

地球动力学

——连续介质物理在地质问题上的应用

〔美〕D. L. 特科特 G. 舒伯特 著

地震出版社

地球动力学

连续介质物理在地质问题上的应用

〔美〕 D. L. 特科特 G. 舒伯特 著

地震出版社

1986

内 容 提 要

运用物理数学方法解释地质学中各种有关过程和机制,是当今地质学向定量发展的主要方向之一。这本书深入浅出,用连续介质物理方法阐明了地球岩石圈的力学、热学、重力等方面的作用及其引起的各种与板块构造有关的现象;为地球物理、地质等学科科技人员进行科研及知识更新的参考书。

GEODYNAMICS

Applications of Continuum Physics to Geological Problems

D. L. Turcotte G. Schubert

John Wiley & Sons

1982 New York

地 球 动 力 学

连续介质物理在地质问题上的应用

〔美〕D. L. 特科特 G. 舒伯特 著

韩贝传 詹贤鋈 等译

李继亮 李文范 校

责任编辑:陈焕新

地 球 动 力 学 出 版

北京复兴路63号

广 益 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

787×1092 1/16 27.25 印张 690 千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数 0001—1650

统一书号: 13180·342 定价: 6.40元

序 言

这本教科书讨论了理解板块构造和各种地质现象所必需的基本物理过程。我们认为这种讨论材料的题目叫地球动力学是合适的。本书内容涉及康奈尔大学和加州大学洛杉矶分校为具有地质学、地球物理学、物理学、数学、化学和工程学等学科广泛知识背景的学生所开设的一系列课程。学生水平可以从高年级大学生到研究生。

在各种情况下，我们都只提示那些数学复杂性最小的材料来讨论。我们没有介绍数学概念，除非它们是了解物理原理必不可少的。例如，我们讨论弹性和流体力学避免引入或使用张量。我们不认为张量概念是理解这些问题或处理大多数地质问题所必需的。然而，解偏微分方程是本书的基本部分。涉及到热传导以及固体和流体力学的许多地质问题要求解这种经典的偏微分方程，如拉普拉斯方程、泊松方程、重调合方程和扩散方程。所有这些方程都是由它们所用于解决的、地质关系的本质源出的。我们对物质的固态粘性、热膨胀系数、比热和渗透率这样一类物理性质提供了基本解释。在研究热传递、牛顿和非牛顿流体行为、弹性薄板的弯曲、断层力学行为和重力异常解释时，强调了有关的基本概念。因而，预期学生将完全理解虎克弹性定律、傅里叶热传导定律、多孔介质中液体流动的达西定律之类的基本物理定律。

习题是本书的一个组成部分。只有通过解大量习题才能充分理解基本的物理原理。对于所附习题，书中有选择地提供了答案。

第一章评述板块构造，其目的在于向学物理、化学和工程的学生提供理解本书其余部分所应用的地质背景。我们希望学地质学的学生也能从这种对大量地质学、地震学和古地磁学的观察结果的概括介绍中获得裨益。由于板块构造是一个正在不断发展的课题，所以这方面的材料也应不断修正。此外，第一章还粗略概述了太阳系其它行星和卫星的地质和地球物理特征。第二章介绍应力和应变的概念，并讨论这些量在地壳中的测量。第三章提出线弹性的基本原理，强调讨论了弹性薄板的弯曲，并将其用于岩石圈弯曲所涉及的问题。第四章主要研究热传导及其在大陆壳以及大陆和大洋岩石圈温度研究上的应用。粗略讨论了对流引起的热传递，并用其确定地幔中的温度。此外，对地表热流源作了讨论，还研究了岩浆和喷出的熔岩流固化所涉及的一些问题。第五章给出了重力测量解释中所涉及的基本原理。第六章研究流体力学；着重讨论了地幔对流和冰期后回跳的有关问题。第七章研究岩石流变、岩石在外力作用下变形或流动的方式，从微观角度讨论了变形的基本过程。第八章讨论断裂的力学性质，特别研究了沿圣安德烈斯断层的位移观测结果。最后，第九章讨论多孔介质中流体流动的基本原理；这是一个已在洋壳和大陆地热区的热水循环中找到应用的课题。

本书的内容旨在提供一学年的教材。为了实现这个目标，地球动力学的一些重要方面不得不割爱。特别是，地震学的基本原理没有包括进去，因而，没有讨论波动方程和它的解。许多地震学研究为地球动力学过程提供了重要的相关资料。例如：(1) 地球密度的径向分布是根据地震波速度的径向剖面推断的；(2) 关于板块边界位置和下降板块在海沟中的位置的重要信息是由震中的精确位置提供的；(3) 大陆壳的构造细节是通过人工地震反射剖面测量

得到的。因此，要充分讨论地震学，本书的篇幅必须大大增加。幸而，这方面已有许多出色的教科书。

地磁场的时空变化的综合研究也不在本书研究范围内。第一章对与古地磁观测有关的地磁场作了简短讨论，但没有进一步研究地磁场的生成机制。

在写作本书时，必须作出几个棘手的决定。一个是单位的选择；我们自始至终都使用的是 SI 单位，因为我们感到在地质学和地球物理学中存在一种使用 SI 单位的强大趋势。不过，我们知道许多 cgs 单位也在广泛使用，如对热流使用 $\mu\text{cal cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，对应力用千巴，对重力异常用毫伽。为此，我们在 SI 单位后的括号中常常写出相当的 cgs 单位，如 MPa（千巴）。另一个决定涉及到原始著作的援引。我们认为，在一本基础教科书中罗列大量参考文献是不适宜的。在第一章关于板块构造和大陆漂移的历史简述中，我们已对那些对这个理论的发展作出主要贡献的个人给予了应有的评价。另外，对资料提供了参考文献。在每章末尾给出了推荐的读物。这些读物许多是教科书和参考书，有些是评论文章。总之，目的都是为这一章提供背景材料或扩展其内容。

我们的许多同事读过本书各种底稿的全部或某些部分。我们感谢 Jack Bird, Peter Bird, Muawia Barazangi, Allan Cox, Walter Elsasser, Robert Kay, Suzanne Kay, Mark Langseth, Bruce Marsh, Jay Melosh, John Rundle, Sean Solomon, David Stevenson, Ken Torrance 和 David Yuen 等人作出的贡献。我们特别要感谢 Ron Oxburgh 对我们的工作作出的贡献和 Tanya Harter 为我们准备的出色的打字稿。

Donald L. Turcotte

Gerald Schubert

译者的话

板块构造是近年来最为流行的大地构造学说之一。该学说的重要特点之一就是从发生、发展和消亡的全过程来统一阐述全球规模的构造运动,并把浅部构造现象和深部的物理过程紧密联系在一起,从而把大地构造学说建立在更加坚实的基础之上。

长期以来,地质学一直是定性描述的一门学科。现代科学的飞速发展和边缘学科的大量涌现,使人们有可能使地质学这门古老的学科逐步走向定量化。板块学说的出现架起了构造地质学通往定量化的桥梁。Donald L. Turcotte 和 Gerald Schubert 所著的 *Geodynamics* 一书正是从定量的角度上研究板块构造的一部专著。该书内容广泛、理论性强、思路清晰、结构严谨,涉及到连续介质物理的各个方面,如热传导理论、弹性理论、塑性理论、流变学、流体力学等;并运用这些理论对大量的构造地质现象作出解释,对板块构造的动力过程提供了可靠的论据。书中每一章后面都附有习题,同时还列出并介绍了大量的参考书,这样就给读者打开了更广阔的思路。

随着电子计算机的发展与各种数值计算理论的不完善,已使人们有可能用近似方法对一种极复杂的地质现象作出数学模拟。本书未涉及这一方面的内容,为一欠缺,但仍不失为一本水平较高的好书。故我们将其翻译出来供大家参考。

本书第一章由贺翼译,第二章和第七章由韩贝传译,第三章由吴海威译,第四章由高玉芬译,第五章由詹贤鏊译,第六章由王晓春、王信和译,第八章由张绍宗译,第九章由王晓春译。全书由李继亮和李文范校。

目 录

第一章 板块构造	(1)
1-1 引言	(1)
1-2 岩石圈	(5)
1-3 增生板块边缘	(6)
1-4 消减带	(9)
1-5 转换断层	(13)
1-6 大陆	(14)
1-7 古地磁与板块运动	(19)
1-8 三联点	(30)
1-9 威尔逊旋迴	(33)
1-10 大陆碰撞	(37)
1-11 火山和热流	(39)
1-12 地震活动和岩石圈应力状态	(47)
1-13 驱动机制	(50)
1-14 比较行星学	(51)
1-15 月球	(52)
1-16 水星	(54)
1-17 火星	(55)
1-18 火卫 1 和火卫 2	(58)
1-19 金星	(59)
1-20 伽利略卫星	(61)
第二章 固体中的应力和应变	(65)
2-1 引言	(65)
2-2 体力和面力	(65)
2-3 平面应力	(70)
2-4 三维应力	(74)
2-5 行星深部的压力	(76)
2-6 应力测量	(77)
2-7 应变的基本概念	(79)
2-8 应变测量	(87)
第三章 弹性和弯曲	(94)
3-1 引言	(94)

3-2	线弹性	(95)
3-3	单轴应力	(96)
3-4	单轴应变	(98)
3-5	平面应力	(99)
3-6	平面应变	(100)
3-7	纯剪切和简单剪切	(101)
3-8	均匀应力	(102)
3-9	二维弯曲或平板挠曲	(102)
3-10	在外加力矩和垂直载荷作用下板的弯曲	(106)
3-11	水平载荷作用下板的屈曲	(109)
3-12	火成侵入体上覆地层的变形	(110)
3-13	在地球岩石圈研究中的应用	(111)
3-14	周期性载荷	(113)
3-15	端载荷作用下地球岩石圈的稳定性	(114)
3-16	岛链载荷作用下弹性岩石圈的弯曲	(115)
3-17	海沟处弹性岩石圈的弯曲	(119)
3-18	弯曲与沉积盆地的构造	(122)

第四章 热传递..... (125)

4-1	引言	(125)
4-2	热传导的傅里叶定律	(125)
4-3	地球表面的热流测量	(126)
4-4	地球的表面热流	(128)
4-5	由放射性元素衰变而产生的热	(129)
4-6	具有体热产生的一维稳态热传导	(132)
4-7	地幔的传导温度剖面	(134)
4-8	大陆地热	(136)
4-9	球或球壳的径向热传导	(138)
4-10	月球内的温度	(140)
4-11	稳态二维和三维热传导	(141)
4-12	由于表面温度和地形的周期变化引起的地下温度的变化	(142)
4-13	和时间有关的一维热传导	(144)
4-14	半无限半空间的周期热: 地下温度的日变化和季节变化	(146)
4-15	半无限半空间的瞬时加热或冷却	(149)
4-16	大洋岩石圈的冷却	(154)
4-17	斯蒂芬问题	(158)
4-18	岩墙和岩床的固结作用	(162)
4-19	运动介质中的热传导方程: 侵蚀和沉积作用的热效应	(165)
4-20	在无限区域中的一维非稳态热传导	(166)

4-21	热应力·····	(169)
4-22	洋底地貌·····	(172)
4-23	海平面的变化·····	(174)
4-24	沉积盆地的热历史和沉降历史·····	(176)
4-25	由恒定表面热流加热或冷却的半无限半空间·····	(178)
4-26	断层上的摩擦热: 沉降板块表面上的岛弧火山作用和熔融作用·····	(179)
4-27	地幔地热和绝热线·····	(181)
4-28	被消滅的岩石圈的热结构·····	(185)
第五章 重力·····		(188)
5-1	引言·····	(188)
5-2	旋转畸变地球的外部重力加速度·····	(188)
5-3	离心加速度和重力加速度·····	(194)
5-4	引力势和大地水准面·····	(194)
5-5	惯性矩·····	(200)
5-6	地表重力异常·····	(203)
5-7	布格重力公式·····	(206)
5-8	重力资料的处理·····	(207)
5-9	补偿·····	(208)
5-10	周期性质量分布的地表重力场·····	(209)
5-11	岩石圈弯曲引起的补偿·····	(210)
5-12	均衡大地水准面异常·····	(212)
5-13	补偿模型和所观察到的大地水准面异常·····	(214)
第六章 流体力学·····		(220)
6-1	引言·····	(220)
6-2	一维槽状流·····	(220)
6-3	软流圈的反向流动·····	(224)
6-4	管道流·····	(226)
6-5	承压含水层的水流·····	(228)
6-6	通过火山管的岩流·····	(229)
6-7	在二维情况下的流体守恒·····	(229)
6-8	二维情况下的单元力平衡·····	(230)
6-9	流函数·····	(233)
6-10	冰期后回跳·····	(234)
6-11	俯冲角度·····	(238)
6-12	底辟作用·····	(241)
6-13	褶皱作用·····	(247)
6-14	斯托克斯流·····	(253)

6-15	具有热补充的管道流·····	(258)
6-16	热泉的含水层模式·····	(261)
6-17	热对流·····	(263)
6-18	底部加热流体层热对流开始的线性稳定性分析·····	(265)
6-19	有限振幅热对流的边界层理论·····	(270)
6-20	板块构造的驱动力·····	(276)
6-21	粘性耗散引起的加热作用·····	(279)
第七章 岩石流变 ·····		(284)
7-1	引言 ·····	(284)
7-2	弹性 ·····	(289)
7-3	扩散蠕变 ·····	(293)
7-4	位错蠕变 ·····	(302)
7-5	具有依赖于温度和应力的流变性质的流体的剪切流动 ·····	(307)
7-6	地幔流变 ·····	(315)
7-7	地幔对流的流变效应 ·····	(319)
7-8	地幔对流和地球的冷却 ·····	(321)
7-9	地壳流变 ·····	(324)
7-10	粘弹性·····	(327)
7-11	弹性-理想塑性性质 ·····	(330)
第八章 断裂作用 ·····		(338)
8-1	引言 ·····	(338)
8-2	断层的分类 ·····	(338)
8-3	断层的摩擦 ·····	(341)
8-4	断层作用的安德森(Anderson)理论 ·····	(343)
8-5	冲断片和重力滑动 ·····	(346)
8-6	粘滑和弹性回跳 ·····	(349)
8-7	圣安德烈斯断层 ·····	(351)
8-8	北安纳托利亚断层 ·····	(353)
8-9	走滑断层作用的一些弹性解 ·····	(355)
8-10	应力扩散·····	(362)
8-11	断层的热活化蠕变·····	(364)
第九章 流体在多孔介质中的渗透 ·····		(370)
9-1	引言 ·····	(370)
9-2	达西定律 ·····	(307)
9-3	渗透模型 ·····	(372)
9-4	承压含水层中的渗流 ·····	(373)

9-5 水在非承压含水层中的渗透	(375)
9-6 火山的几何形态	(386)
9-7 孔隙介质中流体渗流的质量、动量和能量守恒方程	(388)
9-8 在孔隙介质中的一维热对流	(389)
9-9 孔隙层中的热对流	(391)
9-10 在流体饱和的孔隙介质中的地热柱	(395)
9-11 岩浆运移问题的孔隙渗流模型	(402)
9-12 两相态对流	(406)
附录 1 符号与单位	(411)
附录 2 物理常数和性质	(415)
习题答案	(419)

第一章 板 块 构 造

1-1 引 言

板块构造是一种构造模式。它把地球外壳划分为若干个彼此间相对运动的刚性板块。板块运动的相对速度是每年几十毫米。大部分地震、火山喷发和造山运动都发生在板块的边界上。主要的表面板块的分布如图 1-1。

板块主要是由相对冷的岩石组成的，其平均厚度约为 100 公里。板块在不断地新生与消亡。在大洋中脊处，相邻的板块彼此分离，这种过程被称为“海底扩张”。当相邻板块彼此分离时，热的地幔岩石上升，将间隙充填起来。由于固态蠕变作用，这种热的固态地幔岩石表现出类似流体的习性。当这种热的地幔岩石冷却时，便变成刚性的，并增置在板块上，增大了板块的面积。因此大洋中脊也叫作增生板块边界。全球的洋脊系由图 1-1 的粗黑线表示出来。

由于地表面积基本上恒定不变，所以必须有一种板块消亡的补偿过程，这种过程发生在海沟处。板块在这里弯曲并下沉到地球内部去。这种过程称作消减作用。在大洋海沟处，两个相邻的板块会聚在一起，而且一个板块下沉到另一个板块下面，因此，海沟也被称为会聚板块边界。全球的海沟分布如图 1-1 所示，由带三角符号的线表示出来，尖角指向消减的方向。

一个曲型板块的产生与消亡的横剖面如图 1-2 所示。地球内部组成板块的那一部分称为岩石圈。构成岩石圈的岩石是相对冷的和刚性的，因此，当板块在地表运动时，其内部并没有明显的变形。当板块离开洋脊运动时，逐渐变冷与变厚。岩石圈之下的固态岩石是相当热的，足以使得它们能够自由变形。这些岩石组成了岩石圈之下的软流圈。岩石圈在软流圈上滑动，只受到相当小的阻力。

随着岩石圈的岩石变冷，由于热收缩作用它们的密度增大。因此，岩石圈相对于下面的热的软流圈在重力上是不稳定的。由于这种负的浮力，在大洋海沟处，岩石圈弯曲并下沉到地球内部中去。大的断层将下沉的岩石圈与上覆的岩石圈分开。这些断层也是大部分大地震发生的地点。1960 年的智利大地震和 1964 年的阿拉斯加大地震就是两个实例。这些都是现代地震仪使用以来发生的最大地震。依据岩石圈的冷的脆性岩石中发生的地震可以精确地确定下沉岩石圈的位置。这种与消减作用伴生的平面状地震带被称为贝尼奥夫带。

活火山线状分布带几乎平行于所有的大洋海沟。这些火山大约在下沉岩石圈之上 150 公里的地方出现。如果这些火山出现在海底上，它们便构成了岛弧，北太平洋中的阿留申群岛便是一个典型实例。图 1-3 中的阿留申弧的三个火山群岛的照片描绘了这些火山带的明显的线性特点。如果海沟邻近大陆，则火山从陆地上生长起来。这是美国西部的情况，这里火山线从北面的贝克山延伸到南边的沙斯塔山。1980 年强烈爆发的圣海伦斯火山，构成了这条火山线的一个组成部分。

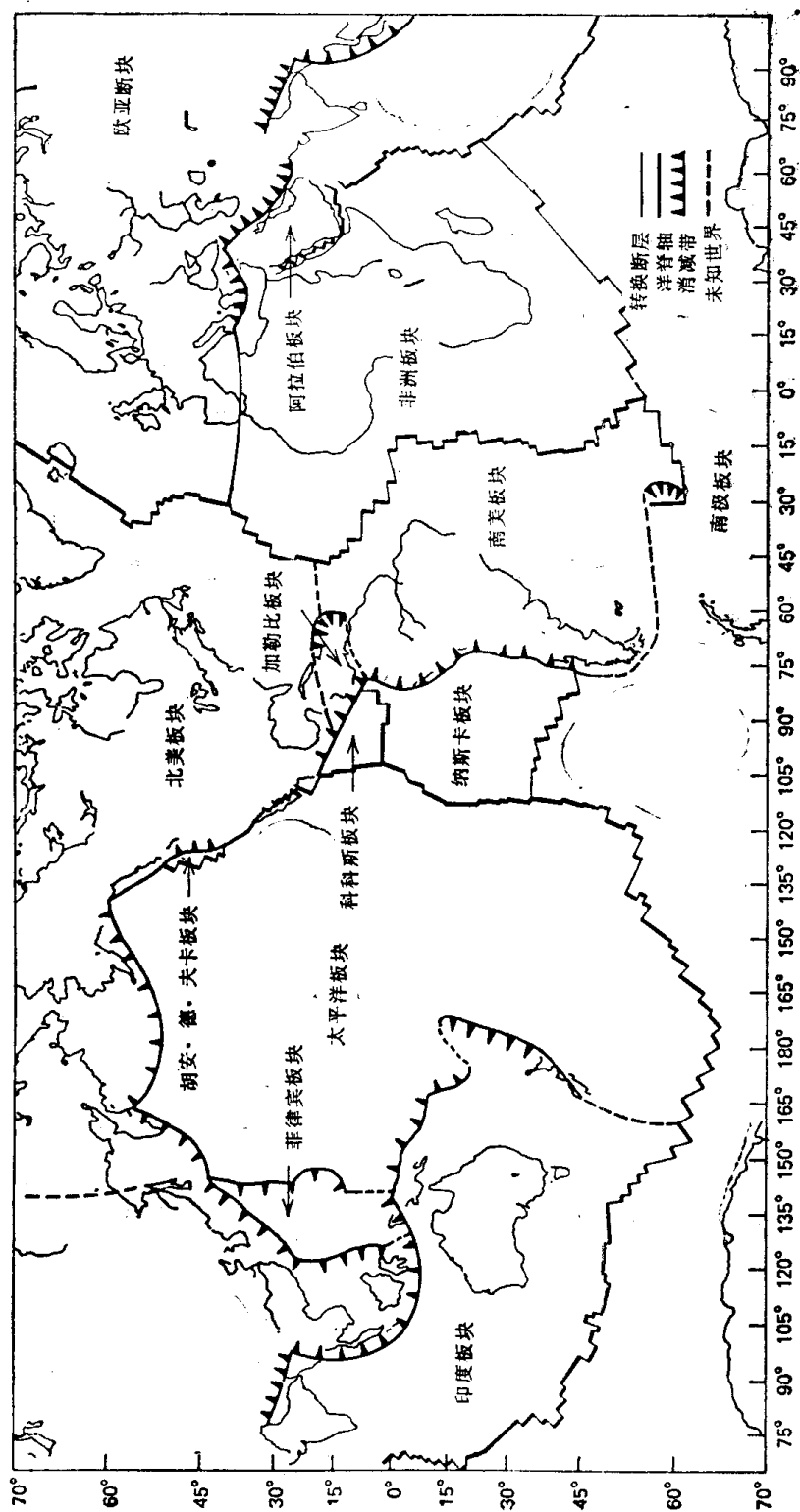


图 1-1 主要表面板块的分布

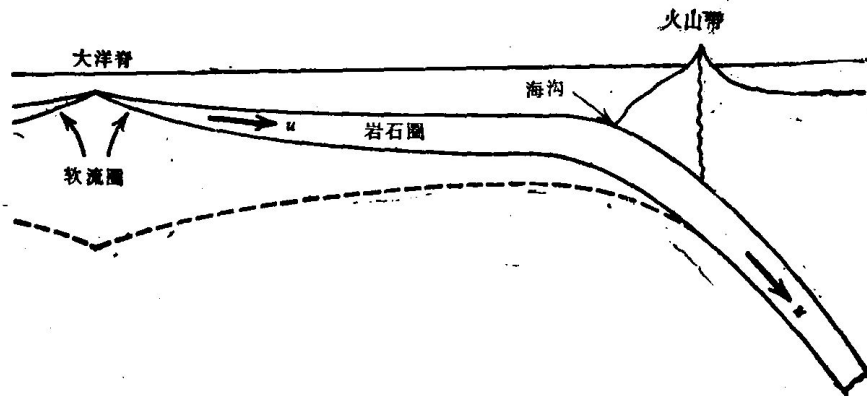


图 1-2 岩石圈在洋脊处的增生和大洋海沟处的消减。
岩石圈之下的软流圈也表示出来

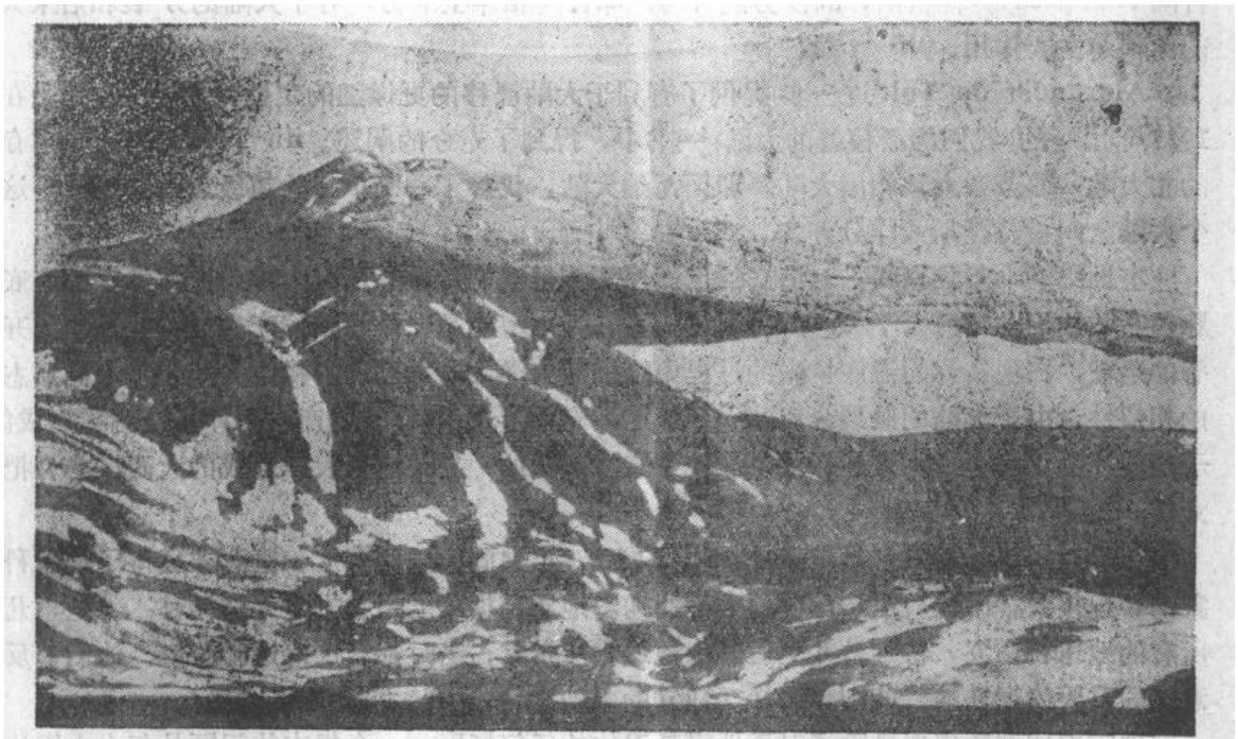


图 1-3 从阿留申群岛的埃达克岛之莫菲特山向东拍摄的照片。在前部显示出埃达格达特火山，远处是大希特金火山(照片刊登蒙 Bruce Marsh 允许)

地球表面分为大陆和大洋。大洋的平均深度大约为 5 公里，陆地则高于海平面。这种高程差别的原因是地壳厚度的不同。地壳岩石与其下面的地幔岩石有着不同的成分，而且密度也较小。因此，相对于较重的地幔岩石来说，地壳岩石在重力上是稳定的。在地壳和地幔之间通常有一个明确的分界面，称作莫霍洛维奇间断面，或称莫霍面。大洋壳的典型厚度是 6 公里，而大陆壳的典型厚度是 35 公里。虽然大洋壳重力上是稳定的，但它相当薄，因而不足以阻止重力上不稳定的大洋岩石圈的消减。大洋岩石圈由于在洋脊处增生、在海沟处消减而不断地循环。由于这种循环，大洋底的平均年龄为 10^2 百万年。

另一方面，大陆壳有足够的厚度而且重力上是稳定的，以致在大洋海沟处不发生消减。因此，大陆壳的平均年龄约为 10^3 百万年，要比大洋壳岩石老得多。当岩石圈板块通过地球

表面运动时,便携带着大陆一起运动。大陆的这种相对运动称之为大陆漂移。

导致板块构造的发展历史,很大一部分都关注大陆漂移假说的可靠性,关心地质时期中大陆相对位置的变化。早在1620年,Francis Bacon便注意到非洲西海岸和南美洲东海岸在形态上的相似性。这种“吻合”曾导致许多作者推测这两个大陆可能曾经连在一起过。大陆漂移假说的详细说明是由Frank B. Taylor于1910年提出的。1912年,A. Wegener开始进一步发展这一假说,并且在他的《大陆与海洋的成因》一书中作了概括。作为气象学家,Wegener对于在赤道地区曾发生过的冰川作用,以及同一时期在高纬度地区曾流行过的气候条件的观察结果特别感兴趣。这种现象本身可以用“极移”、即没有其他地表形变的旋转轴漂移来作解释。Wegener也提供了大陆曾经连在一起的许多定性的论据。除了观察到的大陆边缘的吻合之外,这些证据主要包括地质区的一致性,诸如残留山脉之类的构造特征的连续性,以及化石类型的相符合。Wegener论证了先前曾存在过一个单一的超级大陆,即联合古陆(Pangaea)。他指出,潮汐力或者与地球自转相伴生的力,对于大陆的分裂和后来大陆的漂移起主要作用。

Alexander du Toit进一步提供了有利于大陆漂移的更详细的定性论证,特别是在他1937年出版的《我们的漂移着的大陆》一书中,得到了充分的阐述。du Toit论证了先前存在的北大陆,即劳亚大陆和南大陆,即冈瓦纳大陆,代替了一个单一的超级大陆的提法,这两个大陆之间被特提斯大洋分开。

本世纪五十年代期间,对海底的广泛探测使得我们对世界范围内称为大洋中脊的海底山脉提高了认识。1961年,H. Hess提出假说,指出海底是在洋脊轴部产生的,并且作离开中脊的运动,在现在称为海底扩张的过程中形成了大洋。这种过程解释了大陆边缘之间形态上的相似性。由于大陆的破裂分离,一个新的洋脊便形成了。洋脊处产生的洋底是对称形成的。于是便产生了一个新的大洋。大西洋就是这样形成的;导致这个大洋形成的大西洋中脊把该大洋一分为二。

但是,应该认识到,只是在1967年和1970年之间大陆漂移这一概念才赢得了地球科学家的普遍接受。以往,虽然可信的定性的初步地质论据早已用来支持大陆漂移。但是,几乎所有的地球科学家,特别是几乎所有的地球物理学家,当时都曾反对这种假说。他们的反对意见的重要依据是地幔的刚性和缺乏适宜的驱动力。

地震剪切波的传播排除了对于地幔是固体的任何怀疑,一个根本的问题是怎么由固体岩石来调整数千公里的水平位移,十九世纪后期已经由重力研究普遍地确定了地幔的类似流体的性质。测量表明,山脉具有低密度的山根。这种低密度的山根提供了一种负的相对质量,它几乎等于山脉的正的质量。如果地幔具有流体性质的话,这种山根现象便可以用流体静力平衡原理来解释。山脉看起来象是漂在水上的木块。

1935年Haskell定量地确定了地幔的流体性质。斯堪的纳维亚海滨阶地的高程的研究表明,在失去了最近一次冰期的冰负载之后,地面仍在不断回升之中。如果把地幔当作粘性流体处理,只要它具有大约 10^{20} Pas 10^{21} P的粘度,Haskell便可以解释斯堪的纳维亚现在的上升隆起(注意,这本书中采用了SI制单位,不过在许多情下在括号里给出了cgs制单位的数值。关于单位制的详细情况在附录1中向读者提供出来)。虽然这是很大的粘度值(水的粘度是 10^{-3} Pas 秒),在很长的地质时代中它还是导致了地幔的流体性质。

在本世纪五十年代,对结晶物质的很缓慢的蠕动建立了几种机制。这种蠕动导致了流体

性质。1965年, R. B. Gordon 指出, 固态蠕变定量地解释了由冰期后的回升观测所确定的粘度。如果温度达到了熔融温度的一个较大的分数值, 那么, 热激活蠕变过程便允许地幔岩石在大于 10^{-2} 百万年的时间尺度上以低的应力水平进行流动。刚性的岩石圈则包括了足够冷的岩石, 在如此长的时间尺度内足以阻止蠕变的发生。

为了使板块运动, 必须有力作用于岩石圈上。Wegener 提出, 要么是潮汐力 要么是与地球自转相伴生的力引起了导致大陆漂移的运动。然而, 在本世纪二十年代, H. Jeffreys 爵士在他的《地球》一书中概括地指出, 这些力是不够的。人们不得不去找寻另外一些驱动板块的机制。任何一种合理的机制都必须有足够的能量, 以便提供地震, 火山以及造山作用所消耗的能量。1931年, A. Holmes 提出如下假说: 热对流能够驱动地幔的对流和大陆漂移。如果一种流体被从下面或从内部加热, 并且在重力场存在的情况下从上面受到冷却, 它便成为重力上不稳定的, 于是, 热对流就可发生。在深处的热的地幔岩石, 相对于岩石圈中较冷的密度较大的岩石来说, 是重力上不稳定的。其结果便导致热对流, 在这种对流过程中, 较冷的岩石下沉到地幔中去, 而较热的岩石则上升到地表。在洋脊处地幔物质的上升和在大洋海沟处岩石圈下沉到地幔中去, 即是这种过程的一部分。地幔正在受到放射性同位素铀 ^{235}U 、铀 ^{238}U 、钍 ^{232}Th 和钾 ^{40}K 的衰变作用的加热。

在六十年代, 一些支持大陆漂移的独立观测资料来自古地磁研究。当岩石形成时, 这时的地球磁场能够使这种岩石得到永久磁化。这种磁场的方位的研究能够确定自从岩石形成以来岩石相对于磁极的运动。在一个单独的板块中不曾受到局部变形作用的岩石, 相对于地磁极表现出相同的位置。1956年, K. Runcorn 指出, 北美洲和欧洲的岩石给出了相对地磁极不同的位置。他得出了这样的结论: 这种不同是由这两个大陆之间的大陆漂移造成的。

古地磁研究也表明地球磁场曾经受过一幕幕的倒转。大洋磁场的观测表明那里有磁异常规则条带图型(磁异常指的是一个地区的磁场高于或者低于平均磁场值), 这些条带都平行于大洋脊。1963年, F. Vige 和 D. Mathews 将磁异常条带图型的边线与磁场倒转时间进行对比, 从而能够得出海底扩张速率的定量数值。

在六十年代晚期, 已经确立了对于大陆漂移的地质现象和过程的综合理解的总格架。板块构造的基本假说, 由 J. Morgan 在 1968 年提出。各个刚性板块彼此之间相对运动的镶嵌结构概念是地幔热对流的必然结果。几乎所有的地震、火山和造山作用现在都可以归因于岩石圈板块在其边界处的相互作用。大陆漂移乃是板块构造的一个固有的组成部分。当板块在地表运动时, 便携带着大陆一起运移。

习题 1-1 如果大洋地壳的面积是 $3.2 \times 10^8 \text{ km}^2$, 新的海底现在正以 $2.8 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ 的速度增生, 假定在过去海底增生的速度是不变的, 那么大洋地壳的平均年龄是多少?

1-2 岩石圈

板块构造的一个基本特点是, 只有地球的外壳, 即岩石圈, 在地质时期中保持刚性。由于具低的温度, 岩石圈中的岩石在 10^3 百万年的时间尺度内没有发生显著的变形。岩石圈之下的岩石是足够热的, 因此能够发生固态蠕变。这种蠕变导致了在地质时间尺度上的类似流体的习性。

岩石圈的下部边界由一个等温面(温度恒定的面)决定。该等温面的典型数值是 1600 K

($\sim 1300^{\circ}\text{C}$)。在此等温面之上的岩石是足够冷的,因而表现出刚性,而位于等温面之下的岩石是足够热的,以致容易发生变形。在大洋盆地下面。岩石圈的厚度约为 100 公里;而大陆岩石圈的厚度大约是这个厚度值的二倍。由于岩石圈厚度大约等于地球半径的 2% 到 4%,因此它只是一个薄壳。这个薄壳破裂成若干彼此相对运动的板块。但是,岩石圈的刚性使得板块内部不发生显著的变形。

岩石圈的刚性允许板块在地质时期中传递弹性应力。施加在板块边界上的应力能够通过板块内部进行传递。板块能长距离传递应力的能力对于板块构造的驱动机制有重要的意义。

岩石圈的刚性允许它受到载荷时发生弯曲。一种实例是火山岛施加的载荷。夏威夷群岛的载荷引起岩石圈在载荷周围向下弯曲,导致群岛周围出现一个水深较大的地区。岩石圈在垂向载荷下的弹性弯曲也可以解释大洋海沟和一些沉积盆地的构造。

但是,并非整个岩石圈都有效地传递弹性应力。大致只有上半部有足够的刚性,足以使得在 10^3 百万年的时间尺度内弹性应力不出现弛豫。岩石圈的这一部分被称为弹性岩石圈。在岩石圈的下部较热部分,固态蠕变过程使得应力出现弛豫现象。

1-3 增生板块边缘

岩石圈板块在大洋脊处产生出来。洋脊两侧的两个板块以每年几十毫米的近于恒等的速度作彼此远离的运动。当两个板块分离时,热的地幔岩石向上流动,以便充填空隙。上涌的地幔岩石由于传导热向地表散失而冷却。冷却的岩石增生在正在扩张的板块底部,成为这些板块的一个组成部分;图 1-4 表示出一个增生板块边缘的构造情况。

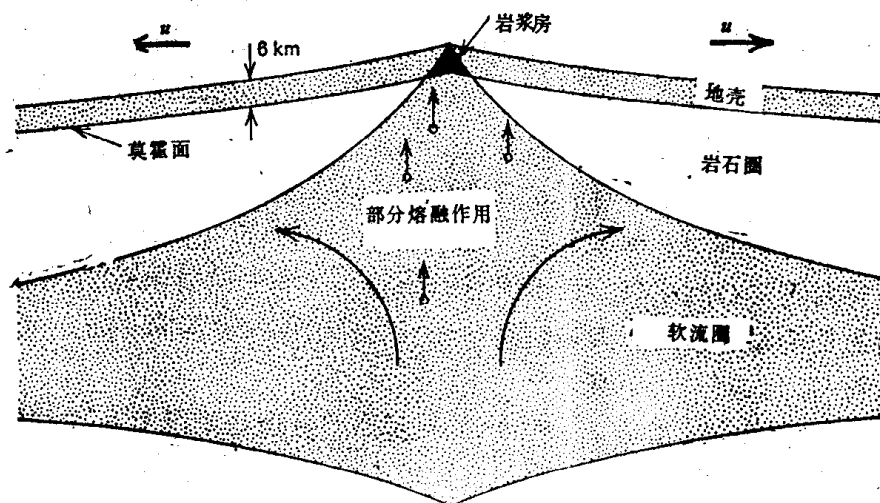


图 1-4 洋脊处的增生板块边缘

当板块远离洋脊运动时,它们继续冷却并变厚。作为距洋脊脊线距离的函数的洋脊高程,可以用岩石圈温度分布来解释。当岩石圈冷却时,密度变得越来越大;因此它向下沉入下伏地幔岩石中。洋脊的地貌高程是由于脊线处增生轴附近较薄较热的岩石圈的较大浮力造成的。洋脊的高程也为板块远离脊线的运动提供了一种体力。抬升的岩石圈的重力体力分力驱动岩石圈远离增生边界运动;它是板块的一种重要的驱动力。这种现象称为重力滑动。

洋脊是地球上大部分火山活动的地方。由于几乎全部洋脊体系都位于水下,所以只有一