผลทุติยภูมิ โดยอาคารที่สร้างด้วยโครงไม้จะพังทลายเพียงเล็กน้อยเมื่ออาคารนั้นต้องอยู่บนหินแข็ง การพังทลายเกิดขึ้นอย่างมหาศาลในส่วนของเมืองที่ตั้งอยู่บนเปลือกโลกที่ดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวที่อ่อน ดินเหนียวนี้จะเปลี่ยนสภาพเป็นดินเหลวเมื่อมันสั่นสะเทือน (เรียกกันว่า quick clays) ทำให้พื้นดินบริเวณนั้นจมตัวลง บางส่วนถูกดันขึ้นเป็นขั้นบันได ทำให้บ้านเอียงและแตกกระจาย ผลทุติยภูมิอื่น ๆ เกิดจากระดับน้ำที่เพิ่มขึ้นจากการเคลื่อนที่ของคลื่นขนาดใหญ่ สามารถทำลายเรือและสิ่งก่อสร้างที่อยู่ในที่ต่ำได้

ผลทุติยภูมิอื่น ๆ ที่มีความสำคัญจากแผ่นดินไหวครั้งสำคัญดังเช่นที่เกิดครั้งกูด ไฟรเดย์ ก็คือ "คลื่นแผ่นดินไหวในทะเล" (seismic sea wave) หรือภาษาญี่ปุ่นเรียกว่า "ซูนามิ" คลื่นนี้จะเกิดขึ้นในทะเลใกล้กับแหล่งของแผ่นดินไหว โดยการเคลื่อนไหวอย่างฉับพลันของพื้นทะเล คลื่นจะเคลื่อนที่เป็นวงกว้างออกไปในมหาสมุทร แต่จะมองไม่เห็นในทะเลที่มีน้ำลึก อย่างไรก็ตาม เมื่อคลื่นมาใกล้ชายฝั่ง คลื่นนั้นจะทำให้ระดับน้ำเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 10—15 นาที และในบริเวณชายฝั่งที่เหมาะสมระดับน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ลมที่พัดดันคลื่นจะผลักส่วนบนของคลื่นให้กระทบแผ่นดินเหนือระดับที่คลื่นปกติเคยปะทะเข้าไปมาก ตัวอย่างเช่น คลื่นแผ่นดินไหวในทะเล ปี ค.ศ. 1933 ในมหาสมุทรแปซิฟิก ทำให้คลื่นปะทะชายฝั่งสูงกว่าระดับปกติถึง 30 ฟุต (9 ม.) ทำให้เกิดการพังทลายเป็นบริเวณกว้าง ผู้คนที่อาศัยในบริเวณที่ต่ำชายฝั่งมักจะเสียชีวิตกันมาก เคยมีน้ำท่วมตามชายฝั่งของญี่ปุ่นในปี ค.ศ. 1703 มีคนเสียชีวิตประมาณ 100,000 คน สันนิษฐานว่าเกิดจากคลื่นแผ่นดินไหวในทะเล

แผ่นดินไหวกับการวางผังเมือง—แผ่นดินไหวแซน เฟอร์นานโด

ความหายนะที่เกิดแก่ชีวิตมนุษย์และการทำลายสิ่งก่อสร้างอย่างมหาศาลของแผ่นดินไหว แซน เฟอร์นานโด เมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 1971 ทำให้เมืองลอสแอนเจลิสต้องสร้างระบบเมืองใหม่เพื่อให้เกิดการสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อมีแผ่นดินไหวอย่างรุนแรงเกิดขึ้น แม้ว่าแผ่นดินไหวครั้งนั้นเมื่อวัดตามมาตราริชเตอร์ยังไม่ถึงขั้นรุนแรงนักก็ตาม (เพราะมีระดับการสั่นสะเทือนเพียง 6.6 อันเป็นค่าปานกลาง) แต่การสั่นสะเทือนในท้องถิ่นนั้นมีความเข้มเท่ากับครั้งก่อน ๆ ที่เคยเกิดขึ้นในเมืองนี้ โชคยังดีที่การสั่นสะเทือนของพื้นดินเกิดเพียงชั่วระยะเวลาสั้น ๆ ถ้าการสั่นสะเทือนนานกว่านั้น บ้านเรือนจะถูกทำลายมากกว่าที่เกิดขึ้นจริง ๆ มากมายนัก โดยเฉพาะความโกลาหลที่เกิดจากการพังทลายของโรงพยาบาลโอลีฟวิว ในซิลมาร์ ซึ่งใช้โครงสร้างใหม่ที่สร้างขึ้นเพื่อให้ทนทานต่อแผ่นดินไหว โรงพยาบาลเวเตอรานในซิลมาร์ได้รับผลจากแผ่นดินไหวและทำให้อาคารบางหลังพังทลายลงมา รอยแตกในเขื่อนแวนนอร์แมน เป็นเหตุให้เจ้าหน้าที่เขื่อนต้องรีบระบายน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำเพื่อป้องกันเขื่อนพังทลายและความหายนะที่จะเกิดขึ้นจากน้ำท่วมบริเวณที่มีอาคารหนาแน่น สถานีเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า ซิลมาร์ (Sylmar Converter Station) เป็นหน่วยสำคัญในระบบจ่ายกระแสไฟฟ้าในเขตเมืองลอสแอนเจลิสก็พังทลายลง ถนนลอยฟ้าสำหรับทางฟรีเวย์ในเส้นทางหลวงก็พังทลายด้วย และบาทวิถีริมฟรีเวย์แตกและเลื่อนที่ไป โชคดีที่แผ่นดินไหวตอน 6 โมงเช้า ซึ่งประชาชนส่วนใหญ่ยังคงอยู่ที่บ้าน มีประชาชนเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่กำลังเดินทางตามเส้นทางสายใหญ่

การเคลื่อนไหวของรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในแผ่นดินไหวแซนเฟอร์นันโดนั้นไม่ได้เกิดตามแนวรอยเลื่อนใหญ่แซน แอนดรีส แต่เกิดห่างจากรอยเลื่อนนั้นไปประมาณ 15 ไมล์ (25 กม.) ซึ่งบริเวณ



รูป 26.14 บาทวิถีและทางข้ามโกลเดน สเตท ฟรีเวย์ ทางตอนเหนือของหุบเขาแซน เฟอร์นันโด แคลิฟอร์เนีย พังทลายลงมา เพราะแผ่นดินไหว เมื่อกุมภาพันธ์ 1971

ที่เกิดเป็นรอยเลื่อนสาขา เชื่อกันว่าถ้าแผ่นดินไหวเกิดตามแนวของรอยเลื่อนแซน แอนดรีส จะทำให้เกิดแผ่นดินไหวที่มีความเข้มมากกว่าแผ่นดินไหวในปี ค.ศ. 1971 (แผ่นดินไหวแซน เฟอร์นันโด) และแม้ว่าปีที่เกิดยังไม่สามารถจะทำนายได้ในทศวรรษนี้ แต่ความเจริญก้าวหน้าของชุมชนเมืองจะต้องขยายโครงสร้างและประชาชนออกไป และความหายนะที่เกิดขึ้นจะต้องเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย

ยิ่งไปกว่านั้นหลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้น สถาบันวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Academy of Science) และสถาบันวิศวกรรมแห่งชาติ (National Academy of Engineering) ได้ร่วมมือกันเพื่อหาผู้เชี่ยวชาญไปศึกษาผลของแผ่นดินไหวและเสนอคำแนะนำออกมา คณะกรรมการสรุปว่า อาคารที่มีอยู่ไม่สามารถจะป้องกันความเสียหายอย่างรุนแรงได้ และควรจะมีการปรับปรุงกันใหม่ คณะกรรมการยังได้เสนอแนะต่อไปว่า อาคารสาธารณะ เช่น โรงพยาบาล โรงเรียน สถานีตำรวจ และกองดับเพลิง ตลอดจนหน่วยงานบริการอุบัติเหตุควรจะสร้างขึ้นให้ทนแรงสั่นจากแผ่นดินไหวให้มากที่สุด โชคดีที่โรงเรียนส่วนใหญ่สร้างหลังจากที่มีแผ่นดินไหวลองบีช ในปี ค.ศ. 1930 จึงไม่มีโรงเรียนใดได้รับความเสียหาย การพังทลายจากแผ่นดินไหวแซน เฟอร์นันโดในปี ค.ศ. 1971 ประมาณว่ามีมูลค่า 500 ล้านเหรียญสหรัฐฯ ผู้เชี่ยวชาญคาดการณ์ว่าถ้าแผ่นดินไหวรุนแรงเท่าปี ค.ศ. 1906 ในแซนแฟรนซิสโก จะทำให้มีมูลค่าความเสียหายถึง 20 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ถ้าแผ่นดินไหวเกิดขึ้นในปีจุบัน เนื่องจากมหานครขยายตัวออกไปมาก บางทีผลกำไรอย่างหนึ่งของแผ่นดินไหวแซน เฟอร์นันโด ก็ได้แก่กองทุนที่ตั้งขึ้นมาเพื่อศึกษาแผ่นดินไหวทุกแง่ทุกมุมทั้งผลของแผ่นดินไหวที่มีต่อสิ่งแวดล้อมในชุมชนเมือง

คำถามทบทวนบทที่ 26

1. โค้งกระทะคว่ำ โค้งกระทะหงาย คืออะไร ลักษณะภูมิประเทศนี้สัมพันธ์กับรอยโค้งอย่างไร
2. หุบเขาโค้งกระทะคว่ำ หุบเขาโค้งกระทะหงายคืออะไร หุบเขาทั้งสองชนิดนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร
3. ช่องเขาน้ำกัดเกิดขึ้นในบริเวณรอยโค้งได้อย่างไร ช่องเขาน้ำกัดเป็นสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญอย่างไร ลำน้ำบรรพกาลคืออะไร ลำน้ำบรรพกาลวิวัฒนาการขึ้นบนบริเวณโค้งตัวได้อย่างไร
4. รูปแบบการระบายน้ำที่เกิดขึ้นบนพื้นที่โค้งตัวที่กัดกร่อนจนถึงวัยตอนกลางมีลักษณะเช่นไร
5. สันเขาไหล่เรียบและหุบเขาผ่าเขาไหล่เรียบแตกต่างจากสันเขาโค้งกระทะคว่ำ และสันเขาโค้งกระทะหงายอย่างไร จงเขียนภาพตัดขวางแสดงภาพสันเขาและหุบเขาดังกล่าวอย่างง่าย ๆ
6. การทรุดตัวของแกนรอยโค้งตัวมีผลต่อรูปร่างของสันเขาและหุบเขาอย่างไร สันเขาโค้งกระทะหงายดึงตัวต่างจากสันเขาโค้งกระทะคว่ำดึงตัวอย่างไร
7. จงอภิปรายถึงสิ่งแวดล้อมสำคัญของบริเวณโค้งตัวซึ่งมีภูมิประเทศเป็นสันเขาและหุบเขาขรุขระ บริเวณโค้งตัวเป็นแหล่งผลิตสินแร่เศรษฐกิจที่สำคัญอะไรบ้าง

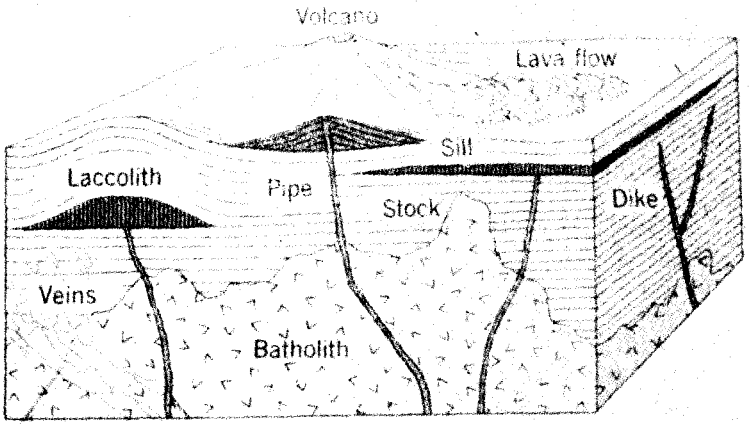
8. รอยเลื่อนคืออะไร แนวรอยเลื่อนคืออะไร
9. จงอธิบายถึงรอยเลื่อนปกติ และอธิบายว่าต่างจากรอยเลื่อนย้อนอย่างไร รอยเลื่อนดังกล่าวทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศแบบใดบ้าง
10. รอยเลื่อนเหลื่อมข้างคืออะไร มีลักษณะภูมิประเทศแตกต่างจากรอยเลื่อนปกติอย่างไร การทรุดตัวคืออะไร
11. จงอธิบายรอยคดโค้งไถลกลับมุมต่ำ รอยคดโค้งนี้ทำให้เปลือกโลกเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ลักษณะภูมิประเทศแบบใดที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างแบบรอยคดโค้งไถลกลับ
12. จงอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างแอ่งกราเบนกับฮอร์สต์ จงอธิบายสั้น ๆ เกี่ยวกับแอ่งกราเบน-ไรห์น
13. สันเขาผาเขาไหล่เรียบมีกระบวนการเกิดแตกต่างจากรอยเลื่อนอย่างไร โครสร้างทั้งสองมีความสัมพันธ์กันหรือไม่
14. ทำไมเราจึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างผารอยเลื่อนกับแนวรอยเลื่อน สิ่งใดเกิดขึ้นก่อน
15. ภูเขาบล็อครอยเลื่อนเกิดขึ้นได้อย่างไร จงเปรียบเทียบภูเขาบล็อครอยเลื่อนในวัยต้นกับวัยกลางหน้าสามเหลี่ยมคืออะไร
16. รอยเลื่อนมีอิทธิพลอย่างไรต่อน้ำใต้ดินและน้ำพุ น้ำมันปิโตรเลียมสะสมอยู่ในโครงสร้างแบบรอยเลื่อนได้อย่างไร ทำไมเขตรอยเลื่อนจึงเป็นแหล่งที่มีสินแร่มาก
17. อะไรคือสาเหตุที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว โฟกัสคืออะไร คลื่นแผ่นดินไหวคืออะไร รอยเลื่อนคืบคืออะไร จงอธิบายมาตราริชเตอร์
18. จงเล่าประวัติของรอยเลื่อนแซน แอนดรีสและแผ่นดินไหว
19. แผ่นดินไหวมีผลทางเศรษฐกิจอย่างไร ยกตัวอย่างประกอบ คลื่นแผ่นดินไหวในทะเลคืออะไร
20. มีบทเรียนอะไรบ้างที่จะเรียนรู้ได้จากแผ่นดินไหวแซน เฟอร์นันโด เมื่อ 9 กุมภาพันธ์ 1971

บทที่ 27
มวลผลึกหิน และรูปทรงภูเขาไฟ

คำว่า "ผลึกหิน" (crystalline rock) เราหมายถึงมวลหินอัคนีชนิดเย็นตัวภายในและหินแปร เช่น หินชิสต์และหินไนส์ซึ่งสะสมตัวกันเป็นก้อนมหึมา คำนี้ช่วยทำให้เราเข้าใจลักษณะภูมิประเทศ การจำแนกลักษณะของมวลพื้นดินโดยแบ่งตามลักษณะทั่ว ๆ ไปของผลึกหิน แม้ว่าเราไม่สามารถจะแบ่งย่อยเป็นกลุ่มย่อย ๆ ได้ก็ตาม

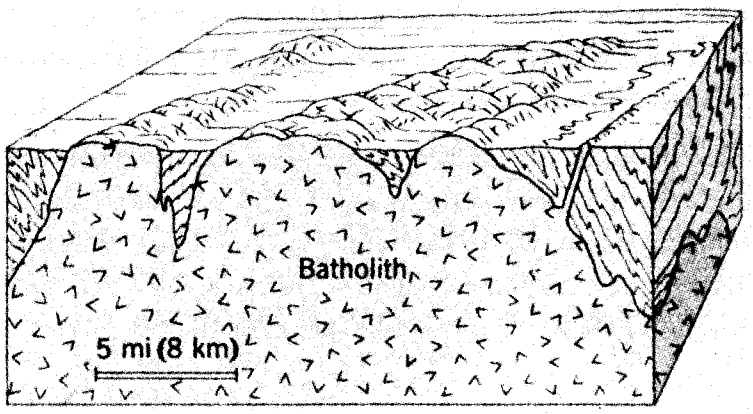
ผลึกหินเนื้อเดียวกัน

หินอัคนีชนิดแข็งตัวภายใน เช่น หินแกรนิต โดยทั่วไปจะเกิดเป็นปื้นหินอัคนี (batholiths) ปื้นหินอัคนีในรัฐไอดาโฮที่โผล่ขึ้นมามีพื้นที่มากกว่า 16,000 ตารางไมล์ (40,000 ตร.กม.) เป็นพื้นที่กว้างขวางเกือบเท่ารัฐนิวแฮมป์เชียร์รวมกับรัฐเวอร์มอนต์ มวลหินนั้นจะฝังลึกลงไปในเบื้องล่างหลายพันฟุต และในทางปฏิบัติเรามักคิดว่าไม่มีฐานเบื้องล่าง มวลหินอัคนีขนาดเล็กมีพื้นที่น้อยกว่า 40 ตารางไมล์ (100 ตร.กม.) เราเรียกว่า "ลำหินอัคนี" (stock)



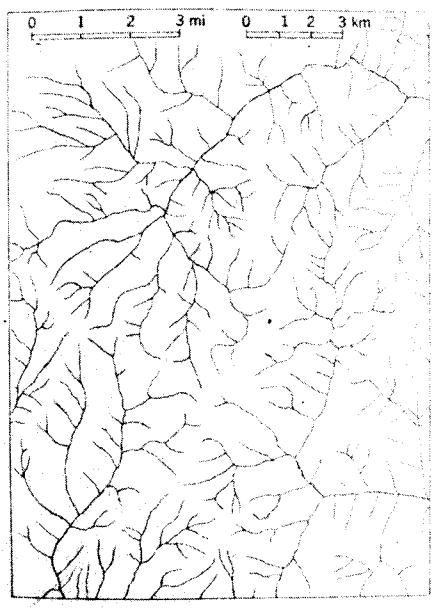
รูป 27.1 หินอัคนีรูปแบบต่าง ๆ

ปื้นหินอัคนีและลำหินอัคนีตอนที่เกิดขึ้นนั้นไม่จำเป็นต้องทอดตัวมาจนถึงพื้นผิวโลก จึงไม่ทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศกำเนิดขึ้นและไม่มีขั้นกำเนิดในกระบวนการกัดกร่อน มวลหินดังกล่าวจะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อมีการกัดกร่อนเป็นร่องลึกลงไปจนถึงชั้นหินเบื้องล่างซึ่งลักษณะภูมิประเทศจะอยู่ในวัยถูกกัดกร่อนเต็มที่และวัยชราในกระบวนการกัดกร่อน กระบวนการนี้จะทำให้หินเบื้องล่างที่เป็นแกนกลางของโดมโผล่ขึ้นมา ดังที่ได้กล่าวถึงมาแล้วในบทที่ 25



รูป 27.2 หินอัคนีระดับลึกจะปรากฏให้เห็นได้ ณ พื้นผิวโลก ถ้าผิวโลกบริเวณนั้นถูกกัดกร่อนพัดพาต่อเนื่องกัน จนหินที่ปิดอยู่เบื้องบนสึกกร่อน

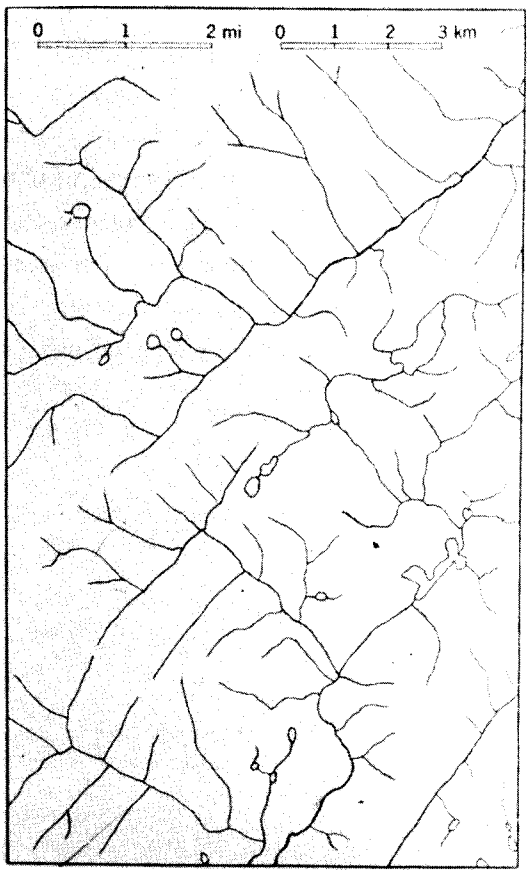
การพัฒนาลักษณะภูมิประเทศบนปื้นหินอัคนีมีลักษณะอย่างไรขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิวและส่วนประกอบของหิน แต่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับว่ามวลหินนั้นมีรอยเลื่อนหรือไม่ ในบริเวณที่หินมีลักษณะเป็นรูปแบบและไม่เป็นรอยเลื่อนขนาดใหญ่ มวลหินจะถูกกัดกร่อนเป็นโกรกธารและช่องเขาแคบโดยมีแนวไม่แน่นอน ระบบการระบายน้ำจะเป็นแบบกิ่งไม้ ซึ่งต่างออกไปจากระบบลำน้ำที่วิวัฒนาการขึ้นในพื้นที่ที่มีหินชั้นเป็นหินฐาน ตามความเป็นจริงแล้วระบบลำน้ำที่เกิดในสองบริเวณนี้เราไม่สามารถจะแยกออกจากกันได้



รูป 27.3 การระบายน้ำแบบกิ่งไม้ วิวัฒนาการขึ้นบนหินอัคนีมวลหมีมาไอดาโฮที่ถูกกัดกร่อนจนถึงวัยตอนกลาง

ในบริเวณที่มีรอยเลื่อนทำให้เกิดรอยแตกตัดกับรอยเลื่อนและหินที่อ่อน ลำน้ำจะไหลตามแนวรอยเลื่อนและอาจทำให้เกิดระบบระบายน้ำแบบเชิงเส้นหรือแบบมุมฉาก ลำน้ำเป็นแบบลำน้ำตามแนวระดับ เพราะวิวัฒนาการขึ้นในบริเวณหินที่อ่อน

ในบริเวณพื้นที่ที่เป็นหินแปร เช่น หินไนส์หรือหินชิสต์ ระบบลำน้ำจะพัฒนาการเป็นแบบกิ่งไม้และลำน้ำเป็นแนวไหลไม่จำกัดทิศทาง (insequent) ทั้งนี้เพราะลักษณะพื้นผิวและส่วนประกอบของหินไม่แน่นอนและดูเหมือนจะมีอิทธิพลต่อพัฒนาการของหุบเขาน้อย ลักษณะภูมิประเทศในแต่ละบริเวณที่เป็นปื้นหินอัคนีถือว่ามีลักษณะเหมือนกัน ยิ่งไปกว่านั้นเรายังใช้คำว่า "ผลึกหินเนื้อเดียวกัน" (homogeneous crystalline) กับมวลหินอัคนีที่เย็นตัวภายในและหินแปร



รูป 27.4 การระบายน้ำแบบมุมฉาก พัฒนาขึ้นบนผลึกหินรอยเลื่อน บริเวณภูเขาอะดิรอนแด็ค นิวยอร์ก

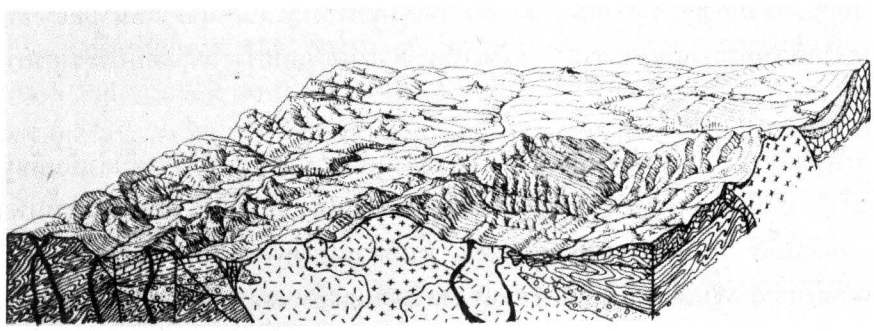
แนวหินแปร

บริเวณที่เป็นหินแปรตามปกติจะเป็นภูมิประเทศที่ขรุขระ สันเขามีลักษณะเป็นแนวยาวไปในทิศทางเดียว และมีหุบเขายาวและขรุขระ เป็นร่องแบ่งสันเขาทั้งสันเขา หุบเขาจะไม่มีชั้นหินชั้นที่คดงอ แต่ระบบลำน้ำจะเป็นแบบบรรจบกันเป็นมุมฉาก ในพื้นที่ที่มีลักษณะดังกล่าวเราจำแนกเป็น

"แนวหินแปร" (belted metamorphics) เนื่องจากภูมิประเทศเป็นผลสะท้อนถึงความแตกต่างของอัตราการกัดกร่อนของแนวหินแปรที่วางตัวขนานกัน เช่น หินชิสต์ หินชนวน หินควอร์ตไซต์และหินอ่อน หินอ่อนมีแนวโน้มที่จะเป็นหุบเขาอย่างชัดเจน หินชนวนและหินชิสต์จะเป็นภูมิประเทศที่มีระดับสูงปานกลางถึงสูงมาก ตามปกติหินควอร์ตไซต์จะคงทนและทำให้เกิดสันเขาหนอกวัวเป็นแนวแคบ ๆ ยิ่งไปกว่านั้นหินแปรทั้งหลายจะแตกหักจากการกระทำของรอยเลื่อนย้อนและรอยเลื่อนไถลกลับ ซึ่งเลื่อนขนานกับแนวหินอื่น ๆ และจะแยกหินชนิดหนึ่งออกจากอีกชนิดหนึ่ง ลำน้ำตามแนวระดับจะเกิดขึ้นตามแนวรอยเลื่อนนี้ ทำให้ภูมิประเทศขรุขระยิ่งขึ้น ส่วนใหญ่ของเขตนิวอิงแลนด์ โดยเฉพาะบริเวณภูเขาทาโคนิกและกรีน เป็นตัวอย่างที่ดีของลักษณะภูมิประเทศดังกล่าว หุบเขาขนาดใหญ่จะวางตัวในแนวเหนือใต้และมีหินอ่อนอยู่เบื้องล่าง ส่วนสันเขาเป็นพวกหินไนส์ หินชิสต์ หินชนวน และหินควอร์ตไซต์ เขตที่สูงในฮัดสัน และตอนเหนือของรัฐนิวเจอร์ซี จะเป็นแนวต่อเนื่องจากแนวนี้ไปทางใต้จนไปเชื่อมกับสันเขาบลูริดจ์ ใกล้ ๆ กับเมืองฮาร์เปอร์ เฟอรี ในรัฐแมริแลนด์ สันเขาควอร์ตไซต์จะวางตัวอยู่ท่ามกลางหุบเขาหินชิสต์อันกว้างใหญ่

บริเวณที่เป็นโครงสร้างสลับซับซ้อน

บางบริเวณของเปลือกโลกโดยเฉพาะบริเวณหินเก่าภาคพื้นทวีปที่เคยโก่งตัว เลื่อนตัวดันตัว และระเบิดเป็นภูเขาไฟมาแล้วหลายครั้ง ขณะที่แต่ละเหตุการณ์เกิดขึ้น จะมีหินชนิดใหม่หรือโครงสร้างแบบใหม่เพิ่มขึ้นในมวลหิน ลักษณะที่ปรากฏในปัจจุบัน จึงเป็นบริเวณที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน (complex structure) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีหินและโครงสร้างต่างกัน ลักษณะภูมิประเทศจึงมีหลายรูปแบบ



รูป 27.5 บริเวณที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน

จากรูป 27.5 เป็นไดอะแกรมแสดงให้เห็นความสลับซับซ้อนทางธรณีวิทยาของพื้นที่ ซึ่งผ่านกระบวนการกัดกร่อนมาเป็นเวลานาน ลักษณะภูมิประเทศอันขรุขระประกอบด้วย รอยเลื่อนแนวผารอยเลื่อน สันเขาหนอกวัว ภูเขาไฟเก่าและลักษณะภูมิประเทศอื่น ๆ หินที่ดันตัวและหินชั้นซึ่งมีอายุและรูปร่างต่าง ๆ กันที่โผล่ออกมา

ทรัพยากรธรรมชาติในเขตหินอัคนีมวลมหาศาล

แนวหินแปรและบริเวณที่สลับซับซ้อน

ในบริเวณที่เป็นหินอัคนีเย็นตัวภายใน หินแปรและโครงสร้างที่สลับซับซ้อนโดยทั่วไปจะเป็นแหล่งที่อุดมด้วยสินแร่ ในบริเวณที่เป็นหินอัคนีเย็นตัวภายในเกิดซ้ำ ๆ กันจะเป็นแหล่งแร่โลหะ ตัวอย่างเช่น บริเวณภูเขารอกกีมีทองแดง เงิน และตะกั่วอยู่ในเขต Coeur d'Alene Distric ในรัฐไอดาโฮ และมีตะกั่ว สังกะสี และเงินที่ลีดวิลล์ ในรัฐโคโลราโด

หินแปรเช่นหินชนวน หินควอรต์ไซต์ หินอ่อน และหินชิสต์ ไม่มีแร่โลหะเหมือนกับหินอัคนี ยกเว้นบริเวณที่มีหินอัคนีเย็นตัวภายในดันตัวแทรกเข้ามา อย่างไรก็ตาม บริเวณหินแปรก็ยังมีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เช่น หินชนวน หินอ่อน ในรัฐเวอร์มอนต์ เป็นเขตที่มีหินดังกล่าวนี้และมีหินอัคนีเย็นตัวภายในดันตัวแทรกเข้ามา ซึ่งก็สามารถทำเหมืองได้เช่นกัน

ตัวอย่างอีกบริเวณหนึ่งที่มีแร่โลหะที่มีมูลค่ามหาศาลอยู่ในหินอัคนี หินแปรและโครงสร้างหินที่สลับซับซ้อน คือ แร่ที่อยู่ในบริเวณรัฐคาตังกา สาธารณรัฐประชาชนคองโก

ส่วนมากของปั้นหินอัคนี หินแปรและบริเวณที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนของโลกจะเป็นภูเขามีป่าทึบและมีประชาชนเบาบาง ตัวอย่างเช่น เทือกเขาแซมมันริฟเวอร์ เบื้องล่างเป็นปั้นหินอัคนีไอดาโฮ ภูเขาเกรตสโมกกี ในรัฐแคโรไลนาเหนือ รัฐจอร์เจีย และรัฐเทนเนสซี เบื้องล่างเป็นมวลหินอัคนีเย็นตัวภายในและหินแปรซึ่งมีโครงสร้างอันสลับซับซ้อน หรือในเทือกเขาทาโคนิกและกรีน ซึ่งเป็นสันเขาหินแปรที่อยู่ในรัฐแมสซาชูเซตส์ และรัฐเวอร์มอนต์ ไม้เป็นทรัพยากรสำคัญของบริเวณเหล่านี้รวมกับแร่ซึ่งมีอยู่อย่างอุดมสมบูรณ์ ขณะเดียวกันการคมนาคมในเขตนี้เป็นไปอย่างยากลำบากและปราศจากพื้นที่ทำการเกษตรกรรม แม้จะเป็นบริเวณที่มีพื้นที่กว้างใหญ่แต่มีประชากรกระจายอยู่อย่างเบาบาง

บริเวณอื่น ๆ ที่เป็นหินอัคนีเย็นตัวภายในและหินแปรเป็นบริเวณที่มีระดับต่ำเป็นหินฐานธรณีภาคพื้นทวีป ซึ่งมีการลดระดับลงจนเป็นพื้นผิวเกือบราบและมีการกัดกร่อนพื้นผิวนั้นเพียงต้น ๆ เท่านั้น แสดงให้เห็นถึงวัฏจักรของการกัดกร่อน พื้นที่ส่วนใหญ่ทางตะวันออกของแคนาดามีลักษณะภูมิประเทศดังกล่าว เช่นเดียวกับในหลายส่วนของสวีเดนและฟินแลนด์ ไม่เพียงแต่มีหินคล้ายคลึงกันเท่านั้น แต่บริเวณดังกล่าวยังได้รับการกระทำจากธารน้ำแข็ง ทำให้เกิดทะเลสาบมากมาย และเนื่องจากมีภูมิอากาศเหมือนกัน ป่าไม้จึงเป็นพวกไม้ใบแหลม

ในสหรัฐอเมริกาตัวอย่างที่เด่นชัดของพื้นที่เกือบราบบนพื้นมวลหินอัคนีเย็นตัวภายใน และหินแปรได้แก่ บริเวณที่ราบสูงปิดมองต์ ในรัฐเวอร์จิเนีย รัฐแคโรไลนาและรัฐจอร์เจีย พื้นที่ระหว่างเทือกเขาบลูริดจ์ ซึ่งอยู่ทางตะวันตกกับที่ราบชายฝั่งทางตะวันออกเป็นบริเวณที่มีภูมิประเทศเป็นลอนคลื่นมีเนินเขาที่ยอดเนินมีระดับเท่า ๆ กัน เหนือระดับพื้นผิวนี้ขึ้นไปจะมีเขาโดดอยู่บ้างไม่กี่ลูก

ภูเขาไฟและลักษณะภูมิประเทศที่เกี่ยวข้อง

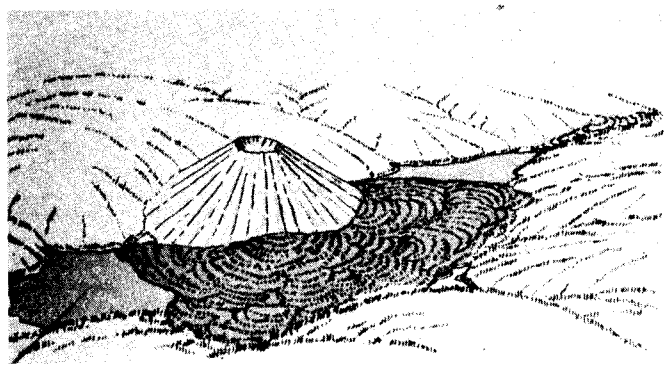
ภูเขาไฟเกิดจากการระเบิดของหินเหลวและก๊าซร้อนที่มีความดันสูงซึ่งถูกอัดอยู่ในปล่อง (pipe or vent) เล็ก ๆ ส่วนมากสารเหล่านั้นมาจากหินหนืดที่อยู่ในระดับลึกลงไป ภูเขาจำแนกออกได้เป็นสองชนิด คือ ชนิดระเบิดและปะทุเงียบ

ภูเขาไฟที่เกิดจากการระเบิดมี ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟ (cinder cone) และภูเขาไฟแบบกรวยซ้อน (composite cone)

ภูเขาไฟที่เกิดจากการปะทุอย่างเงียบ ๆ นั้น เกิดจากลาวาไหลออกมาทำให้เกิดโดมลาวา (lava dome) การปะทุอย่างเงียบ ๆ ของลาวานั้นจะเกิดตามรอยแตกหรือรอยแยก (fissure) ซึ่งลาวาที่ไหลขึ้นมามีปริมาณมากพอที่จะทำให้เกิดเป็นที่ราบหรือที่ราบสูงลาวาอันกว้างใหญ่ซึ่งจัดเป็นพวกเดียวกับชั้นหินแนวระนาบ

ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟ

ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟที่มีขนาดเล็กที่สุด เกิดจากก้อนลาวาแข็งพ่นจากช่องระเบิดตอนกลาง ลาวาที่ถูกพ่นเป็นหินเหลวที่มีก๊าซผสมอยู่ในอัตราสูงทำให้มันแข็งตัวเป็นฟองก้อนกรวดเล็ก ๆ และถูกพ่นออกมาด้วยแรงมหาศาล ฟองนั้นจะแตกออกเป็นชิ้นส่วนหินภูเขาไฟที่มีขนาดเล็ก และหลังจากที่ถูกพ่นขึ้นสู่ท้องฟ้าแล้ว มันจะตกลงมาเป็นของแข็งกระจายอยู่ใกล้ช่องระเบิด เศษหินต่างๆ จะคล้ายอิฐเผาแข็งเป็นมันและมีขี้เถ้าคล้ายขี้เถ้าจากเตาเผาถ่านหิน หินก้อนใหญ่ๆ อาจหนักหลายตัน เราเรียกว่าบอมบ์ภูเขาไฟ (volcanic bomb) ซึ่งตอนที่ถูกพ่นขึ้นมาจะมีลักษณะคล้ายพลาสติกเหลว หินก้อนเล็ก ๆ อาจมีขนาดไม่ถึงนิ้ว จนถึงนิ้วหรือสองนิ้ว (1—5 ซม.) ซึ่งเรียกว่า "มูลภูเขาไฟ" (cinders) สิ่งนี้ทำให้เกิดกรวยมูลภูเขาไฟขึ้น วัตถุอนุภาคขนาดเล็กมาก ๆ เราเรียกว่าขี้เถ้าและฝุ่นภูเขาไฟ (ash and volcanic dust) ขี้เถ้าจะตกลงมาคล้ายหิมะกระจายห่างจากแหล่งระเบิดหลายไมล์ ลมจะพัดพาฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ให้ลอยไปได้ไกล ๆ และอาจจะลอยอยู่เป็นเวลานับปีกว่าจะตกถึงพื้นดิน



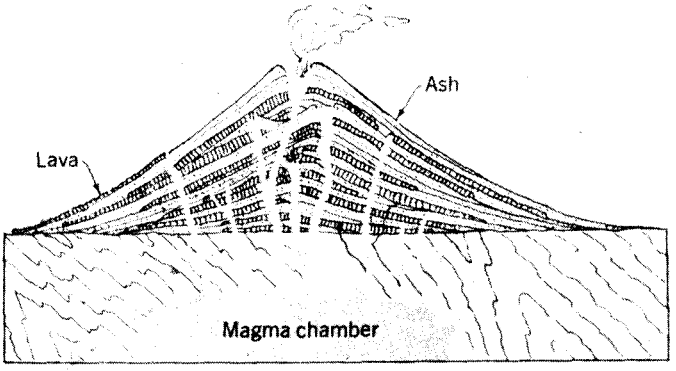
รูป 27.6 ภูเขาไฟกรวยมูลภูเขาไฟ พร้อมกับมีธารลาวาปรากฏไหลลงไปในหุบเขาด้วย ทำให้เกิดเป็นทะเลสาบ

ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟ จะสูงมากกว่า 500 หรือ 1,000 ฟุต (150—300 ม.) และจะโตอย่างรวดเร็ว ภูเขาไฟมองเต นูโว ใกล้เมืองเนเปิลส์ในอิตาลี ภายในสัปดาห์แรกหลังจากที่มันเกิดจะสูงถึง 400 ฟุต (20 ม.) ภูเขาไฟปารีคูตีนในเม็กซิโก เริ่มต้นเป็นภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟและสูง 1,000 ฟุต (300 ม.) ภายในสามเดือนแรก ความลาดของภูเขาไฟกรวยมูลภูเขาไฟอยู่ระหว่าง 26—30 องศา วัตถุมูลภูเขาไฟจะดูดซึมน้ำจากฝนที่ตกหนักโดยไม่ให้มีน้ำเหลือเป็นน้ำไหลบนพื้นผิว ทำให้วัตถุนั้นเหลวลื่นมีส่วนช่วยให้การกัดกร่อนช้าลง การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อกระบวนการผุพังทำให้เกิดดินไหลลงไปในปล่องของภูเขาไฟจนเต็มแล้ว

ธารลาวา (lava flow) บางทีก็ไหลออกมาจากปล่องเดียวกันกับปล่องภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟ ลาวาอาจจระเบิดปล่องให้แตกออกได้ แต่โดยทั่วไปแล้วจะไม่ทำให้รูปทรงของภูเขาไฟเปลี่ยนแปลง ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟนี้อาจระเบิดขึ้นบริเวณใดของภูมิประเทศก็ได้ เช่น สันเขา ลาดเขา และหุบเขา ภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟตามปกติจะเกิดเป็นกลุ่ม ในพื้นที่ไม่กี่สิบตารางไมล์อาจมีภูเขาชนิดนี้จำนวนเป็นโหล บางครั้งภูเขาไฟนี้จะวางตัวขนานกับรอยเลื่อนที่เกิดขึ้นในหินเบื้องล่าง

ภูเขาไฟแบบกรวยซ้อน

ภูเขาไฟสำคัญ ๆ ของโลกเป็นภูเขาไฟแบบกรวยซ้อน เกิดจากมูลภูเขาไฟและชิ้นเถ้าที่ทับถมกันเป็นชั้น ๆ สลับกับลาวา ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงอาจเรียกว่า "ภูเขาไฟแบบชั้น" (strato volcanoes) ก็ได้ ตัวควบคุมมุมด้านลาดคือมูลภูเขาไฟและชิ้นเถ้าที่ตกมากองอยู่และชั้นลาวาช่วยเพิ่มความแข็งและขนาดของภูเขาไฟ ตัวอย่างภูเขาไฟแบบกรวยซ้อนคือภูเขาไฟฟูจิยามาในญี่ปุ่น ภูเขาไฟมายอน ในฟิลิปปินส์ ภูเขาฮูด ในออรีกอนและภูเขาไฟชิแซลดิน ในเกาะอาลูเชียน ภูเขาไฟอื่นๆ ที่สำคัญแต่รูปทรงไม่ค่อยสมบูรณ์คือภูเขาไฟวิสุเวียส ภูเขาไฟเอตนา ภูเขาไฟสตรอมโบลี ในอิตาลีและซิซิลี มีความสูงหลายพันฟุต และมีความลาด 20—30 องศา



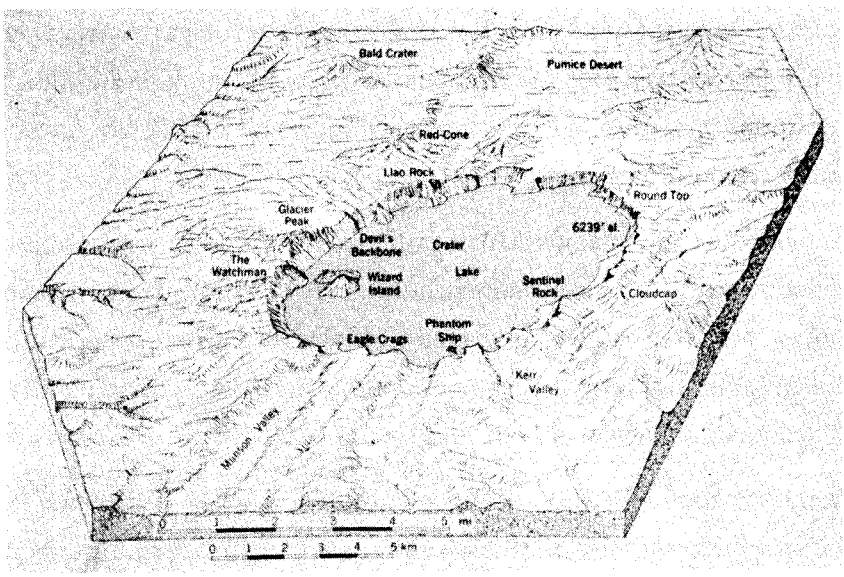
รูป 27.7 ภาพตัดด้านข้างแสดงภูเขาไฟกรวยซ้อน และข้างล่างมีแมกมาไหลขึ้นมาหล่อเลี้ยงอยู่เสมอ

ภูเขาไฟแบบกรวยซ้อนส่วนมากจะวางตัวเป็นแนวหรือมาเป็นวงแหวนรอบมหาสมุทรแปซิฟิก (circum–Pacific ring) เริ่มจากเทือกเขาแอนดิสในอเมริกาใต้ ผ่านไปยังเทือกเขาคาสเคด และเกาะอาลูเชียนเลยไปถึงญี่ปุ่น แล้ววกลงใต้ไปยังหมู่เกาะอินดิสตะวันออกและนิวซีแลนด์ นอกจากนี้ยังมีกลุ่มภูเขาไฟสำคัญ ๆ ในทะเลเมดิเตอร์เรเนียนที่กล่าวถึงมาแล้ว รวมทั้งภูเขาไฟที่ยังมีพลังอยู่ในอิตาลีและซิซิลี ส่วนบริเวณอื่น ๆ ในยุโรปไม่มีภูเขาไฟที่ยังมีพลังอยู่เลย

การระเบิดของภูเขาไฟแบบกรวยซ้อนขนาดใหญ่มักจะมีไอน้ำ มูลภูเขาไฟ บอมบ์ภูเขาไฟและขี้เถ้าพ่นออกมา รวมทั้งธารลาวาไหลออกมาด้วย ปากปล่องภูเขาไฟจะเปลี่ยนรูปทรงอย่างรวดเร็วทั้งจากการทำลายจากส่วนบนและจากการสะสมวัตถุใหม่

แอ่งภูเขาไฟ

ปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดความหายนะอย่างใหญ่หลวงก็คือการระเบิดอย่างรุนแรงของภูเขาไฟซึ่งจะทำลายบริเวณตอนกลางของภูเขาไฟไปทั้งหมด ซากที่เหลือเป็นเพียงแอ่งต่ำขนาดใหญ่อยู่ตรงกลางเรียกว่า "แอ่งภูเขาไฟ" (caldera) ส่วนบนของภูเขาจะถูกแรงระเบิดจนแตกละเอียดลอยปลิวว่อนออกไป ส่วนล่างของภูเขาไฟจะจมลงไปใต้ฐานภูเขาไฟ อย่างไรก็ตาม แอ่งภูเขาไฟส่วนใหญ่มักจะเกิดในยุคประวัติศาสตร์ สภาพต่าง ๆ ใกล้บริเวณภูเขาไฟนั้นเราไม่สามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงได้ เถ้าและฝุ่นจำนวนมหาศาลจะถูกพ่นขึ้นสู่บรรยากาศโดยรอบภูเขาไฟเป็นพื้นที่หลายร้อยตารางไมล์



รูป 27.8 ทะเลสาบปากปล่องภูเขาไฟ เครเตอร์เลค รัฐออริกอน บริเวณที่เป็นทะเลสาบในปัจจุบันนี้เดิมเป็นแอ่งภูเขาไฟ

กรากะตัว เป็นเกาะภูเขาไฟในประเทศอินโดนีเซีย ระเบิดเมื่อปี ค.ศ. 1883 ทำให้เกิดแอ่งภูเขาไฟใหญ่มาก ขณะที่ภูเขาไฟนี้ระเบิดทำให้หินประมาณ 18 ลูกบาศก์ไมล์ (75 ลบ.กม.) จมหายไป การระเบิดครั้งนี้ทำให้เกิดคลื่นแผ่นดินไหวในทะเล ซึ่งได้ทำลายชีวิตมนุษย์ที่อาศัยอยู่ตามชายฝั่งเตี้ย ๆ ของเกาะชวาและเกาะสุมาตราตายไปหลายพันคน การระเบิดในประวัติศาสตร์อีกครั้งหนึ่ง คือ การระเบิดของภูเขาไฟแคตไม ในแหลมอะแลสกาเมื่อปี ค.ศ. 1912 ทำให้เกิดแอ่งภูเขาไฟกว้างกว่า 2 ไมล์ (3 กม.) และลึกถึง 2,000—3,700 ฟุต (600—1,100 ม.) เสียงระเบิดครั้งนั้นได้ยินไปถึงเมืองจูโน ซึ่งอยู่ห่างออกไปถึง 750 ไมล์ (1,200 กม.) และที่เมืองโกไดแอก ซึ่งอยู่ไกลออกไป 100 ไมล์ (160 กม.) มีขี้เถ้าไปตกทับหนาถึง 10 นิ้ว (25 ซม.)

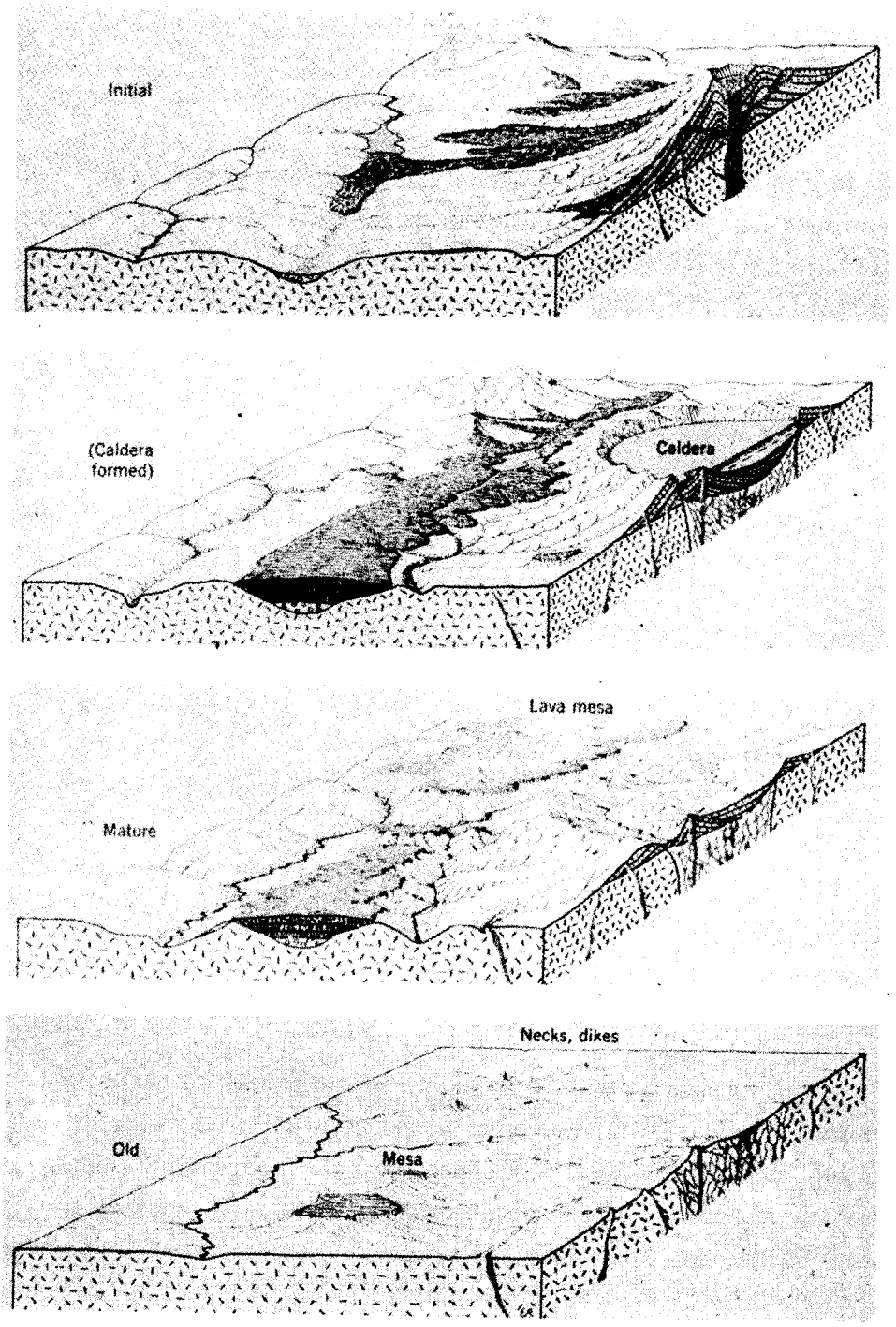
ตัวอย่างของการเกิดแอ่งภูเขาไฟยุคก่อนประวัติศาสตร์ ก็คือทะเลสาบปากปล่องภูเขาไฟ (crater lake) ในรัฐออริกอน ภูเขาไฟเดิมคือภูเขาไฟมาซามา ประมาณกันว่าสูงกว่าขอบปัจจุบันถึง 4,000 ฟุต (1,200 ม.) หุบเขาเดิมเกิดจากการกัดกร่อนของลำธารและธารน้ำแข็ง ที่กัดกร่อนเข้าไปยังข้าง ๆ ของภูเขาไฟมาซามา ซึ่งยอดตรงกลางได้ยุบตัวลงไปจากการระเบิดที่รุนแรง ปัจจุบันนี้ตรงขอบมีรูปทรงเป็นรอยบาก ปากปล่องเกิดขึ้นเมื่อราว 6,600 ปีมาแล้ว เกาะวีซาร์ด เป็นภูเขาไฟที่คงอยู่ในปัจจุบันนี้เกิดขึ้นบนพื้นของแอ่งภูเขาไฟเดิม

วัฏจักรการกัดกร่อนของภูเขาไฟ

รูป 27.9 แสดงให้เห็นถึงลำดับขั้นของการกัดกร่อนภูเขาไฟ ธารลาวาและแอ่งภูเขาไฟ ในบล็อกแรกเป็นภูเขาไฟที่ยังมีพลังอยู่ เป็นกระบวนการสร้างภูเขาไฟ ตอนนี้เป็นขั้นกำเนิด ธารลาวาที่ไหลมาจากปากปล่องภูเขาไฟจะไหลกระจายลงสู่ธารน้ำก้นหุบเขาและไหลไปตามความลาดของหุบเขา และทำให้เกิดทะเลสาบหลังเขื่อนลาวา

ในบล็อคที่สอง มีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างเกิดขึ้น ส่วนสำคัญก็คือ การทำลายภูเขาไฟที่ใหญ่ที่สุดทำให้เกิดแอ่งภูเขาไฟ จะมีทะเลสาบเกิดขึ้นในแอ่งภูเขาไฟ และมีภูเขาไฟทรงกรวยเล็ก ๆ เกิดขึ้นในแอ่งนั้นด้วย ภูเขาไฟอื่น ๆ ที่เกิดมาก่อนก็จะสลายไป ลำธารจะกัดกร่อนบริเวณนั้นจนทำให้รูปทรงกำเนิดเปลี่ยนแปลงไป ในขั้นนี้เราเรียกว่าวัยหนุ่มตอนปลาย ภูเขาไฟเล็ก ๆ บริเวณใกล้เคียง ยังมีพลังอยู่และจะมีรูปทรงแตกต่างออกไป คือ ยังมีรูปทรงงดงามคล้ายกับวัยกำเนิดหรือวัยหนุ่มมาก ๆ

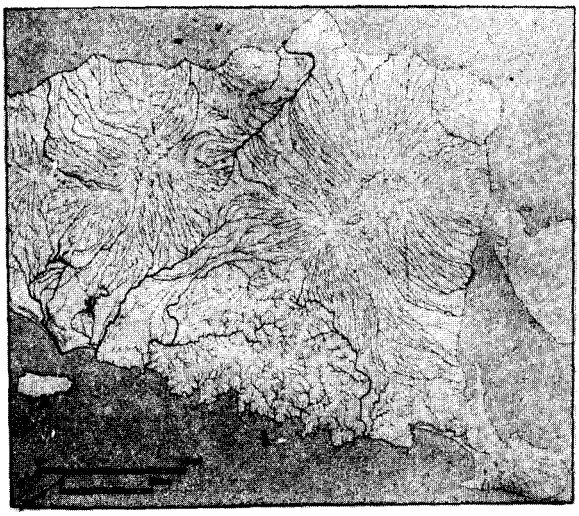
ระบบการระบายน้ำที่ไหลบนกรวยภูเขาไฟเป็นแบบรัศมี (radial) เพราะลำน้ำนี้จะไหลลงไปตามพื้นลาดของภูมิประเทศกำเนิด แม่น้ำกำเนิดจึงเป็นแม่น้ำตามแนวเท เราสามารถจะตีความลักษณะภูเขาไฟได้โดยใช้แผนที่ภูมิประเทศเพียงอย่างเดียวเพราะรูปแบบลำน้ำจะเป็นแบบรัศมีอย่างสมบูรณ์ ในบริเวณหลุมปากปล่องภูเขาไฟจะมีลำน้ำเล็ก ๆ ไหลจากขอบหลุมลงสู่ก้นหลุม ซึ่งขี้เถ้าก้นหลุมจะ



รูป 27.9 ลำดับขั้นการกัดกร่อนพัดพาของภูเขาไฟและธารลาวา

ช่วยดูดซึมน้ำนี้ไว้ โดยที่น้ำนั้นจะไม่ทำให้เกิดช่องน้ำผ่านที่ขอบหลุมเลย ลำน้ำที่ไหลเข้าไปรวมกันนี้เราเรียกว่า "ลำน้ำเข้าสู่ศูนย์กลาง" (centripetal) ซึ่งมีส่วนช่วยให้ตีความลักษณะภูเขาไฟจากแผนที่ได้ด้วย

ในบล็อกที่สามภูเขาไฟทั้งหมดจะสูญสลายไปและถูกกัดกร่อนจนเข้าสู่วัยโตเต็มที่ น้ำจะไหลออกจากทะเลสาบแอ่งภูเขาไฟ และขอบทะเลสาบจะถูกกัดกร่อนให้ต่ำลง ธารลาวาที่ไหลไปตามหุบเขามีความคงทนมากกว่าหินบริเวณโดยรอบและยังคงสภาพอยู่เป็นเนินเมซาสูงกว่าบริเวณโดยรอบ



รูป 27.10 รูปแบบการระบายน้ำแบบรัศมีบนภูเขาไฟในอินดิสตะวันออก

ตัวอย่างของภูเขาไฟที่ถูกกัดกร่อนจนถึงวัยโตเต็มที่คือภูเขาไฟแชสตา ในทิวเขาคาสเคด ด้านข้างของภูเขาไฟนี้มีภูเขาไฟรูปกรวยเล็ก ๆ ลูกหนึ่งซึ่งมีอายุน้อยกว่าเป็นภูเขาไฟสาขา

จากรูป 27.9 แสดงวัฏจักรของการกัดกร่อนภูเขาไฟที่ถูกกัดกร่อนจนถึงวัยชรา ส่วนที่เหลือจะมีเพียงยอดเขาเล็กๆเป็นส่วนของลาวาที่แข็งตัวอยู่ในปล่องภูเขาไฟ เราอาจเรียกว่าคอภูเขาไฟ (volcanic neck) ก็ได้ สันซึ่งวางตัวเป็นรัศมีออกไปจากคอภูเขาไฟนั้นเป็น "พนังรูปกำแพง" (wall-like dike) ซึ่งเกิดจากลาวาดันตัวขึ้นมาตามรอยแตกของเปลือกโลกรอบ ๆ ฐานภูเขาไฟ ตัวอย่างที่ดีของพนังรัศมีนี้ดูได้จาก ชิปรอก (Ship Rock) ในนิวเม็กซิโก เนื่องจากคอตรงกลางและพนังรัศมีผังตัวลึกลงไปในเปลือกโลกต่ำกว่าฐานภูเขาไฟมาก ลักษณะภูมิประเทศนี้จึงคงอยู่ได้เป็นเวลานาน หลังจากที่กรวยและลักษณะภูมิประเทศอื่น ๆ ถูกกัดกร่อนไปหมดแล้ว

โดมลาวาหรือภูเขาไฟรูปโล่

ภูเขาไฟที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะแตกต่างไปจากที่กล่าวมาแล้วคือโดมลาวา หรือภูเขาไฟรูปโล่ (lava dome or shield lava) ตัวอย่างที่ดีที่สุดของภูเขาไฟชนิดนี้คือหมู่เกาะฮาวาย ซึ่งประกอบด้วยโดมลาวาทั้งหมด

โดมลาวามีลักษณะนูนลาดเรียบตรงยอดแบน ทำให้เป็นภูเขาไฟยอดแบนกว้าง โดมฮาวายมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 13,000 ฟุต (4,000 ม.) ถ้ารวมทั้งหินบะซอลต์ส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำทะเลด้วยแล้วจะมีความสูงเป็นสองเท่า ณ ระดับทะเล จะกว้าง 10—50 ไมล์ (16—80 กม.) และฐานใต้ระดับน้ำจะกว้างถึง 100 ไมล์

โดมลาวาเกิดจากลาวาไหลออกมาทับถมกัน การระเบิดและการแตกสลายของวัตถุไม่ใช่สิ่งสำคัญเหมือนกับภูเขาไฟแบบกรวยมูลภูเขาไฟหรือภูเขาไฟแบบกรวยซ้อน ลาวาในลาวาโดมฮาวายเป็นชนิดบะซอลติกสีเข้ม เป็นลาวาที่เหลวมากและไหลตามพื้นลาดไปไกลซึ่งโดยปกติพื้นลาดจะมีมุมไม่เกิน 4—5 องศา

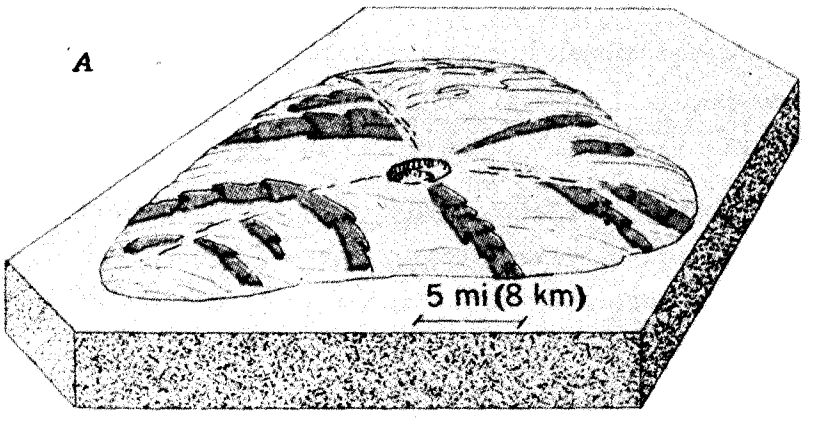
กลางโดมลาวาจะมีแอ่งกว้างมีขอบชันเรียกว่าแอ่งกลาง (central depression or sinks) แอ่งกลางมีอยู่เพียงแอ่งเดียวแต่อยู่ตรงกลางจึงเรียกว่า แอ่งกลาง ในบางกรณีอาจมีหลายแอ่งแต่มีแอ่งเดียวที่อยู่กึ่งกลางซึ่งอาจกว้าง 2 ไมล์ (3.2 กม.) หรือมากกว่าและลึกหลายร้อยฟุต แอ่งลึกนี้เป็นชนิดหนึ่งของแอ่งภูเขาไฟซึ่งเกิดจากการจมตัวของลาวาเหลวที่ไหลขึ้นมาจากเบื้องล่าง บะซอลต์เหลวจะเห็นได้ในหลุมปากปล่อง (pit crater) แอ่งผนังชันอาจกว้าง 0.25—05 ไมล์ (0.4—0.8 กม.) หรือแคบกว่า ซึ่งเกิดอยู่ก้นของแอ่งกลางหรือที่อื่น ๆ บนผิวโดมลาวา ธารลาวาส่วนมากจะเกิดตามรอยแยกหรือรอยแตกทางด้านข้างของภูเขาไฟ

โดมลาวาในเกาะฮาวายได้ผ่านวัฏจักรการกัดกร่อนในขั้นต่าง ๆ กัน ภูเขาไฟที่ยังมีพลังอยู่ เช่น คิลาเอีย และมาอูนา โลอา เป็นภูเขาไฟขั้นกำเนิดและมีพื้นลาดเรียบ ภูเขาไฟลูกอื่น ๆ เช่น อีสท์ เมาอิ นั้นบางส่วนถูกกัดกร่อนเป็นโกรกธารลึก แต่รูปแบบดั้งเดิมยังคงสภาพอยู่บ้าง หรือภูเขาไฟบางลูก เช่น เวสต์ เมาอิ นั้นได้ถูกกัดกร่อนไปหมด เป็นภูเขาที่โผล่ขึ้นมาจากทะเลที่มีด้านข้างชันแสดงว่าเป็นร่องรอยของโดมเก่าและยังคงมีชายฝั่งลึกลงไปใต้ทะเลถึง 250 ฟุต (75 ม.) แสดงให้เห็นถึงขั้นสุดท้ายของการกัดกร่อน

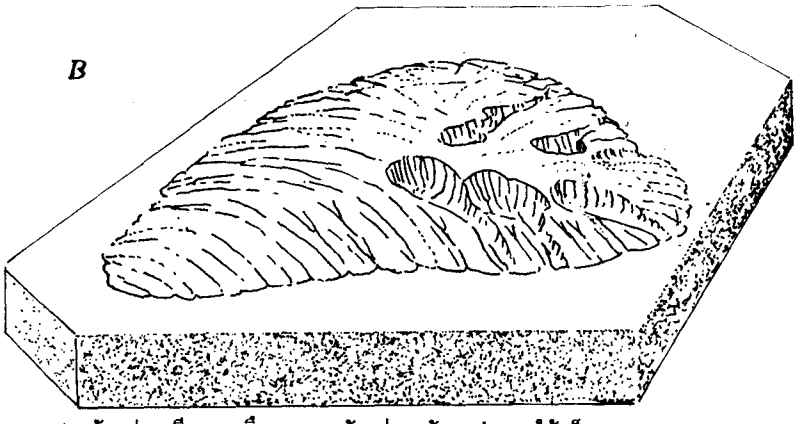
สิ่งแวดล้อมที่สำคัญของภูเขาไฟ

การระเบิดของภูเขาไฟเป็นมหาภัยของโลกที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งจะทำลายเมืองต่าง ๆ ที่ตั้งอยู่ใกล้ภูเขาไฟ และมนุษย์ต้องเสียชีวิตไปมากมาย การสูญเสียนั้นเกิดขึ้นจากเมฆก๊าซจำนวนมหึมาที่ไหลลงมาตามลาดภูเขาไฟคล้าย ๆ กับหิมะถล่ม จากธารลาวาซึ่งไหลมาท่วมทุกส่วนของเมือง จาก

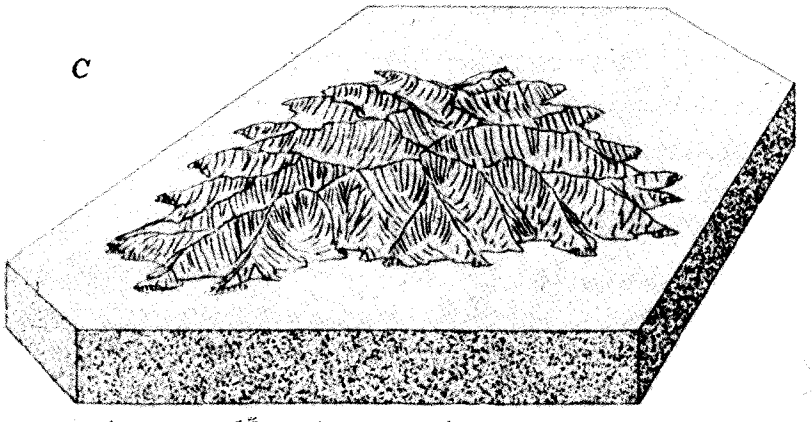
รูป 27.11 โดมลาวาซึ่งอยู่ในลำดับขั้นการกัดกร่อนลำดับขั้นต่าง ๆ



(A) โดมกำเนิด โดยมีแอ่งอยู่ตรงกลาง และมีลาวาใหม่ ๆ ไหลมาตามรอยแยกที่วางตัวเป็นรัศมีไปจากจุดศูนย์กลาง



(B) วัยหนุ่ม มีหุบเขาลึกจากการกัดกร่อนพัดพาปรากฏให้เห็น



(C) วัยตอนกลาง มีพื้นลาดชัน และความต่างระดับมาก

ขี้เถ้ารวมทั้งมูลภูเขาไฟและบอมบ์ที่ลอยฟุ้งอยู่ในตัวเมือง และจากโคลนไหลซึ่งเกิดจากขี้เถ้าภูเขาไฟที่ชุ่มไปด้วยน้ำจากฝนที่ตกหนัก นอกจากนี้ยังมีแผ่นดินไหวอย่างรุนแรงซึ่งเกิดร่วมกับการระเบิดของภูเขาไฟ ถ้าการระเบิดของภูเขาไฟใกล้ ๆ ชายฝั่งจะทำให้เกิดคลื่นแผ่นดินไหวในทะเลอย่างรุนแรง ซึ่งทำให้เกิดรอยเลื่อนใต้ทะเล สิ่งเหล่านี้ไม่จำเป็นต้องเกิดสัมพันธ์กับการระเบิดของภูเขาไฟและอาจเกิดขึ้นได้โดยไม่มีการเตือนล่วงหน้าได้ โดยเฉพาะบริเวณแอ่งก้นสมุทรซึ่งมีแนวภูเขาไฟล้อมรอบ

พื้นผิวภูเขาไฟและธารลาวาที่เกิดขึ้นจะแห้งแล้งและไม่มีพืชขึ้นอยู่เป็นเวลานาน พื้นผิวลาวาบางชนิดจะขรุขระมากยากแก่การสัญจรไปมา ชาวสเปนที่เดินทางเข้าไปทางตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐ ฯ ได้ขนานนามบริเวณนั้นว่า มัลเปอิส์ (malpais) (พื้นดินเลว) ภูเขาไฟส่วนมากที่เกิดขึ้นใหม่จะมีดินอุดมเหมาะแก่การเพาะปลูกมาก

เถ้าภูเขาไฟมีประโยชน์คือทำให้พื้นดินบริเวณที่ขี้เถ้าไปสะสมอยู่นั้นเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรได้ การระเบิดของภูเขาไฟซันเซท เครเตอร์ ใกล้กับแฟลกสตาฟ์ ในรัฐแอริโซนาเมื่อปี ค.ศ. 1605 นั้น ขี้เถ้าภูเขาไฟได้ตกกระจายลงบนพื้นดินทรายแดงรอบภูเขาไฟซึ่งไม่มีพืชขึ้นอยู่เลย ขี้เถ้านั้นได้ช่วยให้ดินเพิ่มความอุดมสมบูรณ์เพราะน้ำจะสะสมอยู่ในขี้เถ้าได้มากซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากในเขตกึ่งแห้งแล้ง เนื่องจากข้าวโพดโฮปีอินเดียน (Hopi Indian corn) เจริญงอกงามได้ดีในดินทราย เป็นผลให้มีชาวอินเดียนแดงไปตั้งถิ่นฐานในบริเวณดังกล่าวหนาแน่น เมื่อขี้เถ้าถูกพัดพาไปจากด้านลาดภูเขาไฟหมดแล้ว โดยการกระทำของฝนที่ตกหนักในฤดูร้อนหรือลมพัดไปสะสมเป็นเนินขี้เถ้า ความอุดมสมบูรณ์ของดินจึงลดลงและหลังจากใช้เพาะปลูกเป็นเวลาถึง 200 ปี บริเวณดังกล่าวก็กลายเป็นเมืองร้างเหมือนกับที่เคยเป็นมาแล้วในอดีต

ภูเขาวัยหนุ่มและวัยถูกกัดกร่อนเต็มที่จะมีทรัพยากรธรรมชาติที่ต่างกันออกไปเนื่องจากภูเขาที่ขรุขระ ตามลาดภูเขาไฟไม่สามารถเพาะปลูกได้ แต่ก็เป็นแหล่งไม้ที่สำคัญ เช่น ภูเขาแซนแฟรนซิสโกซึ่งเป็นกลุ่มภูเขาไฟที่ถูกกัดกร่อนเต็มที่แล้วซึ่งตั้งอยู่ทางเหนือรัฐแอริโซนา เป็นภูเขาที่มีป่าสนเหลือง (ponderosa pine) ขึ้นมากมาย อุตสาหกรรมไม้ซุงมีศูนย์กลางอยู่ที่เมืองแฟลกสตาฟฟ์และเมืองวิลเลียมส์มานานหลายปีแล้ว

ลักษณะภูมิประเทศอันสวยงามของภูเขาไฟจึงทำให้เป็นแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญ มีอุทยานแห่งชาติหลายแห่งที่ตั้งอยู่ในเขตภูเขาไฟ เช่น ภูเขาเรนิเย ภูเขาลัสเสน และทะเลสาบเครเตอร์ ในเทือกเขาคาสเคด ภูเขาวิสุเวียส และภูเขาฟูจิยามาซึ่งจะมีคนเข้าไปเที่ยวบีละมาก ๆ

แร่โลหะมักไม่ค่อยมีในเขตภูเขาไฟและธารลาวา เว้นแต่ว่าเมื่อมีสินแร่ดันตัวขึ้นมาในหินภูเขาไฟ ก็อาจมีแร่โลหะบ้าง เช่น ตามรูพรุนซึ่งเคยมีอากาศแทรกตัวอยู่ในลาวาเก่าอาจมีทองแดงหรือสินแร่อื่น ๆ มาอยู่แทน หินคิมเบอร์ไลท์ ในอเมริกาใต้ซึ่งเป็นแหล่งเพชรที่สำคัญนั้นอยู่ปากปล่องภูเขาไฟเก่า

หินภูเขาไฟบ่นเป็นวัตถุสำคัญที่ใช้ผสมคอนกรีตหรือทำทางรถไฟและใช้ในงานวิศวกรรมอื่น ๆ ดังนั้น ชั้นหินลาวาเก่าในเทือกเขาวัทซุง ทางภาคเหนือของนิวเจอร์ซีจึงมีการทำเหมืองเป็นเวลาหลายทศวรรษมาแล้ว

คำถามทบทวนบทที่ 27

1. หินอัคนีมวลมหาศาลคืออะไร ลำหินอัคนีคืออะไร ภูมิประเทศทั้งสองนี้ใหญ่เพียงใด หินอัคนีมวลมหาศาลประกอบไปด้วยหินอะไรบ้าง เมื่อมวลหินนี้ถูกกัดกร่อนไปจนถึงวัยตอนกลางแล้วทำให้เกิดลักษณะภูมิประเทศแบบใด
2. ระบบการระบายน้ำแบบมุมฉากต้องเกิดบนผลึกหินเนื้อเดียวเช่นมวลหินอัคนีขนาดมหาศาล หมายความว่าอย่างไร
3. ลักษณะภูมิประเทศแบบใดที่วิวัฒนาการบนแถบหินแปร เช่น หินไนส์ ชิสต์ หินชนวน หินอ่อน และควอร์ตไซต์ หินดังกล่าวนี้ทำให้เกิดหุบเขาได้หรือไม่ หินชนิดนี้ทำให้เกิดเทือกเขาสันแคบหรือเทือกเขาสันกว้าง
4. มีหินและโครงสร้างชนิดใดบ้างที่เราจะพบได้ในบริเวณโครงสร้างสลับซับซ้อน เมื่อมองตามช่วงเวลาทางธรณีวิทยาแล้ว โครงสร้างแบบสลับซับซ้อนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นมาแต่ดึกดำบรรพ์ หรือเกิดขึ้นเมื่อไม่นานมานี้ บริเวณนี้เป็นแหล่งแร่ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจใช่หรือไม่
5. ภูเขาไฟมีกี่ชนิด และแต่ละชนิดต่างกันอย่างไร
6. จงอธิบายภูเขาไฟชนิดกรวยมูลภูเขาไฟ ภูเขาไฟชนิดนี้เกิดจากวัตถุชนิดใด ภูเขาไฟชนิดนี้มีขนาดเท่าใดและมันเกิดขึ้นได้เร็วเพียงใด เมื่อมองรูปด้านแปลนแล้วภูเขาไฟชนิดนี้วางตัวอย่างไร
7. ภูเขาไฟกรวยซ้อนเกิดขึ้นได้อย่างไร จงบอกชื่อภูเขาไฟกรวยซ้อนที่มีชื่อเสียงสัก 2–3 ชื่อ แนวใดบนผิวโลกที่มีภูเขาไฟที่ยังคุกรุ่นอยู่ปรากฏอยู่มากที่สุด
8. แอ่งภูเขาไฟคืออะไร ปฏิกิริยาภูเขาไฟแบบใดที่เกิดขึ้น ณ ภูเขาไฟกรากะตัว (1883) และภูเขาไฟคัทไม (1912) จงอธิบายถึงทะเลสาบปากปล่องภูเขาไฟในแอ่งภูเขาไฟ
9. จงอธิบายลำดับขั้นการกัดกร่อนวัยตอนต้น วัยตอนกลางและวัยตอนปลายของภูเขาไฟขนาดใหญ่ รูปแบบการกระบายน้ำที่เกิดขึ้นบนภูเขาไฟมีลักษณะเช่นไร
10. จงอธิบายถึงคอภูเขาไฟและพนังรัศมี และยกตัวอย่างประกอบ
11. จงอภิปรายถึงรูปทรงและวิวัฒนาการของโดมลาวา หรือภูเขาไฟรูปโล่ โดมลาวามีลักษณะภูมิประเทศเกี่ยวพันกับปากปล่องภูเขาไฟกรวยซ้อนอย่างไร
12. จงอภิปรายถึงสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรของภูมิประเทศแบบภูเขาไฟ รูปทรงของภูเขาไฟมีผลต่อดินและพืชอย่างไร

บรรณานุกรม

Battan, L.J. (1962), **Cloud physics and cloud seeding,** Doubleday and Co., New York, 144 pp.

_____. (1961), **The nature of violent storms,** Anchor Science Study series, Doubleday and Co., New York, 158 pp.

Bird, J.B. (1967), **The physiography of arctic Canada,** The Johns Hopkins Press, Baltimore, Md., 336 pp.

Cotter, C.H. (1965), **The physical geography of the oceans,** American Elsevier Publ. Co., New York, 317 pp.

Chamberlin, W. (1947), **The round earth on flat paper,** Nat. geog soc., Washington, D.C., 126 pp.

Chang, Jen-Hu (1968), **Climate and agriculture; an ecological survey,** Aldine Publ. Co., Chicago, 304 pp.

Craig R.A. (1968), **The edge of space, exploring the upper atmosphere,** Doubleday and Co., New York, 150 pp.

Deetz, C.H. and O.S. Adam (1945), **Element of map projection,** special Publ. 68, U.S. Dept. Commerce, U.S. govt. Printing Office, Washington, D.C., 266 pp.

Eyre, S.R. (1968), **Vegetation and soils; a world picture,** second edition, Aldine Publishing Co., Chicago, 328 pp.

Geiger, R. (1965), **The climate near the ground,** fourth edition, Harvard University Press Cambridge, Mass., 611 pp.

Hosmer, G.L. and J.M. Robbins (1948), **Practical astronomy,** fourth edition, John Wiley and Sons, New York, 355 pp.

Helm, T. (1967), **Hurricanes: weather at its worst,** Dodd, Mead and Co., New York, 234 pp.

Johnson, J.C. (1954), **Pyhsical meteorology,** Technology Press of M.I.T. and John Wiley and Sons, New York, 393 pp.

Kendrew, W.G. (1953), **The climates of the continents,** Oxford University Press, London, 607 pp.

Mehlein T.G. (1959), **Astronomy,** John Wiley and Sons, New York, 391 pp.

Money, D.C. (1965), **Climate, soils and vegetation,** University Tutorial Press, Ltd., London, 272 pp.

Pettersen, S. (1969), **Introduction to meteorology,** edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 333 pp.

Raisz E. (1948), **General cartography,** McGraw-Hill Book Co., New York, 354 pp.

Riehl H. (1965), **Introduction to the atmosphere,** McGraw-Hill Book Co., New York, 354 pp.

Robinson, A.H. and R.D. Sale (1969), **Element of cartography,** third edition, John Wiley and Sons, New York, 343 pp.

Robbins, W.W., T.E. Weier, and C.R. Stocking, (1964), **Botany : An Introduction to Plant Science,** third edition, John Wiley and Sons, New York, 480 pp.

Sellers, W.D. (1965), **Physical Climatology,** University of Chicago Press, 272 pp.

Strahler, A.N. (1969), **Physical Geography,** third edition, John Wiley and Sons, New York. 733 pp.

Trewartha, G.T. (1961), **The Earth's Problem Climates,** The Univ. of Wisconsin Press, Madison, Methuen. and Co., London, 334 pp.

_____. (1968), **An Introduction to Climate,** fourth edition, McGraw-Hill Book Co., New York, 408 pp.

White, G.F. ed. (1956), **The future of arid lands,** Am Assoc. Advancement of sci., Publ. 43, Washington, D.C., 453 pp.

ISBN 974-07-5351-5

พิมพ์ที่ บริษัทโรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด 891 ถนนพระราม 1 กรุงเทพมหานคร
นางบุญพริ้ง ต. สุวรรณ ผู้พิมพ์ผู้โฆษณา พ.ศ. 2527