

737554

ナリ

第二

J. G. 兰姆塞

徐 树 桐 主



THE TECHNIQUES OF
MODERN STRUCTURAL GEOLOGY

Volume 2 Folds and Fracture

JOHN G. RAMSAY
MARTIN I. HUBER

现代构造地质学方法

第二卷 褶皱和断裂

徐 树 桐 主译
郑 亚 东 校

地 质 出 版 社

本书由构造地质课程教学指导委员会在1987年第二次全体会议上决定引进本书，由徐树桐主译，郑亚东总校后交付地质出版社出版。

THE TECHNIQUES OF
MODERN STRUCTURAL GEOLOGY

Volume 2: Folds and Fractures

JOHN G. RAMSAY

MARTIN I. HUBER

1987 ACADEMIC PRESS

高等学校教材

现代构造地质学方法

第二卷 褶皱和断裂

徐树桐 主译

郑亚东 校

责任编辑：张荣昌

地质出版社出版

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所发行

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：26.875 字数：634000

1991年8月北京第一版·1991年8月北京第一次印刷

印数：1—1200册 定价：6.90元

ISBN 7-116-00876-4/P·749

校译者的话

本书系著名构造地质学家、教授、英国皇家学会会员、瑞士苏黎世高等理工学院地质所前任所长J. G. Ramsay和M. I. Huber合写的《现代构造地质学方法》的第二卷“褶皱和断裂”。全书分十三个单元（15—17单元）及三个附录（附录F—G），图文并茂，内容丰富，是学习构造地质学及进行野外地质研究的一部非常好的教材。

本卷由徐树桐主译，参加翻译的有陈冠宝（第16单元和附录F）、江来利（第17、23单元）、董树文（第22单元）、刘贻灿（第25单元）、张勇（第26单元）、陈磊（第27单元）等。主译徐树桐除担任大部分单元的翻译外，并对全书进行了初校；陈冠宝协助进行了整理。交稿后由郑亚东进行了终校，并补译了关键词和定义中的说明部分。在编辑过程中对有些图件进行了适当缩减，对全部图件进行了整理和植字（贾桂芬负责植字），删掉了索引，并加入了部分注释。

本书涉及的名词较多，在组织翻译出版过程中与第一卷的统稿受到一定条件的限制，有些地方可能不够完全统一，在文字上也可能存在一定缺陷，望广大读者批评指正。

序 言

积累小型构造资料是一件费力却很吸引人的工作。它不仅包括投影求出地层的倾角和走向，也要求出片理的倾角和走向；同时还要求出线状构造的倾伏；并收集定向标本供实验室研究。在野外很容易由于对研究课题过于热心而错过了对其它同等重要但不太令人感兴趣的地质观察。这意味着工作人员必须自觉遵守纪律，因为对地层等类似现象不给予相应的注意，对一个地区的构造或历史的综合分析就可能是不正确的或至少是不完全的。反过来也是一样，因为没有对岩石所受构造运动的正确认识，地层本身也可能是不正确的或者是难以解释的。

Gilbert Wilson, 1961

……岩石中每一种构造都是有意义的，没有哪一种是不重要的，即使初看起来它似乎是不相干的。

Ernst Cloos, 1946

为补充第1卷写出了《现代构造地质学方法》的第2卷。这两本书可以作为大学中构造地质学两学期教学计划的基础。第2卷的编排和版式大致与第1卷相同。第1卷中提出的关于应变、相容性和岩石组构的许多基本概念，在本卷内作了引伸，以便与天然变形岩石中褶皱和断裂作用的更广泛的几何和力学方式相互联系起来。每一单元都为讨论某个意义明确的岩石构造提供了基础。每一单元开始先简介课题背景，然后是要求读者经过积极思考才能解决的实际问题。所有这些问题都是以真实的例子、变形几何学的数学原理或实际的实验结果为根据的。问题之后便是“解答和说明”部分，其中解答了几何学的、数值的或数学方面的问题，并对由课题中出现的特殊现象进行了广泛的讨论。为了进入下一单元，学生应当研究所有的基本问题和有关的说明。对于那些有更多时间或经验较丰富的学生，带“星号”的问题能加深他们的理解。根据本书的编写方式，我们不希望学生逐页地系统阅读。

本书提供了许多见于野外天然变形岩石中和实验室内构造的照片插图，它们的规模从山脉的侧影、单个的露头构造到薄片下的微观现象。我们认为学生对这些自然现象有一个正确的印象是最重要的。选入插图的实例不仅非常清楚，而且不同于很多教科书中用泛了的实例，我们不想因为这些经典实例仍然很重要而改头换面地重复叙述，因而希望学生阅读其它教科书和杂志作为对本书的补充。

我们没有讨论区域构造，既有观点上的原因也因篇幅所限。我们认为构造地质学仅仅是大地构造学所讨论对象的一个方面。任何对大地构造的充分讨论都需要将构造地质学与沉积学、地层学、火成岩石学和变质岩石学、地质年代学以及地球物理学的许多方面结合起来。构造地质学有其明确规定的研究内容，对它的范围和内容的最低限度的发挥也需要大量篇幅。目前，在有些地球科学同行中有一种将所有的蛋都放在板块构造篮子中，认为

小型构造微不足道、与科学进步无关甚至是有害的不幸倾向。我们认为这种“越大越好”的观点在理智上和哲学上都是不能接受的。

有几位同事和朋友帮助我们准备了实习材料，苏黎世高等理工学院（ETH）的同事 Ueli Briegel 提供了实验岩石变形的数据；物理研究所的 Nazario Pavoni 提供了地震初动分析的数据和意见；Dorothee Dietrich 提供了概括赫尔文特（Helvetic）推覆体内剪切脉系统区域型式的两个图解；Peter Huggenberger 允许我们用莫克勒斯（Morcles）推覆体古地理古构造再造的成果。苏黎世以外的朋友也向我们提供了有价值的信息，特别感谢 Mark Cooper 给了我们赫诺克斯（Hénaux）采石场线长度平衡的原始数据以及 Dietmar Meier 提供了关于侏罗山节理型式的资料及其意义的有益讨论；剪切岩石中薄片组构的照片是由 Carol Simpson 和 Cees Passchier 提供的；一个褶皱交错层的杰出实例来自 Jack Soper；与我们讨论的褶皱作用有关的两个室内实验结果是 Peter Cobbold 的工作结果。讨论地质填图的附录 F 是受到了 Mike Fleuty 所著《金斯顿地震论评》（Kingston Geological Review）最初几版中幽默而又有指导意义的文章的启发。

特别感谢我们的同事 Barbara Das Gupta 为我们编排手稿并提出意见，感谢 Urs Gerber 将我们彩色幻灯片转印成黑白照片并熟练地解决了许多其它照相问题。衷心感谢学术出版社的同仁，特别是 Conrad Guettler 欣然同意对这本书采用不常见的风格和版式以及对出版这两卷书提供熟练而必要的业务指导。

许多构造地质学领域的教师和讲师想要得到用于现代构造地质学方法第1和第2卷插图的黑白照片的彩色幻灯片。所以我们准备了几套不完整的和一套完整的高质量彩色幻灯片。可以从 J. G. Ramsay 教授处获得有详细说明的小册子（地址为：Geologisches Institut, ETH-Zentrum, CH-8092, Zürich, Switzerland）。

John Ramsay
Martin Huber

目 录

第15单元 褶皱的形态	1
引言	1
定义——单一褶皱面	2
褶皱的规模	5
褶皱的形状	6
褶皱形态的傅里叶分析	7
问题	10
星号(★)问题	16
解答和说明	16
波长-波幅分析	16
直观谐分析	19
傅里叶系数的计算	19
轴迹的绘制	20
小型褶皱的对称性	22
关键词和定义	23
主要参考文献	25
第16单元 褶皱定向——投影方法	26
引言	26
褶皱轴	27
π -图解	27
β -图解	28
轴面	29
轴迹	30
脊面迹	30
问题	31
星号(★)问题	31
解答和说明	33
结论	38
关键词和定义	39
主要参考文献	39
第17单元 褶皱分类	41
引言	41
根据岩层厚度变化的褶皱分类(Ramsay, 1967)	42
问题	43
星号(★)问题	46

解答和说明	49
岩层的厚度变化	49
倾角等斜线	51
描述褶皱形态的 ϵ/λ 方程	52
压扁褶皱	54
压扁平行褶皱中的褶皱形状	54
压扁第 3 类褶皱中的褶皱形状	54
实验形成的褶皱	55
索比(Sorby)的“鱼钩”状褶皱	56
关键词与定义	57
主要参考文献	58
第18单元 褶皱的横剖面 and 正剖面	59
引言	59
横剖面 and 正剖面的绘制	60
问题	61
地形变化对正剖面制图方法的影响	62
构造数据的外推法	63
巴斯克(Busk)作图法	64
用等斜线重建褶皱	66
星号(★)问题	68
解答和说明	69
结论性的评述	76
关键词和定义	76
主要参考文献	77
第19单元 褶皱机制之一——单层	78
引言	78
问题	79
星号(★)问题	82
解答和说明	82
波长-厚度关系——理论	82
波长-厚度关系——测量	86
单层纵弯中粘度反差对褶皱形状的控制	87
高强硬度反差	88
低强硬度反差	88
尖-圆褶皱	90
估计强硬度反差	93
褶皱过程中递进的形状变化	97
关键词和定义	98
主要参考文献	99
第20单元 褶皱机制之二——多层	101
引言	101

问题	102
星号(★)问题	106
解答和说明	106
单层纵弯作用理论所推导的多层褶皱的性质	106
褶皱形态随强硬岩层间的堆积距离而变化	108
多层中的褶皱样式	108
与重力无关形成的褶皱	109
重力影响下形成的褶皱	121
各向异性	123
共轭膝折到尖棱褶皱的几何变化	124
两个膝折带的同时发育	127
共轭膝折褶皱的形成和传播机制	127
膝折带的几何性质和应力轴	132
褶皱理	134
关键词和定义	140
主要参考文献	141
第21单元 褶皱中的应变和小型构造	144
引言	144
问题	145
星号(★)问题	149
解答和说明	149
弯褶皱的几何性质	149
切向线应变	159
因切向线应变而变形的岩石构造特征	160
切向线应变和顺层剪切结合形成的褶皱	163
褶皱中切向线应变和顺层剪切的比值	164
顺层缩短对褶皱中应变场的影响	166
用劈理和层理的关系野外解释褶皱	168
关键词和定义	174
主要参考文献	175
第22单元 叠加褶皱	176
引言	176
问题和星号(★)问题	177
解答和说明	186
非平行面的褶皱作用	186
叠加剪切褶皱	187
褶皱干涉型式	192
干涉型式的一般讨论	194
用赤平投影法对叠加褶皱的几何分析	202
叠加褶皱系统中变形线理几何性质的解释	204
关键词和定义	205

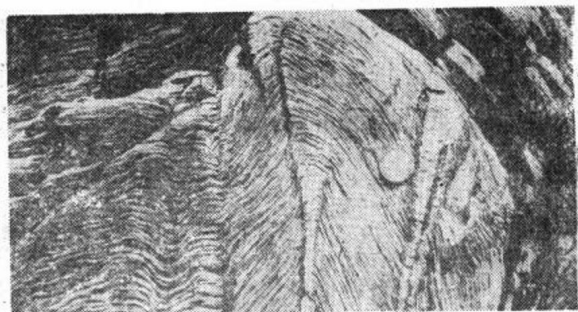
主要参考文献	205
第23单元 断层的几何学和形态	208
引言	208
断层的术语	209
问题	214
星号(★)问题	230
解答和说明	245
断层面上运动方向的确定	245
断层面上运动矢量的计算	245
断坡—断坪式逆冲席体的内部几何特征	248
关键词和定义	249
主要参考文献	251
第24单元 断层和平衡剖面的绘制	253
引言	253
问题和星号(★)问题	256
解答和说明	263
未变形模型的制作	263
线长平衡——例1	265
线长平衡——例2	266
拆离深度的计算	266
应变岩石中线长度的平衡	267
应变岩石中岩层厚度的校正	268
结论性的评述	269
关键词和定义	270
主要参考文献	271
第25单元 断层的力学分析	273
引言	273
力与应力	273
均匀、各向同性弹性体中的应力-应变关系	274
问题	276
岩石破裂的力学实验	276
P-波初动分析	279
震裂锥的几何特征	282
解答和说明	283
关键词和定义	308
主要参考文献	309
第26单元 韧性剪切带和脆性剪切带	312
引言	312
韧性剪切带	313
问题和星号(★)问题	315

解答和说明.....	326
据线方向的变化区分剪切组分和体积变化组分.....	326
剪切组分和体积变化组分的区分——1.围岩无应变	339
剪切组分和体积变化组分的区分——2.围岩有应变	341
非正交剖面上的剪切带各组分的计算	341
雁行脉列	344
关键词和定义	359
主要参考文献	360
第27单元 节理	362
引言	362
节理的几何分类	366
问题	369
解答和说明.....	372
倾斜一致岩层中的节理分析	372
褶皱岩层中的节理分析	377
结论性评述.....	389
关键词和定义	389
主要参考文献	389
附录E 力和应力	391
力	391
应力	391
平面应力分析.....	392
三维应力	394
平面应力中作用在斜交主应力轴面上的应力	394
二维应力变化	395
附录F 地质填图	397
装备	397
地质制图程序	400
标本采集记录.....	405
结论性评述	405
附录G 数学符号	407
1.罗马字母.....	407
2.希腊字母.....	408
资料目录	409

第1卷：应变分析 目录

- 第1单元 位移——长度和角度变化
- 第2单元 应变椭圆的概念——变形和旋转
- 第3单元 不均匀应变概论
- 第4单元 位移矢量区和应变
- 第5单元 实用应变测量之一——初始为圆或椭圆的标志
- 第6单元 实用应变测量之二——线的测量
- 第7单元 实用应变测量之三——心对心法和应变分解
- 第8单元 实用应变测量之四——角度测量
- 第9单元 方位分析
- 第10单元 三维应变之一——面状和线状组构
- 第11单元 三维应变之二——应变测量方法的评论和应变状态的表示
- 第12单元 递进位移和递进变形——原理
- 第13单元 递进变形的测量之一——张性脉
- 第14单元 递进变形的测量之二——压力影
- 附录 A—D

第15单元 褶皱的 形态



在一般地介绍褶皱作用之后，这一单元研究描述褶皱几何形状所需的专门名词。首先是定义单个褶皱面特征所需的名词；然后是描述相邻褶皱层几何关系的名词。推荐基于调和（或傅里叶）分析来描述曲率变化的一些专门方法，并证明这种分析如何既适于一般描述，又适用于非常精确的分析。描述多级谐褶皱中许多小波长褶皱之间的关系，并讨论记录褶皱对称性变化的实用方法。

引 言

褶皱也许是在构造作用下发育于变形岩石中最普遍的构造。它们形成于具有面状形迹（如沉积层理、变质的片岩和片麻岩中的岩性层）或具有平面状各向异性形迹（如早期变形事件过程中形成的劈理和片理）的岩石中。褶皱的普遍存在是因在平面形迹的缩短期间造成侧向偏转的力学不稳定性的生长速率一般都是迅速的。不过，并非所有褶皱都是由这种纵弯作用过程形成的。当非均一的力横向作用于岩层时也能形成褶皱；横弯作用（bending）过程，如地壳差异的沉降作用，剪切带中的差异剪切作用或岩体在不规则底板上的滑动都能引起褶皱。

褶皱的最显著特征是它们几何类型（通常称作褶皱样式）的极其多变。迅速浏览一下后六个单元中的插图，将会得到褶皱几何多样性的某种概念。褶皱样式的这些变化必然与褶皱作用期间构造的力学成因有关，特别与岩石的流变状态有关。对于企图将变形岩石的几何构造与主要构造事件相联系的地质学家来说，褶皱样式变化意义的正确解释是很重要的。随时间和空间不同而改变环境条件是造山带的特点，而岩石类型、温度、压力和应变速率的不同，会导致褶皱样式几何性质的巨大差异。

对褶皱几何性质的正确评价和解释有重要的工业用途。在石油工业中，褶皱及其伴生构造可以形成油捕是众所周知的，而且了解褶皱的周期性和几何性质，往往是选择钻井位置以及勘探和开发方案的关键问题。在采矿工业中，预测褶皱矿体的储量对于制定经济可行的矿山和区域性计划往往是极其重要的。

这一单元中，首先是要揭示褶皱岩石的主要几何特征。我们需要找一些最重要的描述性名词用来明确表示褶皱的特定部分，以便根据这些特征的几何性质制定一个褶皱的初步分类。精确的几何描述和分类不仅仅只有学术上的意义。如果我们需要预测褶皱向两侧和深部延续（或不延续），这种精确的几何描述和分类是必不可少的；这种分类是对比天然褶皱和实验造成褶皱的关键；也是将天然褶皱与按褶皱形成的力学原理推导的褶皱形状进行对比的关键。我们强调这些描述和分类必须能实际应用。一个地质学家往往希望能在野

外迅速地描述一个褶皱；在他能够给一个特定褶皱定名以前，并非总是有时间或不必要花很长时间进行分析。所以我们着重于能对褶皱作出迅速有用而又精确几何描述的实用方法，特别着重那些经得起推敲而又针对问题的方法，以使用数学术语精确定义褶皱的几何特征。

定义——单一褶皱面

一个褶皱面具有用于定义褶皱重要特征的各种曲率。曲率是面的一种基本性质或不变的性质，因而以曲率变化为根据的术语确定了褶皱岩层的基本特征。曲率变化从特定最大（正）值，经过零，到最小（负）值。

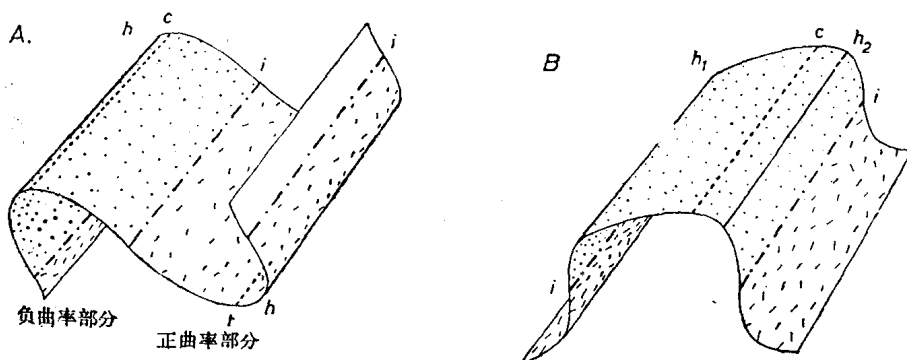


图 15.1 单枢纽褶皱 (A) 和双枢纽褶皱 (B) 表示的主要特征

h —枢纽线； i —拐线； c —脊线； t —槽线；负曲率的背形区以点划线表示；正曲率的向形区以断线表示

连接最大和最小曲率的线，称为**枢纽线**；连接零曲率的线，称为**拐线**（图15.1）。拐线又将褶皱面分成**褶皱域**（fold domain）。负曲率（向上封闭）的域为**背形**，正曲率者（向下封闭）为**向形**（图15.1）。尽管大部分褶皱都可以用这种方法描述，但有些褶皱却既不向上、也不向下封闭。这种向两侧封闭的褶皱，称为**中性**（neutral）褶皱（图15.2A）；当中性褶皱的所有面都为陡倾斜时，称为**倾竖褶皱**（图15.2B）。背形、向形和中性等词仅仅是以几何准则为根据的，而另外一些词（如“新向”（younging sense）或极性方向）则是用来定义褶皱沉积岩中的地层学关系的。**背斜**是指最老地层位于其核部（或褶皱的凹面一侧）的褶皱。**向斜**是最年轻地层位于核部的褶皱。尽管在大多数情况下所见的背形常常就是背斜，向形也就是向斜，但是情况并不总是如此。于先已倒转岩层中发育的褶皱会表现为背形式向斜。这种双重命名在叠加褶皱区确定构造中的几何关系和地层关系是极为有用的。图15.3表示一个侧向封闭的大型背斜，它已被较直立的构造重褶。图左侧①的叠加背形可分为两部分，箭头指示的极性方向使我们能区分出上部的背形式背斜和下部的背形式向斜。有时用 Shackleton (1958) 提出的另一种方法，将地层层序的极性结合在褶皱几何性质的描述之中。他定义图15.3中的极性箭头为一褶曲的面向。在他的命名法中，将背形式背斜称作面向上的背斜；将背形式向斜称作面向下的向斜。

两个拐线之间的褶皱域中，褶皱可以有一个（图15.1A）、两个（图15.1B）或更多个枢纽线。褶皱枢纽线附近的褶皱面区，称为**枢纽带**；两个相邻枢纽线之间的褶皱面区，称

① 原文误为右侧——校者注

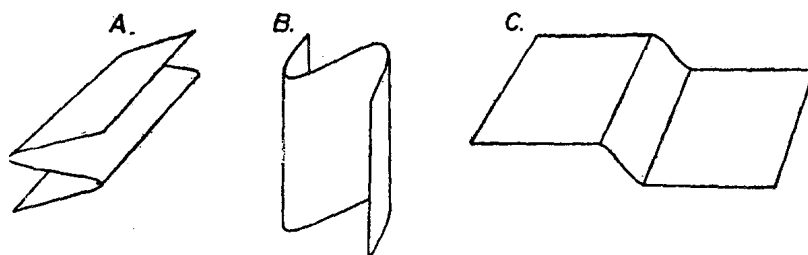


图 15.2 侧向封闭褶皱或中性褶皱 (A), 倾竖褶皱 (B) 和单斜褶皱 (C)

为褶皱翼。根据更详细的曲率变化分析, Ramsay(1967) 已提出枢纽带和褶皱翼的非常严格的定义, 不过这些建议尚未被普遍采用。枢纽线方向的方位角常被称为褶皱的轴向(axial trend)。褶皱枢纽可以是水平的或倾斜的, 枢纽倾斜的褶皱在地表的露头型式表现为特征的V或U型式, 它对解释地质图上褶皱的几何性质是一种重要的特征。通常, 褶皱枢纽线波状起伏, 以及这种起伏方向的改变造成一些特殊的构造形态。向一个方向倾伏的枢纽线通过水平面又向相反方向倾伏的现象, 根据倾伏向上或向下弯曲而分别被称为枢纽的褶皱(culmination)和褶皱(depression) (图15.4)。倾伏的这种变化造成了穹隆(具有枢纽线褶皱的背形), 盆地(具有枢纽线褶皱的向形), 鞍(具有褶皱的背形), 或反鞍(具有褶皱的向形)。有些地区枢纽线定向的变化可能很强烈(大于 90°), 穹隆和盆地的形态变得非常显著。这样的褶皱被称为眼球状褶皱(Ramsay, 1962——根据平面露头所见的封闭眼状形态, 图15.5A)或鞘状褶皱(Cobbold and Quinquis, 1980——根据三维几何形态全部, 图15.5B)。

如果在褶皱面的所有各点上都能找出平行于褶皱枢纽方向的线, 则称为圆柱状褶皱; 平行枢纽的线就是褶皱轴。圆柱状褶皱的横切面不一定必须是圆的; 圆柱状一词的含义仅在于褶皱面的形态可由褶皱轴按平行于其本身的方向在空间移动而成, 这在数学意义上是圆柱状的。虽然许多褶皱的一小段的几何形态十分接近于这种模式, 但大部分褶皱不同于

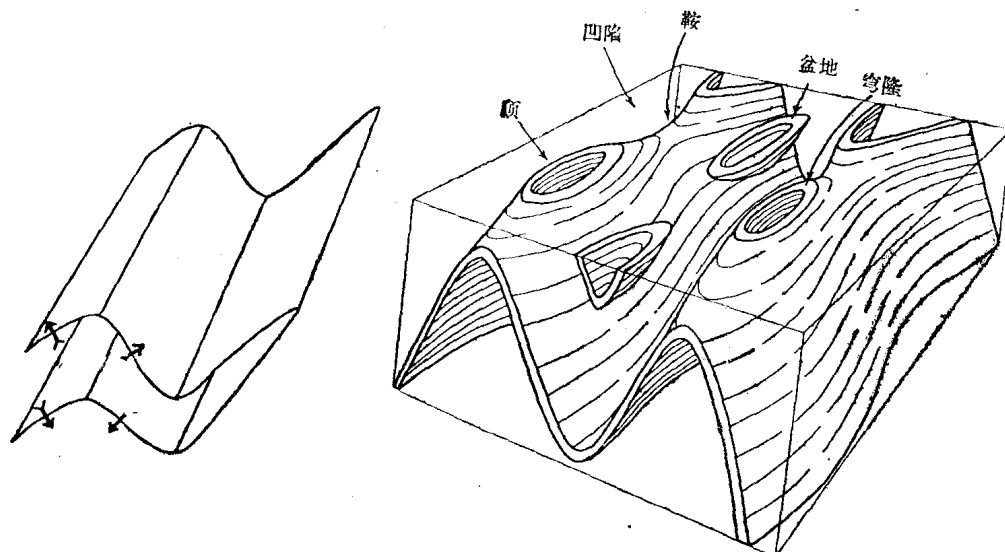


图 15.3 重褶的中性褶皱
左边的背形重褶可分为上部的背形式背斜和下部的背形式向斜; 箭头指示地层的极性

图 15.4 褶皱枢纽线倾伏的变化造成的构造现象

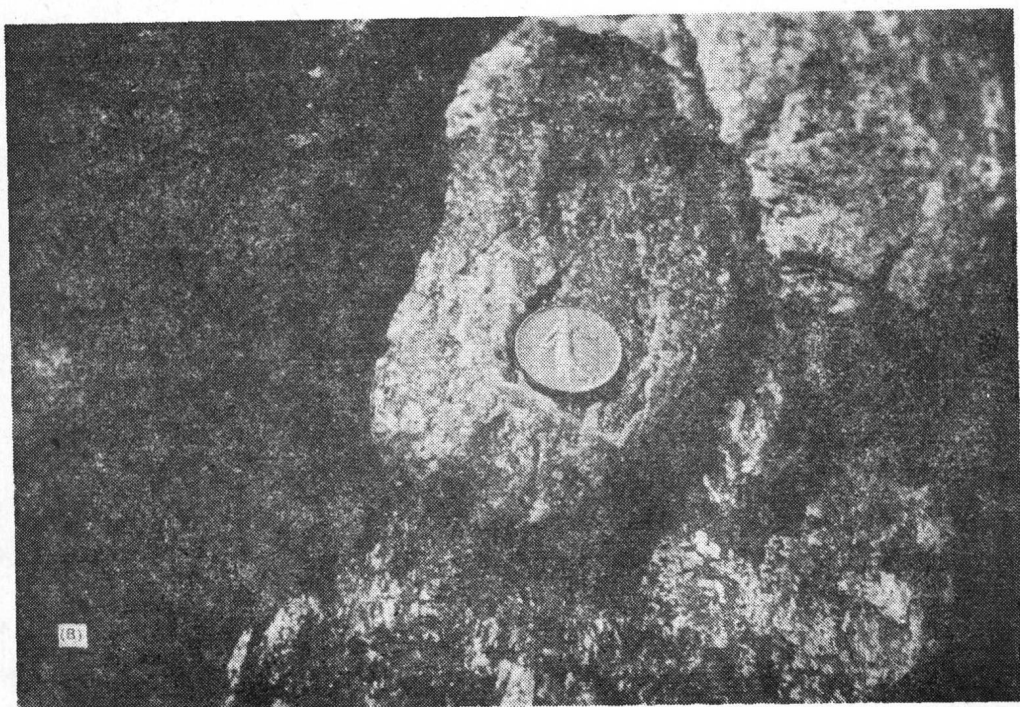


图 15.5 (A) 断面上的眼球状褶皱，挪威 Sokumfjell；(B) 褶皱石英脉中的鞘状褶皱，法国 Groix 岛，褶皱轴方向变化大于 130°

真正的圆柱状，称为**非圆柱状褶皱**。褶皱不能沿其轴向无限延续，必然在某个地方终止。在很多情况下，一个褶皱（或褶皱对）的终点与一个新褶皱的（或褶皱对的）起点相接。以这种方式互相接替的褶皱，称为**雁行式褶皱**（图15.6、15.7）。雁行式褶皱的终端都是非圆柱状的。有时，褶皱接近于数学定义的圆锥状（由一条线通过一固定点的移动而生成的面）。近似**圆锥状褶皱**是可以找到的（Wilson, 1967），然而褶皱层的形态比数学上真正的圆锥形通常要复杂得多。

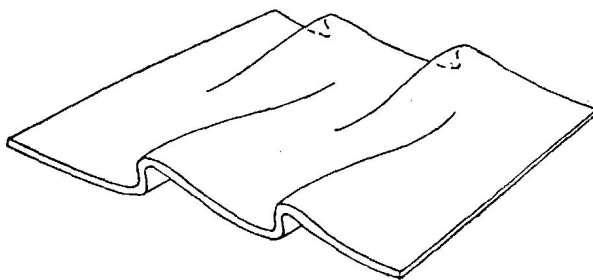


图 15.6 互相接替成雁行状的褶皱

在褶皱面上一般有一条地形位置上最高和最低的线，分别被称作**脊线**和**槽线**（图15.1的*c*线和*t*线）。与枢纽线不同，这些线在褶皱面上不是固定不变的，而是随着褶皱波相对于地表的方向而定。

褶皱的规模

褶皱规模的变化范围很大，往往需要用适当方式表示其大小。在一般性描述中，用常

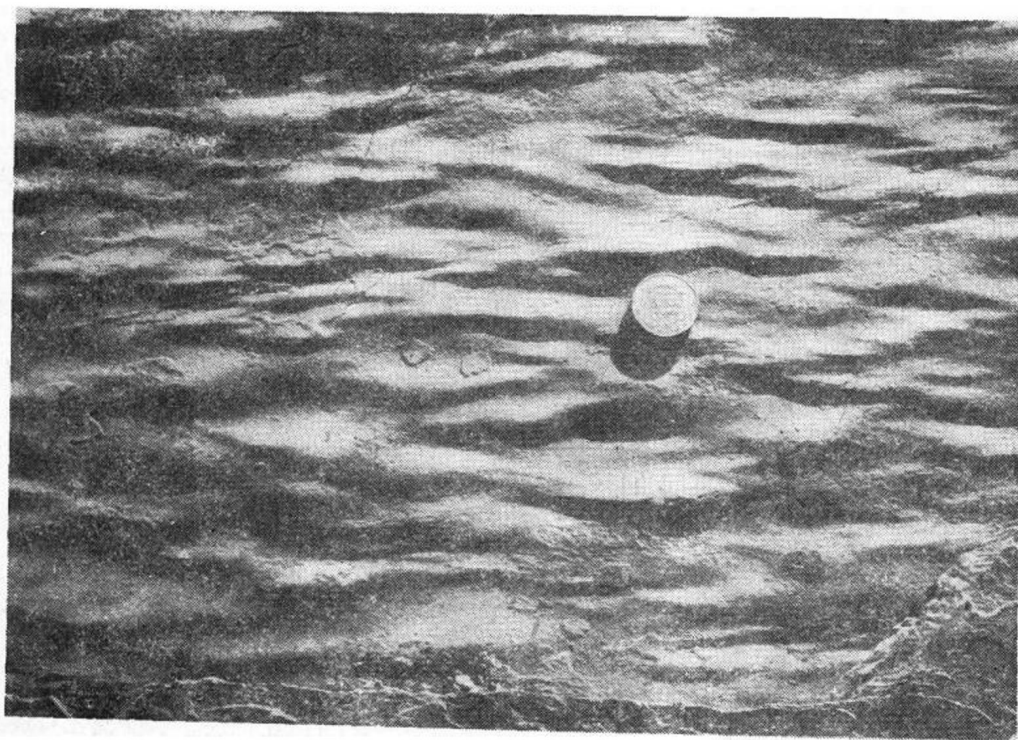


图 15.7 复理石粉砂岩表面的褶皱，显示复杂的接替关系
（瑞士，外赫尔文特推覆体）

用的米制名词（如km、dam（十米）、mm）描绘出图像可能比较方便。为了更精确的描述，需要用波长和波幅的数学概念。如果褶皱岩石表现为简单正弦波式有规则的几何性质，则应用这种概念是没有问题的，但是天然褶皱并没有这种对称性和周期性的规律。每