

5529  
2493

地球构造圈

DI QIU DE  
GOU ZAO LUAN

地球的构造圈

J·H·塔奇  
地质出版社

5203  
993



# 地球的构造圈

J.H.塔奇 著

张伯声 王 战 译

蒋荫昌 吴达文 校

地 质 出 版 社

## 地球的构造圈：其过去的发展及现今的性状

地球据信已经存在了46亿年，有一种单一、长期、深位、全球的驱动机制始终在起作用。据此，谨对地球的几何学、力学、热力、及化学等性状方面作一分析。

### 地球的构造圈

J. H. 塔奇 著

张伯声 王战 译

蒋荫昌 吴达文 校

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑：吴达文

地质出版社出版

（北京西四）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>印张：16<sup>3</sup>/<sub>8</sub>字数：384,000  
1984年8月北京第一版·1984年8月北京第一次印刷  
印数：1—4,710册 定价：3.85元  
统一书号：15038·新1060

## 译 者 的 话

关于地球的形成及其发展历史，中外地质学者提出过不少假说，而J. H. 塔奇所论的“构造圈式地球模式”可说是选料丰富，立论新颖。他吸取了许多有关地学、天文学、数学、物理学、化学等自然科学知识，分析了地球的形成及其地质发展的历史，解说了目前地壳构造的格局。他在本书中提出的论点，一反过去学说的意见，认为：作为太阳派生的原始地球和原始月球，最初是在近似的轨道上运转的；它们的大小差别并不像现在的地球和月球这样大；由于运动速度的差异，当原始月球在接近地球时分裂为八个八分体，其中的五个为原始地球吸引归并，成为地球，其余三个远离地球结合成为月球；被俘的几个“原始月块”形成地球的外圈，部份成为地壳；撞入地球的这些“原始月块”，在软流圈之上作有规律的迁移。历史的和目前的地壳结构、构造运动、地史发展以及与这些相关的特点，均受这种“构造圈式地球模式”的制约。因而，就“构造圈式地球模式”的论点来说，关于地球的形式和发展问题，是从太阳系内的天体力学演化过程和物质的自身属性上去寻求答案的。它对地球上的一切现象的探讨，自始至终都离不开原始月球的五个八分体同原始地球的结合及其结合后的相对运动的发展历史，一直追溯到已知地球的36—46亿年的过去。J. H. 塔奇正视“简单的板块构造说”所认为的“地壳板块“在地球上特大距离的“漂移”，但认为它们的移动漂而有序，移而不乱。

这本书在草译之后，由王战同志对照原文仔细复核一次，修正和增补了不少疏漏之处，并由魏岗峰、吴文奎二同志协助抄写校阅，特致谢忱。

张伯声

## 第二版序言

汉堡的科彭 (Koppen) 教授在力图劝阻阿尔弗雷德·魏格纳 (Alfred Wegener) 切勿再从事关于大陆漂移假说的详细分析时，曾讲过这样一段话：“当一个人的研究课题超过这门科学传统规定的界限时，自然会受到纵非全体也是部份有关学者的怀疑，并把他视为‘外行’” (Georgi, 1962)。果然不出所料，魏格纳关于大陆漂移假说的详细分析，几乎为科学界的所有人士冷落了五十多年。

当本书初版于1972年发行时，作者曾预计它会被科学界斥为异论。但情况并未发展到所设想的程度。来自世界各地的评论一般都是鼓励性的（除了某些理论及科学团体成员的评论比那些讲实际重应用的团体成员的评论多少有些不客气之外）。而且，各界读者对初版的肯定程度，都远远超过了最理想的设想。对采用初版中所阐发的观点而相继发表的“矿床学”（1973）、“月球”（1974）、“石油矿藏”（1974）、“铜矿”（1975）、“金矿”（1975）、“铀矿”（1976）、“地热储”（1976）和“地震”（在印刷中）等八本相关的著作说来，情况也都相同。

在初版中阐述的，并在本版中又再三重复的构造圈式地球模式概念，与其它全球构造假说的概念在两个突出方面有着本质的区别：（1）它体现了据信业已生存46亿年的地球内就已存在的驱动机制的几何学、力学、热力以及化学等各个方面；并且（2）它包含整个46亿年间深达1000公里的地球时-空格架。

和初版一样，第二版也试图说明，使用这两种区别所提出的解释，如何比通过其它全球构造假说所能提出的关于地球性状的起源、演化以及对现今特征的解释要更有意义。这种解释不仅适用于地球岩石圈板块，而且也适用于过去46亿年间于地球上部1000公里内演化的所有板块、岩块及其它形态的物质。

## 初 版 序 言

本书分析的是地球上部1000公里的演化。此分析的基本前提是：认为地表构造的发展，是经过长期在严格规定的制约性条件下起着作用的地球力引起的。根据对这些地表构造的全球性分析，就能解释所设深位力的性质及其可能的起源。

在此分析中包括三重中心概念：（1）地球构造圈是一个统一的动力实体，它是自开始有地球以来，而演化到其现今的状况及性状的；（2）构造圈的演化是通过在以往46亿年间持续起着作用的单一、全球性机制激发的；以及（3）地球内部性状及构造的地表显示，就是今天存在着这种机制的证据。此概念的重要组成部份，涉及从二元原始行星假说所导出的构造圈式地球模式。

以太阳系起源及力学的基本原理为依据的这一假说，建立一个如同原生太阳系实体的构造圈式地球模式。此种模式的驱动机制所使用的两种能源，都是自原始时期以来就已存在的。它们是：（1）地球成生时的不平衡形体；及（2）热力自地球内部向地球外部的流动（还可能有挥发物的流动）。根据这一概念，这种驱动机制在过去46亿年间，就产生出目前的构造圈构造以及构造圈性状的全貌。从而，地球表面的构造正是构造圈驱动机制的显示。

本书采用多方假设的研究方法，对当前有关构造圈的性状、构造及演化的假说作出审慎的评论，并提出构造圈式地球模式，作为可供选择的工作假说，并在现行假说的薄弱、不明确表态，或未曾涉及的那些领域里，加以运用。因为此假说无论在几何学方面或是在力学方面都是统一和全球性的，并且估量到整个46亿年的时间体系，所以对过去46亿年间地球构造圈演化的大量时空域来说，这种解释都能提供解答。

本书讨论了关于在构造圈演化区域中所观察到的结果及此假说所预测的结果之间的相互关系：大陆构造与大洋构造、地震、热流、岩浆活动、造山作用以及相关的地槽发展、重力异常、地磁及极性倒转、海底扩张、大陆漂移、板块构造以及地球内部性状的其它地表显示。

# 目 录

第一章	太阳系的起源	1
第二章	地-月体系	13
第三章	构造圈式地球模式	30
第四章	作为行星的地球	40
第五章	地球的地壳	47
第六章	构造圈	52
第七章	大陆的造山-克拉通构造	67
第八章	地球的深源地震	79
第九章	地热活动的全球格局	91
第十章	侵入及喷出活动	98
第十一章	地球的形态学	106
第十二章	造山运动	109
第十三章	地球的重力场	127
第十四章	地磁与极性倒转	132
第十五章	大陆与大洋	141
第十六章	海底扩张	148
第十七章	大陆漂移与极移	155
第十八章	板块构造与相关的影响全局的过程	163
第十九章	小行星、陨石及玻陨石	171
第二十章	积成的地球及其未来	177
参考文献		180

# 第一章 太阳系的起源

地球的构造圈包括深度大约达到1000公里的地壳和上地幔。本书是通过研究全球规模的地球内部性状的地表显示，来分析地球构造圈的发展历史的。而这些显示，看来是由长期在严格规定的制约性条件下起着作用的力造成的。

例如，一座大山就暗示存在长期的径向力。海底扩张和大陆漂移意味着存在作用于全球规模的切向力。地震则涉及应力的积累，而这些应力则来自具有径向和切向分量的长期力。这些以及其它的结果都意味着，产生出地表显示的内部力都是深位的、长期的和全球性的。

大多数关于地球构造圈演化的假说，都体现出这些内部力的全球性及深位性的性质，但没有回答有关这些力已作用了多久的问题。

如果产生出地球内部性状的力，从开始有地球时就已存在，那么，太阳系演化假说应能解释这些力的性质。如果这些由某种原因引起的力，是在地球形成以后产生的，那么太阳系演化假说就应当指明它们产生的时间以及它们如何保持住它们的深位的以及全球性的特征。

为了找出这些问题及相关问题的答案，本章首先研究关于太阳系起源的演化的假说。

## 现今太阳系的简述

地球与其它行星（或许不包括冥王星）所具有的如此众多的共同特点和特征，说明它们具有共同的起源。在讨论太阳系的起源时，可以把必须加以考虑的突出共同特征概括如下：

a. 所有行星都围绕太阳旋转且其运行轨道都接近圆形，这就与常沿高度偏心的椭圆形轨道而运转的有所不同。太阳系内行星的轨道，实际上都位于大约与太阳的赤道面成 $6^\circ$ 倾斜的同一平面上。所有的行星都以同一方向围绕太阳运转，而且在同一方向上围绕其各自的轴旋转，例外的情况是天王星，它的赤道面大约以 $98^\circ$ 而倾斜，此外可能还有金星，它的旋转看来是反向的。

b. 行星到太阳的距离形成一个级数，其中，行星之间的间距随着它们到太阳的距离的增大，而以非常近似于几何级数的速度增大。这种关系是博德（Bode, 1772）发现的，它预示在火星与木星之间还存在着另一个行星。三十年以后，果然发现了这个带，不过这个带所包含的不是一个行星，而是称为小行星的一群碎片，它们可能就是一个或几个行星碎裂后的残渣。

c. 在火星与木星之间的博德间隔，把行星分为两个不同的组。类地行星（水星、金星、地球和火星）都是小而具有较大密度的、并接近于太阳。它们在其自转轴上转动较慢，且只拥有少数几个卫星。类木行星（木星、土星、天王星、海王星）都是较大且距离太阳较远的行星，它们在其自转轴上转动较快且具有许多卫星。最远的冥王星似乎与此总情况不相符合，有可能它在以前是一个其它行星的卫星。和地球一样，其它类地行星可能

贫于气体元素，但是类木行星则较富于气体，特别是甲烷、氨，还可能有氢。

d. 尽管太阳含有太阳系全部99%的质量，但它却只提供出2%的角动量，其余的98%则提供于行星，而木星却几乎提供了此数量的全部。

今天的太阳系是由太阳、九大行星（其中很多都具有庞大的卫星系统）、小行星及陨星之类的无数较小天体、一个大的彗星族、以及在太阳系主要成员之间分布的宇宙尘和气体组成的。有证据表明，我们的太阳系不是独一无二的，而是许多其它恒星也具有类似于太阳系的行星体系。因此，多年以来天文学家对于恒星的诞生都非常感兴趣，这是因为太阳系的起源所遵守的总法则，很可能与其它恒星在星球演化中所遵守的完全相同。

简单地说，大多数天文学家相信，可以把一个恒星的演化作如下描述：在星际空间中有大量气体和尘埃在运动，而且作用于气体和尘埃的各种不同的力都处于稳定平衡之中。为这种体系所设想的原始力是：（1）那些由这些质点间的万有引力所引起的力和（2）由旋转所引起的离心力。因为在空间物质总是不均匀地分布的，所以在某个阶段，可以由于在空间物质分布的普遍不均匀性原理（Tatsch, 1977e），平衡体系总要变为不平衡或被打破平衡。这样就依次发生了凝聚作用，使气体和尘埃聚集到质量体系的中心。上面所简单说明的情况，就是多数人所一致认为的一个恒星是如何产生的论点。

在天文学家们中间虽然普遍同意这一假说，并把它看作是星体形成的最佳一般假说，但对于像一个恒星怎样形成一行星体系的细节，却还没有统一的意见。从而，天文学家、物理学家、数学家曾经提出过许许多多的假说，以说明围绕着太阳的准有序的行星体系的发展。

特别是在近几百年以来，许多著名科学家都把他们的注意力，转移到太阳系的起源问题上。结果是，自18世纪中叶以来，为了说明太阳系的成因，就曾提出过三十多种假说。这些假说全都易于受到批评，并且没有一种具有全面说服力，但其中有几种看来还有几分真理性和永恒性。

没有重温这三十几种假说的必要。这里只概述一些有代表性的假说，以强调说明太阳系演变的复杂性以及将所有观测资料纳入一个单一、协调、包罗万象的假说中去的困难性。

所有的假说都有一个共同出发点，就是认为，行星的物质包含有微小的质点。这些质点必须已是固体的或气体的，或二者的结合。它们无论如何也不可能已是液态的，因为在近乎真空的空间中，液体会立即蒸发。这些质点的聚集是所有假说中的第一个阶段，而且大家都同意，在此过程中都牵涉到热。因此，当一个新形成的行星只要不能从它的表面通过辐射而快速放热时，则趋向于变热。

据上述，可以了解到这些相互矛盾的关于太阳系起源假说的根据，因为下列问题尚未确定：原始颗粒是气态的还是固态的、抑或是二者的结合？它们过去是热的还是冷的？它们是来自太阳，或者来自外界的闯入者，抑或是来自散布于整个空间的其它宇宙物质？

意义不明之处是不可避免的，这是因为无论在哪里找到的宇宙物质，其基本成分都大体相同。因此，许多争论的问题依然存在，但可把上述问题的答案归入两大范畴：（1）按均变论者的看法是，设想行星是通过一个连续不断的、缓慢的过程形成的；以及（2）按灾变论者的看法是，设想行星是由于某种非同寻常的、猛烈事件的结果形成的。以下对这两大类中的某些假说作一扼要叙述。

## 星云说

试图对有关太阳系的演化系统提出科学假说的首次尝试可追溯到1796年，在这一年法国的一位著名天文学家西蒙·拉普拉斯（Laplace, 1796）正式提出“星云说”。实际上，几乎同所有的假说一样，拉普拉斯的想法并不完全是首创的，而是早在几年之前就由一位德国哲学家，伊美路尔·康德（E. Kant）提出过的。但通常把星云说归功于拉普拉斯，因为正是拉普拉斯而不是康德，把这一思想发展成为一个足够简单明了、且能为其他科学家所领会和检验的程式、从而乐于接受并作为工作假说的缘故。

拉普拉斯认为，在太阳系的开始阶段，所有的物质都是以一团炽热而缓慢旋转的气体“星云”的形态存在的，其范围比目前最远行星的范围还要大得多。然后他提出了一些简单的物理原则，来说明原始星云如何演变成为现今的太阳系。

根据拉普拉斯的概念，当此星云向外层空间散热时，就要变冷且体积缩小。因而这会使自转速度加快；并逐渐增加在赤道面中的离心力。结果，使这个星云慢慢演变成为薄透镜体的形状。最后旋转速度会增加，使周边的离心力与引力相等。当发生这种情况时，透镜状星云就抛出一个作为气体环的边缘条带，这时星云的其余部分继续向中心收缩而远离气体环。已经脱离的气体环，以其在分离时所取得的角速度，继续围绕原来的星云旋转。然后，随同中央星云的继续收缩，就又以同样的方式脱离出第二个环，接着又分出足够多的环，使得每一行星都能有一个环。拉普拉斯进一步设想，每个环中的质点互相吸引，最后使环破裂、收缩、形成球体，而继续在环绕原先占据的轨道上运转。

这样，在星云说里，拉普拉斯所提出的简明方案，似乎能逻辑地说明于十九世纪所观察到的太阳系的全貌。特别是，这一简明方案可以说明行星轨道的间距，它们几近圆形同心的轨道，它们大致在同一个平面上旋转，卫星体系的总体结构以及太阳的余热等。然而甚至拉普拉斯自己也认识到，他的方案中还存在一定的缺点。因此他在他的一部较大的著作中，把他的假说降低到附注的地位，并介绍说，他所创立的假说不过是“一个既未经观察又未经计算而得出的结果”。尽管如此，这方案的简明性使它仍然具有一定的吸引力。事实上，这个方案所具有的感染力是如此广泛，以致星云假说的比较严重的缺点，直到一百年以后才被认识到。

星云说的最明显的缺点是，如果现今的太阳是原来星云的残留体，而且是自从最里面的行星水星形成以后，收缩到其目前的体积的，那么，现在的太阳应该是个快速旋转的，薄的透镜体，然而，一如所熟知的，太阳基本上是个球体，而且旋转缓慢。

或许说，更加关键的是太阳系的角动量问题。实际上，一个行星的角动量就是驱策行星在其轨道上前进的力。其定量近似值为：其质量及其在单位时间里所掠过的面积，与那条连接着它使之绕其旋转的引力中心之间的假想线的乘积。在这方面，罗素（Russell, 1935）证明，整个太阳系并不具备足够的角动量，以致能在太阳系演化阶段的任何时期中抛出一个环。

星云说的第三个缺点，涉及行星旋转的方向。简单说来，如果行星是按照拉普拉斯的假说形成的，那么所有行星旋转的方向都应遵守克普勒定律（Kepler's laws），而与它们现在的旋转方向相反。

以上三点再加上其它的缺点，迫使拉普拉斯的星云说在进入本世纪时就被抛弃了。但

是在以后的章节中将会看到，当其它的概念会导出更多的严重缺点时，还要把这个假说的某些优点引进到现行的一些假说之中去。

## 潮裂说

张伯伦 (Chamberlin) 和莫尔顿 (Moulton) 两位科学家担负起分析星云说缺陷的责任，并用比较令人满意的概念——潮裂说 (Chamberlin and Salisbury, 1928) 取代星云说。他们设想可能在50—60亿年以前，直到太阳几乎与另一个恒星碰撞时为止，它在空间中都是独自运行的，由于两个恒星只在几百万哩的距离内通过，每个星球都由相互吸引的潮力而被部分的破裂。在那个闯入的星球，拖着它的碎屑随从急速撤回太空去时，靠近太阳的残余碎块，落入于围绕太阳的椭圆轨道，并聚集成为行星。由于所设想的碎块与微小的陨星相似，所以把它们称为“星子”。因此潮裂说的另一个名称是“星子说”。

在这种假说中，认为行星的卫星是较小的聚合体，它们距离原始行星太远而未被截取，但距行星较近，足以使它为行星所俘获。

这个假说的严重缺点，涉及行星的近乎圆形的轨道。张伯伦和莫尔顿为了纠正这个缺点而设想从太阳喷出的大部分物质，都消散或为巨大的云呈圆球形环绕太阳旋转。因而，星子凝聚物也在圆形轨道中运行。

然而，除了上面这一特定解释是否适当的问题之外，潮裂说还有其它的缺点。例如，斯皮彻尔 (Spitzer, 1939) 所做的分析指出，所有破裂物质都应瓦解成为巨大的烟尘和气体的云，而且它们永远不会凝聚成星子。当然，还有类木行星大部分是气态的。因此，除非在特殊的前提下，很难以从星子衍生出来。

鉴于上述的和其它的理由，杰弗里斯 (Jefferies, 1918) 和琼斯 (Jeans, 1919) 侧重用太阳的巨大引力场来修正基本的潮裂说。但是，张伯伦和莫尔顿的潮裂说及其几种修正，还包括杰弗里斯和琼斯的气潮概念，却又面临着一个更加严重的问题。简单地说，这个问题产生于下述事实，即木星的角动量超过太阳系所有剩余的角动量；这就是说，将木星投射到它现在的轨道所需要的角动量，要比将所有其它行星投射到它们现在的轨道、并赋予太阳以其目前旋转所需要的角动量更多些。

由于这些及其它的原因，现在认为潮裂说的基本观念，不能充分说明太阳系现今的构造及性状。其结果是，用于太阳系起源的大多数新假说，又都恢复为已包含在类似于原来拉普拉斯星云假说之中且经过修正的概念上来了。其中之一，就是下一节中所要叙述的尘埃云假说。

## 尘埃云说

多年来天文学家就已熟知，在绝大部分的外层空间里，弥漫着尘埃云。因此，两位著名而有才华的天文学家，对太阳系的成因联合提出尘埃云假说就十分自然了。

于是，在1944年冯·卫塞克尔 (C.F. Von Weizsacker, 1944) 以太阳系是由尘埃云演化而来为前提，开始拟定这个假说。冯·卫塞克尔的基本设想是，在遥远的过去，太阳处于这一缓慢且其展布范围超过冥王星现今轨道的尘埃云的中心。根据冯·卫塞克尔的概念，尘埃云的各个质点能“自由的”或按克普勒轨道 (Keplerian orbits) 围绕太阳旋转。就是说，它们的角速度随着距离太阳的远近而逐渐有所不同。冯·卫塞克尔认为，由此就在太

阳周围的同心圆带内，产生出紊流涡流。

据上述，冯·卫塞克尔着手阐发从同心紊流涡流而发展出的原始行星体（图1-1）。简单地说，凝聚作用开始于假定的滚珠轴承型构造中，并逐渐增大，直到这种构造产生出可以吸引反向旋转涡流内所有物质的重力场时为止。在图形中的单个地带里，涡流间的互相吸引不相对抗，并逐渐使它们互相聚合成比目前的行星要大得多、弥散得多的原始行星。基于这一概念，当较大的原始行星发展出紊流涡流时，就会形成卫星。

奎珀（G·P·Kuiper, 1951）从理论上和数学上对冯·卫塞克尔的概念详加描述。尤其是奎珀假设太阳系是由宇宙成份的气态星云演变而成的。在这种宇宙成份中，占优势的是氢和氦，只有很少量的较重元素和许多种原子的质点。

根据奎珀的概念，原始星云是冷的；但由于各个质点的互相吸引而收缩，在其中心处变得比较致密，在其外缘处则逐渐变得较比稀疏。于是它开始缓慢旋转。当原始星云进一步收缩时，它的角动量就增大，结果是，赤道面上的离心力将尘埃云转变成凸镜形。但是和拉普拉斯不相同的是，奎珀假设在星云之内的一切深度上，离心力和内部引力都是平衡的。因此，当尘埃云收缩到冥王星的直径时，它就变得稳定并作为一个整体而旋转。

于是，根据克普勒第三规律，旋转的周期随着距离中心的远近而变化，因此，内部的转动就比外部的快得多。角速度的这些差异就产生出巨大而紊流的涡流。但不同于冯·卫塞克尔，奎珀设想紊流涡流未必一定生成在同心带上，而是在星云内的任何部位上都能产生。这样就形成和再形成了大大小小的涡流，直到少数几个最后获得稳定的形状时为止。它们又依次通过消耗那些较小和不稳定的涡流而生长。其结果是，这个星云到最后呈现为一个基本上由若干大而旋转的气团组成的形体，每个气团都形成一个行星。

但也还有一些问题未能解决。其中之一涉及到自转的方向。如果年轻的原始行星在一大致呈圆形的轨道上运行，并扫除着也在这个轨道上运动的星子，那么合成的运行应是反向的。然而，并非所有的观察者都同意这样的分析。例如，惠普尔（Whipple, 1967）就这样说，假如这个年轻的原始行星正穿过在圆形轨道上运行的固体质点场而盘旋下降或上升时，它就应该已经形成有向前的旋转。或许能在这两个思想学派的什么地方找到它的答案。（详细论述参考Tatsch, 1979d）。

为了解释现今的卫星体系，奎珀—冯·卫塞克尔假说设想，每个原始行星比它如今相应地行星大得多，这不仅因为原始行星的密度小得多，而且还由于原始行星含有许多从那以后才散失掉的气体原素。因而，当此原始行星收缩时，便产生了凝聚成目前卫星体系的紊流涡流，其形成过程与原始行星的相似，只不过规模要小一些罢了。

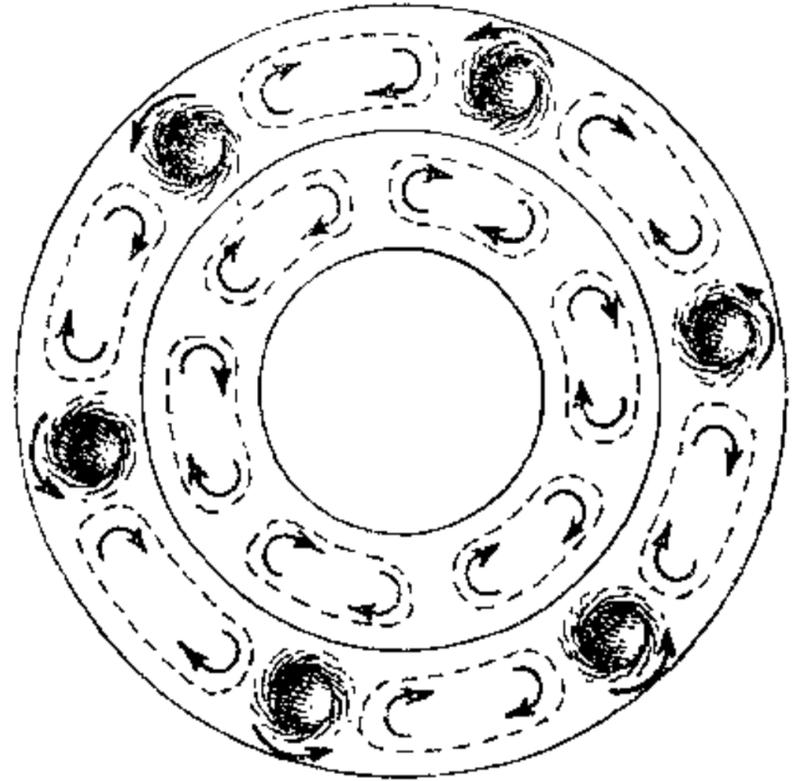


图 1-1 冯·卫塞克尔假说的示意图  
表示太阳星云中的顺时针向涡流（短线）的同心环和反时针向“滚珠轴承”涡流的同心环  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

当星云的中心部分继续收缩时，就要产生热，直至达到热核温度时为止。这又会使辐射的能量向外流溢，其数量足以把原来围绕着原始行星而稳定下来的大量气体驱散到外层空间中去。因为这种效应在最接近中心的部分也最大，较近中心的行星（水星、金星、地球和火星）丧失了它们的大部分气体成份，并凝聚成为固体。与此同时，远离中心的行星（木星、土星、天王星和海王星）却很少受到影响。事实上，它们的气体包裹层，完全有可能通过虏获一些由里面的行星向外吹散的气体，而很容易地增大体积。

由此可见，尘埃云假说解释了许多所曾观察到的太阳系的现象和特点。其中有：行星的间隔、它们几近圆形的轨道；它们在同一平面上的旋转、较大卫星系统的总体结构以及太阳的高温等等。此外，对大小行星之间的差异也做出了解释。并阐明了木星的巨大角动量，认为系派生于原始太阳，即原始旋转的尘埃云。

可是，同所有的假说一样，奎珀—冯·卫塞克尔的假说也有某些缺点。例如，由于星子过小，因此甚至从所假设的最小涡流体系也不能显示出凝聚作用。事实上，甚至最近和最大的小行星之一爱神星（Eros），也绝不是大体呈球形的（如对旋涡流体系的凝聚物所能预期的那样），而是一个十分凹凸不平的、三维不等的滚动岩石碎屑。种种理由说明这些原先形成于火星与木星之间，到后来都破裂成了碎屑的小行星，是一个大行星（或若干行星）的碎块。种种理由之中，也包括上述这两种理由。（详细论述参考Tatsch, 1977d）。

在陨星方面也存在同样的争论，因为陨星很难与奎珀—冯·卫塞克尔假说的涡流体系的基本演化理论相符。陨星这一课题，在下面第十九章中还要作更详细的探讨。这里只要提出陨石的矿物学性质，表明它们是在很大的压力和相当高的温度下结晶的，即它们是大小有如行星的天体碎屑也就够了。

奎珀—冯·卫塞克尔假说所面临的另一个问题，涉及太阳系行星已知的32个卫星之中，有六个作反向运行。根据这个假说，它们原来都是在正向轨道中形成的，但后来在离开了它原先的母体之后，采取了反向轨道，而后再返回到它们曾从那里逃脱出来的行星（但采取了反向的轨道），而另外的则偏离正轨窜到某个其它的行星上去（它们在这里采取了反向的轨道）。在本章下面的一节中，将对此详加讨论。

月球是独一无二的，作为卫星，它与其主行星地球相比时，相对而言是相当大的。因为这个以及其它的原因，它就为奎珀—冯·卫塞克尔假说和所有其它假说，提出了一个特殊的问题。因为这一问题很重要，它的细节将在独自列为一章的“地—月体系”中讨论。

在结束奎珀—冯·卫塞克尔假说之前，应该指出，许多观察者都认为，这个假说是解释太阳系演化的最好和最完善的假说（参见Jones, 1958）。

## 积成说

乌雷(Urey, 1959)曾经指出，行星是由小质点或陨石的积累而构成的。这个假说的主要引人之处，在于它避免了由太阳与行星间不同成分所引起的问题。反之，它却不能解释小的陨石型天体的起源。地球现时每天只约受到500公斤陨石的撞击；在此速度下，地球的质量只能增长百亿分之一，或在30亿年的期间内，只能增厚一毫米。所以，根据乌雷的概念，在地球形成的初期，明显必须有小天体的特大来源。假如有这种来源的话，特别是对联合的地—月起源，作为一个单独的体系来考虑时，乌雷的概念肯定有某些引人的特点。为此，在下一章讨论地—月体系时，将扼要地重新研究乌雷假说。

## 尚未获得解答的关于太阳起源的问题

对上述有代表性的假说的回顾表明，还没有一个完全令人满意的假说，可以说明太阳系起源和演化的。所以，在分析地球的构造圈演化时，有必要对太阳系演化方案中的“遗漏方面”提出一些设想。而在作这些设想之前，最好先停下来扼要回顾一些尚未获得解答的，有关太阳起源的主要问题。

几乎可立即想到这种尚未获得解答的问题共有三个：（1）在太阳系中已知的32个天然卫星中，观察到有6个的运转是反向的；（2）观测的证据支持，存在着一个完整的铁-石质陨石系列；而且（3）观测的证据还支持，地-月之间存在着有成分、密度及其它特征的一些尚未被解释的差异。当然，所有这些还没有得到解答的问题，固然确实并非全都与地球构造圈的演化有直接的联系，然而，必须着重认识到，当使用任一太阳系的演化方案作为原始地球演化的基础时，至少都要设法解决这三个主要问题，因为看来这个构造圈，几乎是自原始地球生成以来，就在不断演化到其现今的状态的。

作者的“二元原始行星假说”（Tatsch, 1959及其以后的著作），为求得对上列三个关键性问题的解答，提供了一条途径。在着手进行下一章之前，可以先对此假说的适当部分，做一扼要叙述。

## 二元原始行星假说

重温有关太阳系起源的一些有代表性的经典假说，并注意到它们尚未解答的某些主要问题之后，目前宜于对当今一些假说的不足之处，既要从逻辑观点出发，又要从过去大约50亿年间地质构造圈的演化的具体情况进行初步分析，做出合乎逻辑的设想。因此，请读者研究有关二元原始行星说的某些特点。这些作者为了解答经典方案尚未提出答案的问题时，所推导出的一个“工作假说”（Tatsch, 1959及其以后的著作）。

通过以上对有代表性的关于太阳系起源的假说的回顾，可见，一般地说，大多数的太阳系发展模式，都是建立在简单一元论结构的基础上的，例如，像可用图1—2图解式地表示出来。一元论的概念，忽略了凝聚为行星的物质的根本来源，它规定，在每条环绕太阳的轨道上，将基本只凝聚成一个行星或原始行星（例如，参见Kuiper, 1951, 1956; Urey, 1951, 1952, 1956, 1959, 1960; Alfvén, 1954; Levin, 1958; Schmidt, 1958; Lyttleton, 1961; Alfvén and Arrhenius, 1975）。

虽然从基本原理来看，除一元论之外的其它基本概念也是合理的，但通常多采用一元论，这一方面可能是由于它简单明了，另一方面是因为目前已知的行星结构，自然也都是是一元的。然而，在对太阳系的演化进行基本分析时，最好也能简单扼要地考虑到更加全面的“多元论”的概念（例如参见Tatsch, 1977d）。在这种概念里认为，初始或在任一特定环绕太阳的轨道中的原始的行星，并不必须像图1—2所示的凝聚成单个星体，而是更可能像1—3所示的在任一环绕太阳的轨道上，凝聚成许多的行星或原始的行星的凝聚体。

显然，所假设的存在于任一特定原始环绕太阳的轨道之中的这种行星或原始行星的凝聚体的精确数目，多少是任意性的，而且，事实上对于最终产物（只要它是多于一个）也是无关紧要的，因为可以证明，任何多元行星结构，都会随着时间的推移，而有退化为二元结构并最后退化为一元结构的趋势（Tatsch, 1977d）。示意图1—4表示出，在一给定的

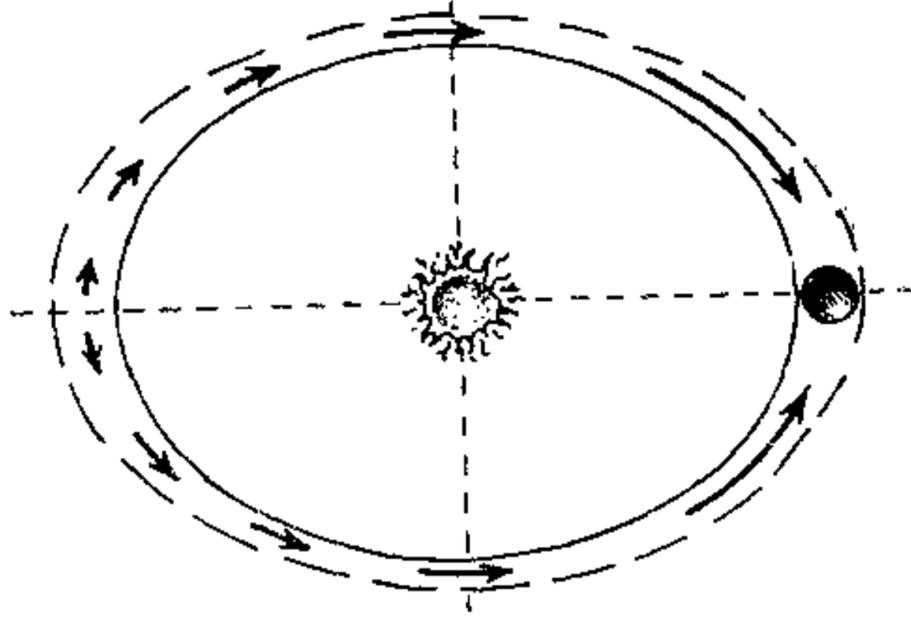


图 1-2 示意图表示行星形成于原始太阳周围的物质：基本的一元论概念  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

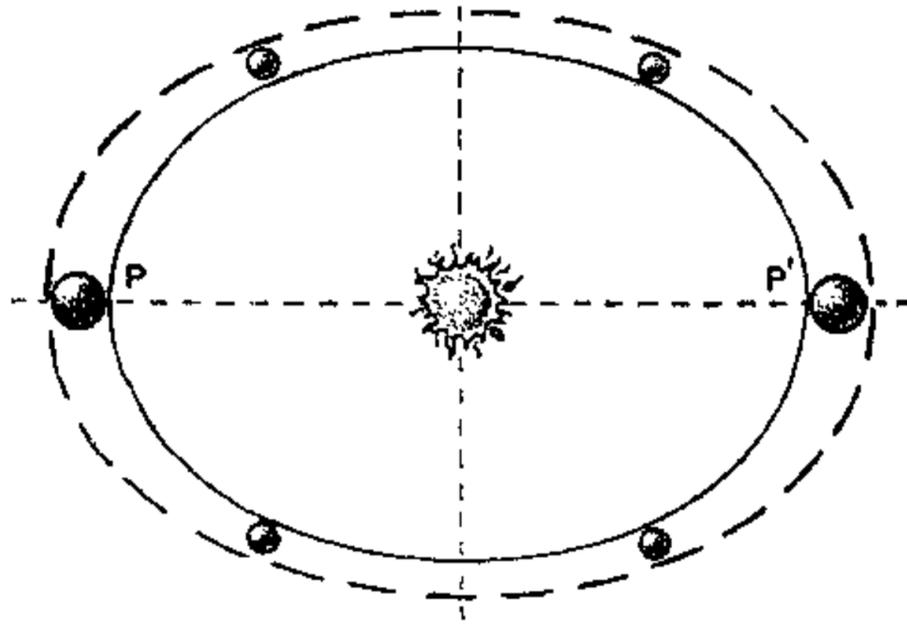


图 1-3 示意图表示来自原始太阳周围的物质在一个行星轨道中的假想凝聚物：基本的多元论概念。  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

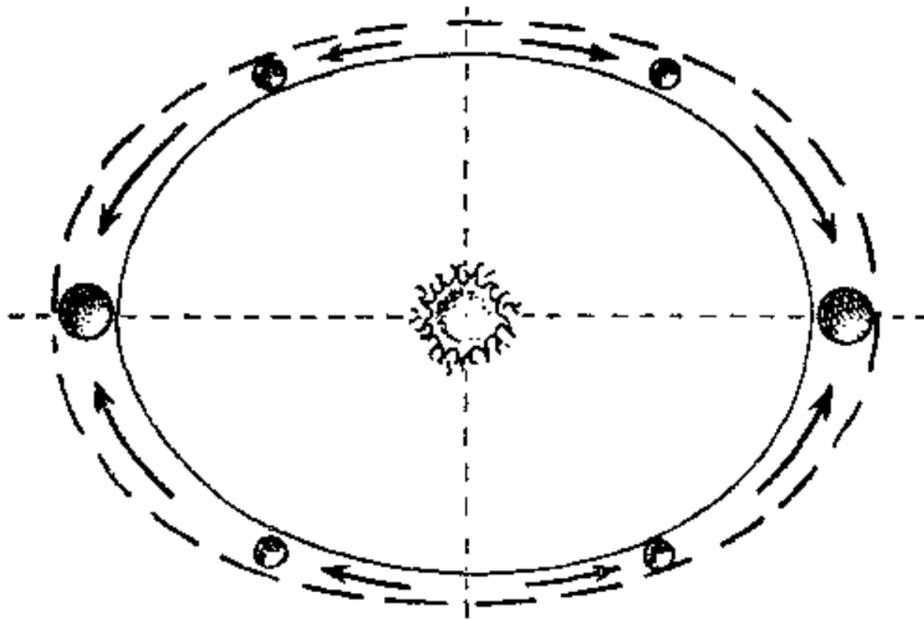


图 1-4 示意图表示行星形成于原始太阳周围的物质：基本的二元论概念  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

环绕太阳的轨道上的多个行星、可能退化为一个二元结构的方式。

从所产生的二元行星结构，进一步退化为一元行星结构的某些实际过程的特征，是有意义的。因为在将二元原始行星假说用于原始地球的形成和演化时，它们对地球的构造圈演化是有影响的。

有关二元原始行星的结构退化到一元结构的基本分析，可以用下述基本二元模式来完成：现在来考虑与上述退化方案相符的两个行星规模的星体。那么，它们的质量几乎相同，并以几乎是同样的轨道及同一的速度围绕太阳运行，而且它们之间的原始间隔大约为 $180^\circ$ 。

图1—5是这一初始结构模式的示意图。中心星体代表原始的太阳体。两个在轨道上运行的星体，是原始行星及其假设的原体或孪生的星体，分别以 $P$ 和 $P'$ 表示。

如果在轨道上运行的两个星体的质量比中心星体的质量小，而且轨道为正圆形，且又无外来干扰会影响这一简单的三体体系，则此结构就与“稳定的”拉格朗结构之一相接近（例如，可参见Lagrange, 1972; Moulton, 1914; Whittaker, 1937; Finlay-Freundlich, 1958; Kurth, 1959; Brouwer and Clemense, 1961; Blanco and McCuskey, 1961; Danby, 1962）。

假设 $P$ 和 $P'$ 都是行星规模的星体，如上述，其各自的质量、轨道和速度并不严格相同，那么，图1—5中所示的这一几近稳定的拉格朗结构，将随时间的前进而退化成为示意图1—6中的另一种稳定的拉格朗结构（例如可参见上段所引用的任何一本参考书）。大致说来，这种原始体系的现代对应体系，也存在于脱洛伊小行星群の場合，这个小行星群在它们围绕现今的太阳运行时，和木星一起在拉格朗等边结构中受到同步牵引；根据二元原始行星假说，就木星来说，目前这个体系是一个假想原始体系的残留体（参见Struve等，1959, pp.143—144; Tatsch, 1959及其以后的著作）。

现在，来回忆一下，二元原始天体 $P$ 和 $P'$ 是行星规模的，而且它们各自的质量、轨道和速度并不必定相同，原始行星 $P$ 及其原体 $P'$ ，当它们绕原始太阳运行时，会围绕它们各自的稳定、等边的拉格朗位置摆动。这种摆动又会因外界随机的扰动所激发的谐振而及时得到加强，此扰动则是由于在行星演化的早期形成阶段中，太阳系内存在着极端的不均一性和扰动所致（例如，参见Kuiper, 1951; Tatsch, 1977d, 1977e）。所引起的谐振，最后会使原始行星 $P$ 及其原体 $P'$ 破碎（但是，自然不必定使它们二者分裂为破碎的碎块，因为万有引力和其它的力有助于将这些破碎的碎块联合到一起）。

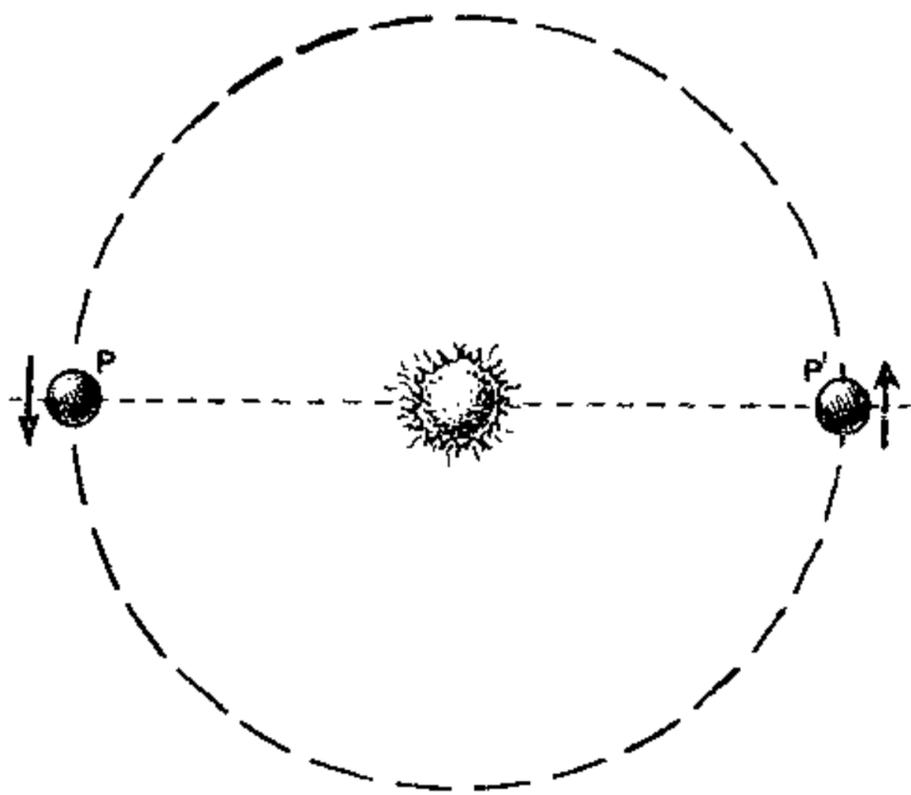


图 1—5 示意图表示二元原始行星假说中的初始二元行星结构

(J. C. Holden据作者在初版中的略图修改而成)

在其它情况都相同的场合下，设想一天体在谐振下所发生的碎裂是如此地和谐，从而碎裂部分的结构与原来天体的结构一模一样，如此，一个四面体就会碎裂成许多四面体等等。同样地，在这种情况下，一个球体就要碎裂成八分体，因为圆球体的八分体状碎块，

要比一球体其它有规则的碎块更接近于球形，球状八分体的重心，仅约比同一体积球体的重心移动了13%（例如，参见Tatsch, 1977d）。

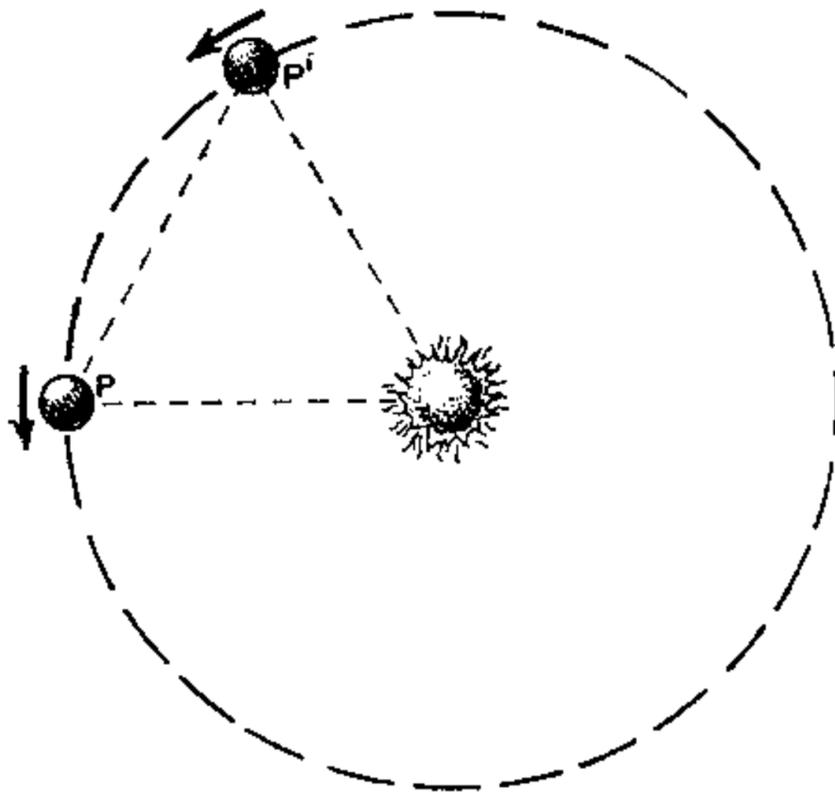


图 1—6 示意图表示二元原始行星假说中的暂时稳定的等边拉格朗结构

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

因为示意图1—6中的结构并不完全稳定，原始行星  $P$  及其原体  $P'$  间的距离，最终会随时间的前进而缩短，于是这两个天体互相接近。当发生这种情况时，二者中的“弱者”就要沿着上述的破碎面分裂开来（因为一个天体比另一个的体积较小，一个比另一个较软弱。在特殊的情况下，可以忽略这种差别，两个天体自然会沿着破裂面大体同时分裂开来。但在一般情况下，只有一个破裂成为碎块，另一个虽然发生破裂，但仍保持原样）（Tatsch, 1959及其以后的著作）。

在研究一般情况之前，值得引人注意的是根据二元原始行星假说，在火星与木星之间的小行星带构成的一个假想行星，紫菀星（Aster），及其原体，即原始紫菀星的残体问题。在第十九章（小行星、陨石和破陨石）中，对此将进行较详细的讨论。

还有，在仔细研究一般情况的细节前，即在研究其中原始行星  $P$  和  $P'$  中只有一个分裂成其碎块、另一个虽然破碎但仍联合在一起的这种情况之前，需要说明的是，应对下面的分析作些简化。举例来说，当进行初步分析时，只需考虑其中仅分裂成一个理想球体的完好八分体的这种情况。尽管根据这种简化所得到的大致情况会适用于这种分析，但读者应认识到，在进行较深入的分析时，自然就不能使用这种简化，因为像原始地球那样的非球形、非均质星体的分裂，当然不能产生理想球体的完好八分体。实际上，更高级的分析表明，分裂为任何数量的几个部分，包括所假设的八分体，都是有可能的（Tatsch, 1959及其以后的著作）。

但是，对这种分析来说，只需要考虑分裂为所设八分体的情况。为了帮助形象地了解在此情况下的几何性质和机制，这里制备了二维示意图的伴生程序，以表示假想分裂星体，即原始星体  $P'$  的每个球形八分体的初始路线。再通过逐次研究每种可能的分裂方式，对此作进一步的简化。

如此，图1—7表示出一个非旋转的、假设在没有任何明显引力场中分裂的破碎球体的、球形八分体的路线。在此简单情况下，球形八分体是从基质量中心向外作幅射运动的（自然，它仍沿绕着原始太阳的近圆形轨道上继续运行）。

图1—8所表示的球形八分体的路线与图1—7的情况一样，但其不同之处，在于设想这个分裂的星体在分裂为八分体时是正在旋转着。在这种情况下，这八个球形八分体都以其质量中心为出发点，沿着螺旋状路线向外运动。（一如前述，它们沿绕着原始太阳的近圆形轨道上继续运行）。

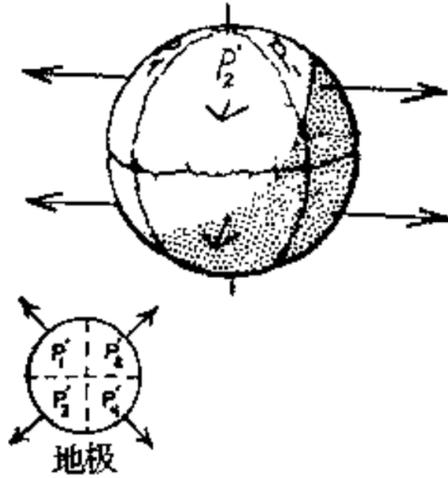


图 1—7 示意图表示，假定在无重大外部引力场的情况下，初始碎裂会分裂为八分体的、非旋转的破裂天体初始碎块的路线

(J. C. Holden据作者在初版中的略图修改而成)

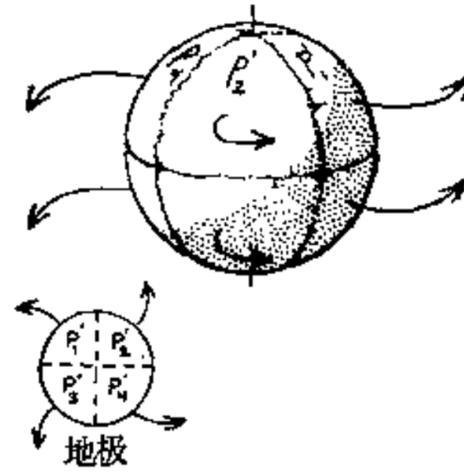


图 1—8 示意图表示，假定在无重大外部引力场的情况下，旋转的初始碎裂会分裂为八分体的破裂天体初始碎块的路线

(J. C. Holden据作者在初版中的略图修改而成)

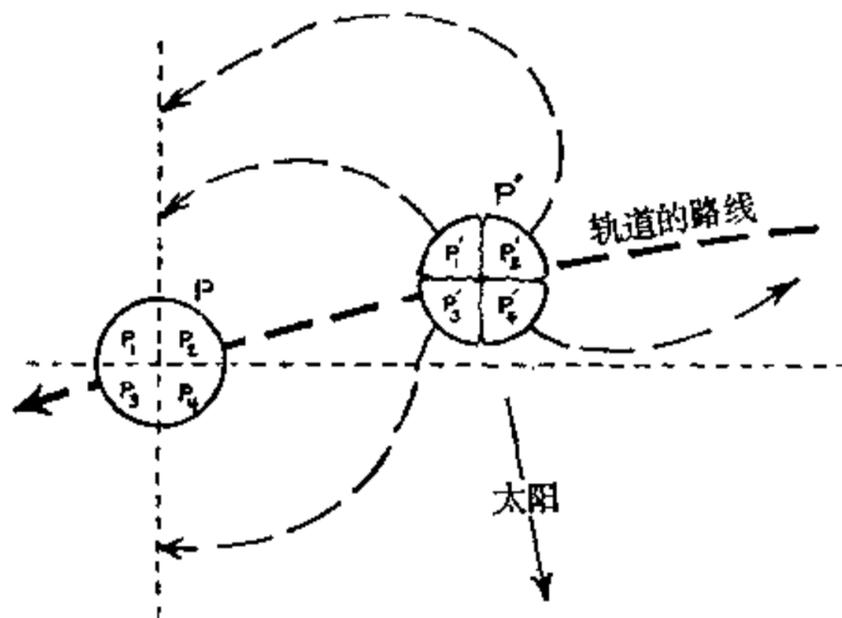


图 1—9 示意图表示，由于太阳对P及对P'的碎块的重大引力而旋转的、分裂为天体P'的、初始碎块的路线

(J. C. Holden据作者在初版中的略图修改而成)

图1—9表示的情况与图1—8的球形八分体的路线相同，所不同的是其结果中包括着太阳、未分裂星体、和正在分裂星体的球形八分体等的重大引力场的影响。一如此二维图解所表明的，考虑到用天体力学方法已解决了此十分体 (ten-body) 的问题，则分裂星体P'的四个球形八分体中的P'1和P'2会采取围绕着尚未分裂的P的定向轨道。按常规，实际分析都是在三维中进行的，而在此二维示意图中，则有一半球形八分体被隐藏在所见到的球形八分体的后边。

在一般情况下，这两个以P'标出的球形八分体采取的是双曲线轨道，并正常地不再受P的影响。即便是在此两个球形八分体不在采取双曲线路线的特殊情况下，其分析结果仍不会有重大变化。在下一章研究地-月体系时，还要对此情况作较详尽的讨论。

图1—9中，两个球形八分体 $P'$ 的路线，对一般分析的结果有重大意义，这是由于它们在原始行星 $P$ 周围采取反向轨道。这样，我们会看到，二元原始行星假说的这个特点，为太阳系32个卫星中的6个绕其各自行星运行的轨道是反方向的问题，提供了答案。在这方面，其意义是重大的，因为采用二元原始行星假说，反向卫星的运行就不再取决于任何特殊的反向机制，这不过是可用以解释正向运行的同一机制的结果而已。

通过对这一模式可变参数的初始值进行适当地调整，就能再现如今太阳系卫星体系中的每个体系（例如参见Tatsch, 1959及其以后的著作）。小行星在前边所提到的特殊场合下进行演化，其中的原始行星及其“原体”大体上是同时分裂为其它破碎碎块的。同样，陨星和慧星的演化也是这一基本二元原始行星假说的结果。此外，也能说明行星及其卫星轨道和自转轴的各种不同的倾斜。这个假说为太阳系其它方面的研究也提供了机制格架，举例来说，像在水星以内和冥王星以外有存在行星的可能性，以及为研究除太阳以外的其它恒星所可能存在的行星系的某些情况等（Tatsch, 1977d）。

本书的目的是分析地球构造圈的演化，因而只涉及二元原始行星假说的三个方面或作一些推断。这就是：（1）地—月体系的演化；（2）原始地球的演化；以及（3）铁—石陨石全系列的演化。在以后的章节中，将逐一研究二元原始行星假说中各个方面，以及与其相似的其它假说，并以第二章地—月体系演化的分析做为开始。

## 第二章 地-月体系

地-月体系可解释为主要是由地球、月球以及在过去46亿年间,在地球引力场的影响下而坠入的陨石和“闯入物”所组成的体系。因此,为了了解地球构造圈的演化,可能有必要在本章里先讨论地球、月球与陨石的一般特征、现状以及它们之间的相互关系。因为将在其它章节里讨论地球和陨石,所以本章主要专门探讨月球及其与地球和陨石的演化间所可能存在的成因关系。

一般来说,地球的构造圈看来是由与月球的物质很相像的物质构成的。而在其它方面,地球和月球则有很大差异。当伽利略于1610年用望远镜对准月球时,就首次认为其中的某些差异是错综复杂的。不久以后,科学家们提出了关于地球和月球的明显相似性和差异性方面的问题。在没完没了地试图解答诸如相似性和差异性此类的基本问题时,对月球就进行了越来越多的观察和分析。

然而,不幸的是,许多观察和分析有使问题复杂化的趋势,而不是使它简化。例如,在1959年,月球背侧的首次照片显示出,它的地貌与正侧的根本不同。十年以后,得自阿波罗飞行的结果使这个问题更加复杂化了。

### 现今的月球: 摘要

现今的月球并不是一个寒冷而僵死的天体,与地球相比,它不过是处于极其宁静的状态罢了。对于发生在800到1000公里深处的月震,从来不曾得到令人满意的解释。存在两种可能性:(1)这一深度可能代表月球岩石圈的基底(例如参见Ridley, 1976);或者(2)月球天体中所固有的不均衡能,是引起月震的原因。而此月球星体,则产生于由二元原始行星说(Tatsch, 1963a)所推导出的地-月体系。

热流计算表明,部分月球可能仍是融熔的。震速资料尚未回答有关月核的问题。有两种基本可能性:(1)月球可能有一融熔核,其体积大约等于月球的2%(Ridley, 1976);或者(2)月球可能不具有中心核,而可能具有自二元原始行星假说(Tatsch, 1973a)推导出的、地-月体系所产生的、地球原体的残余。月球的瞬变事件与月球当时的表面活动相一致。这种表面活动表明,月球内部仍是不平衡的。

在比较详尽地讨论了关于造成月球内不平衡性的原因之前,我们应首先回顾一下月球的总特征。

### 月球的总特征

根据目前所获得的资料,可将月球的总特征概括如下:

- a. 月球是个很古老的天体,其年龄可能同地球的一样,即大约46亿年。
- b. 和地球一样,月球也严重贫于碱质。
- c. 对月海矿物学的研究表明,结晶作用是在无水环境高温下进行的,而且所有现今的证据都说明,水份无论对月球矿物或对月球地貌,都不起任何重大作用。

d. 月球表面矿物的成分清楚地表明，岩浆分异是月球成生的基本作用，而月球岩石的年龄表明，这种分异作用是在地-月体系很早时期的历史中发生的。

e. 月球结晶矿物的宇宙线辐照研究表明，既可以是（1）或许有与喷砂相似的作用不断对月球表面进行剥蚀；也可以是（2）或许会发生这些岩石撞击火山口的突然喷发。

f. 月球和地球的内部构造存在基本区别。

g. 月球有许多构造看来是由准内生构造作用、而不是由撞击产生的。

h. 月球内部有些自相矛盾的方面：在某些方面，月球构造看来是坚固的，但在另一些方面，看来又是破碎的。

i. 月球的某些线性构造看来是内生成因的，它们既可以产生于深位月球网格体系，也可产生于沿着通向表面的裂隙而逃逸的挥发物。

j. 月球呈显著的梨形，其表面升高2.2公里，形成赤道附近的隆起，说明有很不平常的内部构造。

k. 从具有糊状内核的球体、或是从其内壳的顶部位于几百公里深的、“具有双壳的小行星”中所料到的反应，可暗示出月球的基本月震性状。

l. 月球不曾显示过像地球那样的层状构造，而是有深部断裂并且是不均一的。

m. 月球磁场仅约为30伽玛，比地球磁场的35,000伽玛要低三个数量级以上。

n. 某些月球角砾岩的剩余磁性包含两个组成部分：（1）时间常数为几个小时的大粘滞性组分和（2）可能得自月球表面上撞击作用的高矫顽磁性剩磁。

o. 力学、地震、重力和磁性的整体证据表明，月球内部与地球内部是迥然不同的。

p. 月球的质量密集看来与地球类似特征迥然不同，月球的质量密集似乎与月貌的凹陷而不是凸起有关，并估计有可能与古代月质（即环状月海）有关、而不是像地球的情况那样与近代地质有关。

q. 难以精确地确定什么物质构成着月球的内部。但一些分析似乎可以表明，月球表面上的火山岩，曾经在固相线以上的温度下，于真空中，冷却了若干天，结果就丢失了碱金属及其它挥发性氧化物。于是，根据某一概念，阿波罗飞行所采集的物质，可能代表附加在分馏结晶产物之上的分馏升华的残余物，从而表明，月球的内部是由斜方辉石岩或角闪橄榄岩或类似的物质构成的。

有关月球的这些和其它的总特征，将于作者对月球的起源、演化及现今特征的分析（Tatsch, 1974a）中详加讨论。

## 月球环形山

环形山是圆形、多边形或细长的月貌凹陷，一般有陡峭的内坡。月球环形山可以从很小一直大到直径超过100公里。

月球的几乎是连续地爆炸，特别是在月球的早期历史中，已使月球表面形或即使用肉眼也能看到的“完好环形山的外观”。这种爆炸通常产生于下列一种或几种原因：（1）来自宇宙线的离子、太阳风或太阳风暴；（2）气体；（3）陨石；（4）慧星的核；和（5）小行星。

看来月球环形山可分成两个不同的类型：（1）圆形的；和（2）相对非圆形的。相对非圆形的那一类，完全由老于月海的环形山构成。可以用几种不同的方法来解释这些不寻常

的、非圆形的月球环形山；（1）它们与正常的、圆形环形山两者的形成作用是不同的；或（2）它们可能与圆形环形山具有同一起源，但在月亮内的压应力作用的一段期间受到变形。

在某些月海表面上的乱石厚度（1—10米）意味着绝大多数最主要的环形山是在月球历史的早期形成的，继之有熔岩的喷出。

对于月球环形山和月球表面爆破的其它效应的分析，不仅可用以解释为什么月球会有环形山的外貌，而且还有助于解释月球岩石的性质。关于月球环形山的其它细节，见于作者对月球的过去发展及现今性状的分析（Tatssh, 1974a）。

## 月球的断层、月面谷和穹窿

月球上的断层同地球上的断层一样，是一些平面，沿其面之岩块发生了水平、垂向、斜向等变位，这显然是由月面之下的再调整或均衡作用引起的。在一些地方，月球表面上看来象是具有断层，并伴有高达四分之一公里的断崖。

月面谷在月球表面上也是独特的，它与地球上的山谷有某些相似之处。它们可呈直线状、弯曲状或呈复合的形式。在大多数场合下，所说的弯曲处仅与直线有轻微的不同。有许多处暗示出是地堑，其宽度可达10公里，深度可达半公里。它们横切月球表面，完全不顾其它表面构造而延伸几百公里，从而仿佛与月面之下的断裂有成生关系。特别值得注意的是——一条长150公里、宽1公里的弯曲月面谷，在其全长中，其平均方向是理想地直线状。

穹窿是抬升的圆形构造，其对径可达20公里，高数百公尺<sup>①</sup>，有些象地球上的小方山。它们充满了月球表面，在月海区中尤其如此。因为有些陡缘穹窿与地面上的火山穹窿相似，所以一些科学家就把月球穹窿同火山活动联系起来。

## 月海及亮高地（高地）

自17世纪以来，人们就真的把月面上的黑影地区当成是海洋，因而用拉丁文“海”字命名，称之为月海。在关于月海的所有观察结果中最不寻常的是，月球正侧的月海数目及深度，要比其背侧的多得多和深得多。一般来说，月海构成月球表面黑暗、比较平缓的地区。许多月海都呈圆形。其大小不等，大者可达到1300公里（如圆海Mare Imbrium）。有些月海的四周为高达1.3公里的弧形陡崖所环绕，许多月海含有长而斜并穿过它们的皱折山脉，暗示在月面之下发生过沿破裂面的再调整。有些月海具有长（200公里）而狭窄（8—10公里）的山脉，还有一些似乎是断裂的直线状构造。

有迹象表明，月球母岩浆的低粘滞性（可能比地表的橄榄玄武岩浆小一个数量级）与Si和Al的集中度较低有关系。结果是，尽管月心引力较低，月球熔岩仍能比地表的对应岩流，即原始洪流玄武岩流动更快，且流动范围更加宽广。因而，原始之时，原始月球熔岩在凝结以前，能够轻易地流得很远，以充满甚至是最大的月球盆地，而产生月海。

月海和亮高地的其它细节，都包括在作者对于月球的过去发展及现今性状的分析中（Tatsch, 1974a）。

① 原文为数百公里，显然为“数百公尺”之误——译者注。

## 月球背侧和正侧的不同特点

月球背侧和正侧的显著差异是，在背侧很少有很大的盆地，并且事实上无论其广度或体积方面皆无法与月球正侧的月海相比拟。月球背侧最大的圆形构造是东方月海 (mare Orientale)，其中只部分充填有月海物质。莫斯科月海 (Mare Moscoviense) 也在背侧，其大小和正侧较小的圆形仙酒月海 (Mare Nectaris) 相当。虽然只有少数几个环形山的底板，例如最著名的齐奥尔科夫斯基环形山的底板，明显地为平缓而黑暗的月海物质所覆盖。然而，给人以深刻的印象是，在背侧竟有这样的物质实属罕见。从总的形态方面来看，月球背侧的很多形态，都能够同正侧南部高地的形态相比拟。后一区域内的若干具有浅色调底板的大盆地，可举贝利和克拉维两座环形山作为例子与此相对应的盆地，在月球的背侧，大约就有二十个，其中的大多数都比较大一些。

还有其它三项观察结果，可以着重说明月球背侧和正侧的明显差别：(1) 从某一迹象看来似乎可以表明，正侧比背侧要平坦些；即正侧较平坦，背侧较浑圆；(2) 有证据表明，正侧的月亮比背面的薄一些；以及(3) 大体上几乎所有正侧上的盆地，都为月海物质所充填，而在背侧上的少数几个盆地，却是“干的”或“空的”。

月球背侧和正侧的其它有意义的差别的探讨，见于马尔科夫 (Markov, 1962)、巴拉巴绍夫等 (Barabashov et al., 1961)、科索夫斯基和厄尔巴兹 (Kasofsky and El-Baz,) 以及塔奇 (Tatsch, 1974a) 的著作。

## 不断变化的月球：摘要

目前的月球，不像它过去曾经一度所表现的那么活动。但现今月球的瞬变事件暗示出，今天的月球在几何学、力学、热力学和化学上仍未得到平衡 (Tatsch, 1974a)。月球历史最初的16亿年期间所发生的三种最重要的作用，使现今的月球仍处于不平衡状态：

- a. 外来的撞击爆炸。
- b. 内部的局部熔融。
- c. 内部的部分结晶。

这些作用的时-空关系，还没有得到完全而详细的说明 (例如，参看Ridley, 1976)。但最好是总结一下，现在在这方面知道了些什么以及已经假设了些什么：

- a. 看来月球玄武岩，在月球表面的外部碰撞迅速减少之后，就已喷出。
- b. 月海玄武岩自从喷出以后，就很少变化；看来它们保留了它们的原始结构和化学成份。在结构上，它们类似于地球上的玄武岩，但化学成份却不一样。
- c. 和月球玄武岩相对比，大多数月球上的月亮高地的岩石要更加复杂些。这种复杂性似乎反映了过去46亿年到39亿年的一个时期，其间月亮似曾为反复 (或连续) 的碎裂、重熔、变质、混合和混染等作用事件所控制。看来只有少数月球上的明亮高地的岩石似乎未受这些效应的影响，它们有可能起源于原始岩浆 (Ridley, 1976)。

## 大月亮月块的水平运动

观察证据表明，月球上有些线性构造是由月亮明亮高地型亮块的分裂，而不是由沉陷产生的。一条这样的称为弗力刚尼斯 (Frigonis) 月海的线性构造，可长达1500公里，宽

200公里。

还不知道有关所假设的大月亮月块水平运动的确切原因。但已提出过下列几种机制：

a. 原来炽热的月亮，因月亮自表面的冷却而收缩。

b. 与地球板块构造机制相同的月球的板块构造机制。

c. 月亮岩块滑进一个原本就是空的月球圆海凹洼。

d. 作者在二元原始行星假说 (Tatsch, 1947a)中所提出的、为月球形成作用所固有的平衡力。

## 月球岩石的成分：关于地-月体系演化的摘要

为了正确认识地-月体系演化的复杂性，须要很好地了解月球的岩石是怎样变化成为现在情况的，并要了解现在的月球岩石同原始的月球岩石是怎样联系起来的一些迹象及其相关的密切程度，同样，也要了解它们同现在的和原始的地球岩石及陨石可能存在的上述相互关系。

因为对现在岩石的理解是了解地-月体系内的岩石如何演化而成的关键所在，了解现在月球岩石的一些特征，就有可能揭示出原始月球岩石的某些特点，其特征如下所示：

a. 月球岩石甚至与其最接近的地球上的类似岩石相比较时，也显示有明显的特色，这些特色可以表明，地球与月球的化学演化史的截然不同。

b. 如像Al/Ca、Si/Mg和Na/K的比率以及Ti和P含量的变化，突出说明，以其现今的形态和成份而产生出地球和月球岩石的火成作用，是不同的。

c. 有证据表明，过去在月球上所进行的主要作用，是在高度还原（缺氧的）环境中的硅酸盐熔体的结晶作用。

d. 锰三斜辉石的铁类似物， $\text{FeSiO}_2$ ，被发现于月球，但却从未见过它天然地产出在地球上。甚至比较复杂的月球珍奇矿物的情况也是一样，例如具有集中度小的Ca和Y以及较少量的8种，其中包括Al和Na等其它元素的Ti-Fe-Zr硅酸盐。值得注意的是，所有这些月球珍奇岩石却含有铁。

e. 有些月球样品含有纯铁，然而在地球上的岩石中之铁则从来不以纯铁的形态、而总是以氧化物的形态产出的。

f. 月球岩石中Ti的集中度不仅大于地球岩石，而且它们在不同的月海中也有明显的变化。

g. 看来月球岩石中 $\text{O}^{16}$ 和 $\text{O}^{18}$ 同位素的相对丰度，与地球岩石中的相差不大，因而说明，可能地球和月球是在太阳系的同一部位形成的。虽然，看起来这种情况似乎与能表明地球和月球的演化作用的其它证据稍许有些差别，但也未必是相互矛盾的。

h. 得自海燕洋 (Oceanus Procellarum) 的一块柠檬大小的岩石，同一块地球上的正常花岗岩相似，但在成分和年龄方面却完全不同。它所含的放射性U、Th和K约多出20倍，而且比地球上已知的最古老花岗岩的年龄还老10亿年。

i. 大多数月球岩石有很多含有高沸点的元素（如Ti, Zr, Cr），但含有低沸点的元素（如Pb, K, Na）却极少。

j. 月球上和地球上的玄武岩基本相同，但在各别矿物的比例方面，却有明显区别。也就是说，在月岩标本中，辉石和钛铁矿（富于Ti和Fe）较多，而斜长石和三价铁较少。

k. 与月球上的同类岩石相比, 得自地球上的大洋壳、海岭和洋隆的玄武岩, 几乎都含有同一集中度的Mg、Ca、K、P、U、Th、Y和Yb, 但所含Fe、Ti、Ba和Zr要少得多, 而Si、Al和Na的集中度却较高。

l. 由于月球的原始辐射核素的成份 (U、Th和K), 和地球的或陨石的都明显不同, 看来, 月球所经历的月球化学史, 无论与地球或是与陨石所经历的各自的化学史, 都有本质的区别。

m. 有不到百分之三到现在月球土壤混杂物, 是由球粒状陨石组成的。

n. 月球岩石除了其钛铁矿的含量高之外, 它在成分和构造上都很象富钙的无球粒陨石 (钙长辉长岩及古铜钙长无球粒陨石)。可以大致把主要的月球岩石类型分为钛铁玄武岩及角砾岩。

o. 月球岩石和陨石岩石在结构与准矿物学上, 与地球上的岩石相似, 但在它们中间有许多却没有化学相似性,

p. 月球和地球之间的假相似性, 可以认为是由于每方都缺乏亲铁元素和重金属这一事实而决定的。此二者推测是在其熔融相时沉入星球的核部, 留下岩石熔渣而形成了地壳和地幔。在地球形成时似乎发生过这种情况; 但为什么现今极少, 甚至没有金属内核的月球也表现出同样地显著贫于亲铁元素? 这是否意味着, 我们现在所知道的月球, 在过去曾一度有过内核呢? 如果是这样的话, 那又会出现什么情况?

q. 许多月球标本, 似乎是由于同角砾状钙长辉长岩陨石相类似的物质, 经过有限部分熔融而产生的。

r. 某些月球岩石贫于Ag、Au、Zn、Cd、In、Tl和Bi达一到两个数量级, 表明它们是由于在月球增长之前或之后的高温挥发作用下而损耗掉的。

s. 某些月球岩浆岩, 似乎都是大范围岩浆分异的产物。

t. 月球岩浆岩中Rb的损耗, 是在类地行星量增长期间或稍后的时期里发生的。

u. 月球结晶的全部均质性、火成结构和没有捕虏体, 表明它们是由内部、非造山的火山作用而派生于普通的富钛岩浆, 而不是派生于撞击作用。结晶环境容许辉石、橄榄石和斜长石有强烈的成分变化, 并且容许产出某些珍奇的月球矿物。

v. 月球玻璃的基本产状是(1)与月球玄武岩共生的圆球, 或(2)其成分几近玄武岩和显微角砾岩的被复玻璃。

除上列存在于月球、地球和陨石矿物之间的基本差异性与相似性之外, 在它们之中的每种之间, 还存在着各自的差别。例如, 就有一个从纯石质、经石-铁质而到纯铁质陨石的、完整的陨石系列; 在第十九章 (小行星、陨石和玻陨石) 中, 将对它们进行讨论; 同样, 还有一个完全的地球矿物系列, 这将在第十章 (侵入和喷出作用) 中加以讨论。

还可以料到, 地面上不同地区的岩石, 总会有所不同。对月球上的不同部分来说也是这样, 有关地球上的差异的讨论, 见于作者对地球矿藏的起源、演化及现今特征的深入分析 (例如参见 Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c)。关于月球上的差异, 将在作者关于月球的过去发展与现今性状 (Tatsch, 1974a) 的分析中进行讨论。

## 月球的年龄

在分析地-月体系的演化时，最好先将月球年龄与此体系中其它部分的年龄做一番比较。例如，如果说地-月体系所有部分的年龄都相同，那么，据此而制定的一个不同型式的演化假说，就比依据地-月体系某些部分的年龄不相同而制定出来的假说，要合式些。

不言而喻，这里打算要说的“年龄”是指那些已经研究确定的岩石，从最后晶出算起的那段时间。据此，有些月球、地球和陨石的岩石大约具有相同年龄，即它们大约是在地-月体系历史中的同一时期里，从熔融状态中被结晶出来的。这并不是说，像这样的同时结晶作用必须发生在地-月体系中的同一地方。同时结晶作用，这种情况仅适用于有限的几种月球、地球和陨石物质。若是说，所有或大多数月球、地球和陨石的物质曾一度都是同一“年龄”是不够恰当的。然而，如果说，“比较年轻的”岩石是最近才结晶的岩石，那倒是可以的。于是，显而易见，不论其先前的历史如何，凡是最近才结晶的岩石都是“最年轻”的岩石。如此类推，则有些岩石就会有几个“年龄”，其数目恰好与此岩石所曾结晶的次数相同。因而，假如某一岩石是在46、36、27和18亿年以前结晶（或重结晶）的，那么它现在的年龄就是18亿岁，但也有27、36和46亿年的早先的“年龄”。

上述表明，特别是像地-月体系这样的大体系，在分析过去46亿年期间的演化时，十分重要的是，我们必须考虑到几种可能会改变岩石“年龄”的不同的机制（即将其从熔体中结晶出来或从已结晶状态下使之重结晶）。或许更为重要的问题是，什么是决定给定岩石或岩族或岩套岩石的年龄（或改变它的“年龄”）的原因机理或机制？例如，为什么那些“最古老”的地球岩石的年龄只约为36亿年？是什么原因机理或机制，会在过去36亿年期间的某一时间里，决定（或改变）大多数地球岩石的年龄？为什么在过去的36亿年期间的某一时间里，没有一个类似的原因机理能改变大多数的月球岩石的年龄？

任何一个成功的地-月体系演化假说，都必须对这些以及其它的问题作出回答。它必须说明，为什么某些月球土壤、角砾岩及岩石，在过去46亿年期间，看来仍保持未受熔融。它还必须说明，为什么坠落到地球上的最古老陨石，都大约有同样的年龄，却从来没有找到过一块陨石，在化学成分上与相似年龄的月球岩石是完全相像的。然而，有些最古老的月球岩石和在地球上陨石坑附近见到的粗晶大理岩化花岗岩，虽然其年龄不同，但却具有相似的外貌。到底是什么样的几何学与力学的时、空特点，能使地-月体系在过去46亿年间的演化，具有如此约束良好的性能？

从上所述，看来，和地球的情况不同，月球的大部分活动都发生于其历史初期。任一成功的地-月体系演化假说，都必须对此作出解释。

不用说，用这些和其它的观察结果，是能够为月球演化的力学和几何学设置严格限制的。作者在对月球的起源、演化及现今特征的分析中，将对这些限制进行讨论（Tatsch, 1974a）。

## 炽热月球的演化证据：摘要

关于月球的起源问题，是尚未回答的主要问题之一。天文学家和物理学家在试图回答这一基本问题时，曾根据直接和间接证据，设法确定在月球上已发生过的火山作用及其相关的岩浆作用的大小程度如何。如果能将此问题确定下来，那么要确定月球是怎样产生并

演化到现今的状况及其性状等问题，就比较容易解决了。

如果有一个象月球这样大并且其成分又同地球或球粒结构陨石相似的天体，那么在其历史的某一时期中，必定曾经受到过显著的加热作用的。当然这就会引出下列问题：它是怎样被加热的？加热延续到什么时候并继续了多久以及热力在什么程度上仍存在于月球之中等等。

得自阿波罗飞行的有关月球岩石的分析证明，当与相似总体成份的陨石和地球岩石相比时，它们具有低得惊人的K/U比值。此外，如果假设已分析过的月球岩石能代表整个月球的化学成分时，那么，月球岩石就十分肯定地含有足够的K、U和Th，以产生具有热力活动性的月球。然而阿波罗的成果表明，在过去36亿年间，月球表面的岩石未被热到250°以上。简单说来，这意味着，如果来自静海（Mare Tranquillitatis）和其它月海的火山喷发岩，是出自炽热的内部，那么，它们在月球上，就必需是作为极早期的热相而产出的，且继之以至少为36亿年比较寒冷的环境。

对月海所得到的令人意想不到的古老年龄，使许多精心设想的有关月球起源及月表月形的假说遇到困难。作者将在月球的过去发展及现今性状的分析（Tatsch, 1974a）中，对这些假说做进一步详细讨论。

许多科学家多年来都为“炽热”的月球进行着辩护，他们坚持，在月球历史及月球月形中已是一个重要因素的热力活动，主要受控于内力作用。在他们看来，月球表面主要是由火山锥、火山口、火山灰流或裂缝喷发物、断层崖及月堑组成的。另一批“炽热”月球的支持者则主张，较大的几近10公里的月表起伏，大多在深部受到均衡调整；即，高的高出体都具有深的根部。根据这一概念，月亮，特别是在高地中的月亮，是由密度较低的硅酸盐物质上覆于密度较高、含铁镁质较多的下层所组成。

然而，大多数观察者现在宁愿相信，有更多的证据能表明在月球存在的绝大部份期间一直是寒冷的。从下一节就可了解到，甚至有更多的证据表明，月球的演化可能既牵涉到炽热的又牵涉到寒冷的月球。

### 寒冷月球演化的证据：摘要

前一节已概括了支持炽热月球的证据。但还有大量证据表明，月球至少在最后36亿年中就已经是寒冷的了。例如，虽然前节认为月球表面的环形山有可能是火山成因的。但是由于陨石撞击的结果，而产生的解释说法（例如参见Baldwin, 1963），似乎更加合理。

月球环形山与地球火山口有显著区别，前者的直径可自几厘米到几百公里，而后者的直径则从一公里的零点几到大约只有30公里。因而最小的月球环形山比地球上最小的火山口还要小一些，而最大的月球环形山，却又比地球上最大的火山口要大一些。甚至更加令人惊讶的是，地球上几乎所有的火山活动，都被限制在界线分明的线状地带里，而月球环形山看来都大体上是随机分布的。

月球环形山的总数之多几乎令人难以置信，在月球的正侧上，直径大于1公里的就超过300,000个。撞击假说的支持者们认为，月海乃产生于高能撞击所引起的局部、暂时性热力作用的熔融物质流。根据这一概念，可以把所报导的，从阿尔芬萨斯（Alphonsus）和阿里斯塔克（Aristarchus）喷出的气体以及红外热点都解释成为来自相当晚近的陨石撞击的“残余”效应。

除了环形山和有关月球表面的月形等方面之外，还有其它一些对月球的观察结果，支持“寒冷的”月球演化。例如，月球没有明显的磁场，说明它现在还没有一个金属核以及它有可能从来都处于寒冷、未熔融的状态。但这未必是唯一的解释，因为还有其它证据表明，月球有可能在某一时期中曾经有过一个核（例如参见Tatsch, 1974a）。

月球的另一物理特征说明，它有过一次“寒冷的”演化：月球的轨道运行说明它具有不均衡的形态，暗示它的内部很够强硬足以抵抗长期的应力，因而它必定是自从46亿年前形成以来，或至少在最后的36亿年内，就已经是寒冷的了。明确地说，月球的形状不是圆滑的旋转球体，而是三轴椭球体，具有一个数公里的明显突出部分朝向地球。虽然可用月球的引力场来解释这个凸出部分，但它被广泛地认为，是代表着月球表面上的一个实际月形突起。有些观测家认为，它是在月球比较接近于地球的某一远古的时期里被形成和“冻结”的。

另一种看法是，这种引力突起，可能代表月球内部之中的主要不均匀性，而不是外部的月形突起。不论是那种情况，都难以根据“炽热的”月球历史来解释所保留下来的古潮汐突起，或月球质量的不均分布。因为这个突起的规模很大，表明至少在过去的36亿年间，月球的粘滞度接近于零。

## 地-月体系历史中实变事件的证据

在分析任一巨大体系的演化时，从一开始就确定出，有助于促进此体系演化的任何一次活动是否为突变性质的，是有益的。也就是说，是否所有的活动都像这样的性质，就可以说明它一贯是纯粹地均变性的呢？如果其中任何一次显示出是突变性的，那么，这个体系的演化假说，就必须回答有关所猜测的这次或这些次突变的起因与性质的问题。同时，这种演化假说，应能预测或确定这一灾变发生的时间和地点，包括一次或多次灾变必定会发生于其中的那种当时存在的环境所起的作用。

就地-月体系的情况而言，就可以确证在过去的46亿年期间至少发生过一次，也可能是两次这样的灾变。例如，有许多陨石似乎至少与一次、其中有些与若干次的灾变有关。地-月体系中的其它成员是否也是如此？如果是这样的话，那么，我们又找到了些什么证据可以证明，在过去46亿年期间它已发生在地球或月球、或两者兼在？假若影响到陨石的灾变并未涉及整个地-月体系，那么，地球和月球又是怎样逃避开它们的影响的呢？

有些迹象表明，根据在大约46亿年前所发生的一起由于大量热而引起的结晶与熔融“事件”，能够很好地解释月球岩石中U、Th和K的丰度。这样的事件显然不属于均变演化，而应归属于灾变的范畴。然而这又是什么原因引起的？

另一个使人费解的问题是，月海中含有空间上仅相隔几厘米，而时间上却相隔十亿年的物质。大部分月海岩石的年龄约为36亿岁，然而灰尘质点（及一些岩石碎片）的年龄，却约为46亿岁，或者说比月海岩石老十亿年。

因而，对证据的初步研究，似乎表明，月球也许至少经受过两次灾变，一次大致是在46亿年前，即其“创生”之际，另一次大约在此之后的十亿年。至于灾变的性质，却仍难以确定，即，是否月球上所有的岩浆作用都来自炽热的月球内部，抑或它们全都由大陨石撞击所产生的热而引起。

如果任一月球岩浆是来自月球内部，那么它们是否仍像现今地球上的岩浆所表现的那

样缓慢上升，还是像过去那样猛烈地或灾变性地涌出？如果月球岩浆像现今地球岩浆表现的那样是缓慢上升，那么，为什么它们如今在月球上就不再是如此呢？甚至更为重要的是，为什么月球岩浆大约在36亿年前会突然停止流动？为什么36亿年前在地球上就没有类似事件发生？若要突然制止这样的流动，就需要有与灾变大小相称的能量，这样，任何一个成功的地-月体系演化假说，都必须能对此作出解释。如果有任一月球岩浆，通过某些灾变性方式，是从月球内部涌出的，那么，其原因又是什么？

面对这些以及其它类似的问题，一些科学家宁可设想，月球的熔融是因为大约直到36亿年前为止，由于有大陨石降落到月面上的陨石雨所致。将此设想加以引伸，通过假设，36亿年前使月球熔融之大陨石的陨石雨，在那时也同样熔融了地球，就能解释，为什么没有其年龄大于36亿年的地球岩石。因为地球比月球大，所以在36亿年前，就能通过引力而成比例地吸引较大份额的、所假设的大陨石陨石雨，于是那时地球就完全地被熔融了，反之，月球上却只有月海被熔融。根据这一概念，地球和月球都大约在46亿年前形成的，不过地球是在36亿年前被完全熔融了的。当然，之所以在当时产生出所假设的大陨石之陨石雨的那一灾变的原因及其性质，尚未获得解答。

根据详尽研究，似乎可以认为，月球在其演化的早期阶段，曾受到过两类或两种方式的灾变：（1）高温和（2）震荡。对月球实际物质的进一步详尽分析，揭示出像这样的高温震荡该是多么复杂。所存在的角砾岩、玻璃、飞溅滴落有玻璃的月面、无数衬有玻璃的环形山及岩石面以及振裂岩石和矿物碎块，都在说明撞击作用的复杂历史，可以列入的象征有，冲击物和被冲击物可从液态而变化到固态，这意味着还存有因撞击而产生的气体、液体或固体质点所组成的云雾。此外，有些月面小丘或土丘的高铁、镍含量，说明撞击天体部份是铁或镍铁（例如参见Tatsch, 1974a）。

有趣得很，看来这种月球上灾变的复杂性，这某一陨石演化中，竟有其相对应的情况。在陨石形变间似乎存在有某些差异，有的是由于比较突然的动力事件而发生的，而其它似乎是起因于长期稳定的应力作用（即，由于某种方式持续了很长时期的应力）。

在碳质球粒陨石中比在普通球粒陨石中出现的比例较高的震荡效应表明，碳质球粒陨石的成生物质所占据的带，比普通球粒陨石的更接近于母体的表面。橄辉无球粒陨石产生于震荡与热的结合。这种结合的效应可能产生于：（1）两个母体陨石天体的相互碰撞；（2）陨石对一个母体天体表面的撞击；或（3）在母体天体上的火山作用。

已发现的有关陨石中存在着早于地球变形的其它证据是：（1）在铁纹石开始析出以前，在陨石母体天体中的较微变形，可能产生宏观的、随后为铁纹石所装饰过的双晶；（2）在铁纹石析出时，来自体变的应力，可以产生出类似部分退火牛曼线（Neumann lines）那样的显微尺度较换双晶，它们又为后来析出的陨磷铁镍石所装饰，并伴有晚期生成的新牛曼线；和（3）当母体天体是碎块，以及在空间中的碎块间发生碰撞时，就会产生更加激烈的变形（Tatsch, 1977d）。

但有证据表明，不是在所有陨石中都会发生这样情况，例如，虽然震荡压力在某些陨石最后被俘的情况下似乎起有重要作用，但在某些方陨铁中，看来不曾发生这种情况，因为它们不具备已被震荡甚至足以使它们脱离月球的证据。有些“未受震荡的”方陨铁，可能来自“未受震荡的”小行星（Tatsch, 1977d）。

地-月体系存在有早期灾变可能性的另一迹象是，月球上有极其大量的玻璃。假使未

曾有过早期事件使月球脱水，这些玻璃就会变成品质构造。这一不仅使月球表面脱水而且脱去大多数其它挥发物的早期事件的性质是什么？为了找到这个及有关问题的答案，我们必须弄明白有关早期地-月体系的一些概念和假说。

## 关于月球演化的传统概念

关于月球的早期历史，还存在许多重要的岩石学的遗留问题。但最好先扼要叙述一下，普遍接受作为弄清月球标本的几何学、力学、热力学和化学等基础的第一级月球演化程式（例如参见Ridley, 1976）：

a. 月球过去在大约46.5亿年前的一个较短时期内（约1亿年）曾均匀增长，随着足够的增生能的积聚，使数百公里的外壳熔融。

b. 熔融外壳的变冷，发生在高陨石流期间，变冷的月壳不断地被打碎和搅拌，而进入于熔体内部。

c. 最后，使岩石圈变厚且坚，足以经受强大的陨石爆破，而下伏的熔融带却平静地变冷且经受了分离结晶作用。

d. 由于高密度铁镁矿物（钛铁矿、橄榄石和辉石）相对较重斜长石较轻，而导致重力下沉，发生化学-矿物的成层作用，形成超基性的辉石质月幔和富斜长石的月壳。

e. 在过去46亿年到39亿年期间，坚硬的月壳受到巨大陨石的撞击，而凿成很大的月海盆地。

f. 在39亿年以前，在月球表面发生过陨石流，充满了50公里直径的环形山之后，陨石流减少了。

g. 在过去46亿年至39亿年期间，内部热源（K、Th、U）向月面集中。

h. 在过去38亿到31亿年期间，这引起了月幔的部分熔融，以产生出月海玄武岩。

i. 月海玄武岩浆上升入于巨大月海盆地，这可能是由于盆地处在月壳的薄弱地区的缘故。月海盆地的形成与月海玄武岩的成生之间，似乎存在有短暂的关系。

j. 当产生的放射热抵不上表面丧失的热时，月球岩石圈的逐渐增厚，致使局部熔融带沉陷，而深入于月幔之中。

k. 大约在31亿年前，月球岩石圈变得太厚不容月海玄武岩大量上升到月球表面，因而使月表的活动基本停止。

细心的读者不禁会注意到，许多关于这方面的设想都被包含在上述月球演化的程式里了。这种情况说明，为什么会建立起如此众多的假说，皆试图把所有关于月球的观察证据，都放入一个有关月球起源、演化及现今性状的简单而不自相矛盾的概念之中的原因。

## 地-月体系演化的假说

甚至对地-月体系作一简短描述，也能揭示出它是个高度复杂的体系，而且具有极不寻常的演化历史。例如，就有那样的既支持“炽热的”月球、又支持“寒冷的”月球两者兼有的不合理的证据。更准确地说，看来，最少有部份月球是作为炽热天体而开始的，但在其历史的早期已变冷，并自此之后一直保持为寒冷的。

为解释各式各样看上去是不合理的证据，于是对地-月体系的演化提出了许多假说。这些假说中有些是综合的、包括一切的假说，涉及过去46亿年间整个的地-月体系。有些

假说，仅涉及有限时期内的某些特殊或复杂的问题。还有一些假说，则只涉及地-月体系历史中的一个比较小却很重要的方面或单项复杂事件。

大多数地-月体系的演化假说，都是以下列一方面或几方面的问题为目标的：(1)月球的反侧与正侧有很大差异的问题；(2)月球上含有极其大量的、直径达数百公里的各种大小的环形山问题；(3)月球矿物的总体，大约是在地球上矿物产生的同一时期中产生的问题；(4)月球和地球矿物的演化的环境，多少具有根本性差异问题；(5)这些环境差异看来包括岩石在其形成时所受到的在压力、温度和应力梯度等方面的变化问题；以及(6)月球的总密度，大致与地球的上地幔相同的问题。对于任何一种成功的地-月体系演化的假说，都必须以所有的这些方面为其主攻目标（例如，参见Tatsch, 1974a 对这些问题方面的讨论）。

现在看来，月球是通过下列三种基本机制或过程之一而成为地球的卫星的：(1)可能通过来自许多较小天体的增长，而在地球附近独立形成；(2)当月球作为来自太阳系其它部份的闯入者，而接近具备捕获条件的地球时，被俘获的；或(3)通过某种某样的分裂或分离从地球分出而成。下列各节将分别探讨这三种观点。

### 增生假说

许多天文学家、物理学家、地质学家和数学家（以及对所有这些领域的各个学科都熟悉的科学家新团体）都宁愿设想，月球是我们这个体系的固定部分，而且与地球同生发展。至于地球和月球同生演化的精确细节，在如今成立的有关地-月体系演化的假说中，一般还没有详细说明。概括地说，到宁可简单设想，月球是以某些方式由冷的太阳尘埃和气体的云增生而成的（例如参见Llrey, 1952; Alfvén, 1954）。

因为经常把尘云看作是均质的和宇宙丰度的，上述假说就留下未经解释的月球低密度(3.3)问题。有几种火成方案，通过提出：金属尘质点的冷“焊接”，将会引起这些密微核部物质的原始增生，从而留下富含硅酸盐的云尘边缘。用这种方式来防止发生这一问题。

纵然这些方案可以接受，在所有简单增生假说中，还涉及其它一些问题。举例来说，像地球和月球这样的两个简单增生的天体，在整个增生过程中，必须在它们的大小和轨道能量之间，维持敏感的平衡。由于地球增生得更重更大，并且密度也大得多，它就有两种理由在任任何时候都对月球施加更大的引力牵引。其结果是，生长较缓慢的、密度较低的月球，必须从某些方式，不断地以恰好的精确速度，来解决获取动量问题，以维持它的独立，并防止它落入于地球的（如其动量增加的速度过慢）或者落入于太阳的轨道（如其动量增加的速度过快）（例如参见Tatsch, 1977d）。

### 俘获假说

关于月球一度曾是来自太阳系中其它部分来的闯入者但被地球所俘获的假说，是以月球的低密度和倾斜的轨道为根据的（关于这方面的讨论参看Tatsch, 1974a或1977d）。简单地陈述，月球的密度(3.3)只与小行星带的外缘部分相似，而实际上其密度同任何推测的小行星起源的石质陨石的密度都不相称。对此问题领域的详细讨论见第十九章（小行星、陨石和玻陨石）。

俘获假说提出的另一问题是，月球的质量比现在所有的小行星加到一起的质量大约还要大97% (Tatsch, 1977d)。因此，月球如果是来自小行星带的话，那它就是这种小行星当中最大的天体了。

此外，俘虏假说需要有那么一个比较大而重的原始月球，以某种方式射入一个高度偏心的轨道，然后以可能性低的方式为地球所俘获，之后再次摆动而进入一几近圆形但为倾斜的轨道（例如参见Tatsch, 1977d）。实际上，涉及几种低可能性作用方式在时、空上并列的这种灾变事件的机制，是难以设想会在太阳系的一般力学和几何学的规律中产生出来的。简单俘虏说的绝大多数拥护者现在也承认，月球过去运行的轨道。与它被俘时地球的轨道是相似的。

乌赖是月球俘虏说的最坚强的拥护者之一（例如参见Urey, 1952, 1956, 1959）。他觉得大部分证据都支持有一个“寒冷的”原始月球，并创造出一种假说，认为月球是一个，其总体成分类似于凝聚太阳星云的原始天体（Urey, 1956）。这种成分可以解释现今月球的密度以及它的内部低热力。乌赖从而认为，月球的年龄约为46亿年，其现今的月形可以解释为撞击作用的结果。在月海中，这样的撞击便引起了在浅部的熔融。根据他的概念，月球是在地球附近形成的，从而简化了地球俘虏月球的力学和几何学。

虽然，新近获得的化学证据表明，月球的成份既不是太阳的，又不完全是原始的和未经分异的，但乌赖的假说中有许多组成部分是有吸引力的（例如，月球是很古老的以及是在地球附近形成的）。

从基本须要考虑到的问题方面，特别是从力学和几何学上来看，如果地球曾突然俘获了月球，那么海洋潮汐的结果以及固态地球的构造运动的表现，都必定会在今天的地质构造中有所记录。实际上，所发现的一些证据是支持这种情况的。例如，有些观察家认为，距今10到20亿年的前寒武纪叠层石表明，那时的海洋潮汐有很大的振幅，说明当时围绕地球运转的月球有可能距离地球较近（例如参见Tatsch, 1974a 对这一可能性的讨论）。

阿尔文（Alfven, 1965）曾提出，月球原来被俘入于反向轨道。这就使它接近地球，直至达到地球半径2.89倍的罗歇限度（Roche limit）时为止，这里的潮汐力超过了月球的引力。其结果是，月球失去了很多砂、石和较大的岩块，这些实际上是被地球的潮汐所牵引，把它们从月球表面上剥落的。根据阿尔文的假说，由此可以阐明地球的部分，甚至全部的硅铝壳。在失去如此大量的物质到地球上去之后，地-月体系的角动量就被逆转。这就使月球采取一个正向的或与其它天体同方向运行的轨道，而退回到目前月球附近的位置上来。当月球退回且遭到撞击期间，尚未被地球俘获的剩余灾变碎屑就对月球轰击并造成环形山。大多数学者感到，如果发生阿尔文所设想的这种事件，那么它发生的时期，必须早于当时地壳和月海似乎都已经结晶了的36亿年前。尽管如此，许多学者还是感到阿尔文关于地壳来自月球的假说，对于过去所设想的月球来自地球的假说（即太平洋）来说，是一个有趣的对照。

## 分裂假说

由于月球的总成份和密度大致与地球构造圈的相等，几种地-月体系的演化假说，都已考虑到月球有可能与地球的原始构造圈有成生联系。其中最有名的是分裂假说，它认为月球是从地球的太平洋一侧被扯出去的，而太平洋就是来自那次灾变事件的一个伤疤。

月球起源于地球的分裂，最早是由查尔斯·达尔文 (Charles Darwin) 的次子，乔治·达尔文 (George Darwin) 提出的。简单地陈述，达尔文(1898) 主张，原来本是巨大的原始行星地球，只以四小时为一周期而旋转的；论述由此而在其自由振荡与太阳潮汐间引起谐振；证明它发展成为一个巨大的凸起；主张其结果是，它变得不稳定，而最后抛出一个或多个形成了月球的碎块。

后来，其他科学家提出，太平洋盆地是由这次灾变产生的伤痕，并提出地球上残留的硅铝壳发生破裂，大陆地块 漂移开来 (参看 Moore, 1963:15页以下)。在其它两篇分析 (Tatsch, 1974a, 1977d) 中，对此讨题有更详细的讨论。

这一基本分裂假说，解释了月球的低密度，以此为条件，应设想分裂发生于地核业已形成之后，因为月球的密度和地球的上地幔的密度几乎相同。然而，分裂假说却没有其它的优点 (Tatsch, 1977d)。

欧基夫 (O'Keefe, 1970及其早期的著作) 提出的分裂假说的方案，涉及原始行星地球分裂为一个接触-二元体系，这与在某些星系中所观察到的情况相类似。根据欧基夫假说，应当连续有许多物质和角动量的损失，以形成原始月球。高温会使得地球和月球贫于碱质和挥发物质。因为阿波罗的最新成果业已表明，月海的岩石严重贫于碱质，许多学者感到，欧基夫假说值得重新审查，特别是因为最新成果表明，看来月球在许多方面更加与地球相似之处，并不太象球粒陨石。对此问题将在第十九章 (小行星、陨石和玻陨石) 中讨论。

## 专门用于地-月体系演化的假说

除上述的传统假说外，特别是最近五年间由于越来越多地美国和苏联登月球表面所获得的资料可以利用之后，又提出许多有关月球演化的其它一般假说。这些假说在别的地方也有所讨论 (例如，Tatsch, 1974a, 1977d)。简单地说，直到目前为止 (1976年后期) 还不曾对地-月体系的起源、演化及现今性状提出过完全令人满意的假说，但是扼要地研究一下可从作者的二元原始行星假说推导出的、关于地-月演化程序的某些结论，会是合宜的。

## 从二元原始行星假说推导出的地-月演化程式

将二元原始行星假说运用于早期太阳系所得到的结论之一是，有原始地-月体系存在，此体系基本组成：(1) 一个原始地球 (一半径为5400公里、经过分异、并分裂为八分体的天体)；和(2)地球原体的六个八分体已被分裂为八分体的相似天体 (一个如在第一章中解释过的)。在图2—1中，已示意地表示出这个原始地-月体系。示于D处的两个八分体所采取的是双曲线轨道，并且自此局部体系中失落 (Tatsch, 1974a, 1977d)。

作为涉及地球原体的六个八分体 (示于图2—1中A、B和C的位置上)，当它们围绕原始地球旋转时，由于碰撞的结果，就演化出了后-原始地-月体系。随后的形象表示在图2—2中。

现今的月球和地球都是从上述体系演化而来的。关于地球是如何演化的细节见于后续章节。在这里只须提一下，地球原体的碎块，在原始地球自5400公里左右的半径增长到如今的大小的过程中，起重要作用就足够了。当球体半径为5400公里的五个八分体，增生到

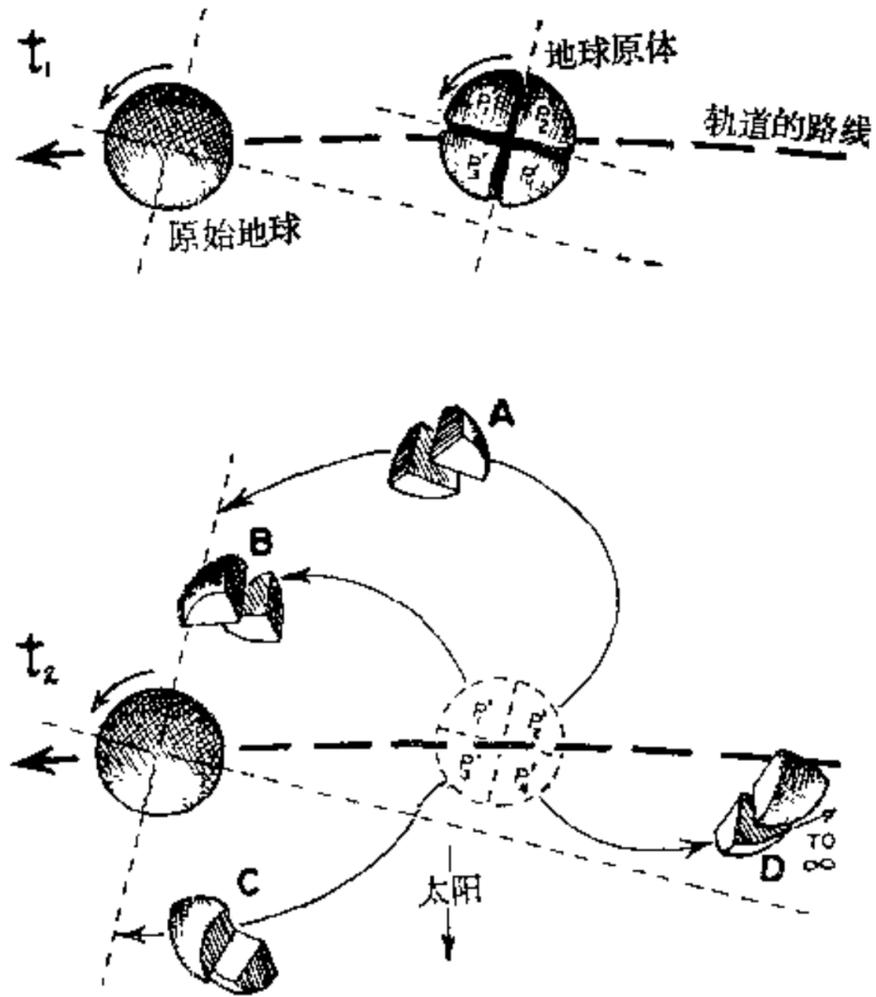


图 2-1 示意图,表示二元原始行星假说所解释的原始地-月体系基本要素。在D处的两个八分体采取双曲线轨道,并从局部体系中尖落  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

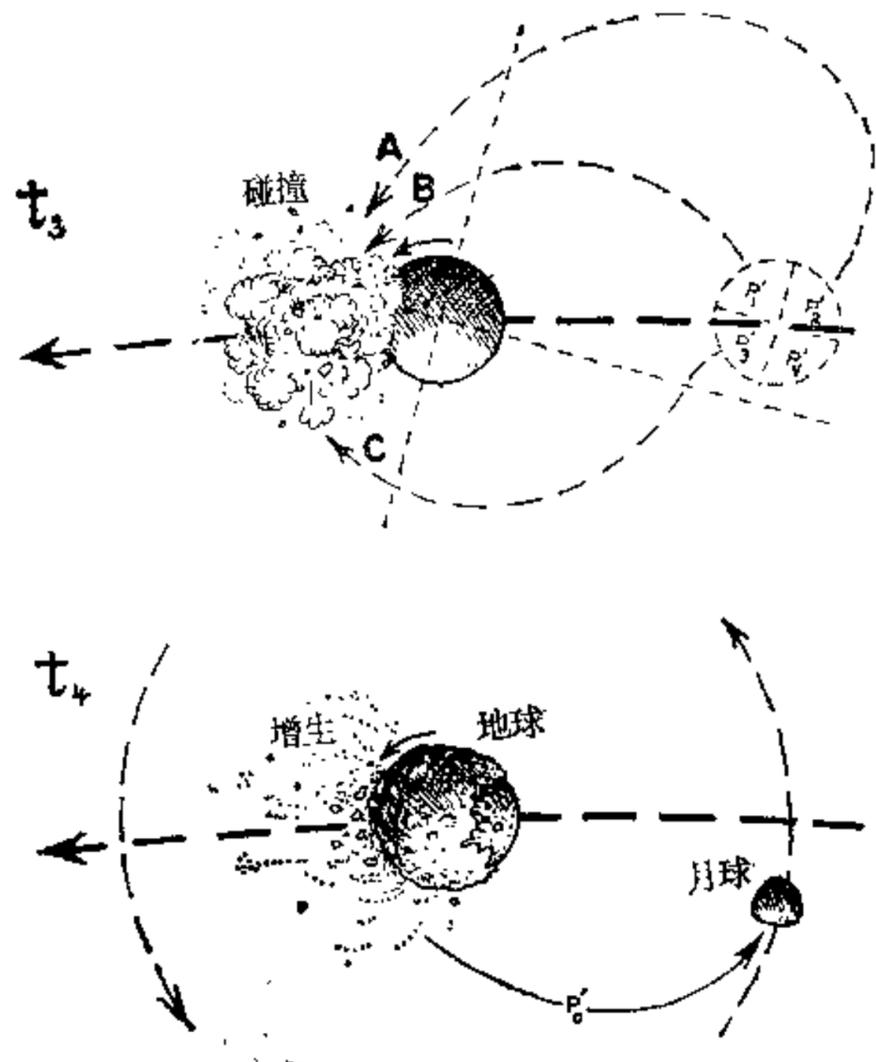


图 2-2 示意图,表示二元原始行星假说所解释的涉及“月球”八分体和地球原体的五个“地球”八分体的碰撞

一个大小相似的球体上时，将使半径增加到差不多等于现今地球的半径。

根据二次碰撞的程度和所采取的碎裂作用，可从原始地-月体系演化出、示意地表示在图2—2中的、两类基本的月球模式：(1)“八分体状碎块”月球模式；及(2)“二次增生的”月球模式。

### 八分体状碎块月球模式

在八分体状碎块月球模式中，当地球原体的月球八分体，一旦从这个碎裂着的天体的半稳定环境中分离出来的时候，由于它忽然碰到本体不再受地球原体的内部部分的高热和高压的约束时，于是它就受到一变化极其快速的环境的支配。这种情况在它以前内部的熔融部分方面（即月球八分体的向点<sup>①</sup>）是特别重要的，这些部分几乎立即遭受到快速变冷及高度还原的环境。

除了可以预期到月球八分体熔融部分的流动及随后的固结之外，可以设想，当它们在围绕原始地球的轨道上运行时，由于随后与地球原体的其它部分相碰撞，而会产生严重的振动。这种振动有助于从月球八分体移除其它的三个“角”。在八分体状碎块月球模式中，当发生更多的振动、与月球八分体的液态及可塑部分的进一步再调整、以及象那样的体系中的那种环境里可预期的重力滑动、碎裂与整平作用之后。月球八分体就变成了现今的月球。根据均质球形八分块的重心只不过从同体积球体的重心移动13%这一事实，就可得出只需要少量的这样的振动、流动、滑动和其它形式的整平作用的概念。对于象地球原体这样的遭受分异的天体说来，这种位移就更小了。

如果对所产生的八分体碎块（或“变形八分体”）月球进行分析，发现它的某些突出特征当联系对月球所观察到的证据时，可能是有意义的：

- a. 基本三轴形体。
- b. 密度分布不均匀。
- c. 平均密度大约与地球的上地幔的平均密度一样，即约为3.3。
- d. 内部构造不象地球的那样是成层的，而更象地球的构造圈。
- e. 年龄约为46亿。
- f. 正侧满布月海。
- g. 背侧月海较少。
- h. 背侧上比正侧上具有一个多少有些不同的基本构造。
- i. 小而不正常的磁场，如同是经受严重振动后，原先半径为5400公里的磁化行星的变形八分体中的剩磁。
- j. 明显的碎裂及月震的格局。
- k. 月球磁场显示有一个快速冷却及高度还原的环境。

### 二次增生月球模式

在二次增生的月球模式中，现今的月球是从相当于地球原体的一个原始八分体中较轻的、未熔融的外缘部分演化而来的，其演化按两个基本步骤进行：(1)通过地球原体八分体的屡次碰撞，而产生的较比完全的碎裂；及(2)这些物质中的一部分经再增生而形成

<sup>①</sup> 也即奔赴点——编者注。

月球。

归根到底，八分体块状碎块月球与二次增生月球的主要区别，只不过是发生在后来变成月球的地球原体的那一部分中的原始反复碰撞及碎裂作用的程度有所不同罢了。

我们没有必要考虑，地球原体可供使用的那些部分，在月球自其中形成以前，所遭受的无数次反复碰撞和碎裂作用。为了提高本章继续进行分析的水平，我们只要考虑反复碰撞与碎裂的类型及程度，因为这些会产生出类似于通过再增生而形成现今月球假说提出之前，乌赖（1959）所设想的那些天体。

用于月球演化的较高级、多次碎裂及重复增生的模式，与变形八分体或八分体状碎块模式，主要有两方面的突出区别：（1）与地球原体相当的那一部分，在多次碎裂及重复增生模式提出的月球演化场合中的再增生发生之前，都被较高度地碎裂了；以及（2）由多次碎裂及重复增生的模式所提出的月球演化，会形成一个完全由次生增生物所组成的月球，而由变形八分体或八分体状碎块模式所提出的月球演化，则只会为地球原体的一个八分体，提供变形条件和一些在那里增生的增生物。

这里无须对这些区别的细节及重复增生月球的特殊特征进行研究。就地球构造圈的演化而论，不管是用八分体状碎块模式或是用有如二次增生这样的高级模式来解释现今月球的产生，都是无关紧要的。在这两种情况下，经过研究所推定出的月球，基本上是一样的（Tatsch, 1974a）。它和构成地球构造圈的物质之间的成生关系，也是一样的。

### 第三章 构造圈式地球模式

构造圈式地球模式可称为，依据构造圈的力学，与几何学来描述地球演化的一种模式。根据二元原始行星假说，它基本由半径为5400公里的原始地球所组成，其上增生有地球原体的五个八分体，简单说来，正如第一章介绍过的，这一基本5400公里半径的原始地球，是已破碎成八分体的分异了的天体。图3—1示意地表示出这个天体。

中心代表一固体核，它有一未曾明确规定的半径，长度介于0到数百公里之间。围绕这个内核的是一外核。外核之外，有注以S的原始地幔的八个八分体包围着外核。热力以及可能还有挥发物从破裂带F向外的优先流动，引起了I处的岩浆活动。

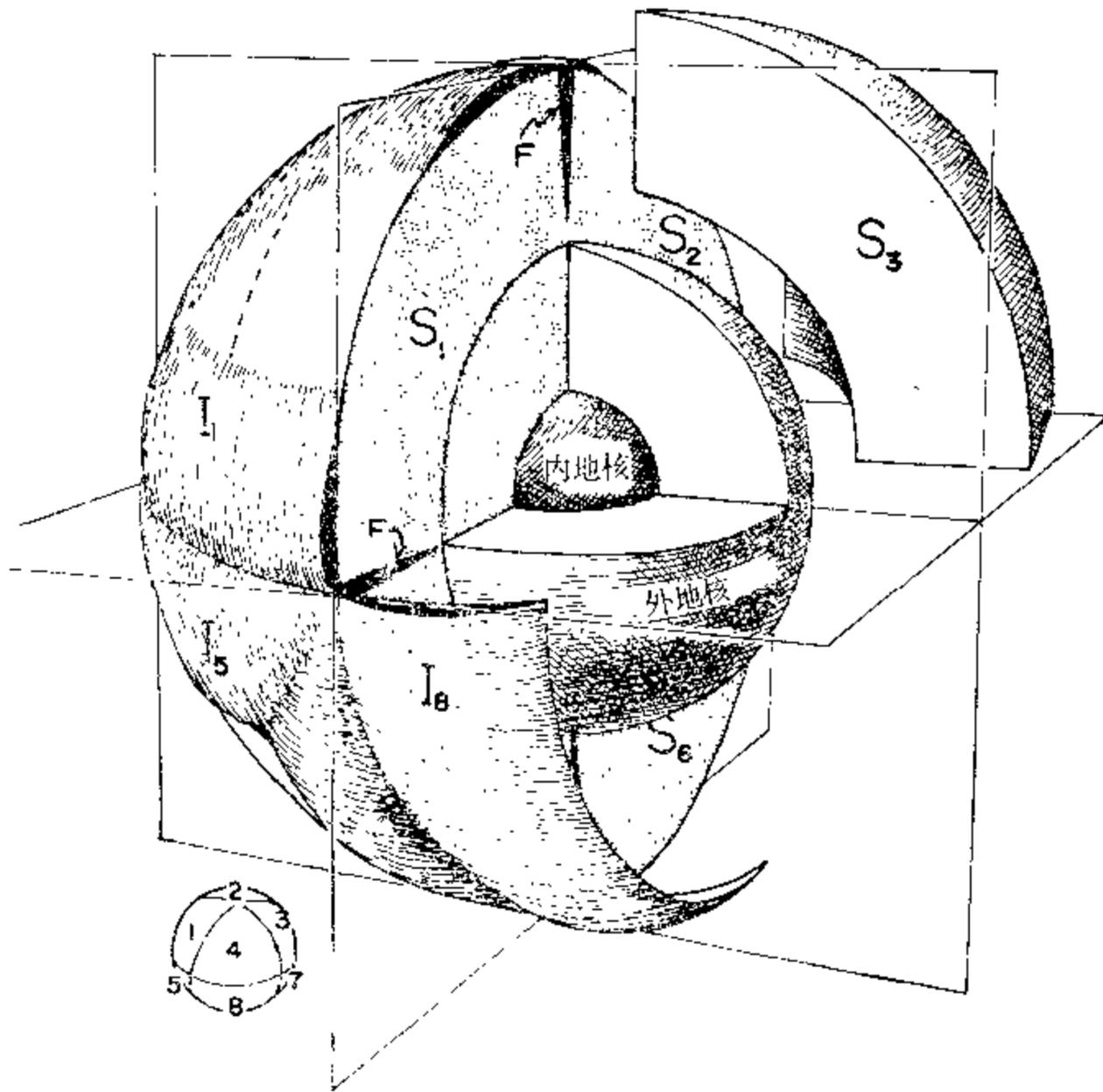


图 3—1 示意图表示，按照二元原始行星假说的基本5400公里的原始地球 (J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

原始地球具有如此的一个体积，以致若在其上附加同等体积的5/8时，则所产生的天体就有一个约为6371公里的半径，即实际地球的半径。

由此就得出原始地球的半径约为5400公里。因而： $1\frac{5}{8}V' = V$ ，其中V'是原始地球

的体积， $V$ 是现在地球的体积。于是，因为 $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ ，我们就可以得到

$$1.625 (R')^3 = R^3, \text{ 由此}$$

$$R' = (1.625)^{-1/3} R = (1.625)^{-1/3} (6371 \text{ 公里}) \approx 5400 \text{ 公里}。$$

从上述可见，5400公里是原始地球的半径，也是地球原体及此模式中使用的下构造圈的半径。构造圈的厚度约为6371减去5400，等于971公里，或大致约为1000公里。虽然这里分别以5400和1000作为在此模式的F构造圈的半径和构造圈的厚度加以应用，但必须指出，从二元原始行星假说而导出了基本构造圈式地球模式的不同参数。对这些参数原始值的限定，从而设定了特殊的假设。这些数值就是多少依赖这些特殊假设而产生的近似值。

因为原始地球被三个互相正交的中面碎裂为八分体，它的表面就为三个互相正交的大圆破裂带所包围，每个带的长度大约为 $2\pi \times 5400 \text{ 公里} = 34,000 \text{ 公里}$ ，或三个带的总和大约为： $3 \times 34,000 \text{ 公里} = 102,000 \text{ 公里}$ 。

### 基本5400公里原始地球的几何学-力学性状

为了分析基本5400公里原始地球的几何学-力学性状，应假设原始地球的基本性状在于力图使其本身平衡到最小能量的状态。可以把这个体系的驱动机制表示为，在其初始状态中所固有的不平衡能量的函数。最简单地说，这基本上包括两个因素的组合：(1) 基本5400公里原始地球的地球原生地不平衡形态所固有的势能；和(2) 来自三个互相正交的带向外发出的优先热流以及可能还有优先挥发物流的局部自通道外流的能，这三个互相正交的带，沿着将原始地球分割为八个八分体状下构造圈岩块的三个平面的地表迹线受到引张的部分是“活动的”。

如果把这个基本模式的驱动机制运用到原始地球上，则此性状将取决于为此模式所固有的某些几何学-力学的限制。这些限制中的比较简单的限制，可以依据几类平衡，或是采取最小能量状态的趋势等方面进行概括。在下面将对此进行讨论。

旋转平衡。示意图3—2表示的是根据旋转平衡的论点出发，所料到的原来5400公里原始地球基本性状是同构造式的地球模式的基本驱动机制相对应的。基本上，有三维固有的旋转自由度，受到模式的结构所抑制，被逼强行，顺沿着八分裂隙而产生了三个互相正交的平面。

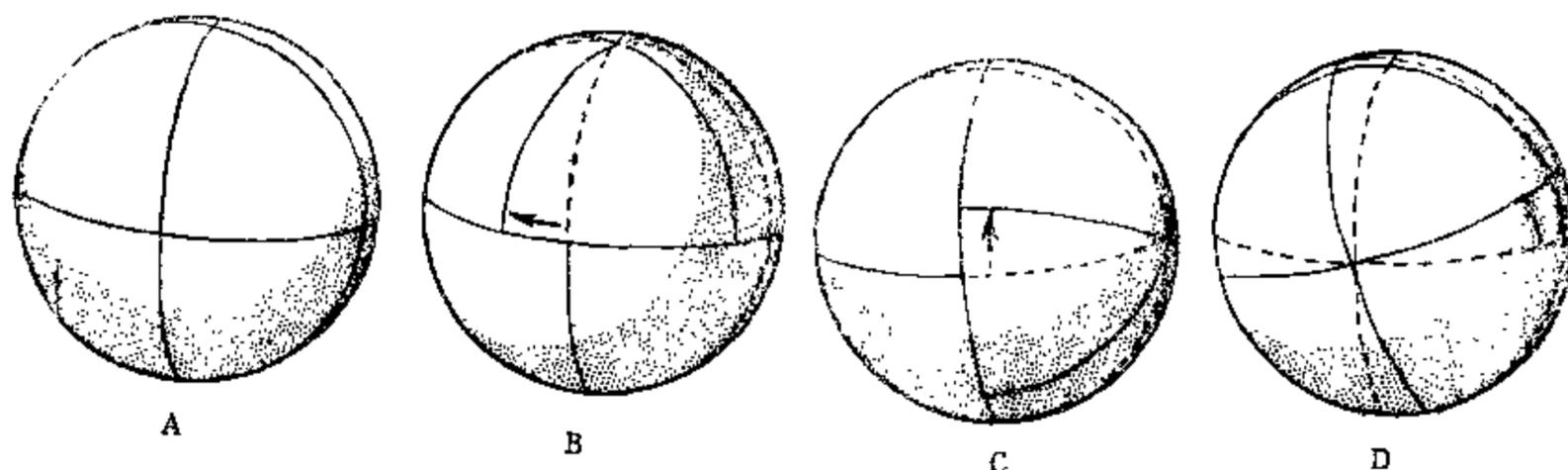


图 3—2 示意图表示，从旋转平衡的论点出发所料想到的，与构造圈式地球模式的主要驱动机制、相对应的原来5400公里原始地球的基本性状

(J. H. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

图3—2的A表示，在顺着原始地球三个互相正交的破裂面中的任一级裂面 都无旋转的情况。图中B表示顺着水平裂面有旋转。图中C表示，顺着本初子午线裂面有旋转。图中D表示顺着正子午线破裂面有旋转。

从图中可见，旋转运动在三个互相正交的破裂面的任一面中 一经开始，则在其它两个面中的整个旋转就会受到限制，直到在第一个面里发生有 $n\pi/2$ 的净旋转时为止，在这里， $n=0、1、2、3、\dots$ 。

径向直移平衡。图3—3示意地表示，从径向直移平衡的论点出发，所料到的原来5400公里原始地球的基本性状是同这个模式的主要驱动机制相对应的。这些球状八分体就模式的中心而言，可自由地作径向运动。根据作用于全球规模的静力调整原则，在任一时间里，都约有半数的八分体相对于基本5400公里半径而下沉，另一半则上升。这里所设想的径向运动的数量级，约为厘米/年级，最大幅度为10公里级。

横向直移平衡。图3—4示意地表示，从横向直移平衡的观点出发，所预料到的原来5400公里原始地球的基本性状是同这个模式的主要驱动机制相对应的。在此模式的约束范围以内，一些八分体(正常情况为2或4)可以顺着三个互相正交的破裂面作横向运动。横向运动的数量级约为厘米/年级，最大幅度为10公里级。

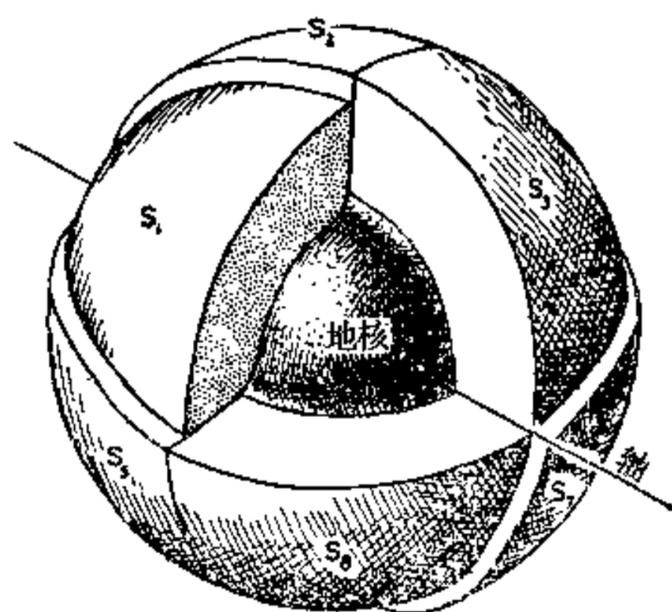


图 3—3 示意图表示，从径向直移平衡的观点出发，所预料到的同构造圈式地球模式的主要驱动机制，相对应的原来5400公里原始地球的基本性状  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

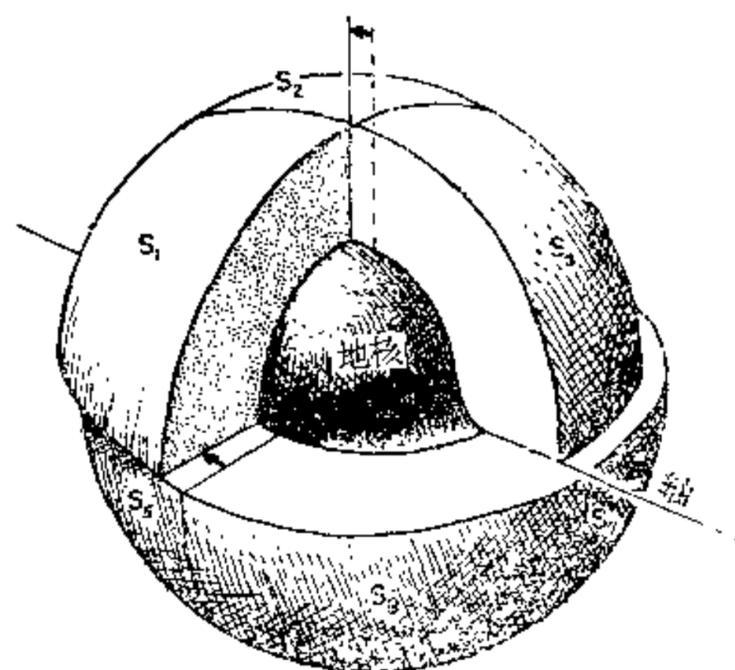


图 3—4 示意图表示，从直移平衡的观点出发，所预料到的同构造圈式地球模式的主要驱动机制，相对应的原来5100公里原始地球的基本性状  
(J. C. Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

单个八分体的运动。图3—5示意地表示，所预期的原来5400公里原始地球单个八分体的基本独立的性状。在此模式的约束范围以内，既同作为模式整体的自由度分离且区别开来，则每个球形八分体对于其各自的重心，皆有几种自由度。由于受到模式的约束，使其本身主要表现为顺沿着三个互相正交的破裂面上相间而出现引张和压缩 (Tatsch, 1977d)。在长期稳定的情况下，这一效应大致是振动的效应。当其它条件都相同时，在任一特定的时间里，可约在半数的八分体接触面上看到引张，而在另一半上看到压缩。这样，由于基本5400公里原始地球每个巨大圆环的长度，都约为 $2\pi \times 5400 = 34,000$ 公里，或全部三个巨大圆环的总长度为 $3 \times 34,000 = 102,000$ 公里，那么，这个原始地球就大约有 $1/2 \times 102,000$

=51,000公里的表面破裂型式应属引张，而同等数量的表面破裂应属压缩（或中性）。由于此模式始终处于自身的平衡过程中，那么，处于引张中的特定块段的位置就趋向沿着5400公里原始地球表面上破裂体系的102,000公里的长度上，大体上不断地进行“漂移”。因而，从外界观察者的角度来看，这一受到引张的特定块段，就像是顺着102,000公里的线状体系作旋迴性但非周期性的运行，原因是原始地球的平衡必定以同样的（即旋迴性但非周期性的）方式来进行。引张块段的这种旋迴性但非周期性的位移速率，是厘米/年级的（Tatsch,1977d）。

在给定时间内，未受引张的块段被认为是处于压性或中性状态。这样不论是压性的或中性的块段，都位于相继的张性块段之间，因而也会以旋转性但非周期性的方式沿102,000公里长的、下构造圈的破裂体系进行位移。此论题将在第八章（地球的深源地震）、以及作者对太阳系性状的补充分析中，作进一步的讨论（Tatsch,1977d）。

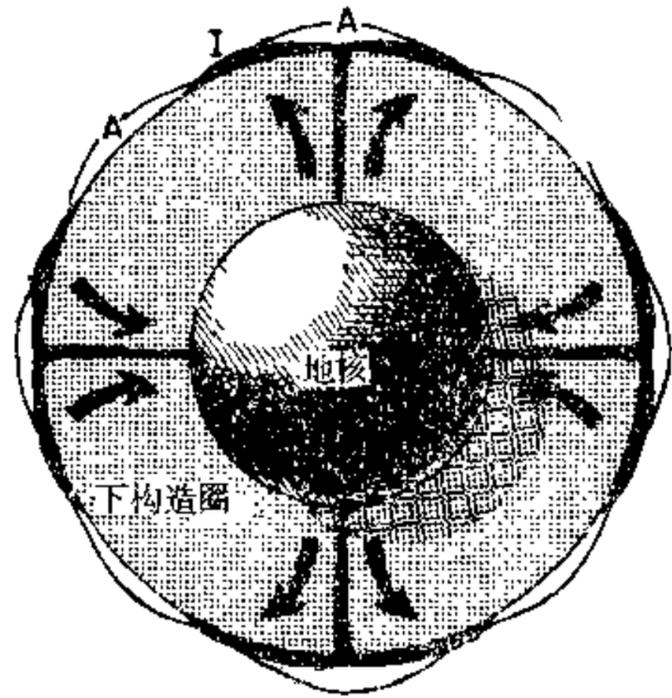


图 3—3 示意图表示，根据基本构造圈式地球模式所预料到的，原来5400公里原始地球的各个八分体的基本性状

(J.C.Holden 据作者在初版中的略图修改而成)

### 后原始构造圈的增生

可以设想，从基本5400公里原始地球演化为后原始地球，有三种基本演化型式，这取决于地球原体五个地球八分体在增生到原始地球上之前被破碎的程度（Tatsch,1977d）。这些型式是：(1)八分体状碎块型；(2)多重碎块型；及(3)复合碎块型。现对它们扼要分析于下。

#### 八分体状碎块增生型

在八分体状碎块型中，地球原体的五个八分体，在增生到基本5400公里原始地球以前，并未完全碎裂（Tatsch,1977d）。在这种情况下，地球原体五个八分体中的每个的一部分，可能至今仍作为地球现在构造圈的未变化部分、或作为现存大陆地盾的地下部分而存在。在第七章（大陆的造山—克拉通构造）中，将扼要说明这种可能性。

在八分体状碎块型的情况里，后原始地球基本演化于下述两过程的结合：(1)增生到基本5400公里原始地球上的地球原体五个八分体的增生作用；与(2)过去46亿年间由此基本模式的驱动机制所引起的分异、变质、加工、岩浆活动及其它效应（Tatsch,1977d）。

在这方面，可以回想一下，此基本模式的驱动机制主要组成于（而且自原始时期以来就已组成于）两个因素的组合，每个因素在过去的46亿年间，都以大体可以预见的方式变化着。这两个因素是：(1)为基本5400公里原始地球在地球成生方面的不平衡形状所固有的势能；及(2)来自5400公里原始地球的基本八分体状破裂型式所形成的三条正交的

“地震构造岩浆带”向外发出的、优先热流以及可能还有优先挥发物流的局部从通道外流的能 (Tatsch, 1977d)。

与今后对地球构造圈在过去46亿年间演化的讨论和分析一样，这里有必要回顾一下，在半径为6371公里的均质球体内，在正常情况下，内部5400公里部分的惯量，至少要超过971公里“外壳”的60%。因此，在很多场合下，可以认为，此模式内部5400公里的不平衡惯量，至少超过（而且过去总是超过）外部971公里的60%。对于一个象实际地球这样的非均质、分异的天体来说，这个惯量因数，当然超过，甚至远远地超过60%。当联系到如在第八章（地球的深源地震）、第十七章（大陆漂移和极移），以及第十八章（板块构造）所谈到的有关所观察到的实际地球某些性状型式的情况，而讨论此模式的某些力学和几何学的性质时，则此数字的意义就更加明显了。

### 多重碎块增生型

多重碎块增生型与八分体状碎块型的主要区别在于，地球原体的五个“地球”八分体，在增生到基本5400公里原始地球上之前，被裂碎到什么程度 (Tatsch, 1977d)。例如，如果在增生前裂碎达到十分彻底的强度的话，那么，就不大可能证明，现今大陆地盾上的任何一个实际的地表岩石，与地球原体的任何一个原生八分体的未变质部分相等同。在第七章（大陆的造山—克拉通构造）及第十章（侵入作用与喷出作用）里，将对此详加讨论。

### 复合碎块增生型

可将复合碎块型视为八分体状碎块型与多重碎块型间的过渡型式 (Tatsch, 1977d)。这个模式能占整个系列内无数位置中的任何一个位置，或作为极端例子而包含在八分体状碎块型及多重碎块型之中，随着增生到基本5400公里原始地球上之前的地球原体八分体所假设的特殊破裂程度而定。

把平均值的极限加以引伸，就可使复合碎块型包括这一或二种极端情况，由此可使三种型式分别减少为一种或二种型式。在本书中，将把这三种型式作为独立的、不同的类型加以讨论。总之，在由此三种型式所引伸出的地球模式中的突出区别都是假想的而不是真实的；但通过分别探讨这三种型式，会使分析比较全面，并且可能比较容易领会。为此，包括第六章（构造圈）在内的以后章节，从规定的两种极端模式所包含的各种模式中，我们认为在全部系列中，实际上有三种模式而不仅是一种，其中包括其终极各点。这种分析研究的效果在第七章（大陆的造山—克拉通构造）和第十五章（大陆与大洋）中将更加明瞭。在这些章节中，是根据存在于过去46亿年和36亿年间地球构造圈内的、以及存在于其它地球构造圈的造山—克拉通演化的关键时期内的，大小最相近的后原始次克拉通地块，来分析现今的大陆构造的。

### 后原始地球

从二元原始行星模式推导出的后原始地球，主要由三个部分或实体组成 (Tatsch, 1977d)：(1) 一个活动-平衡的，或动态的5400公里原始地球，它们经受过分异，并由三个互相正交于中心的面，将其基本上碎裂成八分体；(2) 一个上复的构造层，它们主要由地球原体五个破碎八分体的残留物组成，这些残留物大致以1000公里的厚度增生到5400公里原始地

球上，在增生期间，由于此模式的驱动机制而不断受到变化及（3）与原始地球的破裂体系相伴生的三个互相正交、活动的“地震构造岩浆”带。因为当原始地球被合并为后-原始地球之后，它便失去其个性，从此以后，将称之为此模式的下构造圈，或下构造圈部分。

图3—6是后-原始地球的示意图，表示构造圈内岩浆活动与增生作用的最早期效应。示意地表示出在A处的增生作用，在I处的岩浆活动。用S标明下构造圈的八分体状岩块。示于图3—6中的处于早期演化阶段的原始地球的半径约为5450公里，即在所设想增生的971公里中，只约需50公里，就能使半径达到其现今6371公里的数值（Tatsch, 1977d）。

对于由此模式所引起的有关地球增生的某些意义，将在下一节中加以概括。

### 构造圈式地球模式的某些基本结论

这里最好列出基本构造圈式地球模式的某些重要结论，以便使读者在以后章节中对它们进行详细讨论之先，可以对其性质及范围有一全面的看法。

a. 因为1000公里厚的增生物，是在相当长的时期里添加到原始地球上去的，从而，各种各样的、或是作为各自的或是作为全球性和区域性“岩壳”的增生碎块，无论对于其它增生碎块、或是对于组成目前地球构造圈的基本5400公里原始地球来说，都可能保有相当大的活动自由。而且，这样的活动自由，最有可能顺沿着优先固流限的不同剖面、表面和岩壳上觉察到。在以后的章节中，将对此加以讨论，可以认为其中有一些就是在构造圈内的“波导”、“低速层”以及类似的特征及现象。在这方面最好是回顾一下，若以1米/年的速度增生到1000公里厚，需要100万年的时间；那么，如若速度为1厘米/年，则需要用1亿年的时间才能实现。

b. 地球破裂系统主要组成于下构造圈基本原始破裂系统穿过构造圈的投影。由于构造圈的不均一性，像这样的投影并不是通常的简单、放射状投影，而是更加复杂些（Tatsch, 1977d）。当其它情况都相同时，所确定的从下构造圈上一个“能源”点、穿过平均垂直厚度为1000公里的构造圈物质，而投射到地面上的位置，其“可能误差”大致是 $1000 \times \pi/4$ ，或约为785公里。这一“可能误差”数学的意义、其起因和大小以及此数值的变化都将在第六章（构造圈）中，当联系到地球构造圈在过去46亿年间演化的力学和几何学而对“活动锥”和“地震构造岩浆”带进行研究时，加以讨论。

c. 地球基底的深断裂系统，不论在内部（下构造圈）或在外部（构造圈），都是连续的和全球性的。在此模式驱动机制及八分体状破裂的几何学与力学的制约下，外部的基本上是由于内部而引起的必然后果（Tatsch, 1977d）。据此，地球的深海槽似乎应该形成

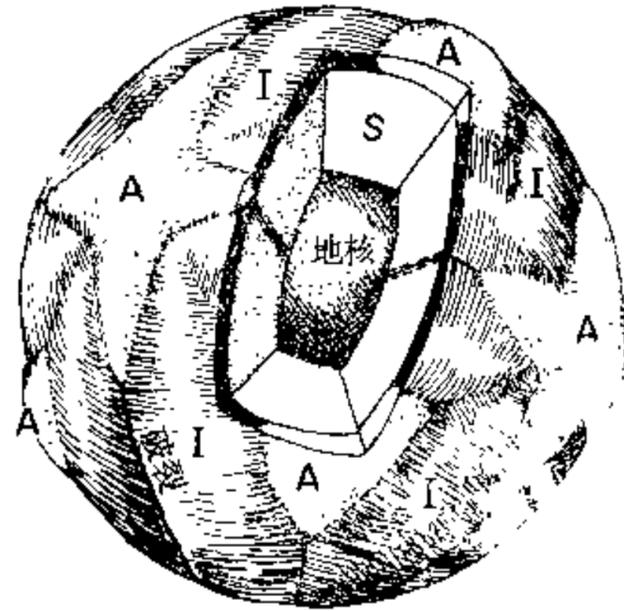


图 3—6 后-原始地球的早期发展阶段示意图，表示原始的岩浆流动与增生作用的联合效应

A 表示增生作用；I 表示岩浆活动。S 标示下构造圈的八分体。这里表示的早期原始地球的半径约为5450公里，即在所设想的971公里的总增生中，大约只需50公里就使其半径增长到其现今的6371公里

(J.C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

一个与下构造圈三个互相正交的大圆带相同的全球型式。

d. “活动”区（即，新岛屿、新山脉、地震海岭和区域断裂线、新火山等等）大致分布在内部下构造圈部分的基底断裂面之上。由于热流优先固流限的以及热流的平面、表面、带及岩壳的效应，当然不能指望这些“活动”区域，会直接位于下构造圈的断裂系统之上。在后面的章节，如第七章（大陆的造山—克拉通构造）、第十六章（海底扩张）及第十八章（板块构造及相关的影响全局的过程）中，将对此详细讨论。

e. “不活动的”或“石化”地区（即，较老的山脉、较老的岛屿、较老的火山带、海底平顶山、无地震海岭等等），是可以从先前下构造圈的破裂系统的投影位置来认识的。对于外部的观察者来说，这些石化、或不活动区域，似乎对于目前活动区会随时间的推移而“漂移”。在正常情况下，这种漂移既包含平移又包括旋转，两者不必须在时间成线性关系（Tatsch, 1977d）。此外，也可以比较准确地说，是下构造圈的破裂系统，而不是地面上的显示从那里“漂移”了，或者更为确切地说，地表显示与下构造圈基底断裂系统二者都已漂移了，这一切都取决于人们在进行分析时采用的是固定基准还是活动基准。

（Tatsch, 1977d）。当然，在这两种情况里的分析结果都是一样的。而且，根据这一基本模式，通过反推程序可见，此“石化”的特点，大体在空间上平行于、在时间上可推导于“活动的”或现在的特点。无须说明，这样的空、时关系，不必定是时间的线性函数。对此在以后适当的章节里，如第七章（大陆的造山—克拉通构造），第八章（地球的深源地震）及第九章（地热活动的全球格局）中，将详加讨论。

f. 当其它情况都相同时，任一特定地面显示（例如山脉、地壳裂岭系、火山带等）的年龄，可以通过测量此特定地面显示自其成生的下构造圈断裂面的现今位置已经“漂移”的总距离，作出粗略的估计。因此，就不会过份惊奇阿帕拉契—加里东（晚古生代）的造山运动在地理上自最近的下构造圈断裂面大约移动了 $30^\circ$ ，即1厘米/年的漂移，大致约与每3亿年 $30^\circ$ 的相当。对此将在第七章（大陆的造山—克拉通构造）、第八章（地球的深源地震）、第九章（地热作用的全球格局）、第十章（侵入活动与喷出活动）、第十一章（地球形态学）、第十二章（造山作用）、第十三章（地球的重力场）、第十六章（海底扩张）、第十七章（大陆漂与极移）、第十八章（板块构造及与其相关的影响全局的过程）以及第二十章（积成的地球及其未来）中，加以讨论。

g. 最古老的地质构造（或地表显示），如前寒武纪地质，现今所占据的位置与下构造圈的基底破裂体系相同一。更准确地说，它们或是：（1）如是稳定的，则与下构造圈地表八分体的中心相同一，或是（2）如果是不稳定的、活动的、或正处于断裂过程中的，则与下构造圈地表八分体的边缘相同一。大约在2亿年前的南美—非洲“地盾”，就是后一情况的例子。这一假想的超级大陆，可能有如图3—7所示，已被裂开和分离。在第十七章（大陆漂移与极移）里，将对此详加讨论。

h. 可以设想最新的地表构造，会以类似的方式而座落在被投射到地表的、三个互相正交的、下构造圈断裂面的地表迹线附近。

i. 存在于后原始地球中的几种“不平衡的”条件之一，是由下述事实造成的，即，地球表面的一些部分，在后原始地球历史的各个时期中，已被笔直的并列于构造圈破裂系统的表面显示之上。这一位置的后果，将在下一章中加以讨论。

i. 来自为下构造圈地球成生不平衡状态所固有的势能所引起的应力松弛以及其它的

平衡效应，是地球深源地震的基础。对此将在第八章（地球为深源地震）中进行讨论。

k. “地幔对流”可能是由沿着为下构造圈断裂系统所提供的构造格局而流出的优先热流所激发的。根据此模式的概念，地幔对流是此基本模式驱动机制的“地表显示”。这样，不同于大多数其它假说，构造圈式地球模式的概念，不要求地幔对流作为海底扩张及大陆漂移的动力。到不如说，地幔对流是可以作为驱动海底扩张和大陆漂移的同一驱动机制的地表显示的这一基本模式从而推导出来。对其力学与几何学的讨论见于第十六章（海底扩张）和第十八章（板块构造与相关的影响全局的过程）。

l. 侵入与喷出的岩浆活动，是由自下构造圈断裂体系向外流出的优先热流（可能还有挥发物流）所激发的。对此将在第十章（侵入作用与喷出作用）中进行讨论。

m. 可以采用从下构造圈断裂系统流出的优先热流，提供基本的原动力与稳定的结构，来维持长期稳定的地磁发电机。对此将在第十四章（地磁与极性倒转）中进行论述。

n. 海洋与大陆的对踵并列关系，基本上是因为下列两个因素的缘故：（1）下构造圈八分体状岩块与此模式中心的辐射状直移运动有关系；及（2）全球规模长期的静压调整成均衡作用。在第十五章（海洋与大陆）中将对此进行讨论。

o. 从全球规模看，例如断层线、裂谷-海岭、山带、海底平顶山链等，通常应显示出大致平行于地表格局的趋势为横向构造所交切的特点。当其它条件都相同时，其结果就趋向形成暗示有羽状、网格状及弧状构造格局的地表显示（Tatsch, 1977d）。这些反映出地球下构造圈岩块与地表之间的直移与旋转，它们最有可能是沿构造圈内优先固流限的那些平面、表面、岩壳及地带发生的。对此将在第六章（构造圈）和第十八章（板块构造与相关的影响全局的过程）进行讨论。

以上是基本构造圈地球模式的一些“一级”结论。对这些和其它一些结论的细节，将在后面适当的章节里进行讨论。此模式的“二级”结论越出了本书的范围。不过，关于这些“二级”结论的性质及范围的简要讨论，都包括在其它较深入的分析中（例如，参见Tatsch, 1973a、1973b、1973h、1973k、1974b、1974c、1975c、1976a、1976b、1977a、1977b、1977c）。

## 从基本构造圈式地球模式所预测的全球地表显示

基本构造圈式地球模式的假设之一是地球上无论过去或现在的地表特征和现象几乎都

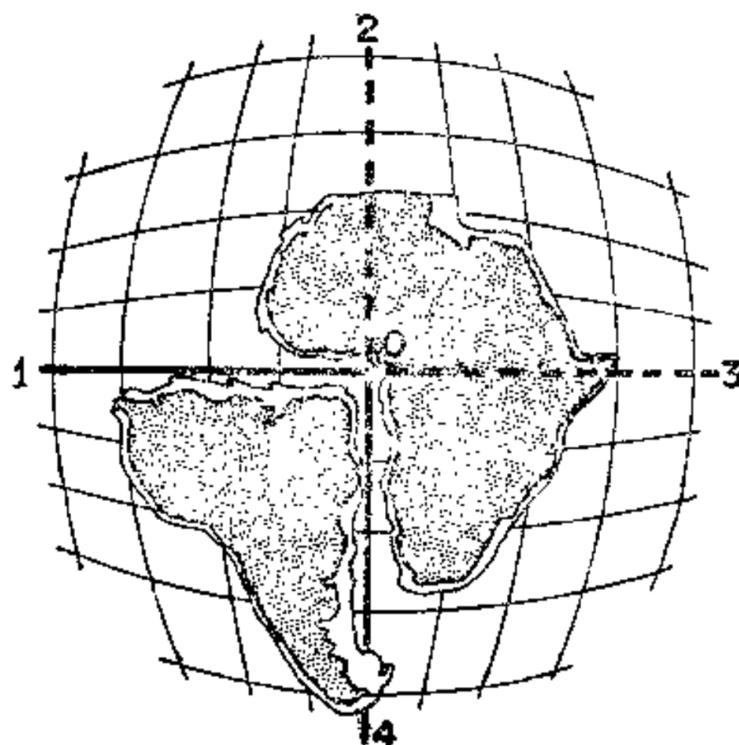


图 3—7 示意图表示，在中生代将非洲及南美洲分裂开来的构造圈式地球模式的两条“地震构造岩浆带”。当时 1—0 和 4—0 区段是“引张”的，2—0 和 3—0 区段是压缩的或中性的。网格线平行于中生代时期下构造圈破裂体系的地面显示，并不平行于地理的赤道与子午线

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

是由于约在46亿年前，自原始地球形成以来，就以存在于地球之内的一种简单机动驱制的基本后果。至于这些地表显示，在过去46亿年间，是如何确实作为地球构造圈性状的后果演化而成，将在以后的章节中进行讨论。不过，最好先在这里列举几项，以便读者可以根据构造圈式地球模式、按构造圈式的方式所介绍的那些地表显示的一般性质和范围作出评价：全球和区域规模的构造运动与造山运动；海底扩展；全球和区域规模的热流格局；地球磁场及其包括有旋迴性但非周期性的反向变化；地球重力场；火山活动；造山运动；大陆地盾、活动带、破裂系统、裂谷和海岭的发展；大陆的裂开、分离与漂移；地震与全球、区域规模的地震格局；重力异常与全球、区域规模的大地水准面的格局；热流异常与全球、区域规模的地热格局；电导异常等等。

在进行讨论以前，最好先考察一种地表显示，以尝试对比复杂问题提供初步解答：有什么可观察到的证据能以证明衍生自二元原始行星假说的构造圈式地球模式可以实际上代表地球？如果是可以的话，那么又如何能对所假设的八个下构造圈岩块的现今位置加以验证和定位？

为了回答这个复杂问题，可以对所得到的地球的有关地表总特征的几组调查资料之一的初步分析进行研究。有一种资料表示出活火山的位置。由于火山看来是由热力诱发的，又因为它们某种构造圈活动的地表显示，所以，可以根据此模式来设想，它们与形成下构造圈破裂系统的三个互相正交的大圈的投影有联系。

从而，作为构造圈破裂系统地表显示的位置的初步近似估计，我们可以对地球上活火山的分布作出三维最小二乘方分析。考虑到从下构造圈穿过不均匀物质自1000公里投影的可能误差，我们可望地球上几乎所有的活火山，在地面上都将位于距下构造圈破裂格局的辐射投影的约 $1000 \times \pi/4 \approx 785$ 公里的距离之内。

当完成了所提出的这种分析之后，就能看出 (Yatsch, 1964a)，大约有93%的活火山都属于此模式所预测的地带之列。更准确地说，这些火山似乎都构成三个大圆带于以下六个点上相交的块段，可以暂且把这六个点称为此基本构造圈式地球模式现今地表显示的基本“构造圈点”，它们是：北纬 $55^\circ$ ，西经 $165^\circ$ （阿留申群岛）；南纬 $55^\circ$ ，东经 $15^\circ$ （布维岛）；南纬 $5^\circ$ ，西经 $85^\circ$ （加拉帕戈斯群岛）；北纬 $30^\circ$ ，东经 $5^\circ$ （直布罗陀）；北纬 $5^\circ$ ，东经 $95^\circ$ （孟加拉湾）和南纬 $30^\circ$ ，西经 $175^\circ$ （克马德克群岛）。

由于从下构造圈到地面投影的可能误差，大约是785公里/111公里/度数 $\approx 7^\circ$ 。因而，在试图定出在纬度或经度上精度高于 $5^\circ$ 的构造圈点的坐标时，就不适用。上述括弧中的地名（阿留申群岛、布维岛等）是用以表示各点大致范围的相关的标志区域，而不是该点的确切地理位置。在以后的讨论中，所正常使用的这些相关地名，只是为了方便；但要理解，这些点只不过是构成着地表下1000公里下构造圈在地表上的布局的六个点的投影罢了。

为了简便起见，前面两个点（阿留申和布维岛）可用来表示基本构造圈式地球模式现今地表显示的“构造圈极点”，其它四点（加拉帕戈斯、直布罗陀、孟加拉与克马德克）可用来表示能大致规定出基本构造圈式地球模式现今地表显示的“构造圈赤道”。

图3—8表示，从上面推导出的、叠置在实际地球突出地理形象全球投影之上的、构造圈式地球模式现今地表显示的“构造圈坐标系”。图中三个互相正交的大圆（ACDEA、ABDEA和CBFEC）是规定下构造圈破裂体系的三个相似大圆的辐射状投影。在A、B、C、D、E和F处的每个交点都是正交交切，而八个三角形中的每一个（CBA、CDB、

CED、CAE、FEA、FDE和FBA) 都是等边的球面三角形(也就是说, 所有的边和角都等于 $90^\circ$ )。在构造圈的表面上,  $90^\circ$ 大约等于10,000公里。在下构造圈的表面上,  $90^\circ$ 大约等于8500公里。

图3—8中用Q Q Q Q 标明的大圆ABDEA, 是下构造圈赤道的投影, 并大体规定了基

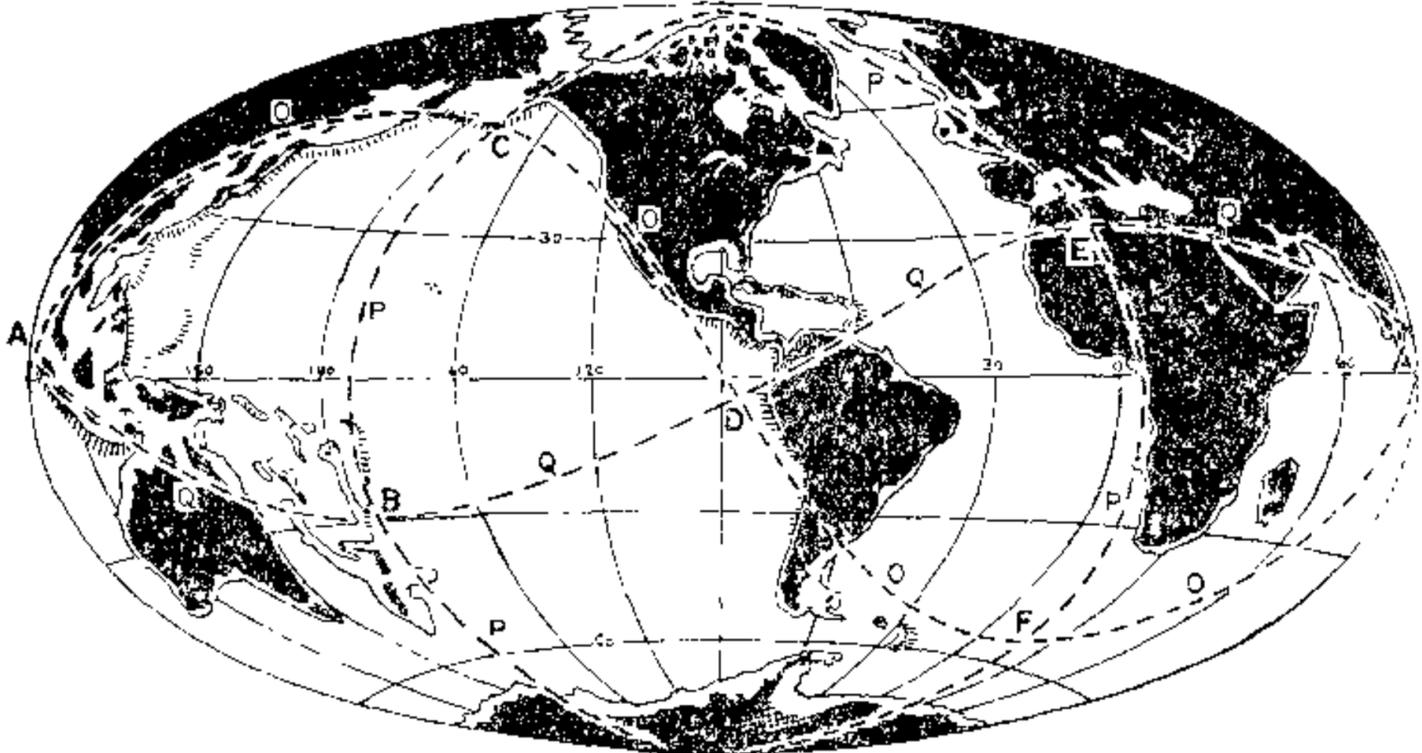


图 3—8 叠置在实际地球全球投影上的、基本构造圈式地球模式现今地表显示的、试用“构造圈坐标系”

(J.C.Holden 据作老初版中的略图修改而成)

本构造圈式地球模式现今地表显示的构造圈赤道。用P P P P标明的大圆CBFEC, 则是下构造圈本初子午线的投影, 并大致规定出, 基本构造圈式地球模式现今地表显示的构造圈的本初子午线。同样, 用O O O O标出的大圆ACDEA则是下构造圈正交子午线的投影。

以构造圈坐标体系为根据, 对地球地表显示进行谐调分析是特别有用的。按照这个模式, 地球的表面显示是由构造圈诱发的, 从而对于构造圈坐标系是谐和的, 但对于利用其它模式进行谐调分析时所正常使用的自然地理坐标系而言, 就不那么谐和了。这个体系也用来作为进行坐标变换的基础, 这对在下面一些章节里所进行的分析是有用的。这些章节是: 6、构造圈; 7、大陆的造山-克拉通构造; 8、地球的深源地震; 9、地热作用的全球格局; 10、侵入与喷出活动; 13、地球的重力场; 14、地磁与极性倒转; 15、大陆与大洋; 16、海底扩张; 17、大陆漂移和极移; 和18、板块构造与相关的影响全局的过程。

## 第四章 作为行星的地球

本章旨在为读者提供有关地球内部性状的全球概观或观点从而能为各种地表现象的观察及测量提供方便。因此，希望读者从全球的规模观察时，能对地球内部性状的力学与几何学、及其与地面现象，在过去46亿年间无论在空间上或时间上可能存在的各种关系方面，得到比较充分的了解。

为了便于说明，现在研究三个方面的全球地表特征和现象：（1）对地球现今特点和现象的全球观点；（2）46亿年前地球上最可能存在的地表特点与现象；以及（3）从地球最早期的地表特点到现今地表特点的演变。因为似乎大约在36亿年前，地球的演化时期有一个间断，所以对此时期的研究将分46亿年—36亿年以前、和36亿年以前到现在两个阶段来进行。

### 大陆的基本构造

长期以来科学家们就已认为，所有大陆的基本构造都大体上是一样的，最简单的分析表明，大陆似乎是通过在一个中心地盾或地核上的增生而成长的。当然，还不清楚到底是什么原因会使它遵循这样一种准-条理性的增生成长型式。此外，许多最新的假说并没有回溯顾及远至36亿期间的观察根据来证实大陆是从中心生长如此演化的。

从全球规模观察从大陆的构造看来：（a）造山带都呈长长的直线状，也就是说，其增生成长可能是顺着巨大圆环的块段发生的，而不同于在球面上小圆区段的直线状构造；

（b）大陆是古老的，而且看来至少自36亿年前，甚至有可能自46亿年前就已开始从中心向外地增生而形成了；（c）最古老的造山带是最接近陆核的中心，但是在离开中心较远的地方，可能会叠加有一定数量的不同时期的造山带；（d）一般来说，在过去46亿年期间的大部分时期中，造山带似乎都曾以旋迴而非周期性的方式，在全球规模的基础上活动；（e）放射性元素在大陆岩石中的集中，暗示发生有地幔的化学分异或相当的作用；以及（f）这样的分异作用的可能性说明，大陆区可能主要是起源于地幔的，而且一如我们现今所知，原始地球可能完全没有地壳（例如参见Tatsch, 1977d）。

上面指出的造山-克拉通构造，在某些大陆中保存相当良好（例如，参见Douglas, 1969; Wgonne Edwards, 1969; Drake, 1970; Martin, 1969; Hurley, 1969, 1973, 1974）。一般来说，所看到的是，古老前寒武地盾依次经过断裂要不就是为后期造山作用的叠加而被改造的长直线状造山带或地槽带所围绕。至于为什么在任一大陆内的造山带都是直线状的、并且属于不同时期、但其延伸却遍及全球，且在过去46亿年的大多数时间里，它们都发生过旋迴式的但非周期性质的活动？所有这些问题都未获得解答。

若将其作为地球内部性状在地面上的显现来考虑，则大陆的造山-克拉通构造表明，它在极长的、也许长达36亿年、甚或46亿年的时期里，就是一种不平常的有规律性的性状。

## 地球的地震活动性与地震

普遍认为，地震发生在不同深度的地壳与上地幔的范围之内，其深度可达不小于800公里，是由于各种不同现象及作用的结果（例如，参见Tatsch, 1977a）。许多与地震有关的断层并不延及地表，而且甚至严重地震的震中区，也没有提供涉及地下地震现象的任何证据。在许多场合下，地震震动的本身只不过是与地震相联系的地球内部性状的地表显示而已。

就全球规模看来，根据通常的分析，地球的地震活动性与地震的分布，似乎都没有形成有规律的型式。但通过使用专门技术，近年来，在阐述明显的全球地震机制的详细情况方面，取得了很大进展（第十章）。

将其作为地球内部性状的地表显示来考虑，则地震使人联想到，地球的内部性状乃是一个全球性机制所控制的，与大陆边缘、岛弧及类似的构造却完全无关，除非它们也是同一机制的地表显示（例如，参见Tatsch, 1977a）。

## 热流及其它地热活动

对于地热历史的详细描述，不可避免地只是一种粗略的推测，这是因为对地球内的热源分布，还不确切了解。然而，可以同全球规模的地球内部热力性状的地表显示联系起来，作出下列说明：

a、以球体对称为基础的热力地球模式与有关放射性元素在大陆地壳中比在洋壳中有较高集中的设想，是不相符合的。

b、通常认为，在莫霍不连续面之下，放射性物质的分布，在海洋之下与在大陆之下有些不同。

c、在大小程度与成分上有如地球这样的天体中，其热扩散是如此之慢，以致在过去46亿年期间，除沿优先热流的通道逃逸而外（第九章），极少的热，能够从750公里的深部更深的地方扩散出去。

d、通常假设，在大洋地球模式中放射能力的“任一合理的分布”，在其深部的实际有效导热率必须真正大于岩浆导热率的平均值；否则，整个地幔将被熔融。

e、通常推测，热传导被限制在地球上部的700公里。

f、有证据表明，地幔的热传导率与内部生热速度保持为一平衡的温度剖面。

从全球范围来看，地球内部性状是通过在地表上的热显示而自我揭示的；但还未能清楚地了解内部性状与地表热显示之间的确切关系，这或许是缺乏全球性热流资料所致。如果可以作出概括的话，那就是近代的造山作用地区是与该地区中的高热流率互相关联。

## 侵入作用与喷出活动

从全球范围的侵入作用与喷出活动的观点来考虑地球内部性状的地表显示时，最好把侵入作用与喷出活动当作代表着地幔物质或好像是产生于深位构造运动的。这种作用包括：火山作用，在大陆区及大洋区中玄武质暗色岩的产出，地幔在地壳裂谷带的上涌，岩基、岩盘及其它侵入体在过去46亿年间的大部时期中的侵位。

许多不同时期的与在世界上不同地区的火山岩与深成岩，似乎彼此互有成因关系（例

如参见Jahn等, 1976), 而且多方面的证据表明, 所有类型的岩浆活动, 都与全球的同时性相关(例如, 参见Vogt, 1976)。

从全球规模来看, 无论是洋中脊型或是阿尔卑斯超镁铁质带型的侵入或喷出活动, 都可以认为是一种单一全球机制的地表显示, 这一机制的特点是沿着深部控制的长线性地带, 具有旋迴性而非周期性的活动。更深入的研究表明, 无论是洋中脊型或是阿尔卑斯超镁铁质带型, 侵入作用与喷出活动, 在每次造山活动的旋迴中, 都形成一个完全的时-空序列(第十章)。

## 山脉与地槽

尚不完全理解存在于山脉与地槽之间的关系。但看来, 在它们之间可能存在着对立、再生的关系, 而且如果把山脉和地槽作为在过去46亿年期间全球规模的地球内部性状在地表上的显示而同时加以分析, 这种对立、再生的通性可能就更加清楚了。山脉与地槽最明显的共同特点是它们在全球规模上的线性。而且, 它们的存在似乎可远溯至地球历史时期中, 甚至从地球一开始就已存在了。

根据上述理由及其它分析, 当我们在全球规模上对地槽和山脉同时加以分析, 并将其视为“活动”的构造(也就是说, 不包括大西洋型地槽), 那么, 它们的起源与演化, 似乎是由一种在地球深部长期起作用的单一全球性机制所控制的(第十二章)。

## 地球的重力场及地球体的形状

如果说地球的重力场及地球的形状, 是过去46亿年期间地球内部性状的地表显示, 那么它们就应具有某些与该时期内全球规模的地球内部性状相关的特点。在理想的均衡平衡条件下, 所有的地壳柱, 在一定深度上, 都施加有相等的压力, 而且延伸到海平面以上的地壳的质量完全等于位于深部的补偿质量。关于这方面的论述已有很多(例如, 参见, Heiskanen and Vening Meinesz, 1958; Heiskanen and Moritz, 1967; Caputo, 1967; Woollard, 1969, 1969a, 1969b)。

从全球规模来看, 倘若认为地球是一动态天体、且其地表形象可滞后于其深部的内部性状而制订出适当的时-空“关系”, 那么, 地球的重力场及地球体的形状, 似乎就反映了过去46亿年间的地球的内部性状。举例来说, 必须对下述事实予以校正, 即: 假如而且只有假如作用是在一竖柱上的不平衡力等于0时, 理想的均衡平衡情况才能存在; 而在所有其它情况下, 柱体则趋向平行于不平衡力的向量方向上移动。很难想象, 在过去46亿年间的任一时期中, 会在客观上的动态的地球内, 出现绝对理想的均衡平衡情况。大多数的重力测量, 似乎也都肯定了这一点。但是, 可以指望存在着近似全球性或区域性构造的近似均衡平衡; 而且对比已有所观测, 不过与现今大陆的位置不相符合。重力平面的特征与大陆构造的独立性, 迫使作出结论, 即重力平面的特征起因于(1)地幔深部的密度差异(比上地幔中的所谓“低速层”还要深, 使均衡平衡能借此而有可能实现; 或起因于(2)为对流或为一类似机制所维持的密度差异, 在此情况下, 它们更易于出现在上地幔中。没有理由认为它们为什么不能是(1)与(2)的结合, 也就是说, 在构造圈内的不止一个深度上, 存在有固流限表面、圈壳及平面(第六章)。

根据目前的证据, 地球的重力场及重力平面的形态, 似乎是地球于过去46亿年间内部

性状的地表显示。但是，质量的分布似乎滞后于引起地球内部性状的力。因此，重力平面的形态应与构造圈的驱机制有关，而与地球内部性状的地表显示无关。

## 地磁与极性倒转

如果地磁与极性倒转是地球内部性状的地表显示，那么下列各点应与此相关。

a、地磁发电机已逐渐形成，并为过去46亿年间曾产生地球内部性状的同一的成因机制所驱动。

b、地磁场无论现在和过去，都与地球驱动机制的全球特征有关。

c、极性倒转可以用地球驱动机制的几何学与力学详细说明。

对观察证据的分析表明，上述的情况属实。因而，从全球规模来看，地磁与极性倒转是地球内部性状的地表显示。而且在过去46亿年间的大部分时期中，情况也都是这样（第十四章）。

## 大陆与大洋

为了确定大陆与大洋是否也是地球内部性状的地表显示，必须：（1）分析发生在大陆与洋底间的相互作用，和（2）研究过去46亿年间所可能发生的相互作用的类型，要特别注意全球性的和区域性的相互作用，对此可解释为有着深位的成因联系。

一般认为存在两类基本的、彼此截然不同的大陆边缘。从自然地理组合上说，它们的代表有大西洋型边缘和太平洋型边缘（例如，参见Drake, 1969）。就全球规模来分析，大西洋型和太平洋型边缘之间的差异，就地球驱动机制活动部分而论，似乎可能随位置而变，情况一如前面联系到地槽所论述的（第十五章）。

从全球规模来看，无论大洋或大陆的大多数地区，在过去36亿年间，都曾经受过多达100次的上升事件。因此，现今的大陆区并非总是大陆区，现今的大洋区也并非总是大洋区。由此可见，大洋与大陆可能是地球内部性状的地表显示。这些地表显示所达到的程度表明，地球驱动机制在过去46亿年间的大部分时期内，已使地球表面表现出，无论是在空间上或是在时间上全球各处的大陆与大洋都在不断进行着变化的情景。

## 地壳谷裂及海底扩张

为了确定地壳谷裂及海底扩张是否为地球内部性状的地表显示，有必要弄清这两种现象的确切性质及其可能存在的相互关系。基本上说，当长期进行全球规模的观察时，如果内部性状的地表显示表现为地壳的“引张”，看来就会在地球上的某些部分发生地壳谷裂。由于原先认为此类地壳谷裂只会产生在海底，就称之为“海底扩张”。但观察资料证明，洋壳谷裂有时也会伸入于大陆地区（例如，北美、中美、冰岛、非洲）。

因为通常把海底扩张作为“驱动力”的某类地幔对流的原故，所以李和麦克唐纳（Lee and MacDonald, 1963）在假设地球体的低热流及高热流之间的关系，代表着理想对流型式的上升流的前提下，试图通过比较引力势与表面热流的球谐分析来获得有关对流型式的证据。他们的成果是不能令人确信无疑的，主要是因为他们可利用的资料对于他们所试图对比的特殊类型来说，数量是太少了。随后的类似分析，除了提出海底扩张和假想的地幔对流可能是地球内部性状的地表显示之外，也不曾澄清所猜测的有关海底扩张与地

幔对流间的关系的性质。

来自世界不同部分的观察资料表明，地球的破裂型式都组成了正交的成对组合(Robert, 1976)。有价值的矿物及其它物质(如以铜矿床和地热矿藏二者为例)，就是沿着这些成对组合赋存的。在许多情况下，侵入体、喷出体及地震震中，都对此同一型式有所偏爱(第八章和第十章)。

地球的破裂体系有全球性的、区域性的及地区性的。全球性体系最深、最老也最发育(例如，参见Katterfeld, 1976)。破裂型式随深度而变得越来越复杂(例如参见El-Etr和Abdel-Rahman, 1976; Jerzykiewicz 等, 1976)。这说明，产生这些破裂的起因机制，都是长期存在的，并处于深位的，而不是短期的及发生在地表的。

根据现今资料的分析，可以说，地壳谷裂(以及作为地壳谷裂附属现象的海底扩张)似乎是地球内部性状的地表显示。此外，看来像这样的地壳谷裂，每当地球内部性状无论在何时何地只要在地面上产生地壳引张的现象，它都会发生(第十六章)。

## 板块构造与相关的影响全局的过程

如果“板块构造”是地球内部性状的地表显示，那么“板块”的性状，就应和全球规模的、长期的、球内部性状的某些特点相关。

简单板块构造概念的基本设想是一个地球的坚硬上层(岩石圈)是由地壳及地幔的最上部所组成。设想岩石圈具有相当大的强度、厚约100公里并座落或漂浮在第二个层圈即软流层之上，同时还设想软流层实际上不具强度，并从岩石圈的基底向下延伸到几百公里的深处。漂浮着的岩石圈又被分为巨大的板块或地块，它们都是以洋中脊、某些断层、以及像环太平洋体系那样的准-弧形构造的大体系所围限。这些板块在洋中脊处扩展开来，在断层处互相摩擦，并于岛弧及类似的构造处受到俯冲(例如，参见Drake, 1970)。

关于所猜测至少在过去46亿年间的部分时期内，就已驱动这些巨大板块在地球表面上进行浮动的那些力的来源及演化，在简单板块构造概念中，并不曾用任何详细的解释予以说明。对于在所有这一时期内曾经控制着这些力的几何学—力学的体制，同样也没有进行解释。

“板块构造”似乎至少是地球内部性状在过去46亿年间的部分时期内、在全球规模上的地表显示，但对于希望解释这些“板块”运动的任何一种概念来说，都必须完全而详尽地解释有关在这些板块之下、至少达到1000公里深度的地球的几何学—力学(第十八章)。

## 大陆漂移和极移

如果地球表面的一些部分正在进行着一定程度的漂移，而且如果作为这种漂移的结果、或除此之外还有旋转的地极也在游移，那么，这些效应就可能属于地球内部性状的地表显示。在地球内部是什么机制引起了大陆漂移与地极游移呢？这是一个新事物，抑或是在过去的16亿年间一直在发生着？如果是后者，那么在这些年代表里设法使大陆在地表上移动的又是什么呢？如果这种机制开始于最近，譬如说是2亿年前，那么，又是什么使它在那时才开始，而不是开始于3亿年、或9亿年、或29亿年前？大陆漂移的进行是否完全是随机的，抑或是按照准-有规律的型式？先于大陆漂移的分裂(如非洲从南美洲分裂开)

是由随机的力所诱发的呢？抑或产生于不出所料的那种有系统并非随机且长期起作用的全局驱动机制所诱发的一些准线状的力？

提出地壳中具有大陆规模的若干地块曾维持其形状，但它们彼此之间已发生相对移动的大陆漂移假说，今天已通过全球的古地磁，并以其它类型的区域的和全球性的研究分析作为补充，已相当完善地建立起来。根据目前的证据看来，可能在地球的全部历史中，大陆漂移和极移都是地球内部性状的地表显示。但是，地球内部的几何学和力学及其驱动机制的性质，尚有待于详细说明。

### 46亿年前地球的最可能的地表特征

当分析至少在过去46亿年的部分时期内，有可能由于内部性状的型式而导致现今地表特征时，最好先简要地研究一下，地球自46亿年前以及在此以后的各个关键时期内，可能存在的地表构形。

原始地球最可能存在的地表特征的构形，在很大程度上取决于采用那种假说去研究地球自太阳星云的演化（第一章）并解释地-月体系的演化，如果设想地球是自太阳星云增生而成，而且月球是在地球附近形成的（但不是地球的一部份），那么，地球表面除了具有与增生过程有成生关系的特征外，则缺乏任何其它的特征。如此，地面在46亿年以前将会显现一种大体上是均一的面貌。无论从地形（平滑）或从成份（相同）的角度来看，整个地面上都是如此。

反之，如果设想在46亿年以前，地表的成分和地形不是均一的，那么，内部和外部的再生作用自那时以后，至少是曾经发生过。否则，很可能这样的非均一面貌，就不会残存到今天。为了这种分析的目的，可以设想，46亿年以前的地面，除了与即时行星自太阳星云形成时所发生的增生作用有成生关系而产生的特征之外，是不会有其它特征的。

### 36亿年前最可能存在的地表特征

如果假设在46亿年前，地球上不曾有过明显的地表特征，那么这种地表特征正好是在何时最先获得的？又是什么原因使它形成？所获得的地面特征是通过外部的还是内部的性状？如果是外部的，它倒底是些什么？如果是内部的，为什么又刚好在它过去发生的时候就发生了，而不是更早些或更晚些？

如果地球的地表特征是在过去46亿年到36亿年期间由于外部原因形成的，那么这样的特征现在就不会是活动的，而是同前寒武纪地质相似，并将具有大约为36亿年的年龄。

如果地球的地面特征是在过去46亿年到36亿年期间得自内部原因，那么，除非36亿年以来，同样的作为起因的内部性状一直都在起着作用，这样的特征到如今就不再是活动的了。在这种情况下，有理由设想，内部的机制在过去的46亿年间大体上都一直在持续地起着作用（因为对地球来说，在36亿年前，地球内部没有可以使之活动的因素）。

在任何情况下，看来前寒武纪地质业已存在于36亿年前，但并不必定是以其现今的形态和位置，而是曾以一种或多种的形态或位置而存在，并且它们也不曾受到严重地加热或振动。

## 地球现今地表特征的演化

无论设想36亿年前的地表特征是由内在或外在的原因引起的，我们必须估量到，自那时以来地面上发生过一些什么问题。在过去36亿年间，存在不存在可以改变地表特征的外部诱发的灾变？如果是这样，那么它们是些什么、在什么时候发生、原因何在？如果在过去36亿年间并没有这种外在影响，那么，是否可以设想，从那时以来，地球表面的一切变化，都是由地球内部性状引起的。

为了回答关于如今地面特征演化的这些及其它有关问题，必须对现在及过去的地球内部性状进行全球性的分析。现在已有好几个国际科学团体都致力于这样的分析（例如，参见Drake, 1976）。

如果把地球看作是一个地球实体，那么大多数过去的及现在的地球现象，都是过去46亿年间地球内部性状的显示，但对于作为起因的内部性状的几何学和力学以及根本驱动机制的性质，仍有待于详细说明。正是作者的假说，由二元原始行星假说所推导出的构造圈式地球模式，对未明确规定的几何学与力学、并对驱动机制的性质都提供了答案。本书的目的之一，就是为了对此详加解释，并把它们和其它关于地球上部1,000公里，即本书称之为地球构造圈的演化假说一起来进行研究。

## 第五章 地球的地壳

莫霍不连续面将地壳与构造圈的其余部分分离开来，莫霍面是地壳与地幔的分界面，这里地震波速有明显的增高。本书把地壳视为一全球性实体，以便着重强调作为长期起着控制作用的、全球性体系的、构造性状的概念。

大陆区地壳的平均厚度为35公里；大洋区的约为5公里。在这两个区里，地壳都以成层的板-块构造为特征，它们在所有深度上具有连续和分段连续的边界。

在某种意义上说，地壳显示出地球内部性状的全貌。当从全球规模并结合不同年龄的岩石来考虑时，地壳就揭示出过去46亿年间地球构造圈演化中有关时、空变化的许多情况。在地壳的不同剖面里，存在着明确的差别。大陆与大洋的地台，同褶皱的构造带有所不同。近期的褶皱构造带，也与古老而受到剥蚀的褶皱构造带有所区别。陆地和陆缘海与大洋也有所差异。过去一度曾是大洋的地区，如今可以是陆地，反之亦然。

所有这些不断变化着的地壳类型，都突出地说明了，地球内部性状长期以来都在自始至终地变化着。这些差别的最有力的突出例子，有莫霍不连续面深度的变化、以及沉积盖层厚度对固结地壳厚度的关系。例如，亚洲太平洋沿岸的山根比起亚洲内陆区的山根要浅一些。还有，地壳的厚度从亚洲的内陆区(65—70公里)到它的边缘区一般也都在逐渐变薄。

其它显著的地壳差异也出现在岛弧地带、东欧地台的地盾区(如乌克兰和沃罗涅什地块)以及地中海褶皱区。单独地来考虑，这些地壳类型表明，构造圈在不同的深处具有不同的性状。总起来考虑，类似的地壳类型则说明，有一全球性的控制作用在控制着构造圈性状。

在喀尔巴阡山脉、科佩特山脉以及地中海造山带的某些山系中，找到地球上一些最厚的地壳。在这些深厚的体系内，由地壳最大厚度所揭示出的最大活动性，并不集中在造山带的轴部，而是有点朝向前渊。当从动态时-空格架的角度来观察时，这些构造看起来就宛如褶皱的台向斜的波浪状位移体系，因为山脉的生成总是朝向前渊，这一体系就为最强的活动线的移动所创造出来。在这些以及其它类似的体系中，莫霍不连续面的深度总是随着地盾的深度而减小，说明莫霍不连续面以上的地壳，与其以下的地幔的性状之间，有着密切的关系。

在对地壳进行讨论时，最好想到，至少10%的地球没有通常所说的地壳层。这种缺失地壳构造的例子有二：(1)如在意大利的伊夫雷亚地区，这里的地幔看来已被“暴露出来”；以及(2)在某些构造岩浆活动带中，这里岩浆地幔物质普遍涌出地表，例如，在某些大洋中脊和火山活动区中。

为了理解有如这些和其它的一些异常的地壳区域，有必要对地壳的构造、成分及其性状进行更加详细的考察。

### 地壳的成分

地壳最突出的特点是其成分的均一性，许多学者感到，这种全球的均一性说明，地壳

中的变质作用是在一封闭体系中进行的。直接对比地槽沉积岩的和花岗岩壳的成分表明，在沉积物的花岗岩化过程中，显著补给有二氧化硅和碱金属。

从地球化学的观点来看，这两种作用（在空间上和时间上相关的、地槽岩石的变质作用及其随后的花岗岩化作用）都是影响着地壳的最重要的深成作用。

以下各段将描述这些以及其它相关的作用是如何影响着地壳的成分的，它们主要是通过（1）从地幔补给物质和能量；以及（2）地表作用对地壳物质的根本再加工。

## 沉积壳的成分

地壳沉积壳的总体积是 $9.4 \times 10^6$ 立方公里（考虑到最新沉积的固结），以及不包括火山岩在内的 $9.0 \times 10^6$ 立方公里，也就是说，约占地壳体积的10%以及地球总体积的0.1%。

沉积壳的平均厚度是1.8公里，或在把没有沉积物覆盖的地盾区除外的2.0公里，沉积物的大部份分布于大陆区（ $5.0 \times 10^6$ 立方公里）及大陆边缘（ $1.9 \times 10^6$ 立方公里），只剩下 $2.5 \times 10^6$ 立方公里或28%分布在大洋区，由于在地表上大洋的面积几乎是大陆的2 1/3倍，所以大洋区中沉积壳的深度就只有大陆区的10%。

在大陆上，全部沉积岩约75%的体积都见于地槽区中，而只约有25%的在地台上，它们的平均厚度分别约为10公里和1.8公里。这些深度考虑到了在地槽沉积区域里的随时间前进而减少，以及在地台上的随时间前进而相应增加。

粘土和页岩是大陆上分布最广的沉积岩（42%）。砂岩（20%）、火山岩（19%），和碳酸盐岩（18%）的丰度大致相等。而所有其它类型的岩石，主要是蒸发岩，则约占1%。

沉积岩的基本特点在于其成分与花岗岩壳岩石平均成分之间的显著差别，而后者至少在过去15亿年间曾是沉积物质的主要来源。这种差别可由地层圈与水圈中含量特别增多的水、二氧化碳和有机碳，以及硫、氯、氟、硼与其它过量的挥发物反映出来（Rubey, 1955）。这种情况，是地幔于脱气作用期间自其中直接释出这些过量挥发物的象征（Vinogradov, 1967；Goldschmidt, 1954；和Rubey, 1951, 1955）。

沉积岩成分的另一重要特点是它们的高钙含量，这是外层壳地球化学的一个很难思议的特征。有利于钾的钾对钠比例的置换，是非常典型的，在大洋中钾被过量的钠所补偿。合起来看，由此会导致地层圈和水圈的钠与花岗岩壳相对而言就有些不足。

这些特点最明显地显示在地台沉积物中，因为它们本是极度风化及强烈发育的地面分异的产物。比较起来，地槽沉积物经受的蚀变就不那么彻底（尤其是砂），它们的成分与母岩的成分相接近。

## 花岗质层壳的成分

花岗质层壳完全集中于大陆，其体积与质量分别接近于 $3.6 \times 10^9$ 立方公里和 $9.8 \times 10^{24}$ 克。酸性的花岗岩类和变质岩是花岗质层壳的基本岩石类型，基性岩和超基性岩所组成的此层壳的体积还不到15%。这些比例关系就确定了其总的酸性成分：典型高含量的二氧化硅加上集中的碱金属（K多于Na）和大部分稀有元素（U, Th, 稀土, Zr, Nb及其它）。

花岗质层壳的平均成分，与新第三纪沉积岩的成分很不相同。这就表明，沉积岩衍生于两种来源：（1）来自花岗岩壳的酸性物质；和（2）来自构造圈内深处火山喷发的基性物质。从对组成现今花岗岩壳的沉积物性质的详细研究所得出的结论是，这些沉积物中

有相当大的一部分都为地表及深部的作用所改变。由于最古老的沉积物，看来都是较基性岩石而不是花岗岩的风化产物，不可避免的会设想，过剩的盐基和铁，势必通过风化作用而被搬运到大洋和远海的沉积物中。反之，通过在开放体系中的某些阶段里发育的区域变质作用以及伴生的二氧化硅和碱金属溶液的补给的情况下，作为这些作用对于沉积物的根本再加工的结果，必定会使二氧化硅和碱质的贫乏得到补偿。按照一些学者的见解，这就是花岗岩化作用的实质。

## 玄武岩质层壳的成分

玄武岩质层壳系由构造和成分都不相同的两个部分（大陆部分和大洋部分）所组成。玄武岩质层壳的大陆部分，是由含有大量岩浆物质的深变质酸性岩和基性岩所组成，基性岩的体积接近于总体积的半数，而在成分上则同地槽玄武岩相似。这部分玄武岩质层壳的厚度相当大并且不均匀。

与此相反，大洋部分的玄武岩质层壳却有高度均匀的成分，约有90%的拉斑玄武岩，其特性是（1）K、Rb、Sr、Ba、P、U、Th和Zr的低含量；和（2）K/Rb和Na/K的高比例。这些特点使大洋玄武岩能与大陆玄武岩明确地区分开来。玄武岩质层壳的大洋部分还有另外的特点：（1）没有花岗岩化作用；和（2）缺少来自地幔的强烈分异作用及熔融。

在裂谷、中脊和其它深断裂内的大部分大洋玄武岩质层壳，都由超基性岩组成。由于这些超基性岩看来都是地幔物质的露头，这就意味着，超基性岩参与了洋壳下层的形成作用。依此类推，超基性岩也可构成大陆部分玄武岩质层壳的基底。但是还没有定量的方法来估计由此方式而产生的部分大陆玄武岩质层壳。自地球存在以来的大部分时间里，无论在大洋还是在大陆区，都已喷出过大量的玄武岩浆。最有可能的玄武岩本源区，是在构造圈的较深部位。

## 大陆壳的成分

大陆壳基本上是由上部的花岗岩质层和下部的玄武岩质层所组成。对于深于花岗岩质层上部的大陆壳部分还很不清楚。花岗岩质层的上半部由花岗岩组成；下半部由岩浆岩和变质岩，主要是片麻岩组成。

大陆壳的玄武岩质层和大洋壳的第三（主要）层相同。在大多数的地壳模式中，此层组成了大陆壳的整个下部。这个层与花岗岩层的分界是康腊德不连续面，并不间断的展布在大洋之下，因为这里没有花岗岩质层，所以它就构成了整个的固结地壳。

对大陆壳的深入考察揭示出，在各层中存在时、空变化。但从所有的根据来考虑，大陆壳玄武岩质层，则是变质岩石的复杂混合物，即大部分是高级变质作用的以及来自地幔的基性和超基性岩浆岩的混合物。

大陆壳内重大异常之一，有一个从7.2到7.4公里/秒震速的过渡层，它是由地壳物质和地幔物质的混合物组成的，而地幔物质则可能是侵入到地壳中去的。

## 大洋壳的成分

与大陆壳相反，大洋壳是由极少数的几种岩石类型组成的：（1）蛇纹岩，（2）橄欖

岩和(3)基性岩浆岩,上述岩石有新鲜的、有变质的或风化了的。

在大多数地区里,大洋壳可能是通过上涌作用,有时称为海底扩张产生的,这里的新洋壳,是从下面洋中脊的脊顶得到补给的。在有些地区里,洋壳受到高度碎裂;在另一些地区里,似乎裸露出真正的上地幔物质。

洋底玄武岩有高度逐渐减少的化学成分。它们几乎与所有其它的玄武岩都不相同,并表现出许多原始的特性。更详尽的研究表明,海底玄武岩中的化学变化是对称的,并显然与其在地幔中的起源方式有关。

## 地壳的性状

当从全球规模并结合地壳构造和成分一起来考虑时,地壳的性状揭示出很多有关过去46亿年间地球构造圈演化中的时、空变化。从实际应用来说,可以根据其水平运动和垂向运动来研究这种状况。对于过去46亿年期间的水平运动,认为包括一直到几千公里的质量传递;而垂向运动的则有几十甚或几百公里。若以速度为1厘米/年计算,则一个地壳板块大约在40亿年的时间内可绕地球一圈。若速度为1毫米/年,则地幔物质可从1000公里的深处,需约10亿年的时间就能升及地表。

对近代发生的地壳垂直运动的研究,比对水平运动的要多些。从垂直位移的梯度看来约比水平运动要低一个数量级。在许多场合下,在这两种运动之间似乎存在着某种关系,因而使得在上升及张性地区与下降及挤压地区之间,有可能存在某种区别。垂向的与水平的地壳运动,可以作为地壳三维形变的组分来进行分析。

## 地壳物质的主要水平运动

地壳物质的主要水平运动,基本上有两种类型:(1)两个地壳板块彼此作相背运动;和(2)两个地壳板块沿其共同边界彼此作横向运动。第一种类型的水平运动,即通常所说的大陆漂移、海底扩张或地壳谷裂;第二种类型,即沿着断层的水平运动,或剪切位移。大陆漂移、海底扩张和地壳谷裂,都将在以后章节中加以讨论,在这里不多赘述。

## 地壳物质的主要垂向运动

地壳物质的主要垂向运动,基本上有两种类型:(1)向上运动或抬升;和(2)向下运动或沉降。几乎在地球上的所有部分,地壳不是上升就是下沉。其速度每年可从零到几厘米,但平均是每年几毫米。造陆的垂向运动往往涉及巨大而又呈方形的地区,而且发生的速度极其缓慢。反之,造山的垂向运动往往涉及长而略呈线状的地带,并且发生的速度比造陆运动的要快一些。

在地球上的某些区域里,沉降和抬升彼此发生在较短的距离之内,在1000公里的水平距离内,其差异速度超过1.6厘米/年。抬升运动通常与正性构造单位相伴生(如穹起);沉降运动一般与负性构造单位相伴生(如盆地)。对地台区中运动的分析表明,地块构造沿着相邻地块的边界具有最大的差异运动。

地壳物质的抬升,有两种主要的因素:(1)传统的冰川-均衡作用;和(2)地幔引起的抬升。在某些冰川以外的地区里,由于后一原因所引起的抬升与前一原因引起的是同样地巨大。此外,地质和地貌的资料还证明,大约在冰川消溶五、六千年后,冰川均衡

作用就不重要了。

在构造岩浆带中觉察到的垂向地壳运动的迹象和强度的显著变化，似乎与地震及有关的地震活动相伴生。对适当地震记录的分析，确定出在活动区有三类垂向地壳运动：（1）在任何一个给定地点的地震性状中，由相当长的宁静期间里的缓慢长期运动，区分开活动幕；

（2）先于地震的加速运动反映出地壳在初始地震初期阶段中的形变；（3）快速运动直接同地震以及和地震相伴随的沉降相关。

## 第六章 构造圈

构造圈是地球上部约1000公里的部分。它包括地壳和上地幔，而直到地面以下约1000公里的深处。在分析构造圈演化的几何学和力学时，最好考虑到垂向和水平方向的分异作用、不均匀性、断裂，以及在过去46亿年间产生出它们的根本驱动机制。只有通过这种包罗万象的分析，人们才有希望理解构造圈性状的型式及其地表显示是怎样演化而成的。因此，本章就从全球观点来讨论有关过去46亿年间地球上部1000公里的起源、演化、构造及性状。

### 地壳与上地幔的经典概念

在讨论地壳和上地幔的经典概念时，最好先回想一下两项使大部分经典概念多少有些过时的新进展：(1)关于地球不是辐射状对称的发现；及(2)关于至少在地球上部的700—800公里中存在重大的横向均一性的发现。然而，由于绝大多数的经典概念，都是建立在地球内部性状地表显示的解释上的，所以，在这里先对这些概念作一扼要叙述。

最早的概念，都是把地壳和地幔想像成为以同心圆壳的形式围绕地核而形成。在此基本概念中，地壳延伸到了莫霍不连续面，且其厚度处处有变化，但在大陆区之下的平均厚度约为35公里，在大洋区之下的约为5公里。虽然莫霍不连续面是一种物理现实，但在分析地球的动力性状时似乎并不重要。因此，大多数现行的经典概念，都把地壳和上地幔合起来看作是单一的实体，其不同深度可达700—1000公里。本书认为其深度可达到1000公里，并把地壳+上地幔这一实体，称为构造圈。

把地壳和上地幔作为一个整体来看的理由是，大约在100年前发现地球表现为，其上部100到200公里，是一宛如漂浮在向下延伸达数百公里的、流态下部构造（或软流圈）之上的、强而相当坚硬的板块（或岩石圈）。

岩石圈和软流圈这些术语是巴雷尔（Barrell, 1911, 1914a）在总结地幔最上部里有一个坚固外层覆盖在一软弱层之上的这一资料时提出的。巴雷尔论证，地球基本上是很坚固的，因为只有这样才能解释（1）大三角洲和地形的地表载荷；和（2）在地壳内，由不同密度引起的、垂向应力的巨大变化。与存在坚固岩石圈的证据相对立，巴雷尔还令人信服地找到了存在软弱岩石圈的证据。这就是说，从全球规模上来看，尽管在过去整个36亿年间或更久远的年代里，曾反复发生过巨大的构造运动和剥蚀作用（达到15公里的深度），但大陆与大洋仍好像接近于均衡平衡。

所以，虽然岩石圈的外层明显地具有几乎令人难以置信的强度，但似乎同样明显的是其深部的物质必定是能够流动的。或者换句话说，是能够进行自我调整以补偿见于地球内部性状的各种地面显示中的横向运动的。巴雷尔的结论是，必然存在一个软流圈式的层，壳或软弱带，其中的物质，可出现能以产生足够巨大应力差的侧向运动。

自从巴雷尔（Barrell, 1911, 1914a）的研究分析之后，几乎没有找到什么相矛盾的证据；但有些研究工作已使岩石圈原来的概念趋于复杂。例如，有些研究工作就支持有关在巨大深度处的较小应力差也能够产生出相当大的流动性的基本概念（例如，参见Bentley，

1964; Gutenberg, 1941; Hamilton等, 1956; Harrison, 1955; Haskell, 1937; Hospers, 1965; 以及Lawson, 1942)。然而, 巴汤及其同事 (Barton等, 1933) 从深部到基底的分析中得出结论, 在一定的地表载荷与环境下, 岩石圈曾发生过塌陷。沃科特 (Walcott, 1968, 1970) 也论证, 巨大的垂向密度应力差, 能影响到岩石圈的绝对抗弯强度, 特别是把破碎的岩石圈视为垂直棱柱体时, 尤其如此, 因为这时可把垂直应力中的大部应力差, 视为对每个棱柱体而不是对全体岩石圈板块的局部调整。克里坦登 (Crittenden, 1963) 的先前分析, 就曾支持过这一观念。

波佩拉尔 (Popelar, 1968) 总结出, 只需要 5 巴的地表应力, 就能在软流圈中引起运动。大多数的其它研究也证明, 这一趋势也适用于发生在局部层位上的均衡调整。

摩尔纳和奥利弗 (Molnar and Oliver, 1969) 在全球基础上论证了最上部地幔中的衰减存在着横向变化, 并确定出这种变化的型式。他们发现: (1) 不能穿透低速层的  $S_n$ , 却能十分有效地在地球上的大陆地质和深海盆地等稳定地区中传播, 但当传播路线通过洋中脊体系的脊部或大多数岛弧体系的凹面时, 其传播就十分无效; (2) 这些观察表明, 在接近脊顶和岛弧体系的最上部地幔中的衰减, 比在较稳定地区中的更加明显; (3) 如果是低衰减, 或高  $Q$ , 与高强度相关, 那么, 这些资料就意味着, 在中脊及大多数岛弧体系凹侧下边的最上部地幔要比在其它地区的更加软弱; (4) 从而, 构造圈的最上部强外壳, 或岩石圈, 是不连续的, 在中脊和岛弧体系中具有断口; 以及 (5) 对在穿过与中脊相衔接的转换断层路线上  $S_n$  的低衰减表明, 转换断层上的任何断口, 都可能是十分狭窄的。

几乎还没有提出过有关软流圈以下地球的构造与性状的全球性几何学-力学方面的概念。但是, 一般都承认, 下地幔是个独立的亚体系, 在某种程度上说, 它的性质完全不同于上地幔 (例如, 参见Stacey, 1969, 234页)。

总结起来, 大多数现代概念都假设有那么一个十分软弱的准流体状的软流圈和一个横向软弱而又强烈非均质的岩石圈, 从而能够支撑最大的山脉。这就意味着, 它不是一层连续的弹性层而是一系列或一组的桩或棱柱。每个桩柱都在其自身的载荷下, 大体上独立地进行漂浮, 并且它们每一个都依靠可保其独立性的优先固流界面, 与相邻的桩柱分离开来 (例如, 参见Tausch, 1977d)。

## 国际上地幔研究项目

国际上地幔研究项目 (例如, 参见Hart, 1969; Drake, 1970) 得出的结论是, 至少在地球上部700公里内所存在的显著横向不均一性, 可作为地球上部大规模运动的驱动机制的证据, 而这些运动又可为由此而产生出不均一性的那种过程创造条件。虽然国际上地幔研究项目 (IUMP), 未能对上述结论中所涉及的有关几何学和力学的精确过程做出明确鉴定, 但是, 这一及其它的发现, 却消除了对地球内部性状的驱动机制, 是深位的和全球规模的怀疑。

国际上地幔研究项目, 对于地球构造圈演化分析的其它有意义的发现是: (1) 有理由相信, 地壳发展的历史, 基本上取决于在1000公里深处正在起作用的那些过程 (Belousov, 1969); (2) 上地幔内的横向及垂向变化, 与上地幔范围内物质的运动以及地球内部性状的地表显示 (如地震、火山作用、山脉的形成与变形以及各类岩石的分异作用等) 相关; 和 (3) 对上述相互关系的分析, 使得有可能由此而理解地球内部的性状及其地表显示。

## 国际地球动力学联合委员会及有关的研究项目

许多相互矛盾的假说的存在以及作为其基础的资料的不足都表明，在根据全球资料而对过去46亿年间上地幔性状得出一个统一的模式之前，还有很多有关资料收集和资料分析的工作要做。尽管上地幔计划在结束时未能完成其使命，但其许多未竟工作，已由国际地球动力学联合委员会在继续进行（例如，参见Drake, 1970, 1976）。

国际地球动力学联合委员会的最初使命是研究板块构造概念及其它关于上地幔的起源、演化和动力学性状的现今特征等等的假说。它包括对有关在过去和现在已塑造了地球表面的动力学过程的分析。它还试图弄清，在一定的时间和地点产生出地表水平运动且正在起作用的潜在力、有如为大陆漂移及海底扩张等的概念所代表的。虽然已对地表上发生的事件做了许多工作，但有关地球内部的驱动机制（无论它是什么）是如何及为何会引起这些水平运动，还了解很少。为了解释水平运动，有必要也分析一下上地幔里的垂向运动。本书所阐述的构造圈式地球模式，正是为试图进行此项工作而提出的一种概念。

## 根据二元原始行星假说而提出的地球的构造圈

根据二元原始行星假说，概略地说明，构造圈是一种增生物，其纵深约1000公里，增生到5400公里原始地球之上。后者，约于46亿年前已经存在，也即现今地球的下构造圈。

## 构造圈式地球模式

如在第三章中所说明的，构造圈式地球模式是一种用构造圈的力学和几何学来描述地球演化的模式。假设构造圈已按前述三种基本演化方式之一，而增生到5400公里原始地球之上。那么，构造圈的演化及性状，将大部取决于所设模式是三者之中的哪一种模式：（1）八分碎块；（2）多重碎块；或（3）复合碎块。例如，在八分碎块型中，地球原体的五个八分体的一些部分，可能依然会作为未经改变的地球现今构造圈的部分、甚至会作为现存大陆地盾的地下部分而存在。在多重碎块型中就不大可能有这种情况，不过，应把那些相当小的碎块除外，它们现在也许被结合或嵌入于年龄小于46亿年的、经过改造的物质之中。

## 下构造圈

下构造圈实质上是如今位于构造圈之下的5400公里原始地球。它被三个通过地心而又互相正交的面割裂成八分体。

图6—1是地球下构造圈的示意图，表示下构造圈的八个块体与下构造圈破裂体系的相互几何关系。用于下构造圈的块体和点子的名称，大约与在其上1000公里的地球表面上对应部分的名称相同。因此，下构造圈的阿留申点（AL），位于地表上阿留申地区之下约1000公里的深处。同样，北美下构造圈块体，大约位于北美大陆之下1000公里。

请注意，北美下构造圈块体比北美大陆要大一些，这是因为前者包含整个下构造圈的1/8（因此，它位于全球1/8的表面之下，而不只是通常所说的北美大陆之下）。对其它大陆也可做同样的分析（Tatsch, 1977d）。在进行这种分析时，必须进行校正，因为半径为6371公里的球体的表面积，要比其半径小1000公里的球体的表面积大1.1倍。

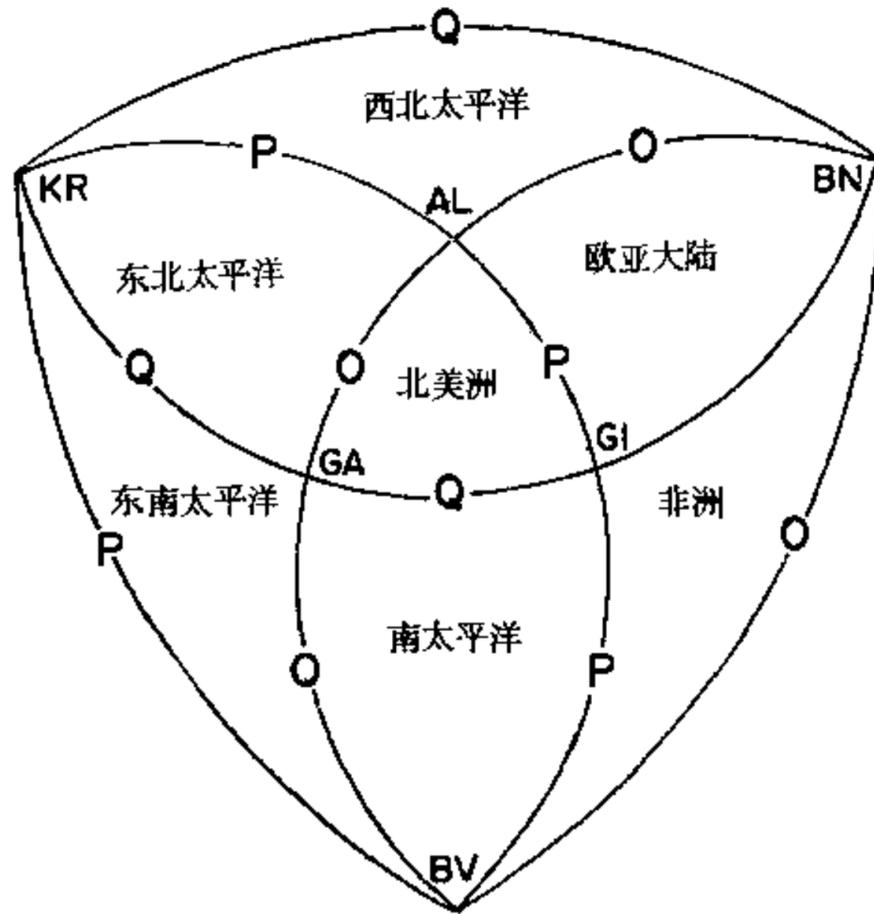


图 6—1 地球下构造圈表面的示意图

表明八个下构造圈块体和下构造圈破裂体系(SI·S)相互间的几何关系。SFS的北极在AL处；南极在BV处。以QQQQ标出的是SI·S的赤道；以PPPP标出的是SFS的本初子午线；OOOO则是正交子午线。请注意南极下构造圈块体在图的“背面”，可由KR、BN和BV三点确定出来

(J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

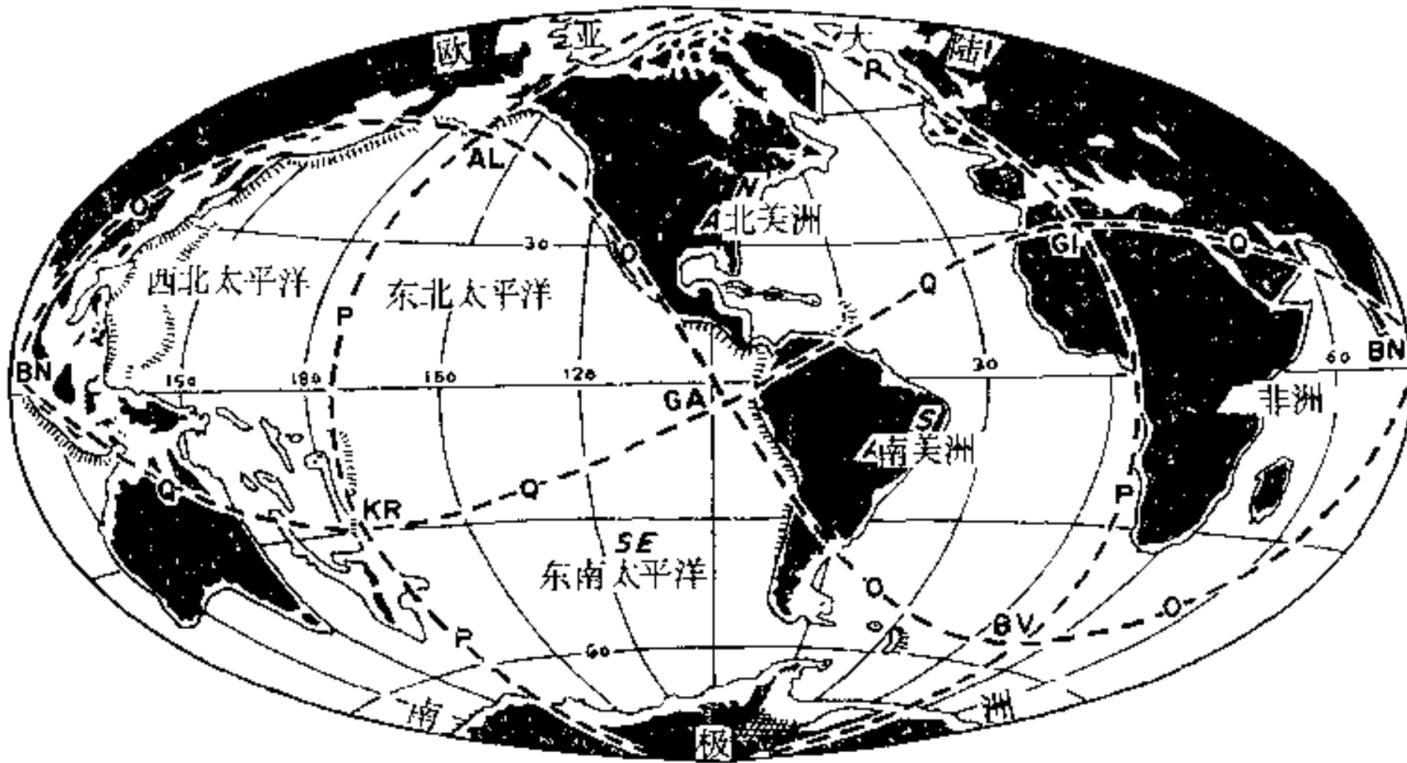


图 6—2 重叠在下构造圈破裂体系(SFS)基本要素之上的全球大陆图

SFS的北极在AL处；南极在BV处。SFS的赤道以QQQQ标明。SFS的本初子午线以PPPP 标明；正交子午线标以OOOO (J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

八个下构造圈块体中的每一个,其表面都形成一个等边球面三角形,它们的所有夹角和边都等于 $90^\circ$  (在下构造圈表面上约为8500公里;在地球表面上约为1000公里)。下构造圈破裂体系的极点,分别位于下构造圈的阿留申点(AL)和布维点(BV)处。下构造圈破裂体系的赤道,通过由加拉帕戈斯(GA)、直布罗陀(GD)、孟加拉(BN)和克马德克(KR)四个点所形成的大圆。下构造圈破裂体系的本初子午线,通过由下构造圈的直布罗陀(GD)、布维(BV)、克马德克(KR)和阿留申四个点所形成的大圆。下构造圈破裂体系的正交子午线,通过由下构造圈的孟加拉(BN)、布维(BV)、加拉帕戈斯(GA)和阿留申(AL)四个点所组成的大圆。

图6—2代表的情况与图6—1相同,但使用的是全球投影,以便将地球大陆的轮廓重叠在下构造圈破裂体系的基本要素之上。

### 构造圈式地球模式的驱动机制

所设想的原始地球(如今的下构造圈)的基本性状是,它有平衡其自身以达到最小能量状态的趋势。因此,这个体系的驱动机制可被表示为,在其初始状态中所固有的不平衡能量的函数(Tatsch,1977d)。最简单地讲,它主要构成于两种因素的组合,而在过去46亿年间,每种因素都曾以大体上可预料的方式发生着变化,这两种因素是:(1)为基本5400公里原始地球在地球成生上地不平衡形状所固有的势能(第三章),及(2)来自优先热流和可能的挥发物流,从下构造圈破裂体系而向外选择性流出的能(如下节所述)。

构造圈式地球模式的驱动机制,是在第三章中所描述的几何与力学的限制范围以内,发挥着作用的。而且当用此模式进行分析时,永远要考虑到这些限制。在以后的章节里,将会清楚地看到它的重要性。这里只须说明,此驱动机制和它于其中发生作用的几何学与力学体制,是构成动力地球这一综合体系的不可分割的部分。

### 下构造圈破裂体系

下构造圈破裂体系,由三个互相正交的破裂面组成。它们在与下构造圈表面相交处,形成三个互相正交的巨大圆环。每个大圆环的长度(或圆周)为 $5400 \times 2\pi = 34,000$ 公里,或三个巨大圆环体系的总长度为 $3 \times 34,000 = 102,000$ 公里。

根据下构造圈的约束条件和自由度(见第三章),可以料到,在任一给定时期中,在长102,000公里的下构造圈破裂体系中,将约有半数处于张性状态,而其余的51,000公里,将处于压性或中性状态。因而,由于此模式试图使本身平衡,所以在过去46亿年间,在沿102,000公里体系上的任一点处,都将交替出现张性及压性状态(第三章)。

由于在漫长的时间中,上述性状都是动摇不定的,所以处于张性状态中的下构造圈破裂体系的特定块段,其位置也有沿此102,000公里体系进行不断漂移的趋势(但因时间很长,漂移的速度相当慢)。从外界的观察者看来,这些特定的张性块段,似乎将以旋迴性而非周期性的方式,沿下构造圈破裂体系运移,原因是,原始地球必将以同样的方式进行平衡(第三章)。这些张性块段在目前所进行的这种旋迴性而非周期性的移动,其平均速度的量级为厘米/年。

设想下构造圈破裂体系中的块段,未处于张性,而处于压性或中性状态;但由于沿此体系的压性梯度不是恒定的,故中性状态有昙花一现的趋势。由于为张性块段所围限,压

性或中性块段，也将沿102,000公里下构造圈破裂体系，以平均厘米/年的速度量级，作旋迴性而非周期性的运移。

被叠加在旋迴性而非周期性的“张-压”效应之上的下构造圈破裂体系的性状，将表现为可从基本驱动机制及此模式约束条件中料到的其它型式的活动（参看第三章）。因而，在旋迴性而非周期性的张-压性性状之外，可望下构造圈破裂体系表现有下列类型的几何学和力学性状：（1）旋转平衡；（2）幅射转换平衡；（3）横向转换平衡；（4）八个下构造圈岩块的独立八分圆运动；以及（5）由前节所述模式中的基本驱动机制，于此体系中所可能产生的其它性状。

可望顺沿着下构造圈破裂体系张性坡段内看到的此特殊类型性状的性质，与预期沿压性块段所可能出现的那些或多或少有些不同。举例来说，在给定的时期内，压力梯度的大小与极性（即，无论增大或减小），在确定产生于下构造圈的表面上的以及作为地表显示因而产生于地面上的地热、构造、地震、地球化学、电磁以及其它效应的精确性质方面，都起着作用。从而，对岩浆发生的性质（即，无论是侵入或是喷出；是酸性或是基性、玄武质、超基性等），都可用过去46亿年间下构造圈破裂体系的旋迴性而非周期性的性状，来进行分析（参看第十章）。对有关地球深源地震的全球分布格局方面，也可进行同样的分析（参看第八章以及Tatsch, 1977a）。在其它的章节里，将讨论下构造圈性状在产生特殊的构造、现象及地表显示等方面所起的作用，其中包括：（1）地壳的性质、成分、及全球地形；（2）大陆的造山-克拉通构造；（3）地球热流及其它地热活动的全球格局；（4）地球在过去46亿年间的全球地貌；（5）造山运动及对那里的改造；（6）地球的重力场及地球体的形态；（7）地磁与极性倒转；（8）从全球规模上所看到的大洋与大陆的相对并列与对踵位置；（9）大洋及大陆区中海底扩张与地壳裂谷的其它迹象；（10）大陆漂移和极移；板块构造与相关现象。

### 构造圈活动的局部圆锥体

当其它情况都相同时，由下构造圈上的一点，穿过“平均”构造圈物质1000公里的垂直厚度，而投射出去的“能源”地表显示的位置，其“可能误差”接近于 $1000 \times \pi/4 = 785$ 公里。如果情况果真是这样，则可料想，由一给定能源（存在于下构造圈表面上）所引起的“活动”，将发生在一圆锥体内的某处，圆锥体以“能源”点做为顶点，且以半径约为785公里的圆面与地面交切。这里所说的“活动”，包括所有由地球驱动机制直接引起的结果（例如，构造运动的、变质作用的、岩浆的，等等）。根据此模式，可望所有这一切会发生在此活动的圆锥体之内。地球驱动机制的间接结果（例如，由直接引起的活动所产生的再调整），当然可在地内的任何地方发生，而与在一特定时期内的这些活动圆锥体的位置无关（Tatsch, 1977d）。

图6—3表示，由下构造圈破裂体系上的能源D，所产生的一些典型活动圆锥体的示意图。O是地球中心。OX、OY和OZ是延及地表的三个互相正交的破裂面。活动圆锥体与地面交切成许多圆AA。由于容许构造圈内的非均质性可以有所变化，因而在示意图中就表示有许多不同的顶角（理想的90°顶角除外）。可以设想，在大多数情况下，顶角都不超过120°。

必须理解，应将包含在这些圆锥体ADA内的全部容积都看成是“活动的”，而不应仅

限于圆锥壳或圆锥面上，但有可能在边缘或其它某些地区中是最活动的（对于这些地区将在后面讨论到优先热流的路线时详细说明）。以D'为顶点的那些圆锥体，表示不完全发育的情况（如，岩基侵入体、不具地面显示的地下断裂等）。

图6—4表示，在下构造圈破裂体系上，以能源O为顶点的一个典型、理想活动圆锥体的几何形状。O点距地心几近5400公里，构造圈的深度约为1000公里。角DOD'几近90°，但它随O点之上的物质的成份及状态的不同而有所变化。DOD'的理论最小值为0°，当优先热流的幅射路线或一条断裂是从O点垂直向上延伸时（即，在“退化圆锥体”的情况），就会存在这种情况。DOD'的理论最大值为180°，即当在O处的能源所产生的效应，完全不能穿透直接位于O点上的构造圈物质时，才会存在这种情况。在这种场合下，可预期能源将沿下构造圈破裂体系移动，直至遇到上复表面不再是完全不能穿透的位置时为止。但是，一如图6—3中所示，一个存在于下构造圈表面上的能源的效应，并不必定总要达到地表（例如，图6—3中D'的情况）。

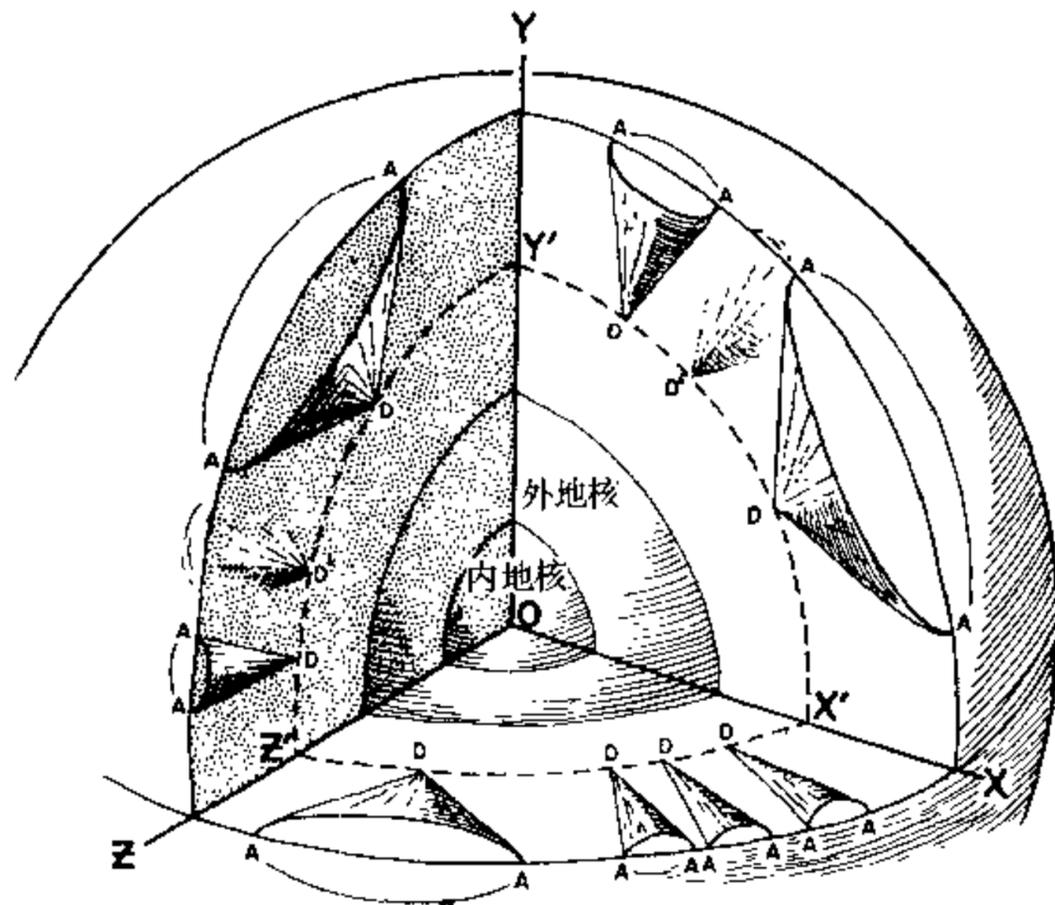


图 6—3 由下构造圈破裂体系上D点处的能源，所引起的典型活动圆锥体示意图  
O是地球中心。OX、OY和OZ是延至地表的三个互相正交的破裂面  
(J. C. Holden据作者初版中的略图修改而成)

图6—5表示，在一典型理想活动圆锥体中，所能预料到的几种构造圈构造的关系的横剖面图。O点代表在下构造圈破裂体系上某点处的能源。FAF线代表活动圆锥体与地面交切所成的圆的直径。A点表示理论上最深的深源地震的震中（参见本书第八章或Tatsch, 1977a）。B和C二点表示典型的中深和浅源地震的震中。这一模式并不排除A可能会作为中深或浅源地震的震中，因为震源可以位于AO线上的任何地方。但相反的情况却并不必定是真实的，因为在正常情况下，不能指望B和C会有比DO线更深的震源，因此，在正常情况下，也不能指望它会产生深源地震。

图6—5的D点代表所料想的最强烈的现今造山-岩浆活动的大致区域（即，新岛屿、

新山脉、新海岭、新火山等)，然而，此模式并不排除会在沿FAF线的任何一点上存在活的破裂作用，因为整个圆锥体FOF都是潜在“活动”的。F表示依据此模式所预示有安山岩流的那些地区中，可望找到的“安山岩线”的极限（参见第十章，侵入作用和喷出活动；第十二章，造山作用）。

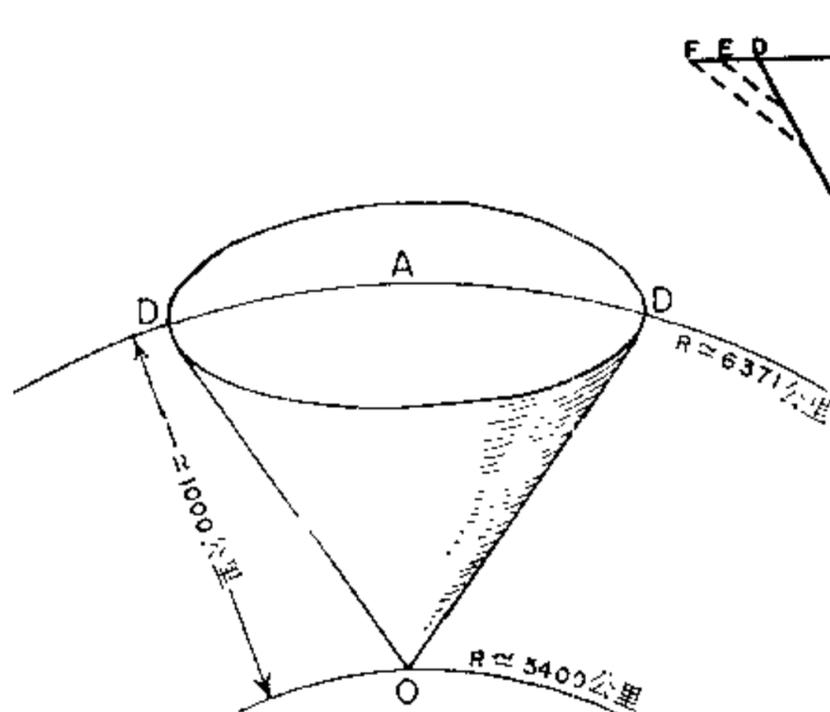


图6—4 图示以位于下构造圈破裂体系中的能源O为顶点的、典型理想活动圆锥体的几何形状

(J. C. Holden据作者初版中的略图修改而成)

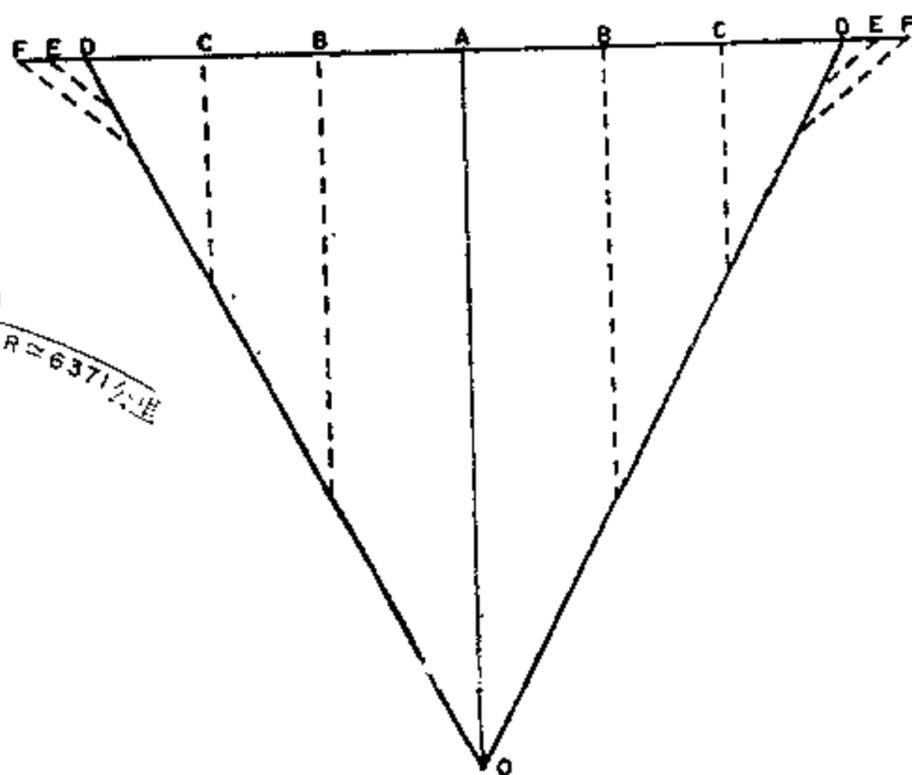


图6—5 横剖面示意图，表示所能料到的典型理想活动圆锥体的几种构造圈构造的关系

O点代表构造圈破裂体系中的某一点  
(J. C. Holden据作者初版中的略图修改而成)

### 全球构造圈的活动楔形带

如果下构造圈上的每个点都形成一局部的活动圆锥体，那么其顶点的地面轨迹线就由三个互相正交的巨大圆环组成，长度合计为  $3 \times 2\pi \times 5400 \approx 102,000$  公里。所产生的这些活动圆锥体形成无数圆锥体，其包络面可称为三条全球性构造圈的“活动楔形带”或理论上的“地震构造岩浆带”。它们与地面交切的总长度合计为  $3 \times 2\pi \times 6371 \approx 120,000$  公里。其示意图，示意图6—6及图6—7中。图中AB、BC和CA的距离，每一个都约为10,000公里。这些活动楔形带的标称宽度为1571公里。

图6—8是用球形透视所表示的上述情况。在C处的局部活动圆锥体，都是以下构造圈破裂体系F上的一些点为基点的。因为在任一给定的时间里，可望会沿着大约50%的下构造圈破裂体系（即，约在51,000公里中），出现“活动的”或有效的能源，所以在任何一个时候，都预期会在半数的全球性楔形带体系内（即，约在这些带的60,000公里中）出现（参见第七章，大陆的造山—克拉通构造；以及第十章，侵入作用与喷出活动）。

一如将在后面的章节中所要讨论的，无须指望所有类型的活动（构造活动、变质作用、岩浆活动，等等），会同时发生在全球构造圈活动楔形带的全部“活动”块段上。例如，某类岩浆活动通常不与某类构造活动相伴生。而且，也不能指望在一给定时期内和一给定地点上，会发生一个类似上述的岩浆活动（参见第十章）。

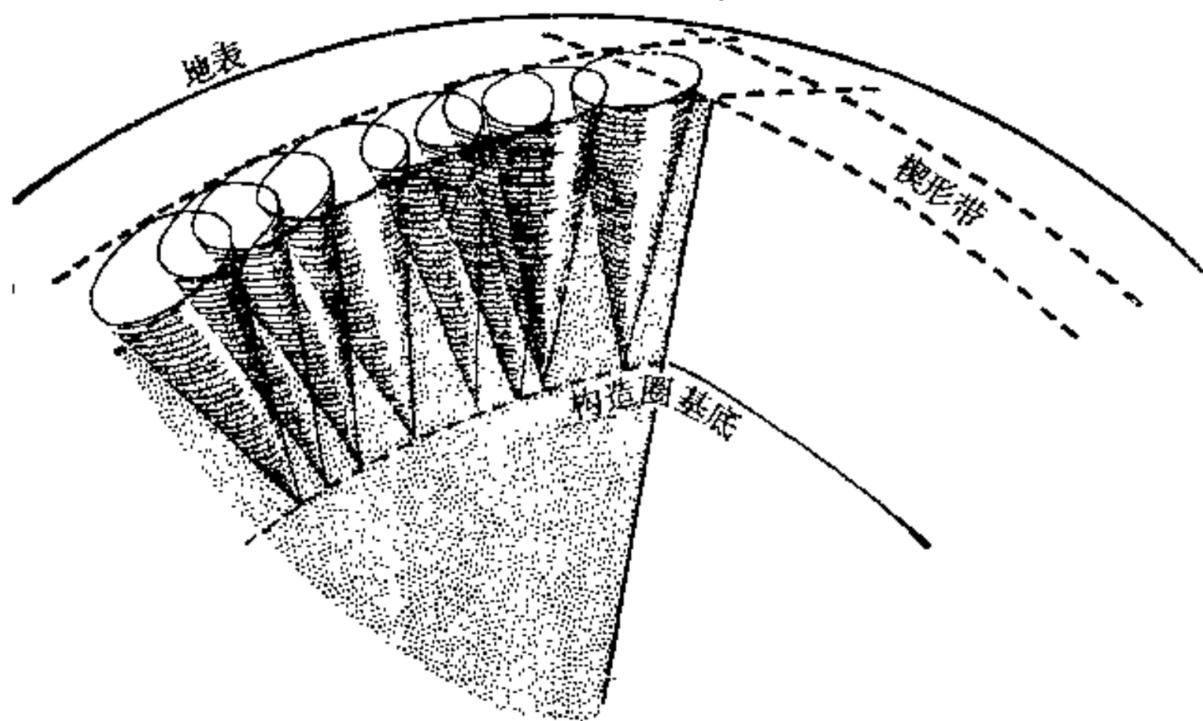


图 6—6 图示由无数构造圈活动圆锥体的包络面所构成的一条构造圈的活跃楔形带

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

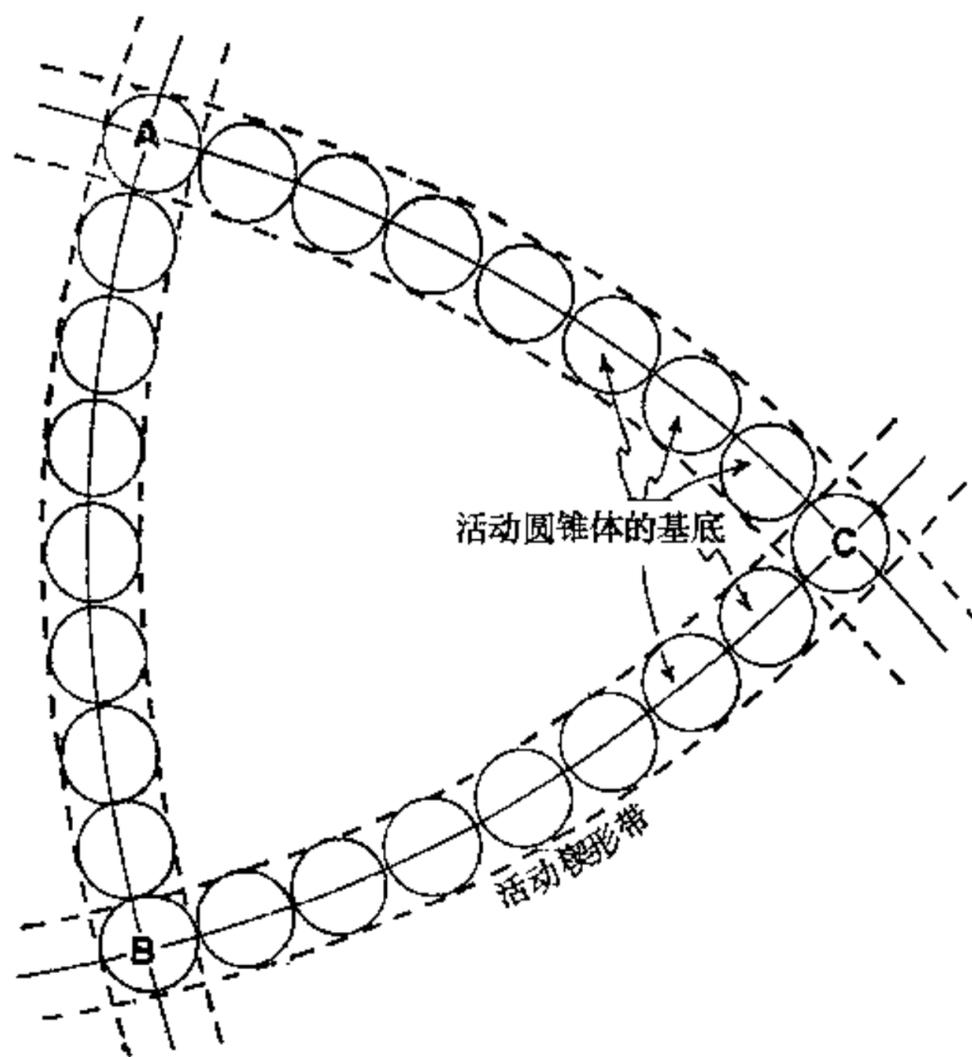


图 6—7 示意图表示由三条正交的“活动楔形带”产生的地面轨迹的平面图  
三带交切地面于 A、B 和 C

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

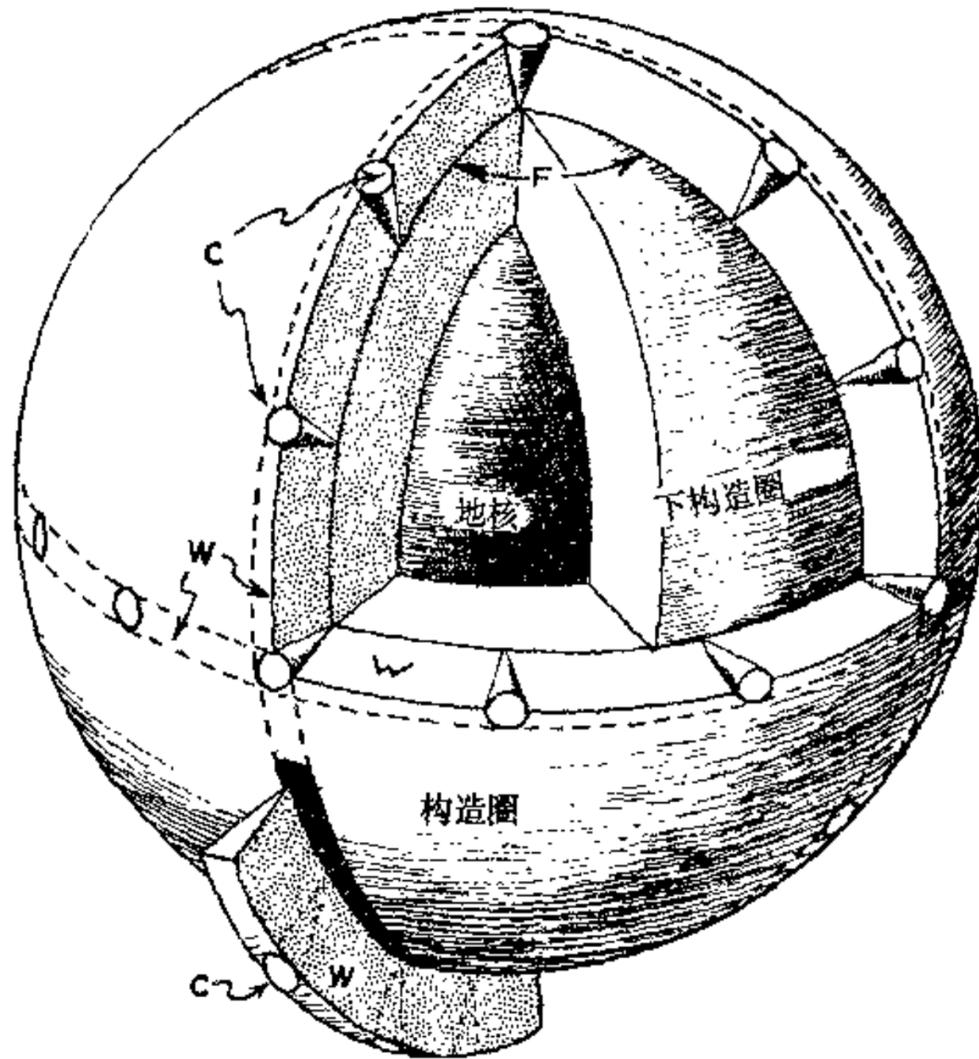


图 6—8 理想构造圈式地球模式的示意图

表示局部活动圆锥体C，下构造圈破裂体系F，下构造圈，构造圈，以及全球性活动楔形带W  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

### 构造圈内优先热流的路线

如果下构造圈破裂体系中某点上的能源系由热力构成的，且此点上的构造圈为均质的，那么，很简单地就能确定出这种热力有可能沿之穿过构造圈而达到地表的最可能的路线。此外，也可预期热流的这些可能的或“优先”路线，会位于一典型活动圆锥体内的某处。

但是，由于构造圈不是均质的，热流的“优先”路线（从下构造圈表面到地面），就可能十分迂回曲折的。举例来说，图6—9概略地表示出，在热力达到地面之前，于构造圈中绕过非均质体向沿之前进的一些可能的路线。例如，在热力达到B层位之前，它可能会沿着许多路线之一而运行（图中所示意性表示的），在这里，于进入C层位之前，它又可在B和B<sub>1</sub>处形成一些次级活动圆锥体，等等。

最后，热力有可能从J<sub>1</sub>到J<sub>4</sub>的四个位置中的任一位置而到达J层位。这样，从O点出发的、穿过构造圈的优先热流路线，就可以在地表上离得相当远的、像S<sub>1</sub>和S<sub>4</sub>的一些位置中的任一位置上，产生出地表显示来（例如：火山或地热藏）。另一方面，它也可在几乎是位于O点的原始能源地面中心，即S<sub>2</sub>或S<sub>3</sub>处，产生出地表显示来。（参见第十章，侵入作用和喷出活动）。在顶角为90°时，S<sub>1</sub>和S<sub>4</sub>的间距很容易超过2,000公里（例如，美国西部）。

图6—10表示，理想热流及可望由下构造圈破裂体系上，位于O处的某能源点所激发的典型活动圆锥体之上，作为地表显示的地形剖面（参见第九章，地热活动的全球型式；

及Tatsch, 1976b)。若顶角 $2\theta=90^\circ$ ，于是， $\theta=45^\circ$ ，而 $r$ 有一约为785公里的标称值。构造圈内的不同的非均质性，使 $\theta$ 处处都有相当大的变化。D大约为1,000公里。关于其它细节及这些非均质性的意义，在后面的章节及其它出版物中都有所讨论（例如参见，Tatsch, 1973a, 1974a, 1975a, 1976a, 1976b)。因此，无须在这里讨论这些细节及意义，只须说明，构造圈式地球模式提供了一个极好的体制，可据此来分析关于地球上层1000公里内的几何学、力学、热力以及化学的非均一性（例如参见Tatsch, 1977d)。

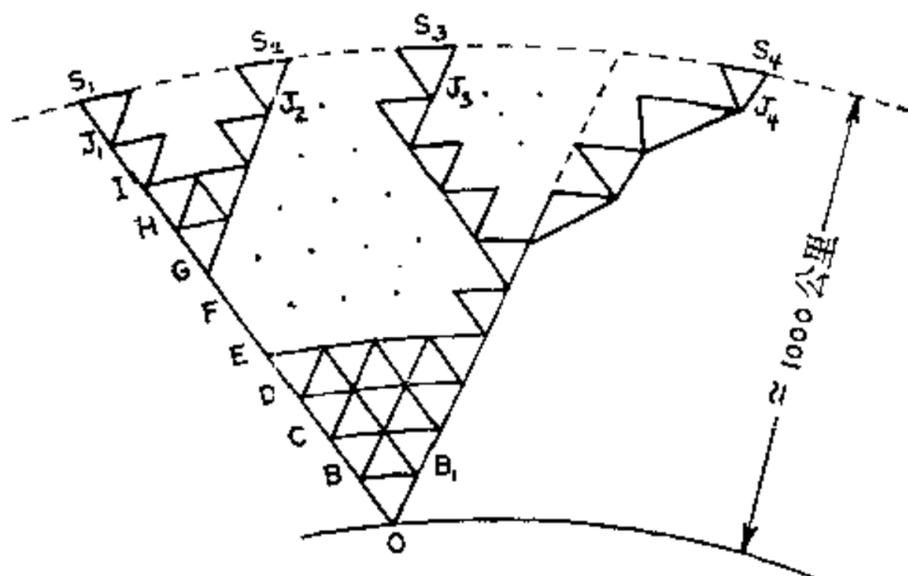


图 6—9 图示优先热流从下构造圈面上的一点 O，而达到地表的一些可能的路线  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

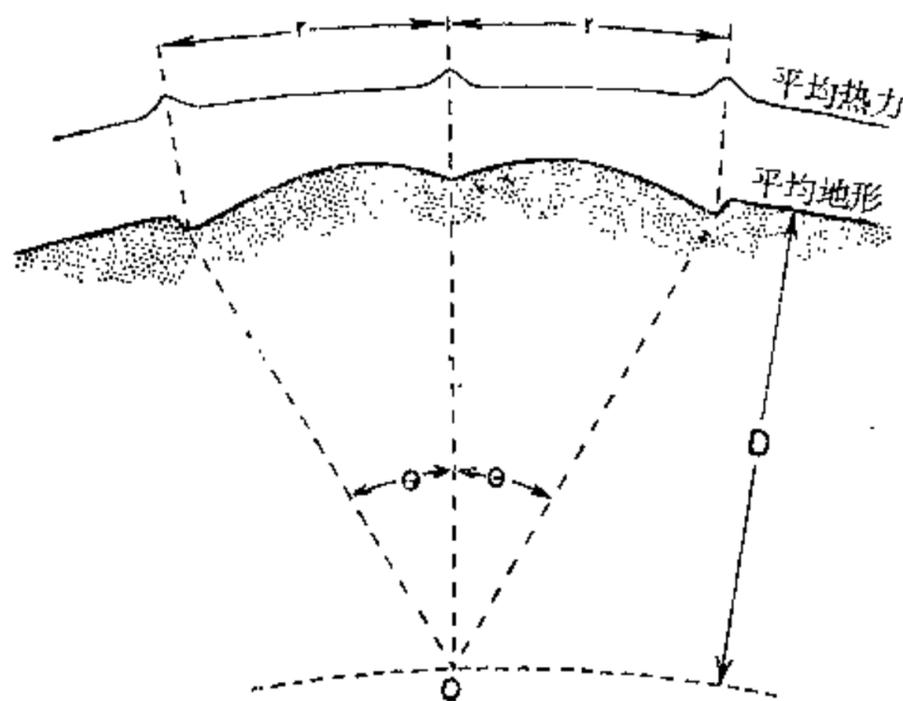


图 6—10 图示，可望由下构造圈破裂体系上、位于O处的某能源点所激发的、典型活动圆锥体之上，作为地表显示的、理论上的理想热流及地形的剖面  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

### 构造圈内优先固流限的平面、表面及壳层

由于上述1000公里增生物质，是在漫长的时间中增生到原始地球上的，从而，无论是单个的、或作为全球性或区域性“壳层”的各个增生碎块，对于其它增生碎块、或对于基

本5400公里原始地球（即，现今的地球下构造圈而言，应能保持其某些活动的自由。所以，由此可知，这样的活动自由最有可能是沿着作为46亿年间构造圈演化的自然结果的、优先固流限的各种平面、表面和壳层最为显著。这些面中有些与现今构造圈内的“波导”、“低速带”以及类似的构造和现象相关。

就上述各方面，最好回想一下，如果增长速度为1米/年，则增长1000公里的深度就需要1亿年。这种情况不仅对过去46亿年间构造圈内的固流体带、面、区域及壳层的发展方面说来是重要的，而且对地球深破裂体系的发展方面来说，也是重要的（例如参见第八章，地球的深源地震，第十八章，板块构造与相关的影响全局的过程；以及Tatsch, 1977a）。在这两种情况下都假设增长过程延续了1亿年，则在任何一年里所需要的能，将只不过是为一一年中破裂穿过（或在其内保持固流限）垂向厚度为1厘米的构造圈物质，所需要的能。假设增长过程延续了10亿年，那么，在任何一年中所需要的能，则只不过是为一破裂穿过（或在其内保持优先固流限）垂向厚度约为1毫米的构造圈物质所需要的能。

根据在此模式内，在力学上是能够维持固流限的观点来看，有必要回想一下，在半径为6371公里的均质球体中，内部5400公里部份的基本惯量，通常至少超过外部971公里外壳的60%。因此，在大多数情况下，可以设想，此模式内部5400公里的非均衡惯量，至少超过（并总是超过）外部971公里的均衡惯量的60%倍。对于实际地球这一非均质天体来说，此惯量差倍数通常甚至都大于60%。

在构造圈增生到下构造圈上去的最早期阶段，上述惯量差倍数必定已是极其巨大的（Tatsch, 1977d）。当增生作用进行时，此倍数自无限大值，有如渐近线一样，而降低到接近于1.6（Tatsch, 1977d）。

有关优先固流限的构造圈平面、表面及壳层的其它方面，将在第十六章（海底扩张）、第十七章（大陆漂移与极移）以及第十八章（板块构造与相关的影响全局的过程）中讨论。

### 构造圈板块的族和组

如果说，下构造圈基本上是由三个互相正交平面的破裂体系所隔开的八个岩块组成的话，那么，关于构造圈的内部构造又能说些什么？现今它们的构造又是如何？以及它是否一直具有大致与今日相同的构造？

从理论上说，构造圈可能由八个岩块组成，每个岩块的深度约为1000公里、在地面上的长度约9,000公里、且为三个互相正交的构造圈活动楔形带体系将其分隔开来。然而，伴生于构造圈增生作用的演化过程的几何学-力学情况，与此构造圈的简单构造实际不相符合。另一方面从尺寸比例来看，从理论上说，构造圈可由无限圆壳组成（其半径约从5400公里到6371公里），而每个圆壳又可被碎裂为无限构造圈板块（Tatsch, 1977d）。

可将实际构造圈规定为介于两个极端之间的某处（就是说，介于单一岩块及无限碎裂的构造圈板块的无限多板块之间）。虽说还得不到良好的物理模拟，但具有下列特征的八叠假想卡片，可对此提出大致相近的情况：

- a. 使每张卡片的形状，想像成一个球状八分体的表面。
- b. 使每叠卡片的底部卡片比顶部卡片小15%，中间的卡片逐渐变化于此二者之间。
- c. 把每张卡片分割成（或碎裂成）许多不同形状和大小的碎片。
- d. 每叠卡片共有1000张（这个数目只是为了方便而随意选择的，因为构造圈的厚度

为1000公里)。

e. 如果每组顶部的卡片的边长为10厘米, 那么, 每组底部卡片的边长就是8.5厘米, 而且这八组(或叠)卡片, 就会在半径为54厘米的球面上, 平滑地贴合起来。

f. 八组卡片中每一组的顶部卡片, 就要联合成一半径约为64厘米的新球体的表面。

g. 在八组卡片中, 每一组的第 $n$ 层卡片, 将联合为一半径约为 $(54 + 0.01n)$ 厘米的新球体的表面。

上述“模拟”模型具有下列附加特征, 这些在分析过去46亿年间构造圈的演化及性状时, 是有意义的:

a. 八组卡片的顶部卡片联合而形成一球壳, 这个球壳可沿其第999层卡片分离开来的“优先固流限”的球面上自由运移。

b. 沿着三个互相正交的大圆所组成并分隔每组顶部卡片的优先固流限线上, 第1000层壳的任一半球部份(在一定限制以内)可自由移动。

c. 可把相似的性状, 归因于任一或全部其它999层由八张卡片组成的球壳。

d. 每当54厘米“基本”球体的性状, 具有数似于构造圈式地球模式所规定的地球下构造圈的性状时, 在八组卡片中就会发育出更加复杂的性状(第三章)。

以下各章, 将详细说明上述模式的细节及其它特征。这里只须指出构造圈式地球模式性状的几个可自上述类似模式推导出的突出特征就够了。举例来说, 图6—11表明, 在动力不均一的构造圈内, 一组构造圈板块的最上部组成部份, 并不一定必须恰好位于同一组的下部组成部份之上。如此, 某一给定组可能在下构造圈的表面上形成一直线状格局 $SS'$ , 但在地表上却形成了非直线状格局。此外, 在下构造圈及地表之间的任一中间层(或族)中, 也不必定会形成直线状的格局。在上图中已把中间层的组成部份省略了。一般可料到, 中间层的位置可介于下构造圈表面与地面之间的任何位置上。但是, 一如后面章节中将指出的, 还存在几个明显的例外。

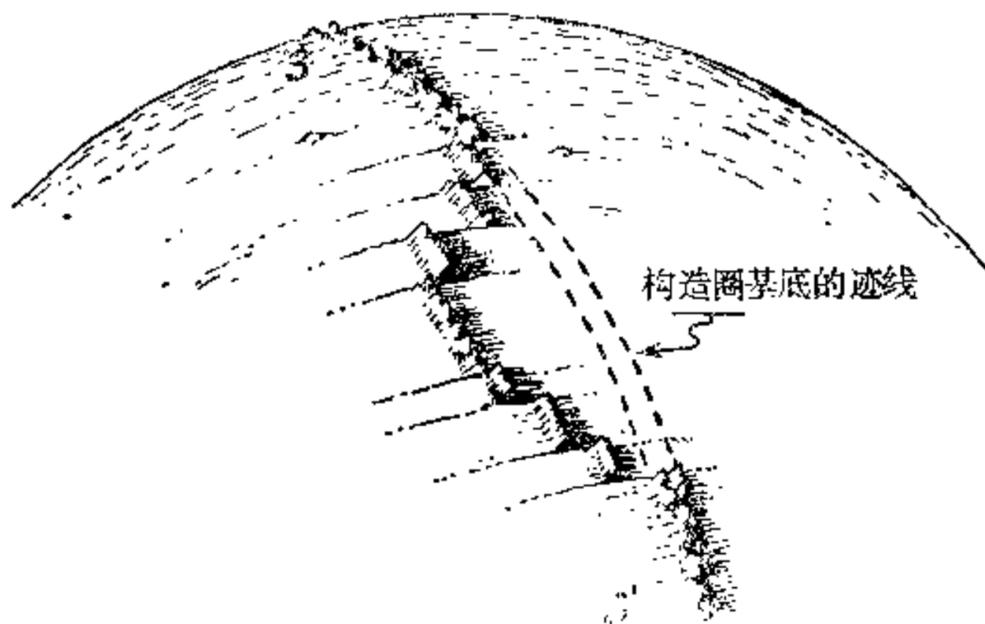


图 6—11 示意图表示, 在一非均质、动力构造圈内的一组构造圈板块的最上部组成部份, 不一定正恰好位于同一组较下部组成部份的正上方  
(J.C.Holden据其1971年版中的略图修改而成)

图6—12表示构造圈板块内的破裂与下构造圈破裂体系间的基本“因果”关系。在大多数场合下, 在一给定地球模式八分体内的碎裂程度, 是自下构造圈向上直到地表而逐层增高

的；但存在明显的例外（例如，参见，Tatsch, 1977a）。从而，地表板块通常比从构造圈基底向上667公里处的板块，受到更多的破裂；在基底上方333公里的板块，也比在0公里处的基底板块受到更多的破裂；等等（参见第十八章，板块构造与相关的影响全局的过程）。

### 构造圈内的低速带、波导及类似的构造

低速带、波导及类似的构造圈构造的形成，是由于下列二者的结合：（1）构造圈板块的组和族，以及（2）优先固流限的平面、表面及壳层。所产生的低速带、波导及有关的构造，可以在任何角度上形成，从水平的到铅直的，这取决于所涉及的构造圈板块的组和族之间破裂的特定位置，同时也取决于所研究的时期中，那些破裂是处于固流体的状态（参见第十八章，板块构造与相关的影响全局的过程）。

### 岩石圈板块

地球的实际岩石圈板块，由上述理论上的“构造圈板块”的最上部份组成。岩石圈板块的演化及现今性状，与下伏构造圈板块的族及组密切相关。在构造圈

式地球模式基本驱动机制的作用下，这些板块已发展成为其现今的状态与性状（例如，破裂、运动等等）。（见第三章）。举例来说，它们的破裂体系首先取决于基本破裂体系与下伏构造圈板块的组及族的运动，而后者却又取决于驱动机制（第十八章，板块构造与相关的影响全局的过程）。

同样，其岩浆作用与变质作用的性状与活动，也取决于构造圈板块的下伏层。但这并不是说，为下伏层所决定的基本岩浆（或其它）的活动，不会受到岩石圈本身内部局部热源（例如，为放射性物质的局部矿囊）而增强（参见第九章，地热活动的全球格局；Tatsch, 1976a, 1976b）。

### 软流圈的构造及性状

地球的实际软流圈是由一个或多个直接位于岩石圈之下的、理论上的构造圈“板块”

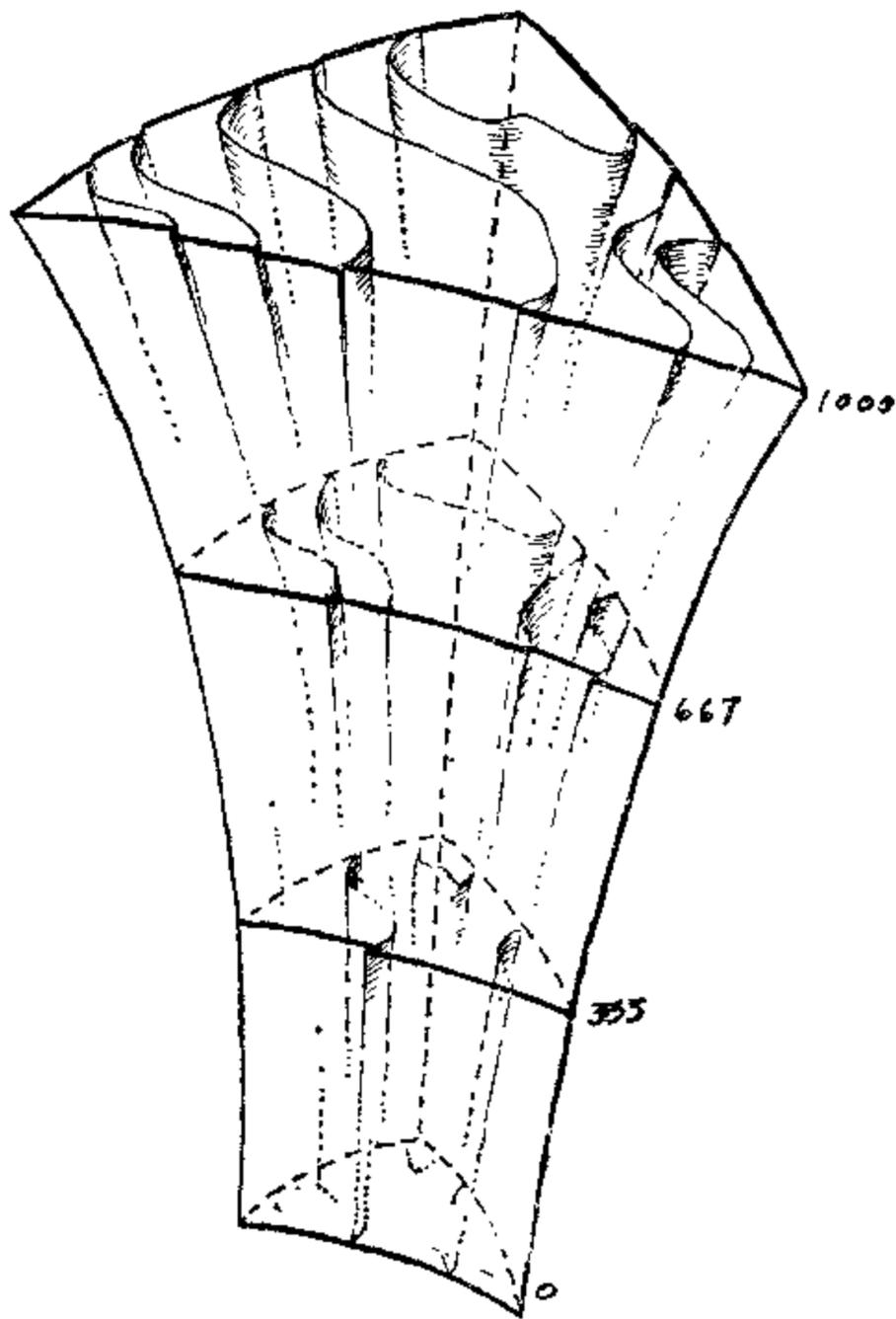


图 6—12 示意图表示构造圈板块内的破裂与下构造圈破裂体系间的基本关系

(J.C.Holden据作者初版中的略图修改而成)

以及存在于软流层之内、之上和之下的固流限平面、表面及壳层所组成的。严格地说，软流圈不是一个独立的实体，而是一个具有沿着优先热流路线为热流、还可能有挥发物流可维持的固流限的构造板块的“组合”。在某种意义上说，软流圈的特征及性状是随其周围环境而变的。软流圈之所以演化到其现今的形态及位置，是因为如今于其上或于其下存在着什么、以及过去在这里存在过什么。因为其上、下层于过去46亿年间，都曾经遭受过变化，从而，在此期间，软流圈的位置、构造及性状，也相随以同一方式发生了变化（第十八章，板块构造与相关的影响全局的过程）。

### 在软流圈下面的构造圈的构造

在软流圈下面的构造圈的构造与软流圈之内及之上的构造十分一样，但由于下列情况，也可经受改变：（1）在较深处可迁到更高的温度和压力；以及（2）接近于下构造圈、下构造圈的破裂体系以及此模式的驱动机制（第十八章，板块构造与相关影响的全局过程）。

和软流圈的情况一样，在过去46亿年间，在软流圈下面的构造圈的构造曾经受过变化（Tatsch, 1977d）。

### 构造圈与下构造圈间的界面

一如从基本条件所能够指望的，构造圈与下构造圈间的界面，不是作为一可觉察的实体而存在的。就物理上可测量的效应而论，构造圈与下构造圈在密切伴生了46亿年之后，它们彼此几乎已被完全地混合在一起了（Tatsch, 1977d）。

对构造圈与下构造圈间界面的最近似物理模拟，将可能是一类自动变速的流体驱动型的，这种自动变速应具有：（1）粘性几乎是零的流体，及（2）时间常数极长。其结果是，这种界面不能用现今的仪器觉察出来，因为如今这里不存在通常所解释的不连续性。在46亿年后的今天，当用几何学方法进行判断时，要准确地确定出构造圈从什么地方开始、构造圈到什么地方终止，就十分困难了。但从力学上来考虑，下构造圈中含有地球的驱动机制，而构造圈却是据此而行动的。从这种意义上说，此界面就可作为“起驱动作用的”下构造圈与“被驱动的”构造圈之间的“联接器”了。从而，此界面在构造圈的演化及构造圈的性状中，起着十分重大的作用。

### 地震构造岩浆带

对地表的详尽研究揭示出，一些以地震、程度极不相同的构造运动及岩浆活动为特征的、延续很长的带，据信业已存在46亿年的地球上的大部份期间，就已在不同的地区里存在了。我们可以把这些地带称为“地震构造岩浆”带。

许多证据说明，所有的地震构造岩浆带都是相似的，而不管它们是在何时、何地形成的。更加详尽地研究揭示出，这些带都与大约46亿年前的“最早的太古代”的地球动力性状有关。

从实用观点出发，这些地震构造岩浆带都与矿床以及地震密切相关（例如，参见 Tatsch, 1973a、1974b、1975a、1975b、1976a、1976b、1977a、1977b、1977c）。有关矿床与地球地震区的起源、演化及现今特征，地震构造岩浆活动带的性状等概念的发展，都与本章前几节中描述过的活动楔形带相关。

## 第七章 大陆的造山—克拉通构造

从全球规模和长期，比如说，36亿年的角度来考虑大陆的构造及演化时，揭示出，在某些大陆上十分明显而独特的造山-克拉通构造，也同样出现于其它的大陆上。许多证据表明，大陆已通过增生而向外生长到一个中央地盾或地核之上。至于使大陆遵循这种准有序的增生型式而生长的准确原因，目前还不知道。大多数的现代假说所回溯的时间，并不是到36亿年为止，而对这一期间说来，所观察到的证据都倾向于支持大陆的这种自中心而生长的演化。

特别是长期对大陆的分析显现出，造山带不仅长而且是直线状的，也就是说，大陆的增生生成，似乎已沿一些大圈的区段发生而这些大圆不似小圆，它们在地面上的投影都成直线状（参考任一球体几何学教科书）。大陆看来是古老的，而且始自中心的增生过程，似乎至少在36亿年以前就已开始。最古老的造山带都最靠近大陆核的中心；而在距离中心较远的地区，则可能出现由不同时期的造山带所产生的大量叠加。看来许多造山带至少在过去36亿年期间，就已在全球范围内，大体以旋迴性而非周期性的方式进行活动。放射性元素在大陆核中数量占有优势，表明，在过去36亿年间的某个时期，于地幔中已发生过化学分异或相当的机械作用。如果确实发生过这样的化学或机械作用，那么，整个大陆区有可能是基本起源于地幔，且原始地球可能完全没有我们如今所识别的地壳或大陆（例如，参见Tatsch, 1977d）。

具有特色的造山-克拉通构造，在大多数大陆上保存相当良好（例如，参见 Douglas, 1969; Wynne—Edwards, 1969; Martin, 1969; Hurley, 1969; Drake, 1970）。一般说来，我们看到的是一个古老的前寒武纪地盾，其周围相继为长的、大体上成直线状的造山带或地槽带所环绕。这些带又往往为后期造山运动的叠加而受到破坏，要不然就是受到改造。

现在的假说没有解释这些造山带为什么都是直线状的以及在任一个大陆之内它们又是属于不同时期的；也没有解释何以它们的延伸看来具有全球的规模，且其活动大体上多以旋迴性而非周期性的方式发生。此外也还没有解释，所有造山带无论它们属于哪一时期，或发现在何处，而其中的空、时关系却又如此明显相似。本章将探讨造山带与克拉通的演化，并探索这些及有关问题的初步解答。

### 大陆、地台、地盾及克拉通

主要大陆（北美、南美、非洲、欧亚、澳洲和南极洲）大体上都是从深洋底上突然升起的巨大陆块，并约占地球表面的1/3。

克拉通是被褶皱带或有时为大洋所围限的陆壳，大而比较稳定的部份。克拉通以下列特点为特征：

- a. 长期（至少几亿年）的构造稳定性。
- b. 总的构造均一性（尽管有复杂的内部构造以及各部分的建造不属同一时期）。

c. 运动没有高的梯度变化。

地盾是克拉通之中的出露部分是为时若干亿年大面积基岩的那些单元。所有地盾地区的厚度几乎都相同：波罗的，34公里；非洲，35公里；加拿大，36公里；澳洲，35公里；东部南极洲，35公里。

地台是以沉积岩为主所组成的平卧或微倾地层所覆盖的克拉通部分。

## 大陆增生

由于沿中央克拉通边缘地槽活动的结果而引起的增生作用而使大陆发生造山-克拉通演化的概念，是由丹纳 (Dana, 1873) 提出的，其后又为许多其它学者，如伯特兰德 (Bertrand, 1887)、徐士 (Suess, 1909)、克劳斯 (Kraus, 1928)、鲍恩 (Born, 1933)、施蒂勒 (Stille, 1940)、阿尔汗格尔斯基 (Arkhangelsky, 1941)、科拜尔 (Kober, 1912)、邦达楚克 (Bondarchuk, 1944)、莎茨基 (Shatsky, 1946)、帕甫洛夫斯基 (Pavlovsky, 1953)、威尔逊 (Wilson, 1957)、基路里 (Gilluly, 1955)、瓦西尔奇夫斯基 (Vassilievsky, 1960)、格尼布登科和莎斯金 (Gnibdenko & Shaskin, 1970) 以及波拉克 (Pollack, 1976) 等人所发展。

大陆增生原理的最初含意，是简单地指一个活动的地槽区域转变为一稳定的大陆地带而言。后来的分析表明，大陆增生的过程又为地槽域的再生所复杂化 (Born, 1933; Stille, 1940, 1944; Arkhangelsky, 1941)。施蒂勒总结出，只有准克拉通区域、但不是真正的克拉通才能受到再生。嗣后，地槽再生的概念又被加以引伸而包括大陆地壳向海洋地壳的再转化，从而提出关于地质作用可逆性的假说 (Van Bemmelen, 1966, 1976; Belousov, 1962)。

## 太古代

在太古代期间，地面上有相当大的部分为浅海所覆盖，陆地只不过是一些低的、经常受到洪水泛滥的、无一定轮廓的岛屿或浅滩。与沉积作用同时发生的主要是基性熔岩的强烈水下喷发。

欧亚大陆的太古代杂岩受到高度变质，在这方面，它们与北美及南非的同一时期杂岩有所不同。然而，北美的拉布拉多和格伦维尔省以及非洲的马达加斯加、纳塔尔、坦噶尼喀、乌干达、赞比亚和少数其它非洲地区的片麻岩-麻粒岩杂岩系，却可与欧洲大陆的太古代杂岩相对比。几乎100%的太古代杂岩都在太古代时受到形变，而不是为后来的造山运动所变形，在这方面是有意义的 (Smith, 1976b)。

太古代构造运动的样式显示出，被卷入的物质具有高度可塑性，并表明当时所发生的褶皱作用与其它构造岩浆作用之间，关系密切。在大多数太古代杂岩中，塑性变形看来并没有形成任何独特的型式，这可能是由于地壳尚未分异成具有典型构造特点的区域的原故。其结果是，在各地发生的太古代构造运动过程大体上都有相等的强度，从而可把太古代称为地壳发展的“泛活动”阶段 (Tatsch, 1977d)。大部分证据都不支持在太古代时克拉通有简单板块构造式的演化作用发生 (Smith, 1976b)。

## 元古代

地球上第一个可辨认的造山运动，是发生在晚太古代或早元古代时期。在那一时期，某些地区里，早先经受剥蚀、甚至被剥蚀成准平原的太古代片麻岩基底，也受到非常强烈地碎裂和部分的沉陷（例如参见Tatsch, 1977d）。在那里，地槽造山系和克拉通地块体系，发育在欧亚大陆的下列地区里：芬诺斯坎、萨克萨干、中亚细亚、北哈萨克斯坦、叶尼塞、贝加尔、斯坦诺瓦、小亚细亚、阿罗维尔、萨特普特、希莫加—达瓦尔以及一些次要地区。这些早期造山—克拉通体系中的某些体系，在前寒武纪中期已完成了它们最早有记录的旋迴，然后处于休眠状态；其它体系则继续进入次一旋迴或复活。因此，在这方面，它们与太古代的有所区别（例如，参见Smith, 1976b）。

当仔细进行分析时，发现最老的造山系与今天所知的最新的造山带相似。优地槽和冒地槽在细节上有所区别，并且可以根据它们的火山—沉积及其深成系列而把它们划分为构造—建造带。和较新的体系一样，最老的体系也显示出明显的陆源物质的来源区及堆积区。举例来说，在东西伯利亚奥廖克玛河盆地中下元古代的沉积（老于21亿年），就是属于地台型的。

与晚期的地槽杂岩一样，下元古代岩石，是以线状褶皱为其特点的，它们或是组合成为长带地带或是组合成为巨大的弧形而凸向地台岩块间的新生角。

有长达几千公里的深断层成为地槽带及其伴生构造带的边界。这些地槽内部的断层常与大量水下熔岩的喷发作用（原始火山作用）、及同时发生的蛇绿岩侵入作用相伴生（第十章，侵入作用与喷出活动）。沿地台边缘的断层具有直线状轮廓，并结合成为具有两个或更多个交切方向的体系。在这方面，这些断裂与后期的断裂相类似（例如，参见Salop and Scheinmann, 1969）。

比较详尽的研究揭示出，这些断层不仅确定了地台与地槽的原始轮廓，而且还控制了火山沉积建造和许多深成侵入体的位置，同时它们还影响到褶皱构造的总方位。萨洛普和沙因曼（Salop & Scheinman, 1969）曾讨论过，断层在作用地壳的高渗透性带及热的“出口”方面所引起的作用。关于它们与地球矿床的起源、演化及现今特征间的联系，也已有所分析（例如，参见Tatsch, 1973a, 1975a, 1975b, 1976a, 1977b, 1977c）。

分隔开太古代（界）和元古代（界）的界限，被认为是大陆造山—克拉通构造演化中的最重大的事件之一：它标志着地球从泛活动体系转变为真正的造山—克拉通构造。还不了解这一过渡是快速发生的或是经过了比较漫长时期；大多数的估计认为，它发生在长达几亿年的时期里。

最老的造山带并不是在原始玄武岩质或下地幔的下层之上形成的，而是形成在一个碎裂而沉陷的变质花岗岩的太古代基底之上的。十分有可能最早的造山克拉通构造，并非围绕绿岩核心的简单增生，而是太古代花岗片麻岩基底的穿透分异运动的一种强烈活化作用（Tatsch, 1977d）。

## 晚前寒武纪

在晚前寒武纪期间，大陆的造山—克拉通的演化，基本上在地槽带向太古代地台上的增生。然而这并不是一个简单的演化过程，而是一个为稳定地块不相连部分的塌陷和沉陷所

周期性中断的过程，暗示着存在于构造圈深部范围内起因机制的影响。

地台扩展的过程始于早元古代末，这时地槽开始附着到克拉通上。这种情况，例如在加拿大和西伯利亚的早前寒武纪褶皱系中，都是显而易见的。贝加尔褶皱系的冒地槽的很多部分，也是增生到安格拉和阿尔丹地台之上的。此外，早元古代的斯坦诺瓦地槽系本身，也附着到阿尔丹地台上。同时，在一些地槽带中的下元古界构造，由于沿着新的和某些老断层发生的塌陷作用而受到重新调整。这再次说明，在构造圈的深部有一个长期活动的起因机制。

在所有大陆之内，中元古代地台及冒地槽活动广泛发育，其中产出大量的石英岩、石英岩-砂矿、石英砾岩和化学成因的云白岩。地台曾被侵蚀成准平原而具有厚的化学风化壳。在有些冒地槽地带里，出现了第一个胚胎期的，为厚厚的红色碎屑物及近地面的斑岩所充填的边缘坳陷。

在中元古代末期（约16.5亿年前），许多大陆都为辉长-苏长岩、斜长岩、花斑状环斑花岗岩和碱性岩等典型地台型分异深成岩所侵入。这些后造山侵入作用，为一构造宁静期而与中元古代同造山期（约在18.5亿年前）的深成侵入作用所分隔；在此宁静期中，有酸性熔岩的局部地面喷发。

在元古代的后半期（即晚元古代），地球的构造性状是十分复杂的。在许多地槽带内出现的巨大内部隆起，把它们分划成区带状。许多边缘坳陷，在靠近分割开地台与冒地槽的深断裂附近，都相互隔绝了。随同着晚元古代的地壳运动，碎屑状磨拉石被堆积在边缘坳陷中（例如，乌拉尔的阿申斯克统）。在活动的地槽带里，相的分带性增强，且砾状岩石的数量有显明的增加。在地台上，特别是古断槽内，堆积有大量陆源型和碳酸盐的沉积物。玄武岩质火山活动几乎遍布于所有地台上。

在一些地台上发生了塌陷，在塌陷构造的基底上，形成有新地槽。这些新地槽中有许多于元古代结束前，就完成了它们的发展过程（例如，非洲的达马拉-基尔巴拉-加丹加带）。

接近晚元古代末期的强烈地壳运动，在许多地槽带内导致回返。在大多数原始地槽（即，早元古代所形成的地槽）中的内生作用，包括超基性岩浆的小型侵入作用和十分强烈的花岗岩深成作用。在此时期中形成的花岗岩山脉，于每一地台区中都占有数十万平方公里的面积（例如，贝加尔山区就含有120,000平方公里的此类建造）。

## 显生宙

几乎在所有大陆内，都有一层角度不整合把晚元古界和显生宙分隔开来。一般地说，始寒武纪到寒武纪的沉积，大体上是逐渐过渡的。有些大陆内，最晚期元古代地层主要出现在古断层中，而最早的显生宙地层却在古生界底部上形成了广阔分布的岩席。

有些多旋迴地槽带已存在了20亿年之久（例如，贝加尔地槽区）；较年轻的单旋迴地槽带却只存在了几千万年。构造运动在长时期中所表现的周期性以及大陆造山-克拉通演化的明显方向性和规律性都说明它们是由深部的机制引起的。

## 一个典型的大陆：北美洲

这种所谓某些大陆是“典型的”及其它一些不是“典型的”的说法，不过是人为的分

类；同时还得承认，对某些大陆所进行的研究，要比对其它的更详尽些。不管怎样，可将北美大陆视作一个良好基地，通过它可以分析某一大陆在过去36亿年间的造山-克拉通构造及演化。

## 北美洲的太古代原始大陆

加拿大地盾含有大量被包围在花岗质岩石里的火山岩带和沉积岩带。在地盾的南部，这些带被排列成火山岩与沉积岩相互交替的线状格局。在地盾的北部，火山岩带和沉积岩带的分布比较随便，但仍表现为亚线状格局。

见于加拿大地盾太古代褶皱带内占有优势的走向和格局表明，这是正在演化着的地壳的原始构造，而不是次生变形的和变质的构造。这种演化，表明了原始大陆的发展。较详细的研究表明，太古界的走向形成了三个三角形或准四边形地区的边缘：（1）西北安大略及曼尼托巴的邻近部分；（2）哈得逊湾西北部；和（3）斯莱夫省中部。太古界围绕各个结节地区的走向与格局的分布，可用以粗略地勾划出三个所设想的古老太古代原始大陆的核部，这三个原始大陆是：苏必利尔、哈得逊和斯莱夫。

在高度概括的形式里，加拿大地盾内的每个原始大陆，都组成于一个克拉通或核以及造山地带或边缘造山带。世界上的其它地盾也显示有相似的太古界构造（例如，参见Tatsch, 1977d）。

除了所观察到的地表的增生之外，太古代原始大陆还可能经受过向其底侧的垂向物质增生。这种壳下沉积作用，或硅铝质的垫板作用，无疑有助于太古代原始大陆内稳定性的增长。北美洲的这些太古代原始大陆，在垂向和水平方向上增长时，它们就相互融合而失去其各自的本性，并进而形成如今所知的加拿大地盾。与此同时，也以相似的过程而产生出其它的大陆地盾。

## 苏必利尔原始大陆

苏必利尔克拉通，与地球上大多数其它克拉通一样，也含有许多火山物质和沉积物质互相更迭的条带。在此克拉通的南部，有三条走向东西的火山岩带：乌奇、基威廷和阿比蒂比带，并于现今为准沉积物、混合岩、副片麻岩和花岗质岩石所组成的插入沉积带所隔开。

通过对这些地带的较详细调查，揭示出有关其物理构造和化学成分方面的更多的细节：

- a. 从克拉通向外，火山岩带的宽度在增加。
- b. 这些带内的各个火山岩区，其规模表现出有规律的增大，最大的一个位于外带的东部（即，阿比蒂比）。
- c. 火山岩群中的酸性火山岩含量，从克拉通向外逐渐增多，而在外带的东部达到最大值。

在苏必利尔原始大陆西北部，这三个主要火山岩带（温迪戈、阿米斯克及拉隆基）在相对的规模和酸性含量方面，向西北（即，从克拉通中部向外）都显示有相似的、但又不大明显的逐渐变化。作为一个整体来看，苏必利尔克拉通显示有长期复杂的历史，其中牵涉到的有，沿中央三角形或四边形克拉通的线状或准线状边缘地带，有多期的花岗岩侵位。

## 加拿大地盾在元古代期间的增长

与太古代的岩石适成对照，元古代的岩石形成一些线性条带和开阔的盆地单元。以北东和北西向为主的元古界走向，从南北向和东西向的太古界走向偏转多达  $30^\circ$ 。大多数元古界组合，表现为平卧的或微倾的地层，通常以极度的构造不整合覆盖于太古界基底杂岩之上。这种情况，在苏必利尔地区特别清楚。在丘吉尔省，元古代赫德森造山运动，使大多数太古代-元古代的年龄关系模糊不清，从而使一些岩层单位的年龄，如那些出露于北萨斯喀彻温和巴芬岛南岸的岩石与加拿大地盾的岩石以及其它下元古界（阿费比亚）岩石等的年龄尚成疑问。

拉布拉多深海槽可以作为元古界岩层的形态和格局的范例，它是一条长近1500公里走向北西的地带，其中含有一个包括铁质建造、镁铁质火山岩及伴生侵入岩的复杂沉积物组合。

加拿大地盾的大古界与元古界在岩性、造山运动和构造运动等方面，都显现出悬殊的差别。特别是在地盾的南部，太古界与元古界的界限，是以自基诺尔造山运动（25亿年前）之末到大约23.5亿年前的一个宁静时期（厄帕尔契间断）为标志的。关于这1.5亿年的宁静期，除了在紧接厄帕尔契间断之后有一个以典型元古代地壳状态为特征的时期外，在其它方面了解很少。

## 以二元盾始行星假说阐明的大陆构造

对以二元原始行星假说阐明的大陆造山—克拉通的演化进行分析时，可把克拉通视为构造圈式地球模式的八个地球块；而把造山带视为三个互相正交的活动楔形带。前一章中图6—1表示的是八个地球块及与其伴生的三条活动楔形带的地表迹线。此模式中的八个点分别标以：AL, 阿留申；BV, 布维；GA, 加拉帕戈斯；GI, 直布罗陀；BN, 孟加拉；KR, 克马德克。

每个地球块的地表迹线，都是一个边长等于10,000公里的等边球面三角形。每条活动楔形带，在地表上大体都集中在一约40,000公里长的大圆上。而每条活动楔形带的顶，大致都沿着在地球表面之下1000公里的下构造圈表面上的长约34,000公里的巨大圆环面分布。

为了便于将此模式的构造同地球的实际构造相联系，在表7—1中，列出了此模式的八个地球块以及实际地球上的相应地盾。根据这一模式，八个地盾中的每一个，在过去36亿年间，都以大致相同的方式，并按下节描述的统一全球机制而演变。

表 7—1 构造圈式地球模式的八个地球块以及与此同一的前寒武纪地盾

构造圈式地球模式的地球块	相应的地盾	构造圈式地球模式的地球块	相应的地盾
AL—GA—GI	北美	EV—GA—GI	南美
AL—GI—BN	欧亚	BV—GI—BN	非洲
AL—BN—KR	(西北太平洋)	EV—BN—KR	南极 (在背面)
AL—KR—GA	(东北太平洋)	BV—KR—GA	(东南太平洋)

## 以构造圈式地球模式阐明的造山带的演化

在大陆造山-克拉通构造演化中的最主要的部分，就是造山带的发展。根据构造圈式地球模式，这些造山带都是大约在46亿年前当地球被形成时就存在着的。

从几何学-力学的观点看，可以通过研究理想活动楔形带中两个区域内的相对张性和压性的性状，而在横剖面上分析这些造山带。这种性状的基本要素表示在图7—1中。根据这一模式，一些地背斜A和一些地向斜S都是由动力反应形成的，而这些动力反应，则是沿构造圈内理想活动楔形带LOR的左侧与右侧而存在的相对挤压(K)和相对引张(T)的环境所引起的。

当相对压力在活动楔形带LOR的左侧和右侧发生变化时，次级楔体A和S的性状，是这些地背斜和地向斜的形成与发展的基础。在沿LO面发生相对挤压的情况下，次级楔体A，由于向上“楔出”而产生地背斜。在形成地背斜的同时，也形成地向斜。沿RO面而存在的相对的引张，使次级楔体S下落成为“洼陷”，从而为地向斜的形成奠定基础。

随着时间的推移并根据此模式的基本驱动机制，相对挤压的环境由此体系的左侧LO面，变换到右侧RO面。这种情况，就在次级楔体S内引起构造岩浆活动。而后，在中部W处的普遍抬升，就产生出山脉（第十二章）。

根据这一模式，这种三阶段旋迴性状，在过去46亿年间，曾反复在地球三条活动楔形带的活动地区里发生过。在下一节里将讨论大陆是怎样在这种三阶段旋迴的环境中演变的。

## 以构造圈式地球模式阐明的北美大陆的演化

根据构造圈式地球模式，一个大陆的演化，牵涉到一个地球块和三条活动楔形带每条中的一个90°块段。就北美洲的情况来说，这个地球块是由图6—1中的AL、GA和GI各点来标出的。这三条相联系的90°楔形带块段都位于北美地球块的周边：(1)AL—GA，(2)GA—GI和(3)GI—AL。在图7—2中对此有更详尽的表示。

根据这一模式，加拿大地盾在过去36亿年间的大部分时间里，已大体保留在为三个90°的楔形带所限定的准刚性等边球面三角的范围内(Tatsch, 1977d)。在此期间，这三条楔形带块段供给构造岩浆活动以活力。而至少在过去36亿年间，相继活化了，已出现在中央克拉通边沿的各个前寒武纪和显生宙的构造带。

难以准确判定，中央克拉通最初的核心形成于何时或来自何处。根据此模式，它出现在地球存在后的某一早期阶段。形成原始克拉通核心的物质可能有两种来源：(1)从地球

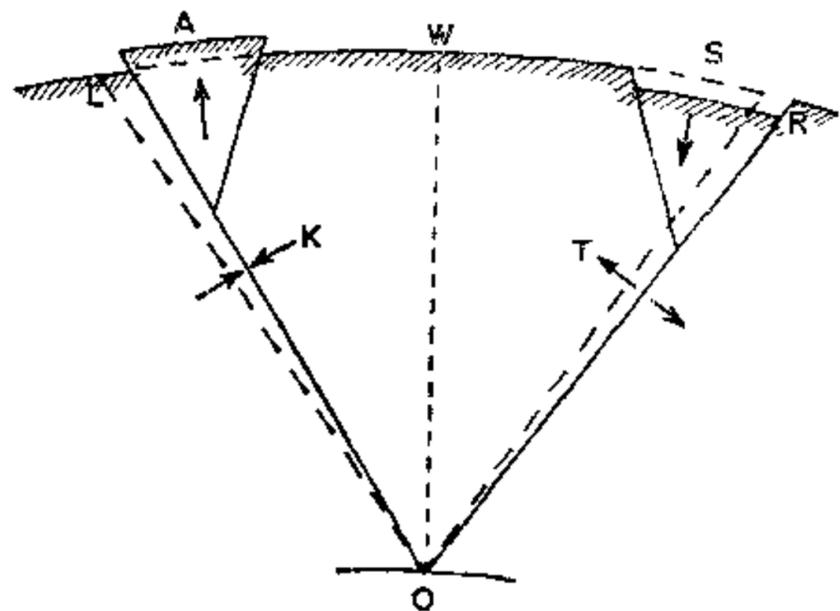


图7—1 示意图表示，通过沿理想活动楔形带左、右两侧上所出现的相对挤压(K)和相对引张(T)的环境，而发生的地背斜A和地向斜S的理想演化 (J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

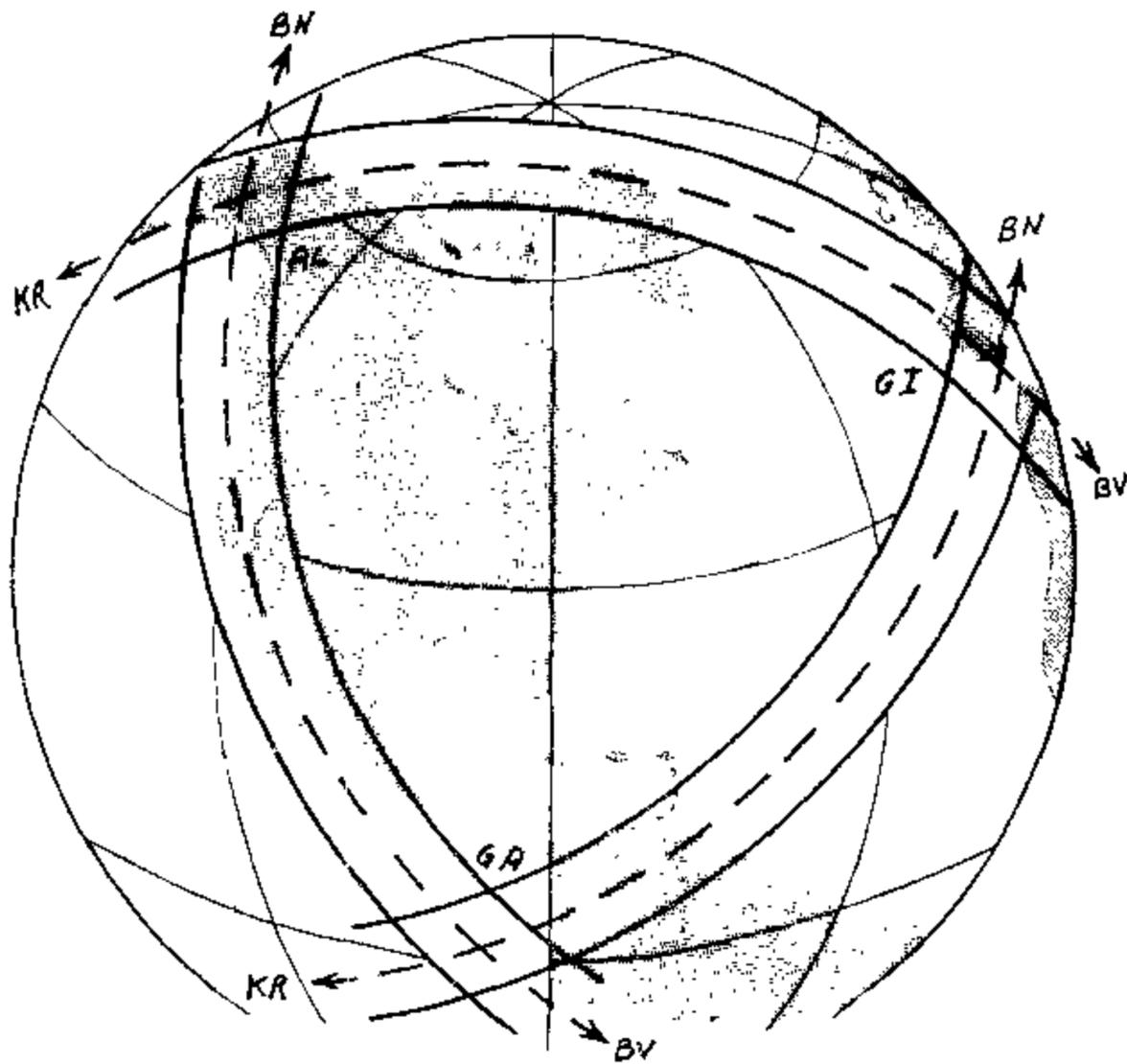


图 7—2 示意图表示，作为构成北美大陆演化基础的阿留申—加拉帕戈斯—瓦布罗陀地球块以及与其伴生的理想活动楔形带块段  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

原体的碎块增生到原始地球上的花岗质类型的物质；和(2)在三条共生的楔形带块段内，由构造岩浆活动所产生的物质。

无论是那种情况，一如为此模式所阐明的，最早的克拉通都位于地球块的大致的中心之上。观察证据表明，从中元古代开始，就已发展出一些小的准稳定地台。当活动楔形带将物质增生到原始地台的底部和边部时，这些准稳定地台就增长和稳定了。过一定时期之后，中心克拉通有起巨大“限度止动器”作用的趋势，而把楔形带的活动限制在克拉通的地平周围。

当中央克拉通的规模由于不断向其边缘的增生而增长时，有些克拉通的规模变得如此巨大而可称为超级大陆，当它们交叉重叠在一个特别活动的楔形带块段之上时，就要裂离。示于图 3—7 中的南美洲和非洲就是一个这样的例子。另一个例子就是联合古陆的分裂。在其它场合下，被捕获在一个楔形带体系中的两个地台，彼此相互碰撞并结合在一起（例如，东欧和西伯利亚地台）。

关于中央克拉通的北美洲造山带的种种空、时分布，可以通过所涉及岩石的年龄研究而予以标定。有关过去二十多亿年间这种分布的例子，可参看图 7—3。在此理想的示意图内，直接位于中心克拉通周围的，是最古老的可确认的造山带。向外和它们大致平行的，是较新的造山带：因努西亚 (Innuitian)、科迪勒拉、阿帕拉契亚造山带。

对于北美地质的详细研究，发现此模式所预测的特定地区，可与实际观察到的资料相

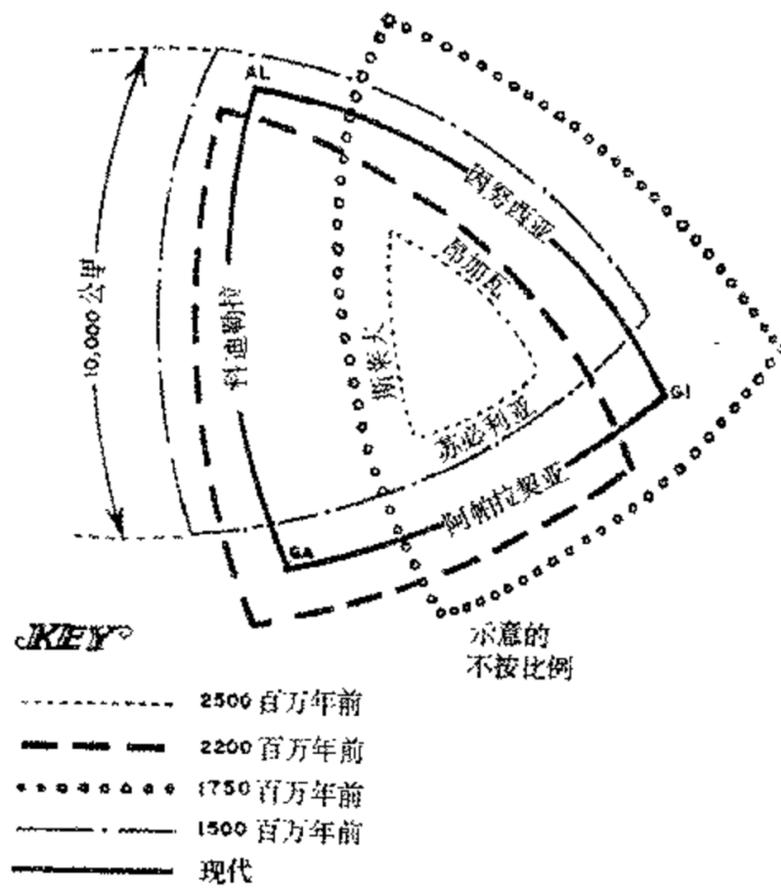


图 7—3 示意图表示，北美洲的理想造山带，在过去25亿年中，有关中央克拉通的不同的空一时位置  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

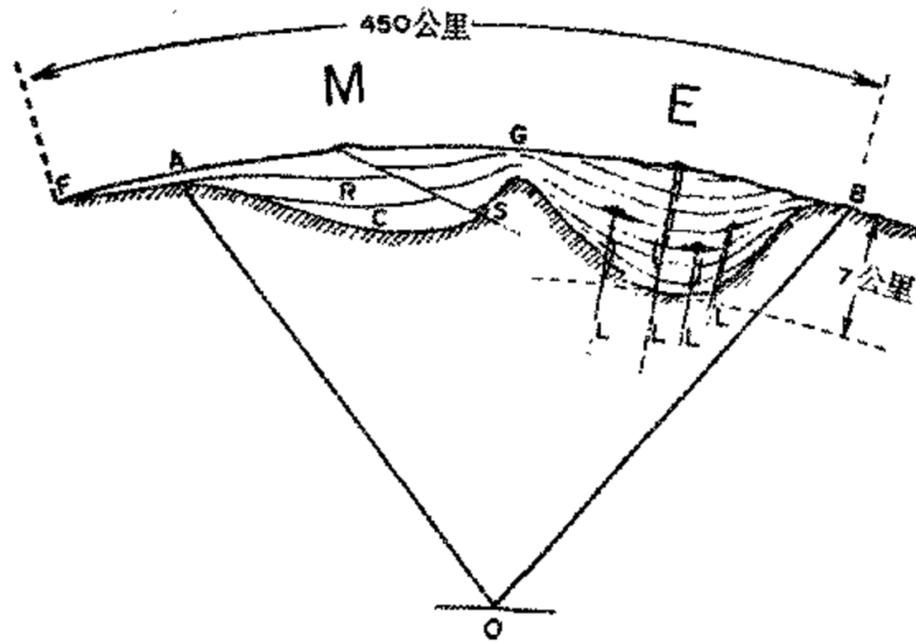


图 7—4 新英格兰，老阿帕拉契亚的塔康造山幕以前的寒武纪 (C) 和奥陶纪 (R) 地层与火山岩的复原剖面  
AOB = 两个活动楔形带。B = 边缘地。F = 前陆。M = 冒地槽 (纽约东部)。G = 地背斜 (弗蒙特南部)。E = 优地槽 (新汉普郡)。L = 熔岩与火山岛的供应者。S = 上奥陶纪塔康逆掩断层的底基  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改的)

对比。这种对比关系之一，就是认为新英格兰较老的阿帕拉契亚，是在塔康造山运动以前就已存在的。图 7—4 所表示的是此地区寒武纪和奥陶纪岩层的复原剖面。图中还表示出激发塔康造山运动的所预测到的活动楔形带的几何学情况，包括当时在此活动楔形带内的地向斜和地背斜的相对位置。所示剖面是加拉帕戈斯—直布罗陀楔形带块段上的奥陶系的部份布局。

古落基山脉的主要构造单元，可为此模式的特定预测与实际观察资料之间提供另一对比关系，即，在晚古生代时，恩康帕尔隆升和前岭隆升为科罗拉多深海槽所隔开。图 7—5 是此地区的复原剖面。以及据此模式所涉及的活动楔形带的基本单元。所示剖面，为存在于晚古生代的加拉帕戈斯—阿留申活动楔形带的右边侧。许多后来沿科罗拉多深海槽轴部发育的如今呈北西走向的隆升 C，就是由于晚古生代的加拉帕戈斯—阿留申活动楔形带的性状所引起的，由下降方向逆转为上升方向的地带。在新生代期间，拉拉米侵入作用也沿此同一的线性方向追踪。

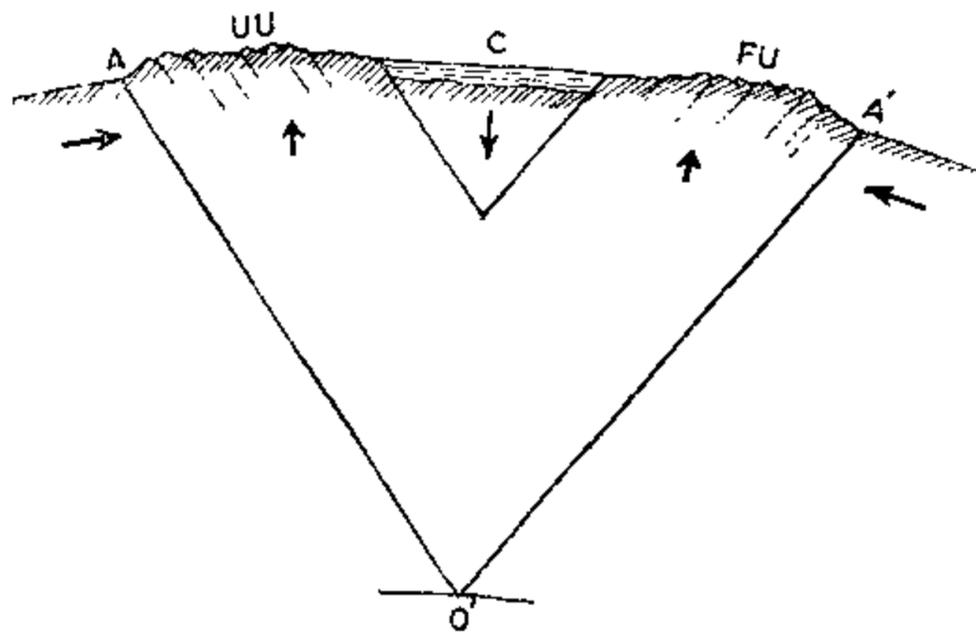


图 7—5 沿加拉帕戈斯—阿留申活动楔形带的右侧，向西北看古落基山脉（晚古生代）的主要构造要素  
 $AO'A'$  = 次级的活动楔形带。UU = 恩康帕尔隆升。FU = 山前隆升。C = 科罗拉多深海槽。AA' 剖面大致向北纬 $38^\circ$ ，西经 $108^\circ$ 延展，约至北纬 $40^\circ$ ，西经 $105^\circ$   
 (J. C. Holder 据作者初版中的略图修改而成)

此模式的特定预测与实际观察资料间的另一个对比关系，提供了加拉帕戈斯—直布罗陀活动楔形带在古生代后的性状。这一性状本身，可由海湾海岸地槽的晚古生代的活动表现出来。图 7—6 中，示意地表示出此体系古生代—更新世的地层。图中还表示出复向斜  $AO'A'$ ，地向斜 G，和复背斜 U。复向斜位于此图幅外的右方。S 代表侵入的岩盐。

图 7—7 是据此模式所表示的北美洲在中生代时的综合图象，其中同时包括地向斜和地背斜。图中的 RR' 剖面 and PP' 剖面，与先前在图 7—1 所表示的理想活动楔形带的剖面十分相似，横剖面宽度为  $1000\pi/2$ ，或约 1571 公里。据此模式，落基山 (GA—AL) 和阿帕拉契亚山 (GA—GI) 的两个活动楔形带，于晚中生代时彼此在墨西哥北部互相交切。此交切点自中生代以来已向东南方向“迁移”，如今已移到此模式中的加拉帕戈斯点附近。

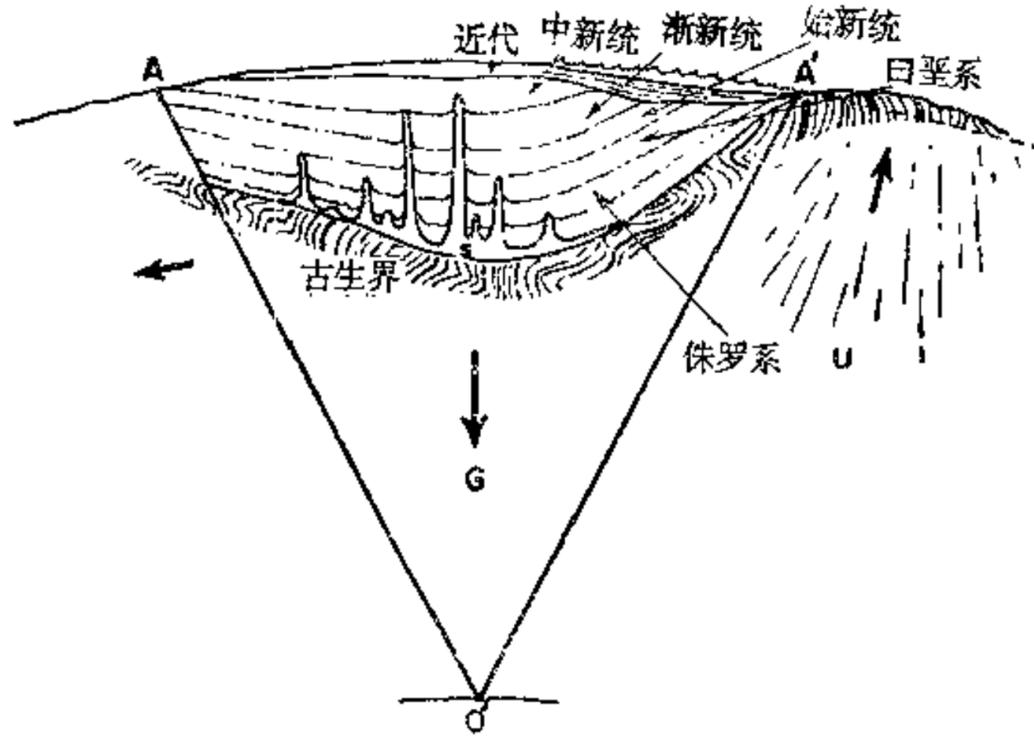


图 7—6 沿格拉帕戈斯—直布罗陀活动楔形带的左边侧，向东北看海湾海岸地槽的后古生代造山运动的性状  
 近似比例尺：1英寸 = (水平) 225公里；(垂向) 10公里  
 (J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

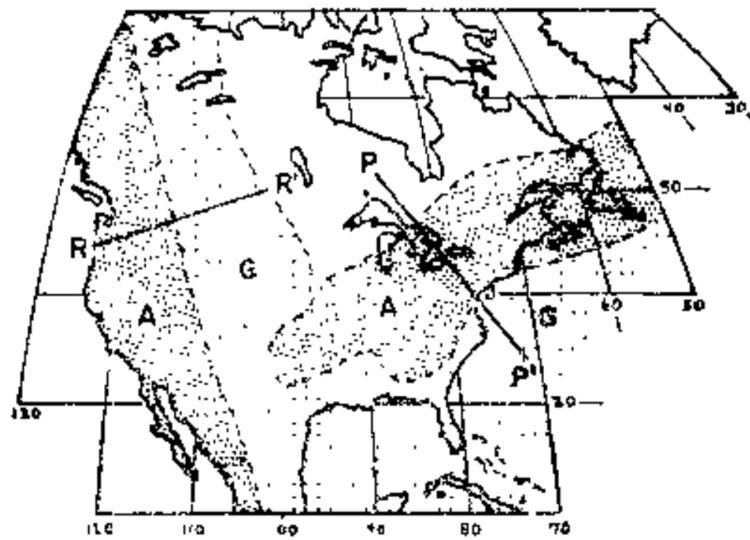


图 7—7 晚中生代期间的北美地槽 (G) 和地背斜 (A)  
 (J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

美国盆地与山脉地区的更新世造山-克拉通构造，为此模式所预测的及在该区所观察到的资料间的对比关系，提供一较新的例子。这一构造已示意地表示在图7—8里，它是沿加拉帕戈斯-阿留申活动楔形带右边侧所作的横剖面。此外还表示有 (1) 次级活动楔形带 AOA'；(2) 形成在隆升之上的更新世冰川 A 和 A'；及 (3) 拉杭坝 (L) 和邦纳维尔 (B) 先成湖。

其它有关过去36亿年间北美洲造山-克拉通的构造及演化的细节，可以通过对此模式适当的空、时预测，与所分析地区及时期的相应观测资料进行比较，而用同样的方法去分析。同类的分析，也可用以研究其它大陆在过去36亿年间的造山-克拉通的构造和演化(例如，参见Tatsch, 1977d)。

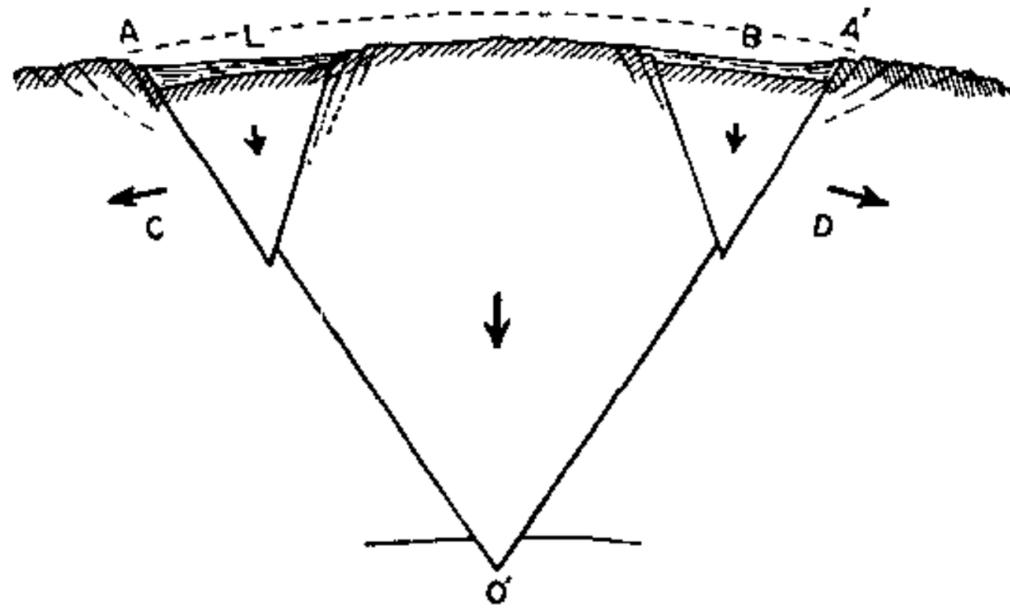


图 7—8 沿加拉帕戈斯—阿留申活动楔形带右侧，向西北看美国西部盆地和山脉地区的全新世造山—克拉通构造  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

### 有关大陆构造的其它概念

除以造山—克拉通演化为基础的假说之外，还为大陆构造提出过许多其它假说，这些假说近来在流行的文献中已有相当广泛的评论，无须在这里进行研究（例如，参见，Lowman, 1976; Smith, 1976b）。

## 第八章 地球的深源地震

地球构造圈演化的研究，必须包括对地球地震的简要分析。因为，在地球的地震活动和构造圈的动力学之间，似乎存在着因果关系。由于二者看来都是深位的，所以详细研究地球的深源地震，对这种分析说来，就显得格外重要。

虽然还不了解地球的地震性状与构造圈动力学间的确切关系，但鉴于此二者间的相互关系都是这样的，以致任何一个用于构造圈演化的假说，都必须说明那些区域里的地震性状，与构造圈的动态特性相关。举例来说，强烈的构造运动都集中在较少数的几个狭窄地带里，合计起来约60,000公里（约等于 $1\frac{1}{2}$ 的地球圆周的距離）。几乎所有目前的地震和火山活动都发生在活动带的那些块段里，其中包括大洋与大陆的裂谷系、岛弧复合体以及年轻褶皱带。

这些观察事实表明，狭窄的活动带是由地球构造圈内的少数巨大岩块间的相互作用而形成的。至于何以物质都集中在这样的大岩块里，以及何以所产生的构造运动、岩浆作用、地震活动和变质作用，都集中在所设岩块间的狭窄长地带里的原因，现在还不清楚。尽管如此，但这种情况暗示出，地震带仍是一单一全球体系的一部分（Tatsch, 1977a）。

于是，在假设地球的地震性是现今构造圈性状的度量标准的情况下，下面几节将研讨与全球性和区域性的地震性格局有关的近期观察结果，以期如此能够得到关于地震活动与构造圈性状之间因果关系的线索。

图8—1表示地震的全球分布格局。研究此图幅所依据的资料（例如，参见Barazangi and Dorman, 1969; ESSA, 1970）表明，较深源地震都被局限在那些于各种深度上都发生地震的地震带中的窄狭且大体上是位于中央的部分（Tatsch, 1977a）。在不发生深源地震的地方，地震活动基本上都集中在岩石圈板块的边缘地带。

地球地震性的全球特征，可以根据构造圈的构造、地震活动与构造岩浆活动的相互关系，以及不同深度上的地震性状来进行研究。

### 地震性状是构造圈构造的函数

因为地震性状与构造圈动力学似乎相关，这就说明，前者也与构造圈的构造相关。因而，最好先简略回顾一下，能表明地震性状乃是构造圈构造的函数的证据。

观测到的证据表明，地壳和地幔无论在大洋区还是在大陆区都被分为薄层。其它研究表明，除了构造中的这种垂向变化外，构造圈还包含有在地壳中与上地幔中的水平方向变化。大洋壳固然是比大陆壳薄一些，而且还有其它方面的区别，但这些差异并不扩及上地幔。因而在大洋区和大陆区之下的上地幔，都几近相同。

根据这些和其它分析，可见地震性状乃是构造圈构造的函数（进一步的细节，参见Tatsch, 1977a）。

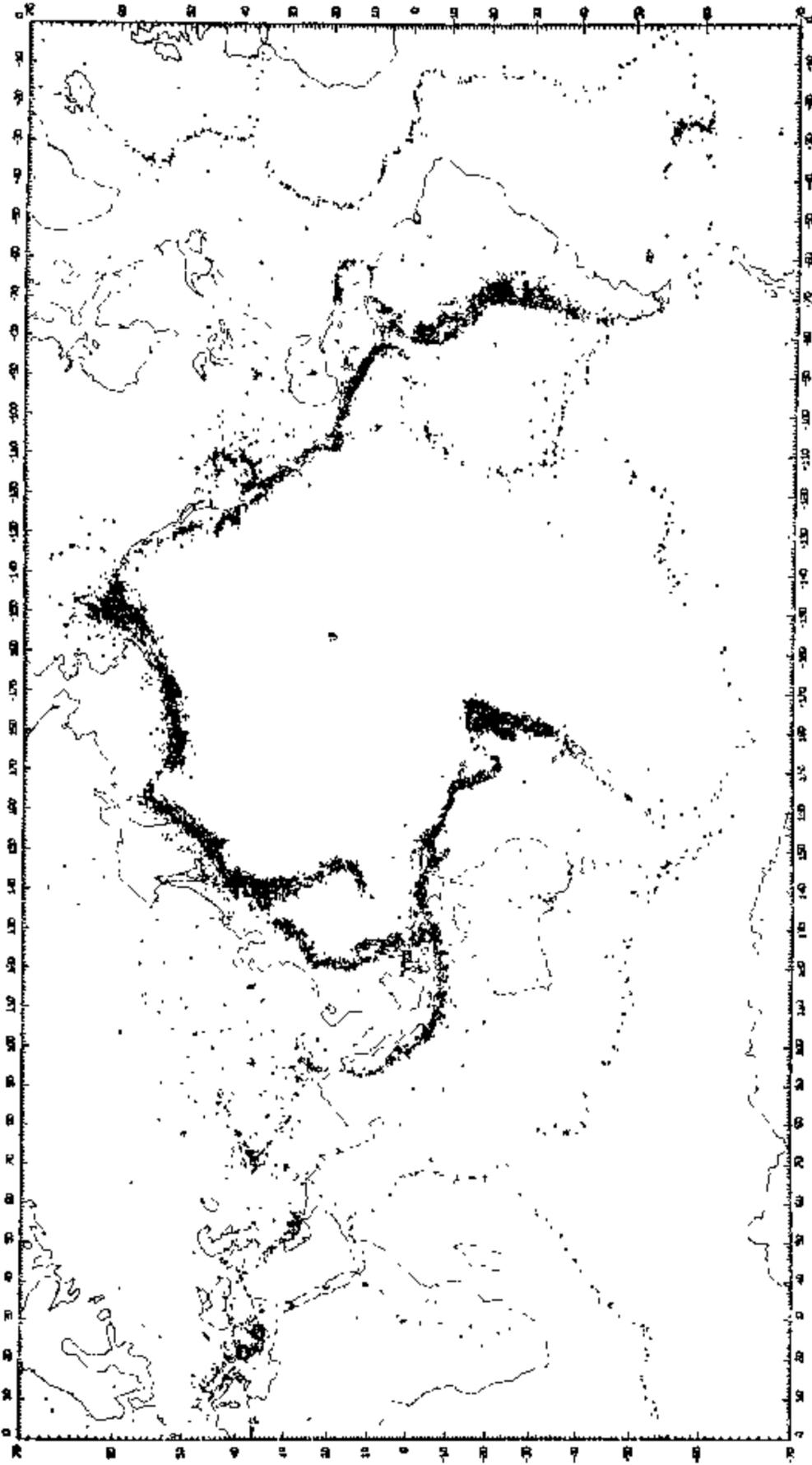


图 8-1 地震的全球分布  
 (据 Barzangi & Dorman, 1969; HSSA, 1970)

## 地震性状与构造岩浆活动之间的相互关系

从全球规模来看，一段时期以来已了解到，地震性状通常与一定的构造岩浆活动相关（例如，参见Gutenberg and Richter, 1954; Holmes, 1965; Hart, 1969）。在地球上的某些地区里，已观察到在下列几方面，即：（1）热流与地震延迟时间之间；（2）震中、重力方向和火山的排列之间；以及（3）发生在共同构造中的深源地震、浅源地震及火山作用之间，都存在有比较特殊的相互关系。

尽管存在这些相互关系，但显然也有相互无关的情况。在洋脊的某些块段里，虽然在构造运动方面是活动的，但却没有地震活动。某些火山块段也无地震。某些强烈地震块段却缺乏火山。其它强震块段并没有显现出构造岩浆活动（至少不在地表上）。可以用不曾产生出地表破裂的地震应力释放及深部破裂来解释。但却不容易解释其它与构造岩浆作用无关的地震活动。

根据上述及其它分析来看，可以得出结论即，任何一个关于地震性状的假说，都必须同时解释地震活动与构造岩浆作用相关和无关的情况。

## 构造圈内各个不同深度上的地震性状

在分析地球的地震性状时，必须考虑其深度系自地表直到超过700公里而进入构造圈内的一完整的地震深度系列。由于在不同深度上所观察到的地震性状有所差异，使此问题变得复杂了。举例来说，看来上地幔比下地幔更会使S波衰减；此差异量的规模可达到一个数量级（Knopoff, 1969）。也可把上地幔分为若干层，下面几层的Q值较低。根据克诺波夫（Knopoff）的模式，Q的平均值在0—325公里是120；在325—650公里是75，等等。

对地震性状的研究表明，某些浅源地震，都是由引起深源地震的同一机制所产生的。至于那些与深源地震没有共同动力的浅源地震，则可能是由于地表活动引起的，如（1）岩石圈板块间的相互作用，（2）岩石圈内的重力滑动，（3）火山作用，以及（4）地壳的均衡调整与接近地表的某种其它次级活动（Tatseh, 1977a）。

也还不完全了解，有关那些似乎与深源地震共用同一起因机制的浅源地震的动力。在此领域还有许多工作要做。由于深源地震很少，而且因为大多数物理概念不适用于700公里的深处，这就使得此项任务更加困难了。如果根据全球来考虑，某些观测结果或许至少可以提供一些初步的解答。对此将在下面关于假说的部分里进行研究。这里只须提出：从总数上看，深源地震比浅源地震少得多；它们在地理分布上受到更多的限制；而且它们用以激发出它们的能量分布情况更加复杂。

## 地球地震性的区域特点

地球上的某些地区显示有清晰的地震格局。两个最明显的格局，是互相正交的环太平洋带及横贯欧亚大陆（或特提斯）带。这些带的区段都接近于大圆的弧；如图8—2所示，横贯欧亚大陆带的一段是 $180^\circ$ ，而环太平洋带的是 $270^\circ$ 。

通常所解释的横贯欧亚大陆（特提斯）地震带，大致沿着大圆EAB的大部分区段延伸，这一段大约是 $180^\circ$ 。通常所解释的环太平洋地震带，大体上沿着大圆A'ACDF'的区段延伸，这一段合计约呈 $270^\circ$ 。通常把两带描述为在A点附近交叉。环太平洋地震带的地

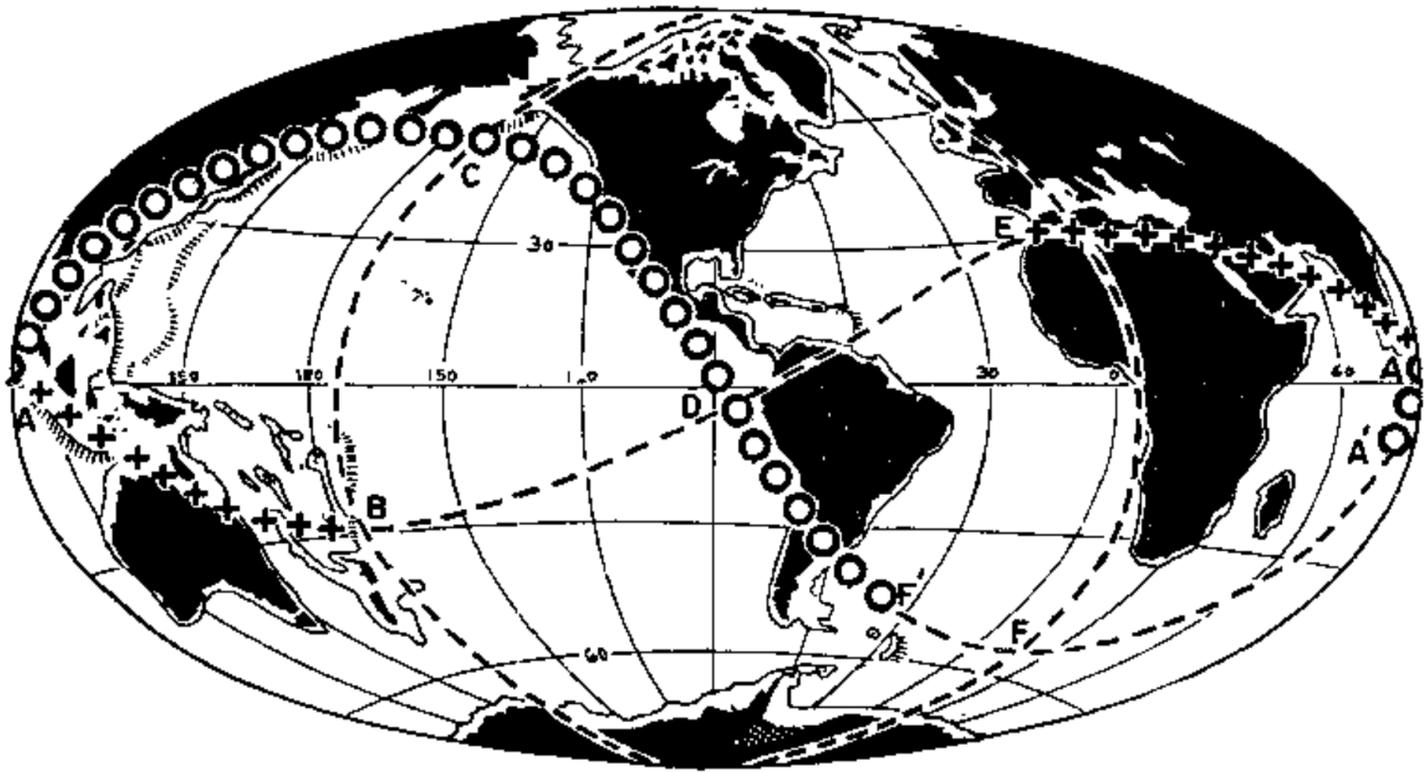


图 8—2 叠置在修改过的艾托夫全球投影图上的环太平洋和横贯欧亚大陆（特提斯）地震带  
(J.C.Holden 据作者初中的略图修改而成)

震，总计约占有历史纪录的地震次数的75%；横贯欧亚大陆地震带（特提斯）的约占23%，其它地带仅约占2%。

图 8—3 表示的资料与图 8—2 相同，只不过图 8—3 采用的是麦卡托投影，而不是图 8—2 所用的是修改过的艾托夫投影。

对于几乎能说明所有现今地球地震性的这两个带的仔细研究，应当能为构造圈动力学提供更多的细节（参见Tatsch, 1977a关于这方面的评论）。举例来说，任何一个对于这两个带的分析，都应提到所存在的与之伴生的自然地理特征都是相当短寿的。因为太平洋和特提斯这两个带都没有存在多长时间，所以，应当想到，与此两条地震带相伴生的自然地理特征，也是比较短寿的（Tatsch, 1977a）。

从存在于地球地震性状与其它地质现象间的关系中，可以找到，这些和其它区域地震格局短寿存在的证据。例如，长期以来就设想，地球地震性状与某些构造岩浆作用有关，而此二者又与全球规模的地球深部构造及地球性状相关（例如，参见Hart, 1969; Drake, 1970, 1976）。大量证据表明，至少在46亿年间的大部时期里，已在地球的各个部分发生过构造岩浆活动。

如果地震性状总是与构造岩浆活动有联系，那么，此二者都很容易归因于，在地球历史很大一部分时期里就已存在的单一、深位、全球性的机制。在关于各种假说的一节中，对此将进行较详细的讨论（也可参看Tatsch, 1977a）。

### 低速带、高速区及其它地震异常

在研究地球地震性状及其与地球构造圈演化的关系时，最好先对构造圈内的主要地震异常作一简要分析。大多数异常都与震速梯度有关，并通常称之为“低速带”、“波导”、“高速区”等。一般来说，低速带与显有构造岩浆活动的区域有关，而高速区则与稳定区相关。因而，低速异常通常与构造圈内的高温、高衰减的环境相关，而高速异常

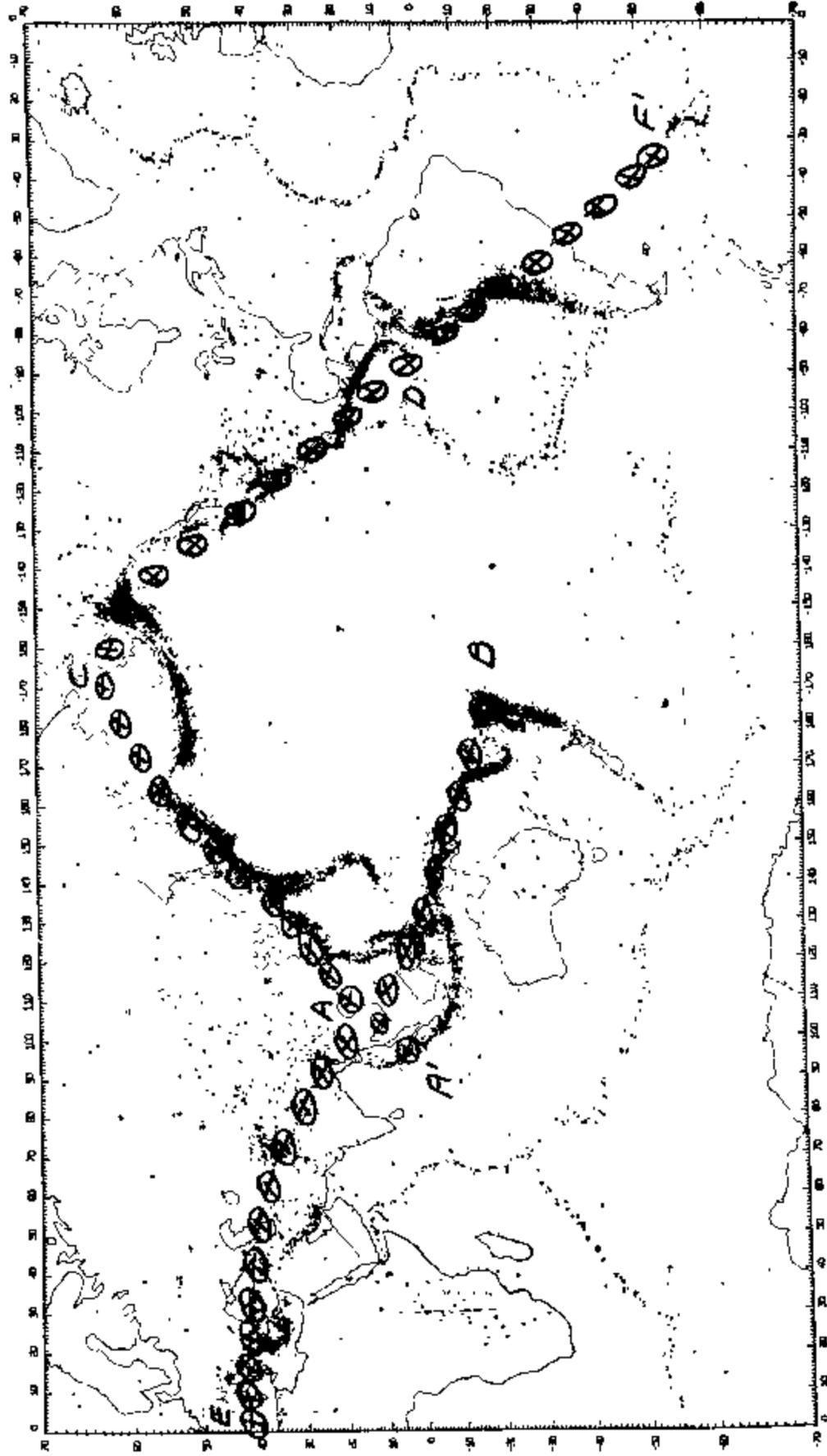


图 8—3 叠置在麦卡托全球投影图上的环太平洋和横贯欧亚大陆（特堤斯）地震带  
 (据 Baruzangi & Dorman, 1969; ESSA, 1970)

通常则与低温、低衰减环境相关。从而对震速异常的研究可为估量构造圈内某些“细微构造”的特征提供一种方法。

对大多数构造结构中的P波和S波说来，已在构造圈中确证有低速带的存在。看来在构造圈内出现的某种型式的初熔，对于低速带的解释是最有可能的（在有水的情况下，可能含有榴辉岩或橄榄岩）。

低速层的实际结构随构造运动的环境而变化，可能与粘度降低的地层相吻合。有些证据表明，低速层可能是由一层层向上的若干个层组成的（例如，参见 Belousov, 1969; Tatsch, 1977a）。

在构造圈中有关导致低速层熔融的起因，还得不到简明的解释（例如，参见 Ringwood, 1969）；但看来，熔融是在地热升高到干固相曲线以上时发生的（Lambert and Wyllie, 1970）。而此一地带，即大陆之下自100公里到250公里、海洋之下自50公里到400公里的在垂向上的有限广度，也未得到解释。此外，单由高温效应，也不可能产生出低速带来（Tatsch, 1977a）。

在有些地区里，低速带位于不连续面之下。举例来说，在美国佛罗里达的坦帕和墨西哥的圣路易斯波托锡之间的深海下，所发现的视速度为8.7公里/秒，说明约在60公里的深处，存在着不连续层或迅速的速度变化。如果沿此剖面存在一低速层，则它必定位于此不连续面之下，因为在墨西哥的地壳速度为6.0公里/秒，而在莫霍面以下的为7.8公里/秒。在那里于沿海平原处到达莫霍面的深度是29公里，而在高原以下则是35公里（Hales, et al, 1970; Hales, 1974）。

在其它地区，有如加拿大地盾，在那里，对P波说来没有低速层，但只有一深度的间断，这种速度在其中只有很小或没有梯度（Magnitsky and Zharkov, 1969）。在其它地区里，速度降低的强度或梯度，则表现出有所变化。

看来地震的衰减与低速区是相互关联的。在美国半稳定区中的数值，比盆地山岭省中的数值高三倍。此外，低速区也往往是高热流区，特别是在海岭上以及在类似的大陆地区，如盆地山岭省，那里的热流值都大大超过平均值（Tatsch, 1977a）。

看来在地壳厚度的区域性变化与地球应力场之间是彼此相关的（McBirney, 1969）。基本上，在张性地区的地壳（例如，盆地山岭省；大陆及大洋区中的“活动区”；与海岭）的厚度都小于平均值。反之，在压性地区（例如，大陆地盾；大洋盆地；褶皱山带的低密度“山根”；以及岛弧复合体中的岛屿下的地壳）的地层厚度都大于平均值。在千岛火山岛弧之下，低速层的一个伸出部分已达到地壳基底；熔岩通过此伸出部分而流至火山（Belousov, 1969）。

莱贝尔曼和施莱贝尔（Liebermann and Schreiber, 1969）发现有证据表明：在不存在对P波的低速层时，却能存在对S波的低速层；以及在地幔的过渡区里，横波速度可随深度而降低。

构造圈显示有极大的不均一性，且震波性状，在非均质物质中的、与在无任何压力与温度梯度情况下的理想均质非层状物质中的，有很大差别。比如在均质介质中，就不出现甚至不具界面或不连续面的非均质物质中的P波与S波的干扰现象。尤其是在传播以及在内部折射时，出现有P波和S波的转化。同样，非均质性的程度越大，所引起的从P波向S波的转化程度也越高。一般说来，低速层和其它地震异常，似乎都与传播路线的物理参

数有关，而不仅是与其发源地或接收站的环境参数有关。

在研究过构造圈震速异常的全部特性后，就可清楚地看到，任何关于地震性状的假说，都必须具体体现出全球的震速格局以及在全球规模上与构造岩浆活动的相互关系。

### 下构造圈内的地震性状

还没有一个令人满意的关于下构造圈的模式，不过可以得到一些有关地核-地幔界面的资料。看来，掠过此界面而传播的S波，于地幔最下部100公里内，约传播了1000公里。其它资料表明，地核的半径，实际上几乎可能是此类数目的两倍。

有证据表明，在液态地核的下半部，存在速度梯度的变化。由于在不传热条件下的均质流体不能解释这种性状，而用液态核心中有少量固体包体，就有可能解释其速度的分布。但这一概念还不能阐明何以地核内的固体包体与液体之间能保持其稳定性。

虽然下地幔与地核中存在一些变异，但与构造圈内的变异相比时，它们就不那么重要。因此可认为，下构造圈内的地震性状，在分析构造圈的性状及演化时，无关紧要。

### 解释地球地震性的假说

已提出许多假说来解示地震的成因，但没有哪一个能对此作出完全令人满意的解答。这主要是由于所观察的地球地震性状十分复杂所致 (Tatsch, 1977a)。

地球地震性状，似乎与构造圈的构造及性状有关。因此，任何关于地震起因的假说，都必须考虑到构造圈的构造与动力学，及其对地球地震性状的关系和影响。从而必须在全球及区域规模上，来研究地球内部的性状与地表显示间的因果关系。

如果存在区域性的地震格局，就必定存在对它的区域性控制原因。如果存在全球性的地震格局，也必定存在全球性的控制原因。倘若是在某一深度上而不在其它深度上存在地震格局，就必定是两者之中的一个原因：(1) 作用于不同深度上的不同起因机制；或是(2) 在某一深度、而不是在其它深度上的局部影响。根据这些和有关的研究，看来下部构造的力学和几何学，对在所有深度上控制地震发生的起因机制，都起有重大的影响。

在一定时期内，有些地震在上地幔内释放的能量，多于在地壳中释放的能量。在其它地区，同一深度而在侧向上相分隔的地震，似乎有时间上和成因上的关系。

### 地球地震性状的成因机制

如今对地球构造圈的动力性质，有时可根据“新全球构造”及“板块构造”来表述 (第十八章)。作为此假说 (例如，参见Tsacks等，1968) 的基础的是地壳和地幔最上部组成了一个坚硬的上层 (岩石圈) 的概念。板块构造的概念认为，岩石圈有相当大的强度、厚约100公里，并座落或漂浮在第二层 (软流圈) 之上，这个软流圈实际上没有强度，并可从岩石圈基底向下延伸几百公里。

根据这一简单的板块构造概念，漂浮着的岩石圈又被分割成一些巨大的并为海岭、一些断层和一些准弧型构造所环绕的板块。根据这一概念，这些板块在海岭处舒展开来，并在断层处相互搓磨，而在“岛弧”及类似的构造处，被伏冲下去。海岭在某些区域中被断成许多断层线的切面，其走向与海岭本身的走向相正交。根据简单板块构造的概念，小地震是由于沿这些断层的运动而发生的。大地震则发生在一个板块的主导边棱伏冲到另一板

块之下的地方。通过一些尚未详细说明的方式，这种伏冲作用就产生出好象汤加、千岛、日本、马里亚纳、秘鲁-智利海岸和波多黎各等地那样的巨大线状大洋深海槽。根据这一简单板块构造的概念，在这些深海槽里的地震，都产生于这些板块大致沿着毕鸟夫面的深度超过700公里的下降。

在此简单板块构造运动的概念中，是设想这种下降的动能提供于：（1）拖与载，（2）拉，（3）滑，（4）推，或（5）这些方式中的两种或多种的结合。

简单板块构造的概念，一般在对大洋区中许多地震的解释还能令人满意，但对见于大陆区中的地震性状，尚有很多问题未能解答。实际上还不清楚，简单板块构造概念的任何一个公参数，是否也在大陆内部的地块中起作用。

尽管简单板块构造概念是为地球地震性状的起源机制所最常引用到的概念，但最好还是回顾一下为地震性状所提出的其它假说的一些主要特点。在较早期假说中，有一个就是雷德 (Reid, 1911) 的“回弹”假说。雷德曾将其概念的要点总结如下：

a. 引起构造地震的岩石破裂，是其强度大于岩石所能经受得住的强度的弹性应变结果，而这种应变则产生于地球内相邻部分的相对运动或位移。

b. 相对位移并不是在断裂时突然产生的，但它们大体上是在长时期内逐渐达到其最大数量的。

c. 在地震时产生的唯一块体运动，是破裂两侧向没有弹性应变的部位的突然弹性回弹；这些运动从破裂处向两边所延伸的距离只有几公里。

d. 地震振动发源于断裂面；它们自其开始振动的面的面积最初时很小，但此面积可以很快变大，不过其变大的速率不超过岩石中的压缩弹性波的速度。

e. 在地震时所释放出的能量，是直接于破裂前以岩石弹性应变能的形式释出的。

雷德的假说解释了许多所观察到的地震资料，但并未详细说明在地内发生弹性应变的确切过程。然而，在任一深度上的应变的发生，都说明有应力（或力）在那一深度上正在起着作用。发生在深度超过700公里的地震，使此问题更加复杂了。

在现代所运用的雷德的概念里，横过破裂或断层的应力，都是以暂时地线性方式发生的。当这种应力超过某一临界值时，即超过了相应的给定深度或构造中所固有的应变极限时，就会由所造成的断裂而产生地震。但所观察到的证据否定了这一概念，因为在一段层的给定点上，两次主震间的时间间隔不存在什么规律性。

大多数为地震所提出的“震源”机制都必定是复杂的，因为应力场无论在应力释放之前或之后都必定处于静态平衡之中。这一要求排除了存在一切简单力偶或许多“复合”力偶的可能性，其结果是对每次地震都要求有一精心特制的几何学—力学解释。

有的证据甚至反驳了对最复杂“断层面”解法的有效性，因为根据在地震发生时所实际观测到的地震性状来看，它是不切合实际的。埃维桑 (Evison, 1967) 已详细论述过一种作为另一种手段的震源机制，其中具体地表现出伴随突然相转换所发生的体积变化。

乌拉德 (Woollard, 1969, 1969a, 1969b) 的结论认为，现今的地震格局与应力的松弛有关，而与造成全球破裂格局的机制无关。根据他的概念，应力松弛的格局（即现今地震的格局）与全球破裂的格局间的差异，代表的是它们二者之间的时滞。

格里格斯及贝克尔 (Griggs and Baker, 1968) 在有关的研究中作出结论，尽管有证据表明地震波具有剪破裂震源的特征，但深源地震不大可能由任一已知的破裂类型引

起。他们提出一种机制，其中具体体现出，在高压高温下受到剪切应变的物质中，为热力激发的流动而引起的“剪切熔融不稳定性”。

总结起来，如今还没有一种有关地球地震性状的起因机制的假说，能够解释发生在所有大洋和大陆区各种深度上的地震。在这方面所关心的是，自从伊萨克斯及其同事在1968年刊出其划时代的论文以来，简单板块构造概念（Isacks.等，1968）再也不曾对地震学有多大的促进（例如参见Bolt, 1976）。

## 以二元原始行星假说为依据的地球地震的性状

在本章前面的段落里，已经解释过地震是如何在地球的某些有侧限的区域里，通过能量的突然释放而发生的。所涉及的能量可以是如下的任何一种或几种类型：引力势型、动力型、化学型和弹性应变型。可以把这些能量的释放，看成是地震的直接原因。

当今流行的大多数假说，都未详细说明下列几个问题：（1）引起能量积累的这一过程的性质，当此能量释放时就激发出地震；（2）震前能量积累过程的根本原因或起因。对此二问题，已由源自二元原始行星假说的构造圈式地球模式，做出初步回答。在另一分析中已对这些问题作过详细分析（Tatsch, 1977a）。现将一些分析的结果概括如下。

## 地震、活动楔形带及地震构造岩浆带

一、如在第六章中所指出的，通过对地表的详细研究揭示出，以不同程度的地震、构造和岩浆活动为特征的某些狭长地带，在过去46亿年的大部分期间已存在于地球之内，据信地球业已存在。可将这些带称为“地震构造岩浆带”。

大量证据表明，所有地震构造岩浆带，无论其形成于何时、何地，大体上都相似。详细研究揭示出，这些带与回溯到约46亿年前“最早期太古代”地球的动力学性状有关（Tatsch, 1977d）。

在发展关于地球地震区的起源、演化和目前特点的概念时，认为这种地震构造岩浆带的性状与第六章所描述的活动楔形带有关（可参看Tatsch, 1977a）。所设想的这种关系的根据是：假设地震构造岩浆带，只不过是过去46亿年间，地球活动楔形带里的几何学、力学、热力以及化学等方面的性状在地表的显示（Tatsch, 1977d）。

今天的地震（参见图8—1）与现今的地震构造岩浆带网格以及过去的地震构造岩浆带的形迹相伴生。90%以上的今日地震都与现今活动楔形带的网格相关；10%以下的今日地震与过去的网格形迹有联系。后一类地震中有些与断陷地槽及古断槽相关，即与大陆区内以断层为边界的活动楔形带的形迹相伴生（Tatsch, 1977a; Shatsky and Bodanoff, 1960; Kay, 1951; Aubouin, 1965）。关于此类地震中的一些特殊例子，将在下节中加以讨论。

## 根据模式所预测的与从实际观测到的地球地震性状间的对比

将构造圈式地球模式所预测的与根据实际所观测到的地球地震性状进行比较，就有可能对这一被作为地震的起因预测和控制的工作假说的模式作出评价（Tatsch, 1977a）。虽说不可能对此模式的所有预测进行研究，但也可以选择几个来作为全球性以及区域性地区中的代表。

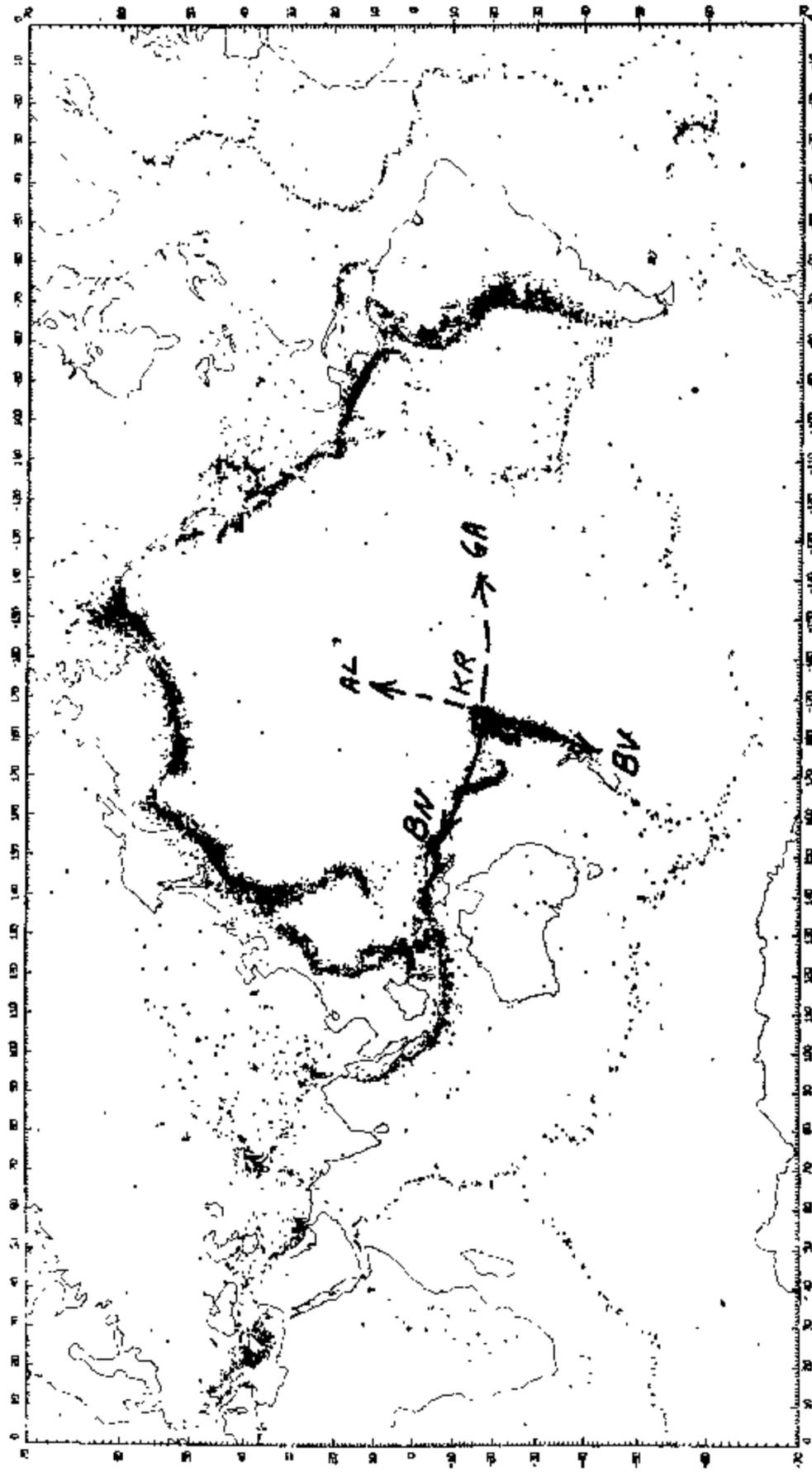


图 8—4 在构造圈式地球模式中处正交破裂体系上的有关构造圈式地球模式所予测的与实际所观测到的地震性资料之间的相关关系

(据Barazangi & Dorman, 1969; RSSA, 1970)

此模式所预测的与实际所观察到的情况之间的相互关系，在前边图 8—2和图 8—3所指出的著名的环太平洋及横贯欧亚大陆（特提斯）的地震带中，特别值得注意。

一个重要的区域相互关系发生在此模式下构造圈破裂体系中的克马德克（KR）点附近。这一相互关系已表示在图 8—4中。实线KR—BV，代表下构造圈破裂体系的一些块段在地表的迹线。它们与那一地区深源地震分布的相互关系，说明在此模式的下构造圈KR（克马德克）点的几百公里之内，存在一深构造圈的正交破裂体系。KR—AL弧和KR—GA弧，代表现今活动楔形带在地表上的不活动块段。这些不活动块段的特点，将在第十章探讨侵入作用和喷出活动时加以讨论（可参看Tatsch, 1973a）。

在所预测与所观测到的情况彼此间的另一特殊相互关系，是南美洲的两条明显的深源地震带，如图 8—5中所示，这是根据所观测的资料（ESSA, 1970）作出的示意图。在此相互关系中，包括两条平行带。彼此相距700公里，并分别位于南纬22°—29°（图中的S带）、和南纬7°—12°（图中的N带）的范围内。O点在下构造圈的表面上。ABCD在地面上。GA—BV线是GA—BV活动楔形带地面迹线的中线。

图 8—5 与一幅世界地震图（例如，参见ESSA, 1970）的对照表明，南美洲对于构造圈的GA—BV弧约旋转了35°，而且这个旋转可能是发生在深度超过600公里的很深的地方。在第十七章（大陆漂移与极移）将对南美洲的旋转进行讨论。

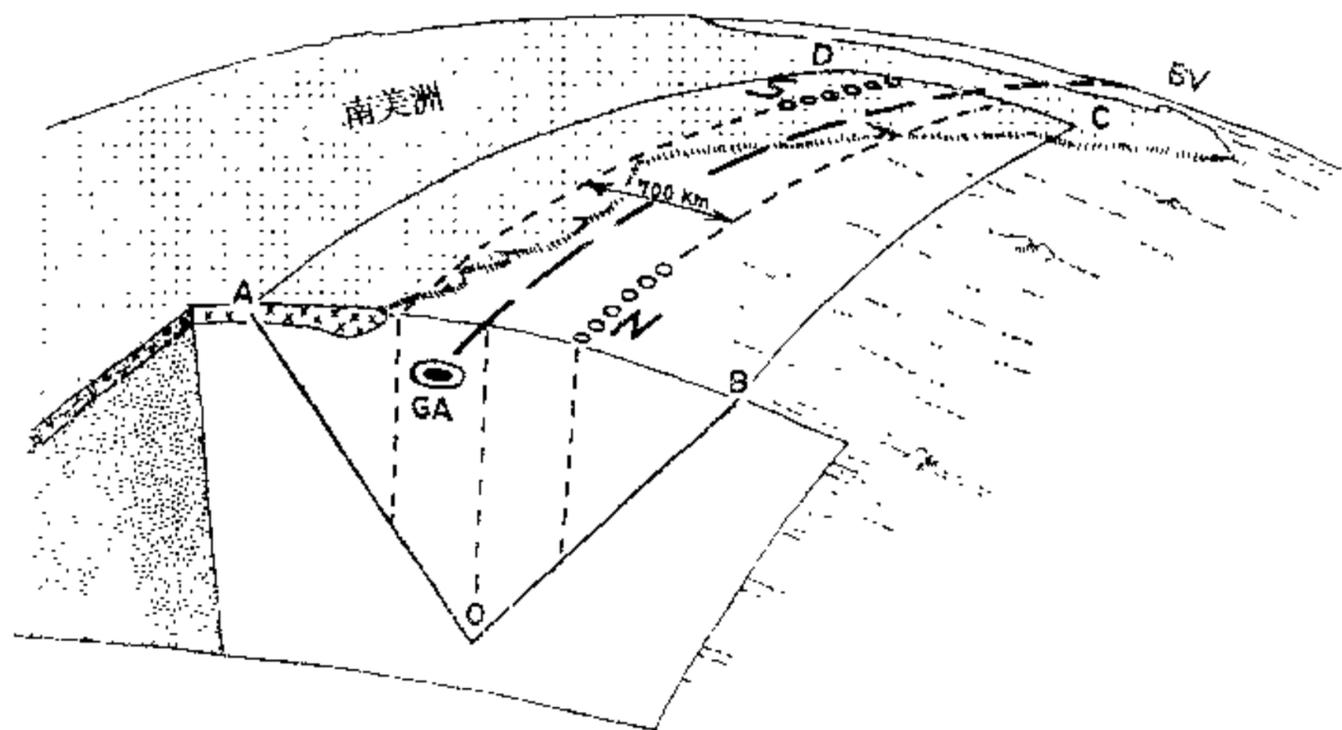


图 8—5 示意图表示如何用构造圈式地球模式来解释南美洲的两个平行的深源地震带  
(J. C. Holden 据作者初版中的插图修改而成)

## 地震预测、控制及预防

一般公认，用现今的技术是不可能具体预测地震的时间、地点和震级的。之所以不可能，主要是因为它是随着对所涉及的地震起因机制的力学和几何学的错误理解而有所变化的（Tatsch, 1977a）。

我们知道地震是在何时、何地发生的，但不了解它们是如何、以及何以发生。有时，很小地震的震群，在主震前的几个月就发生于震中地区。有时在这些同样的小地震发生后，却没有任何相继的主震。地面掀斜与某些地震活动的增大及减弱有关，而且直接在地震发生之前就能观察到异常掀斜。在地震之前，也常观察到地磁波动。

通过对所观测到的这些异常情况进行精细对比，在可预见的未来，至少有可能对某些地震作出长期预测。对这些同样的参数进行更加周详地监测，必将有可能做出某些近期预测（例如，参见Anon, 1976a）。这样的预测，最主要是取决于测量，要不就是取决于确定地球内各不同深度上的应力（而不是由应力产生的应变）的技术发展。还不能做到对地应力参数的直接测量；但已提出，可通过应力对岩石的电磁特性和对震速的效应而进行间接的确定（例如，参见Tatsch, 1977a）。

在为地震预测拟定出实用的程序之前，在此领域还有大量工作要做。对于地震的控制和预防也可得出同一结论。众所周知，小的不平衡力就可诱发出地震，比如新水库的注水。这说明，通过有计划地施加应力，就有可能控制地震，但问题在于应如何确定在何时、何地去有计划地施加应力。

尽管难以预报地震的确切时间和地点，但构造圈式地球模式为未来地震所可能出现的时间和地点，提出了确定其时-空界限的基础。在另一篇分析中，将对此进行讨论（Tatsch, 1977a），这篇分析的重点是与地震起因机制有关的地球性状的几何学、力学、热力学和化学等各个方面。

## 第九章 地热活动的全球格局

地球热力作用的详细描述当然只不过是一种初步的推测，因为还不了解地球深处热源分布的性质。因而，对地热活动的格局，最好是依据已知的地表地热异常并联系适宜的关于地球构造圈在过去46亿年间的几何学、力学、热力及化学等方面性状的模式，来进行分析。

可将地热异常解释为已在地球各个部分作选择性侵位的热力（加上某些伴生的挥发物）的集中。当在地表附近发现有这些异常现象或热储时，它们一般都伴生于火山、温泉、间歇泉、地压盆地、喷气孔和热的岩石。在地下较深部位，地热储可与岩浆侵入以及与过去46亿年间已在地球构造圈内发育的某些其它超热异常相伴生。

在现今注意能源的世界上，最使人感兴趣的是那些可在地面下钻及的地热储。实际上，这样的能储，在世界上的无论是大洋和大陆、乃至南、北两极的地区里都有所发现。但较比详尽地研究证明，有些地区比其它地区更有利于热储的形成；也就是说，地热储似乎已形成了一定的地方性、区域性和全球性的格局，而不是均匀地分布在地表上的各个部分。

现在普遍认为，地热异常与上地幔内镁铁质和超镁铁质岩石的部分熔融的形迹相关联。但谁也不确切知道，这些局部熔融事件何以发生，以及它们何以只发生于某一时期和地区，而不发生于另一时期和地区。

地球中的温度一般随深度而增高。在地壳的基底（25公里到50公里），温度幅度为200℃到1000℃。地心（6371公里）的温度约为4500℃。

大部分的地热能，都被深深地包含在地幔和地核中，使用现今的勘探技术还无法采获。然而，有相当大量的地热能，却位于从地表上可采的深度之内。在另一篇分析中（Tatsch, 1976b），对此有所研究，这里勿庸多赘。

### 与地震构造岩浆带活动的形迹相伴生的地热异常：摘要

当根据地球活动性状来分析地热储的全球分布格局时，最初给人的印象是，尽管地热能量以有数的几种形态而产生，然而看来，这种热储可发现于各种各样的地理位置，以致很难进行概括。然而仔细的研究揭示出，现今的热储可以根据开始发生于最早期太古代期间的地球动力性状事件加以解释，因为那时形成了第一个地热储。当根据构造圈式地球模式所提供的长期、深位的驱动机制（第三章）来观察地球的性状时，就能对此有最清楚的了解。

根据这一概念，可以把地球现今的地热储解释为，曾经一次或多次活动的、地震构造岩浆带的超热形迹。深入地研究表明，看来几乎所有的地热储，都形成在地震构造岩浆活动事件的形迹以内。现将这些形迹的某些伴生物列举如下：

a. 具有高热流和零星温泉的广阔地区，都与地震构造岩浆活动较古老的形迹相伴生。

b. 年轻盆地的形迹（如墨西哥湾和匈牙利盆地）具有近地表的低热流，而高速的沉积与沉陷相结合同时发生的断层作用及选择性覆盖作用，则在深处形成地压热库。

c. 大陆核与地震构造岩浆活动的古老形迹相伴生，除深部外，这里只有低热流，且地热前景相对很小。

d. 干热岩石可产生于地震构造岩浆活动新侵入体的固结作用，或产生于围绕这种岩体的不渗透岩石的传导性加热。

e. 地热对流体系，既可形成于环绕地震构造岩浆活动的年轻硅质形迹而对流的大气水，也可形成于沿破裂形迹而在深部循环的大气水。

f. 大多数地热异常带与近期的大多数造山带大体相符（例如，参见Cermak et al, 1975）。

g. 这些地带与地震带以及近期构造运动的上升区相符。

h. 相伴生的地震活动，多集中在水平地温梯度大于为 $0.13^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ 的区域内。

地热异常与地震构造岩浆带活动的形迹相同一的特殊例子，将在本章较后的段落里说明。

### 在地热区内的热力及物质转移

在以垂向自然对流为主的地热区内，热力和物质的转移，是受地震构造岩浆活动的高渗透性形迹所围限的热流格局控制的。在某些情况下，于长达30亿年的时期里，这些形迹都可能根深蒂固地保留于地壳中（Gay, 1975）。

较详尽的研究表明，地球深部的热力是通过优先热流的路线而分散的（Sclater and Francheteau, 1970; Tatsch, 1965, 1976b）。可证明优先热流的某些路线与火山-深成岩体体系、裂谷、海岭及“热点”等的路线相同。在这方面有意义的是，沿海岭所观察到的许多活动与摩根（Morgan, 1971）的单一热点概念相抵触的情况（Vogt, 1976）。看来被称为“热点”的现象多少要复杂些，而不是“地幔对流”所驱动的“地幔缕”那样简单地面的表现形式。（例如，参见Neill, 1976）。

### 包含在所见地球热流格局中的能量的可能来源

早已认识到地球的热流格局是地内性状的地表显示。但确切产生出地球内部性状的能源究竟是什么？使之在地面上表现为独特的格局、而不是被均匀分布的、这一能源的性质又是什么？

已提出过许多有可能的来源，但没有一个能使人满意。现在可把其中一些有代表性的列举如下：

- a. 岛弧复合体中微密物质的重力沉降。
- b. 在岩石圈板块底部上由于对流而进入软流圈的剪力。
- c. 放射性核素的蜕变。
- d. 从原始行星形成作用中因袭下来的化学差异。
- e. 在海岭下活动断裂中的岩浆垂向转移。
- f. 沿毕乌夫面的磨擦热。
- g. 上述两种或多种的结合。

这些可能起源的多种多样性及其各自的不适当性正好表明，我们对包含在地球独特热流格局中的实际能源的了解是多么浅薄。大多数假说认为，无论能量的根本来源是什么，但它都与地球构造圈内的热传导格局密切相关 (Tatsch, 1976b)。

## 地球深部热异常的地表显示

地球散热的速度约为 $10.2 \times 10^{12}$ 卡/秒 (Williams, 1976)。其中至少有1/2 (也可能是2/3) 的热量，似乎是通过地球上长达360,000公里的地震构造岩浆带的活动块段散失的。这些活动块段，包括与海岭相伴生的长约55,000公里的地震构造岩浆带，以及长约125,000公里的其它大洋与大陆的地震构造岩浆带 (例如，大洋中的海山链和大陆上的裂谷系及山链)。由此可见，可能有多达2/3的地热散失，是通过在地震构造岩浆带活动的地表显示所代表的相当小的区域里发生的。

地内深部的热异常的某些地表显示，已被称为“地幔缕”。如果热异常可产生于地幔内 (如：发生自长期、不平衡几何、力学、热力及化学的异常)，则地幔物质的固流是“细缕”性的，甚至这些“缕”与其周围地幔间的温差只有 $100^\circ$ ，但它也能以每年一到数厘米的速度，穿过地幔而上升几百公里 (例如，参见 Yuen and Schubert, 1976)。在这种区域里的最近分析证明，如果有地幔缕发生，那么，它们必定如我们会在地震构造岩浆带内所料到的那样，是由深达700公里的基底加热作用来驱动的 (例如，参见 Parmentier et al, 1975)。

## 与新生代地震构造岩浆活动带相伴生的地热异常

90%以上的现代地表地热异常，都与新生代地震构造岩浆带活动的带相关联。这些情况的研究，已包括在作者关于地球构造圈的几何学、力学、热力学和化学的各个方面的详细分析中，这些分析有助于地热异常的研究 (Tatsch, 1976b; 第五章到第十六章)。可以逐一列出与新生代地震构造岩浆带相联系的12个块段二次球状体的地热异常实例。

a. 加拉帕戈斯到直布罗陀—在此块段中的地理区域包括：加拉帕戈斯组合体、科科斯海岭、部分中美、加勒比诸岛、南美洲北部、部分中大西洋海岭、西北非洲、伊比利亚半岛的一部分以及伴生的、可证明是同一于加拉帕戈斯—直布罗陀块段的岛屿及海底区域。与此块段相伴生的具体的地热异常有：布伊朗特 (瓜德罗普)、科迪勒拉火山 (中美)、墨西哥湾盆地、曼斯菲尔德港 (德克萨斯)、塞巴斯蒂安 (德克萨斯) 以及得克萨斯和路易斯安纳地压体系。有关此块段地热异常的这些及其它细节，都包括在文献中 (例如，参见 Tatsch, 1966b; 第五章)。

b. 直布罗陀到孟加拉—包括在此块段中的地理区域有：西班牙、北非、欧亚大陆南部、中东、伊朗、巴基斯坦、印度以及可辨认是与直布罗陀到孟加拉地段相关联的岛屿及海底区域。具体的地热异常有：阿拉拉特 (土耳其)、阿特兰蒂斯 II (红海)、切列肯半岛 (苏联)、楚玛桑 (印度)、多瑙河盆地 (匈牙利)、埃特纳 (意大利)、喜马拉雅—緬甸弧 (印度)、拉德勒洛 (意大利)、列斯波斯 (希腊)、麦隆—达乌奇带 (印度)、潘瑙尼恩盆地 (匈牙利和南斯拉夫)、西藏间歇泉、乌尔及利卡 (葡萄牙) 和维苏威 (意大利)。有关这一块段地热异常的一些及其它细节，可查阅文献 (例如，参见 Tatsch, 1976b; 第六章)。

c. 孟加拉到克马德克—在此块段中的地理区域包括：澳洲北部、班格拉德什、布隆

奈、缅甸、印度尼西亚（包括西里伊安、爪哇、加里曼丹和苏门答腊）、柬埔寨、马来西亚、巴布亚新几内亚、菲律宾南部、越南南部、斯里兰卡、泰国以及可证明是同此块段相联系的岛屿和海底区域。具体的地热异常有：万丹（印尼）、布干维尔（所罗门群岛）、芝萨拉—芝苏喀密（印尼）、瓦努瓦岛（斐济群岛）、喀瓦—喀莫疆（印尼）、克拉喀托（印尼）和拉包尔（巴布亚新几内亚）。有关这一块段的这些和其它地热异常的细节，已描述于文献中（例如，参见Tatsch, 1976b: 第七章）。

d. 克马德克到加拉帕戈斯—包括在此块段中的地理区域有：克马德克—汤加复合带、部份奥斯特拉尔海山链、部分社会群岛海岭、部分陶马图海岭、部分太平洋—南极海岭、加拉帕戈斯复合体以及可证明是同此块段的相联系岛屿和海底区域。具体的地热异常包括：加拉帕戈斯热液活动、塔希提和七土伊拉。有关这一块段地热异常的这些和其它细节，都包括在文献中（例如，参见Tatsch, 1976b: 第八章）。

e. 阿留申到加拉帕戈斯—包括在此块段中的地理区域有：阿拉斯加南部、加拿大西部、美国西部、墨西哥西部、中美、加拉帕戈斯复合体的一部分以及可证明是同此块段有关系的岛屿和海底。具体的地热异常包括：阿瓦查潘（萨尔瓦多）、羚羊谷（加利福尼亚）、奥斯汀—巴格雷—布列顿布什（俄勒冈）、洛斯阿苏弗勒斯（墨西哥）、巴伦纳斯海峡（加利福尼亚湾）、博伊赛（爱达荷）、布利汉城（犹他）、昌德勒（亚利桑纳）、塞罗普利托（墨西哥）、埃利穆（阿拉斯加）、菲勒霍尔间歇泉（怀俄明）、间歇泉（加利福尼亚）、格林伍德（科罗拉多）、杰米兹（新墨西哥）、克拉马斯福尔斯（俄勒冈）、刘易斯顿（蒙大拿）、米格河（美属哥伦比亚）、莫莫陀姆博（尼加拉瓜）、贝克峰（华盛顿）、帕里克廷（墨西哥）、巴塞（墨西哥）、罗斯福温泉（犹他）、汽艇泉（内华达）和黄石（美国）。此块段中的这些和其它地热异常的细节，都包括在文献中（例如，参见Tatsch, 1976b: 第九章）。

f. 加拉帕戈斯到布维—包括有此块段中的地理区域有：南美洲西部、阿根廷东部、福克兰隆起、斯克舍海岭、南桑威奇海沟、大西洋—印度洋海岭西端、布维复合体的一部分以及可证明是同此块段相关联的岛屿及海底区域。具体的地热异常包括：阿空加瓜（阿根廷）、钦博拉索（厄瓜多尔）、科托迪科希（厄瓜多尔）、南美间歇泉（特别是在哥伦比亚、厄瓜多尔、秘鲁、玻利维亚、智利和阿根廷）、厄尔塔蒂奥和乌宾纳斯（秘鲁）。这些和其它地热异常的细节，在文献中却有描述（例如，参见Tatsch, 1976b: 第十章）。

g. 布维到孟加拉—包括在此块段中的地理区域有：部分布维复合带、部分大西洋—印度洋海岭、非洲南部、中印度洋海岭、部分孟加拉复合体，以及可证明是同此块段相关联的岛屿及海底区域。具体的地热异常包括：阿法尔（非洲）、缅甸—安达曼—尼科巴弧（印度）、坎贝（印度）、达洛尔（埃塞俄比亚）、东非裂谷系、亨宁通（肯尼亚）、乞力马札罗（坦桑尼亚）、基塔加塔湖（乌干达）和纳尔马达—塔普蒂（印度）。此块段的这些和其它地热异常的细节，在文献中有所讨论（例如，参见Tatsch, 1976b: 第十一章）。

h. 孟加拉到阿留申—包括在此块段中的地理区域有：部分孟加拉复合体、部分印度尼西亚、部分马来西亚、东南亚、东北亚、阿留申复合体的一部分，以及可证明是同此块段相联系的岛屿及海底区域。具体的地热异常有：阿波（菲律宾）、秋野宫（日本）、楚科奇半岛（苏联）、楚克霍次克（苏联）、富士（日本）、八丁原（日本）、希加舒萨（日本）、堪察加（苏联）、库纳什尔（苏联）、栗驹（日本）、劳林斯克（苏联）、马槽（中国台湾）、

松川（日本）、萨哈林（苏联）、蒂威（菲律宾）和龙支诺—库里尔斯科（苏联）。在这个地段的这些和其它地热异常的细节，都包括在文献中（例如，参见Tatsch, 1976b: 第十二章）。

i. 阿留申到直布罗陀—在此块段中的地理区域包括：阿留申复合体的一部分、阿拉斯加的西部和北部、加拿大北极区的岛屿、西部和南部格陵兰、大西洋中脊的一部分、欧洲西缘以及可证明是同此块段相联系的岛屿及海底区域。具体的地热异常包括：不列颠、爱尔兰和苏格兰的加里东构造带、切柳斯金（苏联）、赫克拉（冰岛）、科雷马（苏联）、克拉夫拉（冰岛）、纳马弗贾尔（冰岛）、皮尔格里木泉（阿拉斯加）、雷克雅内斯（冰岛）、横贯大西洋地质大断裂水热田（大西洋）、泰梅尔（苏联）和苏联北极区。此块段的这些及其它地热异常的细节，在文献中有所描述（例如，参见Tatsch, 1976b: 第十三章）。

j. 直布罗陀到布维—在此块段中的地理区域包括：加那利群岛、非洲西部、部分大西洋中脊、部分布维复合体，以及可证明是同此块段相联系的岛屿及海底区域。具体的地热异常包括：阿森松岛、博阿维斯塔（加那利群岛）、福戈（佛得角群岛）、富韦特文图拉（加那利群岛）、果夫岛、兰扎罗特（加那利群岛）、圣海伦拿岛和特里斯坦达库尼亚岛。这些及其它地热异常的细节，都已描述于文献中（例如，参见Tatsch, 1976b: 第十四章），

k. 布维到克马德克—在此块段中的地理区域包括：布维复合体的一部分，部分大西洋—印度洋中脊、南极中部山脉、新西兰、克马德克—汤加海岭，以及可证明是同此块段相联系的岛屿及海底区域。具体的热异常点包括：布罗德兰兹（新西兰）、卡韦罗（新西兰）、迪斯科弗里峰（南极大陆）、埃里伯斯峰（南极大陆）、克尔克佩特里克峰（南极大陆）、新西兰间歇泉、莫德皇后山脉（南极大陆）、罗托鲁阿（新西兰）、陶波凹陷（新西兰）、维多利亚（澳大利亚）、怀曼古（新西兰）和怀拉开（新西兰）。此块段的这些和其它地热异常的细节，都描述于文献中（例如，参见Tatsch, 1976b: 第十五章）。

l. 克马德克到阿留申—在此块段中的地理区域包括：汤加—克马德克复合体的一部分，托克劳群岛、北托克劳深海槽、非尼克斯群岛、西北圣诞岛海岭、夏威夷群岛以及与之伴生的海岭、皇帝海山链、部分阿留申复合体，以及可证明是同此块段相联系的岛屿及海底区域。具体的热异常包括：阿达克（阿拉斯加）、阿尼阿克察克（阿拉斯加）、阿特卡盆地（阿拉斯加）、皇帝海山链、夏威夷热水对流体系、基拉韦厄（夏威夷群岛）、非尼克斯岛、普纳裂谷（夏威夷群岛）、万烟谷（阿拉斯加的卡蒂迈）。在此块段的这些及其它地热异常的细节，都包括在文献中（例如，参见Tatsch, 1960b: 第十六章）。

### 伴随前新生代地震构造岩浆活动而生的地热异常

前已说明，几乎所有现代的地表地热异常，都与新生代地震构造岩浆带的活动形迹相伴生（Tatsch, 1976b: 第五章—第十六章）。其它地热异常，则与前新生代地震构造岩浆带的活动形迹相伴生（同上，第十七章）。属于后一类的地热异常，是由于地震构造岩浆活动形迹，能在长达30亿年的期间里，在地壳内保持不平衡这一事实而引起的（Tatsch, 1977d; Goy, 1975）。从而可见，自从太古代以来，已存在的岩石中就有某种应力格局。这种格局目前一般都倾向于铅直，暗示着现今的应力状况包括来自前寒武纪构造运动，热力及重力的分量以及来自现今力的分量。

从最广泛的意义上来看，前新生代地震构造岩浆活动的地热形迹有：（1）遗留的高热

异常形迹；(2)受到过热液侵位的矿床(例如，参见Tatsch, 1973a)；(3)中生代及古生代的石油矿储(Tatsch, 1974b)；(4)为前新生代的地震构造岩浆活动所造成的山脉(第十二章)；(5)所有前新生代的侵入作用和喷出活动(第十章)以及(6)可回溯到在据信已存在46亿年的地球的开始阶段就已发生的大陆的前新生代造山-克拉通演化(第七章)。

从上述可见，根据构造圈式地球模式的概念，与前新生代地震构造岩浆带相伴生的地热储，应当包括那些于前新生代期间就被侵位到地囊或储集层中的地热部分以及到目前依然残存或留有形迹的地热部分。

现将有代表性的、关于和前新生代地震构造岩浆带活动事件相伴生的地热异常的例子，列举如下：

a. 阿菲翁(土耳其)——在土耳其的这一地区的地热储，与古生代地震构造岩浆活动事件形迹的结晶大理岩及变质片岩相关联。于160米至460米深处的温度约为100℃。目前正在将此能量转化为热力以供阿菲翁市使用。在厄梅尔利，产出蒸气与热水的混合物。

b. 阿肯色(美国)——阿肯色的地热储，与此地区的前新生代地震构造岩浆活动相联系(Tatsch, 1973a, 1974b, 1976a)。大多数地热储，都产出在造成瓦奇塔山系的地震构造岩浆活动的形迹内的霍特斯普林(温泉)附近。这些热储包括霍特斯普林(温泉)东北约10公里的穆德溪的赖斯泉、霍特斯普林温泉以及大查利比特。

c. 贝加尔裂谷(苏联)——贝加尔裂谷带的地热储，有从40℃到70℃的温泉，在裂谷凹陷内500米到2000米的深处，地下水的温度为20℃到75℃。

d. 波西米亚白垩系盆地(捷克斯洛伐克)——在波西米亚北部的地热储，与中生代的地震构造岩浆带活动事件的300米到400米厚的砂岩—泥质岩形迹相随而生。其下伏石炭二叠纪地层的厚度为12公里(Tatsch, 1977c)。热流接近于2热流单位(=微卡/厘米<sup>2</sup>/秒)(例如，参见Cermak, 1975)。

e. 布罗德兰兹(新西兰)——此地热储含有与这一地区白垩纪地震构造岩浆带活动事件相联系的成层火山岩序列。这一火山岩序列覆盖在石英砂岩、长石砂岩和泥质岩(即灰瓦岩基底)之上。此基底从海拔150米到300米的卡姆加罗阿高原，朝着海平面下2公里到3公里的陶波-雷波罗阿盆地而向西倾斜(例如，参见Rinehart, 1975)。主要的热异常，都沿着那一中断了基底稳定下降的、断块地垒的、地震构造岩浆带活动的残迹而产生。这里的温度往往超过300℃。两层广布的不渗透流纹岩流及三层不渗透的熔结凝灰岩质火山灰流序列，分隔出四层含水层：怀罗瓦、劳塔威利、上奥哈库里及下奥哈库里。这些含水层的渗透性随着深度的增加而降低。地热储产生于定钻孔的地点。钻孔是布置在沿横切过覆盖于怀罗瓦含水层之上的流纹岩穹窿的断层上面。

f. 克里米亚前陆及地台(苏联)——中生代地震构造岩浆带活动的前陆-地台形迹，在新生代地震构造岩浆带活动幕期间再活化，这些地热储随之而产生。其细节已在作者对地热储的深入分析中有所讨论(Tatsch, 1976b; 第十六章)。

g. 邓肯山脉(南极大陆)——此地区的地热储是发生在奥陶纪的地震构造岩浆带活动罗斯事件的形迹。在这个地区出露的费尔韦瑟组，厚约3.5公里(例如，参见Stump等, 1976)。

h. 希腊——希腊本土的地热储，出露于前新生代地震构造岩浆活动事件的中生代灰岩高原形迹之内，可以证明，这一形迹与构造圈赤道上的直布罗陀到孟加拉块段相同(Tatsch,

1973a、1974b、1976a)。

i. 爱尔兰加里东构造带—无数的温泉、热液矿化作用带及其它前新生代地震构造岩浆带活动的形迹，与加里东褶皱带的爱尔兰部分相联系。大多数温泉与远至古生代的横断层带密切相关（例如，参见 Horne, 1976）。在世界上的其它地方，也发现有相似的构造体系。例如，阿拉斯加褶皱带，加拿大西部、加拿大西部—美国边区、怀俄明的大霍恩山脉、捷克斯洛伐克以及日本弧（Tatsch, 1976b）。

j. 拉代雷洛（意大利）—这个地热储，与在新生代地震构造岩浆活动事件中又重新活动的三叠—侏罗纪地震构造岩浆带活动的形迹相联系。关于拉代雷洛地热储的细节，都包括在以下的文献中（例如，参见，Ellis, 1975；Tatsch, 1976b：第六章）。

k. 马萨诸塞—马萨诸塞的地热储，与此区域的前新生代地震构造岩浆活动带相联系（Tatsch, 1973a, 1974b, 1976b, 1976b）。这些地热储，大多数都位于造成阿巴拉契亚山脉的地震构造岩浆带活动的形迹中。最著名的地热储，是威廉斯顿以南几公里的桑德泉它与纽约的一个类似的地热储相距不太远。

l. 费尔威瑟峰（南极大陆）—此区域的地热储，是奥陶纪地震构造岩浆活动带罗斯事件的地震构造岩浆活动带形迹。在此次事件中这里的前寒武—寒武纪的地层，都被形变、变质和侵入（例如，参见 Stump et al, 1976）。

m. 罗杰斯峰（弗吉尼亚）—在世界各地无数类似的地方，这里的地热储形迹是典型的。它们的时代，可能是从最早太古代（大约在46亿年前）到新生代。这些一度曾作为热泉、喷气孔、间歇泉和其它深部热异常等而活动的古形迹，如今主要是通过它们在矿床的成因、演化和现今特性等方面的作用，才为我们所熟知的（例如，参见 Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977e）。在罗杰斯峰处，晚前寒武纪的熔结火山灰—流状凝灰岩（约8.2亿年前），构成了弗吉尼亚西南部罗杰斯峰的主体（例如，参见 Ronkin 1976）。这里仍保存着许多晚前寒武纪地震构造岩浆活动带的形迹。其中除了古喷气孔之外，还包括许多柱状节理、变形的薄硬壳，浮石堆、球粒以及地震构造岩浆活动的其它古老火山相和构造相的遗迹。与世界上许多其它地方的类似地热储的形迹一样，可以证明，罗杰斯峰是与一个地下四结合的地面三接合形迹相同（例如，参见 Tatsch, 1977d）。

n. 波兰的前陆与地台（波兰）—这些热储与在新生代地震构造岩浆活动带事件期间、又重新活动的中生代地震构造岩浆活动带的前陆—地台形迹相联系。在作者对地球的地热储的深入分析中，对其细节有所讨论（Tatsch, 1976b：第六章）。

o. 新疆（中国）—在此区域中的地热储，是从意大利到希腊和土耳其，然后通过高加索而伸入到中国西南部的同一高温带的一部分（例如，参见 Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c）。

## 第十章 侵入及喷出活动

侵入与喷出活动，在过去46亿年间，对地球构造圈的演化起了重要作用。其中包括：火山作用；大陆及大洋区内玄武岩质暗色岩的产生；地幔在地壳裂谷处的上隆；以及岩基、岩盘与其它各类侵入体在过去46亿年间的侵位。

从长期、全球规模的角度上可以看出，无论是大洋中脊型或者是阿尔卑斯超镁铁质型的侵入及喷出活动，都是为沿着由深部控制的、长长的线状带，以旋迴而非周期性的活动为特征的单一、长期、全球性的机制所激发的。详细地研究揭示出，无论在大洋中脊型或在阿尔卑斯超镁铁质型的每一造山运动旋迴内，侵入及喷出活动都构成一完整的时-空系列（例如，参见Tatsch, 1973a）。

### 前寒武纪的侵入与喷出活动

就如今所能确定的情况而论，最早期前寒武纪地壳的演化，都发现在最古老的地盾里。其趋势是从薄壳的不稳定原始大陆块发展为厚壳较稳定的大陆块，前一单元代表地壳发展的前地槽阶段，后者则代表早期的地向斜阶段。

沉积物及火山物质堆积的场所，是从随机与呈次线型分布的太古代的盆地和深海槽，而逐渐进展到较长而连续的元古代的海沟、稳定地台及原始地槽的。在北美洲，元古代的北东及北西走向，代替了太古代的东西与南北走向（例如，参见 Goodwin, 1968）。在其它大陆上，地表活动方向的走向，也表现有同样的变化。继不成熟的复理石型太古代沉积之后，则为成熟的、陆棚型元古代沉积。火山活动也由简单，连续型，变为多种多样的不连续型。此外，主要生热元素（U、Th、K、和Pb）在地壳成分中的巨大增加，显然是在地表晚太古代与元古代岩层中发生的一个重大事件，这一事件肯定会影响到地壳历史的各个主要方面，其中包括岩性、造山运动、构造运动和生物学等方面。

地球上许多最大的侵入体，是在前寒武纪时期侵位的。对这样的大侵入体，将在其它分析中详加讨论（例如，参见Tatsch, 1973a）。

### 向下的侵入活动

在正常情况下，侵入活动的方向都是垂直向上的，但在少数场合下，也会斜向上方，这取决于侵入体侵位时作用于其上的不平衡力的向量的具体方向。在一些少见的场合中，不平衡力的向量是垂直向下或斜向下方的（例如，纯重力），这时可认为这种侵入体是向下“侵入”的。例子有：（1）在削亡作用进一步发展的阶段里，花岗岩质的岩块可以（由于不平衡力向量的作用）被俯冲入玄武岩质地幔中；以及（2）由较轻物质向下转移所引起的大陆物质的“海洋化”（例如，参见Belousov, 1968）。

### 母岩浆的性质及来源

现在还不能确定母岩浆的性质及来源，这是因为目前所观察到的证据，还不能清楚地

详加说明被认为是全部侵入与喷出活动的所有母岩浆来源的、原始地幔物质的性质。但根据所能得到的证据，可以做些猜测。

由于认为母岩浆是基性的，所以通常猜想玄武岩浆能以液态而存在于地幔深处，且在其上升过程中，由于低压分异作用，使其成分受到改变。但这种设想是行不通的，因为见于地表的大多数玄武岩，都有其独有的化学成分，并显示出确定于低压结晶分异过程的一些结晶作用序列。

对其中包括起源于高压、且密度比周围岩浆大得多的捕虏体和捕获晶体的玄武岩的分析，可为未被近地表分馏作用所改变的母岩浆，提供一个极其有用的标志。对此已在本书另外的地方有所讨论，这里无需研究（例如，参见Tatsch, 1973a）。

现在还不知道岩浆是如何、何时、何地产生的，而且控制其化学成分的参数也不清楚是些什么（例如，参见Capaldi et al, 1976）。但是，最好先总结一下，对这些重要过程都知道了些什么以及提出过什么见解：

a. 为玄武岩质岩浆和安山质岩浆而提出的一切成生模式，都牵涉到以上地幔为先决条件的物理环境下铁镁质和（或）超铁镁质岩石的部分熔融。

b. 这些模式大都不能成功地充分论述，包括由岩浆的部分熔融，其后来在化学次体系中的分异作用以及其最终的喷发作用所引起的岩浆形成作用的延续时间问题。

c. 通过研究某些如地震那样的前兆，就可以解决火山爆发的预测问题。

d. 关于判定地震与火山活动明显相关的问题，尚有争论。

e. 看来只有震源浅于10公里的地震，才在某种程度上清楚地与火山作用有联系（例如，参见Mina Kami, 1974）。

f. 其它地震发生于火山岛弧之下几百公里的深处，但它们与岩浆的产生及上升间的关系，还不清楚。

g. 是否深源地震代表岩浆成生的另一种能量平衡的形式，以及是否地震是由于部分熔融所导致的体积变化而引起的，抑或是由上升岩浆产生的应力激发的，所有这些问题现在都还不清楚。

h. 据伊汤和穆拉塔（Eaton and Murata, 1960）报导，在夏威夷，于火山爆发前震源开始约自50公里的深处向上迁移。

i. 岩浆上升的平均速度约有0.2公里/日到0.3公里/日（例如，参见Blot, 1972）。

j. 有些证据说明，岩浆只是在喷发之前的几年或几十年内形成的（例如，参见Oversby and Gast, 1968）。

## 岩浆成生过程中的全球性与区域性的均一性

许多侵入及喷出活动的例子都说明，在岩浆成生过程中存在全球性与区域性的均一性。宾夕法尼亚东南部的三叠纪岩墙、岩席和岩流中未经风化的新鲜冷凝辉绿岩，就是这样的一个例子。这种辉绿岩包括两组截然不同的岩石，其区别是：（1）一组岩石含有较高的Al和S（罗斯维尔型，接近高铝玄武岩）和（2）另一组岩石含有较高的Mg、Ti和Cu（约克哈文型，一种典型的石英拉斑玄武岩）。

在这两组岩石中都有岩席和岩墙，看来，在同一类型中的岩席与岩墙的冷凝相之间，不存在化学上的区别。冷凝接触带没有局部同化作用的迹象，而且至少在长达230公里的

整个区域内，化学成分都极其均一。

在每种类型岩石中，比较大距离内所表现出的化学均一性，意味着：(1)充分均质化的岩浆，从内部岩浆体，曾发生100公里的横向迁移，或(2)在所研究的三叠系地区的整个230公里范围内，成生着地幔及岩浆的过程是相同的。

在成分上与大洋拉斑玄武岩的成分相似并与之同年代皆为三叠纪，说明：三叠纪沉积盆地与岩浆的成生，已构成了一次中途夭折的大陆谷裂作用事件，这次谷裂作用在所设想的北美洲与欧洲分离时，实际上(而后)已在更东一些完成了。

其它研究说明，有证据支持关于岩浆成生过程存在世界范围的一致性的假说(Tatsch, 1973a)。

## 上升机制

根据上述及其它分析，原始岩浆的最终本源好像是位于地球构造圈的深部。但还不清楚哪一种促使岩浆升及地表的机制性质。

各种各样的岩浆类型均可产生，伴随其形成的深度而变。如阿尔卑斯超镁铁质岩(即低 $O^{18}$ )与上地幔的最浅部分相关系；而碱性超镁铁质岩(即高 $O^{18}$ )与位于稳定大陆壳之下的较深区域相关系。这种关系说明，岩浆类型是由深位机制控制的。只有通过上升机制的进一步分析，才能确定此深位机制的确切性质。

大面积喷出岩流的同源性，是与上升机制有关的因素之一。对此，可在沿北美西海岸广泛分布的中新世玄武岩的密切关系中看出。

系统的时间变化，看来可由许多铁镁质侵入体的成份表现出来。例如，在蒙大拿和怀俄明的贝尔图斯山脉中，各个侵入体是发生在26、20、18、15、15—12以及7亿年前的。这些主要是岩墙体的侵入体，可按其 $TiO_2$ 含量而划分成组。和 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 一样， $TiO_2$ 也与侵入时代无关。这些岩墙，都是低 $Al_2O_3$ 含量、及低K/Rb比即，一般小于230的大陆拉斑玄武岩。每一 $TiO_2$ 组的岩墙都显示出贫于Sr的趋势，而同加拿大地盾怀俄明地区的其它铁镁质岩石相似，这可能是斜长石低压分馏结晶作用的结果。

在这方面，有意义的是，对加拿大的太古代和元古代的优地槽带以及南非和澳大利亚西部太古代优地槽带的分析表明，这两类不同的超基性岩体，它们每一类的侵位，大体都与其各自所包围的火山岩的侵位同时发生(例如，参见Naldrett, 1970)。在作者关于矿床起源、演化和目前特点的著作中，对此课题有进一步的分析(例如参见Tatsch, 1973a, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c)。

## 侵入岩与喷出岩：其演化的摘要

侵入岩与喷出岩有许多共同之处。二者看来都是地球内部性状的地表显示，并且可能也是同一深位机制的产物。二者在地球构造圈的深部，都有长期的起源和演化的历史。

侵入岩浆与喷出岩浆的驱动机制，一般地说，可用 $aA + bB + C$ 来表示，其中的 $a$ 和 $b$ 是常数，假如 $a + b = 1$ 时，两者中的每一个都可以是0； $A$ 是来自上升热力的能，也可能来自挥发物的能； $B$ 是来自地球平衡能于地表局部地面的地表显示的能(第六章)； $C$ 则是为局部环境所固有的“局部”能(如局部应力、局部放射性等)。在相对为水平张性的地区里的这些局部环境，一般所具有的 $b$ 都大于 $a$ ，并伴有所产生的玄武岩流；在相对为水平

压性的地区里，一般所具有的 $a$ 都大于 $b$ ，并伴有所产生的安山岩流。

$aA + bB + C$ ，这一给定驱动机制实际效应的性质，决定于在其中起作用的环境（例如，参见Tatsch, 1977d）。处于两种不同环境中的同一驱动机制，将产生出完全不同的效应：在一种环境里，其结果可能是联合发生侵入作用与变质作用；而在另一种环境里，则可能是联合发生喷出作用与变质作用（例如，参见Tatsch, 1973a）。但在大多数场合下，驱动机制的部分能量，将被消耗于对岩石的转变中，也就是说，被消耗在所引起的变质作用中。

在最简单的情况下，作为驱动机制 $aA + bB + C$ 的局部显示的部分能量 $C$ ，将会在接触变质作用中或在直接以热接触而使岩石发生转变的作用中消耗掉。在现实世界中的大多数场合下，变质作用，不过是接触变质与热力变质的线性组合、再加上起因于褶皱作用和重结晶作用所引起的变质作用罢了。

总之、侵入岩和喷出岩的历史，与地球内部性状的几种地表显示密切相关（Tatsch, 1977d）；

a. 地球运动：大洋与大陆区的隆起与凹陷；由岩石的褶皱作用与逆掩断层作用所引起的造山作用；以及地震。

b. 变质作用：先存岩石在热力、压力和应力的作用下转变成为新型岩石；以及在热力、化学活动、移动的液体的作用下转变成为新型岩石。

c. 岩浆活动：侵入体的侵位；熔岩流和气体以及其它火山产物的喷出。

在所有的情况下，任何一种岩石的历史也即岩石对特别驱动机制( $aA + bB + C$ )的反应史，在地球历史的每一时期中，在地球的不同部份之内，这一特别驱动机制正好都能起作用。

从对此基本构造圈式地球模式的几何学—力学方面的回顾中，可以看出 $a$ 、 $A$ 、 $b$ 、 $B$ 和 $C$ 这五个参数，在过去46亿年同在多么广阔的范围里发生着变化。无论侵入岩或喷出岩，每一种岩石，都是这五种参数为适应地球不断企图使本身平衡至最小能量状况，而长期变化的记录。直至地球内部能够达到完全平衡时为止，在为不断变化着的 $aA + bB + C$ 这一驱动机制区域显示的驱使下，侵入岩和喷出岩将持续记录其各自对一直变化着的环境的反应。从某种意义上说，每种岩石的历史，都是在岩石存在的各个时期里，就已组成着其特定驱动机制的 $a$ 、 $A$ 、 $b$ 、 $B$ 以及 $C$ 这五个参数变化的记录。

### 用构造圈式地球模式所解释的侵入及喷出活动

根据构造圈式地球模式，侵入及喷出活动是与此模式的“活动锥”及“活动楔形带”相联系的（第六章）。那就是，由于（存在于构造圈基底）一定能源的侵入及喷出活动，可望发生在一个以“能源”为顶点、且在理想情况下，以约785公里的标称半径交切地表而形成的一大圆的活动锥内部的某一部位上（例如，参看图6—4）。

如果在下构造圈破裂体系（在构造圈的底部）中的每一点上都形成了局部活动锥，则其顶点在下构造圈表面上的轨迹合计总长约为102,000公里的三个互相正交的大圆。所产生的活动锥就形成了其“封壳”也可称为构造圈三条全球性活动“楔形带”的无数个活动锥体。在地表上，这里的半径是构造圈基底半径的1.18倍，因而这些锥体的中线在地表上所形成的三个互相正交的大圆，其累积总长度为 $102,000 \times 1.18 = 120,000$ 公里。

据此模式，所有侵入及喷出活动，都是由地球的驱动机制激发的。正常地预计，直接由

地球驱动机制所产生的侵入及喷出活动，会发生在活动楔形带如今所在位置的范围内；而间接起因于地球驱动机制者，则可能发生在地球内的任何地方，并且与活动楔形带如今“活动”的部位无关。

因为在任一给定时间里，有活动力的或起作用的能源预计会沿着约50%的下构造圈破裂体系（即，约51,000公里）上出现，从而就有可能指望侵入及喷出活动会于任一时代发生在约半数的全球楔形带体系之中（即，在地表上沿总长约60,000公里的“地带”之中）。侵入和喷出活动，并不必须同时发生在全球构造圈活动楔形带的所有活动片段中。此外，某些类型的岩浆活动，通常也不与某些类型的构造运动相联系。举例来说，超基性喷出通常都不与挤压性构造运动相伴生。同时，也不要指望会在一给定时间及一给定地点上，发生一种上述的岩浆活动。对此区及其它相关地区的详细讨论，都包括在作者关于矿床学方面的著作中（例如，参见Tatsch, 1973a, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c）。

### 与假定的构造圈式地球模式的演化方式相关的侵入及喷出的活动

地球构造圈的发展取决于所提出的是什么样的基本假设，若按照构造圈式地球模式，则是通过下列三种基本增生演化的方式之一而发展的，它们是：八分体状碎块、多重碎块和复合碎块（详情见第三章）。在过去46亿年间，岩浆活动的类型及性状在三种构造圈式演化增生方式的每一种中都会有所不同。

在地球构造圈演化的八分体状碎块型式中，地球原体的五个八分体在增生到基本5400公里原始地球上面之前，还没完全碎裂（第三章）。在这种场合下，地球原体五个八分体中的每一个的一些部分，都可能会作为地球现今未受变动的构造圈部分、甚至作为现存大陆地盾的地下部分而仍存在于今天。

如果地球构造圈是通过八分体状碎块型式演化的，那么过去46亿年间的侵入及喷出活动，在地球构造圈的演化方面，就将与通过多重碎块及复合碎块型式而发生的多少有些不同。在这里无须讨论这些区别的细节。

多重碎块型与八分体状碎块型的主要区别，在于地球原体的五个“地球的”八分体，于增生到5400公里的原始地球上之前遭受破裂的程度。如果，在先于增生的破碎程度相当完全，那么，就不大可能在现今大陆地盾的实际表层岩石中，把地球原体的未受改变的原始八分体部分确认出来，因为过去46亿年间的侵入及喷出活动，已将这些多重破碎的原始岩石改造了。

可将复合碎块型视为八分体状碎块型及多重碎块型之间的中间类型。取决于所设想的地球原体八分体，在增生到基本5400公里原始地球之上之前的具体破裂程度，这一型式，可在以八分体状碎块型及多重碎块型为两极所围限或裹入整个序列中间，占有其中之一的中间位置。关于在过去46亿年间，这些碎块由于侵入及喷出活动而受到改变的情况，还可以做出下列类似的陈述，即，在复合碎块型中，原始碎块为侵入及喷出活动所改变的量及程度，可能也是介于构造圈演化的八分体状碎块型与多重碎块型之间的。

### 侵入及喷出活动是构造圈内优先热流路线的一个函数

在构造圈活动楔形带之内，侵入及喷出活动的性质和部位主要取决于两个因素：（1）局部应力场的性质及（2）优先热流的路线。

倘若在沿下构造圈破裂体系的某一点上的能源是由热力所组成的，并且假如在此点之上的构造圈是均质的，那么，要确定热流藉以穿过厚1000公里的构造圈物质而达到地表的最可能的路线，就会比较简单些。但是，由于构造圈（而且特别是活动楔形带）并不是均质的，其优先热流的路线（从下构造圈的表面到地面）有可能十分迂回曲折，以便绕过低热传导的非均质体。那热流所追随的确切路线，会影响到所产生的岩浆活动的性质和地点，无论是侵入的或是喷出的。据此模式，这种情况就能解释，通向火山和地球内部侵入体的“运道”或管道，之所以是迂回曲折的原因。

## 侵入及喷出的岩浆与低速带之间的关系

依照构造圈式地球模式，地球的“低速带”与侵入及喷出活动，是通过一个共同机制而相互关联的；即，产生于上地幔内初熔的低速带（例如，参见 Lambert and Wyllie, 1970）与岩浆活动，都是由同一个驱动机制激发的。初熔是和导致岩浆熔融的同一个机制有关，使岩浆上升而产生侵入与喷出活动。从而，可将低速带当成是一个介于软流层“板块”之间的水平“侵入体”的复杂全球性网状系统。在这些区域里，某些原始岩浆上不平衡力的向量是水平的（即，不存在足够的垂向管道，以向上转运全体原始岩浆）。当有水平的通道而不能向上运行岩浆时，就会作侧向运行；若无通路时，就会停留在原处。

由上述可见，侵入及喷出活动都与地球构造圈内的低速带及优先热流路线密切相关。对此课题在作者关于地球矿床的成因、演化及现今特征的著作中，有较详细的讨论（例如，参见 Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c）。

## 侵入与喷出的岩浆作用及构造活动

玄武岩质和流纹岩质岩浆活动与地壳变薄相关，而后者依次起因于（1）地壳的引张，（2）来自下部的加热，或（3）二者的结合。由于在给定区域、给定时期中，地壳受到引张和加热的量，是由地下环境的几何学、力学、热力学和化学等因素所起的作用决定的，从而侵入与喷出的岩浆活动的成分，就形成一个从超基性到过酸性的暂时序列。依照构造圈式地球模式的看法，此成分序列大体以旋迴性方式重复出现。这就为过去46亿年间，在地表所出现的大量从基性到酸性的岩石，提供了解释。

## 与隆升和冲断层相联系的侵入及喷出活动

正如曾经一度所认为的那样，许多山脉主要是垂向隆升而不是地壳水平挤压的产物（例如，参见 Eardley, 1963）。举例来说，在古生代冒地槽以东的拉腊米落基山脉，基本上形成于大规模的侵入活动，这一带的山脉，主要构成于其构造起伏达几百米（如布多因穹窿）到12公里的（温德河隆起与类似的构造）既不规则而又宽阔的形体。晚三叠纪断层作用，使这里的某些拉腊米“侵入体”，受到相当大的改造。较新的拉腊米山脉，又受到侵蚀作用、沉积作用以及后来的侵入与喷出活动的改造（例如，参见 Curtis, 1975）。

对拉腊米地区的冲断层进行填图时，证明它们大部分是从边缘冲向隆起或冲向侵入体的。隆升量与边缘冲断层的类型及超伏度之间普遍相关，说明存在一共同的起因机制。这种伴生现象在大型隆起中（即：6公里或更多）是十分显著的，而在低或中等隆升的侵入体里，则几乎难以察觉。

在这些和类似关系隆起与冲断层之间暗示，垂向隆升（或来自下方的侵入作用）是变形的基本型式，而冲断层则是与垂向或倾斜向下作用的不平衡力的向量（即，重力滑动、流动和大规模的剥蚀）有关的次生侧向变形。

总之，构造圈式地球模式认为，山脉隆起以及地面上的有关构造，皆由于硅氧（花岗质）层内深处的巨型岩席和巨型岩盘所引起。有关产生各种地表构造所需的侵入体的大小、形状与深度，以及为在世界上的不同地方产生出山脉所需的有关边缘断层的性质，都将在第十二章（造山运动）中，加以讨论。

### 作为正、负地表构造的底辟侵入体

底辟侵入体通常可以正性地表的特征形式显示出来，例如，盐丘。然而，在某些情况下，当一个侵入体如果丧失其向上的平衡力向量而发生垂向沉降时，就可以造成负性地表特征。萨斯喀彻温的卡斯威尔环形构造就是这种负性地表特征之一，它是位于阿萨斯卡组未经扰动的碎屑岩中，直径达40公里，几乎近于圆形的沉降岩块（例如，参见 Currie, 1969）。

依照构造圈式地球模式，底辟侵入作用，是由存在于活动楔形带中的向上的不平衡力的向量所激发的。因此，卡斯威尔环形构造正是与那一地区及那一时期的楔形带的活动相伴生的地震构造岩浆带活动的形迹。北美洲西部的许多其它类似的构造，都与此同一活动相联系。可以证明世界上其它部分的类似构造，都与此模式的其它活动的楔形带相关。

### 在时—空上有关联的侵入体与喷出体的同源岩浆成因

来自世界各地的观测证据表明，一般说来，深成活动与火山活动，都是与地震构造岩浆带活动的同一事件同期发生的岩浆相，它们在远自太古代以来的各个时期中，都已发生过。在犹他州的宾厄姆和帕克城-科汤伍德地区，就能见到这样的一个实例。与在其它类似的场合一样，在那个地区，侵入岩和喷出岩的近似性，其岩石化学及其在时代方面的相似性，都说明它们是同源岩浆起源的（例如，参见 Smith, 1976）。显然，此同源岩浆成因的基本控制因素，位于沿地震构造岩浆带活动的柯泰兹-尤尼塔轴的形迹上，这个带在太古代、元古代、晚寒武纪、奥陶纪和晚泥盆纪期间，曾断断续续地活动过。

### 海底玄武岩中的变异

海底玄武岩中所有的成分变异，并非都能用简单的高层位分馏结晶作用，或以来自共同地幔的不同程度的部分熔融作解释。对此问题的详细研究表明，通常可用下列方式对它进行比较好的解释：

$$\sum_{i=1}^n a_i A_i, n=3, \text{ 其中的}$$

$A_1$  = 分馏结晶作用

$A_2$  = 高层位扩散作用

$A_3$  = 地幔的垂向及侧向不均一性

$a_i$  = 参数，如果  $\sum_{i=1}^3 a_i = 1$  则其中的任一参数都可以是 0。

从而，如果在玄武岩中的成分变异，可同样归因于分馏结晶作用和高层位的扩散性，于是  $a_1 = a_2 = 0.5$ ，及  $a_3 = 0$ 。但得自法-美大洋中部海底研究（大西洋中脊上北纬  $36^\circ$  处）所观察到的证据表明，这些玄武岩具有的三个参数值都不是零（例如，参见 Bryan, 1976）。在其它主要大洋盆地的玄武岩中，也找到同样的证据。

上述及其它分析表明，海底玄武岩与其它喷出岩（及侵入岩）的演化都同样是十分复杂的。对此课题，在作者关于矿床学的著作中，有较详尽的讨论（例如参见 Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c）。

### 同源岩浆作用的喷出—侵入概念

有些证据表明，火山及深成岩浆的演化是由单一机制激发的。根据这一概念，完全不同的同时存在的侵入作用和喷出作用可在不同的空-时构造环境中产生出来（例如，参见 Ustiyev, 1970; Mossakovskii, 1972; Nalivkin, 1973）。

### 深海锰结核的成因

对于深海锰结核的起源、演化及现今特点，还没有得出完全令人满意的解释（例如，参见 Margolis and Burns, 1976; Tatsch, 1977b）。在过去 100 年间，曾进行过很多的研究和分析，然而，这些结核仍是不可思议的。但可将其一般成因概况归纳如下：

$$\sum_{i=1}^n a_i A_i, n=4, \text{ 其中}$$

$A_1$  = 来自上复水柱的结核生长

$A_2$  = 来自下伏沉积物的结核生长

$A_3$  = 来自由某些受控于生物化学作用的结核生长

$A_4$  = 来自周期性喷出—侵入活动效应的结核生长

$a_i$  = 参数，如果  $\sum_{i=1}^4 a_i = 1$ ，则任何一个参数都可以是 0

举例来说，赤道太平洋东北部的一些富铜镍带，就可由参数  $a_1 = 0.1$ ， $a_2 = 0.3$ ， $a_3 = 0.1$  和  $a_4 = 0.5$  来限定（例如，参见 Tatsch, 1975a）。

### 蛇绿岩

蛇绿岩这一术语表示，一系列看来是代表着洋壳或地幔物质的铁镁质和超铁镁质岩石。这些岩石是否是在“扩张的海岭”中形成的、或者是沿着在大陆内的一条“主要缝合线”形成的、抑或是属于盆地和岛弧发展的一部分，则尚无所知（例如，参见 Irwin, 1976; Menzies, 1976; Church and Coish, 1976; Frey, 1976）。然而，较详细的研究表明，所有的蛇绿岩都是在地球上自太古代时就已发生的，是在不同的地震构造岩浆带活动事件中被侵位的（例如，参见 Tatsch, 1973a）。

## 第十一章 地球的形态学

本书使用的“地球的形态学”一词,与一般意义上的“地貌学”为同义语:即地球表面的形象、特征、起源及演化的科学(Challinor, 1961)。本书的前提是,这些地表形象都是地球内部性状的产物。就是说,由于在过去46亿年间,地球内部性状都在永无休止地变动着,所以地球表面的形态也在不断地变化。

### 原始地球的地貌性状

在对过去46亿年间地球性状所做的任一分析中,都必须考虑到地球的开始、现今以及至少有一段似乎是关键性的中间时期。因为约在36亿年前,地球的演化发展似曾被中断过,因此可将此时期作为关键性的中间时期。

如果设想地球是自太阳星云增生而成,且月球是在地球的附近形成的(但不是地球的一部分),那么,地球表面可能除了由增生作用所形成的形象之外,就不会有其它任何的形象。因而,从全球的地形(平整)和成分(均匀)的观点来看,地球的表面形象,从46亿年以前,就已大体上表现出均一的面貌。

反之,如果设想地球表面的成份及(或)地形,在46亿年以前就不是均一的,那么,从那时以后,在连一次内部或外部更新作用的机会都没有的情况下,这种形象也就不大可能残留到今天。所以,为了进行这一分析,可以设想46亿年以前的地面,除具有与行星自太阳星云形成时的增生过程有成生关系的形象之外,是不会有其它的形象的。

### 地球在36亿年前最可能具有的地貌性状

如果设想地球在46亿年以前没有什么值得重视的地表形象,那么,又确切是在什么时候首次获得这种地表形象以及引起它们的原因是什么?它们是由内因还是由外因造成的?如是外因,那么,此外因又是什么?如果是内因,那它为什么又恰好在其发生的那个时期中才发生,而不是发生在某一较早或较晚的时期里?

倘若地表形象是由过去46亿年到36亿年期间里的外因形成的,那么,这样的形象现在将是不活动的,并会与前寒武纪地盾相似,且年龄约为36亿年。

假如地表形象是在过去46亿年到36亿年的期间里由内因形成的,那么除非此同一内部起因性状,自从36亿年以来一直在起着作用,否则,这样的形象如今将不会是活动的。既然是这样,就可以合理地设想,在过去46亿年间,内部起因机制大体上都一直在起着作用(因为在36亿年前,在地球内部还找不出什么能激发出此种机制)。

在任何一种情况下,看来前寒武纪地盾在36亿年前就已经存在了,但并不必须以其如今的形态和原来的位置而存在,而可以是一种或一种以上的位置和形态而存在,不过从那时以后,就不曾受过严重的加热或冲击。

## 地球现今地貌性状的演化

不管是否设想36亿年前的地球表面的形象，是从内部或从外部引起的，但我们必须考虑到，某些有关自那时以来对于地球表面曾发生过什么变动的问题。是否在过去36亿年间，曾发生过能改变地球表面形象而来自外界的灾变？如果是这样，那它是什么、发生在什么时候、又是由什么原因引起的？如果在过去36亿年间不曾发生过这样的外部作用，那么，是否可以合理地设想，36亿年以来地球表面的所有变化，都是由地球的内部性状引起的？

为了回答这些以及关于地球现今地貌性状演化的有关问题，必须对地球现在及过去的内部性状，进行全球规模的分析。过去十年间，在国际上地幔委员会及地球动力学联合会等国际团体的管理下，已由一些学者进行过许多这样的分析（例如，参见Delaney及Smith, 1969; Drake, 1970; 1976b; Hart, 1969; Knopoff等, 1968; Shaw, 1976; Stacey, 1969; Tacheuchi等, 1967; Wynne-Edwards, 1969）。

当把地球视为一全球性实体时，上述分析结果表明，绝大多数的过去与现今的大地现象都是过去46亿年间地球内部性状的显示，但对引起内部性状的几何学与力学以及根本驱动机制的性质，仍未得到详细说明。而作为作者可提出的前提的构造圈式地球模式，却可为这种尚未被详细说明的几何学、力学以及驱动机制的性质，提供答案。在研究这种驱动机制如何解释过去46亿年间的地球地貌性状之前，最好先回顾一下在地球地貌性状方面起有作用的能与力的问题。

### 在过去46亿年间地球的地貌性状中所需要考虑的能与力的问题

无论对46亿年前的地球形态作何设想，但自那时以后，看来其形态已在不断地发生着变化。有关地壳不稳性的证据是不容否认的。不管地球的形态在一给定的时间和地点看起来是多么固定，但某些部分自地球开始以来就在变化，且至今仍在变化着。地球的一些部份正作为炽热的液体还在运动着；其它部分则作为坚硬岩块或板块仍在向上、下或侧方漂移；还有些部份顺坡受到水冲、风蚀或侵蚀。在整个地球历史时期中，这种连绵不断的扰动使内陆海变成山脉，而山脉本身又变为洼地。它也可使山谷变成山脉，山脉变为山谷。

较详细的研究表明，只有当不平衡力的向量在起作用时，才会发生地貌的变化。只有在不平衡力的作用下，才会发生均夷作用、地壳运动和岩浆活动；并且在任何一时期、任何一地点上的地貌变化的方向，都只能出现在这一不平衡力的方向上（Tatsch, 1977d）。举例来说，如果在一地块或一板块上的不平衡力是向上的，就会发生隆起。如果在一被抬升区的不平衡力是向下的，就会发生均夷作用。如果在一岩浆体上的不平衡力是向上的，我们就会看到向上的侵入或喷出活动。如果在一岩浆体上的不平衡力是向下的，就会发生向下的侵入作用、俯冲或凹陷。如果在一岩浆体上的不平衡力是水平的，就会形成岩席（如果是侵入的）或形成高原（如果是喷出的）。

### 过去46亿年间地球地貌性状的驱动机制

别洛乌索夫（Belousov, 1969）总结出，地球表面形象发展的历史，基本上取决于1000公里深处起作用的那些过程。其它一些学者的结论是，尚不能确定是否需要存在一特定的

对流，以解释过去46亿年间的地貌活动性状（例如，参见 Drake, 1970, 1976b; Hart, 1969; Knopoff, 1969; Lyustikh, 1969）。大多数学术研究者都一致认为，简单的地幔对流模式是不能令人满意的，必须对它做进一步的补充，以使之包括更多的关于现实地球的已知构造及非均一性方面的细节（参见 Tatsch, 1977d, 对这方面的讨论）。

依照构造圈式地球模式，是设想原始地球（即如今的下构造圈）的基本性状，在于趋向将其自身平衡到最小能量的状态（第六章）。此体系的驱动机制可表述为，在其初始状态中所固有的不平衡能量的函数。那么，最简单地说，地貌性状的驱动机制，基本是由两个因素的结果组成的，每种因素在据信地球业已存在的46亿年间，一直是以可预测的方式变化着。这两种因素是：

a. 在基本5400公里原始地球的不平衡状态中所固有的潜能。

b. 来自下构造圈破裂体系向外的优先热流以及可能还有挥发物的选择性开拓通道的能。

这种驱动机制，是在过去46亿年间造成地球的所有地貌性状的原因。简捷地说，它对下列各种变化都起着作用，例如，造山运动、重力异常、包括极性倒转的地磁变化、有关大洋与大陆的永无休止地变化着的全貌的各个方面、海底扩张及其它类型的地壳谷裂作用、大陆漂移与极移、以及能使地球的地貌发生改变的地球构造圈的板片及断片的运动。

### **用以补偿地球内部的不平衡与不断变化着的地貌的地表调整**

从全球规模及长期的观点来看，海底扩张及其它形态的地壳谷裂，似乎都代表那些由地球内部性状引起有引张的区域里的地貌性状。以类似方式发生的地壳板块的移动、地下板块与岩块的运移以及大陆漂移，都代表在那些地区里的地球的地貌性状。可把那些地区里的地球内部性状的结果描述为切向的不平衡力的矢量在一个板块上，或一岩块上，或一大陆上起作用，驱使该板块或该岩块或该大陆运移，是与地球的总体或某一基准点相关，并以此不平衡力矢量的方向为其运动方向（Tatsch, 1977d）。

简言之，依照构造圈式地球模式，海底与大陆的谷裂、地壳板块的运动、地下板块和岩块的移动以及大陆漂移等，都是用以补偿地球内部的不平衡与不断变化着的地貌的一些地表调整。地球的地表形态，只不过是地球表面对地球内部永无休止的平衡性状，所进行的自我调整的一种暂时地延期试图罢了。在某些情况下，一岩块可能被运移而影响平衡；在其它情况下，一个板块可能被运移；还有另外一些情况下，可以形成一个裂谷的影响平衡。有时全球性的山脉，可在单独一次造山运动中，从这些裂谷中生长出来。在其它的一些时期里，当一板块在地球进行无休止的努力以呈现最小能量的形态来，进行自我调整以达到比较接近于平衡的地位时，就会发生地震。

下一章，将讨论某些有关地球所经历过的一次最大的“地貌变化的细节：地槽的形成与造山运动。

## 第十二章 造山运动

关于地球的一些最令人迷惑不解和了解得最少的问题，都涉及造山运动。甚至对于研究得最好的山系来说，甚至与其形成作用相关的确切的地球动力学程序及过程也还不清楚（例如，参见 Hamet and Allegre, 1976）。在过去一百年间，特别是在过去十年中，已为造山运动制订了许多假说。但其中还没有一个假说，能与地球的实际山脉中有关其起源、演化以及现今特征的可观察到的实际资料完全相符。

对这些从全球规模上所观察到的资料进行详细分析表明，造山运动与地槽的发展有关（例如，参见 Aubouin, 1965; Tatsch, 1977d）。据此，对地槽演化的分析，应能为造山运动的几何学、力学、热力学以及化学等各个方面有所启发。特别是，这样的分析，应能对下列几类问题提供答案：

- a. 为什么有如美国落基山这种地区的地壳，从3.5亿年前开始，在相继的一亿年间，会缓慢沉降而形成一狭长的地槽？
- b. 何以此地槽而后在强烈造山运动的较短时期中，会受到压碎及抬升面或为山脉？
- c. 何以此地区在山脉被缓慢剥蚀掉时却保持宁静，而后，又终于和缓隆升而形成宽阔穹拱，却未被进一步压碎？

### 地槽的活动

看来地槽的活动与两种深位的作用相关：（1）整个地壳在沉积作用的过程中的“下沉”；和（2）地壳底层被上地幔的“吸收”，以及莫霍不连续面随后的向上迁移。这两种作用可以产生出完全相同的总结果：即，地壳物质逐渐沉入于地幔之中。

对此两种作用相关的观察资料的详细分析，又引出了另外的问题：

- a. 使地槽带内产生变形的力，是否与搬动地壳物质使之进入地幔以及使地幔物质进入地壳为同一的力？
- b. 或者，地槽内所见到的压碎变形，后产生于毫不相干的水平方向的力而这水平方向的力与球〔面〕的半径成正切？
- c. 倘若如此，这种水平方向的力，是从地槽外部产生的吗？
- d. 或者，是否有可能勿须求助于水平力，就能解释地槽的变形作用？

根据需要有一个普遍的全球性切向力，以产生地槽变形的假设，地质学家多年来一般都采用了收缩假说，假设由于地球在变冷，其表面发生皱缩，从而引起介于地台坚硬岩体之间的地槽的压缩。他们在与地槽和山脉相伴生的褶皱建造中，看到了这种压缩的结果（例如，参见 Holmes, 1965）。

虽然收缩假说已不再被普遍接受，但现今的假说也未能对地槽带中的褶皱作用，做出另一种令人满意的详细解释。许多科学家都确信，地槽的褶皱作用与下列两种作用所引起的压缩力有关：（1）大陆的相对水平运动（第十七章）；地幔对流体系中下降支流的“牵引”（第十八章）；或（2）以上二者的结合。

## 地槽活动的多样性

按照经典的说法,所有地槽都可归入于一或两种类型:即优地槽和冒地槽。实际上,每种地槽都是此二种类型的结合。一般可把它们表示为 $aA+bB$ ,其中,A代表优地槽组分;B代表冒地槽组分;a和b是常数,倘若 $a+b=1$ 时,则它们之中的任何一个都可以是零。因此,假若一个地槽纯属优地槽性质,那么b就为零;如纯系冒地槽性质,则a就为零。但在大多数的实际地槽中,无论a或者b都不是零:即此地槽的一部分为优地槽性质,一部分为冒地槽性质。尤其是从长期的角度来看时,每一实际地槽都同时表现有A和B二者的特点,其中的a和b会大体以旋迴的方式随同时间而变化(例如,参见Tatsch,1977d)。

在某些情况下,一个给定区域中的地槽动力学性状,将特定的A和B的特征消除到如此程度,致使这些地槽表现为既非A型、也非B型。在任何一个地槽的演化中,空、时变数是如此众多,从而在许多情况下,简单A和B的分类不仅困难、且无意义。或许这样表述较比妥当:即有无数以 $aA+bB+C$ 的形式而存在的地槽类型,其中a和b可以是零,而C(一特定参数,包括该地区的几何学、力学、热力学的条件)总不是零。

## 关于地槽演化的假说

最新的地槽模式,都涉及包括有沉陷、火山作用及张力的一个或几个阶段,随后发在有浊流沉积的晚期挤压相以及火山作用的终止(例如,参见Aubouin,1965;Dietz,1961,1963,1966;Dietz及Holden,1966,1970,1970a,1973,1974;Wynne-Edwards,1969)。

对这些及其它假说的详细研究表明:大多数的地槽带,在世界上各个部分里都遵循着相似的发展方式,且它们在过去的36亿年间,都曾屡次遭受过造山运动。这暗示存在着几种法则:

a. 地槽活动大体上有一周期性迁移的趋势。

b. 或许从最早期太古代以来,就有一良好有序的全球性起因机制,长期在地球深部起着作用。

c. 存在着一个可追溯到地球开始时期的地槽演化的重复格局,从而每一年轻地槽,只不过是自地球形成以来的一系列较早期地槽的良好有序的修正。

## 地槽与造山运动的关系

各个时代的和来自各个大陆的地质资料表明,造山运动与地槽发展密切相关。当把地槽、山脉与有关的谷裂以及准带状隆升事件,视为一个单一的长寿体系或族中的组成部分时,就可看出,它们在地球表面上包括有总长超过十万公里的细长线性构造。尚未完全了解存在于这些细长地表构造族中的组成部分之间的关系。但在它们之间似乎存在一种对立的、长生鸟<sup>①</sup>般的联系,暗示它们是由单一、长期存在、深位、全球性的机制所激发的。

从全球规模的观点来看,线性是山脉与地槽的最明显的共同特征。此外,它们二者的时代都可追溯到地球历史的遥远的过去;即,所存在的山脉及地槽,此二者残迹的时代几

① 相传此鸟活了五、六百年之后,自焚为灰,然后由灰中复生,活泼而美丽。故常用作长生不老之象征。

——译者注。

乎都可追溯到太古代的早期（例如，参见Tatsch,1977d）。一般地说，看来地槽是地壳中的长条状拗陷，其基底显然已深深地沉陷到所堆积的沉积物之下。这些长条状拗陷的连续累积的沉积物深达20公里以上，在某些情况下，其时间跨逾长达数百万年，看来山脉是自这些长命的带状沉陷带隆起而成的。隆升是以地层的巨大破裂、断层与褶皱以及其它地表变动而宣告结束的。所有这些，大体上似乎是由以旋迴性而非周期性的方式、为全球规模的深位起因机制所激发的。

因为地槽沉积物的沉积作用有可能是在浅水中进行的，有些学者（例如，Hall,1857）得出的结论是，地槽拗陷及伴生的长期沉陷，是由沉积堆积物的重压引起的。但其它学者（例如，参见Dana,1873）则认为，沉积物的堆积是拗陷的结果，而不是拗陷的原因。

有些山脉和地槽，看来是沿着大陆边缘形成的。有些，则似乎完全是在大陆内部形成的。而另一些，却又似乎是部分在大陆内、部分在大陆之外形成的。如果可以把地壳谷裂视为造山旋迴的最早期阶段，那么可以说，某些山脉和地槽完全是在大洋区域之内形成的（第十五章）。

无论现在及过去的地槽，看来都是以有序的方式而形成于全球的各个部分的，这就意味着，有存在一全球规模、性能良好的控制系统的可能性（例如，参见Drake等1959；Dietz,1961,1963,1965；Deitz及Holden,1966,1970,1970a,1973,1974）。举例来说，阿尔卑斯地槽的构造及发展似乎与印度尼西亚弧的相似，它们二者在大部分历史时期中，都是由深海槽及海岭的复杂体系组成的（例如，参见Aubouin,1965）。从这些及其它的分析中（例如，参见Argand,1916；Kuenen,1967；Laubscher,1969；Schuchert,1923；Sylvester-Bradley,1968），可以得出结论，即地槽与山脉的起源、演化及现今特征，都是由同一起因机制控制的。图12-1示意地表示出，由所设的单一、长期、深位的全球机制，使地槽发展为一条山脉的四个阶段：

在第一阶段里，两个陆块I和II，为数百公里宽的浅海（S）所分开，对浅海及相邻陆块的成因的讨论，参见第十五章。

在第二阶段里，在高地区（H）发生侵蚀作用，在相邻的海区里发生有沉积物的充填。海床（S）沉降，这部分起因于沉积载荷，但主要起因于存在一个不断向下的不平衡力矢量（P），此矢量在一段时期里，以良好有序的方式向下方“拖拉”海床多达20公里（Tatsch,1977d）。

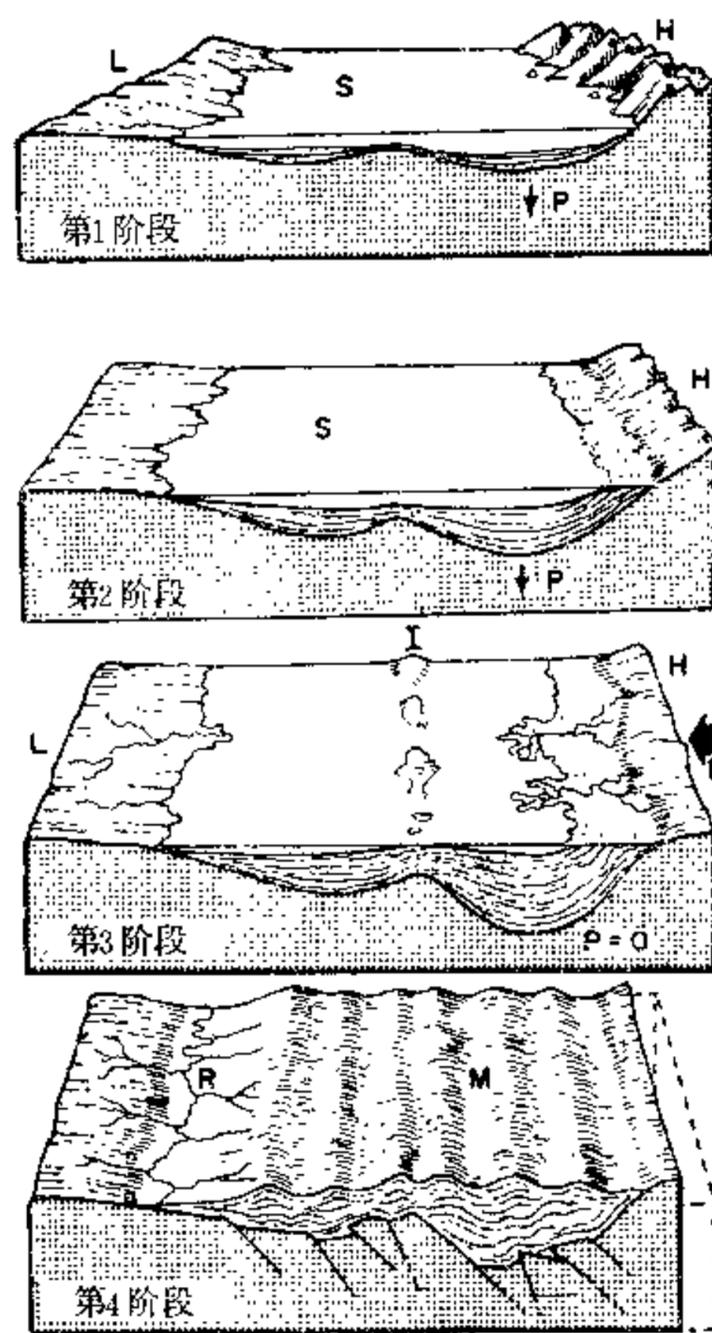


图 12—1 示意图表示地槽及山脉的理想发育的各个阶段

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

在第三阶段里，当向下的不平衡力矢量（P）停止下“拉”时，沉陷也就中断。地槽的右“颞”（H）由于不平衡力矢量（F）在其右方的作用，而以良好有序的方式开始向左“颞”（L）靠拢。沉积地层被挤向上方，在海面上出现了一系列狭窄的岛链（I）。如果F为一力偶（即，包括有旋转及直移），于是岛链（I）在此力偶的作用下就会发生弯曲（第十五章）。

在第四阶段里，升降停止。这时会留下一条平行的褶皱山脉（M），其弯曲都与第三及第四阶段中的力偶作用相称。古老的高地已被侵蚀到其根部。在左侧，一条新河流（R），把从新山脉（M）侵蚀下来的沉积物搬走。

### 地球造山运动事件的简短总结

自从地球形成以来，造山运动事件或造山运动已发生过许多次。但较老山脉的残迹已被侵蚀成为地盾、或成为构成着大陆核心的古老且经常是复杂的岩石的低平区域（第七章）。虽说大陆核的某些边缘，曾为而后来自周围造山运动的薄薄一层年轻岩石的沉积物所覆盖，但这些大陆地质本身，自太古代以后，都很少受到造山运动的侵袭。

还不具体了解有关在各地盾上所发生过的造山运动事件的数目，但在加拿大地盾上，至少已查明有五次明显的前寒武纪造山运动。看来在其它地盾里的造山运动，与加拿大地盾里的都大致是在同一时期中发生的。

在显生宙期间，曾发生过三次主要的造山运动事件：

a. 下古生界的造山运动，以泥盆纪期间的褶皱作用而约结束在4亿年前。此褶皱作用形成了欧洲大陆上从爱尔兰西北部延伸到挪威北部的巨大山脉；在其它大陆上也形成有类似的山脉，例如，北美洲的塔康—阿卡德、格陵兰的加里东以及澳洲的塔斯曼。

b. 上古生界的造山运动，以山脉的形成约结束于2.25亿年前。此山脉向东延伸，从法国到捷克斯洛伐克横跨欧洲；在其它大陆也有类似的山脉，如北美洲的阿巴拉契亚、不列颠群岛的海西、非洲的海峡褶皱以及澳洲的晚期塔斯曼等。

c. 阿尔卑斯造山运动结束了沉积物的实质上是连续的沉积作用，它们发生在三叠纪、侏罗纪及白垩纪，并大约结束在6千5百万年以前。在其它大陆上也发生过类似的造山运动，例如北美洲的拉腊米、南美洲的安第斯及非洲的阿特拉斯等。

根据所有大陆上的造山运动的全球同时代性，显然造山运动与地槽发展具有着一长期、深位、全球性的起因机制。从紧随着每期造山运动之后，都有一个介于其间的长期而稳定的时期这一事实出发，可以证明这种机制大体具有着旋迴性的性质。在此稳定时期中，仍继续进行着侵蚀作用及沉积作用，且几乎未受褶皱作用与隆升的干扰。

详细研究证明，随着时间的消逝，看来地槽与造山运动的过程，会以下列双重方式进行“迁移”：（1）一类是，造山运动的活动是沿构造带的走向作线性“迁移”；以及（2）构造带本身平行其原来位置而迁移。还不完全了解此种迁移的确切原因，但构造圈式地球模式却可为其提供一初步机制（Tatsch, 1977d）。

### 变质作用与造山运动间的关系

变质作用与造山运动以及与地槽发展密切相关，但还不了解这种关系的确切性质。变质作用涉及在不同条件下（尤其是温度和压力）由于坚硬的岩石所处的环境有所不同而产

生矿物学与构造方面的变化。接触变质作用是由岩浆侵入体对围岩的热效应引起的。区域变质作用，其最重要的类型，则产生于造山运动期间的热效应及压力。机制促使发生造山运动，从而引起变质作用。

区域变质岩石，主要是导生于泥质及砂质沉积物的片岩与片麻岩。此类杂岩在所有造山带里的所有被切割的轴部地带回溯至寒武纪的最早期都可见到（例如，参见Tatsch, 1977d）。在许多情况下，可以追踪这样的带到1000公里以外。在大多数情况下，变质重结晶作用的压力及温度，都大致朝向造山带的中线而在增高，说明热源大体上呈线状，并大致集中在造山带内部的深处。

许多变质带，都伴有大量花岗岩质及玄武岩质岩浆岩。玄武岩质火山作用，通常发生在地槽阶段；花岗岩侵位，则发生在区域变质作用的主幕或主幕之后。详细的研究证明，变质作用在大陆的演化中起了影响（第七章）。

## 造山运动的力

如果较好地理解了造山运动，那么，要确定哪些自地球形成以来就在创造着山脉的力，也就比较容易了。但在山脉是如何产生的问题尚未得到解答时，人们就已经为造山运动提出了许多假说（例如，参见Holmes, 1965；或其它优秀的地质学教科书）。

对于能站得住脚的造山运动假说所进行的详细研究表明，每种假说归根到底都是试图提供一种缺之则不能发生造山运动的要素，也即不平衡的力。更确切地说，一个成功的造山运动假说，必须能提供一种具有旋迴性空、时分布的不平衡的力场，只有如此，它才能迎合下列基本要求：

a. 通过提供一种向下作用的不平衡力向量，才能“起动”（以便引起原始地槽的拗陷）。

b. 停止提供向下作用的不平衡力向量，并开始提供向上作用的不平衡力向量（以便引起地槽堆积物的隆升）。

c. 提供呈水平方向作用的不平衡力向量（以使地槽堆积物受到挤压）。

所有站得住脚的假说，都包含此三者中的第一个要素（即初始的拗陷）。但在某些假说里，则缺少第二个要素（隆升），而在另一些假说里，却缺少第三个要素（挤压）。

在这一对地球构造圈演化的分析中，没有必要对所有的造山运动假说都进行全面的分析。这里只须依据不平衡力向量的概念，对其中有代表性的假说做些分析也就够了。因为所有的造山运动假说都体现出，有要求能创造出向下作用的不平衡力向量的需求。归根到底，这就意味着，必须形成一个深海槽，只有如此重力才能发生作用，以将沉积物填入此深海槽中。重力在所有的时期里都起着作用，但直到地壳上形成深海槽或裂谷时为止，单靠重力是不能提供不平衡力的。

地球上的裂谷或深海槽，可产生于下列任一方式（例如，参见Tatsch, 1977d）：

a. 地球外界的影响。

b. 地球的膨胀。

c. 地球的压缩。

d. 热力以及还有挥发物的向上流动而透出地面。

e. 极块以及（或）岩块在地球内的运移。

f. 上述两种或多种方式的结合。

早期的造山运动假说（例如，参见Holmes,1965），运用前三种机制（即地球外界的影响；地球的膨胀；以及地球的压缩），以创造出初始地槽拗陷、裂谷或深海槽。较近期的假说（例如，参见Dewey及Bird,1970,1970a）运用后三种机制，以创造出初始地槽拗陷、裂谷或深海槽。

本章最后一节所分析的是，例如像地球这样的一个球体的体系中，要在46亿年以上的一段时期，产生并维持d和e这两种机制，所能牵涉到的一些困难。

## 造山运动的假说

自从人们首次看到山脉以来，就试图解释它们的存在状态。在地球构造圈演化的分析中，无须研究为造山运动所提出的所有假说的细节。我们只须研究几个较新的假说，以便确定它们与所观察到的山脉主要特点之间，能联系到何种程度。

a. 大多数山脉，都是地球表面上长的、线状或弧形构造的一些部分。

b. 大多数山脉，都含有与山脉大体平行的明显的沉积带、变形带以及热力格局带。

c. 它们含有复杂的内部几何形态，具有大范围的冲断作用及岩体转移，而使极不相似的岩系并列在一起，致使许多前期构造受到破坏或被弄得模糊不清。

d. 它们显示出极度的地层短缩现象，并经常呈现大范围的地壳短缩现象。

e. 它们具有不对称的变形及变质的格局。

f. 它们在垂直构造带的走向方向上，常在沉积成分及厚度上表现出明显的变化。

g. 它们主要含有“海洋”沉积物。

h. 它们的下伏基底主要是大陆型岩石，但构造带本身却含有许多个带，其中的基性和超基性（蛇绿岩套）岩石，都是作为基底以及作为上冲断片而产出的。

i. 它们含有一些在沉积区内，极长时期的时间间隔中，都没有火山活动的期间里，被沉积下来的沉积层序。

j. 当与现今包含在大部分山脉中的沉积过程所持续的时间相比较时，它们的强烈变形作用与变质作用所持续的时间，则是比较短的。

最初的包括有上述山脉十大显著特征的大部分特征的综合假说之一，是由布彻提出的。

## 布彻假说

布彻（Bucher,1933,1950,1955）根据对造山带的研究得出的结论是，在这些造山带里的变形作用，是从地壳的“向下弯曲”，超过了位于深源地震带之上的、一个积极皱缩的下地壳壳层中的收缩开始的。他觉得沉陷地槽中的沉积载荷有增强此过程的趋势，然而他的分析却清楚表明，这种载荷不是地壳沉陷的主要原因。他的观察结果证明，正如通过低角度冲断层的剪切作用所显示的，在此沉陷过程中，这里的地壳最后终得破裂。与此同时，在布彻的模式里，认为超热的水及挥发物，可从下地壳中逃逸出来，以产生区域变质作用及深成岩浆作用。

压缩作用最后会使此地带软化到足以使地槽的变形岩块形成地壳褶皱。这些岩块向上伸延，从而形成伏褶皱，或形成冲断断块。于是，在布彻的模式里，这些向前推进的伏卧褶

皱或冲断岩块，使得沉积盖层“剥离”，而达到活动带边界之外很远的地方，由此而产生出边缘变形及有关的现象。

布彻以为，在造山运动过程中，“先前存在的”破裂带是能起作用的。取决于这些破裂和山脉的运动方向的相对位置，它们可以确定原始地槽中有关盆地形成的现象以及在最外部表层褶皱中的位置异常。在布彻的模式里，当此过程通过各个造山运动期而演化时，由于这些局部影响的缘故，使得在剖面上及地面上的实际构造，也表现出不断变化的图象。当造山带发展时，所喷出的大量岩浆又会使这些变化得到增强。在这些场合下，岩浆就取代了主要的背斜或冲断岩块。这种以及其它的复杂情况，势必会改变甚至破坏“典型”造山带的“正常”构造形象。

图12—2所表示的是布彻设想在一给定时期里、在造山带的不同块断上、或于三个不同时期的同一造山带的给定块断中，所能出现的三种不同的情况。第一种情况，表示具有主背斜的“典型”造山带；第二种情况，表示具有冲断岩块的造山带；第三种情况，表示具有大量岩浆喷出的造山带。

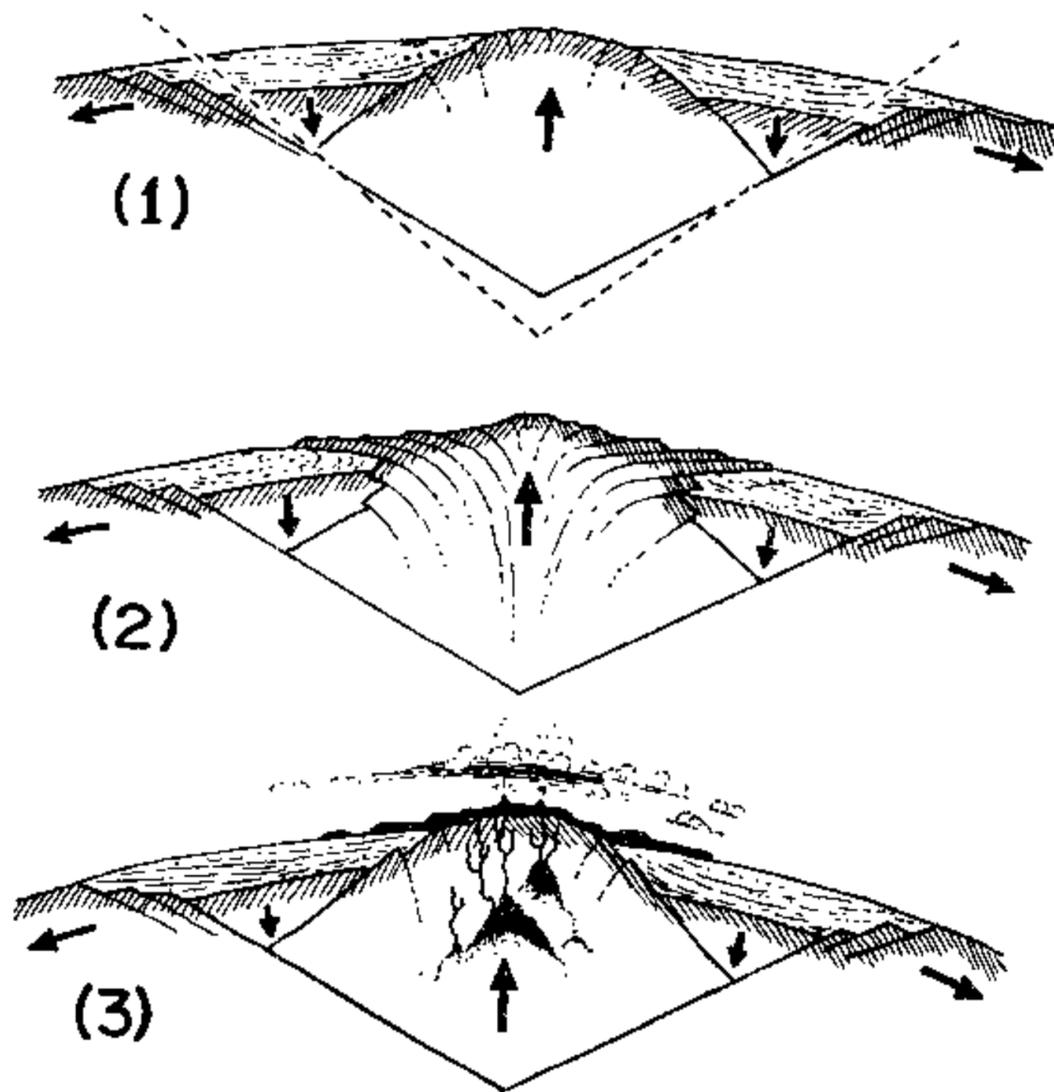


图 12—2 示意图表示布彻的三期造山带的构形

(1) 具有主背斜；(2) 具有冲断岩块；(3) 具有岩浆的喷发，每一次都参照在构造模式地球模式的一个理想活动类型带上

(J. C. Holden 据作者新版书略图修改而成)

## 杜威-伯德假说

杜威与伯德小组及其同事们，已用对造山带的沉积、火山、构造及变质年代学的分析并结合简单板块构造概念的结论来证明，造山运动都是以两种基本的方式发生的，而这两种方式都涉及岩石圈板块的相互作用（例如，参见Dewey, 1969, 1969a; Bird, 1970; Dewey

及Bird, 1970, 1970a)。

在杜威-伯德假说里，所提出的基本造山运动的过程之一，是一个无载荷的（即，未载有大陆的）板块落入于一个深海槽之中。根据此假说，这种情况既可发生在大陆边缘，也可发生在像西太平洋周围的那些主要岛弧的边缘。这一过程，产生出有如美洲西岸山系那样的科迪耶拉型的造山带。在杜威-伯德假说中的另一种基本的造山运动过程，即一个有载荷的岩石圈板块（即，其上载有大陆的板块）落入于一深海槽之中。按照此假说，这一过程可产生出，喜马拉雅-阿尔卑斯型的造山带。

在科迪耶拉型造山带的形成作用中，热力是主导机制。根据杜威-伯德假说，这一热力机制，是由一系列可派生于运动着的岩石圈板块的几何学与力学的复杂事件引起的。在他们为科迪耶拉造山带所采用的假说里，基本上认为是认为，当岩石圈板块在大陆边缘处开始沉降时，就把大洋壳与地幔的楔体驱向大洋。他们设想，板块沉降的速度与其厚度及密度相关，此二因素在板块自洋中脊向外“生长”时，都会有所增大。

当板块沉降的深度达到100公里或更深时，沉降板块之上洋壳的高载荷压力及剪切应力，引起了部分熔融。这种熔融，又依次产生出玄武岩质岩浆及钙碱质岩浆。产生于岩浆上升的热力，造成中心为岩浆的岩石地下穹窿。当穹窿胀大并向着大陆生长时，高温的变形作用及变质作用，就开始对较低大陆隆起的沉积物发生影响。

上升的贴边地带很快升出海面，在它和大陆之间形成一深海槽。当此深海槽为沉积物所填满时，这种物质就被缓慢地驱向并冲断到大陆之上，从而完成了杜威-伯德的科迪耶拉型的山脉。

无论何时，当此过程开始在大陆边缘附近发生时，所产生的山带都会沿此大陆的边缘而形成。杜威与伯德由此而设想，这种变形作用可以向大陆内部“迁移”，从而产生出内部山脉。

反之，如果这种作用是在离开大陆相当远的深海槽处发生的，那么，就会在海洋内生长出一岛弧复合体，于是，在岛弧与大陆之间，就会形成一些小洋盆。按照杜威-伯德假说，西太平洋周围的情况，即属此类。

根据此假说，喜马拉雅-阿尔卑斯并不是在一不可思议的过程中形成的。就是说，当两个载有大陆的岩石圈板块彼此相互作用时，则在板块消亡带上的单一深海槽带，常被岩石圈物质在广阔区域中的破碎和分离所取代。按照此概念，这种类似于碰撞的相互作用，可以产生出例如喜马拉雅那样的大山脉。但是，倘若两个板块中有一个板块载有一群列岛而不是一个大陆，那么，由碰撞所形成的山脉就小得多了，例如新几内亚北部的那些山脉，就是这种情况。

杜威-伯德假说的优点，无须在此细述。这里只提一下，杜威和伯德及其同事们，为了给他们的假说提供证据，而在援引世界各个山带中地槽发展的地层序列时，一般说来，所采用的方式与布彻的相同，也就够了。然而，若就全球规模对这些观察资料进行分析时，并回溯到过去36亿年间似乎曾经起过作用的那怕是很少几次主要的造山运动来看，则无论是杜威和伯德的假说、或者是布彻的假说，都不能与这些观察资料完全相符合。

在杜威-伯德假说提出以后的很短时期内，又根据同一简单板块构造概念，而提出许多其它的造山运动假说。在关于论述地球构造圈演化的书中，没有必要讨论这些假说的细节。不过，最好还是把某些根据简单板块构造概念而提出的造山运动假说中的一些有关的

事实，列举如下：

a. 如今以简单板块构造概念为基础而提出的有关造山运动的假说，要比当前在地面上所存在的山系多三倍（例如，参见Tatsch, 1977d对这些问题的分析）。

b. 不同的学者，对同一山系可提出各不相同的“板块构造”模式。举例来说，对阿尔卑斯，至少就提出了三种都是以简单板块构造概念为基础的、独立的、性质不同的模式。对此，可概括为下列各类：（1）多达450公里的大陆壳的消亡，是由于受到一个固定附着于此大陆壳的沉陷大洋板片的“牵引”，而被拖到另一片大陆壳之下的（例如，参见Trumpey, 1960; Helweg, 1976）；（2）向南俯冲（Dewey及Bird, 1970, 1970a）；以及（3）向北俯冲（Oxburgh, 1972）。

c. 某些独自研究学者，就曾根据简单板块构造概念，而提出过一种以上的造山运动假说。例如，杜威和伯德就对纽芬兰西部的古生代山脉，至少提出过三种独立的、性质不同的模式（Bird及Dewey, 1970; Dewey及Bird, 1971; Dewey, 1974; Smith, 1976b）。

d. 地球上许多山脉的起源、演化及现今特征，还不能根据简单板块构造概念做出完善的解释（例如，参见Dietrich, 1976; Skehan及Rast, 1976）。

对以简单板块构造概念为基础的所有造山运动假说的详细研究表明，有可能用一种自圆其说、但与“板块构造”截然相反的模式，来解释世界上最著名的山系的演化（例如，参见Smith, 1976b）。对以简单板块构造概念为基础的这些造山运动假说的比较详细的分析，见于作者对作为一个星球的地球性状的分析，并特别是对其约在46亿年前的“最早太古代”的分析（Tatsch, 1977d）。

### 格里芬—韦格曼假说

韦格曼关于造山运动的网状脉概念，是根据对阿尔卑斯、中欧华力西结晶岩以及挪威、苏格兰的加里东造山带的研究，提出来的（例如，参见Wegmann, 1935; Griffin, 1970）。在韦格曼的基本概念里，下部构造向上朝着被韦格曼称为“过渡层”的中间性层带隔开的、较刚硬的上部构造的盖层，猛然扩大。

格里芬（Griffin, 1970）指出，韦格曼概念中的这个阶段，与杜威-伯德概念中的可相比较的阶段，有惊人的相似性（Dewey及Bird, 1970, 1970a; Bird, 1970）。在这两种概念里，下部构造都呈蘑菇状，而且朝向与其伴生的克拉通，又都是对称的。在这两种概念里，在此下部构造形成之前，都有一混合岩前锋，侵入到上复的沉积层中。在这两种概念里，都认为在上升的山脉核部之上，发生张性效应，与此同时，在沿着上升活动核部及下部构造二者的海洋一侧，都发生沉陷及俯冲作用。

在韦格曼的概念里，下部构造是在较老的基底内通过“再活动”而发展的，而在杜威-伯德的概念里，则认为活动核部，是通过在“比较低的大陆隆起上沉积物的受热与变形作用”而发展的。这两种概念间的基本区别在于，杜威-伯德模式，为发动造山运动的热提供出准确的机制，即，在杜威-伯德的概念里，沉降的板块产生出那一发展并驱动着活动内核向上运动的热力。明尼尔及托克索兹（Minear and Toksoz, 1970）对杜威-伯德的生热机制提供了理论支持。但他们的解释尚未被普遍接受（例如，参见Hasebe等, 1970; Jacob, 1970; Luyendyk, 1971; 以及Mckenzie, 1971）。

## 其它造山运动假说

还有许多其它造山运动假说，但在地球构造圈演化的分析中，不需要对它们一一进行分析。这里只须说明，大多数造山运动假说都设想，在造山运动过程中的早期阶段，有某种形式的垂直向下的运动，以及除中期阶段的某种水平运动外，还有在后期阶段的某种形式的隆升，也就够了。

大多数造山运动假说，都没有详细说明，有关激发出造山运动过程的驱动机制的性质与本源的几何学、力学、热力学以及化学等方面的细节。在下一节里，将根据构造圈式地球模式，来探讨这一驱动机制。

## 根据构造圈式地球模式来解释造山运动

简单地说，看来造山运动与大陆造山-克拉通的演化，地球的深部地震，其地热活动，及其侵入与喷出活动都是不可分割地联系在一起。根据构造圈式地球模式所解释的造山运动，不过是由构造圈式地球模式的基本驱动机制所产生的几种地球内部性状的地表显示中的一种罢了（第六章）。

地槽的发展和与之相关的造山运动活动，可以根据本书的第124页，图6—5中所示。用此模式的活动楔形带这一理想形式，进行分析最适宜。在其一般的形式中，活动楔形带与图的中部大体左右均一或对称。但在现实世界中，实际上是很少能看到这种理想的左右均一性或对称性的，这是因为，它已为此模式中的那些相邻八分体内各自的构造运动所改造的原故。

举例来说，如果相邻岩块的表面都在同一水平上，则在图6—5右侧发展的地槽，就与在图左侧发展者相似。而另一方面，若情况相反时，那么，活动楔形带就有向右侧倾斜的趋势，因而在图的每一侧，就会产生出不同类型的地槽。根据此模式，这就是为什么会在大多数地槽体系的演化中，产生出优地槽和冒地槽的原因之一。

据上述，可见造山作用以及相关的活动，何以会发生在活动楔形带之内。简单地说，当在任一特定时间就全球规模来看时，从46亿年前开始并一直延续到今天的造山运动及相关的活动，已形成可证明是同一于地球下构造圈破裂体系的、三个互相正交的构造带的格局（第六章）。

举例而言，所有的造山运动及相关的27亿年前的活动，都形成了如此的一种相互正交的格局，它们穿过了与当时已存在的所有克拉通相伴生的、每条地震构造岩浆带的一些部分（第七章），其中所包括的比较著名的体系有：耶洛奈夫、基诺拉、克蒂利德、斯科利、萨穆、巴西、沙姆瓦、斯威士兰、邦达尔坎德、达瓦尔、波尔巴腊以及卡尔古利等。

约在这些地震构造岩浆带活动事件之后一亿年，造山运动活动也形成了三个可证明是同一于此下构造圈破裂体系的三个相互正交的带的格局。但此格局，与27亿年前的则大不相同。这一差异起因于下述事实，即：在1亿年的这一段时间间隔里，有些构造圈板块与岩块彼此之间，以及对于下构造圈破裂体系，都已发生过移动（第四章）。它们在地表上移动的速度为1厘米/年，在1亿年中则累计可达1000公里。因此，形成于26亿年前和27亿年前的具有这两种造山运动格局的地段，可以相距几千公里。

根据此模式，发生在今天的造山运动及相关活动，也会形成同样的三个典型相互正交

带的格局与此模式的下构造圈破裂体系的格局是相同的。形成于过去1亿年的山脉，与在它之前1亿年所形成的山脉也都多少有所移动。

## 地槽演化的全球格局

米切尔和雷丁 (Mitchell and Reading, 1969) 在根据海底扩张及岩石圈板块的俯冲作用，对地槽生长顺序以及大陆边缘演化所进行的分析中，曾把地槽分为以下几种类型：

(1) 大西洋型；(2) 安第斯型；(3) 岛弧型；(4) 日本海型及(5) 地中海型。现将每种类型的主要特点，概括如下：

a. **大西洋型地槽**：在米切尔-雷丁的分类中，它们发生在大陆边缘朝向大洋的一侧，在其附近的岩石圈板块之间，没有差异运动。在此类地槽中，包括一个海隆、一些深海平原、一个大陆隆起、一个大陆架及一个海岸平原。此种地槽沉积序列近似为：(1) 超基性岩；(2) 拉斑玄武岩质火山岩及远洋沉积；(3) 成分上是成熟的浊积岩及远洋沉积；(4) 地球自转等值线洋流沉积；以及(5) 浅海及近海沉积。

b. **安第斯型地槽**：包括一个海下深海槽及一个火山岛弧，它们发生在大陆边缘上或在其旁侧，位于其下的扩张岩石圈正在沉降。对深海槽这一单元的地槽沉积序列说来，它大致是：(1) 远洋沉积；(2) 成分上是成熟的及不成熟的浊积岩；及(3) 粗复理石。对山弧这一单元来说，它是：(1) 粗粒磨拉石及(2) 钙碱质火山岩。

c. **岛弧型地槽**：包括一个海下深海槽及一个火山岛弧。发生在扩张的岩石圈离大陆有一段距离的沉降地带。地槽沉积物为：(1) 成分上是成熟的浊积岩及远洋沉积；(2) 岛弧周围的钙碱质火山岩；以及(3) 偶尔有浅水碳酸盐。

d. **日本海型地槽**：发生在大陆边缘与边缘岛弧间的小洋盆中。地槽沉积都是成分上成熟的浊积岩、块体流物质、火山灰和远洋沉积、逐渐递变为浅海沉积。取决于盆地的性质，日本海型沉积物可以覆盖在(1) 大陆地壳或(2) 典型大西洋型地槽的拉斑玄武岩之上。

e. **地中海型地槽**：发生在大陆之内或之间的小洋盆里。地槽沉积物与日本海型地槽的沉积物相似。

如果运用构造圈式地球模式，来分析上述米切尔-雷丁地槽分类的全球分布格局时，可以发现：

a. 大西洋型地槽都发生在大陆边缘的向洋一侧，在其附近，如今没有活动的楔形带活动(第六章)。

b. 安第斯型地槽发生在大陆边缘上或在其旁侧，在其附近，如今有活动的楔形带活动。

c. 岛弧型地槽发生在与大陆有一段距离的地带里，但其附近，如今有活动的楔形带活动。

d. 日本海型地槽发生在与列岛毗连的大陆边缘之间的小洋盆中，但其附近，如今有活动的楔形带活动。

e. 地中海型地槽发生在大陆内或大陆间的小洋盆中，但其附近，如今有活动的楔形带活动。

将构造圈式地球模式的概念加以引伸，则米切尔-雷丁所划分的五类地槽，可重新组合

成为两种新的类型：(1) 发生在此模式的现今活跃的活动楔形带附近的地槽；及(2) 不发生在现今活跃的活动楔形带附近的地槽。从而，由此得出：(1) 只有大西洋型这种地槽可归入第二类，因为在其附近没有现今活跃的活动楔形带；及(2) 安第斯型、岛弧型、日本海型与地中海型的地槽，都可归入为此模式所设想的第一类之中，因为它们都发生在现今活跃的活动楔形带附近。

据此，可做出如下的观测小结：(1) 现代的造山运动不会与大西洋型地槽相伴生（因为它不接近现今活跃的活动楔形带），这里包含在地槽之内的岩石圈板块之间，也不存在任何差异运动（理由同上）；以及(2) 在所有其它类型的地槽里，都存在相伴生的现今活跃的造山运动（因为这些地槽都接近现今活跃的活动楔形带），而且可能包含在地槽内的岩石圈板块之间，存在差异运动（理由同上）。因此，可以做出结论，当地槽类型受到与地槽相关的，正在活跃的活动楔形带环境（即，无论是大洋的、大陆的或边缘的）的改造时，就构造圈式地球模式现今活跃的活动楔形带而论，地槽类型随其所处位置而变。

总结起来，现代地槽以及与地壳谷裂及造山运动相伴生的有关构造，可以证明都与现今活跃的活动楔形带的现代全球性部位相同(图6—2)。同样地，可以证明古代地槽的残迹，以及与古代的谷裂及造山运动相伴生的有关构造，也与古代的地槽演化时起过作用的、当时的活动楔形带的相应部位相同一。从而，寒武纪时期的地槽残迹，应与此三条相互正交的活动楔形带在寒武纪时的部位相同一；志留纪的地槽残迹，应与志留纪时的活动楔形带的部位相同一；三叠纪的地槽残迹，应与三叠纪时的活动楔形带的部位相同一，等等。

其它有关地槽的分析，都包括在奥博因 (Aubouin, 1965)，迪茨 (Dietz, 1961, 1963, 1966) 以及迪茨与霍尔登 (Dietz and Holden, 1966, 1970, 1970a, 1973, 1974) 的分析中。

### 根据构造圈式地球模式来解释地槽的迁移

在构造圈式地球模式中，构造圈板块及岩块相对下构造圈而运动。所以，地球表面的性状为下构造圈内的破裂体系所制约。从而，可以证明，“不活动的”或残留的地槽，都与下构造圈破裂体系原先的部位相同一。对于外界的观察者说来，这些古老或不活动的地槽，看来都已及时地相对现代的活动地槽而发生迁移。这种迁移可同时含有直移及旋转，在这种情况下，它们不必定是时间的线性函数 (Tatsch, 1977d)。

从几何学—力学的观点出发，可以更加确切地说，不是地槽而是下构造圈破裂体系已经迁移过，或者，也许地槽及下构造圈破裂体系二者都已迁移过，这取决于在分析时是选择地球的哪一部分来作为固定的或活动的基准的。但无论是哪种情况，其结果都是相同的；也就是说，当从时间的格架上来看时，这些地槽似乎已经受过空间的迁移。这种迁移的形式是属于 $aA + bB$ 的，这里的 $a$ 及 $b$ 都是常数，只要 $a + b = 1$ ，则无论哪个都可以是0。这里的 $A$ 及 $B$ ，分别代表旋转与直移。

### 冲断岩席与造山运动

在构造圈式地球模式中的某些冲断断层，能够移动1000公里以上。这些断层中包含有大块的岩石，而各个岩席尽管经历过长距离的运移，但看来都仍保持显著的连贯性，且未遭受变形。贯穿整个山链而发生的冲断断层作用，看来乃是最重要的造山运动过程之一（例

如，参见Elliott,1976)。

还不了解冲断岩席的起源、演化及驱动机制，但对在这方面所提出的几种概念，可做如下概括：

a. 重力滑动包括几种不同的说法，可将其中最简单的概括为：(1)完全在重力影响下发生的重力移动；(2)在运动时，冲断层面在运动的方向上，向下倾斜；以及(3)在冲断层的后沿处，它们朝着地表面切割出上剖面。

b. 布彻(Bucher,1956)的“重力扩张”中则认为，在重力作用下，山链从地形海拔较高的区域“向外扩张”，因而产生出冲断层及伏褶皱。

c. 普赖斯和蒙特乔伊(Price and Mountjoy,1970)，根据实际观察资料而反对重力滑动的概念，他认为冲断层面并不向下坡倾斜，也不在其后沿处切割出上剖面。作为替代，他们再次注意到“重力扩张”的概念，认为：(1)在重力影响下，含有冲断层带的岩体朝向克拉通作侧向扩张；(2)驱动机制，系激发于造山带内部与克拉通的地表间的高程差异；以及(3)从区域规模上看，在完成扩张时，地表的水平力是不重要的。

d. 构造圈式地球模式的观点认为，含有冲断层带在内的岩体，是由于地震构造岩浆带内早期向上的力，而获得其比克拉通高的高程的。而后，在当时作用在此岩体上的不平衡力向量(其中大部分是重力)的影响下，此岩体朝向克拉通作侧向扩张。

## 有代表性的山系的起源、演化及现今特征

在已描述过造山运动的一些主要假说之后，最好对世界各地区的有代表性的山系的起源、演化及现今特征做些描述。

在大多数场合下，对这些有代表性的山系的描述，都更加坚定地以得自构造圈式地球模式的解释做为根据。这样做的理由有两条：(1)除以构造圈式地球模式为依据者以外，根据所有其它假说的关于大多数山系的起源、演化及现今特征的问题，都已被适当地包括在当代文献之中；以及(2)读者将有机会对照比较流行的造山运动概念，来比较构造圈式地球模式的可能性及局限性。

## 关于环太平洋造山运动活动性的分析

环太平洋地区是对任一造山运动假说的最好“检验场”，因为这一区域几近占有全球面积的一半，而且几乎完全为山脉所环绕(图12—3)。

麦克伯尼(Mc Birney, 1970)是最早用环太平洋山脉，来分析以新构造运动概念为基础的造山运动假说的研究者之一。简单地说，麦克伯尼的结论是，海底扩张理论机制的稳定性，与所观察到的包含现今环太平洋造山运动活动的岩浆作用与构造运动的幕期性，存在根本的不一致。麦克伯尼证明，在一方面，洋壳横向运动的速度相对稳定；而在另一方面，还存在影响着环太平洋带广大区域的火山作用、深成作用及构造运动的显著波动。

可在此列出麦克伯尼所提出的一些问题。举例来说，他曾问道，何以距东太平洋中隆6500公里的日本弧内的安山岩质火山作用，在与南美的仅距所设扩张中心1600公里的安山岩质火山作用相比较时，它的时间延长得更长、且活动得更强烈，而所设想的是，在南美俯冲大洋板块的温度应更高、而且那里的消亡速度也是全球最高的地带之一，所有这些都是因为什么？在两个离开很远且地质上又截然不同的区域，如印度尼西亚与安的列斯群

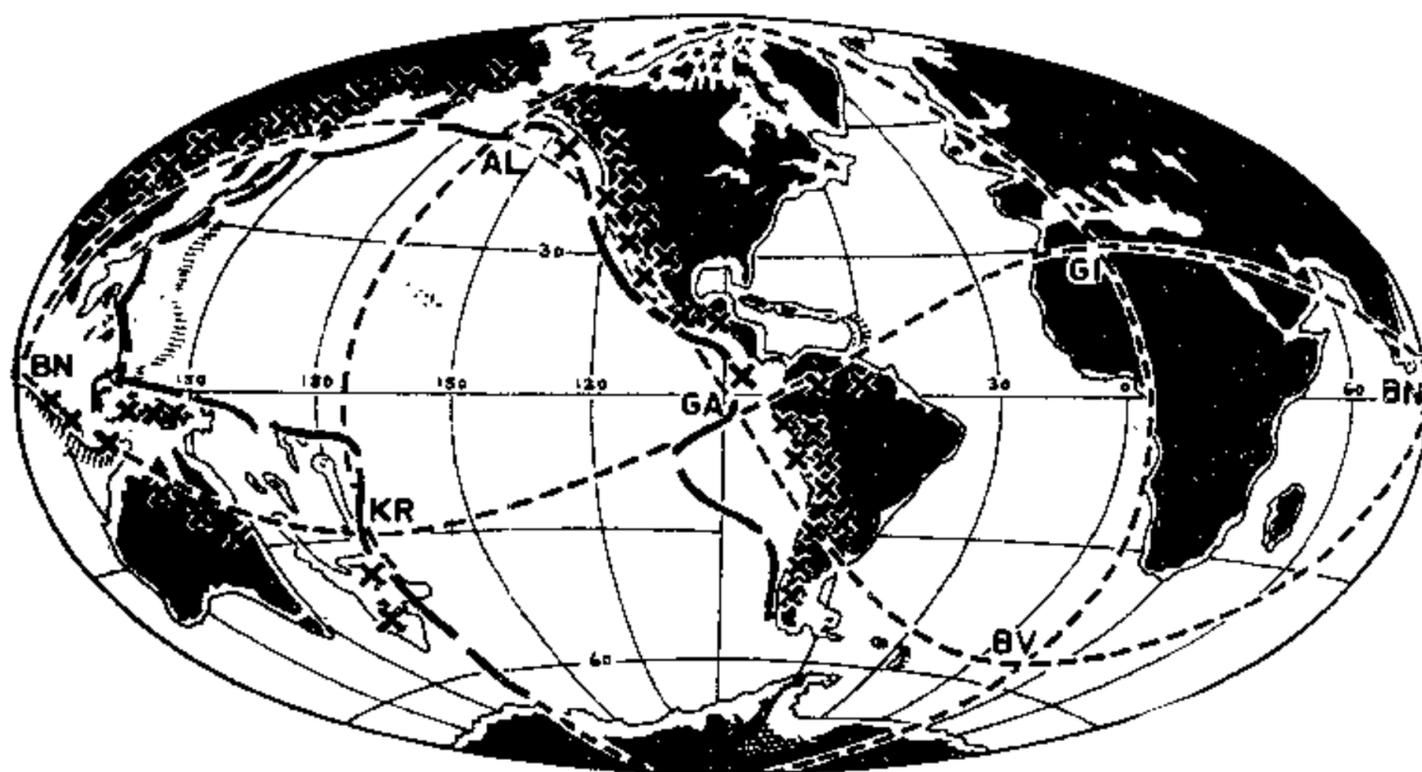


图 12—3 地球的全球投影，表示环太平洋造山运动活动（斜十字）及安山岩线（横断线）

点 AL（阿留申）、BV（布维）

GA（加拉帕戈斯）、GI（直布罗陀）、BN（孟加拉）和KR（克马德克）代表构造圈式地球模式的六个下构造圈点的辐射地面投影

（J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成）

岛，所看到的相似性，在与那些见于任一单个区域中的、第三纪较短期间内的、连续造山幕之间的相似性相比较时，却有更多的相似之处，这又是因为什么？

构造圈式地球模式，可为前一问题提供初步答案：日本弧与南美造山带是属于同一活动楔形带的两个块段（就是说，每一块段都是正子午线构造圈活动楔形带的一部份，可以证明它们与下构造圈点阿留申、加拉帕戈斯、布维及孟加拉相同（第六章）。

## 欧洲的哈茨山脉

欧洲的哈茨山脉，是自英格兰西南部延伸至波兰的海西期活动地震构造岩浆带褶皱了的残迹的一小部份。对这段残迹的起源、演化与现今特征，还不完全了解（例如，参见 Kerbs及Wachendorf, 1976）。最好先总结一下，对此实体及其环境已了解了些什么、又假设了些什么：

a. 看来这一褶皱带是起源于大陆内的，它们具有自元古代到晚石炭纪的活动地震构造岩浆带的残迹。

b. 中欧的海西造山带，为活动地震构造岩浆带的褶皱残迹所包围。

c. 前寒武纪或早期显生宙的活动地震构造岩浆带的残迹，含有低压变质作用的核部及广泛分布的花岗岩质侵入体。

d. 向东南倾斜的毕鸟夫带的残迹，可以定出或不能定出，哈茨山脉内活动地震构造岩浆带的先前界限。

e. 安德森（Anderson, 1975a）根据简单板块构造概念，对该地区提出了一种解斜，但看来他的观点得不到任何观察资料的支持。

f. 克留布斯和瓦琴道夫（Krebs and Wachendorf, 1976），对安德森所设想的该

区的早期洋壳残迹，提出过疑问。

g. 细碧岩质熔岩，主要是在晚泥盆纪和早石炭纪的活动地震构造岩浆带的一次事件中，被喷出的。

h. 细碧岩的侵位，被局限在抬升海岭的两侧，它们是与活动地震构造岩浆带事件相伴生的、深断裂作用的残迹。

i. 与海西褶皱带相关的元古代到古生代的沉积作用，看来已发育在活动地震构造岩浆带的、较早期前寒武纪事件的、多期变质及花岗岩化的残迹之上。

j. 在这些残迹中，表现出泥盆系的所有岩相过渡，它们可从英格兰中部的老红、砂岩、通过英格兰西南部与阿登山脉的陆架相、向到莱因希费尔山的远海相。

k. 哈茨山脉西北部，含有西北向叠瓦状褶皱带原地系统的残迹（如，克劳斯塔—库尔姆带到坦尼灰瓦岩带）。

l. 哈茨山脉东南部，在沿着平卧的冲断层面，存在有外来系统及重力滑动的残迹（如，哈茨格拉德带、南哈茨向斜及塞尔克向斜）。

m. 为活动地震构造岩浆带海西幕中所固有的同沉积垂向运动，将下陷的地槽划分为山岭和盆地，它们又被转变成宽广的复背斜和复向斜（如，西哈茨隆起和上哈茨背斜）。

n. 有些海西期的活动地震构造岩浆带的残迹，是有以向外延伸及冲断断层作用为特征的扇状格局（如，阿克—布鲁克山带）。

o. 在哈茨山脉东南部，类复理石沉积作用（即，前进造山作用的残迹）始于晚泥盆纪早期，而后逐渐向北迁移，之后又为始于早石炭纪（密西西比系）的活动地震构造岩浆带的新相所更新。

## 非洲的前阿特拉斯山脉

摩洛哥的前阿特拉斯山脉，是组成西非克拉通的最新活动单元之一。观察资料表明，在此山脉内，至少含有九次活动地震构造岩浆事件的残迹。

a. 老于26.5亿年。活动地震构造岩浆带的札古拉尔幕，产生出杰贝尔—维哈列姆片麻岩（克尔多斯区）及威德—阿塞姆利尔片麻岩（埃尔—格拉拉区）。

b. 26亿—24亿年以前。活动地震构造岩浆带的伯贝拉幕，产生出克尔多斯统和增纳加统。

c. 22亿—20亿年以前。活动地震构造岩浆带的伯瓦塞尔幕，产生了埃尔—格拉拉系。

d. 14亿—13亿年以前。活动地震构造岩浆带的前阿特拉斯幕，产生了石灰岩与石英岩系。

e. 约在10亿年前。活动地震构造岩浆带的玛罗坎德幕，产生了夕洛瓦—萨洛系。

f. 10亿到9.5亿年前。活动地震构造岩浆带的晚古生代幕，产生了瓦扎夏特系。

g. 9.5亿到5.7亿年前。活动地震构造岩浆带的阿道尔顿幕，产生了“下寒武系”白云岩。

h. 约在3亿年前。活动地震构造岩浆带的海西幕，使覆盖在前寒武纪前阿特拉斯山脉之上的古生代岩层，发生褶皱。

i. 新于1.5亿年。活动地震构造岩浆带的阿尔卑斯幕，使前阿特拉斯杂岩受到抬

升。

查洛特 (Charlot, 1976) 最近在一篇文章里, 分析了前阿特拉斯山脉的起源与演化, 而未涉及构造圈式地球模式的解释。其它学者对此山脉的某些块段, 也进行过较详细的研究 (例如, 参见 Findlay 及 Mundy, 1976)。

### 北美洲阿巴拉契亚山脉

北美洲东部的阿巴拉契亚山脉, 含有活动地震构造岩浆带许多幕的残迹。有些活动可以追溯到元古代; 其它的一些则与活动地震构造岩浆带的阿勒格尼幕一样年轻。现将这些残迹中比较突出的列举如下:

- a. 11亿年前。活动地震构造岩浆带的格兰维尔幕的残迹。
- b. 4.8亿年前。活动地震构造岩浆带的塔康幕的残迹。
- c. 3.6亿年前。活动地震构造岩浆带的阿卡德幕的残迹。
- d. 2.5亿年前。活动地震构造岩浆带的阿勒格尼幕的残迹。

和世界上其它山系的情况一样, 每一活动地震构造岩浆带的幕, 都出现在为活动地震构造岩浆带的前幕所形成的克拉通残迹的旁例。

### 亚洲的不可思议的喜马拉雅山脉

对于喜马拉雅山脉的起源、演化与现今特征的分析, 揭示出它们有许多不可思议之处。对来自阿富汗、西藏、缅甸、泰国及马来西亚的资料说来, 情况尤其如此。

从大地构造方面来看, 可把喜马拉雅山脉划分成为三条基本上是东西向的活动地震构造岩浆带残迹。

a. 印度-恒河盆地前地与下喜马拉雅, 主要由原地的新第三纪到现代的沉积岩所组成。第四纪的盖层主要在南部, 志第三纪岩石主要分布在西部以及在直接位于北方的准平原地带里。

b. 中带组成于小喜马拉雅与大喜马拉雅山脉, 它含有外来的变质与未经变质的残余地层, 其时代可从前寒武纪直到第三纪。

c. 北带组成于西藏的喜马拉雅山脉, 它是前寒武纪到中生代的大陆架沉积物, 在北部则为晚中生代到老第三纪的蛇绿岩-复理石-磨拉石相的沉积物。

对于喜马拉雅山的详细研究表明, 在其形成作用中, 包括一系列的表面引张与挤压事件。可将这些事件总结如下:

a. 在早中生代期间, 引张发生在活动地震构造岩浆带的中生代幕的早期阶段。

b. 而后, 可能在始新世时, 地表力变为压缩, 而介于印度与亚洲间的大洋地带消逝不见, 因而产生出作为那一时期活动地震构造岩浆带事件残迹的印度缝合线。

c. 于是, 再往后, 到渐新世或中新世时, 一次活动地震构造岩浆带事件在印度板块内产生出一个主要的中央冲断层, 这是一次深部的地壳破裂。

d. 当地震构造岩浆带内的力变为压缩时, 就发生了一些俯冲断层。

e. 稍后, 在类似力的作用下, 产生出主边界冲断层。

没有必要重温为喜马拉雅山脉的起源、演化及现今特征所提出的许多其它的假说。感兴趣的读者可以查阅下列文献, 以及这些文献中列出的许多其它参改资料: 杜威与伯德

(Dewey and Bird, 1970, 1970a); 杜威与伯克 (Dewey and Bucke, 1973a); 迪茨与霍尔登 (Dietz and Holden, 1970, 1970a); 根瑟 (Gansser, 1964); 莱福特 (Le Fort, 1971, 1975); 勒皮雄与希尔兹勒 (Le Pichon and Heirtzler, 1968); 麦金西与斯克雷特 (McKenzie and Sclater, 1971); 莫尔纳与塔蓬纳尔 (Molnar and Tapponnier, 1975); 雷伊与阿·卡里亚 (Ray and Acharyya, 1976); 塔奇 (Tatsch, 1977d); 以及瓦尔迪亚 (Valdiya, 1976)。

## 北美洲的瓦奇塔-马拉松山系复合体

瓦奇塔-马拉松山系不可思议的复杂性, 会使研究者果断地说, 所有以简单板块构造概念为依据而提出来的造山运动假说, 在应用到此山系时, 都是“过份简单化了” (Roeder, 1976)。

许多关于瓦奇塔-马拉松山系的复杂情况以及有关的解释, 都已概括在很多文献中 (例如, 参见 Cebull等, 1976a, 其中列出有用的参考文献)。这里无须赘述。但是, 最好还是先总结一下, 尚未见于文献的几条有用的构造圈式地球模式概念:

a. 对于瓦奇塔-马拉松山系的分析表明, 它是包括阿巴拉契亚山脉以及墨西哥北部一些山脉在内的较大体系的一个亚系。

b. 详细研究表明, 这条较大的山系 (阿巴拉契亚-瓦奇塔-马拉松-墨西哥) 中, 含有两类线性块段: (1) 走向为北东的块段; 及 (2) 走向为北西的块段。

c. 走向为北东的块段, 包括阿巴拉契亚山系、得克萨斯的瓦奇塔褶皱带以及马拉桑山脉东南方的墨西哥山脉。这些都是与构造圈赤道相伴生的活动地震构造岩浆带古生代幕的残迹 (第六章)。

d. 走向为北西的块段, 包括阿肯色与俄克拉何马的瓦奇塔山脉以及马拉松山脉。这些都是与径向活动楔形带相关的活动地震构造岩浆带古生代幕的残迹。

e. 纽芬兰的长岭、新英格兰的格林山脉与伯克舍丘陵、哈得逊-新泽西高地、兰岭、韦科隆起、拉诺隆起与戴维尔斯河隆起, 都是活动地震构造岩浆带前寒武纪幕的抬升残迹。

用构造圈式地球模式, 对阿巴拉契亚-瓦奇塔-马拉松-墨西哥山系的详细解释, 将超出本书的范围。但欢迎并请求感兴趣的读者向作者讯问其细节, 并提出具体的问题。

## 大洋盆地中的海山、火山岛及其它山脉

现已对海底山系的起源、演化及现今特征提出许多模式。与大陆上的山系一样, 洋盆内的许多山系也形成线状体系。但是, 在某些场合下, 已分别对在海中的及在大陆上的山脉提出了一些假说。

这里没有必要对这些假说进行详细讨论。然而, 最好把一些为洋盆内山脉的起源、演化与现今特征所提出的不同类型的假说, 列举如下:

a. 弥散断裂 (例如, 参见 Betz及Hess, 1942; Jackson与Wright, 1970; Green, 1971)。

b. 构造圈式地球模式概念 (Tatsch, 1959, 及其以后的著作)。

c. 热点 (Christofferson, 1968; Morgan, 1971)。

- d. 沿转换断层的火山作用 (Erickson等, 1970; Handschumacher, 1973)。
- e. 渐进底辟的上涌 (Mc Dougall, 1971)。
- f. 热缕 (Morgan, 1972)。
- g. 地幔缕 (Morgan, 1972a)。
- h. 剪切熔融 (Shaw, 1973; Shaw and Jackson, 1973)。
- i. 熔融点 (Dalrymple and Clague, 1976)。

对上述假说的详细研究表明, 其中有一些是专为在海底上创造出山脉而制定的。构造圈式地球模式的观点却不是这样, 它用以创造出岛链、海山及其它海底山脉的机制, 与用以创造出大陆上的山脉的机制都是一样的。

## 第十三章 地球的重力场

多年来已认识到地球的内部在重力上是不稳定的，但还不清楚这一不稳定性的原因（例如，参见 Vlaar及Wortel, 1976; Tatch, 1977d）。

本书所设的前提是，由于地球内部性状在过去46亿年间曾无休止地发生着变化，从而使地球的重力场及地球体的形状（Challinor, 1964）也表现出不断变化的情景。进一步所设的前提是，构造圈式地球模式提供出一几何学-力学结构，在此结构中，可以明确表示：（1）用于地球内部性状驱动机制的细节；以及（2）这一性状与代表着不断变化的地球重力场的地球体全貌的关系。

在研究这些前提之前，先来总结一下所观察到的有关地球体的形态、及其与地球其它大地现象和构造的关系的一些资料。

### 地球体的形态与其它静力学及动力学大地现象间的一般对比

如果能对空-时进行某种调查，则一般说来，地球体的形态与其它大地现象是可以互相对比的。这样的一些最早的对比表明，如果对地形进行调整，则高热流值可与低重力相一致（Lee and Mac Donald, 1963）。然而，特定的重力平面异常并不与大洋与大陆现今的位置相关，而是与构造圈的更具根本性的深位构造相关。

有些大地现象与基底的年龄有关，它们之间的一般相互关系是，重力随基底年龄的增加而增大。因而，在重力与热流间没有严格空间关系的这种情况，就代表地球内部热力性状与产生出重力变化的起因机制之间，存在着时间的滞后。可想而知，在地表测量的热流与所测的重力之间，这种滞后可能会相差几百万年。若以几厘米/年的速度转换为空间范围时，则一千万年的时滞，就代表地面上的几百公里。

当从全球规模来看时，包括重力在内的大部份大地现象，对于地球自转轴而言，都是不对称的。这就使对比发生困难，特别是当资料不足时，尤其如此。与其它涉及资料不足的问题一样，倘若观察到的低“信号”（即，在广大地区内的观察资料不足时）能为降低此体系内的“干扰”所弥补，则此问题就有可能部份地得到克服。对此可用第三章中所谈到的，把地理坐标转换（调整地极）为大地构造圈式坐标来完成。在这样做了之后，从全球规模来看时，重力平面的格局，就大致会与其它大地现象及构造格局相关了。

海德与马尔林（Hide and Mallin, 1970; Hide, 1970）发现，倘若把地磁场的非偶极分量在径向上移动一下位置，则它与地球体的形状间就存在一个十分明显的相应关系。

在地球的某些部份里，地球体的形状与其它大地现象之间的关系仍是个谜。举例来说，阿富汉的重力场，在兴都库什山脉东部，以其有很大的平均海平负异常为特征、而在其西部，则以此异常基本为零为特征。这说明，这条山脉的西部是处于均衡平衡状态之中的，而其东部则伴有巨大的质量不足。在地球上的其它部份里，大体上在一小区域里的单个地表构造中，也表现出类似的复杂情况。

## 地球体的形状是地球内部性状的函数

如果地球重力场及地球体的形状，是过去46亿年间的地球内部性状的地表显示，它们就应具有某些与那一期间的地球内部性状相关的特点。在理想的均衡条件下，在某一深度上的所有地壳柱，都会施加相等的压力；而且自该深度向上延展的地壳柱所具有的质量，也正好与该深度之下的补偿质量相等（例如，参见 Heiskanen及Vening Meinesz, 1958; Heiskanen及Moritz, 1967; Caputo, 1967; Woollard, 1969, 1969a）。

从全球规模来看时，如果对空、时进行适当调整，则地球的重力场与地球体的形状就可以反映过去46亿年间的地球内部性状，这是因为事实上地球是一个动力学的天体、且地表构造的发展可以滞后于深处内部性状的缘故。举例来说，因为只有作用于铅直地壳柱上的不平衡力为零时，才能存在理想的均衡平衡情况，所以必须进行调整；在所有其它情况下，地壳柱都趋向于平行此不平衡力的向量而运动。在实际不断变化的地球中，很难设想在过去46亿年间的任何一个时期里，会出现绝对理想的均衡状态（例如，参见 Tatsch, 1977 d）。事实上，实际的重力测量也证实如今的情况正是如此。然而，可以预期会存在、并且也的确观察到亚全球性或区域性构造的几近均衡平衡状态，但它们与如今的大洋-大陆的配置不相一致。

为了根据几何学-力学的概念来解释地球体的形状，曾进行过多次尝试。阿特姆杰夫及阿图什科夫（Artemjev and Artyushkov, 1971）的结论是，只有设想地球体的某些构造，是由“重力对流”而不是由热力对流所维持时，才能对它有所理解。在他们的模式里，由所设重力对流产生的大规模地幔运动引起地壳的伸张，从而又导致发生谷裂作用。但此模式并未说明，在整个46亿年期间，有关这一支持所设重力对流体系的适当机制的细节，而在解释此时期内的地球内部性状时，这种机制都是至关重要的。

## 地球体的形状是地内深部岩体位移的函数

地球体形状的地区性及区域性变化，是由在地表或地表附近的岩体的位移造成的。因此，地球体的变化，可产生于地下水位起伏、侵入及喷出活动、由隆升而引起的构造运动以及与渐变或灾变相伴生的地壳运动。

地球体的形状与海陆构造全球格局间缺乏相关性，说明地球体的构造起因于：（1）地幔深处、即低速带之下的密度差异（因而，即质量差异），设想有时由此而会影响到均衡平衡；及（2）在较浅深度上的密度差异，是靠对流或一种相当的机制维持的；或（3）由于（1）及（2）的结合，即沿构造圈内不同深度的固流限平面上所产生的密度差异（第六章）。

## 地球体的形状是地球上延展线性及方形构造的函数

地槽、山脉及相关的裂谷与准线性隆起，代表着地面上长度超过100,000公里的线性构造。还不完全理解此线性“家族”的许多成员间的相互关系，但看来在它们中间存在着对立的、长生鸟般的联系（第六章）。当把地表构造的线性“家族”联系于地面上的方形构造，即大陆与大洋，进行分析时，这种不可思议的联系的性质，就更加有意义了。

从这一观点出发，可以把大陆在过去46亿年间的演化，说成是一种增生过程，即在大

体上成方形的中央岩体（克拉通）的外围，通过线性延展构造或造山带的作用，而向外生长（第七章）。因此，当从全球角度进行分析时，就会觉得，无论是大洋-大陆的全貌都表现为方形格局，或者是地球体所表现出的那种补偿于地表构造与激发这些构造使之演化的起因机制间的而数量上大体等于时间滞后的类似构造，也就不足为奇了。

### 用构造圈式地球模式来解释地球体的形状

根据构造圈式地球模式，可以证明，作为地球重力场量度的地球体的形状，与活动楔形带并与和其伴生的热力活动及构造运动有关（第六章）。

使用以地球旋转极为依据的地理坐标时，则可以把地球体的形状表示为地理的余纬度（ $\theta_K$ ）的、和地理经度（ $\phi_K$ ）的函数，在地表任何一点上的地球体波动值，都可表示为：

$$g = g(\theta_K, \phi_K)$$

上列公式可以引伸到任何解析度或  $N$  级，情况如下：

$$g = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^m (A_n^m \cos m \phi_K + B_n^m \sin m \phi_K) \cdot P_n^m(\cos \theta_K), \text{ 其中}$$

$K$  值是由 1 到  $N$ （例如，参见 Kreyszig, 1962; Merritt, 1962; Abramowitz 及 Stegun, 1964; Heiskanen 及 Vening Meinesz, 1958; Caputo, 1967; 或任何其它讨论第二类相关的 Legendre 函数的参考文献）。

根据二元原始行星假说，以地球的大地构造圈的性状为依据的大地构造圈式坐标体系，对于地球体的形状来说，要比以地球自转轴为依据的地理坐标体系更加“谐和”。这就是说，二元原始行星假说和以此为依据的构造圈式地球模式所设想的地球体形态的波动，是地球在过去 46 亿年间的构造与性状的显示，而不是与其联系不明确的地球自转轴的显示。换句话说，如今地球体的形状所代表的是，地球于过去 46 亿年间、并包括目前在内的地震构造岩浆活动事件的残迹。

借助于第三章所叙述的将地理坐标转换为地球构造圈坐标的方法所进行的分析，已可证明，的确存在这种所设的“谐和”关系。简单地说，这种转换涉及在进行地球体形状的球状协和分析前，先要用上面的地球体波动公式，来替代地球构造圈式坐标的  $\theta_K$  和  $\phi_K$  值。在从全球规模对此进行研究时，可见对转换资料进行的分析，一般都能确证所料想到的、存在于地球体形状与其它大地现象及构造之间的关系（Tatsch, 1964a, 1969, 1977d）。

### 地球体的形状是地球构造圈式演化模式的函数

取决于做出何种设想，根据二元原始行星假说，地球构造圈，是通过三者中的任何一种基本增生演化方式而发展的。这三种方式已在第八章中描述过了，即八分体状碎块型、多重碎块型及复合碎块型。在构造圈演化的每种可能增生方式中，地球的重力场在过去 46 亿年间都会有所区别。现将这些区别概括如下：

a. 在八分体状碎块型中，一如第三章中所描述的，为形成地球而指定的地球原体的五个八分体，在增生到基本 5400 公里原始地球上之前，还没有完全碎裂。在这种场合下，今天地球原体的五个“地球”八分体中的每一个，都仍可能作为地球构造圈中未受变化的部份而存在，甚至有可能是现存大陆地盾的地下部份。详细分析表明，构造圈的这种演化方式，可能会对现今地球的形态，起有重大影响（Tatsch, 1977d）。

b. **多重碎块型**与八分体状碎块型的区别,主要在于地球原体的五个“地球”八分体,在增生到基本5400公里的原始地球上之前的破裂程度。倘若在增生前已相当彻底地破裂了,那么,就极不可能证明目前大陆地盾上的任何实际地表岩石,就是地球原体的原始八分体的未经改变的部份。因为在过去46亿年间的构造、岩浆及变质作用的活动,已会对这些多重碎裂的原始岩石进行过改造。从而,这种地球构造圈的演化方式,只会对现今的地球体形态产生较小的影响(同上)。

c. **复合碎块型**可视为八分体状碎块型与多重碎块型之间的一种中间型式。取决于所设在增生到5400公里基本原始地球上之前,地球原体的八分体的具体碎裂程度,这种方式可以处于以八分体状碎块型为一端、以多重碎块型为另一端的整个序列中无数中间部位里的任一部位上。关于这些碎块在过去46亿年间于地球上所受到的构造、岩浆及变质作用的改造,也有类似的情况。就是说,在过去46亿年间,地球上这些碎块所遭受的构造、岩浆及变质改造的质与量,都是这些碎块在增生到基本5400公里原始地球上之前,地球原体的八分体所经受的特定碎裂程度的函数。由此可见,地球构造圈的这种演化方式,对现今地球体形态所产生的影响,是介于八分体状碎块型与多重碎块型之间的。

详细研究表明,把如今地球体的形态说成是过去46亿年间地球内部性状的函数,要比把它说成是构造圈藉以演化的特定增生方式的函数更加贴切。在地球内部性状的特定因素中,对现今地球体形态可能起着重大影响的因素,正是那些由过去46亿年间构造圈内优先热流路线所决定的因素(第九章)。在下节里,将对此进行简短的讨论。

### **地球体的形态是地球构造圈内优先热流路线的函数**

在构造圈活动楔形带内,地球体波动的性质和部位,主要取决于两种基本因素:

- a. 岩浆活动的性质及地点。
- b. 优先热流的路线。

详细研究表明,当在全球基础上未考虑这两种因素时,它们并不是不相容的。

倘若在沿下构造圈破裂体系某点上的能源是热力,而且如果在此点之上的构造圈是均质的,那么,要确定热力会沿之通过构造圈而到达地表的最可能的路线,就比较简单了。然而构造圈(并特别是活动楔形带)不是均质的,优先热流的路线(自构造圈基底到地表)就可能十分曲折,以便绕过低热传导的非均质部份。热力所追随的确切路线,将影响到所产生的侵入或喷出的岩浆活动的性质和地点。根据此模式,这就是通向火山的或侵入体侵位的管道,之所以是曲折的原因。从而又会影响到活动楔形带内的重力异常。

从全球规模看,下构造圈破裂体系对地球体的形态起有重大影响。此体系把下构造圈分为八分体,结果是,可望地球体形态会表现出于其中所固有的特征,即,在理想的情况下,应存在与八个下构造圈大地岩块相伴生的八个地球体的极。

### **地球体的形态是地球软流圈流动格局的函数**

地球体形态内的质量异常及由此而引起的变化,只能产生于物质从一地点向另一地点的实际迁移。据此要求,从而地球内物质的任何致密化或稀疏化,无论其程度大小,如果没有物质的实际运移,就不会产生质量异常及由此而发生的地球体形态的变化。

这种质量必须实际受到运移,才能产生质量异常的必要条件,类似于:必须施加不平

衡力向量才能产生运动；或者，无论绝对压力有多大，在液体流动以前必须存在水位差；又或，无论电压有多高，在电流流动前必须存在电位差，等等。反之，任一不平衡力不管其多么小，都会引起运动，正象不管有多么小的水头都会引起液体流动，或者，甚至最小的电位差也会引起电流一样。

将此分析加以引伸，从而，无论何时发生质量转移，就必定存在正在起着作用的不平衡力。转移的瞬间方向就在不平衡力的瞬间方向之中。质量转移的方向随着(而且只随着)不平衡力方向的变化而变化。

归根到底，构造圈内的质量转移必定与软流圈内的流动相关。根据现今的概念，大部份的软流圈流都是由初始熔融产生的(例如，参见 Lambert and Wyllie, 1970)。引起这种熔融的机制，也正是引起侵入与喷出作用的机制。

总之，在软流圈“板块”间的“水平侵入体”的复杂网络内(第六章)，在没有足够的垂向管道以向上输导所有原始岩浆及与之伴生的热力时，软流圈流都作水平运动(第十章)。既不能向上、又不能向旁侧流动的岩浆，就将留在原地。从而，地球体的形态与软流圈的构造及性状、并与优先热流以及与之伴生的初始熔融的路线，都有不可分割的联系。

### 地球体的形态与地球的驱动机制

根据目前的证据来看，地球的重力场与地球体的形态，似乎是过去46亿年间地球内部性状的地表显示。然而，看来质量的再分配，滞后于引起地球内部性状的各种力。从而，地球体的形态应与构造圈的驱动机制有关(第六章)，而不与地球内部性状的地表显示相关。这种驱动机制，在实际上对发生在过去46亿年间的地球体形态的所有显著变化方面都起作用，而且也对现今地球体的形态有影响，并将激发出地球体的所有未来的变化(Tatsch, 1977d)。

### 作为重力平衡显示的海底扩张、地壳板块运动及大陆漂移

当从长期及全球规模上来看时，海底扩张与其它形式的地壳岩裂都是代表着地球某种趋向的地表显示，即，地球力图通过引张并在某些区域中产生地壳变薄、以将其形态(地球体)平衡到具有最小位势的形态(第十六章)。相似地，地壳板块运动、地下板块和岩块运动以及大陆漂移，都代表地球试图通过使板块、岩块与大陆相对地在那里一个基准点进行运动，以平衡其形态(第十七章及第十八章)。

因此，地球体的形态是地球重力场的一种暂时受到延误的趋势，它要通过调整其本身以适应地球内部的永无休止地在进行着平衡的性状。在某些情况下，岩块会移动以实现平衡；在另一些情况下，板块也会运动；还有的情况是，可以形成裂谷的达到平衡。有时，全球规模的山脉可自这些裂谷生成；在其它的时期里，一个板块可沉入于海底裂谷或深海槽中。还有，在另一些时期里，地球为达到其形体可代表最小势能平面的条件而进行永无休止的尝试中，当一个板块的岩块调整其自身以达到更加接近于平衡的位置时，就会发生地震。

## 第十四章 地磁与极性倒转

地磁与极性倒转，是对地球内部性状地表显示方面研究最多、但了解最少的两个方面。这些显示与地球构造圈的演化以及与地球的对流场、电场等其它大地现象，有着密切的联系。但除此之外，对于地球磁场的起源、演化及现今特征等都很少了解（例如，参见 Courtillot and Le Mouél, 1976; Fisher 等, 1975; Hillhouse and Cox, 1976; Levy, 1976; Naidu, 1974, 1975; Rikitakes, 1975; Tacier 等, 1975）。

### 地球的对流场

地磁场的存在暗示出地幔对流的一种形式；但对这种对流的确切性质，尚难以说明。有证据表明，热力、重力及水磁力都会影响地球的对流场，但还不确切了解这些影响是如何产生的。

通常认为，热力过程是地幔对流的形成机制。有些地球物理测量资料证明，地幔所具有的特性并非辐射对称的，而这种对称却可望出现在，作为从流体随机增生的球体的那种在冷的情况下形成的地球中（Runcon, 1969）。热对流可以包括由下列情况所导致的任何一种不稳定形式：

- a. 在地核内部的增热。
- b. 在地幔内部的增热。
- c. 热力穿过构造圈向外的流动。
- d. 上述两种或三种情况的结合。

### 地球的电场

地球的“电场”极其微弱，而且因为难以直接测量，所以尚未能在大范围内对它进行分析。然而，通过每当地球电场内发生变化时就记录下地球构造圈变化的某些特征，就有可能作出间接测量。得自紧邻大多数火山喷发地点及许多地震地点的电性异常观察资料，有可能指出在构造岩浆活动期间构造圈内是地电场电势变异的所在地（例如，参见 Tatsch, 1977a; 1977d）。

构造圈熔融物质的导电性，比同一物质在不熔状态时的导电性，大2到3个数量级（例如，参见 Lubimova and Feldman, 1970; Johnson, 1975）。这突出地表明，地电场与地热场的密切联系（第九章）。在分析地电场与地势场间的紧密伴生关系时，必须仔细并不间断地判别，于给定深度上的平均温度，及于该深度上优先热流狭窄路线的实际温度（第六章）。从全球或区域范围来考虑，于给定深度上的平均温度都大致相同，然而在沿优先热流狭窄路线上的实际温度，可以比在同一深度上构造圈其它部分的温度，大几个数量级。

根据这些及其它观察资料与分析，可以把与构造圈演化相关的导电性特性归纳如下：

- a. 下地幔中的导电性，可能产生于温度升高时硅酸盐的半传导特性。

- b. 地壳的导电性，一般低于沉积岩。
- c. 导电性随着间隙水的数量及含盐度的增多而增高。
- d. 地幔导电性表现出随深度的加深而迅速增高。
- e. 上地幔的导电性，在很短的距离内，可以有几个数量级的变化（例如，在亚利桑那之下的上地幔，其导电率比在邻区新墨西哥之下的大50到100倍。
- f. 在高热流率及低震速地区，导电率也最高。

## 地球的磁场

地球的磁场，在很多方面表现出是由一巨大而永恒的、其磁轴偏离于地球旋转轴的磁体所产生出的磁场。详细研究与地磁有关的几何学、力学、热力学及化学的参数表明，用这一简单概念去解释所观察到的有关这个场的复杂情况，是毫无希望且不适当的。这些复杂情况与地球构造圈的其它参数是如此复杂地纠缠在一起，以致还没有找到能解释所观察到的有关地球磁场性状的准确解答（例如，参见Doell and Cox, 1971, 1972; Levy, 1976）。

因为在分析地球构造圈的演化时，必须包括对地磁场演化的分析，所以最好先总结一下，对过去46亿年间地球磁场的性状，已了解了些什么。对此将在下面几节中进行。

## 地磁场与地球旋转轴间的关系

看来对称性及其它几何学方面的研究，都牵涉到地磁场的起源、演化与现今特征。举例来说，所观察到的有关地磁场都大致围绕地球旋转轴而对称的资料，就成了关于过去46亿年间地磁场的起源与保持方面的假说的重大约束条件。

在地质时间表中，地磁轴与地球自转轴间的角度变化（或倾斜），看来只是一个相对小的瞬变现象。因此，就没有什么理由要在地球内去寻求什么不对称要素、或提出涉及有不对称特征的有关地磁机制的假说。尽管在涉及物理学因果情况的分析中，通常都多少会直觉地运用对称原则，然而在分析其中因果关系紧密交织在一起的、有时甚至是交替变换的地磁场时，还是应当使用一比较明确的研究方法的（Elsasser, 1966）。

地磁场的起源与保持的基本原因，看来只不过是（1）地球的自转，从实用的观点上说，它是轴对称的，以及（2）除了旋转效应之外，看来地核中的各种运动、温度梯度及有关效应都是球形对称的。如果地磁场以始终如一的方式偏离地球自转轴，那么，这种地磁场的对称，就会低于可归因于由已知起作用的原因的联合所造成的地磁场的对称。这种情况，可能还需要存在一些其它的（目前尚无所知）、能引起低对称的原因。由于不存在偶极场始终如一的倾斜，因此，这种引起较低对称的原因是不存在的。从而，有理由假设，地磁轴是被迫才与作为对称轴的地球自转轴保持相当小的角度的。还不清楚这一约束性条件的原因，但所观察到的证据都支持其存在，而且成功的假说，都必须体现出它的起源与结果。

对地磁场的起源、演化与现今性状的假说，都必须包括下列各点：

- a. 对地球自转轴与地磁场长期密切伴生的解释。
- b. 二轴间的瞬变原因。
- c. 有关在几十亿年的长时期里，产生并维持这些严格制约关系的、适当驱动机制的

几何学-力学性质。

## 地球磁场的偶极性质

地球磁场可以分解为偶极组分与非偶极组分。非偶极组分反映出典型的深位组分的特征，不过对其确切的性质尚无所知（例如，参见Morner, 1976; Courtillot and Le Mouél, 1976）。地磁场的球谐分析，不能产生可证明与地磁场非偶极特征相同一的各个谐和条件。各自独立的分析都暗示，地磁场可能组成于多重深位偶极（例如，参见Bullard, 1956）。

很难用数量表明多重偶极。大多数的分析认为，八个非中心放射的偶极，可以合理地体现出全球规模的地磁场，它们的位置约在距地心四分之一地球半径处，或可能还要远一些（例如，参见Lowes and Runcorn, 1951; Alldredge and Hurwitz, 1964）。

海德与马尔林发现，在地磁场非偶极组分与地球体态间，存在一密切但有瞬时偏离的相互关系（Hide and Malin, 1970），暗示这两个构造圈参数，是由同一的全球、深位、长期存在的机制激发的。

在过去二百万年间，地球的偶极场非常接近于大地中心轴的偶极。如今此地磁偶极的北方形迹位于北纬 $89^\circ$ ，东经 $211^\circ$ （例如，参见Cox and Opdyke, 1971），或大致距大地中心轴的偶极北方形迹1200公里。对地磁偶极南方形迹的非对称位置，有较比深入的分析（Tatsch, 1977d）。

## 地磁场的古地磁平稳区域

在大西洋两侧（即，欧非大陆及南北美洲）以及世界上其它部分，所发现的古地磁“平稳”区域，其峰-谷值的变动幅度都小于50伽马（例如，参见Pitman, 1971; Heirtzler and Vogt, 1971）。对这些“平稳”带，已提出了各式各样的形成原因：

- a. 在持续很长的时期中，没有地磁极性倒转。
- b. 在古地磁盖印时期中，平稳带的低纬度位置。
- c. 缺乏高度磁化的枕状玄武岩、或缺乏存在于假设发生地磁倒转事件时期中的其它物质。

在全球各个部分所观察到的平稳带并不一定是同期的，这一事实支持后一种起因（即上述c项）。其它起因则为别的资料所支持，这就说明，几种起作用的原因的联合，乃是地磁平稳带的真正起因（Tatsch, 1977d）。

## 地球磁场的年龄

还没有对地磁年龄进行定量测定的直接资料。可以得到的资料既不能证明、也不能否认地球磁场的年龄和地球的一样老。

为了满足地磁场在显示出剩磁的最古老岩石侵位以前就已存在的假说，布莱克威尔（Blackwell, 1971）设想，地球增生过程约在不晚于40亿年前就已完成。但是，并不必须假设确有这一时间限制，因为地球磁场有可能在增生过程实际完成之前就已存在了。在构造圈式地球模式（第三章）中，地球原体的五个“地球的”八分体增生到原始地球上的增生作用，并不必定要完成在地磁场存在之前。如今月球上存在的剩磁（第二章），支持

原始地球与地球原体约在46亿年前就已有了磁场，即约比布莱克威尔所设想的年代早6亿年 (Tatsch, 1977d)。

## 地球磁场的强度变化

地磁场的强度，变化很大，它可在相当短的几千年的地质时期内变化100% (例如，参见Kitazawa, 1970)。这些短时间的快速变化大体呈旋迴性 (但非周期性)，说明它们是由几种原因的组合激发的。这些原因可能与许多几何学、力学、热力学及化学的参数相关，例如，地幔的非均一性、地球内部构造岩浆活动的性状以及地球主要驱动机制的性质等。目前对这些参数中的任一参数，还不能完全做出定论。从而无法对地球磁场变化的原因，进行详细分析 (例如，参见McElhinny and Evans, 1976; Tatsch, 1977d)。

## 地球磁场的驱动机制

地球的现代偶极动量正约以每年1/2,000变化着，表明时间常数约为2000年，由此可知，地磁场不会只是原始地球的一种衰减残迹，而必定是不断地受到某种方式的激发。这种激发作用的性质是什么？以及在过去46亿年间，它又是怎样被保持下来的？

布拉德 (Bullard, 1949) 的结论认为，如果地球自转能为地磁发动机的驱动机制提供能量，则此激发作用就不存在什么问题了。他设想，由于地核可能是椭球状而不是真正的圆球状，它就不能准确地随同地幔旋进，结果所产生的内部运动，就适宜于驱动地磁发动机。但是，这种结果是可疑的，因为看来地磁流是起源于热-电，而不是单纯起源于热力。况且，在几万年的时期内占主导地位的偶极场及其轴的特征，都暗示地球自转 (或其它的轴对称特征) 起着控制作用。由此所得出的结论是，地磁发动机的激发力，可能是几种起作用的因素的线性结合，其形式是  $aA + bB + \dots + jJ$ ，其中  $a + b + \dots + j = 1$ ，而 A、B、……J，则是来自联合起来以发动地磁场的几种因素的作用 (Tatsch, 1977d)。

一如为热电发动机中所要求的，下地幔的导电性可能产生了硅酸盐在升温下的半传导特性，有如可望见于优先热流的壳层、平面和表面中的那样 (第六章; Courtillot and Le Mouel, 1976)。从以上的分析，可以得出下列初步结论：

a. 曾在过去46亿年间产生出地球内部性状的全球性原因机制，也已演化出并迄今仍在驱动着地磁发动机 (Tatsch, 1977d)。

b. 与过去一样，当前的地磁场仍与地球内部驱动机制的全球性特征相关。

c. 可以根据地球内部驱动机制的几何学与力学，来解释极性倒转的旋迴性但非周期性的性质。

## 地磁的极性倒转

现已了解，至少在过去450万年间，就已多次发生地磁极性倒转。没有理由怀疑，极性倒转现象，自开始有地球以来就一直在不断地发生着。用“闭式”形式，对一次倒转所做的几何学-力学解释，可用以对据信业已存在46亿年的期间中，所可能出现的任何数目的倒转做出解释。但是，甚至对一次这样的倒转的合理解释都未找到 (例如，参见Naidu, 1974, 1975; Tacier等, 1975; Hillhouse and Cox, 1976)。

在根据倒转过程所最可能具有的时、空特征，来分析适用的观察资料时，就可看出这

一例转过程的复杂性。在进行这种分析时，可将倒转过程的主要空间特征总结如下：

- a. 在磁化岩石的总数中，具正极性与具反极性的大致各占一半。
- b. 每次倒转都是一单独完全的 $180^\circ$ 转变，而不是其总数达到 $180^\circ$ 的陆续增值。
- c. 所有影响地磁场的基本因素似乎都是轴对称，而没有极对称，即，在相反的轴向间没有区别，南极性与北极性是同样可能的。
- d. 见于不同大陆上以及单一大陆上的不同岩石中的极性倒转，都存在明显的对比关系。
- e. 几乎在所有场合下，受到后来侵位的岩浆岩接触烘烤的沉积岩，都获得同一于此种岩浆岩极性的热剩磁。
- f. 在快速的熔岩流层序及深海沉积物中，都发生有倒转过程。

以同一方式，可将极性倒转过程的主要时间特征概括如下：

- a. 极性倒转看来曾经以旋迴性但非周期性的方式发生过，平均说来，每次倒转为200,000年；或，如果自地球开始以来，它们一直都以这一平均速度发生的话，那么，这种倒转就几近发生了23,000次。
- b. 每次倒转过程大约持续5000年，或约占此平均旋迴的1.5%。
- c. 在倒转过程中，全球磁场强度的大小为4或5的因数所缩减，这表明在实际的倒转过程中，非偶极场以及所可能存在的偶极场的赤道分量，仍继续起作用。
- d. 在某些延续很长的纪里，如二叠纪，地磁场显然或是有一个恒定的极性，或是有过无数次倒转，但都太短而不能觉察出来。
- e. 看来在快速极移时期及（或）大陆漂移时期，也频繁发生过倒转，从而暗示，或是地幔构造可能已直接影响到对地磁场起作用的地核活动（Irving, 1966）；或是这一控制着地核活动的机制，也同样控制着极移与大陆漂移（第十七章）。

尽管不能证实磁极倒转曾在过去450万年前就已发生过，然而存在足够的证据可作为对地磁极性倒转的近似或易处理的几何学-力学解的基础。在本章的最后一节里，将讨论这一解答，在那里将依照构造圈式地球模式的几何学-力学格架，对极性倒转做出解释。

### 极性倒转的随机模式

由于还没有以严谨的形式解决有关行星的水磁发动机问题，所以为此复杂且似乎是难以处理的地磁极性倒转问题，提出了许多随机模式。

这些模式中的大部分，都可归为两类：（1）宿命论的双盘发动机（Rikitake, 1958; Allan, 1962; Mathews and Gardner, 1963）；以及（2）统计的模式（Cox, 1968, 1969, 1970; Parker, 1969; Nagata, 1969）。

其它有关在地磁极性倒转旋迴中的地球构造圈性状的分析，可参见：科克斯与奥普代克（Cox and Opdyke, 1971）、克里尔与伊斯皮尔（Creer and Ispir, 1970）、菲希尔等（Fisher et al, 1975）、海尔茨勒与沃格特（Heirtzler and Vogt, 1971）、伊脱与富勒（Ito and Fuller, 1970）、约翰逊（Johnson, 1975）、麦克埃尔欣尼（McElhinny, 1971）、以及沃特金斯（Watkins, 1968）。

## 用构造圈式地球模式来解释地磁与极性倒转

根据构造圈式地球模式，可以证明地磁与极性倒转，同一于下构造圈破裂体系及与之相伴的热力及构造活动 (Tatsch, 1977d)。地球磁场的起源、演化及保持，取决于热力及可能还有挥发物，从下构造圈破裂体系穿过构造圈、沿优先热流路线的向外流动。地磁场的迁移及其极性倒转，是由构造圈板块与岩块相对于“固定的”下构造圈破裂体系的迁移激发的。

从而，构造圈式地球模式为发动并维持一地磁发动机在过去46亿年间的长期运转，提供了基本的激发力及稳定的几何学-力学格架。因此，地磁场的起源、演化及稳化，与地球构造圈的演化密切相关；而对构造圈性状的研究，则为分析包括极性倒转在内的地球磁力性状，提供了一种手段。

## 用构造圈式地球模式来解释地球的磁场及板块-岩块的运动

简单板块构造的概念认为，岩石圈的巨大大陆规模的板块而进行运动。任何一个板块对于其它板块的运动，可以根据一个旋转极与一个量级来精确测定，其瞬时值可以于任一时间、自被地形与地震资料所改进过的地磁异常资料计算出来 (例如，参见Morgan, 1968; Le Pichon, 1968)。

在一段持续很长的时期内，这些瞬变值都不是固定的参量。取决于用作下限的最小板块的大小，板块的数目几乎是无限的而且是不断变化的。所以，如果在一段持续很长的时期中来观察地表时，则“极点与量级”的数目同样是无限制的，并会产生一多重漂移基准的体系。这种情况，一如在分析地球构造圈于过去46亿年间的演化时、所必然会出现的情况。

这种不称心的多重运动基准的情况，并不会发生在构造圈式地球模式中，因为所有板块与岩块的位置及运动，都是相对单一、长期、固定的基准来说明的，即，这个基准，就是由三个相互正交的中心平面，穿过下构造圈破裂体系的六个固定点，所建立起来的构造格架 (第六章)。

作为板块与岩块在构造圈内运动的基准的全球“固定”性，已为所观察到的大地表板块如今的“旋转极”，都位于地球旋转极附近的资料所证实 (例如，参见Heirtzler等1968; Heirtzler及Vogt, 1971)。

因为构造圈板块与岩块的运动，其中包括，为简单板块构造概念的极点与旋转所证实的地表岩石圈板块的运动，在构造圈式地球模式里，都是相对地球构造圈的极点来描述的，因而地球磁场的性状及构造圈岩块的运动，都与同一基准有关。地球下构造圈破裂体系的轴这一共同基准，是地球的地球成生特征，据此模式，此特征在过去46亿年间，在几何上是永远不变的 (第六章)。

因此，在构造圈的演化中，下构造圈破裂体系格架的几何不变性，提供了一长期、固定的格架，从而可以在全球规模上，于其中分析地球电场的性状、及研究与之伴生的地磁和极性倒转 (Tatsch, 1977d)。

## 用构造圈式地球模式来解释地球的电场

由于地球深处内部的电的特性，对温度变化极其敏感（例如，参见Lubimova及Feldman, 1970），从而，自全球规模来考虑时，可以设想，地球的电导格局一般与其热力格局相关。因此，就全球规模而论，可以认为，地球的热场是与地球电场的第一级相近似（Tatsch, 1977d）。

构造圈式地球模式，在选择下构造圈的轴作为地球电场的“工作假设”轴时，就使用了这一近似。在实际的地电轴与下构造圈轴之间，存在着空、时幅度差，而涉及像地球构造圈演化的这种数十亿年的漫长时期里，这些幅度差，都是些可以忽略不计的瞬变（同上）。

## 用构造圈式地球模式来解释地球磁场的倒转

根据构造圈式地球模式来分析地球磁场的倒转时，其结果可用示于图14—1中的地球表面上的向量迹三角来代表。

三只箭头（ $OZ_G$ ， $OZ_M$ 及 $OZ_R$ ），代表伴生于地球磁场倒转的磁场向量： $OZ_G$ 代表地球电场； $OZ_M$ 代表地球磁场； $OZ_R$ 代表地球旋转场。O点位于地球中心； $Z_G$ 在阿留申附近

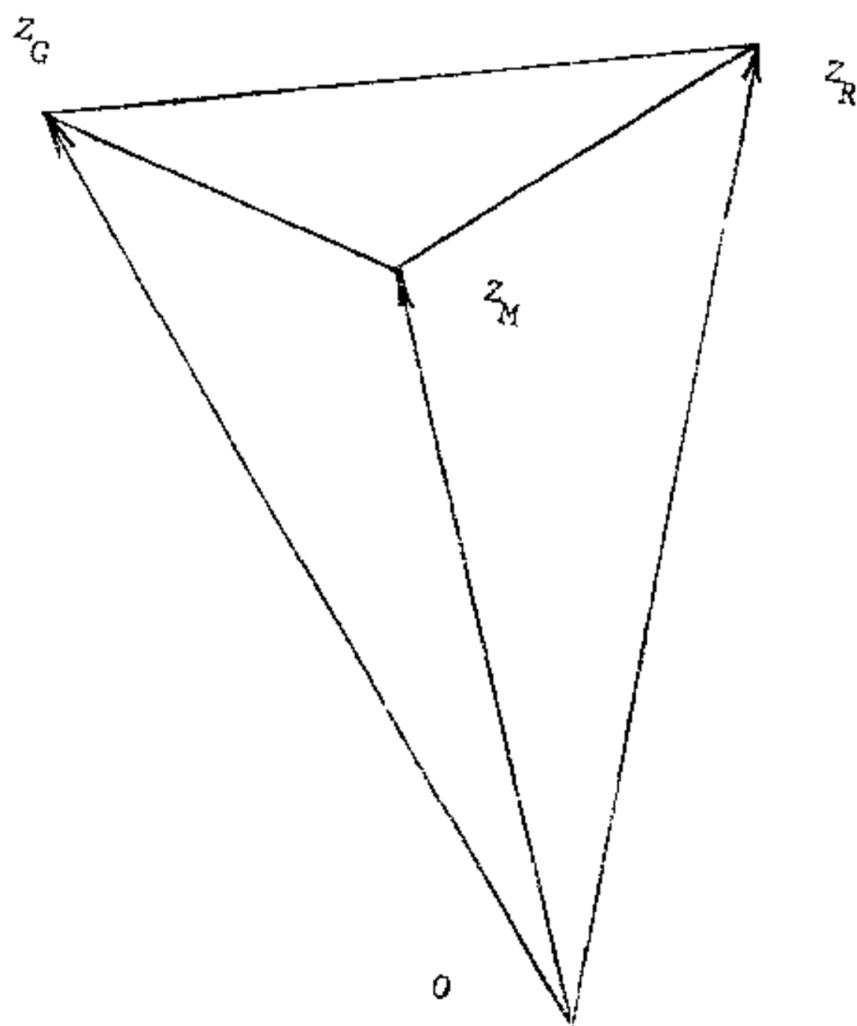


图 14—1 与地磁极性倒转相联系的向量迹三角

（Tatsch, 1964a）； $Z_M$ 是磁北极； $Z_R$ 是自转（或地理）北极。

以 $Z_G$ 表示的地球电场是极其微弱的；而且因为不能直接测量，所以难以在任何大范围内进行分析。但是可以通过研究地球内部性状在几何学、力学、热力学及化学等的某些方面，与电导之间的所观察到的关系，而进行间接测量（Tatsch, 1977d），在此模式中，地球电场与地球构造圈内优先热流的路线相联系（第九章）。

在此模式中，通过发生下列三事件之一，地球磁场的极性都可被倒转：（1）倒转地球自转场的极性；（2）倒转地球电场的极性；（3）倒转图14—1所示向量迹三角的极性。

对此三种可能性进行检验时，可发现前两种的可能性几近于零。也就是说，在过去46亿年间，无论地球的自转方向或地球电场的极性纵然发生过倒转，但总共也没有几次。而且，如果确实有过任何倒转，那么它们也只能发生在地球历史的最早期阶段。

在检验第三种可能性时，可发现在过去46亿年间向量迹三角的极性已被多次倒转。据

此，可以“预言”：（1）在过去46亿年间，地球场的磁性已被多次倒转；及（2）在每次向量迹三角的极性发生倒转时，地球的磁场也发生倒转。示于图14—1中的基本构型中，这种向量迹三角的极性为正性；即，向量迹（ $Z_G$ 、 $Z_M$ 及 $Z_R$ ）在地面上形成逆时针向构型。

但这种构型并不总是正性的，因为所观察到的资料表明，就地球旋转轴相对而言，地球电场与地球磁场二者都是瞬变的。因此， $Z_G$ 与 $Z_M$ 两点都相对 $Z_R$ 而在运动。

在图14—2中，用虚线 $Z_GA$ 及 $Z_MB$ 表示地球电场极与地球磁场极的运动。在 $Z_M$ 每次穿过 $Z_G$ 、 $Z_R$ 线时，向量迹三角的极性都会发生倒转。无论什么时候发生此种情况，则地球磁场的极性也发生倒转（Tatsch, 1977d）。

图14—3表示的是，由 $Z_M$ 穿过 $Z_G$ 、 $Z_R$ 线，而引起的几种可能构型之一。向量迹三角中的向量迹（ $Z_G$ 、 $Z_M$ 及 $Z_R$ ），现在形成一“负性”构型；即，这些向量迹，在地面上形成顺时针向构型。

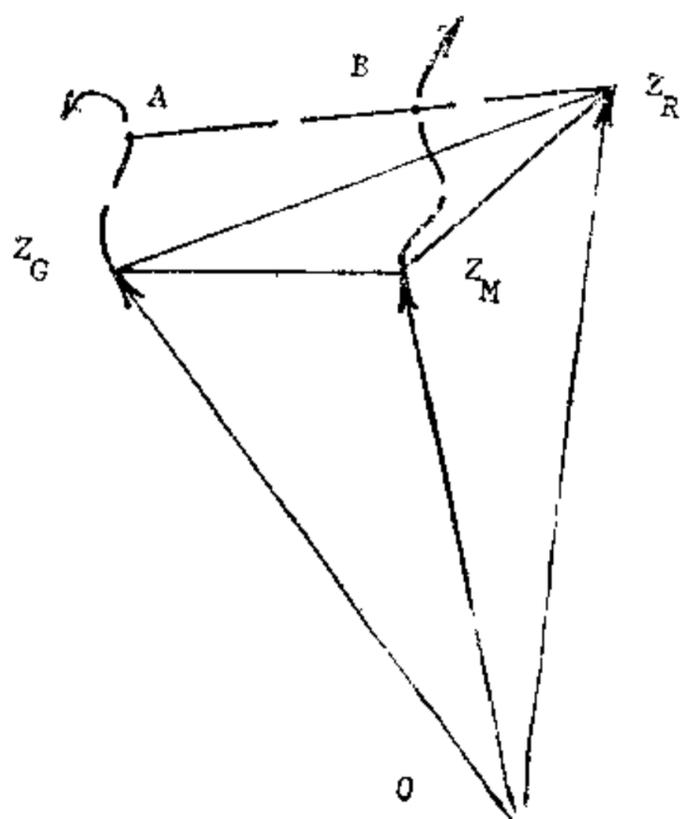


图 14—2 与地球磁场倒转相联系的向量迹三角的动力学性质

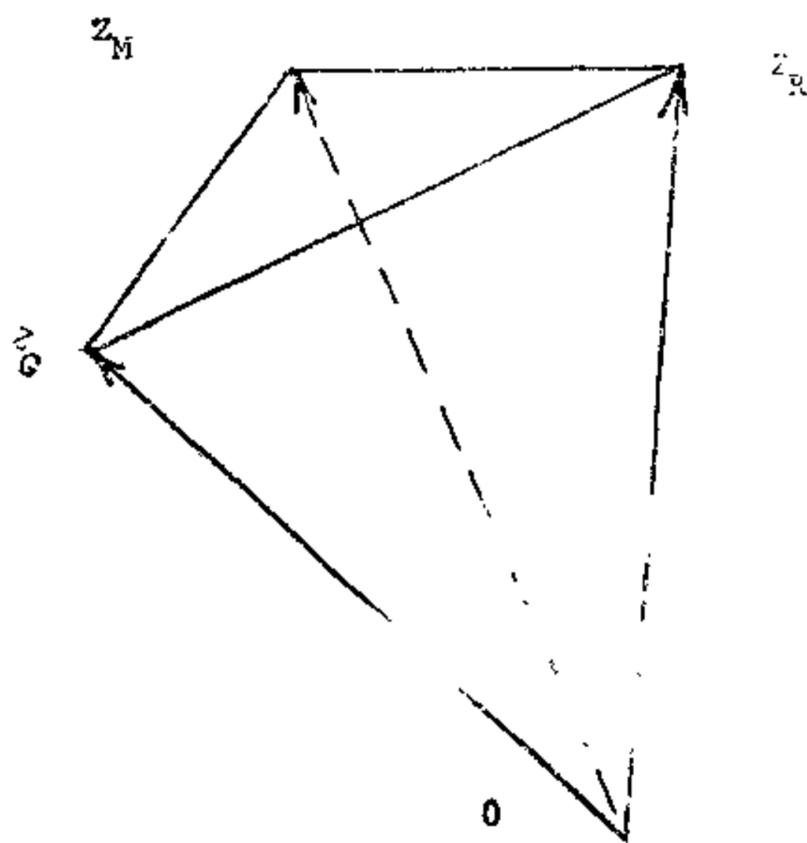


图 14—3 与地磁极性倒转相联系的向量迹三角：极性倒转的情况

从图14—2可以看出，在任一给定的时间里，向量迹三角的极性为正性的或然率约为50%；以及在任一给定时间里，向量迹三角的极性为负性的或然率也约为50%。可将自此模式推导出的其它解释，概括如下：

- a. 在 $Z_G$ 、 $Z_R$ 、 $Z_M$ 角度大时，地球磁场的极性要比在此角度小时“稳定”。
- b. 当此角值接近于零时，地球磁场的极性，可能于短时间内多次倒转，特别是如果 $Z_G$ 与 $Z_R$ 的运动，有相互补偿的趋势时，则 $Z_G$ 与 $Z_M$ 二者会大致与 $Z_R$ 保持为共线。
- c. 地球磁场的年龄，可能与地球本身的相同。
- d. 当长期自全球规模来考虑时，地球的磁场是十分复杂的。
- e. 地球磁场发动机的演化及驱动机制，与过去46亿年间产生出地球内部性状的全球

性起因机制相同。

f. 在磁化岩石的总数中, 具有正常磁性的及具有倒转磁性的约各占一半。

g. 每次极性倒转, 都应是单一、完全的 $180^\circ$ 变化, 而不是陆续地增加到 $180^\circ$ 。

h. 实际地极倒转过程的长短 (即 $Z_M$ 穿过 $Z_G$ 、 $Z_R$ 线所需要的时间), 应短于相继倒转间的平均时间。

# 第十五章 大陆与大洋

最近的研究已证明，在我们所理解的大陆、大洋及将其分隔开的边缘地带内，有“一些巨大的裂口”（Ewing 及 Oliver, 1976）。现在看来大陆与大洋间的边缘，要比过去所设想的复杂得多（例如，参见 Asada 及 Shimamura, 1976; Jahn 等, 1976; Hussung 等, 1976; Rodriguez 等, 1976）。某些涉及大洋盆的观察资料，甚至就更加难以理解（例如，参见 Blakely, 1976; Cooper 等, 1976; Erlandson 等, 1976; Ewing 及 Oliver, 1976; Hargraves, 1976; Lowman, 1976; MacDonald, 1976; Ringwood, 1976; Sutton 等, 1976; Uyeda, 1976; 以及 Winterer, 1976）。

尽管我们对这些裂口有所了解，但在地球构造圈演化的分析中，还必须研究：大陆与大洋的起源、演化及现今性状，其相似性与差异性，以及在过去46亿年间的不同时期里，促使大陆与大洋作水平及垂向运动的驱动机制的性质。

对于地球表面上的大部分地区，其中包括欧亚大陆、南极洲以及南纬 40° 以南的海域（占有地球表面的1/3）的研究，还很不充分，从而难以对过去46亿年间的海-陆全貌做出正确的综合性分析。但根据所占不到地球表面一半的地区里的研究资料，还是可以做出初步结论的。

已在第七章里，讨论过各个大陆于过去46亿年间的演化。对各个洋盆的比较短期的性状，将在第十六章中加以研究；对各个大陆的水平运动，将在第十七章中讨论。本章仅对大洋与大陆于过去46亿年间的不断演变的全貌，作一全球性的分析。

## 大洋盆地

在分析大洋与大陆于过去46亿年间的相互关系时，需要特别注意两个因素：（1）这些大洋与大陆，在年龄方面的大小级序差异；以及（2）每一洋盆之内所固有的表面不均一性。大洋与大陆在年龄方面的差异，将在另一章中去研究。下面仅就大洋表面的不均一性，进行一些讨论。

可把每个洋底描述为在年轻的玄武岩质表面之上，点缀了一花岗岩质残体，例如一些岛屿及相关的特征。大西洋洋底的情况就是如此，它基本上相当于玄武岩层的顶面，但被许多片的花岗岩岛屿及海岭所断开。印度洋的西半部，在物理特征上类似与大西洋洋底相似，基本上也是一玄武岩质表面，含有大到像马达加斯加、小到有如生长在岩层上的珊瑚岛的花岗岩质残体，再加上一些花岗岩的水下海岭。类似地还有西太平洋，其大部份为玄武质岩石所铺平的底板，在马里亚纳岛弧与亚洲大陆之间，以及在新西兰与波利尼西亚地区之间，也点缀着花岗岩质岛屿及其它特征。

## 太平洋盆地

约有93%的海洋区域以及约有65%的地球表面，都被四个大洋盆地所覆盖，它们是：太平洋盆地、大西洋盆地、印度洋盆地及北冰洋盆地。其中最大的太平洋，可以根据安山

岩线来最好地定出界限。安山岩线大致是一条环绕整个太平洋复合体而延伸的路线，长约50,000公里，并把真正的大洋区（深的与玄武岩质的）与准大陆性的大洋区（浅的与安山岩质的）分离开来。这条安山岩线大致围绕了3/8的地球表面，在印度尼西亚及汤加-克马德克地区，出现90°的急转弯，但在南太平洋中的界线，却不清楚。

如图12-3中的安山岩线所示，平行于并接近于南、北美洲的西海岸而延伸；然后伸向阿留申群岛、堪察加半岛、千岛群岛、日本、马里亚纳群岛、新几内亚、斐济等的向洋侧；再经埃利斯岛（深太平洋内侧的一个玄武岩岛）的向陆侧；在汤加与库克群岛之间向南延伸；再后伸向新西兰的向洋侧；最后，再向南方延伸，而在南方大洋地区中的某一待定点上，与南美洲那支安山岩线相会合。

关于这条安山岩线的起源、演化及现今地理轮廓，尚无令人满意的解释。在本章后面的段落里，当讨论到大洋盆地的演化时，将根据构造圈式地球模式，来探讨几种可能性。

如果太平洋在过去2亿年间就已在演化，那么，它在赤道处的平均生长速度为10厘米/年。对于创造出太平洋的几何学-力学过程，几乎一无所知（例如，参见 Sutton等，1976）。在一些有关的假说里，认为太平洋是一个称为原始大洋（Panthalassa）的大盆地的残余（例如，参见 Carey, 1958; Rodolfo, 1971）；在其它的假说里，则认为太平洋系由一较小的古老盆地演化而成（第十六章）。大多数假说都不讨论太平洋地区在地球存在以来的、前95%的时期里的演化。虽说大部份大洋盆地的生长，看来在25亿年以前就已发生（Lowman, 1976），但在文献中，几乎不曾注意到太平洋在前寒武纪期间的性状。

在东、西太平洋盆地之间，于过去已存在一条或多条的去耦带（例如，参见 Hammond等，1974）。在有关太平洋演化的几种可能性与假说中，就包括以5厘米/年的圆周速度，作大约80°的后中生代逆时针向旋转。卡韦等（Kawai等，1969）发现约自1.2亿年以来，本洲岛受到一近似于此角度的弯折。在此之前，日本未被弯曲，暗示只是本洲的北部，参与了所说太平洋的旋转。看来其它的许多太平洋岛链，自中生代以来，都承受了近似于此角度的旋转（Tatsch, 1977d）。

详细的研究表明，一些与太平洋中板块运动的运动学相伴生的构造，似乎是“有点偶然”（例如，参见 Winterer, 1976）。简单地说，“某些地磁学者或沉积学者、或是他们二者的某些设想，都是错误的”（同上）。大多数学者现在都认为，大洋盆地的历史是可以根据简单板块构造概念来解释的（第十八章）。但并非所有的观测资料，都支持这种认识大洋盆地的起源、演化及现今特征的简单方法的（例如，参见 Sutton等，1976）。

## 大西洋盆地

大西洋可能是作为两个截然不同的实体而演化的，此二实体沿着扩展特提斯的加拉帕戈斯-直布罗陀弧而分隔开来。北大西洋可能是从一个浅海环境而沉降到深海的深度的，且受到强烈的海底侵蚀。拉布拉多、格陵兰、冰岛、罗卡尔海底高原、不列颠群岛，以及西班牙勾划出这些北大西洋的、几近隔绝部份的轮廓；而大西洋中脊，则平分开拉布拉多海与比斯开湾。

大西洋东岸显然比西岸年轻，暗示如今的大西洋，是从一原始大西洋盆地演变而来。来自南美洲深海边缘的最古老沉积物（晚侏罗世）、其如今的深度，比其所说在原始大西洋中沉积时的深度深3—4公里（例如，参见 Fox等，1970）。

在东大西洋沉积物中的6千万年的时间间断，暗示大西洋盆地的演化方式，比简单海底扩张的（第十六章）要复杂些，特别是自从其时代相当于沿特提斯带向东，即欧洲阿尔卑斯及非洲阿特拉斯的造山运动的时代的沉积物“缺失”以来，情况尤为复杂。

大西洋盆地演化的复杂性，也可为其它作者的分析所证实，其中包括：马克斯威尔等 (Maxwell et al., 1970)、阿农 (Anon, 1971b)、麦克多加尔 (Macdougall, 1971)、吉布桑与托韦 (Gibson and Towe, 1971)、尼德汉 (Needham, 1976)、爱尔兰德桑等 (Erlandson et al., 1970)、尤丘皮 (Uchupi, 1976) 以及德拉霍夫扎尔 (Drahovzal, 1976) 等的分析。

## 印度洋盆地

印度洋盆地，显然是通过持续达1亿年以上的复杂事件序列而形成的（例如，参见 Le Pichon, 1968; Le Pichon and Heirtzler, 1968; Vinogradov and Udintsev, 1975; 以及 McElhinny, 1970）。

在印度大陆周围的侵入与喷出活动中（例如印度的大量德干岩流），可以看到这种复杂演变的一个例子，它在时间上与印度洋的启开相关。有关印度洋演化的其它复杂情况，将在第十七章里讨论。

## 北冰洋盆地

与其它大洋盆地一样，北冰洋的演变方式也极其复杂。北冰洋盆地的演变，至少有两种可供选择的可能性：

- a. 此盆地可能是地壳上的一个固定的或古老的构造，其年代为早古生代或晚寒武纪。
- b. 它可以是一较年轻的中-新生代构造，是由大陆壳的沉陷或由大陆地块的谷裂作用或漂移形成的。

这两种假说，都不能完全解释所有见于北冰洋盆地中的复杂情况（例如，参见 Pitcher, 1973; Cooper 等, 1976）。

## 边缘海盆地的起源

大洋-大陆边界的一个难解之谜，涉及岛弧复合体“后边”的边缘海盆地。对这些独特构造的起源、演化及现今特征，至少已提出过四种机制：

- a. 它们可能是通过岛弧的形成作用，使大洋地壳“封闭”而造成的（例如，参见 Winterer, 1976）。
- b. 它们可能是由于同岛弧自大陆的“漂移”相联系的扩张启开作用造成的（例如，参见 Sleep and Toksoz, 1971）。
- c. 它们可能代表起因于大洋化的地壳沉陷 (Belousov, 1962, 1968, 1969, 1970, 1976)。
- d. 它们可能是活动地震构造岩浆带的遗迹（第六章）。

## 加勒比海盆地

加勒比海盆地，与任何一个关于大洋盆地的起源与演化的假说都不相符合（例如，参

见Van der Voo等, 1976)。从地质学上说, 加勒比海的构造, 部份是海洋的、部份是大陆的, 即, 加勒比海下面的地壳, 比正常的洋壳要厚一些, 在贝阿塔海岭及尼加拉瓜海岭以下的地壳, 厚度超过正常洋壳的两倍。已在阿韦斯海岭发现花岗质物质。这些发现以及其它观察资料暗示, 加勒比海可能是一沉陷了的大陆区。然而为美洲及欧亚大陆所重建的“前漂移拟合”, 对于南、北美洲之间的前漂移大陆块, 也提不出什么新的补充(第十七章)。

### 特提斯带内的小盆地

特提斯带内的突出盆地有: 马德拉盆地、地中海、黑海、红海、里海、波斯湾、阿曼湾、孟加拉湾、暹罗湾与印度尼西亚诸海。特提斯带的其它构造及其自然地理状况, 几乎完全被在阿尔卑斯地震构造岩浆活动事件中消灭、并重新铸造过, 但是, 前新生代的再造作用暗示, 这一古-中生代的欧亚带, 形成一几近13,000公里长的巨大圆弧, 其中包括一古老的原始加勒比海、以及这一自直布罗陀海峡而穿过东印度群岛的基本欧亚特提斯弧(例如, 参见Challinor, 1964; Fuster, 1968; Fuster等, 1968; Bosshard and MacFarlane, 1970; Anon, 1971c; Tatsch, 1977d)。

根据构造圈式地球模式, 可以证明一“扩张”的特提斯带与一40,000公里的带相同一, 这个带形成了从两个方向上来扩展基本欧亚特提斯带, 以形成一个环球带, 其位置大约位于下构造圈破裂体系“赤道”的辐射上方约1000公里的地带处(第六章)。

与基本欧亚特提斯带一样, 扩张的特提斯带也包括许多大体上是封闭的海; 它们是: 墨西哥湾、加勒比海、一些欧亚特提斯盆地、一些东印度盆地以及加拉帕戈斯盆地。这一“地中”带或扩展特提斯带, 把地球的北大陆与南大陆分隔开来, 也即, 使非洲与欧洲、澳洲与亚洲、南太平洋岛屿与北太平洋岛屿、以及南美洲与北美洲分隔开来(Tatsch, 1977d)。

构造圈式地球模式的基本驱动机制, 为产生所设特提斯扭曲提供了最可能的起因机制(第四章); 即, 在地球不断地试图平衡其大地成因上的不平衡形态时, 便沿着一个穿过了全球延伸达40,000公里的巨大圆形特提斯带的中心平面, 而彼此相对扭动其北半部与南半部构造圈(Tatsch, 1977d)。

### 地中海

约在1200万年以前的上新世早期, 地中海显然开始起有大雨塘的作用, 当它与大西洋的出入口反复地开闭时, 它也交替地出现充水与蒸发。此过程约终止于550万年前。从那以后, 地中海就已在地质上保持稳定。

### 黑海与里海

黑海与里海位于地中海的东边, 它们与地中海的演变程序密切相关。黑海约在10,000年的时期里, 才从地中海分离出来, 并作为最近一次全球范围海平面降低的结果, 而约在20,000年前才开始分离的。在这段时间的后期, 冰川溶化增多, 有充足的淡水流入黑海, 使之成为淡水湖。约在10,000年前, 黑海通过博斯普鲁斯海峡, 而重新与地中海相连接, 再次把黑海变为咸洋盆(例如, 参见Ross等, 1970)。

里海相似于黑海，只是在其向西延伸到黑海与地中海之前，它早就开始发生强烈沉陷并有沉积物的堆积。里海已开始进入的形成有褶皱、泥火山以及底辟构造为特征的下一个构造发展阶段（例如，参见 Neprochnov 等，1970）。

## 红海

红海是一个与特提斯带相伴生的新生洋盆，在过去几百万年间，它一直以 1 到 1.5 厘米/年的速度加宽着。对此盆地演化的细节，已为许多学者研究过，现只举出其中的几个，如理查德桑与哈里桑 (Richardson and Harrison, 1976)、菲利普斯等 (Phillips et al., 1969)、吉尔德勒 (Girdler, 1970) 等。在吉尔德勒的模式中，红海与亚丁湾是在阿拉伯向北移动时形成的，阿拉伯的北移形成了土耳其与伊朗的地震活动山脉，并在其尾迹中留下这两个盆地。有些观察资料 (Richardson and Harrison, 1976) 说明，红海形成于一次地震构造岩浆活动事件的两次不同时间的相（第六章）。

## 小洋盆演化的一般模式

可以用  $aA + bB + C$  的形式，来表示大多数用于小洋盆形成作用的假说。式中  $A$  代表垂直运动，如沉陷或下落，它们是由向下作用的不平衡力向量激发的； $B$  代表水平运动，包括直移与旋转，其中任何一个都可接近于零； $C$  代表局部环境的制约；而  $a$  及  $b$  是常数，若  $a + b = 1$ ，则它们二者中的哪一个，都可以是零。

对于大部包括在水平方向上作用的不平衡力向量的假说（即上述等式中的  $a \neq 0$ ），已由齐德维尔德 (Zijderveld 等，1970) 及沃格特 (Vogt 等，1971) 论述过。对于大部包括在垂方向上作用的不平衡力向量的假说（即上述等式  $b \neq 0$ ），已由范贝麦伦 (Van Bemmelen, 1969) 论述过。

一如所料，世界各地的深钻记录，都支持  $a$  与  $b$  的值是变化于 0 与 1 之间的。 $a \neq 1$ （及  $b \neq 0$ ）的值，适用于紧邻撒丁岛以西的地区。 $b \neq 1$ （及  $a \neq 0$ ）的值，适用于阿尔沃兰海。 $a \neq 1/2$ （及  $b \neq 1/2$ ）的值，适用于地中海的其它部分。在加勒比海及其它复合小海盆内的钻井记录，表明  $a$  与  $b$  有类似的变化，也是从 0 到 1。

在某些小盆地区域中的钻探结果，还留有可疑的问题，而且在可为地球表面上的每一小盆地指定  $a$  与  $b$  的数值之前，还需要有更多的资料。对古盆地的  $a$  及  $b$  值，甚至更加不清楚。

其它有关内陆海与大洋周边沉陷的形成作用方面的问题，都已由别洛乌索夫 (Belousov, 1969) 及范贝麦伦 (Van Bemmelen, 1969) 讨论过。

## 大洋相对于大陆的对踵排列

90% 以上的大陆的位置，都与大洋区成对踵关系。欧亚大陆的大部，其背面是南太平洋；南极大陆的背面，是北冰洋；北美洲的背面，是印度洋；非洲的背而是太平洋。虽说对这种对踵排列已知道了几百年，但还不太了解。不过已提出过几种推测：

a. 大陆与大洋都在全球规模上受到均衡补偿。“较重的大洋区”通过活塞状的作用，迫使“较轻的”对踵大陆上升，并具有在全球液压静力体系中起着储集所作用的“流体的”地核（例如，参见 Tatsch, 1964, 1966a, 1966b, 1977d）。

b. 地球正逐渐演变成为一个以边棱为大陆、以平坦面为海洋的四面体形体（例如，参见 Clayton, 1967, 在59页中有示意图）。

c. 现今的海陆格局，代表 *a* 与 *b* 的组合 (Tatsch, 1977d)。

克莱顿 (Clayton) 关于四面体状地球的概念，与四面体是一收缩行星于晚期所采取的形态这一事实相关 (Tombaugh, 1963)。

## 大洋-大陆界面的类型

对见于大洋-大陆界面中的相似性与差异性的解释，仍是令人迷惑不解的。因为大陆与大洋并非固定的构造（第十六章及第十七章），它们之间的界面，也必然是在不断地变化着的，因此，应当存在许多类型的、反映着大洋-大陆全貌的、不停变化的大洋-大陆界面。然而，所有的界面，实际上都可归入于两种不同的、有明显差别的类型，这表明有一个单一的全球性机制在起作用，使正好把所有的边是截然划分为两种基本类型。

对存在于两类基本大洋-大陆界面间的鲜明对比性，已知道多年了，通常表这它们的术语是“大西洋型”边缘及“太平洋型”边缘（例如，参见 Belousov, 1969; Conolly, 1969, 1970; Emery 等, 1970; Karig, 1971; Kosminskaya 及 Zverev, 1968, 1970; Mitchell 及 Reading, 1969）。

**大西洋型边缘**，在向陆侧具有稳定而未变形的岩块，也不见后古生代活动的证据。由大洋到大陆的地壳厚度变化颇为突然，在某些地方可以深海沉积为特征。在正常情况下，大西洋型边缘都没有深的深海槽，然而，在与大陆隆起相伴生的沉积物下，可以发现深海槽状的构造。在许多场合下，古生代及更早期的构造，都为大陆边缘所截断。

在另一方面，太平洋型边缘具有与大洋-大陆界面相平行的年轻的构造带。浅源地震，极其普遍 (Tatsch, 1977a)，中深及深源地震也很多，在沿太平洋型边缘的某些块段中，情况尤其如此。有许多深海槽都沿着这些边缘地带而分布。大洋-大陆的过渡情况，比大西洋型的更加多变，且沉积堆积物似乎也没有那么巨大。

从全球规模来进行分析时，看来大西洋型与太平洋型边缘的基本区别，乃是其位置相对活动地槽而言的函数（第十二章）。详细研究揭示出，大洋-大陆边缘的类型，乃是地下构造圈性状的函数 (Tatsch, 1977d)。

根据构造圈式地球模式，太平洋型边缘与现代活动楔形带相关系（第六章）；所有其它的边缘，都是大西洋型的。这样，与一个现代活动楔形带相接近的南、北美洲的西海岸，欧亚大陆的东海岸，澳洲的北海岸等，都是太平洋型边缘的实例 (Tatsch, 1977d)。

## 准大陆的大洋区及准大洋的大陆区

大洋在许多方面都与大陆相象。举例来说，从存在于大陆区基底中的断裂分布与洋底的破裂格局之间的相似性，就可看到这种情况（例如，参见 Kutina, 1976）。按照推测，年轻的大洋，是在大陆板块移离岩浆活动的深位线时，而在古老的基底上形成的。从而，通过长期、深位的基底破裂格局并于而后的再活动及向上地传播，基底的破裂格局就成为被铭刻在较年轻大洋板块上的印痕 (Tatsch, 1977d)。

大洋区内地震构造岩浆活动带活动的许多显示，都与大陆区的相似。这些显示所包括的不仅有地表显示、也有地下显示。所看到的具有这种性质的地表实体有，像深海测得的隆起；

在地下的则有，像在上述隆起之下的构造根。正像所预期的，这些构造根的密度，都介于洋壳物质与陆壳物质之间（例如，参见 Kelleher 及 McCann, 1976）。在欧里皮克—新几内亚海隆可以看到这种例子，那里的地下残迹约延伸有20公里；在九州以南的菲律宾海西部（16公里）；南部澳大利亚西方的布罗肯海岭（20公里）；翁通—瓜哇高原（30公里）；以及其它（例如，参见 Bentley, 1974；Bott 等, 1971；Grow 及 Bowin, 1975；Kienle, 1971；Kroenke, 1972；Shor 等, 1971；Solomon 及 Biehler, 1969；Sutton 等, 1971）。在世界上的所有大洋盆地中，都见有类似的残迹（Tatsch, 1977d）。

有些大洋区，看来是“大陆性的”。举例来说，翁通—瓜哇高原，看来仍是一个“从大陆断开的块段”（例如，参见 Furumoto 等, 1976）。但是关于此大陆的碎屑或块段的起源，还存在问题。简单板块构造概念认为，新几内亚与所罗门群岛区，是澳大利亚板块与太平洋板块碰撞的前线。约翰桑与莫尔纳（Johnson 及 Molnar, 1972）已提出，太平洋板块包括此高原以及所罗门群岛的北段也是一样。鉴于所得到的比较新的观察资料，看来这种设想是“不完全能站得住脚的”（例如，参见 Furumoto 等, 1976）。在所罗门群岛之下的地壳厚度，只约有15公里（Furumoto 等, 1970），但在高原之下，地壳的平均厚度，却是此数值的两倍（从南部的25公里，到北部的42公里）。况且，看来在所罗门群岛与此高原之下，存在着一个相当明显的深海槽（例如，参见 Woollard 等, 1967）。根据构造圈式地球模式的概念，翁通—瓜哇高原，是新生代孟加拉—克马德克地震构造岩浆带的一部份。在这方面有意义的是，在此高原上所测得的海平异常，实际上只约为15毫伽（MGal），显然与理论上所计算出的约为-200毫伽的数值，有所不同（例如，参见 Furumoto 等, 1976）。此外，看来在此高原的北部而不是在其南部，存在着一个高速（7.6公里/秒）的基底地壳层。

### 活动大洋区内的物质转移

为了工作上的目的，通常多根据三种过程，来研究玄武质洋壳与外成洋盆间的物质转移（例如，参见 Wolery 及 Sleep, 1976）：

- a. 低温风化作用包括在大约低于20℃时，于流体与岩石间所发生的反应。
- b. 火山喷发作用涉及海水与地震构造岩浆带活动相伴生的、冷却岩浆体之间的、高温、较短暂的物质转移。
- c. 大规模的热液活动是长期性的物质转移，与b相似，不过它的热力是得自地震构造岩浆带的深部，而不是简单地得自正在冷却中的火山物质本身。

详细的研究证明，这些过程构成一个连续的统一体，而且它们全部都与相伴生的地震构造岩浆带活动相关（Tatsch, 1977d）。

## 第十六章 海底扩张

简单海底扩张概念，已相当成功地解释了应用于过去几亿年间地球大洋盆的起源与演化的体系看来是合理的。但此简单概念，并未包括一个适当地驱动机制的几何学、力学、热力学及化学等方面的细节。这种缺陷说明，能用简单海底扩张概念来解释的现象，只不过是一较大体系中的一部份，这一较大体系的驱动机制，不在简单海底扩张概念所包括的较浅(几十公里)、及较短暂(几亿年)的空-时格架的范围之内(例如，参见Tatsch, 1969)。

本书的主题之一，就是要用那些包括在构造圈式地球模式中的概念(第三章)，来描述这一较大、较长期及较深位的体系。这种情况正是在简单海底扩张概念提出之后，所立即可以预见到的情况(例如，参见Tatsch, 1969)。

本章研究对简单海底扩张概念的某些“支持与反对”的意见，并研究对较大、较长期与较深位、作为解释地球上大洋盆地的起源、演化及现今特征的代表性工作假说，即构造圈式地球模式理论的“支持与反对”的意见。

### 海底扩张假说

根据现代流行的概念，地表是由若干彼此相对运动的坚硬板块组成的。介于这些地表板块之间的界面构成了地球上最强烈的地震、造山运动与构造活动的地区。沿着那些彼此正在分离着的界面，发生喷出作用，并被称为“海底扩张”。这些喷出物形成新洋壳的海岭。在板块之间发生有横向运动的场合，就将这些界面称为“转换断层”。根据简单海底扩张概念，深海槽、岛弧体系以及(或)山链都是沿着那些处于压缩下的界面形成的。

无须在此分析对简单海底扩张概念的这些及其它的假说进行研究，在文献中已对这些假说的效力及局限性有所讨论(例如，参见Blakely, 1976; Burke等, 1976; Cooper等, 1976; Deitz及Holden, 1966, 1970, 1970a, 1973, 1974; Drahovzal, 1976; Erlandson等, 1976; Girdler, 1976; Hammond等, 1974; Hargraves, 1976; Hawkins, 1976; Helweg, 1976; Jahn等, 1976; Klitgord, 1976; Loudon, 1976; Lowman, 1976; Macdonald及Reid, 1976; Moore, 1975; Needham等, 1976; Rea等, 1976; Richardson及Harrison, 1976; Richardson等, 1976; Sutton等, 1976; Uyeda, 1976; Van der Voo等, 1976; Winterer, 1976; 以及这些文献所援引的较早期的参考文献)。

虽然在关于地球构造圈演化的分析中，不需要包括对简单海底扩张概念的详细分析，但最好应考虑到此概念所已遇到的某些领域的问题。在根据构造圈式地球模式来研究简单海底扩张概念时，就能最好地完成此项任务。

### 用构造圈式地球模式来解释海底扩张

从全球规模及长期观点来看时，海底扩张与其它形态的地壳谷裂，都明显地代表着地下活动导致地壳引张是那些区域里的地球的地面性状。地壳板块运动、地下板块及岩块的运动以及大陆漂移，以类似的方式，代表在那些区域里地球的地面性状，当地球的内部性

状的组合表现出以切向不平衡力向量作用于一个板块、一岩块或一块大陆上。这种不平衡力向量促使那岩块、那板块或那块大陆相对地球的整体，也即，相对地球以内的一个基准点而产生运动（第三章）。

海底扩张、地壳板块运动、地下板块及岩块的运动、以及大陆漂移都是些密切相关的现象；但还不了解它们间的因果关系。根据构造圈式地球模式，所有这些现象中的每一种现象，都意味着，当地球构造圈为试图将地球置于最小能量状态、来调整其本身在地球内部无休止的平衡性状时，在此企图宕延的一种表现形式（第十三章）。

### 用构造圈式地球模式来解释地幔对流

还不清楚地幔对流、大陆漂移及海底扩张之间的确切联系。也没有证明，大多数按成因方式而将这些现象联系起来的假说是完全令人满意的。

如果假设自从地球开始生存以来，大陆漂移就已不是一个连续的过程，那么就必须认为，对流是在某一时间的一个“静止”状态下开始的，此时间可用“ $t$  减  $k$ ”表示，其中  $t$  是大陆开始漂移的时间， $k$  是（1）使对流体系进行运转所需的年数以及（2）使之能驱动大陆去运动所需的年数。这一假设提出一个几乎是难以解决的，关于在“ $t$  减  $k$ ”的时间中，供给一巨大激发力的问题。

反之，如果认为，对流是在46亿年前，即在地球开始存在以来就开始了，那么，从那时以后，任何一段的对流流线，都能从1厘米/年的速度运行过46000公里。在这种情况下，于“ $t$  减  $k$ ”的时间里，提供一种不可能是巨大的激发力，以起动此对流体系，就不存在什么问题了（Tatsch, 1977d）。

几乎所有关于地幔对流的假说，都是以本纳德-拉莱的概念为基础的（Benard, 1900; Rayleigh, 1916; Foster, 1969; Takeuchi 及 Sakate, 1970; Ichiye, 1971）。这些现今流行的假说，是假设，由这种对流所引起的海底扩张，大约在2亿年前就开始了。这些假说的设想，是下列二者之一：（1）常数  $k$  的值，约为  $46 - 2 = 44$  亿年；或（2）在过去46及2亿年之间的某段时间里，可以得到一种巨大的不平衡力，以活化此体系。

在构造圈式模式中，假设地球的性状，至少在过去的36亿年间，就已大体上是同样的了；并且假说，在那一时间里，某些多少类似于海底扩张及大陆漂移的现象早就已以旋迴性但非周期性的方式发生过。在这一概念中，地幔对流很可能是由自下构造圈破裂体系向外流动的优先热流、以及可能还有挥发物流激发的（第九章）。

总结起来，与大多数假说不同，构造圈式地球模式，并不要求地幔对流来作为一种引起像海底扩张及大陆漂移这些现象的机制。在此概念中，倒宁可认为地幔对流与海底扩张及大陆漂移一样，都是由同一的基本驱动机制激发的（第六章及第十七章）。

## 海 岭

一如用构造圈模式所解释的，海岭都与此模式的活动楔形带相联系（第六章）。活动的喷发海岭与现今的活动楔形带相联系；不活动的海岭与“古”楔形带相联系。从而，大西洋及印度洋的与现今活动楔形带相联系的活动海岭，就同南、及东太平洋与古（中生代）楔形带相联系的无地震海岭有所不同。

中太平洋“活动的”（后中生代的）海岭与克马德克—阿留申楔形带相联系。夏威夷

及其它中太平洋的后中生代山链，似乎自中生代以来就已约被旋转了 $78^{\circ}$ （第十五章）。

## 海底扩张与侵入-喷出活动之间的关系

根据构造圈式地球模式，海底扩张和与此模式的活动楔形带相联系的构造岩浆活动，密切相关（第六章）。此类活动的主要类型之一，包括侵入及喷出活动（见第十章）。

许多与构造圈式地球模式现代活动楔形带相联系的海岭，都留有相似于海岭的线性带的玄武质岩浆侵入体与喷出体的线性带的痕迹（第十五章）。根据此模式，这些线性带之一，就是那一条300公里长的，通过汤加-拉乌盆地中心的海岭（Sclater等, 1971）。属于这种类型的其它海岭有：

- a. 与佛得角群岛相联系的、淹没在水下的东西向中新代海岭（例如，参见 Dash 等, 1971）。
- b. 太平洋的许多海山链（例如，参见 Hey及Morgan, 1971）。
- c. 与缅甸隆起相联系的、一系列东北-西南向的线性海岭（Holcombe, 1971）。
- d. 日本区域中的“板片”界面（Carr等, 1971）。
- e. 在美国盆地及山岭省之下的线性带（Scholz 等, 1971）。
- f. 包括夏威夷、奥斯达尔与拉克代夫-马尔代夫群岛在内的无数岛链。
- g. 像沃尔维斯、冰岛-法罗、以及卡内几等的无震海岭。
- h. 例如德干暗色岩、部份阿法尔系以及斯内克河玄武岩等线性喷出体。

由于构造圈式地球模式的驱动机制位于大洋与大陆的表面之下，所以这个模式预示，就构造岩浆活动而论，它除了受到地球构造圈各个部份中的几何学、力学、热力学及化学的不均一性影响之外，在大洋与大陆的构造岩浆活动间，并无截然的、基本区别。

## 海底扩张与大陆上某些岩浆-造山过程间的关系

任何试图依据简单海底扩张概念，来解释大陆岩浆-造山过程的尝试，都会在推导自简单海底扩张概念的有关机制的稳定性方向，与见于岩浆及构造过程的幕期性特征方面之间，都存在着基本的不一致性（例如，参见 McBirney, 1969）。这说明，或是（1）有各自的机制，在驱动着大洋与大陆的岩浆-造山过程，或是（2）海底扩张是以幕期性的方式而发生，与见于大陆上的幕期性方式相类似（Tatsch, 1977d）。

可以根据构造圈式地球模式，把所观察到的情况总结如下：

- a. 在大洋区与大陆区中，有一个单一、全球、长期、深位的机制，在驱动着岩浆过程与造山过程。
- b. 此单一机制，是构造圈式地球模式的基本驱动机制（第六章）。
- c. 大洋与大陆的岩浆及造山活动，都是以幕期性形式，也即以旋迴的但非周期的方式发生的。
- d. 在大洋以及大陆内的这种活动，与现今的活动楔形带相联系（第六章），并与活动地震（第八章）以及地槽发育紧密相联（第十二章）。

## 扩张轴的迁移

在某些条件下，构造圈板块与岩块，可以自由地相对下构造圈破裂体系而运动（第三

章)。当构造圈的地表板块之间发生海底扩张的喷出作用时，则这些板块可以相对地从有关的下构造圈破裂体系块段幅射向上的点和线、发生位移。

旋转轴的这种“迁移”，可以包括直移、旋转、以及二者的结合。一般可将这些迁移表示为  $aA+bB$ ，其中  $A$  代表直移， $B$  代表旋转， $a$  和  $b$  都是常数，若  $a+b=1$  时，则无论  $a$  或者  $b$  都可为零。当  $b=0$  时，发生纯直移迁移；当  $a=0$  时，发生纯旋转迁移；当  $a$  与  $b$  都不为零时，发生直移与旋转相结合的迁移 (Tatsch, 1977d)。

图16—1所示，为只涉及直移，即  $b=0$ ，的扩张轴的迁移。在地表上的扩张轴  $AB$ ，相对地位于幅射向下1000公里的下构造圈破裂体系的那一有关块段的地表投影  $A'B'$ ，而承受了直移为  $a$  的迁移 (第六章)。

图16—2所示，只涉及旋转，即  $a=0$ ，的扩张轴的迁移。在地表上的扩张轴  $AB$ ，就下构造圈破裂体系的那一有关块段的地表投影  $A'B'$  而言，则承受了旋转角为  $b$  的迁移。

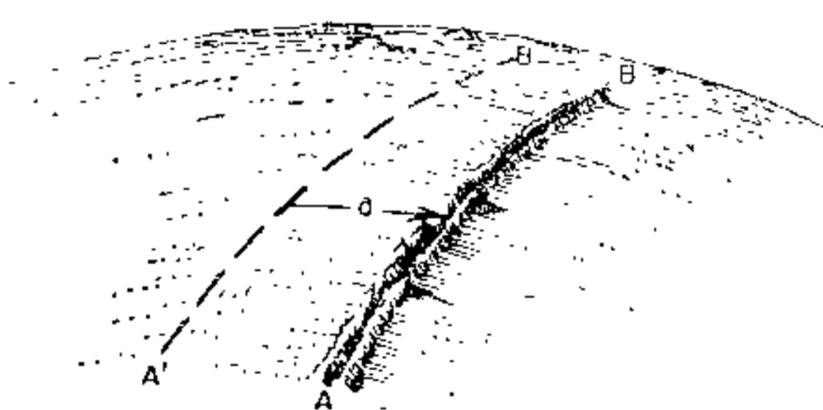


图 16—1 只涉及直移的扩张轴的迁移  
(J.C.Holden据作者初版中的略图修改而成)

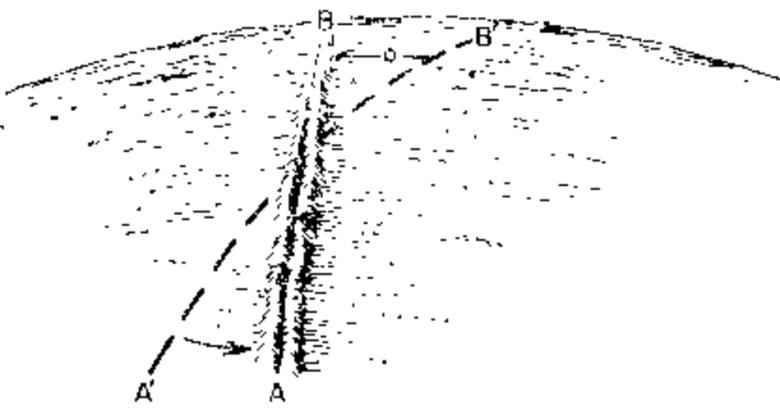


图 16—2 只涉及旋转的扩张轴的迁移  
(J.C.Holden据作者初版中的略图修改而成)

图16—3所示，为扩张轴既涉及直移也涉及旋转，即  $a$  或  $b$  都不为零的迁移。在地表上的扩张轴  $AB$ ，相对地位于幅射向下1000公里的下构造圈破裂体系的那一有关块段的地表投影  $A'B'$ ，则承受了直移为  $a$  及旋转为  $b$  的迁移。

除了个别的条件之外，扩张轴并不采取有如示于前三种图解中的那种简单、理想的形式。而是根据各个构造圈板块与岩块上的“局部”不平衡力向量的效应(第六章)，地面上的实际扩张便会出现示于图 16—4 中的情况。扩张轴的每一块段，都相对地位于幅射向下1000公里的下构造圈破裂体系的、那一有关块段的投影 ( $A'B'$ )，而各自承受独立的直移及旋转。

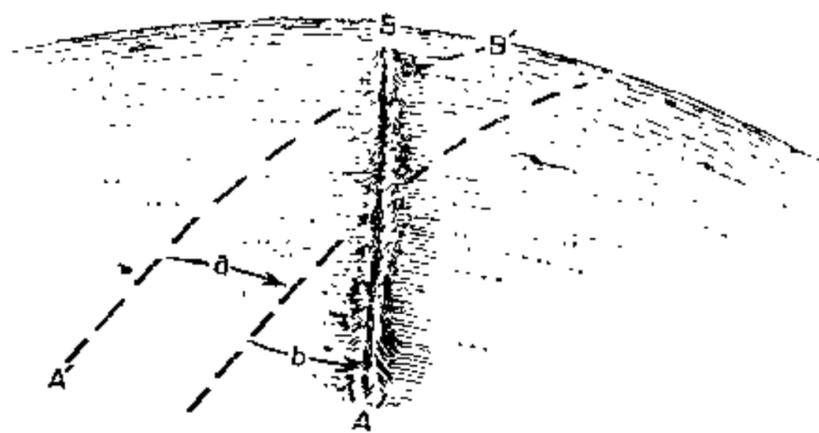


图 16—3 既涉及直移又涉及旋转的扩张轴的迁移  
(J. C. Holden, 据作者初版中的略图修改而成)

当此扩张轴与下构造圈的六个基本点之一相联系时 (第六章)，这时，示于图16—4中的基本型式，就可能受到变化。可料到有两种这种变化的情况：(1) 其中不存在与所研究区域之下的那一下构造圈基点相关联的半球扭曲 (第三章)；及 (2) 其中存在与那一点相关联的半球扭曲。

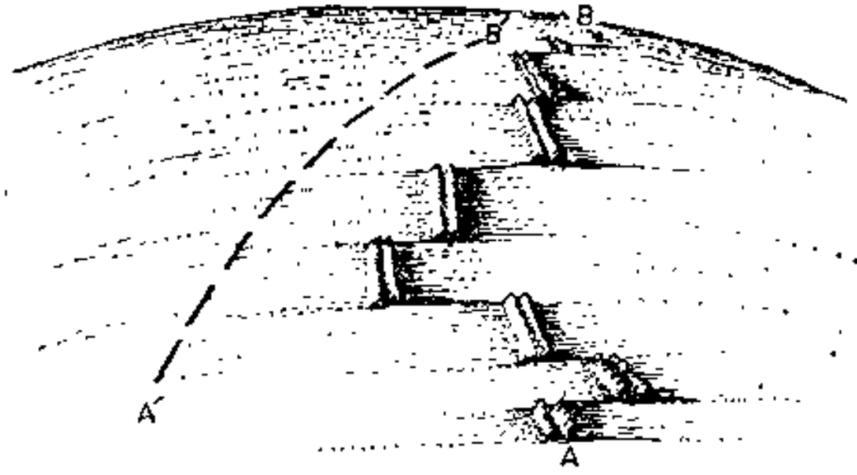


图 16—4 既涉及直移又涉及旋转的扩张轴各个块段的迁移  
(J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

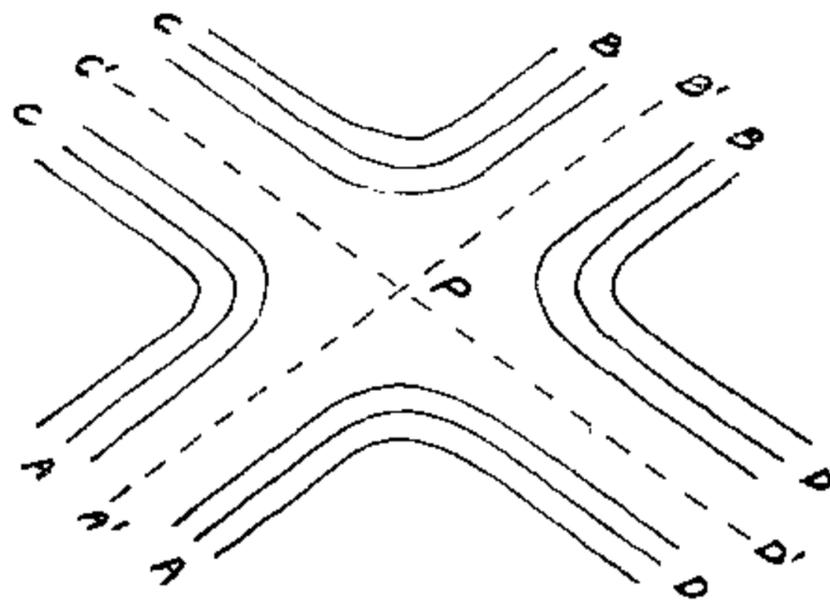


图 16—5 在扩张与下构造圈的六个基本点之一相伴生时，扩张轴的迁移  
(J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

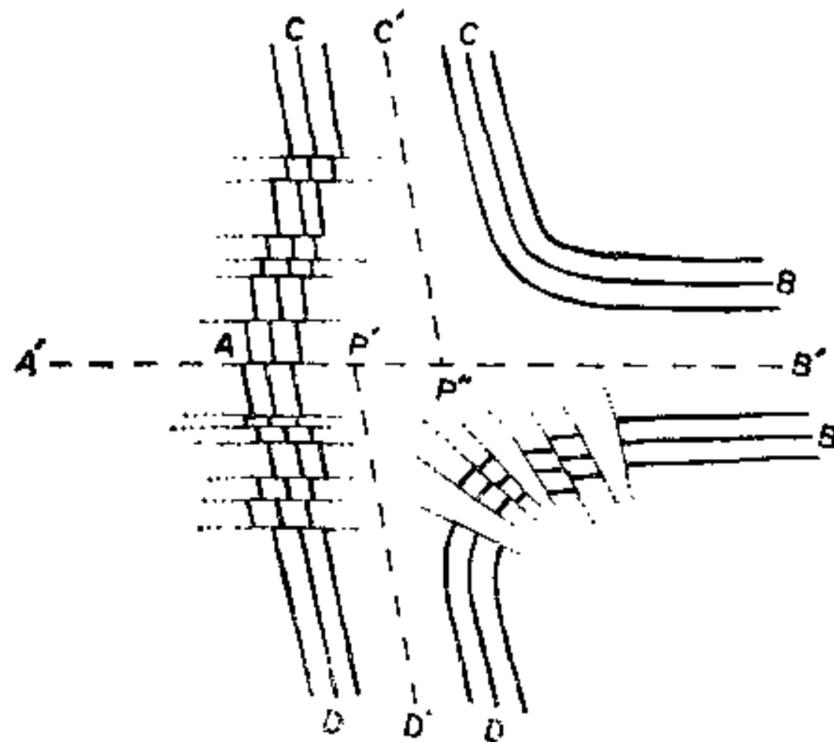


图 16—6 在下构造圈六个基本点之一的震中附近，扩张轴的迁移。穿过此基本点已发生了半球扭曲  
(J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

图16—5所说明的是这两种情况的前一种情况，即其中不存在与下构造圈的 $P$ 点相联系的情况。扩张轴在地表上的 $CB$ 、 $AB$ 、 $BD$ 及 $AD$ 块段，相对地位于 $A'B'$ 及 $C'D'$ 之下1000公里、并通过下构造圈 $P$ 点的下构造圈破裂体系的相关块段、在地表上的投影 $A'B'$ 及 $C'D'$ ，已发生过位移。

一如图16—6中所示，当半球扭曲与穿过下伏下构造圈点的破裂之一相随而生时，扩张格局就可发生进一步的变化。在这种情况下，在地表上可以产生出一对三接合。除开这对三接合之外，半球的扭曲，还会使与之相关的扩张轴发生畸变。已表示出这种扩张轴的无数可能构型中的几种变化。举例来说，如图所示，扩张轴的 $CA$ 与 $AD$ 块段，已采取 $CAD$ 的构型，因为在沿 $A'P'$ 块段上，不存在海底扩张喷出作用。扩张轴的 $CB$ 块段是“正常的”。扩张轴的 $BD$ 块段，在 $P''$ 点附近遭受破碎，因为在此附近有喷出管道（第十章）。

在图16—6中所示的这种有代表性的构型的变体里，扩张轴 $CD$ 的各个块段，除了示于图16—6中的直移之外，还可经受旋转（参见图16—2），在这一点上，就与大西洋中脊的情况相近似。在另一篇分析中，将对这些及其它见于地表的实例，做比较详细的讨论（Tatsch, 1977d）。在那篇分析中，是联系大陆漂移及板块构造，来讨论海底扩张的全球性几何学与力学的。

## 斜向扩张

观测资料揭示出，许多沿着活动带，如洋中脊，发生的“斜向扩张”的情况。伯德与菲利普斯（Bird and Philips, 1975），在关于大西洋中脊的报告中，就报导过两个这样的例子，即：（1）自2500万年前到1400万年前；（2）从900万年前到现在。

已为“斜向扩张”提出过两种模式：

a. 在简单海底扩张的概念里，“斜向扩张”，是在非洲板块每次开始“向更偏北的方向离开美洲板块面扩张时，由“转换断层的制动”引起的。

b. 在构造圈式地球模式的概念里，“斜向扩张”，是由地震构造岩浆带相对两侧上的不平衡力向量，都不垂直于地震构造活动带地表显示的中线这一事实引起的。

## 西非外面的大陆边缘：一个有代表性存在着问题的区域

对非洲西岸的起源、演化及现今特征的情况，还不完全了解（例如，参见Uchupi等，1976）。但最好先总结一下，对此存在问题的区域的发展，已了解了些什么并提出了什么设想：

a. 大多数概念，都是根据大西洋的发展来解释西非大陆的。

b. 在这些概念里，认为非洲约在1.8亿年前与北美洲分离，而伊比利亚半岛则约在800万年前与北美洲分离。

c. 直布罗陀海峡区域，形成于下述二者的结合：（1）在过去1.8亿年到7200万年期间（与赤道地震构造岩浆带相联系）的直移，以及（2）从过去6300万年到现今这段期间中，于赤道地震构造岩浆带内的收敛。

d. 位于基底之上的最老沉积岩，含有晚三叠纪的蒸发岩。

e. 在阿普提—赛诺曼时期，西北非洲外面的深洋，只有少量的底部环流。

f. 第三纪的地震构造岩浆带活动事件，通过下述方式而改造了摩洛哥以南的分散边

缘：（1）使高阿特拉斯西部外海大陆架地层，发生褶皱，（2）使加那利岛，受到侵位，（3）使西班牙萨哈拉外海大陆斜坡上的地层，发生褶皱，（4）使佛得角高原，遭受隆升，（5）使上部隆起之下的大洋基底，受到隆升，以及（6）使沿此海岭的火山海山，受到侵位。

### 某些大洋区内的脊顶跳动及不对称扩张

从全球规模上，把简单海底扩张概念运用于地球表面的现今性状时，就得出用于洋盆形成作用的简单而合理的解释。但是，详细的研究表明，必须把某些特定的假设，引入到这一简单概念中去，以便理解所观察到的有关洋盆的起源、演化、及现今特征等的资料方面的复杂性。现将这种四个特定的假设总结如下：

a. 脊顶跳动可引用于洋盆中的下述许多区域，即于其中所观察到的资料，与简单海底扩张概念所预示的资料不相符合（例如，参见Winterer, 1976）。

b. 不对称扩张可引用于洋盆中的下述区域，即于其中所观察到的异常资料，与脊顶跳动的特定假设不相矛盾。

c. 扩张方向的变化只有当脊顶跳动及不对称扩张，都不能对所观察到的资料作出适当的解释时，才能引用。

d. 结合有上述两种或三种情况的复合特定假设，只有在它们之中的任一假设的本身，都不适于对所观察到的资料作出解释时，才能引用。

详细的研究表明，即便运用了所有上述以及其它的特定假设之后，简单海底扩张概念，在关于洋盆的起源、演化及现今特征等方面，仍然遗留有如这些盆地的实际观察资料所揭示出来的许多问题（例如，参见Sutton等，1976；Tatsch, 1977d）。

## 第十七章 大陆漂移与极移

在过去十年间，魏格纳（Wegener, 1915）的简单大陆漂移概念，已为科学界所广泛接受。但是，此简单概念并没有包括一个适当驱动机制的几何学、力学、热力学及化学等方面的细节。这一缺陷表明，用简单大陆漂移概念所能解释的现象只不过是一较大体系的一部份，而比较大体系的驱动机制，却不在简单大陆漂移概念所拥有的那一较浅（几百公里）、及较短期（几亿年）的空-时格架的范围之内（Tatsch, 1977d）。

本书的主题之一，就是用构造圈式地球模式所概括的概念，来描述这一较大、较长期及较深位的体系。本章所要探讨的是，有关简单大陆漂移概念、及以作为解释大陆区水平运动的工作假说的这一较大、较长期及较深位的构造圈式地球模式概念的某些“支持与反对”的意见。

### 大陆漂移概念的演变

简单大陆漂移概念设想，至少在过去2亿年间，大陆规模的地壳板块，一方面虽然保持着它们的形状，但另一方面却已彼此相对发生移动或漂移。这一概念，已根据全球范围的古地磁分析、并辅以其它类型的区域性及全球性研究，而很好地建立起来。

大多数较早期的大陆漂移概念，是与杜陶义特（Du Toit）、泰勒（Taylor）及魏格纳（Wegener, 1915）相关。支持大陆漂移与（或）极移的一般观察结果及假说，可归纳为三类：

- a. 超级大陆漂移前的构形。
- b. 极移曲线。
- c. 根据岩石是产生于构造活动期或宁静期，而表现出岩石的旋迴性共生关系。

在某些漂移前的构形中，南方的大陆（非洲、澳洲、南美洲、印度及南极洲）在侏罗纪期间（约在1.5亿年前），都围绕着南极大陆而组合在一起，以形成冈瓦纳古陆；而其余的大陆，则组合起来形成劳亚古陆。在其它的构形中，所有的大陆都构成一个漂移前的单一超级大陆，即泛古陆。大多数现代概念认为，一个超级大陆的单独一次破裂，可能太简单、并过于受到时间上的限制。因此，大多数概念现在设想，存在一系列的超级大陆，它们反复地破裂、且又再联合，而成为不同的全球表面构形（Tatsch, 1977d）。

非洲、南美洲与澳洲这三个大陆的极移曲线所循的路线，几乎完全相同。这些曲线具有独特的大Z形的形状，其中的对角线约为 $90^\circ$ ，或有一约为地球圆周 $1/4$ ，即10,000公里的直线状迹线。当从时间上进行分析时，这些曲线表明，在过去5亿年间，大陆沿此独特的Z形路线进行漂移时的速度，约为2厘米/年。因为其它的资料表明，大规模的构造运动，是以几厘米/年的速度发生的，所以这一规模的极移，就至少和一些这种大规模的构造运动，有全球性的联系（例如，参见Tatsch, 1977d）。就此而论，从上志留纪到中白垩纪的3亿年间，所有地极运动就澳洲而言，显然是在石炭纪期间的一个2千万年的单一构造幕里发生的（Irving, 1966）。

对岩石年龄的分析表明, 存在一个大体以2.5到5亿年为一周期, 在构造上为活动与宁静时期的旋迴性序列。极移与大陆漂移事件, 显然都与这种旋迴序列的构造活动时期相关 (Tatsch, 1977d)。

上列及其它方面的关于极移与大陆漂移的新近分析, 已由下述作者作出, 他们是: Beckmann 与 Mitchell, 1976; Emery 等, 1975; Hammond 等, 1974; Hargraves, 1976; Hodgson 等, 1976; Lowman, 1976; Needham 等, 1976; Rosenberg及 Runcorn, 1975; Tarling 及 Runcorn, 1973; Uyeda, 1976; Vander Voo 等, 1976, 以及其中所引用的许多早期参考文献。

从这些以及其它的分析, 可以做出以下结论:

- a. 大陆漂移与极移, 是地球内部性状的地表显示。
- b. 这些现象至少已发生了2亿年, 并有可能在地球的全部历史时期中, 都在发生着。
- c. 对地球内部的几何学与力学, 还了解得很不充分, 因而不能对大陆漂移与极移驱动机制的性质, 做出完全而详尽的描述。

### 与大陆漂移有类联的其它大地现象

看来大陆漂移总是与其它大地现象, 如大洋与大陆的谷裂作用、岩浆活动、以及与构造岩浆活动相关联的其它现象在一起发生的。快速的极移, 是在强烈的构造岩浆活动期间发生的。在这样的时期里, 也发生比较多的极性倒转 (第十四章)。

因为大陆漂移几乎总与岩浆活动一起发生, 而且岩浆活动, 又依次几近沿全球最大热流带而发生 (第九章), 这就暗示, 在此三种现象之间, 存在着因果关系 (Tatsch, 1977d)。

### 漂移着的大洋与扩张中的大陆

海尔兹勒和沃格特 (Heitzler and Vogt, 1971) 根据地磁异常平行于海岭, 而分析了大陆漂移与极移。他们的结论是, 除了其它许多情况之外, 由于在这种分析中涉及大量的变数, 所以要做出结论是困难的。然而, 他们通过把大陆漂移解释为: “在许多包含有大陆的板块之间的一种特殊运动情况”, 而总结了他们的成果。

对此概念的简单引伸, 同样可以把“大洋漂移”解释为: “在许多含有大洋的板块之间的一种特殊运动情况” (例如, 参见 Uyeda, 1976; Tatsch, 1977d)。看来, 至少有部份太平洋就已参与了这种运动。大多数证据表明, 至少, 部份中太平洋, 或许当它“被嵌入”在一板块之中时, 自中生代以来, 已向北迁移了 $20^{\circ}$ , 或超过了2000公里。

通过指出现时已了解到的, 有关大洋区与大陆区都已经受过显然是由深位引张产生的力所激发的谷裂作用与扩张作用, 从而可对上述概念做进一步的引伸 (第十五章)。因此, 我们可以说, “大洋漂移”与“大陆扩张”, 乃是大陆漂移与海底扩张的对立现象。

观察资料表明, 曾有一个原始大陆存在于一个古老的小盆地之中, 这个盆地的当时的边界, 为加拉帕戈斯、直布罗陀、美国东岸与非洲。但不存在什么证据能够表明此原始大陆曾发生过什么事件 (例如, 参见 Van der Voo 等, 1976)。图17—1示意地表示, 此原始大陆与古大洋如何有可能在晚中生代就已出现。此原始大陆 (PC) 位于一个由加拉帕戈斯 (GA)、直布罗陀 (GI)、美国东岸 (U.S.) 及非洲 (AF) 所围限的所设古老的小洋

盆地。阿巴拉契亚山脉及阿特拉斯山脉，可用A—US—A'及 A—AF—A' 近似地表示出来。

在非洲及其它大陆的裂谷中，也存在性质类似的证据。这些大陆裂谷中的火山作用，无论在成份上和体积上，都与海岭中谷里的完全不同。这就说明，至少在某些场合下，于扩张着的大陆下的地热梯度，要比在扩张着的海底下的地热梯度低得多。

其它的分析表明，纯“大陆”性状与纯“大洋”性状之间的区别，似乎不像一度所设想的那样分明（第十五章）。许多大陆的性状，与大洋中的类似性状一模一样，而许多大洋的性状，又与大陆中的类似性状雷同。因此，所有无论是大洋或是大陆的地表性状的起因机制，必然存在于大陆与大洋之下的深处、一个老于最古大陆的全球性统一体系之中(Tatsch, 1977d)。

### 大陆漂移与极移的起因机制

假如地表的一些部份正在经受着一定数量的漂移，而且如果，作为漂移的结果或作为漂移的补充，地球的旋转极也在游移，那么，这些效应就能代表地球内部性状的地表显示。至于有关引起大陆漂移与极移的地内确切机制的问题，尚未能解答。举例来说，对下列问题就还没有找到答案：

- a. 大陆漂移是较新的事件，还是在过去46亿年中一直在进行的事件？
- b. 如果是后者，那么，又是什么在所有这些年代里，于地球表面上操纵着大陆的移动？
- c. 如果大陆漂移是在较近的时期里开始的，譬如说，在2亿年前，那么，又是什么促使它在那时开始，而不是开始于3亿年前、9亿年前、或29亿年前？
- d. 大陆漂移的进行，完全是随机的，抑或是遵循着一些可确定的、准有条理的格局？
- e. 漂移前的大陆破裂作用（例如，非洲自南美洲的破裂）是由随机的力引起的呢，还是如所预期的？是由一有条理的、非随机的、在几十亿年的长期内一直在起着作用的全球性驱动机制所导致的那些准线性力引起的吗？
- f. 大陆漂移与极移是各不相同的现象吗？
- g. 如果不是，它们彼此之间以及它们与其它大地现象之间，又是如何相关的？

对于这些及其它有关大陆漂移与极移的问题，只有等到对激发出这些现象的适当机制有所认识之后，才能得到解答。鉴于许多有关大陆漂移与极移的假说，都是以地幔对流作为基本驱动机制，李与麦克唐纳（Lee and Mac Donald, 1963）通过假设，重力平面

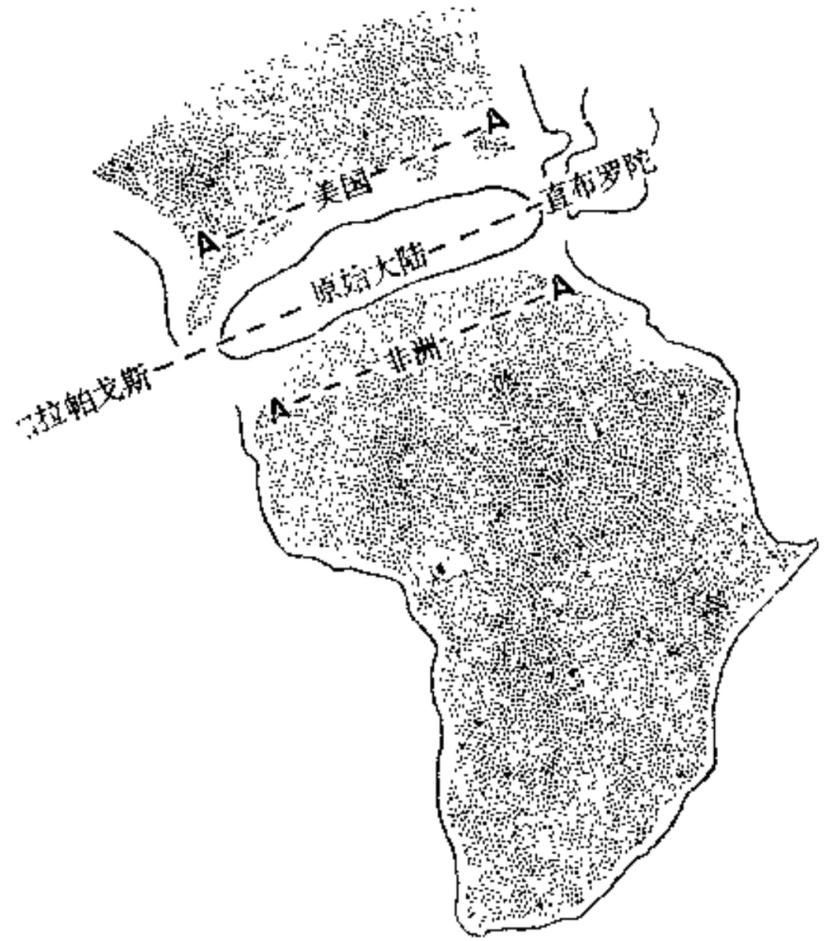


图 17—1 示意图表示在古老大西洋中的一小片原始大陆的残迹  
(J. C. Holden 据作者初稿中的略图修改而成)

“低”与热力“高”之间的对比关系，应代表理想对流型式的上升部份，而试图用比较地面热流值与引力势的球谐分析，来获得有关对流格局的证据。

他们的结论是没有说服力的。这主要是因为，对于他们所企图进行的特定类型的对比说来，所观察到的资料太少所致。随后的类似分析，除开提出漂移与所设地幔对流都可能是同一全球性、深位、长期的机制的显示之外，也没有澄清所猜测的、有关大陆漂移与地幔对流间的关系的性质（Tatsch, 1977d）。认为大陆漂移与地幔对流之间有所联系的一种观点，是认为，当中央驱动机制无论何时在地表上某一区域中产生出张性环境时，地壳显然就会演变出裂谷、扩张及漂移。但其细节，尚待说明。

有些学者通过使用其它激发力作为引起大陆漂移的力源，而迴避开理解很差的、有关地幔对流体体系的、那些不合乎需要的细节。凯恩（Kane, 1971）设想，来自地球自转速度变化的差异角动量，是移动大陆的激发力。伊奇叶（Ichiye, 1971）使用由差异加热所导致的不稳定地幔对流，来相对大陆的新部份而推动大陆的较老部份。而差异加热，则系起因于原始大陆物质中的、不同的放射性生热率。

贝尔（Bell, 1971）总结出，岩石圈板块实际上可与地幔的下部分离，并且在那一深度上，对于与之相关的质量转移格局，也不可能像对于地表显式那样，可以直接探测出来。

潘（Pan, 1971）的结论是，极移与地球上层的构造运动，在它们的驱动力方面是密切相联系的，就是说“能的扰动激发起极移，极移维持着构造运动，而构造运动又调整着极移”。潘的假说提出了一系列似乎是合理的事件，但并未对几何学-力学的细节提供什么情况，而这些却正是为发动、激发、以及现在还在支持这一为其体系所需要的“能的扰动”所必须的。

总结这些及其它的分析，可以说尚未能确定出关于大陆漂移与极移的令人满意的驱动机制，而且在找到这些相关现象的某些关键性问题的答案之前，也没有什么是可以确定下来的。

### 用构造圈式地球模式来解释大陆漂移与极移

根据构造圈式地球模式，大陆漂移及极移与地壳板块运动以及与下地壳板块及岩块的性状，都密切相关（Tatsch, 1977d）。根据此模式，这些现象都代表在那些地区中的地球内部性状的地表显示，在那里，这样的性状的组合，可以作为作用于一板块、一岩块、或一大陆上的切线方向上的不平衡力向量来表示，而这个力的向量却使那一板块、岩块、或大陆，相对地球总体、或相对其中的某个基准点产生运动。简单地说，这些现象都是些地表调整，以补偿不平衡的、永恒变化的、地球内部性状。有时一个岩块发生运动，能促进这种补偿的平衡；在另一些时期，当地球不断地试图呈现出一种最小能量状态，在一岩块或板块调整其自身到更接近于平衡的位置时，就可以产生裂谷或发生地震。

根据构造圈式地球模式，每当一个大陆进行运动而影响到这样的平衡时，就发生大陆漂移。按照此模式，当一简单直移使一块大陆自另一块大陆分离时，就会发生最基本的大陆浮移类型。而此类直移，是从一条可证明是与活动楔形带相同一的线性裂谷向外发生的（第六章）。

比较复杂的大陆漂移类型，是在直移与旋转相结合，而使一块大陆从另一块大陆分离

时发生的。根据此模式，这是常见的大陆漂移的形式。一般可把它表达为 $aA + bB$ ，其中的A代表直移，B代表旋转， $a$ 与 $b$ 是常数，若 $a + b = 1$ 时，则它们二者中无论那一个都可为零。

以构造圈式地球模式的几何学、力学、热力学与化学等各方面为基础（第六章），由此可见，正在发生着谷裂与漂移的大陆的旋转要素，是与地球构造圈的优先固流限平面、表面及壳层密切相关，并受其控制（Tatsch, 1977d）。

## 大陆漂移与世界裂谷体系

大陆漂移，显然总是沿着全世界裂谷体系的一段开始发生的。谷裂与漂移间的确切因果关系尚不清楚，但从其连带关系看来却是全球性、长期与深位的。因此，对于全世界裂谷体系基本力学及几何学的详尽研究，应能说明谷裂与漂移这两种现象之间的联系性质（Tatsch, 1977d）。

图17—2所示，为全世界裂谷体系可见块段的基本要素。以AL、BN、GA、GI、BV及KR标出的地点，是下构造圈6个基本“点”的辐射地面投影（第六章）。根据全世界裂谷体系，只约有一半可以在地表上见到的假设，就可用推测来预示或“再造”那些未被暴露的部份。这样的推测，未在图中表示出来，但可在大多数标准教科书中、与世界裂谷体系图中，找到它们（例如，参见Hart, 1969; Stacey, 1969）。

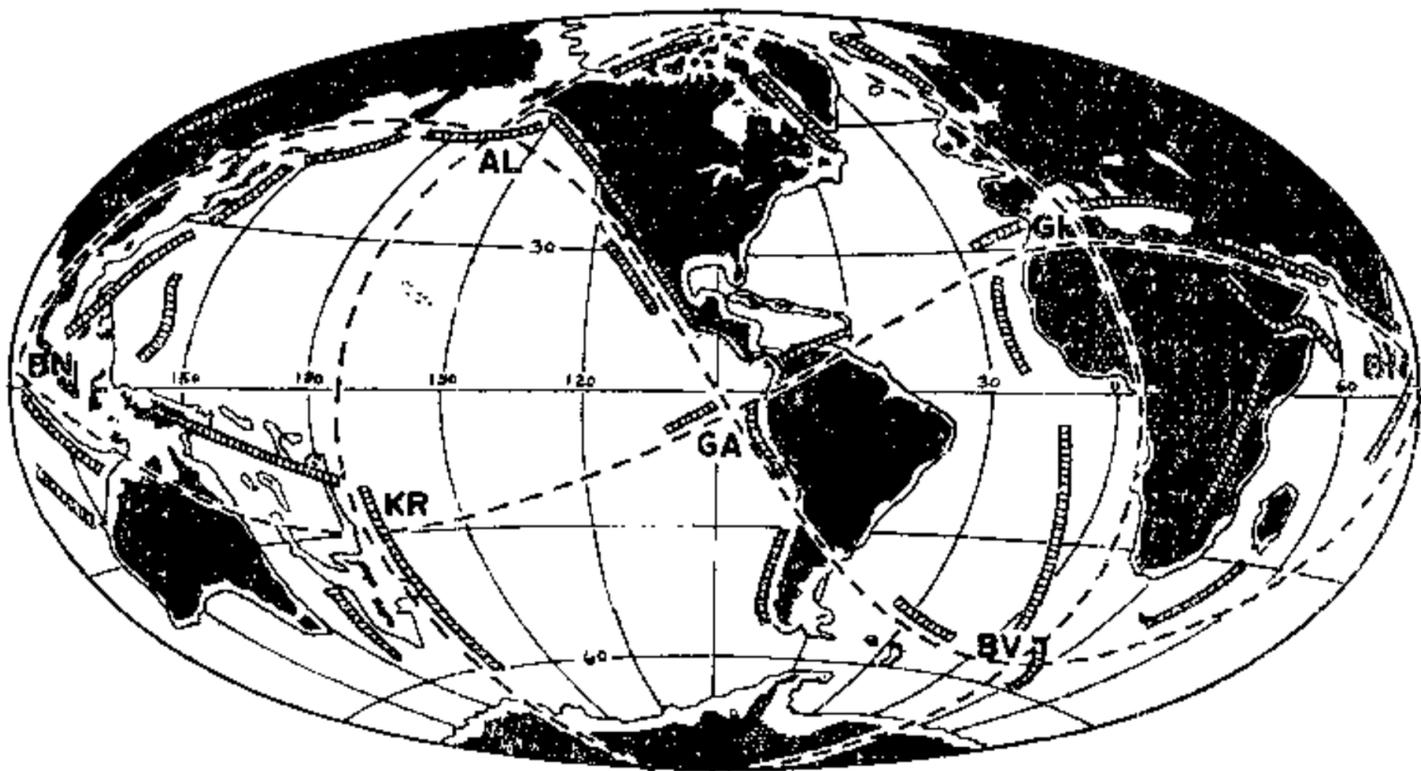


图 17—2 世界裂谷体系可见块段的基本要素  
(J. C. Holden 据作者初版中的路图修改而成)

阿泰姆杰夫与阿图什科夫（Artemjev and Artyuschkov, 1971），通过全球性分析所得出的结论是，世界裂谷体系的所有块段，都是由单一、深位的机制产生的，但是他们没有详细说明这种机制的几何学与力学的细节。莫尔（Mohr, 1971）的分析，对裂谷类型与岩浆类型做了对比。他发现，较快的谷裂作用速度（即那些具有较大引张梯度的裂谷）与“大洋的”拉斑玄武岩相关联，甚至在大陆区域内也是如此；而较慢的谷裂作用速度（即那些具有较小引张梯度的裂谷），则与一系列更多的较碱质岩浆岩相关联（第十章）。

埃里克桑等 (Erickson et al, 1970) 通过对皇帝破碎带的分析得出结论, 需要用某些更为复杂的几何学与力学, 才能解释这个带对于世界裂谷体系的“斜向趋向”。肖尔

等 (Shor et al, 1971) 对处于世界裂谷体系中的澳洲与新西兰间的块段, 以及格里姆 (Grim, 1970) 对处于加拉帕戈斯与巴拿马间的块段, 都做出了类似的结论。

在下构造圈六个基本点 (AL、BV、BN、GA、GI与KR) 中心附近的裂谷, 有时是弯曲的。对这些弯曲的地表裂谷, 所提出的起着作用的因素共有两种, 即:

a. 在下构造圈上的一个“活动点”在地面上可以投影成一个圆。

b. 当地表板块与下构造圈上的一条直线相对而旋转时, 则此直线在地表上的投影, 可以是一条曲线。

关于在 a 类中起着作用的力学与几何学的情况, 已示意地表示在图 17-3 中。下构造圈表面 (SS') 上的一个活动点 (P), 投影

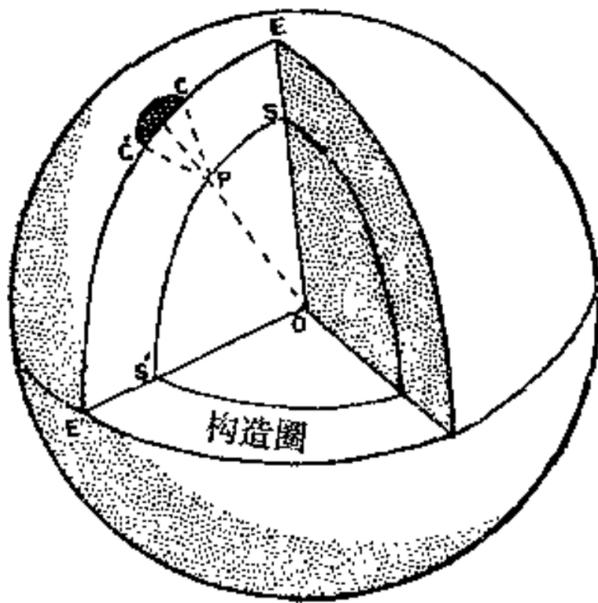


图 17-3 示意图表示, 活动点 P 是如何通过投影, 而在地表上成为一个圆的

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

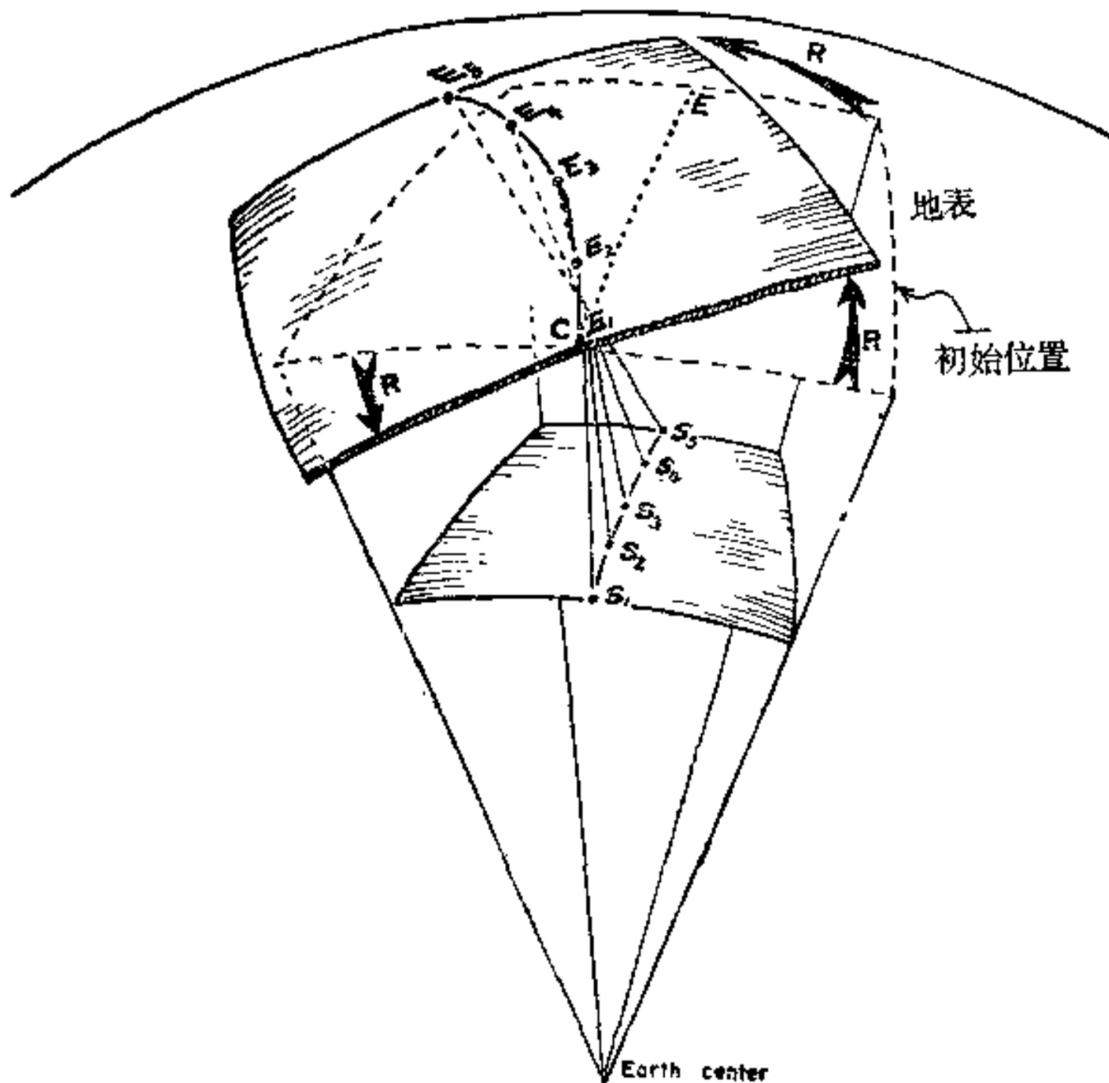


图 17-4 示意图表示, 下构造圈表面上一直线状活动点序列, 在投影到地表上时, 是如何成为一曲线状序列的

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

到地表 (EE') 上而成为一个圆 (CC')。O 是地球的中心。

倘若是按照地表板块与下构造圈上一条同定直线相对作旋转所持续时间的时间序列, 进行投影时, 则可用类似的方式, 表示出  $b$  类所起的作用。图 17—4 所表示的就是这种情况, 位于下构造圈表面一条直线上的五个活动点序列 ( $S_1$  到  $S_5$ ), 当地表上的一个板块, 在  $t_1$  到  $t_5$  的时间序列中, 围绕 C 点经受了 R 的旋转时, 则会投影成为地面上的一条从  $E_1$  到  $E_5$  的曲线状序列。

造成这类情况的力学及几何学, 与包含在某些岛屿或岛链变为弯曲的演化过程中的那些相近似。斯通与卡默朗 (Stone and Cameron, 1970) 讨论过阿留申链变为弯曲的演化作用。凯维等 (Kawai et al, 1969) 已讨论过本州岛变为弯曲的演化作用。

从图 17—4 可以看出, 无论是 (1) 在从  $t_1$  到  $t_5$  的时间序列中, 点 S 从  $S_1$  移到  $S_5$ , 或者是 (2) 在从  $t_1$  到  $t_5$  的时间序列中, 地面上的板块在下构造圈表面上一单个活动点 ( $S_1$ ) 的上方, 除发生 R 的旋转之外, 还经受了从  $E_1$  到  $E_5$  的直移, 其结果都是一样 (Tatsch, 1977d)。

总结起来, 尽管世界裂谷系的几何学与力学, 在用简单大陆漂移概念来分析时是复杂的, 但根据构造圈式地球模式 (第六章) 来解释, 却比较简单明了。这种简单化, 是因为简单大陆漂移概念所考虑的, 只是深度约为 100 公里的“地表”板块现象, 而构造圈式地球模式, 考虑的则是所有地表的、与深达 1000 公里的地下的现象。

### 用构造圈式地球模式来解释大陆漂移与极移的驱动机制

根据构造圈式地球模式, 激发大陆漂移与极移的驱动机制, 与激发地表性状其它方面的基本驱动机制, 都是相同的。一如第六章中所述, 约自 46 亿年前地球开始存在以来, 这种驱动机制也已存在了。此模式还进一步设想, 大陆块至少已存在了 36 亿年 (第七章), 且在此期间, 可能已发生过大陆漂移。

根据此模式, 所有的大陆不大可能 (也无必要) 曾一直被同时联合成为一单个的超级大陆。根据此模式, 在过去 36 亿年间的某一时期中, 每个现今的大陆块, 却有可能就已被附加在另外一个或几个现今的大陆块之上。但在此概念中, 所有大陆不大可能 (也无必要) 曾全部被联合成为一个单个的超级大陆。

从而, 在此概念中, 有人会说, 这既不属于“一类漂移前的构形”, 也不属于“那种前中生代的构形”。有人会说, “最可能是属于上侏罗纪的构形”、或“最可能是属于下古生代的构形”、或属于许多有可能存在的任一种前寒武纪的构形 (Tatsch, 1977d)。

由于在过去 36 亿年间的全部时期里, 所有的大陆, 大体上都已在持续不断地运动中, 因而可能有无数个前中生代构形, 而每一构形与前一或后一构形间, 至少相差几厘米。当运动速度为几厘米/年时, 则在每百万年内, 大陆就可漂移几百公里, 或约用几十亿年, 就能绕地球漂移一周。

在这里有必要回思一下, 在第七章中讨论过的, 由大陆核的基本造山-克拉通演化, 对大陆漂移及超级大陆构形所设置的限制。根据此模式, 容许在“漂移前的构形”中发生大陆间的开启, 但不容许发生叠复。这就是说, 若在密切拟合的再造构造中存在叠复现象, 则根据此概念, 就应将此构造拉开, 直至此叠复不再存在时为止, 于是, 据此模式, 所得的这一结果, 就表示出一种可能的“漂移前”的构形, 就是说, 于所研究的特定地质时期内, 没有叠复现象 (Tatsch, 1977d)。

在除海平面以外的各种深度上的“拟合”，并不一定比在海平面上的更好。因为过去各个大陆的差异抬升及沉陷，已严重地降低了，使用任一现今给定的深度，作为古代全球水平基准分析的可行性。

总结起来，根据此模式，大陆可归入于下到三类漂移范畴：

a. 那些各自进行着运动的大陆，即，有如现今的北美洲、南美洲、澳洲与南极洲这样的单个大陆。

b. 那些经历着集体运动的大陆，即作为现今欧亚大陆那样的、被缝合成一个单元的几个大陆的组合。

c. 那些处于正在分裂中的大陆，如欧非大陆；或属于正在结合中的大陆，如印度亚大陆。

根据此模式，在大陆漂移与有关现象的所有场合中，驱动机制都是同一个基本驱动机制（第六章）。关于此机制如何移动板块、大陆及地块的细节，将在下章讨论板块构造时，进行探讨。

# 第十八章 板块构造与相关的 影响全局的过程

现今流行的“板块构造”概念，大约是在十年前正式提出的（例如，参见 Mckenzie and Parker, 1967; Morgan, 1968）。在其最简单的形式中，此概念包括两点基本假设：

a. 即，地球表面为若干巨大而坚硬的球面状帽盖或板块所覆盖，它们仅在沿其边界处才经受显著变形。

b. 这些板块彼此之间相对运动。

此简单概念在过去十年间已十分流行，这主要是因为它相当成功地解释了地球表面的总的大规模的性状（例如，参见 Le Pichon 等, 1973）。但在此简单概念中，并未包含一个适当驱动机的几何学、力学、热力学及化学等方面的细节。这一缺陷表明，用简单板块构造概念所能解释的现象，只不过是一个更大体系的一部分，其驱动机制，位于为简单板块构造概念所包括的较浅（几百公里）、及较短（几亿年）的空-时格架之外。

用包含在构造圈式地球模式中的概念（第三章）来描述这一更大、更长期、更深位的体系，正是本书的论题之一。本章既检验一些对简单板块构造概念的“支持与反对的意见”，也检验对于作为解释地面板块性状的一种工作假说的、更大、更长期、更深位的构造圈式地球模式的“支持与反对的意见”。这类材料中，有些与第十六章（海底扩张）及第十七章（大陆漂移与极移）中的相类似。这种相似性产生于，所有这三种现象都是同一驱动机制的地表显示这一事实（第三章）。

## 前寒武纪时期地球的构造性状

虽然还不了解原始地壳的性质，但那些古老的绿岩带暗示出，有一早期、超活动、太古界、形成着硅镁层的岩石圈，曾遭受过前进相的破碎作用、混合岩化及花岗岩化（例如，参见 Drake, 1976b）。作为统一的地盾区一经形成，早期大陆就继续增长，而变得更厚且分布也更广。大部分元古界都亲身经历了大陆核在太古界基底上的固化与稳化（第七章）。

这些增大了的、形成硅铝层的陆块，可能早在太古代时就被裂开过。而这种分裂作用，并不是以随机的方式、而主要是沿着直线状地带，大体以分裂良好的方式发生的（例如，参见 Anhaeusser, 1976; Drake, 1976b, Tatsch, 1973a, 1977d; Valencio, 1976）。

关于简单板块构造概念的基本原理，“已在大部分的地质时期中起有作用”的说法，现已为一些支持者所广泛接受。但是，当分析到地球上的许多特定地区时，甚至是在新近的地质时期里，也存在“许多根本性的问题”（例如，参见 Kahle, 1974; Neary 等, 1974; Tatsch, 1977d）。

## 地球上大洋区的构造性状

根据简单板块构造概念，还不能完全对地球大洋区的起源、演化及现今特征的几何学、力学、热力学与化学等方面进行解释（例如，参见Erlandson等，1976；Kahle，1974）。有些观察到的资料，与简单板块构造概念所预见的不相符合。可将它们概括如下：

a. 简单板块构造概念，未能成功地地为西太平洋建立起一前后一致的构造运动史（例如，参见Hilde等，1976；Jahn等，1976）。

b. 过去在东、西太平洋盆地之间，已存在一个或多个去耦地带（例如，参见Hammond等，1974）。

c. 挖自某些海山上的熔岩，在化学上与已知的“大洋型”岩没有明显差异，但却与某些仅见于大陆裂谷中的岩石相似（例如，参见Winterer，1976）。

d. 看来在25亿年前，大多数大洋盆地的生长就已发生。

e. 简单板块构造概念，不能估计出所设早期大洋的宽度，甚至连估计到最近似的数量级都无能为力（例如，参见Burke等，1976）。

f. 北极部分区域的演化细节，与简单板块构造概念的原则不相一致（例如，参见Cooper等，1976；Marlow等，1976；Scholl等，1976；Stewart，1976a）。

g. 有些观察资料（例如，参见Richardson and Harrison，1976）认为，红海是由一次地震构造岩浆带活动事件的两个暂短独立的相而形成的（Tatsch，1977d）。

h. 根据简单板块构造概念，还不能清楚地了解海岭内中谷与裂谷山脉之间的关系（例如，参见Macdonald and Reid，1976）。

i. 根据简单板块构造概念，还不能完全解释洋壳“形成”后，于其中发生的变化（例如，参见Uyeda，1976）。

j. 当根据简单板块构造概念进行分析时，东太平洋海隆的一些部分，表现有异常的性状（例如，参见Rea，1976）。

k. 对于简单板块构造概念说来，西南太平洋的岛屿以及与之相关的山脉，仍是一个谜（例如，参见Hilde等，1976；Krebs，1975；Watts and Weissel，1976）。

l. “板块”运动，在布维点附近的速度及方向，与在假设全球性闭合中，对板块运动的分析所预示的速度及方向，有显著的差异（例如，参见Sclater等，1976a）。

m. 根据简单板块构造概念，还不能完全理解许多大洋岛屿的起源、演化及现今特征（例如，参见Gill，1976；Solomon等，1976）。

n. 对于在某些所推断的“扩张中心”之下不深地方的结晶基底的报导表明，在这种区域中的海底板下面的构造，要比简单板块构造概念所预示的复杂得多（例如，参见Williams，1976）。

o. 根据简单板块构造概念，还不能完全理解印度洋的许多特征（例如，参见Sclater等，1976）。

## 地球大陆区的构造性状

像上面指出的那样，简单板块构造概念（有一些例外），在解释大洋区内地球大部分的总构造性状时，是相当成功的。反之，当根据简单板块构造概念，来检验地球大陆区内

的许多地质及变形构造时，看来其性能就不太良好（例如，参见 Gedney等，1976；Lathram and Albert, 1976）。

以上分析，对位于板块中心的许多大陆区特别适用，但也适用于沿板块边缘的一些大陆区。在这些不相符合的构造中，有一条就是复杂的阿尔卑斯-喜马拉雅-印度尼西亚山链，它从北非向东延伸，通过南欧、土耳其、伊朗及喜马拉雅而进入印度尼西亚。这一带大致成直线状的山链，难以再分成与简单板块构造概念“明确相关的单元”（例如，参见 BenAvraham and Nur, 1976；Kashfi, 1976；Pavoni, 1976）。

现将根据简单板块构造概念，还不能很好解答的、涉及大陆区的一些其它的问题，概括如下：

a. 对大陆裂谷的起源与演化，还不完全理解（例如，参见Girdler, 1976；Needham等，1976）。

b. 在威特瓦特斯兰系内，厚达8公里的中粗粒碎屑岩，似乎是堆积在花岗质地壳上的一个长350公里、宽200公里的盆地中（例如，参见Hargraves, 1976）。关于容许发生这种堆积的构造环境，还是一个令人迷惑不解的问题。如果这些堆积物曾一度分布得更加宽广的话，那么，大陆的出现，必须更早于23亿年前（同上）。

c. 自从简单板块构造概念诞生以来，就把南部安第斯看成是，当大陆跨到洋底上时，将会发生些什么的典型例子。举例来说，与智利海岸相平行就存在一个深海槽，这是一条地震带，它约以 $25^{\circ}$ 的角度而从深海槽下部倾入于大陆之下；还有，在离深海槽线差不多300公里处，开始升起火山山脉，在那里，所设的下降板块，已到达足以产生出熔岩的深度。但尚未提出有关安第斯山脉，是怎样作为板块运动的结果而发展起来的、全面并被普遍接受的解释（例如，参见Hodson等，1976）。

d. 如果简单板块构造概念是正确的，那么，覆盖在部分大西洋基底岩石上的几近1公里厚、大部是尚未石化的沉积物，已使2—3公里厚的沉积物堆积层附冲了约40公里，而其本身却未经受任何明显的内部变形（例如，参见Peter and Westbrook, 1976）。

e. 南美洲安第斯区一些部分的起源、演化及现今性状，不宜用简单板块构造概念来解释（例如，参见James等，1976）。

f. 达尔里姆普尔与克拉格（Dalrymple and Clague, 1976）曾提出，印度与欧亚大陆的碰撞，引发出一个世界性的“相对与绝对板块运动变化的连锁反应，这种情况，已由太平洋内发生在4200万年前的夏威夷-皇帝海山链方向的变化记录了下来”。这是一个有益的概念，它与所观察到的资料如此吻合，以致此概念认为，世界各地的所有地震构造岩浆活动，都与所有其它地震构造岩浆活动密切交叉耦合。但达尔里姆普尔-克拉格概念缺乏一个驱动机制，而说不出印度与欧亚大陆为什么相碰撞。

g. 对简单板块构造概念说来，北美洲落基山脉同样是个谜。尽管可以想得到海岸山脉与塞拉山脉中的岩石，与在那里的大陆之下沉陷的大洋板块相关，但落基山脉就完全不同了。落基山脉远在内陆，与所设大洋板块在该处沉陷的海岸相距甚远。在5000万年前，于蒙大拿与怀俄明的阿布萨罗卡火山区喷出的熔岩，在化学成分上，与喷出于印度尼西亚的熔岩相似，而印度尼西亚的喷出作用，则发生在距离板块由于喷出作用而开始沉陷入地球的那一地带300公里处。阿布萨罗卡喷出区与现今大陆边缘的距离，是上述的四倍。科罗拉多圣胡安山脉的那些火山，距离海洋就更远了。此外，除了在其北段之外，落基山脉主

要是由于垂直抬升形成的，而不是形成于来自海洋方面的褶皱作用（例如，参见Hodson等，1976）。

h. 一些新近的分析表明，纳兹卡与加勒比板块间的相对运动，平行于巴拿马湾以南的大陆边缘（例如，参见Jordan, 1976），或约与加拉帕戈斯至直布罗陀一线相平行（Tatsch, 1977d）。

i. 简单板块构造概念，并未对北美洲西海岸的起源、演化及现今特征，提出一个完全令人满意的模式（例如，参见Sharman等，1976）。

j. 中美地区的起源、演化及现今特征，难以根据大多数的全球构造概念进行解释（例如，参见Horne等，1976；Tatsch, 1977d）。

k. 见于地球上构造活动的一个“重要的部分”，不能根据简单板块构造概念来解释（Turcotte and Oxburgh, 1976）。

l. 乌拉尔山脉的起源、演化及现今特征，不宜于根据简单板块构造概念来解释（例如，参见Bulashevitch, 1976）。

m. 关于地中海阿尔卑斯带东部的发展的“主要实际资料”，“似乎排除了”对那一地区使用简单板块构造概念，去进行解释的“任何可能性”（例如，参见Belousov and Shalpo, 1976）。

## 洋盆内的大陆地壳

在洋盆内，有许多不能完全依据简单板块构造概念来解释的大陆碎块。这些碎块包括楚科奇角（Chukchi Cap）、波尔库潘海岸（Porcupine Bank）、东加那利群岛，加勒比海诸岛、斯科舍海岭、布罗肯高原、克尔古伦高原（Kergulen Plateau）、克罗哲泽特（Crozet）、劳德霍威海隆（Lord Howe Rise）、及诺尔福尔克海岭（Norfolk Ridge）（例如，参见Scrutton, 1976）。现将特别令人迷惑不解的例子概括如下：

a. 根据简单板块构造概念，还不能很好地理解加勒比海的起源、演化及现今特征（例如，参见Bence等，1975；Bullard等，1965；Carey, 1958；Dietz and Holden, 1970a；Gose, 1976；MacDonald, 1976a；Rod等，1976；Tatsch, 1977d；Van der Voo等，1976；以及这些文献中所引用的参考文献）。

b. 有一深位断层体系横过北美洲的东南部，并沿巴哈马台地东北边缘延伸。对此体系的详细研究表明，存在着大陆与大洋构造都受同一个长期、深位破裂体系控制的可能性（例如，参见Drahovzal, 1976）。

c. 根据简单板块构造概念，不能解释见于新西兰上部新生界岛弧中的许多构造（例如，参见Ballance, 1976）。

## 板块边缘处地球构造的性状

详细研究文献后，发现已对板块边缘处的地球构造性状，提出过五类基本概念。可概括如下：

a. 一种简单的、对所有板块都追溯到第一批板块出现的时代的板块构造概念（例如，参见Burke等，1976）。

b. 一种简单的、只追溯到中生代的板块构造概念，在地球存在的其余95%的时期

内，还有“其它机制”在起作用（例如，参见Smith, 1976b）。

c. a与b的各种组合，即，设想d的百分比，可具有一系列从95%一直降到10%的、各种不同的数值（例如，参见Briden, 1976）。

d. 关于在不同的历史时期中，包含有两种或多种“其它机制”的概念（Tatsch, 1977d中有评论）。

e. 关于在地球存在的全部历史时期中，只有一种单一、长期、深位的机制在起作用的观点，例如，构造圈式地球模式。

在此分析中，没有必要研究这五类观点的细节。这里须指出，仅根据见于板块边缘处的“观察资料”，是不能对消亡作用（及其它影响全局的过程）的驱动机制，做出有意义的分析的（Tatsch, 1977d）。

### 与地球的构造性状相关联的热力活动

根据简单板块构造概念，发生在造山带内的加热作用，是由消亡板块产生的热融体引起的（例如，参见Dewey, 1969b, 1976b）。另一些用于与地球构造圈性状相关联的热力活动的观点有：（1）在沉积物堆积层内的“自熔作用”（例如，参见Smith, 1976b）；及（2）在构造圈式地球模式的活动楔形带内的优先热流的路线（Tatsch, 1959及此后的著作，在第九章中已有所概括）。

最好根据关于与地球的构造性状相关联的热力活动，来对某些观察到的资料进行如下总结：

a. 根据简单板块构造概念，火山作用是位于美国西海岸外、NNW走向的深海槽中的活动消亡作用，同时发生的。但由于它的运动方向，基本与大盆地（the Great Basin）的扩张方向相正交，从而所设的火山前沿的迁移方向，与简单板块构造概念相矛盾（例如，参见Smith等, 1976）。

b. 所有根据简单板块构造概念的模式所预示的热流值，都比在“扩张轴”附近所实际测得的值高得多（例如，参见Williams, 1976）。

c. 在海岭附近的热流，沉积厚度与岩石圈板块年龄之间的关系，与简单板块构造概念所预见的，不完全一致（例如，参见Anderson and Hobart, 1976; Sclater and Crowe, 1976）。

d. 热力非均一性，发生在构造圈的许多部分里（第九章）。这些异常（也称为“热点”）在简单板块构造概念的许多假设中，都占有主要地位。它们被认为是引起火山作用、隆升、板块破裂及板块运动的主要原因（例如，参见Birch, 1975; Thompson, 1976）。但简单板块构造概念，并未对这些热异常的起源、演化及现今特征的起因机制进行详细解释（同上）。构造圈式地球模式则认为，它们与优先热流的路线有关（第九章）。

e. 简单板块构造概念没有解释，在世界各个地区的那些可以计量的、长期、深位、空-时的相互关系，以及构造运动、变质作用与岩浆作用间的相互作用（例如，参见Belousov, 1976; Drake, 1976b）。

f. 依据简单板块构造概念解释地球变形的尝试，没有获得“任何明显的成绩”（例如，参见Anderson and Bolt, 1976）。

g. 根据简单地幔对流的概念，不能解释包括板块运动在内的、地表上的构造特征及

现象（例如，参见Whitehead, 1976; Tatsch, 1977d）。

### 与地球构造性状相关联的地震活动

有许多地震可以根据简单板块构造概念来解释，但有些则不能（例如，参见Lomitz, 1974; Tatsch, 1977a）。现将几个有代表性的例子概括如下：

- a. 大陆边缘下的地震断层面，并不与简单板块构造概念所假设的沉陷板块相平行。
- b. 在许多场合下，与地震相关联的断层面，并不是简单板块构造概念所假设的板块的上界或下界。
- c. 在许多场合下，地震活动一直延伸过整个大陆的边缘，向所假设的板块，却只是在某一深度上才是活动的，在其它的深度上则是不活动的。
- d. 深源地震趋向于集中在较小区域或“巢穴”中，而不是沿着所假设的沉陷板块的主导边缘。
- e. 观察自北美西南部横向剪切格局的资料，与由简单板块构造概念所预示的不相一致（例如，参见Abdel-Gawad and Tubbesing, 1976）。
- f. 大浅源地震沿消亡边界的分布，与从简单板块构造概念所预示的分布格局，不相一致（例如，参见Kelleher and McCann, 1976）。
- g. 看来大陆地壳的构造，比简单板块构造概念所认为的，要复杂得多（例如，参见Ez, 1976）。

### 与地球构造性状有关的矿床

看来地球上矿床的起源、演化及现今特征，与地球在过去46亿年间的构造性状之间，存在着密切的关系（例如，参见Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c, 1977d; 以及其中所引用的许多新近的参考文献）。但这种相关关系，看来要比得自简单板块构造概念的关系复杂得多（例如，参见Dasch, 1976; Kutina, 1976; Routhier, 1976; Strong, 1976; Thompson, 1976; Walker, 1976）。

由于在常见的文献中，对这些复杂性已有所概括，因此，在这里甚至是对一些有代表性的例子进行概括，也是毫无意义的了。

### 沉陷的岩石圈板块

简单板块构造的基本设想之一，就涉及岩石圈板块沉陷于地幔。据此概念，这些所设的沉陷板块，在其沉陷的地带，便生成了深海槽。在文献中，对涉及板块沉陷的这些及其它复杂情况已有所分析（例如，参见Dasch, 1976; Jahn等, 1976; Kutina, 1976; Noble等, 1975; Prince and Kulm, 1975; Routhier, 1976; Strong, 1976; Walker, 1976; 及其中所引用的参考文献）。

无须在地球构造圈演化的分析中，对这些及其它的有关沉陷板块性状的分析的细节进行讨论。这里只须提出，简单板块构造概念与构造圈式地球模式的假设之间的一个主要区别也就够了。

根据构造圈式地球模式的概念，深的深海槽并非产生于沉陷的板块，而是由此模式的基本驱动机制所引起的、深位的构造圈性状，创造出来的（第六章）。在构造圈式地球模

式的概念里，每当板块沉陷时，都是因为有一种作用于这些板块之上的、向下的不平衡力的缘故。这种力，主要由两种基本成分组成：（1）重力及（2）已经存在着的“开启的”深海槽。

简单地说，板块之所以沉陷，是因为已存在有深海槽。这一概念与简单板块构造的有所不同，后者认为，深海槽之所以出现在那里，是因为有板块在那里“挖了”一个沟，并沉陷于其中。对沉陷板块的这两种观点的这些及其它的根本区别，将在另一篇分析中，做较详细的讨论（Tatsch, 1977d）。

## 地球岩石圈的垂向运动

简单板块构造概念的一个经常受到批评的缺点是，它对于在地球历史的各个时期中，地表上大、小部分所曾受到的多次垂向运动的事例，很少或完全无所补充。有些造山与造陆的抬升与沉陷，约可追溯到46亿年前的“最早的太古代”。在简单板块构造概念中，却未包括关于这些垂向运动的起因（例如，参见Le Pichon等, 1973; Mckenzie and Parker, 1967; Morgan, 1968; 以及在这些文献之后发表的许多关于简单板块构造概念的论文）。

在“简明与精致的”简单板块构造概念出现之后，还需要一个与地表各个部分的垂向及水平运动都相协调的、更加复杂的、全球规模的体系。实际上，在某些学者的心目中，对于简单板块构造概念的进一步发展说来，这种需求可能是一难以逾越的障碍（例如，参见Van Bemmelen, 1976）。

其它观测者，则企图用“重力构造运动”，来说明地表上的这些垂向运动（例如，参见De Jong and Scholten, 1973）。但是，重力本身只能着手调整为某些其它的力所不能调整的那些状况（例如，参见Tatsch, 1977d）。重力不能引起全体隆升，而在地球形成以来，如非全部也是大部分的时期中，在地球上各个部分却已经历过全体隆升（同上）。

## 沉积作用与构造运动

沉积作用的许多方面，都具有构造含意。这些方面的大多数都表明，特定的沉积序列，是由相应的构造性状的区域性格局所激发的，但这种相联关系十分复杂（Dickinson, 1974; Dott and Shaver, 1974; Thompson, 1976）。

一如用简单板块构造概念所解释的，一个沉积盆地的演化，“可以看作是一系列不连续板块构造的调整及板块相互作用的结果，它们的各种效应，混合而成为一个发展的统一体”（例如，参见Dickenson, 1974b）。有些关于如何根据简单板块构造概念来分析沉积作用的解释，比起上面所说的，“书本气息”比较少些。但是，它们对于从事野外工作的石油地质工作者来说，即使有用，但也很少（例如，参见Chapman, 1973; Fischer and Judson, 1975; Tatsch从b到k; Thompson, 1976; Tiratsoo, 1973）。

## 石油矿藏

如果对地表上形成盆地的力有更多的认识，那么，对于油藏的勘探就会简单得多了（例如，参见Tatsch, 1973a, 1973b到k）。因为简单板块构造概念，不能解释为创造出盆地所必要的垂向运动，因而，这种概念对于石油勘探来说，只有“不大的影响”（例如，

参见Bullard, 1975; Fischer and Judson, 1975; Thompson, 1976)。

## 地球岩石圈板块的驱动机制

现在还不了解, 移动地球板块的能的主要来源。但看来所涉及的直接的力, 是由地球中热的不均一性激发的(例如, 参见Bullard, 1975)。关于记有这种驱动机制的其它最新观测结果, 参见拜比及肖尔(Bibee and Shor, 1976)、霍奇森(Hodgson等, 1976)、里查森等(Richardson et al, 1976)以及欣及莫尔纳(Shin and Molnar, 1975)的著作。

在另一篇分析中, 对地球性状的驱动机制这一课题, 有较详细的讨论(Tatsch, 1977d)。在这篇分析中, 是对整个地球(不只是地表)、及其全部历史(不只是过去的几亿年)的驱动机制, 进行了空-时的研究。

## 简单板块构造概念与其它全球构造概念间的比较与对照

从全球规模来考虑, 简单板块构造概念, 与许多其它的全局构造概念相类似。但是, 经过详细的研究证明, 它们是有重要的区别的。简单板块构造概念, 与其它全球构造概念之间的大多数相似之处, 系产生于它们都是以同样的观察资料为基础这一事实。

本书的目的, 不是分析简单板块构造概念与其它全球构造概念间的所有差别。但可以举出简单板块构造概念, 与作者在“构造圈式地球模式”中, 所包含的全局概念间的两点主要区别:

a. 没有为简单板块构造概念, 详细说明一驱动机制的几何学、力学、热力学及化学等诸方面的情况, 但为构造圈式地球模式的, 却做了详细说明(第六章)。

b. 构造圈式地球模式, 包含大约可回溯到过去46亿年的“最早太古代”的地球性状; 而简单板块构造概念却未能如此。在对这些区别的影响, 进行更加详细的分析时, 都用不上简单板块构造概念, 与构造圈式地球模式概念之间的这两种根本性的区别。请有兴趣的读者, 对此二种看法做出自己的评价。为了便于进行这种评价, 可以任意参考几本下述文献: (1) 关于简单板块构造概念(例如在本章前面几页中所提到的参考文献, 再加上Jordan等, 1976; Kahle, 1974; Meyerhoff and Mayerhoff, 1976; Oxburgh, 1975; Smith等, 1976a; Smith, 1976b; Truex, 1976; 以及这些文献中所援引的许多参考文献); 以及(2) 关于构造圈式地球模式概念(例如, Tatsch, 1973a, 1974b, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977a, 1977b, 1977c, 1977d)。

## 第十九章 小行星、陨石及玻陨石

对小行星、陨石及玻陨石所赖以产生的整个演化序列的分析，可用以解释这些太阳系的“岩石”之间，何以会发育出某些相似性及某些差异性。对这些相似性及差异性的分析，又依次会使有关地球构造圈系自原始太阳系发展而来的整个演化过程，有更清楚的了解 (Tatsch, 1977d)。

本章再述一下当地球构造圈正在发展着的那一46亿年期间，在该时限以内的小行星、陨石及玻陨石等的性状。据此，可将小行星、陨石及玻陨石演化性状的主要几何学、力学、热力学及化学等方面的情况，与地球构造圈现今状态的变量及性状格局联系起来。

### 小行星

小行星在火星轨道与木星轨道之间，形成一个行星碎屑带。大多数关于小行星演化的假说，都使用泰蒂乌斯-博德定律 (Titius-Bode Law) (例如，参见Roy, 1976; Nieto, 1972)，来假设，介于火星与木星轨道之间，发现存在小行星的地方，可以安放一个或可能两个行星轨道 (例如，参见Stacey, 1969; Tatsch, 1962, 1977d)。这便假定了小行星是灾变成因的，它们起源于一个或两个行星体系或母体系。

因为只有那些直径大于1公里的小行星才能探测出来，所以还不知道它们的精确数目、有些分析证明，小行星的“总数”随其体积的减小而急剧增加 (Blano and McKuskey, 1961)，这就意味着，小行星物质的总质量，是无法决定的 (Tatsch, 1977d)。

用于估计小行星年龄的分析证明，所设的陨石的“母体”，都是从一个共同的本源分异出来的。在一些假说里，这一共同的本源就是小行星，它们在能产生出陨石的小行星的分裂作用之前，还曾有过化学分异作用的历史。对陨石的分析证明，小行星的这种分异作用，大约发生在45亿年以前，或非常接近于发生在太阳系的开始阶段。

小陨石的贫缺表明，陨石都是小行星近期碰撞的产物，因为较老的小陨石，可能已被波因廷-罗伯桑效应 (Poynting-Robertson effect) 的力学所破坏 (Tatsch, 1977d)。假如有一次原始小行星的碎裂作用，曾发生于太阳系历史的很早时期中，譬如说在36亿年前到46亿年前之间，那么，所有那次碎裂作用凡是小于50厘米的产物，在很久以前，由于波因廷-罗伯桑效应，就已坠入于太阳之中 (Tatsch, 1977d)。

使用波因廷-罗伯桑效应、并结合宇宙线曝光资料所做的分析表明，在太阳系力学与概率律的脆弱平衡内，所有的陨石都可演化自：

- a. 一个或两个相当大的行星规模的天体。
- b. 许多小的小行星规模的天体。
- c. a与b的贯序组合 (例如，参见Stacey, 1969; Tatsch, 1962, 1977d)。

### 陨石

陨石是地球外的岩石状天体，可把它们分为三大类：陨铁、古橄铁镍陨石及石陨石。

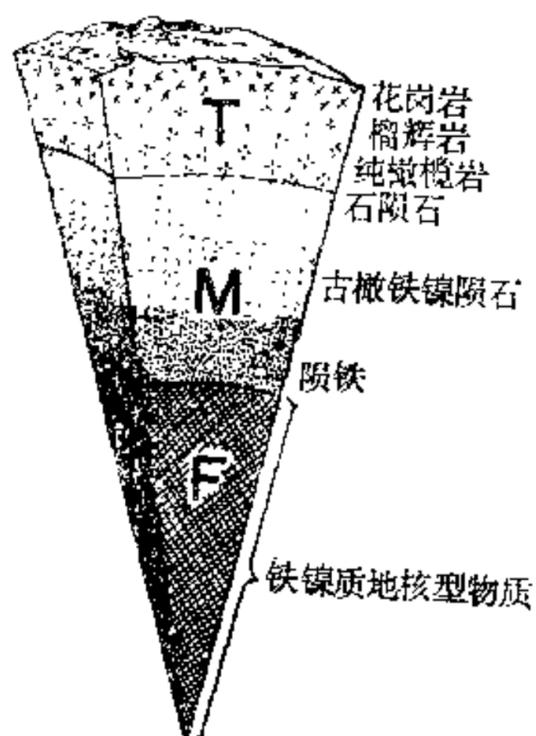


图 19-1 地球岩石 (T)、陨石 (M) 与铁镍质地核物质等系列的密切关系 (J.C.Holden 据作者初版中的略图修改而成)

陨铁或铁陨石，几乎全由铁-镍合金组成。古橄铁镍陨石，是铁-镍与重的，如橄榄石与辉石的，基性硅酸盐混合物。石陨石或石质陨石，几乎全由重的基性硅酸盐组成。

在此三类陨石之内或之间的过渡情况，说明它的成份形成一个大体几近完全的系列或连续体，而与地球岩石系列的“基性”端，良好相符 (Tatsch, 1977d)。

图19-1 表示出地球的成份系列，与陨石的成份系列的密切关系。系列内的过渡情况是，地面上的某些纯橄橄榄岩，与陨石中的某些石陨石相类似，而某些陨石质陨铁，则类似于某些铁镍质地核物质 (例如，参见 Chapman, 1976; Dymek 等, 1976; Stacey, 1976)。

陨石比过去一度想象的要复杂得多 (例如，参见 Ashworth and Barber, 1976; Dodd, 1976;

Dymek 等, 1976; Fodor and Keil, 1976; Graham 等, 1976; Grossman and Ganapathy, 1976; Kerridge, 1976; Stacey, 1976; Tatsumoto, 1976; Wilkening, 1975)。

### 凯波伊塔古铜钙长无球粒陨石 (The Kapoeta Howardite): 实例研究摘要

简单地说，看来凯波伊塔与月球一样，也大体经历过同样的复杂发展历史，包括：

a. 行星规模的母天体的岩浆分异作用。

b. 反复的粉碎化及角砾化。

c. 约在40亿年前 (不必须是由冲击作用造成的) 的一次岩浆事件 (例如，参见 Wilkening, 1975)。

d. 外来碎块的合并，其合并方式，与所预示的星体及星体原体的合并方式相同 (Tatsch, 1977d)。

月球母体与凯波伊塔母体间的原始差异，似乎在于粉碎化与角砾化时期的长短及强度 (例如，参见 Wilkening, 1975)。

### 玻陨石

玻陨石是在地表许多地方都发现过的、小而圆、富含二氧化硅玻璃的块片。这些瓶绿色到黑色的玻璃体包括，波希米亚及摩拉维亚的莫尔道熔融石；南澳大利亚的澳大利亚玻陨石；塔斯马尼亚东北部的昆斯汤玻陨石；东印度群岛的比利汤玻陨石；菲律宾的里扎尔玻陨石；东柬埔寨、越南及泰国的印度支那玻陨石；可能还包括某些利比亚沙漠的玻璃陨石。从地理上说，大多数玻陨石看来都沿着呈巨大圆环状延展的特提斯带 (第十五章) 而集中分布。集中程度较小的分布情况，则见于世界上的大部份地区。

已知的最大玻陨石，只有几十公斤重；大多数都比这小得多。玻陨石的形状最常见的有近圆球状、卵圆状、梨状、钮扣状、透镜状、哑铃状、纺锤状以及某些不规则的形状。

大多数玻璃陨石的表面，都以某种方式表现出被凿出凹痕、刻出沟槽以及受到模压，暗示曾飞翔穿过大气圈，但没有一个曾被看到是从天空上坠落下来的。

对于每个比较大的群集的自然地理区域（欧洲、澳大利亚、塔斯马尼亚、东印度群岛、菲律宾、印度支那及利比亚），玻璃陨石的年龄，与于其中发现它们的地质建造的年龄可以对比。但玻璃陨石的成份，却与那些地质建造毫不相干。玻璃陨石的年龄（即自它们是后一次熔融以来所消逝的时间），约在30万年到3500万年之间，而且这些年龄可分为四或五个不同的组，是由四次或五次事件产生的。如今已在地质上消失的更加古老的玻璃陨石，可能已产生在跨越地球历史的、其余99%的时间里的早期事件中。

所有的玻璃陨石都以其“熔融过”的外表，而与其它的玻璃陨石相似。在这方面，玻璃陨石与发现在月球上的某些“玻璃”相似（第二章）。

在某些演化假说中，认为所有的玻璃陨石都起源于月球；而在另一些假说里，则认为它们都起源于地球（例如，参见 Barnes and Barnes, 1973; O'Keefe, 1963; Geiss and Goldberg, 1963）。

### 陨石与小行星间的关系：摘要

还不了解陨石类天体与小行星类天体之间的确切关系（例如，参见Chapman, 1976）。但最好还是先总结一下，对这种关系知道了些什么及已作过何种设想：

- a. 天文资料表明，小行星可能曾是多类陨石的母体。
- b. 大多数小行星的表面与炭质球粒陨石相类似，而在它们中间，只有极少数才是石质-铁成份的。
- c. 在小行星带中，也认出有其它的陨石类型，但它们的数量很少。
- d. 为了把陨石从小行星带引进到地球上，似乎存在着某些动力学过程。
- e. 小行星的成份与距离太阳的远近有关系，这一趋势表明，在普通的小行星与炭质球粒陨石的星云状冷凝物（如果那里确曾存在这样的界限的话）之间的界限，应接近于如今小行星带的内缘。
- f. 现今小行星的表土很薄，不可能作为形成大多数角砾化及富气陨石所要求的环境。
- g. 如今组成着一些小行星的物质，在太阳系存在以来的前1000万年到1亿年之间，曾被加热到熔点，并发生过分异。
- h. 如今组成着其它一些小行星的物质，在那时受到变质。
- i. 如今组成着其它小行星的物质，在那时未受到热力的影响。
- j. 还没有为g、h及i项所提出的复杂热力学，设想出令人满意的机制。
- k. 有些证据表明，碰撞的热可为碰撞物体所埋藏与保留（例如，参见Wetherill, 1975）。
- l. 在小行星带中罕见的或缺失的陨石类型，包括某些主要的类型，例如，常见的球粒陨石、顽火辉石球粒陨石及一些非球粒陨石的类型。
- m. M-型小行星（可能是E成份），在小行星带的外部占有压倒优势，这一观察结果，看来与平衡浓缩模式不符，该模式将顽火辉石球粒陨石置于普通球粒陨石之内侧，从而比炭质球粒陨石，更接近于太阳。
- n. M-型小行星在许多方面都很象是，来自分异的、原始天体内部深处的、纯铁-镍

物质的残迹，而这种原始天体，是在太阳系历史的早期碎裂的（例如，参见Tatsch, 1977b, 1977d）。

o. 存在于小行星外层的有一颗可能是LL6成份的巨大小行星(349德姆鲍斯卡[Dembowska])，它的存在，仍然是个谜，因为难以设计出一种合理的动力学方案，以将这颗巨大的小行星，从更接近于太阳的区域，转移到其现今的轨道上来。

p. 上述及其它资料说明，应将LL6球粒陨石，看成是源自一个高度变质或分异的、含炭天体内部的深处。

q. 据上述，可将此形状不规则的德姆鲍斯卡小行星，视为一个被碎裂成介乎灶神星(Vesta)与S-型核心(the S-type cores)之间的、中间状态的母体。

## 地球、月球、陨石及小行星上岩石的相似性与差异性：摘要

来自地球、月球、陨石及小行星上的岩石，表现出许多相似之处，无论是在这些太阳系成员各个单元之内、或之间，都是如此。举例来说，朱文纳斯(Juvinas)钙长辉长岩、凯波伊塔(Kapoeta)古铜钙长岩及约翰斯汤(Johnstown)奥长古铜岩，都分布在沿FeO/MnO比值接近于35的一条直线上。陨石的母体，看来与来自地球及来自月球的有所不同。举例来说，钙长辉长岩的氧同位素成份，与来自月球的标本的，有显著差异（例如，参见Dymek等，1976）。然而详细的研究证明，除了存在个别的差异之外，地球、月球、陨石及小行星的岩石，却构成一种成份上的连续统一体。

## 用二元原始行星假说来解释小行星演化的天体力学问题

从天体力学的观点来看，小行星体系是太阳系中几何学-力学性状最良好的复合体之一。已对此体系的主要几何学、力学、热力学及化学诸方面进行过分析（例如，参见Tatsch, 1960, 1962, 1977d）。

这里只需要研究这些方面中的一个方面：即小行星的存在，应归功于其成生环境。就是说，根据二元原始行星假说，小行星之所以存在，是由于星体及星体原体（第一章）是在类地行星（水星、金星、地球及火星）与类木行星（木星、土星、天王星及冥王星）之间的范围内被创造出来的。在这种概念里，小行星带不是作为一“偶然事件”、而是作为太阳系性状良好的、可预期的演化后果而存在的。

在图19—2中用图解表示出，来自行星A及其原体A'的小行星带的演化。一如其它行星的演化系列（第一章），小行星体的质量中心(C)继续围绕在S方向上的太阳、并沿轨道路线(AA')运行。星体与星体原体的八分体，其原始碰撞区表示在IK处。

在二元原始行星假说的概念里，小行星与月球的演化序列，都具有高度的稳定性（第二章），而小行星体系的稳定性，约比月球体系的稳定性，高一个数量级（Tatsch, 1977d）。就月球演化体系而论，天体力学的分析可以证实，在几何学与力学上，是有可能为“暂时储存”现今至少组成着部份月球表面的、地球原体的原始碎块，而产生出一些延续几亿年的准稳定轨道的（Tatsch, 1974a）。在小行星演化序列方面，同样有可能为“暂时储存”据此模式现今构成着小行星带中物质总体的星体及星体原始的碎块，而产生半稳定的、持续几十亿年以上的轨道（也就是，在时间上大一个数量级（Tatsch, 1977d）。

如前面所指出过的（第一章），现今的小行星带，有可能是由介于火星与木星之间的、

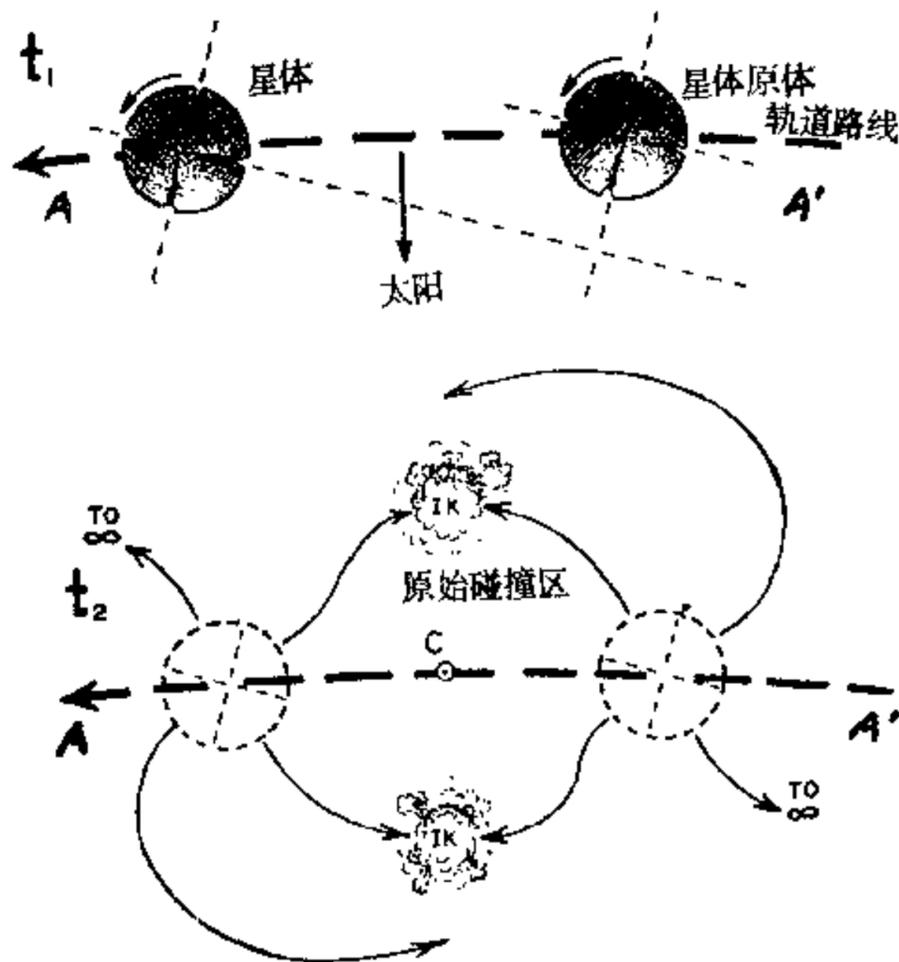


图 19—2 示意图表示根据二元原始行星假说的小行星带的演化  
(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

具平行轨道的、两个完全的行星体系发展而来的；即，行星体 I 和行星体 II，它们每个均具有其自己的“原体”，即行星 I 原体、及行星 II 原体。这种可能性并不会改变任一分析的结果，即（像这样的）使用一级二元原始行星假说所得到的分析结果。

### 小行星对陨石及对太阳系其它岩石的关系

根据二元原始行星假说，小行星与地球的、月球的及陨石的岩石，有着最为原始的（“亲堂兄弟的”）关系。根据这一概念，在原始太阳系的演化序列中（第一章及 Tatsch, 1977d），小行星带曾于火星与木星的轨道之间，形成过构成所设行星及行星原体（或两个这样的“小行星状”行星，即行星 I 及行星 II）的残余物。

如前节所述，所假设的行星及其“原体”，都分裂成为各自的八分体状部份。这些八分体状部份，当它们继续围绕太阳运转时，在示于图19—2中的原始碰撞范围扩大时，会依次进一步碎裂，而形成小行星。

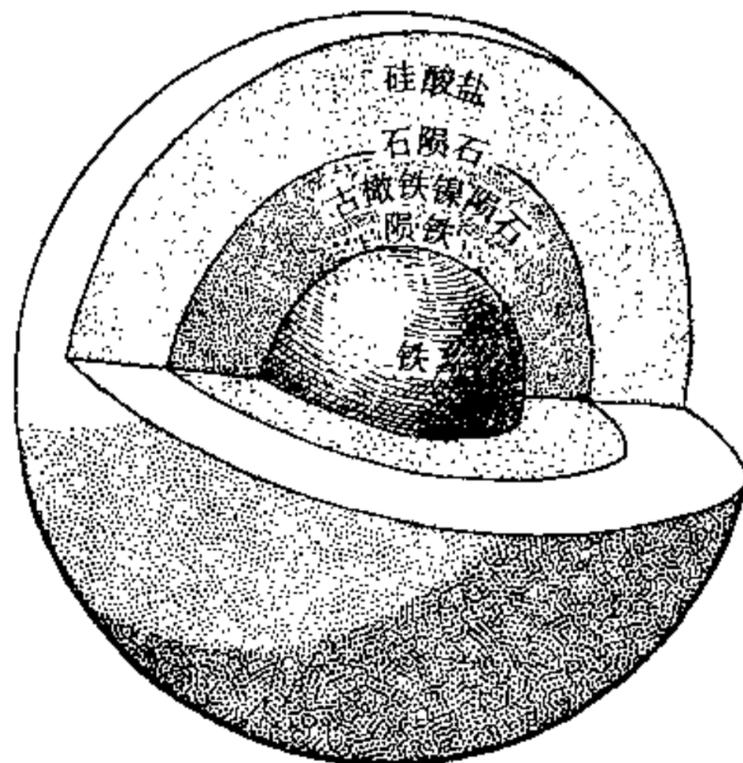


图 19—3 示意图表示约在过去 36 亿年到 46 亿年前，即在随后使这些八分体碎裂成小行星的碰撞发生之前，从成份上看，所假设的行星体可能具有的形态

(J. C. Holden 据作者初版中的略图修改而成)

图19—3示意地表示出，所假设的行星星体在恰好于初次分裂以后其可能具有的形态，

也就是说，于过去36亿至46亿年间，将这些八分体碎裂成为小行星的多次碰撞中的第一次碰撞以前的情况。有关这种可能性的含意，将在另一篇分析中 (Tatsch, 1977d) 详加讨论。

## 第二十章 积成的地球及其未来

在分析地球构造圈的演化时，可以根据许多观点中的一种观点，来对积成的地球进行讨论。现将其中的三种例举如下：

a. 从哲学的观点，强调积成地球在积成的宇宙中的作用。

b. 从天体力学的观点，强调积成地球的几何学-力学性状，如何在将来会继续象在过去46亿年间那样，保持良好。

c. 从生态学的观点，强调如何运用构造圈式地球模式来造福人类。

本章是用上述三种观点中的最后一种，来作为总结几种方法的基础的，利用此模式可以帮助人类有计划地享受地球的益处、避免其灾难、保护其景观。至于在a及b里所表达的观点，已包括在其它两篇分析中（分别在Tatsch, 1977e及1977d中），因此这里无须考虑。

### 地球生态学及人类生态学的问题

在研究解决地球与人类的生态学问题时，我们必须考虑，选择哪些方法才能使人类享受到工业化的益处、而不会对环境造成无可挽救的破坏。举例来说，地球显然无法支撑，人们以指数的增大速度，来使用其有限的资源与能源的（Tatsch, 1973a）。

因勘探、钻探、挖掘矿物及非矿物宝藏而对环境的破坏与蹂躏，目前还没有牵涉到广大的区域。但由于对燃料及金属的需求日趋扩大，同向所需要的地域也将越来越大。任何可以减少这些地域的面积、及减轻违背此区域环境的技术与方法，都将造福于人类及其子孙后代。

在原子能燃料，能够满足我们对能源的需求之前的很长的时期里，由于现今石油及天然气储量的枯竭，将需要增加烧煤的数量。采煤，尤其是露天开采，会造成严重的地面污染。当煤矿赋存于陡峭地形中时，达种情况更加严重（例如，参见Tatsch, 1977c）。

油页岩是能源的另一种来源，但油页岩的热化学性状，也引起了一些环境问题（例如，参见Tatsch, 1974b）。这些问题中较比突出的是：

a. 每吨油页岩大约只能产出一桶石油。

b. 为了从页岩中提取石油，需要有很大的污染-喷射炼油厂。

c. 提炼后的页岩残渣，比未加工的页岩多10%。

总之，能源与金属工业，给人类的未来造成严重的生态学问题。这些问题只有通过一种承认、并考虑两方面问题的建设性途径，才能很好地得到解决：（1）人类需要具有能源及其它矿产资源，以维持其美好生活；（2）他们必须找出能取得这些资源、而对环境只造成最小破坏的方法。

就此而论，极端的自然资源保护者必须意识到，虽说停止勘探或加工自然资源可以保护环境，但也势必摧毁人类。此外，极端的开发主义者也必须意识到，为取得地球资源所进行的无限制地开发，必须破坏希望享用这些资源的人类的生活环境。

这就需要有考虑周全的规划、积极的努力与及时的行动。可以运用构造圈式地球模式作为一种“生态学工具”，以补充这一规划、努力及行动。

### 作为生态学工具的构造圈式地球模式

如果人们详细了解了地球的几何学、力学、热力学及化学的性状，他们就能够在满足其对自然资源的需求的同时，采取必要的措施以保护其环境。举例来说，人们能够利用有关对地球主要起因机制的详尽知识，来分析能源及金属矿床的起源、演化、迁移及现今的聚积。他们还能利用对地球应力格局的起源、演化及破坏性效应的详尽知识，来分析地震的起因、做出预测及进行控制（例如，参见Tatsch, 1977a）。同样，他们也能利用对地热格局的起源、演化及变化的详尽知识，来分析火山的起因、做出预测及进行控制（例如，参见Tatsch, 1976b）。

所以，在详细了解了构造圈及其在过去46亿年间于1000公里深处的性状之后，人类就能够根据自然资源及环境灾害，来估计地球的现今性状。

构造圈式地球模式，提供了一种有助于这种估计的基本生态学工具。关于此模式对上述问题的具体应用，在其它的分析中已有所讨论（例如，参见Tatsch, 1973a, 1973b到k, 1974a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977a, 1977b, 1977c）。

### 为保护环境而设计的选择性勘探、钻探及采矿的模序

意义不明确资料，使得难以详细说明矿产资源（例如，参见 Babcock, 1976; Barker 等, 1976; Goldschmidt, 1954; Hodder and Hollister, 1976; Hodgson 等, 1976; Johnson, 1976; Krauskopf, 1971; Levorson, 1967; Thamm, 1976）。

与矿床起因、演化、迁转、富集及侵位有关的作用，似乎构成一个包括炽热岩浆及地球动力活动的多阶段序列，其中包括（例如，参见Tatsch, 1977d）：

- a. 地下岩浆的侵入、冷却及分异作用。
- b. 地表的火山作用及其它喷出活动。
- c. 变质作用的完整序列。
- d. 由于地表水及地下水的活动，所产生的侵蚀、风化及淋滤作用。

构造圈式地球模式，为“选择性”勘探、钻探及采矿程序，提供了一种手段。此手段可以提供两类益处：（1）一种更加经济的用于寻找矿物及非矿物矿床的方法；及（2）通过消除在无经济价值的矿区中不必要的挖掘与钻探，来保护环境的方法（例如，参见Tatsch, 1973b到k）。

用以探讨矿产勘探问题的构造圈式地球模式，是建立在十分简单的前提之下的：如果一个人今天知道地球上所有矿床于46亿年前曾存在于什么地方，并且他能详细说明，地球于过去46亿年间的几何学、力学、热力学及化学的性状，那么，他必然能够预测这些矿床的现今的位置（例如，参见Tatsch, 1973a, 1973b到k, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c）。

### 各类矿床间的某些空-时联系

观察资料表明，地球的各类矿床间，存在一定的空-时关系。举例来说，在欧洲就存

在与海西期地震构造岩浆活动事件相关的两种基本类型的金属矿床，其它的类型，则与较早或较晚期的造山运动事件相关（例如，参见 Routhier, 1976）。在一给定的时间范围内，这些共生体似乎形成长条状或带状格局（同上；Tatsch, 1973a）。这种情况在大陆（及板块）之内，以及在沿着大陆（及板块）的边缘，都是一样（例如，参见 Dixon and Pereira, 1974; Mitchell and Garson, 1972; Sawkins, 1976b; Sillitoe, 1972a, 1972b, 1972c, 1974; Tatsch, 1973a, 1973b到k, 1975a, 1975b, 1976a, 1976b, 1977b, 1977c）。

可以根据见于地球地震构造岩浆带内的各不相同的几何学、力学、热力学及化学的不均一性，来对各个成矿省内的空-时联系进行分析。已在全球规模上对各种各样的矿床进行了这种分析，其中包括：煤矿（Tatsch, 1977c）、铜矿（Tatsch, 1975a）、地热储（Tatsch, 1976b）、金矿（Tatsch, 1975b）、石油矿藏（Tatsch, 1973b到k）及铀矿（Tatsch, 1976a）。

运用构造圈式地球模式，对其它矿物资源的分析工作仍在进行中。所有的分析，都是以寻求最有效的方法、来对矿产资源进行定位及开采、而对环境只造成最少量破坏的方法为目标的。简单地说，清楚了解地球上不同矿床类型间的空-时联系，便能很好地完成此项工作。而根据例如像构造圈式地球模式这样的—一个长期、深位、全球性模式，就能对这些联系做出最好的解释。

## 参 考 文 献

说明：下列参考书目的编排顺序，是按照在本书正文中，所同时用到它们的顺序来编排的。举例来说，“Jones, J. C., 1976”排在“Jones, R. M. 1974”之后，这是因为这两条有可能作为“Jones, 1974, 1976”而被同时引用。同样地，“Jones, Brown, and Smith, 1975”排在“Jones, Williams and Brown, 1973”之后，这是因为这两条有可能作为“Jones等, 1973, 1975”而被同时引用。

附在年代后面的字母（如，Jones, 1974a, 1975c），指的是我们主参考书目内条目的顺序编排，并非其所有的条目都会出现在本书的参考书目中。字母 a 表示这是列入我们主参考书目中的第二个“Jones, 1974”，第一个则单纯使用“Jones, 1974”。

在本参考书目的末尾，对用于此参考书目中的略语，做了解释。

NOTE: The following bibliographic items are arranged in the order in which they would appear when used together in the body of the text. For example, "Jones, J. C., 1976" appears after "Jones, R. M., 1974", because these two items would be cited as "Jones, 1974, 1976". Similarly, "Jones, Brown, and Smith, 1975" appears after "Jones, Williams, and Brown, 1973", because these two items would be cited as "Jones et al., 1973, 1975".

The letters following the year (e. g., Jones, 1974a, 1975c) refer to the ordering of items within our master bibliography, not all items of which appear in the bibliography of this book. The letter a means that this was the second "Jones, 1974" entered into our master bibliography, the first being simply "Jones, 1974".

The abbreviations used in this bibliography are explained at the end of the bibliography.

Abdel-Gawad, M., and Tubbesing, L., 1976. Transverse shear in southwestern North America: A tectonic analysis. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 61-81.

Abramowitz, M., and Stegun, I. A. (Editors), 1964. Handbook of Mathematical Functions. National Bureau of Standards, Washington, 1046 pp.

Agarwal, N. K., Jacoby, W. R., and Berckhemer, H., 1976. Teleseismic P-wave travelttime residuals and deep structure of the Aegean region. Tectonophys., 31, 33-57.

Agricola, G., 1556 (1912, 1950) De Re Metallica. Transl. by

H. C. and L. H. Hoover. Dover, New York, 638 pp.

Ahmad, F., 1973. Have there been major changes in the Earth's axis of rotation through time? In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 487-501.

Ahrens, L. H. (Editor), 1968. Origin and Distribution of the Elements. Pergamon, New York, 1178 pp.

Ahrens, T. J., 1973. Petrologic properties of the upper 670 km of the Earth's mantle; geophysical implications. Phys. Earth Planet. Int., 7, 167-186.

Ahrens, T. J., and Schubert, G., 1975. Rapid formation of eclogite in a slightly wet mantle. Earth Planet. Sci. Ltr., 27, 90-94.

Aki, K., Christoffersson, A., and Husebye, E. S., 1976. Three-dimensional seismic structure of the lithosphere under Montana LASA. Bull. Seis. Soc. Amer. Bull., 66, 501-524.

Alfven, H., 1954. On the Origin of the Solar System. Clarendon, Oxford, 191 pp.

Alfven, H., 1965. Origin of the Moon. Science, 148, 476.

Alfven, H., and Arrhenius, G., 1969. Two alternatives for the history of the Moon. Science, 165, 11-17.

Alfven, H., and Arrhenius, G., 1970. Mission to an asteroid. Science, 167, 139.

Alfven, H., and Arrhenius, G., 1975. Structure and Evolutionary History of the Solar System. Reidel, Dordrecht, 276 pp.

Allan, D. W., 1962. On the behavior of systems of coupled dynamos. Proc. Cambr. Phil. Soc., 58, 671-693.

Allan, D. W., Thompson, W. B., and Weiss, N. O., 1967. Convection in the Earth's mantle. In: S. K. Runcorn (Editor), Mantles of the Earth and Terrestrial Planets. Interscience, New York, pp. 507-512.

Aldredge, L. R., and Hurwitz, L., 1964. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. J. Geophys. Res., 69, 2631-2640.

Alvarez, W., 1973. The application of plate tectonics to the

Mediterranean region. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 893-908.

Alvarez, W., 1976. A former continuation of the Alps. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 891-896.

Amerigian, C., 1974. Seafloor dynamic processes as the possible cause of correlations between paleoclimatic and paleomagnetic indices in deep-sea sedimentary cores. Earth Planet. Sci. Ltr., 21, 321-326.

Amstutz, G. C., and Bernard, A. J. (Editors), 1973. Ores in Sediments. Springer-Verlag, Berlin, 350 pp.

Anderson, R. N., 1974. Cenozoic motion of the Cocos plate relative to the asthenosphere and cold spots. Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 175-180.

Anderson, D. L., 1975. Chemical plumes in the mantle. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 1593-1600.

Anderson, T. A., 1975a. Carboniferous subduction complex in the Harz Mountains, Germany. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 77-82.

Anderson, P., 1976. Ocean crust and arc-trench gap tectonics in southwestern British Columbia. Geology, 4, 443-446.

Anderson, O. L., and Bolt, B. A. (Editors), 1976. Theory and Experiment Relevant to Geodynamic Processes. Elsevier, Amsterdam, 293 pp.

Anderson, D. L., and Hart, R. S., 1976. An Earth model based on free oscillations and body waves. J. Geophys. Res., 81, 1461-1476.

Anderson, R. N., and Hobart, M. A., 1976. The relation between heat flow, sediment thickness, and age in the eastern Pacific. J. Geophys. Res., 81, 2968-2989.

Anderson, R. N., and Langseth, M. G., 1976. New terrestrial heat flow measurements on the Nazca plate. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 243-254.

Anderson, R. N., Clague, D. A., Klitgord, K. D., Marshall, M., and Nishimori, R. K., 1975. Magnetic and petrologic variations along the Galapagos spreading center and their relation to the Galapagos

melting anomaly. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 683-694.

Anderson, R. N., Moore, G. F., Schilt, S. S., Cardwell, R. C., Trehu, A., and Vacquier, V., 1976. Heat flow near a fossil ridge on the north flank of the Galapagos spreading center. J. Geophys. Res., 81, 1828-1838.

Andrews, D. J., 1975. A numerical investigation of the thermal state of the Earth's mantle. Tectonophys., 25, 177-186.

Anguita, F., and Hernan, F., 1975. A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary Islands. Earth Planet. Sci. Ltr., 27, 11-19.

Anhaeusser, C. R., 1975. Precambrian tectonic environments. In: Donath et al. (Editors) (q. v.), pp. 31-53.

Anhaeusser, C. R., 1976. Archean metallogeny in southern Africa. Econ. Geol., 71, 16-43.

Anon., 1971b. Deep sea drilling project: Leg 14. Geotimes, 16(2), 14-17.

Anon., 1971c. On to the Caribbean. Geotimes, 16(1), 27-30.

Anon. (Editor), 1975. Proceedings of the Ninth World Petroleum Congress, v. 2 (Geology). Allied Science Publishers, London, 378 pp.

Anon., 1976a. Earthquake Prediction: Opportunity to Avert Disaster, Circ. 729. U. S. Geol. Survey, Washington, 35 pp.

Arana, V., and Vegas, R., 1974. Plate tectonics and volcanism in the Gibraltar arc. Tectonophys., 24, 197-212.

Arculus, R. J., 1976. Geology and geochemistry of the alkali basalt-andesite association of Grenada, Lesser Antilles island arc. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 612-624.

ARCYANA (Francheteau, J., and 7 others), 1975. Transform fault and rift valley from bathyscaph diving saucer. Science, 190, 108-116.

Argand, E., 1916. Sur l'arc des Alpes occidentales. Eclogae Geologicae Helvetiae, 16, 179-182.

Arkhangelsky, A. D., 1941. Geological Structure and Geological History of the U. S. S. R. Gostoptektizdat, Moscow, 376 pp.

- Armstrong, R. L., 1975. Episodic volcanism in the central Oregon Cascade Range: Confirmation and correlation within the Snake River Plain. Geology, 3, 356-357.
- Artemjev, M. E. and Artyushkov, E. V., 1971. Structure and isostasy of the Baikal rift and the mechanism of rifting. J. Geophys. Res., 76, 1197-1211.
- Arth, J. G., and Hanson, G. N., 1975. Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northeastern Minnesota. Geochim. Cosmochim. Acta, 39, 325-362.
- Artyushkov, E. V., 1974. Can the Earth's crust be in a state of isostasy? J. Geophys. Res., 79, 141-752.
- Asada, T., and Shimamura, H., 1976. Observation of earthquakes and explosions at the bottom of the western Pacific: Structure of the oceanic lithosphere revealed by longshot experiment. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 135-153.
- Ashgirei, G. D., 1974. Origin of continental crust. Geology, 2, 401-404.
- Ashworth, J. R., and Barber, D. J., 1976. Lithification of gas-rich meteorites: Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 222-233.
- Athvale, R. N., 1973. Inferences from recent Indian paleomagnetic results about the northern margin of the Indian plate and the tectonic evolution of the Himalayas. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 117-130.
- Atwater, T., 1973. Studies of seafloor spreading and plate movements in the Pacific basin. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 213-217.
- Aubouin, J., 1965. Geosynclines. Elsevier, Amsterdam, 335 pp.
- Audley-Charles, M. G., 1975. The Sumba fracture: A major discontinuity between eastern and western Indonesia. Tectonophys. 26, 213-228.
- Austin, P. M., 1975. Paleogeographic and paleotectonic models for the New Zealand geosyncline in eastern Gondwanaland. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 1230-1234.
- Baadsgaard, H., Lambert, R. G. J., and Krupicka, J., 1976.

Mineral isotopic age relationships in the polymetamorphic Amitsoq gneisses, Godthaab District, West Greenland. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 513-527.

Babcock, E. A., 1976. Bedrock jointing on the Alberta plains. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 142-152.

Badham, J. P. N., and Halls, C., 1975. Microplate tectonics, oblique collisions, and evolution of the Hercynian orogenic systems. Geology, 3, 373-376.

Baird, A. K., Morton, D. M., Woodford, A. O., and Baird, K. W., 1974. Transverse Range Province: A unique structural-petrochemical belt across the San Andreas fault system. Geol. Soc. Amer., Bull., 85, 163-174.

Bak, J., Korstgard, J., and Sorensen, K., 1975. A major shear zone within the Nagssugotoqidian of West Greenland. Tectonophys., 27, 191-209.

Bakor, A. R., Gass, I. G., and Neary, C. R., 1976. Jabal al Wask, northwest Saudi Arabia: An Eocambrian back-arc ophiolite. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 1-9.

Baldwin, R. B., 1963. The Measure of the Moon. Univ. of Chi. Press, Chicago, 488 pp.

Ballance, P. F., 1976. Evolution of the upper Cenozoic magmatic arc and plate boundary in northern New Zealand. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 356-370.

Ballard, R. D., Bryan, W. B., Heirtzler, J. R., Keller, G., Moore, J. G., and Van Andel, Tj., 1975. Manned submersible observations in the FAMOUS area: Mid-Atlantic Ridge. Science, 190, 103-108.

Barabashov, N. P., Mikhailov, A. A., and Lipskiy, Yu. N. (Editors), 1961. Atlas of the Other Side of the Moon. Pergamon, Oxford, 141 pp.

Barazangi, M., and Dorman, J., 1969. World seismicity map of ESSA Coast and Geodetic Survey epicenter data for 1961-1967. Bull. Seis. Soc. Amer., 59, 369-380.

Barazangi, M., Pennington, W., and Isacks, B., 1975. Global

study of seismic wave attenuation in the upper mantle behind island arcs using pP waves. J. Geophys. Res., 80, 1079-1092.

Barberí, F., Bonatti, E., Marinelli, G., and Varet, J., 1974. Transverse tectonics during the split of a continent: Data from the Afar Rift. Tectonophys., 23, 17-29.

Barbey, P., 1975. The Adam Talha epizonal sequence (North Mauritania) and a general scheme for the Eburnean orogenic belt of west Africa. Precamb. Res., 2, 255-262.

Barker, F., 1976. Archean sequence of the southwestern Big Horn Mountains, Wyoming. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 568.

Barker, F., Arth, J. G., Peterman, Z. E., and Friedman, I., 1976. The 1.7 to 1.8 b. y. old trondhjemites of southwestern Colorado and northern New Mexico: Geochemistry and depth of genesis. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 189-198.

Barker, F., Millard, H. T., and Reed, J. C., Jr., 1976a. Geochemistry of the Webb Canyon Gneiss, Teton Range, Wyoming: An Archean bimodal rhyodacite-tholeiite pair. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 268-269.

Barnea, J., 1976. The Earth and its hot unknown interior. Geotherm. En., 4(4), 63-65.

Barnes, V. E., and Barnes, M. A. (Editors), 1973. Tektites. Dowden, Hutchinson, & Ross, Stroudsburg, Penna., 445 pp.

Barrell, J., 1914. The strength of the Earth's crust, part 5. J. Geol., 22, 441-468.

Barrell, J., 1914a. The strength of the Earth's crust, part 6. J. Geol., 22, 655-683.

Barton, D. C., Ritz, C. H., and Hickey, M., 1963. Gulf coast geosyncline. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 17, 1446-1458.

Basu, A. R., 1975. Hotspots, mantle plumes, and a model for the origin of ultramafic xenoliths in alkali basalts. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 261-274.

Baumann, L., 1976. Introduction to Ore Deposits. Wiley, New York, 131 pp.

Baumann, A., Best, G., Gwosdz, W., and Wachendorf, H., 1976.

通  
1  
0  
5  
7

The nappe pile of eastern Crete. Tectonophys., 30, T33-T40.

Baumgardt, D. R., and Alexander, S. S., 1976. Evidence for lateral heterogeneity in the lower mantle beneath continents and oceans from PcP-P residual anomalies. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 283-284.

Beck, R. H., Lehner, P., Diebold, P., Bakker, G., and Doust, H., 1975. New geophysical data on key problems of global tectonics. In: Anon. (Editor) (q. v.), pp. 3-17.

Beckmann, G. E. J., and Mitchell, J. G., 1976. Paleomagnetic and geochronological work in central West Greenland. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 269-280.

Begemann, F., Weber, H. W., Vilcsek, E., and Hinterberger, H., 1976. Rare gases and <sup>36</sup>Cl in stony-iron meteorites: Cosmogenic elemental production rates, exposure ages, diffusion losses, and thermal histories. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 353-368.

Bell, J. S., 1971. Seafloor spreading through gravity sliding. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 3, 368.

Belousov, V. V., 1962. Basic Problems in Geotectonics. McGraw-Hill, New York, 316 pp.

Belousov, V. V., 1968. Some general aspects of development of the tectonosphere. In: Benes (Editor) (q. v.), pp. 9-17.

Belousov, V. V., 1969. Interrelations between the Earth's crust and upper mantle. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 698-712.

Belousov, V. V., 1970. Against the hypothesis of oceanfloor spreading. Tectonophys., 9, 489-511.

Belousov, V. V., 1976. History and interactions of tectonic, metamorphic, and magmatic processes. In: Drake (Editor)-(q. v.), pp. 190-192.

3  
Belousov, V. V., and Sholpo, V. N., 1976. Geodynamics of the eastern part of the Mediterranean Alpine Belt. Tectonophys., 35, 27-43.

Belyaevsky, N. A., and 10 others, 1976. Lithospheric structure along a profile from the Black Sea to the Polar Urals. Tectonophys., 33, 359-378.

終

- Benard, H., 1900. Tourbillions cellulaires dans une nappe liquide. Rev. Gen. Sci., 11, 1261-1271, 1328.
- Ben-Avraham, Z., and Nur, A., 1976. Slip rates and morphology of continental collision belts. Geology, 4, 661-664.
- Bence, A. E., Papike, J. J., and Ayuso, R. A., 1975. Petrology of submarine basalts from the central Caribbean: DSDP Leg 15. J. Geophys. Res., 80, 4775-4804.
- Benes, K. (Editor), 1968. Upper Mantle (Geological Processes). Academia, Prague, 260 pp.
- Benioff, H., 1959. Circum-Pacific tectonics. Publ. Dom. Obs. Ottawa, 20, 395-402.
- Benioff, H., 1963. Source wave forms of three earthquakes. Seis. Soc. Amer. Bull., 53, 893-897.
- Bennett, G. T., Clowes, R. M., and Ellis, R. M., 1975. A seismic refraction survey along the southern Rocky Mountain Trench, Canada. Seis. Soc. Amer. Bull., 65, 37-54.
- Bentley, C. R., 1964. The structure of Antarctica and its ice cover. In: H. Odishaw (Editor), Research in Geophysics, vol 2. MIT Press, Cambridge, pp. 225-389.
- Bentley, L. R., 1974. Crustal structure of the Carnegie ridge, Panama basin, and Cocos ridge. MS thesis, Dept. Geol. Geophys., Univ. Hawaii, Honolulu.
- Berman, E. R., 1975. Geothermal Energy. Noyes Data Corp., Park Ridge, NJ, 336 pp.
- Berry, W. B. N., and Boucot, A. J., 1968. Continental development from a Silurian viewpoint. In: Misik (Editor) (q. v.), pp. 15-23.
- Bertrand, M., 1887. La chaine des Alpes et la formation du continent europeen. Soc. Geol. France Bull., 15, 423-477.
- Best, M. G., 1975. Migration of hydrous fluids in the upper mantle and potassium variation in calc-alkalic rocks. Geology, 3, 429-432.
- Betz, F., Jr., and Hess, H. H., 1942. The floor of the North Pacific Ocean. Geogr. Rev., 32, 99-116.

Bibee, L. D., and Shor, G. G., 1976. Compressional wave anisotropy in the crust and upper mantle of the Pacific. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 333.

Bickford, M. E., and Mose, D. G., 1975. Geochronology of Precambrian rocks in the St. Francois Mountains, southeastern Missouri. Geology, 3, 537-540.

Bickle, M. J., Martin, A., and Nisbet, E. S., 1975. Basaltic and peridotitic komatiites and stromatolites above a basal unconformity in the Belingwe greenstone belt, Rhodesia. Earth Planet. Sci. Ltr., 27, 155-162.

Binz, C. M., Ikramuddin, M., Bey, P., and Lipschutz, M. E., 1976. Trace elements in primitive meteorites: IV, Abundance patterns of thirteen trace elements and interelement relationships in unequilibrated ordinary chondrites. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 59-71.

Birch, F. S., 1975. Conductive heat flow anomalies over a hot spot in a moving medium. J. Geophys. Res., 80, 4825-4827.

Bird, J. M., 1970. General concepts of orogenesis in terms of lithospheric plate tectonics. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 2, 733-734.

Bird, J. M., and Dewey, J. F., 1970. Lithospheric plate - continental margin tectonics and the evolution of the Appalachian orogen. Geol. Soc. Amer. Bull., 81, 1031-1060.

Bird, P., and Phillips, J. D., 1975. Oblique spreading near the Oceanographer fracture. J. Geophys. Res., 80, 4021-4027.

Bischke, R. E., 1976. Secular horizontal displacements: A method for predicting great thrust earthquakes and for assessing earthquake risk. J. Geophys. Res., 81, 2511-2516.

Blackett, P. M. S., Bullard, E. C., and Runcorn, S. K. (Editors), 1965. A symposium on continental drift. Phil. Trans. Roy. Soc., A, 258, 1-40.

Blackwell, D. D., 1971. Heat flow. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 1135-1139.

Blakely, R. J., 1976. An age-dependent, two-layer model for

marine magnetic anomalies. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 227-234.

Blanco, V. M., and McCuskey, S. W., 1961. Basic Physics of the Solar System. Addison-Wesley, Reading, pp. 179 et seq.

Blatt, H., and Jones, R. L., 1975. Proportions of igneous, metamorphic, and sedimentary rocks. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 1085-1088.

Blot, C., 1972. Volcanisme et seismes du Manteau Superieur dans l'archipel des Nouvelles Hebrides. Bull. Volcanol., 36, 446-461.

Bode, J. E., 1772. Anleitung zur Kenntniss des Gesternen Firmels, 2d ed. Hamburg, 462 pp.

Bolt, B. A., 1976. Nuclear Explosions and Earthquakes: The Parted Veil. Freeman, San Francisco, 309 pp.

Bonatti, E., 1975. Metallogenesis at oceanic spreading centers. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 3, 401-431.

Bonatti, E., Zerbi, M., Kay, R., and Rydell, H., 1976. Metaliferous deposits from Apennine ophiolites: Mesozoic equivalents of modern deposits from ocean spreading centers. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 83-94.

Bondarchuk, V. G., 1944. Geomorphology in geosynclines. Izv. Acad. Sci. USSR, Geol. Ser., 1, 107-112.

Born, A., 1923. Über Werden und Zerfall von Kontinental-gebirgen. Forsch. Geol. Paleontol., 10(32), 348.

Borradaile, G. J. (Editor), 1975. Progress in Geodynamics. North Holland, Amsterdam, 245 pp.

Bosshard, E., and MacFarlane, D. J., 1970. Crustal structure of the western Canary Islands from seismic refraction and gravity data. J. Geophys. Res., 75, 4901-4918.

Bott, M. H. P., Browitt, C. W. A., and Stacey, A. P., 1971. The deep structure of the Iceland-Faeroe ridge. Mar. Geophys. Res., 1, 328-332.

Bowen, R. L., 1974. The enigma of late Paleozoic orogeny in southeastern North America. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 6, 336-

- Bowen, R. L., 1976. Mass balances of the conservative Earth: Some examples. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 7.
- Bowin, C., 1974. Migration of a pattern of plate motion. Earth Planet. Sci. Ltr., 21, 400-404.
- Brecher, A., 1976. Textural remanence: A new model of lunar rock magnetism. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 131-143.
- Briden, J. C., 1969. Intercontinental correlations based on paleomagnetic evidence for recurrent continental drift. In: Gondwana Stratigraphy, UNESCO, Paris, pp. 421-439.
- Briden, J. C. (Editor), 1976. Ancient Plate Margins. (Tectonophysics, 33(3/4)). Elsevier, Amsterdam, 171 pp.
- Bridgwater, D., and McGregor, V. R., 1974. Field work on the very early Precambrian rocks of the Isua area, southern West Greenland. Gron. Geol. Undersog. Rapp., 65, 49-59.
- Bridgwater, D., Watson, T., and Windley, B. F., 1973. The Archean craton of the North Atlantic region. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., A, 273, 493-501.
- Brobst, D. A., and Pratt, W. P. (Editors), 1973. United States Mineral Resources. Govt Ptg Off, Washington, D. C., 722 pp.
- Brock, B. B., 1972. A Global Approach to Geology: The Background of a Mineral Exploration Strategy Based on Significant Form in the Patterning of the Earth's Crust. Balkema, Cape Town, 365 pp.
- Brock, A., 1973. Precambrian polar wander and continental drift of Africa and North America: Some comments. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 33-36.
- Brouwer, D., and Clemence, G. M., 1961. Methods of Celestial Mechanics. Academic, New York, pp. 260-et seq.
- Bryan, W. B., 1976. Compositional variation and petrogenesis in basalt glasses from the Atlantic, Pacific, and Indian Oceans. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 572-573.
- Bucher, W. H., 1933. The Deformation of the Earth's Crust. Princeton Univ. Press, Princeton, 518 pp.
- Bucher, W. H., 1950. Megatectonics and geophysics. Trans. Amer. Geophys. Un., 31, 495-507.

- Bucher, W. H., 1955. Deformation in orogenic belts. In: Poirdervaart (Editor), The Crust of the Earth. Geol. Soc. Amer., New York, pp. 343-368.
- Bucher, W. H., 1956. Role of gravity in orogenesis. Geol. Soc. Amer. Bull., 67, 1295-1318.
- Bulachevitch, Yu. P., and 8 others, 1976. Geodynamics of the Urals. Tectonophys., 35, 15-26.
- Bullard, E. C., 1949. The magnetic field within the Earth. Proc. Roy. Soc., Lond., A 197, 433.
- Bullard, E. C., 1956. Edmund Halley (1656-1742). Endeavour, 15, 189.
- Bullard, E. C., 1964. Continental drift. Quart. J. Geol. Soc. Lond., 120, 1-39.
- Bullard, E. C., 1970. Geophysical consequences of induction anomalies. J. Geomag. Geoelect. 22, 73-74.
- Bullard, E. C., 1975. The emergence of plate tectonics: A personal view. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 3, 1-30.
- Bullard, E. C., 1975a. Overview of plate tectonics. In: Fischer and Judson (Editors) (q. v.), pp. 5-17.
- Bullard, E. C., Everett, J. E., and Smith, A. S., 1965. The fit of the continents around the Atlantic. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., A, 258, 41-51.
- Bullen, K. E., 1963. An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 383 pp.
- Bullen, K. E., 1974. Introductory remarks on standard Earth models. Phys. Earth Planet. Int., 9, 1-3.
- Bullen, K. E., 1974a. Standard Earth model requirements in respect of density and rigidity in the inner core. Phys. Earth Planet. Int., 9, 41-44.
- Bullen, K. E., 1975. The Earth's Density. Chapman and Hall, London, 420 pp.
- Burke, K., and Dewey, J., 1973. An outline of Precambrian plate development. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp 1035-1045.

Burke, K., and Whiteman, A. J., 1973. Uplift, rifting, and the breakup of Africa. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 735-755.

Burke, K., Dewey, J. F., and Kidd, W. S., 1976. Precambrian paleomagnetic results comparable with contemporary operation of the Wilson cycle. Tectonophys., 33, 287-299.

Burns, K. L., and Shepherd, J., 1976. Satellite lineaments in southeast Australia. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 354-368.

Burrett, C. F., 1974. Plate tectonics and the fusion of Asia. Earth Planet. Sci. Ltr., 21, 181-189.

Burton, P. W., and Bennell, J. D., 1976.  $Q^{-1}$  and lithospheric thickness. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 151-154.

Cabre, R., 1975. Geodynamics in the eastern Pacific and the western Americas. Phys. Earth Planet. Int., 9, 169-173.

Cady, W. M., 1973. The earmarks of subduction. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 955-961.

Cameron, A. G. W., 1970. Formation of the Earth-Moon system. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 350.

Cameron, A. G. W., 1973. The outer solar system. Science, 180, 701-708.

Cameron, K. L., and Cameron, M., 1976. Reconnaissance investigation of volcanic rocks from southeastern Chihuahua, Mexico: A comparison with the Sierra Madre Occidental and Trans-Pecos Texas. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 10.

Caner, B., 1970. Electrical conductivity structure in western Canada and petrological interpretation. J. Geomag. Geoelect., 22, 113-129.

Cannon, W. H., 1974. The Chandler annual resonance and its possible geophysical significance. Phys. Earth Planet. Int., 9, 83-90.

Capaldi, G., Cortini, M., Gasparini, P., and Pece, R., 1976. Short-lived radioactive disequilibria in freshly erupted volcanic rocks and their implications for the pre-eruption history of a

magma. J. Geophys. Res., 81, 350-358.

Caputo, M., 1967. The Gravity Field of the Earth from Classical and Modern Methods. Academic, New York, 202 pp.

Carey, S. W., 1958. A tectonic approach to continental drift. In: S. W. Carey (Editor), Continental Drift. Univ. of Tasmania, Hobart, pp. 177-355.

Carey, S. W., 1975. The subduction myth. SEAPEX Proc., 2, 41-69.

Carey, S. W., 1975a. The expanding Earth: An essay review. Earth Sci. Rev., 11, 105-143.

Carmichael, I. S. E., Turner, F. J., and Verhoogen, J., 1974. Igneous Petrology. McGraw-Hill, New York, 739 pp.

Carr, M. J., 1976. Underthrusting and Quaternary faulting in northern Central America. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 825-829.

Carr, M. J., Stoiber, R. E., and Drake, C. L., 1971. A model for the upper mantle below Japan. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 279.

Cawthorn, R. G., 1975. Degrees of melting in mantle diapirs and the origin of ultrabasic liquids. Earth Planet. Sci. Ltr., 27, 113-120.

Cawthorn, R. G., and Strong, D. F., 1974. The petrogenesis of komatiites and related rocks as evidence for a layered upper mantle. Earth Planet. Sci. Ltr., 23, 369-375.

Cebull, S. E., and Keller, G. R., 1974. Plate tectonics and the Ouachita system in Texas, Oklahoma, and Arkansas: Reply. Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 147-148.

Cebull, S. E., Shurbet, D. H., Keller, G. R., and Russell, L. R., 1976. Possible role of transform faults in the development of apparent offsets in the Ouachita - Southern Appalachian tectonic belt. J. Geol., 84, 107-114.

Cebull, S. E., Keller, G. R., Wickham, J., and Roeder, D., 1976a. Plate tectonics models for the Ouachita foldbelt: Comment (SEC and GKR) and replies (JW and DR). Geology, 4, 636-638.

Cermak, V., 1975. Temperature-depth profiles in Czechoslovakia and some adjacent areas derived from heat-flow measurements,

deep-seismic sounding, and other geophysical data. Tectonophys., 26, 103-119.

Cermak, V., Lubimova, E. A., and Stegena, L., 1975. Geothermal mapping activity in central and eastern Europe. In: Witherspoon et al. (Editors) (q. v.), pp. 1-7.

Chadwick, B., and Coe, K., 1975. A horizontal tectonic regime in the Archean of Greenland and its implications for early crustal thickening: A comment. Precambr. Res., 2, 397-400.

Challinor, J., 1964. A Dictionary of Geology, 2d ed. Oxford Univ. Press, New York, 289 pp.

Chamberlin, T. C., and Salisbury, R. D., 1928. The Two Solar Families. Univ. of Chi. Press, Chicago, 156 pp.

Channell, J. E. T., and Tarling, D. H., 1975. Paleomagnetism and the rotation of Italy. Earth Planet. Sci. Ltr., 25, 177-188.

Channell, J. E. T., and Horvath, F., 1976. The African-Adriatic promontory as a paleogeographical premise for Alpine orogeny and plate movements in the Carpatho-Balkan region. Tectonophys., 35, 71-101.

Chapman, R. E., 1973. Petroleum Geology: A Concise Study. Elsevier, Amsterdam, 304 pp.

Chapman, C. R., 1976. Asteroids as meteorite parent-bodies: The astronomical perspective. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 701-719.

Chapman, D. S., and Pollack, H. N., 1975. Global heat flow: A new look. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 23-32.

Chapman, M. E., and Solomon, S. C., 1976. North American - Eurasian plate boundary in northeast Asia. J. Geophys. Res., 81, 921-930.

Chappell, J., 1974. Upper mantle rheology in a tectonic region: Evidence from New Guinea. J. Geophys. Res., 79, 390-398.

Charlot, R., 1976. The Precambrian of the Anti-Atlas (Morocco): A geochronological synthesis. Precambr. Res., 3, 127-299.

Chase, C. G., and Gilmer, T. H., 1973. Precambrian plate tectonics: The midcontinent gravity high. Earth Planet. Sci. Ltr., 21, 70-78.

Chase, C. G., Herron, E. M., and Normark, W. R., 1975. Plate tectonics: Commotion in the ocean and continental sequences. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 3, 271-291.

Chen, J. H., and Tilton, G. R., 1976. Isotopic lead investigations on the Allende carbonaceous chondrite. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 635-643.

Christofferson, E., 1968. The relationship of seafloor spreading in the Pacific to the origin of the Emperor Seamounts and the Hawaiian Island chain. Trans. Amer. Geophys. Un., 49, 214.

Church, W. R., and Coish, R. A., 1976. Oceanic versus island arc origin of ophiolites. Earth Planet. Sci. Ltr., 31, 8-14.

Clayton, K., 1967. The Crust of the Earth. Natural History Press, Garden City, NY, 155 pp.

Colborn, J. G., 1976. The Thermal Structure of the Indian Ocean. Univ. Press, Honolulu, 174 pp.

Coleman, P. J. (Editor), 1973. The Western Pacific: Island Arcs, Marginal Seas, Geochemistry. Univ. Western Austr., Press, Perth, 675 pp.

Coleman, P. J., 1975. On island arcs. Earth Sci. Rev., 11, 47-80.

Condie, K. C., and Harrison, N. M., 1976. Geochemistry of the Archean Bulawayan Group, Midlands greenstone belt, Rhodesia. Pre-cambr. Res., 3, 253-271.

Condie, K. C., and Hunter, D. R., 1976. Trace element geochemistry of Archean granitic rocks from the Barberton region, South Africa. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 389-400.

Coney, P. J., 1976. Plate tectonics and the Laramide orogeny. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 579.

Conolly, J. R., 1969. Western Tasman Sea floor. New Zealand J. Geol. Geophys., 12, 310-343.

Conolly, J. R., 1970. Sedimentary history of the continental margins of Australia. NY Acad. Sci. Trans., ser 2, 32, 364-380.

Cooper, A. K., Marlow, M. S., and Scholl, D. W., 1976. Mesozoic magnetic lineations in the Bering Sea marginal basins. J. Geophys.

Res., 81, 1916-1934.

Courtillot, V., and LeMouel, J. L., 1976. On the long-period variations of the Earth's magnetic field from 2 months to 20 years. J. Geophys. Res., 81, 2941-2950.

Cox, A., 1968. The lengths of geomagnetic polarity intervals. J. Geophys. Res., 73, 3247-3260.

Cox, A., 1969. Geomagnetic reversals. Science, 163, 237-245.

Cox, A., 1970. Reconciliation of statistical models for reversals. J. Geophys. Res., 75, 7501-7503.

Cox, A., 1975. Symmetric and asymmetric geomagnetic reversals as a renewal process. In: Fisher et al. (Editors) (q. v.), pp. 173-186.

Cox, A., and Opdyke, N., 1971. Geomagnetic reversals and long-period secular variations. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 1210-1213.

Creer, K. M., and Isper, Y., 1970. An interpretation of the behavior of the geomagnetic field during polarity transitions. Phys. Earth Planet. Int., 2, 283-293.

Creer, K. M., Collison, D. W., and Runcorn, S. K. (Editors), 1967. Methods in Paleomagnetism. Elsevier, Amsterdam, 609 pp.

Cristescu, C., Klepczynski, W. J., and Milet, B. (Editors), 1974. Asteroids, Comets, Meteoric Matter. Editura Academiei, Bucharest, 334 pp.

Crittenden, M. D., 1963. Effective viscosity of the Earth derived from isostatic loading of Pleistocene Lake Bonneville. J. Geophys. Res., 68, 5517-5530.

Currie, K. L., 1969. Geological notes on the Carswell circular structure, Saskatchewan. Can. Geol. Surv. Ppr., 67-32, 6 pp.

Curtis, B. F. (Editor), 1975. Genozoic History of the Southern Rocky Mountains (Memoir 144). Geol. Soc. Amer., Boulder, 280 pp.

Dalrymple, G. B., and Clague, D. A., 1976. Age of the Hawaiian-Emperor Bend. Earth Planet. Sci. Ltr., 31, 313-329.

Dana, J. D., 1873. On some results of the Earth's contraction from cooling, including a discussion of the origin of mountains and

the nature of the Earth's interior. Amer. J. Sci., ser 3, 5, 423-443; 6, 6-14, 104-115, 161-172.

Danby, J. M. A., 1962. Fundamentals of Celestial Mechanics. Macmillan, New York, pp. 198 et seq.

Darwin, G. H., 1898. The Tides. Houghton, New York, 151 pp.

Dasch, E. J., 1976. Nazca plate studied. Geotimes, 21(4), 24-25.

Dash, B. P., Ball, M. M., King, G. A., Butler, L. W., and Rona, P. A., 1971. Geophysical measurements in the Cape Verde archipelago. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 235.

Dauvillier, A., 1956. L'Origine des Planetes. Presses Universitaires de France, Paris, 225 pp.

Dauvillier, A., 1963. L'origine du systeme terre-lune. Bull. Soc. Roy. Sci. Liege, 32, 38-53.

Davis, S. N., Reitan, P. H., and Pestrong, R., 1976. Geology: Our Physical Environment. McGraw-Hill, New York, 480 pp.

DeJong, K. A., and Scholten, R. (Editors), 1973. Gravity and Tectonics. Wiley-Interscience, New York, 502 pp.

Delaney P., and Smith, C. H. (Editors), 1969. Deep-Seated Foundations of Geological Phenomena. Special issue Tectonophys., 7, 359-610.

Demenitskaya, R. M., and Karasik, A. M., 1969. The worldwide pattern of midoceanic ridges and its northern part. Noveyskiye dvizheniya, vulcanizm, i zemletryaseniya materikov i dna akeanov, Izdatelestvo Nauka, Moscow, pp. 249-257.

DeSitter, L. U., 1956. Structural Geology. McGraw-Hill, New York, 552 pp.

Dewey, J. F., 1969. Evolution of the Appalachian/Caledonian orogen. Nature, 22, 124-129.

Dewey, J. F., 1969a. Continental margins: A model for the transition from Atlantic type to Andean type. Earth Planet. Sci. Ltr., 6, 189-197.

Dewey, J. F., 1974. Continental margins and ophiolite obduction: Appalachian-Caledonian system. In: C. A. Burk and C. L.

Drake (Editors), The Geology of Continental Margins. Springer, Berlin, pp. 943-950.

Dewey, J. F., 1976. Ophiolite obduction. Tectonophys., 31, 93-120.

Dewey, J. F., 1976b. Ancient plate margins: Some observations. Tectonophys., 33, 397-385.

Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970. Mountain belts and the new global tectonics. J. Geophys. Res., 75, 2625-2647.

Dewey, J. F., and Bird, J. M., 1970a. Plate tectonics and geosynclines. Tectonophys., 10, 625-638.

Dewey, J. F., and Bird, J. M., 1971. Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland. J. Geophys. Res., 76, 3179-3206.

Dewey, J. F., and Burke, K., 1973. Plume generated triple junctions. Trans. Amer. Geophys. Un., 54, 229.

Dewey, J. F., and Burke, K. C. A., 1973a. Tibetan, Variscan, and Precambrian basement reactivation: Products of continental collisions. J. Geol., 81, 683-692.

Dewey, J. and Spall, H., 1975. Pre-Mesozoic plate tectonics: How far back in Earth history can the Wilson cycle be extended? Geology, 3, 422-424.

Dewey, J. F., Pitman, W. C., III, Ryan, W. F. B., and Bonnin, J., 1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine system. Geol. Soc. Amer. Bull., 84, 3137-3180.

Dickinson, K. A., 1974. Depositional environments as a guide to uranium exploration in south Texas. Econ. Geol., 69, 149.

Dickinson, W. R. (Editor), 1974a. Tectonics and Sedimentation. Soc. Econ. Paleont. and Mineral., Tulsa, 204 pp.

Dickinson, W. R., 1974b. Plate tectonics and sedimentation. In: Dickinson (Editor) (q. v.), pp. 1-27.

Dickinson, D. J., 1976. An airborne infrared survey of the Tauhara geothermal field, New Zealand. Geotherm. En., 4(3), 32-40.

Didier, J., 1973. Granites and their Enclaves. Elsevier, Amsterdam, 393 pp.

Dietrich, V. J., 1976. Evolution of the eastern Alps: A plate tectonics working hypothesis. Geology, 4, 147-152.

Dietz, R. S., 1961. Continents and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. Nature, 190, 854-857.

Dietz, R., 1963. Collapsing continental rises: An actualistic concept of geosynclines and mountain building. J. Geol., 71, 314-333.

Dietz, R. S., 1966. Passive continents, spreading sea floors, and collapsing continental rises. Amer. J. Sci., 264, 177-193.

Dietz, R., and Holden, J. C., 1966. Miogeosynclines in space and time. J. Geol., 74, 566-583.

Dietz, R. S., and Holden, J. C., 1970. East Indian basin (Wharton basin) as pre-Mesozoic ocean crust. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 2, 537.

Dietz, R. S., and Holden, J. C., 1970a. Reconstruction of Pangea: Breakup and dispersion of continents, Permian to present. J. Geophys. Res., 75, 4939-4956.

Dietz, R. S., and Holden, J. C., 1973. Continents adrift: New orthodoxy or persuasive joker? In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 1105-1121.

Dietz, R. S., and Holden, J. C., 1974. Collapsing continental rises: Actualistic concept of geosynclines: A review. In: Dott and Shaver (Editors) (q. v.), pp. 14-25.

Dingle, R. V., and Scrutton, R. A., 1974. Continental breakup and the development of post-Paleozoic sedimentary basins around southern Africa. Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 1467-1474.

Dixon, C. J., and Pereira, J., 1974. Plate tectonics and mineralization in the Tethyan region. Min. Dep., 9, 185-198.

Dodd, R. T., 1976. Accretion of the ordinary chondrites. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 281-291.

Dodd, R. T., 1976a. Iron-silicate fractionation within ordinary chondrite groups. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 479-484.

Doe, B. R., and Smith, D. K. (Editors), 1972. Studies in Mineralogy and Precambrian Geology. Geol. Soc. Amer., Boulder,

248 pp.

Doell, R. R., and Cox, A., 1971. Pacific geomagnetic secular variation. Science, 171, 248-254.

Doell, R. R., and Cox, A., 1972. The Pacific geomagnetic secular variation anomaly and the question of lateral uniformity in the lower mantle. In: Robertson (Editor) (q. v.), pp. 248-284.

Donath, F. A., Stehli, F. G., and Wetherill, G. W., 1975. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Annual Reviews, Palo Alto, 466 pp.

Donath, F. A., Stehli, F. G., and Wetherill, G. W. (Editors), 1976. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. Annual Reviews, Palo Alto, 484 pp.

Dott, R. H., Jr. (Editor), 1972. Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation. Univ. Wisc., Madison, 59 pp.

Dott, R. H., and Batten, R. L., 1976. Evolution of the Earth, 2d ed. McGraw-Hill, New York, 350 pp.

Dott, R. H., Jr., and Shaver, R. H. (Editors) 1974. Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, 380 pp.

Douglas, R. J. W., 1969. Orogeny, basement, and geological map of Canada. Geol. Assoc. Can. Spl. Ppr. 5., pp. 1-6.

Drahovzal, J. A., 1976. Lineaments of northern Alabama and possible regional implications. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 250-261.

Drake, C. L., 1969. Continental margins. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 549-556.

Drake, C. L., 1970. A long-range program of solid Earth studies. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 152-159.

Drake, C. L., 1975. The International Geodynamics Project. In: Anon. (Editor) (q. v.), pp. 55-62.

Drake, C. L., 1976. Geodynamics Project. Geotimes, 21(1), 21-22.

Drake, E. T., 1976a. Alfred Wegener's reconstruction of Pangea. Geology, 4, 41-44.

- Drake, C. L. (Editor), 1976b. Geodynamics: Progress and Prospects. Amer. Geophys. Union, Washington, 238 pp.
- Drake, C. L., Ewing, M., and Sutton, G. H., 1959. Continental margins and geosynclines: The East Coast of North America north of Cape Hatteras. In: L. H. Ahrens et al. (Editors), Physics and Chemistry of the Earth, v 3. Pergamon, New York, pp. 110-198.
- Du Toit, A. L., 1937. Our Wandering Continents. Boyd, Edinburgh.
- Du Toit, A. L., 1940. Developments on and around the Witwatersrand. Econ. Geol., 35, 98-108.
- Dymek, R. F., Albee, A. L., Chodos, A. A., and Wasserburg, G. J., 1976. Petrography of isotopically-dated clasts in the Kapoeta howardite and petrologic constraints on the evolution of its parent body. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 1115-1130.
- Dziewonski, A. M., 1976. A three-dimensional view of the lower mantle. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 326.
- Eardley, A. J., 1963. Relation of uplifts to thrusts in Rocky Mountains. In: The Backbone of the Americas: Tectonic History from Pole to Pole. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa.
- Eaton, J. P., and Murata, K., 1960. How volcanoes grow. Science, 132, 925-938.
- Egglar, D. H., 1976. Does CO<sub>2</sub> cause partial melting in the low-velocity layer of the mantle? Geology, 4, 69-72.
- Egyed, L., 1969. Physik der festen Erde. Akademiai Kiado, Budapest, 368 pp.
- El-Etr, H. A., and Abdel-Rahman, M. A., 1976. Airphoto lineations of the southern part of the Gulf of Suez region, Egypt. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 309-326.
- Elliott, D., 1976. The motion of thrust sheets. J. Geophys. Res., 81, 949-963.
- Ellis, A. J., 1975. Geothermal systems and power development. Amer. Sci., 63, 510-521.
- Elsasser, W. M., 1966. Thermal structure of the upper mantle. In: P. M. Hurley (Editor), Advances in Earth Sciences. MIT Press,

Cambridge, pp. 461-471.

Emery, K. O., Uchupi, E., Phillips, J. D., Bowin, C. O., and Bunce, E. T., 1970. Continental rise off eastern North America. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 54, 44-108.

Erickson, B. H., Naugler, F. P., and Lucas, W. H., 1970. Emperor fracture system zone: A newly discovered feature in the central North Pacific. Nature, 225, 53-54.

Erlandson, D. L., Orwig, T. L., Kiilsgaard, G., Mussels, J. H., and Kroenke, L. W., 1976. Tectonic interpretations of the East Caroline and Lyra Basins from reflection-profiling investigations. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 453-462.

ESSA, 1970. World Seismicity. Mercator chart NEIC-3005. Coast & Geodetic Survey, Washington, DC.

Evison, F. F., 1967. On the occurrence of volume change at the earthquake source. Bull. Seismol. Soc. Amer., 57, 9-25.

Ewing, J. I., and Oliver, J. E., 1976. Seismological studies of the Pacific area. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 69-70.

Ez, V. V., 1976. The role of intercrustal convection of the structure of the continental crust. Tectonophys., 35, 161-167.

Fairbridge, R. W., 1973. Glaciation and plate migration. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 503-515.

Fairhead, J. D., 1976. The structure of the lithosphere beneath the Eastern rift, east Africa, deduced from gravity studies. Tectonophys., 30, 269-296.

Fielder, G., and Wilson, L. (Editors), 1975. Volcanoes of the Earth, Moon, and Mars. Elek, London, 126 pp.

Fielder, G., Fryer, R. J., Gash, P. J. S., Whitford-Stark, J. L., and Wilson, L., 1976. Lineament patterns on the Moon, Mars, and Mercury. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 379-388.

Findlay, M. G., and Mundy, B., 1976. Tectonically controlled stratigraphy of the Jurassic ranges of northeast Africa. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 171.

Finlay-Freundlich, E., 1958. Celestial Mechanics. Pergamon,

New York, pp. 33 et seq.

Fischer, A. G., and Judson, S. (Editors), 1975. Petroleum and Global Tectonics. Princeton Univ. Press, Princeton, 322 pp.

Fisher, R. M., Fuller, M., Schmidt, V. A., and Wasilewski, P. J. (Editors), 1975. Proceedings of the Takesi Nagata Conference. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 589 pp.

Flowers, B. S., 1976. Overview of exploration geophysics: Recent breakthroughs and challenging new problems. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Bull., 60, 3-11.

Fodor, R. V., and Keil, K., 1976. A komatiite-like lithic fragment with spinifex texture in the Eva meteorite: Origin from a supercooled impact melt of chondrite parentage. Earth Planet Sci. Ltr., 29, 1-6.

Foland, K. A., and Henderson, C. M. B., 1976. Application of age and Sr isotope data to the petrogenesis of the Marangudzi ring complex, Rhodesia. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 291-301

Foster, T. D., 1969. Convection in variable fluid heated from within. J. Geophys. Res., 74, 685-693.

Fox, P. J., Heezen, B. C., and Johnson, G. L., 1970. Jurassic sandstone from the tropical Atlantic. Science, 170, 1402-1404.

Francheteau, J., and 7 others, 1975. See ARCYANA.

Francis, P. W., and Rundle, C. C., 1976. Rates of production of the main magma types in the central Andes. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 474-480.

Franz, J. D., Rumble, D., and Vidale, J. R., 1976. Transport models and their application in geochemistry. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 465-467.

Frey, F., 1976. International conference on the nature of the oceanic crust. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 393-401.

Furumoto, A. S., Hussong, D. M., Campbell, J. F., Sutton, G. H., Malahoff, A., Rose, J. C., and Woollard, G. P., 1970. Crustal and upper-mantle structure of the Solomon Islands as revealed by seismic refraction survey of November-December 1966. Pac. Sci., 24, 315-332.

Furumoto, A. S., Webb, J. P., Odegard, M. E., and Hussong, D.

M., 1976. Seismic studies on the Ontong Java Plateau, 1970. Tectonophys., 34, 71-90.

Fuster, J. M., 1968. Gran Canaria. In: Fuster et al. (Editors) (q. v.), pp. 217-223.

Fuster, J. M., Cendrero, A., Gastesi, P., Ibarolla, E., and Lopez-Ruiz, J., 1968. Fuerteventura. In: Geology and Volcanology of the Canary Islands. Lucas Mallada, Madrid, 243 pp.

Fytikas, M., Guiliiani, O., Innocenti, F., Marinelli, G., and Mazzuoli, R., 1976. Geochronological data on Recent magmatism of the Aegean Sea. Tectonophys., 31, T29-T34.

Ganapathy, R., Papia, G. M., and Grossman, L., 1976. The abundances of zirconium and hafnium in the solar system. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 302-308.

Gansser, A., 1964. The Geology of the Himalayas. Interscience, New York, 289 pp.

Garland, G. D. (Editor), 1966. Continental Drift. Univ. of Toronto Press, Toronto, 140 pp.

Garson, M. S., and Krs, M., 1976. Geophysical and geological evidence of the relationship of Red Sea traverse tectonics to ancient fracture Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 169-181.

Gaskell, T. F. (Editor), 1967. The Earth's Mantle. Academic, London, 509 pp.

Gay, S. P., Jr., 1973. Pervasive Orthogonal Fracturing in Earth's Continental Crust. American Stereo Map Co., Salt Lake City 124 pp.

Gay, N. G., 1975. In-situ stress measurements in southern Africa. Tectonophys., 29, 447-459.

Gay, S. P., 1976. Aeromagnetic lineament study of covered Precambrian basement, southeastern Missouri. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 183-191.

Gedney, L., Van Wormer, J., and Shapiro, L., 1976. Tectonic lineaments and plate tectonics in south-central Alaska. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 27-34.

Geiss, J., and Goldberg, E. D. (Editors), 1963. Earth Sciences

and Meteorites. North-Holland, Amsterdam, 312 pp.

Georgi, J., 1962. Memories of Alfred Wegener. In: S. K. Runcorn (Editor), Continental Drift. Academic Press, New York, pp. 309-324.

Gibb, R. A., 1975. Collision tectonics in the Canadian Shield? Earth Planet. Sci. Ltr., 27, 378-382.

Gibson, T. G., and Towe, K. M., 1971. Eocene volcanism and the origin of Horizon A. Science, 172, 152-153.

Gill, J. B., 1976. From island arc to oceanic islands: Fiji, Southwestern Pacific. Geology, 4, 123-126.

Gill, R. C. O., and Bridgwater, D., 1976. The Ameralik dykes of West Greenland, the earliest known basaltic rocks intruding stable continental crust. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 276-282.

Gilluly, J., 1955. Geologic contrasts between continents and crustal structure. In: Poldervaart (Editor), Crust of the Earth. Geol. Soc. Amer., Boulder, pp. 7-18.

Girdler, R. W., 1970. The structure and evolution of the Red Sea and the nature of the Red Sea, Gulf of Aden, and Ethiopian Rift Junction. Tectonophys., 10, 579-582.

Girdler, R. W., 1975. The great negative Bouguer gravity anomaly over Africa. Trans. Amer. Geophys. Un., 56, 516-519.

Girdler, R. W., 1976. The East African rift system: Geophysical aspects. In: Drake (Editor) (q. v.), pp. 75-80.

Glen, W., 1975. Continental Drift and plate Tectonics. Merrill, New York, 188 pp.

Glikson, A. Y., 1976. Earliest Precambrian ultramafic-mafic volcanic rocks: Ancient oceanic crust or relic terrestrial maria? Geology, 4, 201-205.

Gnibidenko, H. S. and Shashkin, K. S., 1970. Basic principles of the geosynclinal theory. Tectonophys., 9, 5-13.

Goldschmidt, V. M., 1954. Geochemistry. Clarendon, Oxford, 730 pp.

Gooding, J. L., and Muenow, D. W., 1976. Activated release of alis during the vesiculation of molten basalts under high vacuum:

Implications for lunar volcanism. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 675-686.

Goodwin, A. M., 1968. Archean protocontinental growth and early crustal history of the Canadian shield. In: Benes (Editor) (q. v.), pp. 69-89.

Goodwin, A. M., 1975. Archean volcanism in Superior Province. Canadian Shield. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 7, 764.

Gose, W. A., 1976. Paleomagnetism of pre-Tertiary rocks from Honduras, Central America. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 239.

Graham, A. L., Easton, A. J., Hutchison, R., and Jerome, D. V., 1976. The Bovedy meteorite: Mineral chemistry and origin of its Ca-rich glass inclusions. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 529-535.

Green, D. H., 1971. Compositions of basaltic magmas as indicators of conditions of origin: Application to oceanic volcanism. Proc. Roy. Soc. Lond., A-268, 707-725.

Griffin, V. S., Jr., 1970. Relevancy of the Dewey-Bird hypothesis of cordilleran-type mountain belts and the Wegmann stockwork concept. J. Geophys. Res., 75, 7504-7507.

Griffin, V. S., Jr., 1974. Plate tectonics and the Ouachita system in Texas, Oklahoma, and Arkansas: Discussion. Geol. Soc. Amer. Bull., 85, 145-146.

Griggs, D. T., and Baker, D. W., 1968. The origin of deep-focus earthquakes. In: H. Mark and S. Fernbeck (Editors), Properties of Matter under Unusual Conditions. Wiley-Interscience, New York, pp. 23-27.

Grim, P. J., 1970. Bathymetric and magnetic anomaly profiles from a survey south of Panama and Costa Rica. FSSA Tech. Memo. ERLTM-ACML, 9.

Grossman, L., and Ganapathy, R., 1976. Trace elements in the Allende meteorite: I, Coarse-grained, Ca-rich inclusions. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 331-344.

Grow, J. A., and Bowin, C. O., 1975. Evidence for high-density crust and mantle beneath the Chile trench due to the descending lithosphere. J. Geophys. Res., 80, 1449-1458.

Gulyas, E., and Hedervari, P., 1976. Concentration of seismic energy within the two active domains beneath individual volcanoes and groups of volcanoes of Java, Indonesia. Tectonophys., 30, 129-140.

Gutenberg, B., 1941. Changes in sea level, post glacial uplift, and mobility of the Earth's interior. Geol. Soc. Amer. Bull., 52, 721-772.

Gutenberg, B., 1951. Internal Constitution of the Earth. Dover, New York, 439 pp.

Gutenberg, B., 1959. Physics of the Earth's Interior. Academic, New York, 240 pp.

Gutenberg, B., 1960. Low-velocity layers in the Earth, ocean, and atmosphere. Science, 131, 959-965.

Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1954. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2d ed. Princeton Univ. Press, Princeton, 273 pp.

Halbouty, M. T. (Editor), 1970. Geology of Giant Petroleum Fields. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, 575 pp.

Halbouty, M. T. 1972. Rationale for deliberate pursuit of stratigraphic, unconformity, and paleogeomorphic traps. In: R. E. King (Editor), Stratigraphic Oil and Gas Fields. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, pp. 3-7.

Halbouty, M. T., 1976. Application of LANDSAT imagery to petroleum and mineral exploration. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 745-793.

Halbouty, M. T., King, R. E., Klemme, H. D., Dott, R. S., and Meyerhoff, A. A., 1970. Factors affecting formation of giant oil and gas fields and basin classification. In: Halbouty (Editor) (q. v.), pp. 528-540.

Hales, A. L., 1974. Crustal structure modelling in a spherically symmetric Earth. Phys. Earth Planet Int., 9, 7-8.

Hales, A. L., Helsley, C. E., and Nation, J. B., 1970. Travel times for an oceanic path. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 359.

Hall, J., 1857. Direction of the currents of deposition and source of the materials of the older Paleozoic rocks. Canadian

Naturalist and Geologist, 2, 284-286.

Hallam, A., and Sellwood, B. W., 1976. Middle Mesozoic sedimentation in relation to tectonics of the British area. J. Geol., 84, 301-321.

Hallberg, J. A., Johnston, C., and Bye, S. M., 1976. The Archean Marda igneous complex, Western Australia. Precamb. Res., 3, 111-136.

Haman, P. J., 1976. Possible relationship between lineament tectonics and the dynamics of the Milky Way galaxy. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 528-536.

Hamet, J., and Allegre, C. J., 1976. Rb-Sr systematics in granite from central Nepal (Manaslu): Significance of the Oligocene age and high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio in Himalayan orogeny. Geology, 4, 470-471.

Hamilton, R. A., Brooke, F. R., Peacock, S. D., Bowater, S., and Bull, C., 1956. British North Greenland Expedition, 1952-54: Scientific results. Geophys. J., 122, 203-241.

Hammond, S. R., Kroenke, L. W., and Thayer, F., 1974. Latitudinal displacements on the Ontong Java Plateau between 30 and 100 m. y. ago. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 6, 374-375.

Handschumacher, D. 1973. Formation of the Emperor Seamount chain. Nature, 225, 150-152.

Hargraves, R. B., 1976. Precambrian geologic history. Science, 193, 363-371.

Harp, E. L., 1976. Fracture system of Mars. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 389-408.

Harrison, J. C., 1955. An interpretation of gravity anomalies in the eastern Mediterranean. Phil Trans. Roy. Soc. Lond., A-248, 283-325.

Hart, P. J. (Editor), 1969. The Earth's Crust and Upper Mantle. Amer. Geophys. Un., Washington, 735 pp.

Hasebe, R., Fujii, N., and Uyeda, S., 1970. Thermal processes under island arcs. Tectonophys., 10, 335-355.

Haskell, N. A., 1937. The viscosity of the asthenosphere.

Amer. J. Sci., 33, 22-28.

Hawkins, J. W., Jr., 1976. Petrology and geochemistry of basaltic rocks of the Lau Basin. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 283-297.

Heezen, B. C., and 11 others, 1973. Diachronous deposits, a kinematic interpretation of the post-Jurassic sedimentary sequence on the Pacific plate. Nature, 241, 25-32.

Heirtzler, J. R. (Editor), 1972. Understanding the Mid-Atlantic Ridge. National Academy of Science, Washington, 131 pp.

Heirtzler, J. R., and Vogt, P. R., 1971. Marine magnetic anomalies and their bearing on polar wander and continental drift. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 1220-1223.

Heirtzler, J. R., Dickson, G. O., Herron, E. M., Pitman, W. C., and Le Pichon, X., 1968. Marine magnetic anomalies, geomagnetic field reversals, and motions of the ocean floor and continents. J. Geophys. Res., 73, 2119-2136.

Heiskanen, W. A., and Moritz, H. 1967. Physical Geodesy. Freeman, San Francisco, 364 pp.

Heiskanen, W. A., and Vening Meinesz, F. A., 1958. The Earth and its Gravity Field. McGraw-Hill, New York, 470 pp.

Helweg, J., 1976. Shortening of continental crust in orogenic belts and plate tectonics. Nature, 260, 768-770.

Henderson, P., Fishlock, S. J., Lau, J. C., Cooper, T. D., Conrad, R. L., Boynton, W. V., and Schmitt, R. A., 1976. Rare earth element abundances in rocks and minerals from the Fiskenaesset Complex, West Greenland. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 37-49.

Herndon, J. M., and Suess, H. E., 1976. Can enstatite meteorites form from a nebula of solar composition? Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 395-399.

Hess, H. H., 1962. History of the ocean basins. In: A. E. J. Engle et al. (Editors), Petrological Studies. Geol. Soc. Amer., New York, pp. 599-620.

Hey, R. N., and Morgan, W. J., 1971. Parallel seamounts in the northeast Pacific. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 236.

- Heymann, D., 1976. Earliest history of Moon and solar system. Geotimes, 21(5), 19-20.
- Hide, R., 1970. Earth's core-mantle interface. Quart. J. Roy. Met. Soc., 96, 579-590.
- Hide, R., and Malin, S. R. C., 1970. Novel correlations between global features of the Earth's gravitational and magnetic fields. Nature, 225, 605-609.
- Higuchi, H., Morgan, J. W., Ganapathy, R., and Anders, E., 1976. Chemical fractionation in meteorites: X, Ureilites. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 1563-1571.
- Hilde, T. W. C., Uyeda, S., and Kroenke, L., 1976. Tectonic history of the Western Pacific. In: Drake (Editor) (q. v.), pp. 1-15.
- Hillhouse, J., and Cox, A., 1976. Brunhes-Matuyama polarity transition. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 51-64.
- Hlauschek, K., 1976. Der Bau der Alpen und seine Probleme. Enke Verlag, Stuttgart, 589 pp.
- Hodder, R. W., and Hollister, V. F., 1976. Some geologic distinctions among lineaments for the mineral explorationist. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 453-461.
- Hodgson, R. A., 1976. Review of significant early studies in lineament tectonics. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 1-10.
- Hodgson, R. A., Gay, S. P., Jr., and Benjamins, J. Y. (Editors). Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics. Utah Geol. Assn., Salt Lake City, 636 pp.
- Holcombe, T. L., 1971. Evolution of the seafloor relief of the Burma Rise and adjoining provinces. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 250.
- Holmes, A., 1965. Principles of Physical Geology. Ronald, New York, 1288 pp.
- Holmgren, D. A., 1976. Major fracture patterns in the British Isles. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 263-278.
- Horai, K., 1976. Heat flow anomaly associated with dike intrusions, 2. J. Geophys. Res., 81, 894-898.

Horne, R. R., 1976. Transverse fault zones in Ireland; criteria and interpretations. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 199.

Horne, G. S., Clark, G. S., and Pushkar, P., 1976. Pre-Cretaceous rocks of northwestern Honduras: Basement terrain in Sierra de Omoa. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 566-583.

Hospers, J., 1965. Gravity field and structure of the Niger Delta, Nigeria, West Africa. Geol. Soc. Amer. Bull., 76, 407-422.

Houtz, R., and Ewing, J., 1976. Upper crustal structure as a function of plate age. J. Geophys. Res., 81, 2490-2498.

Hunter, D. R., 1976. Some enigmas of the Bushveld Complex. Econ. Geol., 71, 229-248.

Hurley, P. M., 1969. Some observations on the geological history of Laurasia. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 7, 112.

Hurley, P. M., 1973. On the origin of  $450 \pm 200$  m. y. orogenic belts. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 1083-1089.

Hurley, P. M., 1974. Pangeaic orogenic system. Geology, 2, 373-376.

Hurley, P. M., and Rand, J. R., 1969. Pre-drift continental nuclei. Science, 164, 1229-1242.

Husebye, E. S., King, D. W., and Haddon, R. A. W., 1976. Precursors to PKIKP and seismic wave scattering near the mantle-core boundary. J. Geophys. Res., 81, 1870-1882.

Hussong, D. M., Edwards, P. B., Johnson, S. H., Campbell, J. F., and Sutton, G. H., 1976. Crustal structure of the Peru-Chile trench:  $8^{\circ}$  -  $12^{\circ}$  S latitude. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 71-86.

Hutchison, C. S., 1976. Indonesian active volcanic arc: K, Sr, and Rb variation with depth to the Benioff zone. Geology, 4, 407-408.

Hutchison, R., 1976a. Strontium and lead isotope ratios, heterogeneous accretion of the Earth, and mantle plumes. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 482-485.

Hyndman, R. D., 1976. Heat flow measurements in the inlets of southwestern British Columbia. J. Geophys. Res., 81, 337-349.

Ichiye, T., 1971. Continental breakup by nonstationary mantle convection generated with differential heating in the crust. J. Geophys. Res., 76, 1139-1153.

Irving, E., 1966. Palcomagnetism of some carboniferous rocks from New South Wales and its relation to geological events. J. Geophys. Res., 71, 6025-6051.

Irwin, W. P., 1976. Ophiolites viewed (in Iran). Geotimes, 21(3), 20.

Isaacson, L. B., and Heinrichs, D. F., 1976. Paleomagnetism and secular variation of Easter Island basalts. J. Geophys. Res., 81, 1476-1482.

Isacks, B., and Molnar, P., 1969. Mantle earthquake mechanisms and the sinking of the lithosphere. Nature, 223, 1121-1124.

Isacks, B., Oliver, J., and Sykes, L. R., 1968. Seismology and the new global tectonics. J. Geophys. Res., 73, 5855-5899.

Ito, K., 1976. Heat flow and thickness of the oceanic lithosphere. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 65-70.

Ito, H., and Fuller, M., 1970. A paleomagnetic study of the reversal process of the geomagnetic field. In: S. K. Runcorn (Editor), Paleophysics. Academic, New York, pp. 133-138.

Jackson, E. D., and Shaw, H. R., 1975. Stress fields in central portion of the Pacific plate: Delineated in time by linear volcanic chains. J. Geophys. Res., 80, 1861-1874.

Jackson, E. D., and Wright, T. L., 1970. Xenoliths in the Honolulu volcanic series. J. Petrol., 11, 405-430.

Jacob, K. H., 1970. P-residuals and global tectonic structures investigated by three-dimensional seismic-ray tracings with emphasis on Longshot data. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 359.

Jacobs, J. A., 1963. The Earth's Core and Geomagnetism. Pergamon, Oxford, 137 pp.

Jacobs, J. A., Russell, R. D., and Wilson, J. T., 1959. Physics and Geology. McGraw-Hill, New York, 424 pp.

Jahn, B. M., Chen, P. Y., and Yen, T. P., 1976. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance.

Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 763-776.

James, D. E., Brooks, C. and Cuyubama, A., 1976. Andean Cenozoic volcanism: Magma genesis in the light of strontium isotope composition and trace-element geochemistry. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 592-600.

Jeans, J. H., 1919. Problems of Cosmogony and Stellar Dynamics. Cambridge Univ. Press, London, 121 pp.

Jeffreys, H., 1918. On the early history of the solar system. Monthly Notices, Roy. Astron. Soc., 78, 424-441.

Jeffreys, H., 1962. The Earth: Its Origin, History, and Physical Constitution, 4th ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 438 pp.

Jerzykiewicz, T., Mierzejewski, M., and Zelazniewicz, A., 1976. Joint and fracture patterns in basement and sedimentary rocks in the Sudetes Mountains. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 295-306.

Johnson, M. J. S., 1975. Tectonomagnetic effects. In: Fisher et al. (Editors) (q. v.), pp. 283-303.

Johnson, A. C., Jr., 1976. Lineament analysis: An exploration method for the delineation of structural and stratigraphic anomalies. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 449-452.

Johnson, R. C., and Hills, F. A., 1976. Precambrian geochronology and geology of the Boxelder Canyon area, northern Laramide Range, Wyoming. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 809-817.

Johnson, T., and Molnar, P., 1972. Focal mechanism and plate tectonics of the southwest Pacific. J. Geophys. Res., 75, 5000-5032.

Johnson, H., and Smith, B. L. (Editors), 1970. The Mega-tectonics of Continents and Oceans. Rutgers, New Brunswick, NJ, 282 pp.

Jones, H. S., 1958. The origin of the solar system. Endeavour, 17(67), 140-144.

Jordan, T. H., 1975a: The continental tectosphere. Rev. Geophys. Space Phys., 13(3), 1-12.

Jordan, T. H., 1976. Lateral heterogeneity in the lower mantle. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 326.

Jurdy, D. M., and Van der Voo, R., 1975. True polar wander since the Early Cretaceous. Science, 187, 1193-1196.

Kahle, C. F. (Editor), 1974. Plate Tectonics: Assessments and Reassessments. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, 514 pp.

Kamen-Kaye, M., 1970. Age of basins. Geotimes, 15(7), 6-8.

Kamen-Kaye, M., 1972. Persian Tethys and Indian Ocean. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56, 1984-1999.

Kanasewich, E. R., and Cutkowske, P. R., 1975. Detailed seismic analysis of a lateral mantle heterogeneity. Earth Planet. Sci. Ltr., 25, 379-384.

Kane, M. F., 1971. Differential rotational inertia of continental plates. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 355.

Karig, D. E., 1971. Origin and development of marginal basins in the western Pacific. J. Geophys. Res., 76, 2542-2561.

Karig, D. E., 1972. Remnant arcs. Geol. Soc. Amer. Bull., 83, 1057-1068.

Karig, D. E., 1974. Tectonic erosion at trenches. Earth Planet. Sci. Ltr., 21, 209-212.

Karig, D. E., and Sharman, G. F., III, 1975. Subduction and accretion in trenches. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 377-389.

Karnik, V., 1969. Seismicity of the European areas. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 139-144.

Kashfi, M. S., 1976. Plate tectonics and structural evolution of the Zagros geosyncline, southwestern Iran. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 1485-1490.

Katterfeld, G. N., 1976. Global and regional systems of lineaments on the Earth, Mars, and the Moon. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 369-378.

Katterfeld, G. N., and Charusin, G. V., 1970. Global fracturing on the Earth and other planets. Geotectonics, 6, 333-337.

Katz, M. B., 1974. Paired metamorphic belts in Precambrian granulite rocks in Gondwanaland. Geology, 2, 237-241.

Katz, M. B., 1976. Broken Hill: A Precambrian hot spot? Pre-camb. Res., 3, 91-106.

Katz, M. B., 1976a. Precambrian granulite facies belts, lineaments, and plate tectonics. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 609-615.

Kaula, W. M., 1969. A tectonic classification of the main features of the Earth's gravitational field. J. Geophys. Res., 74, 4807-4826.

Kaula, W. M., 1975. Absolute plate motions by boundary velocity minimizations. J. Geophys. Res., 80, 244-248.

Kawai, N., Hirooka, K., and Nakajima, T., 1969. Paleomagnetic and potassium-argon age informations supporting Cretaceous-Tertiary hypothetical bend of the main island Japan. Paleogeog. Paleoclim. Paleocol., 6, 277-282.

Kay, M., 1951. North American geosynclines. Geol. Soc. Amer. Mem., 48, 143 pp.

Kearey, P., 1976. A regional structural model of the Labrador Trough, northern Quebec, from gravity studies, and its relevance to continental collisions in Precambrian times. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 371-378.

Kelleher, J., and McCann, W., 1976. Bouyant zone, great earthquakes, and unstable boundaries of subduction. J. Geophys. Res., 81, 4885-4896.

Keller, G. R., Smith, R. B., and Braile, L. W., 1975. Crustal structure along the Great Basin - Colorado Plateau transition from seismic refraction studies. J. Geophys. Res., 80, 1093-1098.

Kennedy, M. J., 1975. Repetitive orogeny in the northeastern Appalachians: New plate models based upon Newfoundland examples. Tectonophys., 28, 39-87.

Kennett, J. P., and Watkins, N. D., 1976. Regional deep-sea dynamic processes recorded by late Cenozoic sediments of the southeastern Indian Ocean. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 321-339.

Kerridge, J. F., 1976. Major element composition of phyllosilicates in the Orgueil carbonaceous meteorite. Earth Planet. Sci.

Ltr., 29, 194-200.

Kesler, S. E., 1976. Our Finite Mineral Resources. McGraw-Hill, New York, 120 pp.

Kesson, S. E., and Ringwood, A. E., 1976. Mare basalt petrogenesis in a dynamic Moon. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 155-163.

Key, R. M., and Hutton, S. M., 1976. A tectonic generation of the Limpopo Mobile Belt, and a definition of its western extremity. Precamb. Res., 3, 79-90.

Khain, V. E., 1970. Present day concepts on the origin of geosynclinal folding. Geotectonics, 3, 3-29.

Khain, V. E., and Muratov, M. V., 1968. Geosynclinal belts, orogenic belts, folded belts, and their relation in time and space. In: Misik (Editor) (q. v.), pp. 9-13.

Khain, V. E., and Muratov, M. V., 1969. Crustal movements and tectonic structure of continents. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 523-538.

Kienle, J., 1971. Gravity and magnetic measurements over Bowers ridge and Shiroshov ridge, Bering Sea. J. Geophys. Res., 76, 7138-7143.

King, L. C., 1962. The Morphology of the Earth. Hafner, New York, 699 pp.

King, R. E. (Editor), 1972. Stratigraphic Oil and Gas Fields. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, 687 pp.

King, L. C., 1973. An improved reconstruction of Gondwanaland. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 851-864.

King, P. B., 1975. Ancient southern margin of North America. Geology, 3, 732-734.

King-Hele, D., 1976. The shape of the Earth. Science, 192, 1293-1300.

Kingma, J. T., 1974. The Geological Structure of New Zealand. Wiley-Interscience, New York, 407 pp.

Kisvarsanyi, G., and Kisvarsanyi, E. B., 1976. Ortho-polygonal tectonic patterns in the exposed and buried Precambrian basement of southeast Missouri. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 169-

182.

- Kitazawa, K., 1970. Intensity of the geomagnetic field in Japan for the past 10,000 years. J. Geophys. Res., 75, 7403-7411.
- Klitgord, K. C., 1976. Seafloor spreading: The central anomaly magnetization high. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 201-209.
- Knopoff; L., 1969. Continental drift and convection. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 683-689.
- Knopoff, L., 1969a. Structure of the low velocity channel and its relationship to large-scale structure. Tectonophys., 1, 403.
- Knopoff, L., 1969b. Attenuation of seismic waves in the mantle. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 273-276.
- Knopoff, L., Drake, C. L., and Hart, P. J. (Editors), 1968. The Crust and Upper Mantle of the Pacific Area. Amer. Geophys. Un., Washington, 522 pp.
- Knopoff, L., Heezen, B. C., and MacDonald, G. J. F. (Editors), 1969. The World Rift System. Tectonophys., 8, 586 pp.
- Kober, L., 1942. Tectonische Geologie. Borntraeger, Berlin, 492 pp.
- Kopal, Z., 1973. The Solar System. Oxford, New York, 152 pp.
- Kosminskaya, I. P., and Zverev, S. M., 1968. Deep seismic sounding in the transition zones from continents to oceans. In: Knopoff et al. (Editors) (q. v.), pp. 122-130.
- Kosminskaya, I. P., and Zverev, S. M., 1970. Structure of the continental margins. J. Geomag. Geoelect., 22, 179-195.
- Kosofsky, L. J., and El-Baz, F., 1970. The Moon as Viewed by Lunar Orbiter. NASA, Washington, 152 pp.
- Kraus, E., 1928. Das Wachstum der Kontinente nach der Zyklus-theorie. Geol. Rundsch., 19, 353-481.
- Krauskopf, K. B., 1971. The source of ore metals. Geochim. Cosmochim. Acta, 35, 643-659.
- Krebs, W., 1975. Formation of southwest Pacific island arc-trench and mountain systems: Plate or global-vertical tectonics? Amer. Assoc. Petrol. Geol., 59, 1639-1666.
- Krebs, W., and Wachendorf, H., 1976. Carboniferous subduction

complex in Harz Mountains, Germany: Discussion and reply. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 830-832.

Kreyszig, E., 1962. Advanced Engineering Mathematics. Wiley, New York, 856 pp.

Kroenke, L. W., 1972. Geology of the Ontong Java Plateau. Haw. Inst. Geophys., Honolulu, pp. 72-75.

Kuenen, P. H., 1967. Geosynclinal sedimentation. Geol. Rundsch., 56, 1-19.

Kuiper, G. P., 1951. On the origin of the solar system. In: J. A. Hynek (Editor), Astrophysics. McGraw-Hill, New York, pp. 357-427.

Kuiper, G. P., 1956. The formation of the planets, part 3. J. Roy. Astron. Soc. Can., 50, 158-173.

Kuno, H., 1966. Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. Bull. Volcanol., 29, 195-222.

Kurth, R., 1959. An Introduction to the Mechanics of the Solar System. Pergamon, New York, pp. 136 et seq.

Kutina, J., 1975. Tectonic development and metallogeny of Madagascar with reference to the fracture pattern of the Indian Ocean. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 582-592.

Kutina, J., 1976. Lithospheric plate motions: One of the factors controlling distribution of ore deposits in some mineral belts. Min. Dep., 11, 83-92.

Kutina, J., 1976a. Relationship between the distribution of big endogenic ore deposits and the basement fracture pattern: Examples from four continents. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 565-593.

La Berge, G. L., 1976. Major structural lineaments in the Precambrian of central Wisconsin. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 508-518.

Lagrange, J. L., 1772. Essai sur le Probleme du Trois Corps. Paris Academy (Collected Works, vol 6), pp. 229 et seq.

Lambert, I. B., and Wyllie, P. J., 1970. Low-velocity zone of the Earth's mantle: Incipient melting caused by water. Science,

196, 764-766.

Laplace, S. P., 1796. Exposition du Systeme du Monde. Paris.

Laravie, J. A., 1975. Geometry and lateral strain of subducted plates in island arcs. Geology, 3, 484-486.

Lathram, E. H., and Albert, N. R., 1976. Significance of space image linears in Alaska. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 11-26.

Laubscher, H., 1969. Mountain building. Tectonophys., 7, 551-563.

Lawson, A. C., 1942. Mississippi Delta: A study in isostasy. Geol. Soc. Amer. Bull., 53, 1231-1254.

Lee, W. H. K., and MacDonald, G. F. J., 1963. The global variation of terrestrial heat flow. J. Geophys. Res., 68, 6481-6492.

Le Fort, P., 1971. Le chaine himalayenne et la derive des continents. Rev. Geog. Phys. Geol. Dyn., ser 2, 13, 5-12.

Le Fort, P., 1975. Himalayas, the collided range: Present knowledge of the continental arc. Amer. J. Sci., 275, ser A, 1-44.

Le Pichon, X., 1968. Seafloor spreading and continental drift. J. Geophys. Res., 73, 3661-3697.

Le Pichon, X., and Heirtzler, J. R., 1968. Magnetic anomalies in the Indian Ocean and seafloor spreading. J. Geophys. Res., 73, 2101-2117.

Le Pichon, X., Francheteau, J., and Bonnin, J., 1973. Plate Tectonics. Elsevier, Amsterdam, 300 pp.

Lewandowski, D. W., Jennings, T. V., and Lehman, W. T., 1976. Relation between ERTS lineaments: Aeromagnetic anomalies and geological structures in north-central Nevada. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 106-117.

Levin, B., 1958. The Origin of the Earth and Planets. Foreign Language Publishing House, Moscow, 88 pp.

Levinson, A. A., 1974. Introduction to Exploration Geochemistry. Applied Publising, Calgary, 612 pp.

Levorsen, A. I., 1967. Geology of Petroleum, 2d ed. W. H. Freeman, San Francisco, 724 pp.

- Levy, E. H., 1976. Generation of planetary magnetic fields. In: Donath et al. (Editors) (q. v.), pp. 159-185.
- Liebermann, R. C., and Schreiber, E., 1969. Critical thermal gradients in the mantle. Earth Planet. Sci. Ltr., 7, 77-81.
- Lindgren, W., 1933. Mineral Deposits, 4th ed. McGraw-Hill, New York, 930 pp.
- Lomnitz, C., 1974. Global Tectonics and Earthquake Risk. Elsevier, Amsterdam, 320 pp.
- Louden, K. E., 1976. Magnetic anomalies in the west Philippine basin. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 253-267.
- Loves, F. J., and Runcorn, S. K., 1951. The analysis of geomagnetic secular variation. Phil. Trans. Roy. Soc., A-243, 525.
- Lowman, P. D., Jr., 1976. Crustal evolution in silicate planets: Implications for the origin of continents. J. Geol., 84, 1-26.
- Lubimova, E. A., and Feldman, I. S., 1970. Heat flow, temperature, and electrical conductivity of the crust and upper mantle in the USSR. Tectonophys., 10, 245-281.
- Luyendyk, B. P., 1971. Comments on paper by J. W. Minear and M. N. Toksoz, "Thermal regime of a downgoing slab and new global tectonics". J. Geophys. Res., 76, 605-606.
- Lyttleton, R. A., 1961. An accretion hypothesis for the origin of the solar system. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 122, 399-405.
- Macdonald, G. A., 1976. Some highlights in the development of volcanology in the Pacific area. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 309-317.
- MacDonald, W. D., 1976a. Paleomagnetic results from Honduras, Central America, and the derivation of the Caribbean plate. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 239.
- Macdonald, K. C., and Reid, I., 1976. How does the Mid-Atlantic Ridge median valley evolve into the rift mountains? Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 335-336.
- Macdougall, D., 1971. Deep sea drilling: Age and composition of an Atlantic basaltic intrusion. Science, 171, 1244-1245.

Magnitsky, V. A., and Zharkov, V. N., 1969. Low-velocity layers in the upper mantle. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 664-675.

Margolis, S. V., and Burns, R. G., 1976. Pacific deep-sea manganese nodules: Their distribution, composition, and origin. In: Donath et al. (Editors) (q. v.), pp. 229-263.

Markov, A. V., 1962. The Moon: A Russian View. Univ. of Chi. Press, Chicago, 391 pp.

Markowitz, W., and Guinot, B. (Editors), 1968. Continental Drift, Secular Motion of the Pole, and Rotation of the Earth. Reidel Dordrecht, 107 pp.

Marlow, M. S., Scholl, D. W., Cooper, A. K., and Buffington, E. C., 1976. Structure and evolution of Bering Sea shelf south of St. Lawrence Island. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 161-183.

Martin, H., 1969. Problems of age relations and structure in some metamorphic belts of southern Africa. Geol. Assoc. Can. Spl. Pbr., 5, pp. 17-26.

Mathews, J. H., and Gardner, W. K., 1963. Field reversals of "paleomagnetic" type in coupled disc dynamos. U. S. Naval Res. Lab. Rpt., 5886.

Maxwell, A. E., Von Herzen, R. P., Hsu, K. J., Andrews, J. E., Saito, T., Percival, S. F., Milow, E. D., and Boyce, R. E., 1970. Deep sea drilling in the South Atlantic. Science, 168, 1047-1059.

McBirney, A. R., 1969. Andesitic and rhyolitic volcanism of orogenic belts. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 501-507.

McBirney, A. R., 1970. Cenozoic igneous events of the Circum-Pacific. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 2, 749-751.

McBride, S. L., Caelles, J. C., Clark, A. H., and Farrar, E., 1976. Paleozoic radiometric age provinces in the Andean basement, latitudes 25° to 30°. Earth Planet Sci. Ltr., 29, 373-383.

McCall, G. J. H., 1973. Meteorites and Their Origins. Wiley, New York, 352 pp.

McCarthy, T. S., 1976. Chemical interrelationships in the low-pressure granulite terrain in Namaqualand, South Africa, and their bearing on granite genesis and the composition of the lower crust.

Geochim. Cosmochim Acta, 40, 1057-1068.

McDougall, I., 1971. Volcanic island chains and seafloor spreading. Nature, 231, 141-144.

McDougall, I., 1976. Geochemistry and origin of basalt of the Columbia River group, Oregon and Washington. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 777-792.

McElhinny, M. W., 1970. Formation of the Indian Ocean. Nature, 228, 977-979.

McElhinny, M. W., 1971. Geomagnetic reversals during the Phanerozoic. Science, 172, 157-159.

McElhinny, M. W., 1973. Paleomagnetism and Plate Tectonics. Univ. Press, Cambridge, 358 pp.

McElhinny, M. W., and Evans, M. E., 1976. Paleomagnetic results from the Hart dolerite of Kimberley Block, Australia. Precamb. Res., 3, 231-241.

McKenzie, D. P., 1971. Comments on paper by J. H. Mearns and M. N. Toksoz, "Thermal regime of a downgoing slab and new global tectonics". J. Geophys. Res., 76, 607-609.

McKenzie, D., and Bowin, C., 1976. The relationship between bathymetry and gravity in the Atlantic Ocean. J. Geophys. Res., 81, 1903-1915.

McKenzie, D. P., and Morgan, W. J., 1969. The evolution of triple junctions. Nature, 224, 125-133.

McKenzie, D. P., and Parker, R. L., 1967. The north Pacific: An example of tectonics on a sphere. Nature, 216, 1276-1280.

McKenzie, D. P., and Sclater, J. G., 1971. The evolution of the Indian Ocean since the late Cretaceous. Roy. Astron. Soc. Geophys. J., 24, 437-528.

Menard, H. W., 1973. Does Mesozoic mantle convection still persist? Earth Planet Sci. Ltr., 20, 237-241.

Menard, H. W., 1973. Epeirogeny and plate tectonics. Trans. Amer. Geophys. Un, 54, 1244-1255.

Menzies, M., 1976. Rifting of a Tethyan continent: Rare earth evidence of an accreting plate margin. Earth Planet. Sci. Ltr., 28,

427-438.

Merritt, F. S., 1962. Mathematics Manual. McGraw-Hill, New York, 378 pp.

Meyerhoff, A. A., and Meyerhoff, H. A., 1976. Climatically controlled sediments, the geomagnetic field, and trade wind belts in Phanerozoic time: A discussion. J. Geol., 84, 365-375.

Minakami, T., 1974. Prediction of volcanic eruptions. In: L. Civella et al. (Editors), Physical Volcanology. Elsevier, New York, 313-333.

Miner, J. W., and Toksoz, M. N., 1970. Thermal regime of a downgoing slab and new global tectonics. J. Geophys. Res., 75, 1397-1419.

Misik, M. (Editor), 1968. Orogenic Belts. Academia, Prague, 327 pp.

Mitchell, A. H. G., and Garson, M. S., 1972. Relationship of porphyry copper and circum-Pacific tin deposits to paleo-Benioff zones. Trans. Inst. Min. Metall., 81, 10-25.

Mitchell, A. H., and Reading, H. G., 1969. Continental margins, geosynclines, and ocean floor spreading. J. Geol., 77, 629-646.

Miyashiro, A., 1975. Petrology and plate tectonics. Rev. Geophys. Space Phys., 13(3), 94-101.

Mohr, P. A., 1971. Ethiopian rift and plateaus: Some volcanic petrochemical differences. J. Geophys. Res., 76, 1967-1984.

Mohr, P. A., 1976. ENE-trending lineaments of the African Rift system. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 327-336.

Mohr, P. A., and Potter, E. C., 1976. The Sagatu Ridge dike swarm, Ethiopian rift margin. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1, 55-71.

Molnar, P., and Oliver, J., 1969. Lateral variations of attenuation in the upper mantle and discontinuities in the lithosphere. J. Geophys. Res., 74, 2648-2682.

Molnar, P., and Tapponnier, P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. Science, 189, 419-426.

Moody, J. D., 1966. Crustal shear patterns and orogenesis. Tectonophys., 3, 479-522.

- Moody, J. D., and Hill, M. J., 1956. Wrench fault tectonics. Geol. Soc. Amer. Bull., 67, 1207-1246.
- Moore, P., 1963. A Survey of the Moon. Norton, New York, 333 pp.
- Moore, J. C., 1975. Selective subduction. Geology, 3, 530-532.
- Morey, G. B., and Sims, P. K., 1976. Boundary between two Precambrian W terranes in Minnesota and its geologic significance. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 141-152.
- Morgan, W. J., 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. J. Geophys. Res., 73, 1959-1982.
- Morgan, W. J., 1971. Convection plumes in the lower mantle. Nature, 230, 42-42.
- Morgan, W. J., 1972. Deep mantle convection plumes and plate motion. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 56, 203-213.
- Morgan, W. J., 1972a. Plate motions and deep mantle convection. In: Shagam et al. (Editors), Studies in Earth and Space Sciences. Geol. Soc. Amer., Boulder, pp. 7-22.
- Morgan, J. W., Ganapathy, R., Higuchi, H., and Krahenbuhl, U., 1976. Volatile and siderophile trace elements in anorthositic rocks from Fiskenaesset, West Greenland: Comparison with lunar and meteoritic analogues. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 861-887.
- Morner, N. A., 1976. Eustasy and geoid changes. J. Geol., 84, 123-151.
- Mossakovskii, A. A., 1972. Palaeozoic orogenic volcanism in Eurasia: Principal complexes and the tectonic factors in their distribution. Geotectonics, 1, 14-22.
- Moulton, F. R., 1914. An Introduction to Celestial Mechanics. Macmillan, New York, pp. 277 et seq.
- Muehlberger, W. R., and Ritchie, A. W., 1975. Caribbean-Americas plate boundary in Guatemala and southern Mexico as seen on Skylab IV orbital photography. Geology, 3, 232-235.
- Mueller, S. (Editor), 1974. Structure of the Earth's Crust Based on Seismic Data. Elsevier, Amsterdam, 391 pp.
- Myers, J. S., 1976. Granitoid sheets, thrusting, and Archean

- crustal thickening in West Greenland. Geology, 4, 265-268.
- Nagata, T., 1969. Length of geomagnetic polarity intervals. J. Geomagnet. Geoelect., 21, 701-704.
- Naidu, P. S., 1974. Are geomagnetic field reversals independent? J. Geomagnet. Geoelect., 26, 101-104.
- Naidu, P. S., 1975. Second-order statistical structure of geomagnetic field reversals. J. Geophys. Res., 80, 803-806.
- Nakano, T., 1970. Origin of the solar system. Prog. Theor. Phys., 44, 77-98.
- Naldrett, A. J., 1970. Synvolcanic ultramafic bodies: A new class. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 2, 633-634.
- Nalivkin, D. V., 1973. Geology of the USSR. Univ. of Toronto Press, Toronto, 855 pp.
- Naqvi, S. M., Rao, D., and Narain, H., 1974. The protocontinental growth of the Indian Shield and the antiquity of its rift valleys. Precamb. Res., 1, 345-398.
- Neary, C. R., Gass, I. G., and Cavanagh, B. J., 1976. Granitic association of northeastern Sudan. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 1501-1512.
- Needham, H. D., Choukroune, P., Cheminee, J. L., Le Pichon, X., Francheteau, J., and Tapponnier, P., 1976. The accreting plate boundary: Ordoukoba rift (northeast Africa) and the oceanic rift valleys. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 439-453.
- Neill, W. M., 1976. Mesozoic epeirogeny at the South Atlantic margin at the Tristan hot spot. Geology, 4, 495-498.
- Neprochnov, Y. P., Kosminskaya, I. P., and Malovitsky, Y. P., 1970. Structure of the crust and upper mantle of the Black and Caspian seas. Tectonophys., 10, 517-538.
- Newhouse, W. H. (Editor), 1942. Ore Deposits as Related to Structural Features. Princeton Univ. Press, Princeton, 280 pp.
- Nickelsen, R. P., 1976. Early jointing and cumulative fracture patterns. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 193-199.
- Nieto, M. M., 1972. The Titius-Bode Law of Planetary Distances: Its History and Theory. Pergamon, Oxford, 161 pp.

Ninkovich, D., 1976. Late Cenozoic clockwise rotation of Sumatra. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 269-275.

Noble, D. C., and 6 others, 1975. Chemical and isotopic constraints on the origin of low-silica latite and andesite from the Andes of central Peru. Geology, 3, 501-504.

Oakeshott, G. B., 1976. Volcanoes and Earthquakes: Geologic Violence. McGraw-Hill, New York, 128 pp.

Ohnaka, M., 1976. A physical basis for earthquakes based on the elastic rebound model. Bull. Seis. Soc. Amer., 66, 433-451.

Ojakanagas, R. W., and Darby, D. G., 1976. The Earth: Past and Present. McGraw-Hill, New York, 224 pp.

O'Keefe, J. A. (Editor), 1963. Tektites. Univ. of Chi. Press, Chicago, 228 pp.

O'Keefe, J. A., 1970. Geochemical evidence for the origin of the Moon. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 350.

Oliver, J., Sykes, L., and Isaacks, B., 1969. Seismology and the new global tectonics. Tectonophys., 7, 527-541.

Oversby, V. M., and Gast, P. W., 1968. Lead isotope compositions and uranium decay series disequilibrium in recent volcanic rocks. Earth Planet. Sci. Ltr., 5, 199-206.

Oxburgh, E. R., 1972. Plate tectonics and continental collision. Nature, 239, 202-204.

Oxburgh, E. R., 1975. Reviews. Econ. Geol., 70, 1298.

Pan, C., 1971. The wandering of the pole and the Earth's evolution cycle. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 355.

Park, R. G., and Tarney, J. (Editors), 1973. The Early Precambrian of Scotland and Related Rocks of Greenland. Univ. of Keele, Keele, 194.

Parker, E. N., 1969. The occasional reversal of the geomagnetic field. Astrophys. J., 158, 815-827.

Parmentier, E. M., Turcotte, D. L., and Torrance, K. E., 1975. Numerical experiments on the structure of mantle plumes. J. Geophys. Res., 80, 4417-4424.

Parmentier, E. M., Turcotte, D. L., and Torrance, K. E., 1976.

Studies of finite amplitude Non-Newtonian thermal convection with applications to convection in the Earth's mantle. J. Geophys. Res., 81, 1839-1846.

Pavlovsky, E. V., 1953. On some general regularities of the Earth's crust development. Izv. Acad. Sci. USSR, Geol. Ser., 5, 82-89.

Pavoni, N., 1976. Recent crustal movements and neotectonics of the Middle East. In: Drake (Editor) (q. v.), pp. 236-237.

Pavoni, N., and Green, R., 1976. Recent Crustal Movements. Elsevier, Amsterdam, 554 pp.

Pereira, J., and Dixon, C. J., 1971. Mineralization and plate tectonics. Min. Dep., 6, 404-405.

Peter, G., and Westbrook, G. K., 1976. Tectonics of southwestern North Atlantic and Barbados Ridge complex. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 1078-1106.

Peterson, R. M., 1976. Curvilinear features visible on small scale imagery as indicators of geologic structure. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 618-625.

Petrasccheck, W. E. (Editor), 1974. Metallogenic and Geochemical Provinces. Springer, Vienna, 183 pp.

Pettijohn, F. J., 1972. The Archean of the Canadian Shield: A resume. In: Doe and Smith (Editors) (q. v.), pp. 131-149.

Phillips, J. D., Woodside, J., and Bowin, C. o., 1969. Magnetic and gravity anomalies in the central Red Sea. WHOI Contribution 2182, 22 pp.

Piper, J. D. A., 1976. Definition of pre-2000 m. y. apparent polar movements. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 470-478.

Pitcher, M. G. (Editor), 1973. Arctic Geology. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, 747 pp.

Pitman, W. C., 1971. Seafloor spreading and plate tectonics. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, I 130 - I 135.

Plafker, G., 1976. Tectonic implications of oriented lakes and lineaments in northeastern Bolivia. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 519.

Poldervaart, A. (Editor), 1955. Crust of the Earth. Geol. Soc. Amer., New York, 761 pp.

Pollack, H. N., 1976. Thermal evolution of the North American shield and platform. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 503.

Pollack, H. N., and Chapman, D. S., 1976. Global map of mantle heat flow. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 328.

Popelar, J., 1968. Gravity field and isostasy in the area of the Czechoslovak West Carpathians. Sbornik Geologických Ved, Úzita geofyzika, 7, 7-24.

Pouba, Z., and Stempok, M., 1970. Problems of Hydrothermal Ore Deposits. Schweitzerbartsche Verlag, Stuttgart, 396 pp.

Powell, B. N., 1976. Relation of the layered series to other rocks of the Wichita complex, Oklahoma, and resulting Precambrian structural relations. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 59.

Powell, C., 1976. Array evidence for lower mantle heterogeneity beneath subduction zones. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 284.

Press, F., 1972. The Earth's interior inferred from a family of models. In: Robertson (Editor) (q. v.), pp. 147-171.

Press, F., 1976. Haicheng and Los Angeles: A tale of two cities. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 1435-1436.

Press, F., and 12 others, 1975. Earthquake research in China. Trans. Amer. Geophys. Un., 56, 838-881.

Price, R. A., and Mountjoy, E. W., 1970. Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca rivers; Progress report. Geol. Assoc. Can. Spl. Ppr. 6, 7-25.

Prince, R. A., and Kulm, L. D., 1975. Crustal rupture and the initiation of imbricate thrusting in the Peru-Chile Trench. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 1639-1653.

Prouty, C. E., 1976. Michigan Basin: A wrenching deformation model? Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 505.

Rankin, D. W., 1976. Alkalic ash-flow tuffs at Mt. Rogers, Virginia: The site of a late Precambrian triple junction. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 620.

Rao, R. U. M., Rao, G. V., and Narain, H., 1976. Radioactive heat generation and heat flow in the Indian shield. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 57-64.

Ray, K. K., and Acharyya, S. K., 1976. Concealed Mesozoic-Cenozoic Alpine Himalayan geosyncline and its petroleum possibilities. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 794-808.

Rayleigh, Lord, 1916. On convective currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side. Phil. Mag., 32, 529-546.

Rea, D. K., 1976. Changes in the axial configuration of the East-Pacific Rise near 6° S during the past 2 m. y. J. Geophys. Res., 81, 1495-1504.

Read, H. H., 1975. The Granite Controversy. Murby and Co., London, 430 pp.

Reid, H. F., 1911. The elastic rebound theory of earthquakes. Bull. Dept. Geol. Univ. Calif., 6, 413-420.

Rice, A., and Fairbridge, R. W., 1975. Thermal runaway in the mantle and neotectonics. Tectonophys., 29, 59-72.

Richards, T. A., and McTaggart, K. C., 1976. Granitic rocks of the southern Coast Plutonic Complex and northern Cascades of British Columbia. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 935-953.

Richardson, E. S., and Harrison, C. G. A., 1976. Opening of the Red Sea with two poles of rotation. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 135-142.

Richardson, R. M., Solomon, S. C., and Sleep, N. H., 1976. Intraplate stress as an indicator of plate tectonic driving forces. J. Geophys. Res., 81, 1847-1856.

Richter, C. F., 1958. Elementary Seismology. Freeman, San Francisco, 768 pp.

Richter, F. M., and Parsons, B., 1975. On the interaction of two scales of convection in the mantle. J. Geophys. Res., 80, 2529-2541.

Riding, R., 1974. Model of the Hercynian foldbelt. Earth Planet. Sci. Ltr., 24, 125-135.

- Ridley, W. I., 1976. Petrology of lunar rocks and implication to lunar evolution. In: Donath et al. (Editors) (q. v.), pp. 15-48.
- Rikitake, T., 1958. Oscillations of a system of disk dynamos. Proc. Cambr. Phil. Soc., 54, 89-105.
- Rikitake, T., 1966. Electromagnetism and the Earth's Interior. Elsevier, Amsterdam, 308 pp.
- Rikitake, T., 1969. Conductivity anomaly of the upper mantle. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 463-469.
- Rikitake, T., 1975. Models of the Earth's magnetic field generation. In: Fisher et al. (Editors) (q. v.), pp. 187-196.
- Rikitake, T., 1976. Earthquake Prediction. Elsevier, Amsterdam, 357 pp.
- Rinehart, J. S., 1975. Faulting in geothermal areas. Geotherm. En., 3(12), 7-24.
- Ringwood, A. E., 1969. Composition and evolution of the upper mantle. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 1-17.
- Ringwood, A. E., 1970. Origin of the Moon: The precipitation hypothesis. Earth Planet. Sci. Ltr., 8, 131-140.
- Ringwood, A. E., 1970b. Origin of the Moon. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 346.
- Ringwood, A. E., 1971. Core-mantle equilibrium. Geochim. Cosmochim. Acta, 35, 223-230.
- Ringwood, A. E., 1974. The petrological evolution of island arc systems. J. Geol. Soc. Lond., 130, 183-204.
- Ringwood, A. E., 1976. Phase transformations in descending plates: Implications for mantle dynamics and differentiation. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 391-398.
- Ritsema, A. R. (Editor), 1972. The Upper Mantle. Elsevier, Amsterdam, 644 pp.
- Robert, D., 1976. Lineament trends in France. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 308.
- Robertson, E. C. (Editor), 1972a. The Nature of the Solid Earth. McGraw-Hill, New York, 677 pp.
- Robertson, C. E., 1976. Tectonic linears of the Ozarks glades

region of southwestern Missouri. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 192.

Robertson, A. H. F., and Fleet, A. J., 1976. The origin of rare earths in metalliferous sediments of the Troodos Massif, Cyprus. Earth Planet. Sci. Ltr., 28, 385-394.

Robinson, R., 1976. Relative teleseismic traveltimes residuals, North Island, New Zealand, and their relation to upper-mantle structure. Tectonophys., 31, T41-T48.

Rod, E., Van der Voo, R., Mauk, F. J., and French, R. B., 1976. Permian-Triassic continental configurations and the origin of the Gulf of Mexico: Comment (ER) and reply (RV, FM, and RF). Geology, 4, 703.

Roddick, J. C., Compston, W., and Durney, D. W., 1976. The radiometric age of the Mount Keith granodiorite, a maximum age estimate for an Archean greenstone sequence in the Yilgarn block, Western Australia. Precambr. Res., 3, 55-78.

Rodgers, J., 1970. The Tectonics of the Appalachians. Wiley-Interscience, New York, 272 pp.

Rodolfo, K. S., 1971. Contrasting geometric adjustment styles of drifting continents and spreading sea floors. J. Geophys. Res., 76, 3272-3281.

Rodriguez, R. E., Ramon-Cabre, S. J., and Mercado, A., 1976. Geometry of the Nazca plate and its geodynamic implications. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 87-103.

Roeder, D., 1976. Plate tectonics models for the Ouachita foldbelt: Reply. Geology, 4, 637.

Rogers, J. W. W., 1976. Continental evolution of continental sial through geologic time. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 258-259.

Roggensten, W., Fischer, A. G., Napoleone, G., and Fischer, J. F., 1976. Paleomagnetism and age of Wichita Mountain basement. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 62.

Rona, P. A., 1976. Asymmetric fracture zones and seafloor spreading. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 109-116.

Rona, P. A., Harbison, R. N., Bassinger, B. G., Scott, R. B., and Nalwalk, A. J., 1976. Tectonic fabric and hydrothermal activity of Mid-Atlantic Ridge crest (Lat. 26°N). Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 661-674.

Roper, P. J., 1974. Plate tectonics: A plastic as opposed to a rigid body model. Geology, 2, 247-250.

Rosenberg, G. D., and Runcorn, S. K. (Editors), 1975. Growth Rhythms and the History of the Earth's Rotation. Wiley, New York, 560 pp.

Ross, D. A., Degens, E. T., and MacIlvaine, A., 1970. Black Sea: Recent sedimentary history. Science, 170, 163-165.

Routhier, P., 1976. A new approach to metallogenic provinces: The example of Europe. Econ. Geol., 71, 803-811.

Roy, A. E., 1967. Bode's law. In: S. K. Runcorn (Editor), International Dictionary of Geophysics, 2 vols. Pergamon, Oxford, p. 146.

Rubey, W. W., 1951. Geologic history of sea water: An attempt to state the problem. Geol. Soc. Amer. Bull., 62, 1111-1147.

Rubey, W. W., 1955. Development of the hydrosphere and atmosphere with special reference to probable composition of the early atmosphere. Geol. Soc. Amer. Spl. Ppr. 62, 631-650.

Runcorn, S. K. (Editor), 1962. Continental Drift. Academic, New York, 338 pp.

Runcorn, S. K., 1969. Convection in the mantle. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 692-698.

Runcorn, S. K., 1973. Polar wandering and continental drift. In: Tarling and Runcorn (Editors) (q. v.), pp. 995-997.

Runcorn, S. K., 1974. On the forces not moving lithospheric plates. Tectonophys., 21, 197-202.

Runcorn, S. K., and Urey, H. C. (Editors), 1972. The Moon. Reidel, Dordrecht, 238 pp.

Russell, H. N., 1935. The Solar System and Its Origin. Macmillan, New York, 235 pp.

Saggerson, E. P., and Turner, L. M., 1976. A review of the

distribution of metamorphism in the ancient Rhodesian craton.

Precamb. Res., 3, 1-53.

Salop, L. I., and Scheinmann, Yu. m., 1969. Tectonic history and structure of platforms and shields. Tectonophys., 7, 565-597.

Sawkins, F. J., 1976a. Widespread continental rifting: Some considerations of timing and mechanism. Geology, 4, 427-430.

Sawkins, F. J., 1976b. Metal deposits related to intracontinental hotspots and rifting environments. J. Geol., 84, 653-671.

Scheibner, E., 1976. Theory of lateral propagation (inflection, imposition) of major shears. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 604-608.

Scheidegger, A. E., 1963. Principles of Geodynamics. Academic, New York, 362 pp.

Scheidegger, A. E., 1972. The rheology of the tectonosphere. Internat. Geol. Cong. Abstr., 24, 99.

Scheidegger, A. E., 1976. Foundations of Geophysics. Elsevier, Amsterdam, 238 pp.

Schilling, J. G., 1976. Galapagos mantle plume: Geochemical evidence. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 343.

Schmidt, O. J., 1958. Theory of the Earth's Origin. Foreign Languages Publishing House, Moscow, 139 pp.

Scholl, D. W., Marlow, M. S., MacLeod, N. S., and Buffington, E. C., 1976. Episodic Aleutian Ridge igneous activity: Implications of Miocene and younger submarine volcanism west of Buldir Island. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 547-554.

Scholz, C. H., Barazangi, M., and Sbar, M., 1971. Cenozoic evolution of the Basin and Range province. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 350.

Schuchert, C., 1923. Sites and natures of North American geosynclines. Geol. Soc. Amer. Bull., 34, 151-260.

Sclater, J. G., and Crowe, J., 1976. On the reliability of oceanic heat flow averages. J. Geophys. Res., 81, 2997-3006.

Sclater, J. G., and Francheteau, J., 1970. The implications of terrestrial heat flow observations on current tectonic and

geochemical models of the crust and upper mantle of the Earth. Geophys. J., 20, 493-509.

Sclater, J. G., Hawkins, J. W., and Chase, C. G., 1971a. Crustal extension between the Tonga and Lau ridges: Petrologic and geophysical evidence. Trans. Amer. Geophys. Un., 52, 194.

Sclater, J. G., Karig, D., Lawver, L. A., and Loudon, K., 1976. Heat flow, depth, and crustal thickness of the marginal basins of the south Philippine Sea. J. Geophys. Res., 81, 309-318.

Sclater, J. G., Bowin, C., Hey, R., Hoskins, H., Peirce, J., Phillips, J., and Tapscott, C., 1976a. The Bouvet triple junction. J. Geophys. Res., 81, 1857-1869.

Sclater, J. G., Luyendyk, B. P., and Meinke, L., 1976b. Magnetic lineations in the southern part of the Central Indian Basin. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 371-378.

Scott, R. B., Malpas, J., Rona, P. A., and Udintsev, G., 1976. Duration of hydrothermal activity at an oceanic spreading center, Mid-Atlantic Ridge (lat 26°N). Geology, 4, 233-236.

Scrutton, R. A., 1976. Microcontinents and their significance. In: Drake (Editor) (q. v.), pp. 177-188.

Sengor, A. M. C., 1976. Rift valley formation as a combined result of parting and uplift. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 65.

Sharma, P. V., 1976. Geophysical Methods in Geology. Elsevier, Amsterdam, 428 pp.

Sharman, G. F., Reickle, M. S., and Brune, J. S., 1976. Detailed study of relative plate motion in the Gulf of California. Geology, 4, 206-210.

Sharp, J. M., Jr., and Domenico, P. A., 1976. Energy transport in thick sequences of compacting sediments. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 390-400.

Shatsky, N. S., 1946. The Wegener hypothesis of geosynclines. Izv. Acad. Sci. USSR, Geol. Ser., 4, 7-21.

Shatsky, N. S., and Bogdanoff, A. A., 1960. La Carte Tectonique Internationale de l'Europe au 2.000.000<sup>e</sup>. Izv. Acad. Sci. USSR, Moscow.

- Shaw, H. R., 1973. Mantle convection and volcanic periodicity in the Pacific: Evidence from Hawaii. Geol. Soc. Amer. Bull., 84, 1505-1526.
- Shaw, C. E., 1976. Large-scale recumbent folding in the Valley and Ridge province of Alabama. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 87, 407-418.
- Shaw, H. R., and Jackson, E. D., 1973. Linear island chains in the Pacific: Result of thermal plumes or gravitational anchors? J. Geophys. Res., 78, 8634-8652.
- Shaw, D. M., Dostal, J. and Keays, R. R., 1976. Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 73-83.
- Shih, J., and Molnar, P., 1975. Analysis and implications of the sequence of ridge jumps that eliminated the Surveyor transform fault. J. Geophys. Res., 80, 4815-4822.
- Shor, G. G., Kirk, H. K., and Menard, H. W., 1971. Crustal structure of the Melanesian area. J. Geophys. Res., 76, 2562-2586.
- Short, N. M., 1975. Planetary Geology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 361 pp.
- Shtreys, N. A., and Tseysler, V. M., 1972. Formation of geosynclinal regions. Geotectonics, 1, 1-2.
- Shurbet, D. H., and Cebull, S. E., 1975. The age of the crust beneath the Gulf of Mexico. Tectonophys., 28, T25-T30.
- Siedner, G., and Mitchell, J. G., 1976. Episodic Mesozoic volcanism in Namibia and Brazil: A K-Ar isochron study bearing on the opening of the South Atlantic. Earth Planet. Sci. Ltr., 30, 292-302.
- Sillitoe, R. H., 1972a. Relation of metal provinces in western America to subduction of oceanic lithosphere. Geol. Soc. Amer. Bull., 83, 813-818.
- Sillitoe, R. H., 1972b. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Econ. Geol., 67, 184-197.
- Sillitoe, R. H., 1973c. Formation of certain massive sulphide deposits in sites of seafloor spreading. Trans. Inst. Min. Metall., 81, B141-B148.

Sillitoe, R. H., 1974. Tin mineralization above mantle hot-spots. Nature, 248, 497-499.

Sillitoe, R. H., 1975. Subduction and porphyry copper deposits in southwestern North America: A reply to recent objections. Econ. Geol., 70, 1474-1477.

Sims, P. K., 1976. Early Precambrian tectonic-igneous evolution in the Vermilion district, northeastern Minnesota. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 379-389.

Singer, S. F., 1970. The early history of the Earth-Moon system. Trans. Amer. Geophys. Un., 51, 350.

Sinha-Roy, S., and Stonely, R., 1976. On the origin of ophiolite complexes in the southern Tethys region: Discussion (S-R) and reply (S). Tectonophys., 34, 257-265.

Sipkin, S. A., and Jordan, T. H., 1976. Lateral heterogeneity of the upper mantle from multiple ScS travel times. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 283.

Skehan, J. W., and Rast, N., 1976. Paleozoic margins of paleo-American and Paleo-Eurafrican plates: Drifting or rifting? Geology, 4, 185-186.

Sleep, N. H., 1976. Michigan basin: Mechanics of formation. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 509.

Sleep, N. H., and Toksoz, M. N., 1971. Evolution of marginal basins. Nature, 233, 548-550.

Smith, M. R., 1976. Arcuate structural trends and basin and range structures. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), pp. 626-634.

Smith, A. G., 1976b. Plate tectonics and orogeny: A review. Tectonophys., 33, 215-285.

Smith, D. L., and Fuller, W. R., 1976. Heat flow in Florida. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 271.

Smith, J. W., Kunz, C. S., Williams, A. L., and Scheper, R. J., 1976. Structural and photographic lineaments, gravity, magnetics, and seismicity of central USA. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.) pp. 163-168.

Smith, R. B., Mabey, D. R., and Eaton, G. P., 1976a. Regional geophysics and tectonics of the Intermountain West. Geology, 4, 437-438.

Solomon, S., and Biehler, S., 1969. Crustal structure from gravity anomalies in the southwest Pacific. J. Geophys. Res., 74, 6696-6707.

Solomon, S. C., Sleep, N. H., and Jurdy, D. M., 1976. Absolute plate motions in the early Tertiary. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 329.

Spencer, A. M. (Editor), 1974. Mesozoic-Cenozoic Orogenic Belts: Data for Orogenic Studies. Scottish Academic, Edinburgh, 809 pp.

Stacey, F. D., 1969. Physics of the Earth. Wiley, New York, 324 pp.

Stacey, F. D., 1976. Paleomagnetism of meteorites. In: Donath et al. (Editors) (q. v.), pp. 147-157.

Steiner, M. B., and Helsley, C. E., 1975. Reversal patterns and apparent polar wander for the Late Jurassic. Geol. Soc. Amer. Bull., 86, 1537-1543.

Stemprok, M. (Editor), 1968. Endogenous Ore Deposits. Academia, Prague, 425 pp.

Stephansson, O., and Johnson, K., 1976. Granite diapirism in the Rum Jungle area, northern Australia. Precamb. Res., 3, 159-185.

Stewart, J. H., 1976. Late Precambrian evolution of North America: Plate tectonics implications. Geology, 4, 11-15.

Stewart, R. J., 1976a. Turbidites of the Aleutian abyssal plain: Mineralogy, provenances, and constraints for Cenozoic motion of the Pacific plate. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 793-808.

Stille, H., 1940. Einfuehrung in den Bau Nordamerikas. Borntraeger, Verlag., Berlin, 717 pp.

Stone, D. B., and Cameron, C. P., 1970. Paleomagnetic investigations in Alaska. Alaska Sci. Conf. 20th, 1969, Proc., 311-318.

Strand, T., and Kulling, O., 1972. Scandinavian Caledonides. Wiley-Interscience, London, 302 pp.

Strong, D. F. (Editor), 1976. Metallogeny and Plate Tectonics. Geol. Assoc. Can., Waterloo, 660 pp.

Struve, O., Lynds, B., and Pillans, H., 1959. Elementary Astronomy. Oxford, New York, 396 pp.

Stump, E., Corbato, C. E., and Browning, A., 1976. Stratigraphy of the Fairweather formation, central Transarctica Mountains. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 8, 511-512.

Suarez, M., 1976. Plate-tectonic model for southern Antarctic Peninsula and its relation to southern Andes. Geology, 4, 211-214.

Suess, E., 1909. The Face of the Earth. Clarendon, Oxford, 2 vols, 400 and 673 pp.

Sugimura, A., and Uyeda, S., 1973. Island Arcs: Japan and Its Environs. Elsevier, Amsterdam, 247 pp.

Sumartojo, J., and Gostin, V. A., 1976. Geochemistry of the Late Precambrian Stuart Tillite, Flinders Ranges, South Australia. Precambr. Res., 3, 243-252.

Sung, C. M., and Burns, R. G., 1976. Kinetics of high-pressure phase transformations: Implications to the evolution of the olivine-spinel transition in the downgoing lithosphere and its consequences on the dynamics of the mantle. Tectonophys., 31, 1-32.

Sutton, G. H., Maynard, G. L., and Hussong, D. M., 1971. Widespread occurrences of high-velocity basal layer in the Pacific crust found with repetitive sources and sonobuoys. In: J. G. Heacock (Editor), The Structure and Physical Properties of the Earth's Crust (Monog. 14). Amer. Geophys. Un., Washington, pp. 193-209.

Sutton, G. H., Manghnani, M. H., and Moberly, R. (Editors), 1976. The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and Its Margin. Amer. Geophys. Un., Washington, 480 pp.

Sykes, L. R., Isacks, B. L., and Oliver, J., 1969. Spatial distribution of deep and shallow earthquakes of small magnitude in the Fiji-Tonga region. Seis. Soc. Amer. Bull., 59, 1093-1113.

Sylvester-Bradley, P. C., 1968. Tethys, the lost ocean. Sci. J., 4, 47-53.

Tacier, J. D., Switzer, P., and Cox, A., 1975. A model

relating undetected geomagnetic polarity intervals to the observed rate of reversals. J. Geophys. Res., 80, 4446-4448.

Takeuchi, H., and Sakata, S., 1970. Convection in a mantle of variable viscosity. J. Geophys. Res., 75, 921-927.

Takeuchi, H., Uyeda, S., and Kanamori, H., 1967. Debate about the Earth. Freeman-Cooper, San Francisco, 253 pp.

Talandier, J., and Kuster, G. T., 1976. Seismicity and submarine volcanic activity in French Polynesia. J. Geophys. Res., 81, 936-948.

Tarling, D. H., and Runcorn, S. K. (Editors), 1973. Implications of Continental Drift for the Earth Sciences, 2 vols. Academic, New York, 1184 pp.

Tatsch, J. H., 1959. Initial results of preliminary investigations (1938-1958) regarding the feasibility of using polyistic planetary configurations for making certain solar-system evolutionary studies. U. S. Embassy, Caracas, in manus.

Tatsch, J. H., 1960. The evolution of the solar system in accordance with a dual primeval planet model. U. S. Embassy, Caracas, Venezuela, private publication, given limited distribution to approximately 300 selected Earth and planetary scientist in various parts of the world.

Tatsch, J. H., 1962. The evolution of the retrograde motion of certain planetary satellites in accordance with a dual primeval planet model, outline of doctoral dissertation, submitted to graduate advisor (Professor G. P. Kuiper, the astronomer, now deceased), February 4, 1962, about 75 pp.

Tatsch, J. H., 1963a. Certain selenophysical implications of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 44, 877.

Tatsch, J. H., 1963b. Certain seismological implications of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 44, 887.

Tatsch, J. H., 1963c. Certain volcanological implications of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer.

Geophys. Un., 44, 892.

Tatsch, J. H., 1964a. Distribution of active volcanoes: Summary of preliminary results of three-dimensional least-squares analysis. Geol. Soc. Amer. Bull., 75, 751-752.

Tatsch, J. H., 1964b. Certain geomagnetic implications of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 45, 39.

Tatsch, J. H., 1964c. Certain oceanographical implications of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 45, 74.

Tatsch, J. H., 1964d. Further volcanological implications of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 45, 124.

Tatsch, J. H., 1964e. Global distribution patterns of geoidal deviations: Preliminary results of a spherical harmonic analysis based on a dual primeval planet model as an Earth model. Science, submitted.

Tatsch, J. H., 1964f. Global distribution patterns of gravity anomalies: Preliminary results of a spherical harmonic analysis based on a dual primeval planet model as an Earth model. J. Geophys. Res., submitted.

Tatsch, J. H., 1964g. An inquiry into global distribution patterns of major seismic regions. Seis. Soc. Amer. Bull., submitted.

Tatsch, J. H., 1964h. Global distribution of seismic and aseismic ridges. Seis. Soc. Amer. Bull., submitted.

Tatsch, J. H., 1964i. Global distribution patterns of heat flow: Preliminary results of a spherical harmonic analysis. Deep Sea Res., submitted.

Tatsch, J. H., 1965a. The global distribution patterns of fossil volcanoes and their relationship to the global distribution patterns of active volcanoes. National Science Foundation proposal number P51073R.

Tatsch, J. H., 1966a. Certain correlations between geomagnetic

observations in the Indian Ocean and deductions arrived at from applying a dual primeval planet model to that region of the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 47, 56-57.

Tatsch, J. H., 1966b. Certain correlations between oceanographic observations along the South Atlantic Ridge and deductions arrived at from applying a dual primeval planet model to that region of the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 47, 123.

Tatsch, J. H., 1966c. Certain correlations between geomagnetic observations in the South Atlantic Ocean and deductions arrived at from applying a dual primeval planet model to that region of the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 47, 464.

Tatsch, J. H., 1966d. Certain correlations between oceanographic observations along the North Atlantic Ridge and deductions made from applying a dual primeval planet model to that region of the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 47, 477.

Tatsch, J. H., 1966e. Certain correlations between selenophysical observations and deductions arrived at from applying a dual primeval planet model to the Earth-Moon system. Trans. Amer. Geophys. Un., 47, 486.

Tatsch, J. H., 1966f. Certain correlations between seismological observations in the African continent and deductions made from applying a dual primeval planet model to that region of the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 47, 490.

Tatsch, J. H., 1967. Global geomagnetic evidence supporting the existence of a geophysical equator predicted as a consequence of applying a dual primeval planet model to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 48, 59.

Tatsch, J. H., 1969. Seafloor spreading, continental drift, and plate tectonics unified into a single global concept by the application of a dual primeval planet hypothesis to the Earth. Trans. Amer. Geophys. Un., 50, 672.

Tatsch, J. H., 1970. Global seismicity patterns as interpreted in accordance with a dual primeval planet hypothesis. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 2, 153.

Tatsch, J. H., 1972a. The Earth's Tectonosphere: Its Past Development and Present Behavior. Tatsch Assoc., Sudbury, 889 pp.

Tatsch, J. H., 1972b. Global symmetry of mineralization belts. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 4, 729-730.

Tatsch, J. H., 1973a. Mineral Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, 264 pp.

Tatsch, J., H., 1973b. The origin, evolution, and present characteristics of the Tertiary petroleum deposits of the world. Tatsch Assoc., Sudbury, 58 pp.

Tatsch, J. H., 1973c. The origin, evolution, and present characteristics of the Mesozoic petroleum deposits of the world. Tatsch Assoc., Sudbury, 62 pp.

Tatsch, J. H., 1973d. The origin, evolution, and present characteristics of the Paleozoic petroleum deposits of the world. Tatsch Assoc., Sudbury, 63 pp.

Tatsch, J. H., 1973e. The origin, evolution, and present characteristics of the giant oil fields of North America. Tatsch Assoc., Sudbury, 67 pp.

Tatsch, J. H., 1973f. The origin, evolution, and present characteristics of the petroleum deposits in the Arctic Ocean and North Sea areas. Tatsch Assoc., Sudbury, 62 pp.

Tatsch, J. H., 1973g. The origin, evolution, and present characteristics of the petroleum deposits in the Middle East areas. Tatsch Assoc., Sudbury, 62 pp.

Tatsch, J. H., 1973h. The origin, evolution, and present characteristics of the petroleum deposits within the Indonesian islands and within other areas of the arc extending roughly from the Bay of Bengal to the Kermadec-Tonga region. Tatsch Assoc., Sudbury, 66 pp.

Tatsch, J. H., 1973i. The origin, evolution, and present characteristics of the Tertiary basins that appear to be largely nonpetroliferous. Tatsch Assoc., Sudbury, 62 pp.

Tatsch, J. H., 1973j. The probability for the existence of Tertiary petroleum deposits between Cape Cod and Cape Fear. Tatsch

Assoc., Sudbury, 65 pp.

Tatsch, J. H., 1973k. Petroleum in the Philippines: An analysis of related Mesozoic and Cenozoic geophenomena. Tatsch Assoc., Sudbury, 43 pp.

Tatsch, J. H., 1974a. The Moon: Its Past Development and Present Behavior. Tatsch Assoc., Sudbury, 338 pp.

Tatsch, J. H., 1974b. Petroleum Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, 378 pp.

Tatsch, J. H., 1974c. Reversals of the Earth's magnetic field as interpreted by the Tectonospheric Earth Model. Nagata Conference, June 3-4, Pittsburgh.

Tatsch, J. H., 1975a. Copper Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, 339 pp.

Tatsch, J. H., 1975b. Gold Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, 275 pp.

Tatsch, J. H., 1975c. The geodynamics of continental interiors as interpreted by a Tectnospheric Earth Model. Penrose Conference, December 14-19, San Diego.

Tatsch, J. H., 1976a. Uranium Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, 303 pp.

Tatsch, J. H., 1976b. Geothermal Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, 292 pp.

Tatsch, J. H., 1977a. Earthquakes: Cause, Prediction, and Control. Tatsch Assoc., Sudbury, about 400 pp., in press.

Tatsch, J. H., 1977b. Iron Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, about 320 pp., in press.

Tatsch, J. H., 1977c. Coal Deposits: Origin, Evolution, and Present Characteristics. Tatsch Assoc., Sudbury, about 350 pp., in press.

Tatsch, J. H., 1977d. The Physics of the Solar System: An Analysis Based on the Dual Primeval Planet Hypothesis. Tatsch Assoc., Sudbury, about 450 pp., in prep.

Tatsch, J. H., 1977e. The Principle of Universal Heterogeneity:

A Basis for the Dual Primeval Planet Hypothesis. Tatsch Assoc., about 475 pp., in prep.

Tatsch, J. H., and Talbot, J. L., 1971. Global symmetry of tectonic belts. Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog., 3, 728-729.

Tatsumoto, M., Unruh, D. M., and Desborough, G. A., 1976. U-Th-Pb and Rb-Sr systematics of Allende and U-Th-Pb systematics of Orgueil. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 617-634.

Taylor, S. R., 1975. Lunar Science: A Post-Apollo View. Pergamon, 372 pp.

Tham, N., 1976. The distribution of oil and natural gas deposits in the Earth's crust in relation to Pt, Ni, and Cr mineralization along great circles. In: Hodgson et al. (Editors) (q. v.), p. 617.

Thomas, W. A., 1976. Evolution of Ouachita-Appalachian continental margin. J. Geol., 84, 323-342.

Thompson, T. L., 1976. Plate tectonics in oil and gas exploration of continental margins. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 1463-1501.

Tikhonov, A. N., Lubimova, Ye. A., and Vsalov, V. K., 1969. Heat flow from the Earth's interior depending on inner parameters variations. Bull. Volcanol., 33, 261-280.

Tiratsoo, E. N., 1973. Oilfields of the World. Scientific Press, Beaconsfield, Eng., 376 pp.

Titley, S. R., 1976. Characteristics of some telescoped alteration patterns in southwestern Pacific porphyry copper deposits. Econ. Geol., 71, 703

Titley, S. R., and Hicks, C. L. (Editors), 1966. Geology of the the Porphyry Copper Deposits. Univ. of Ariz., Tucson, 287 pp.

Tombaugh, C. W., 1963. Private discussion.

Torbett, M. V., 1976. On the connection between tidal friction and plate tectonics. Tectonophys., 30, T17-T18.

Truex, J. N., 1976. Santa Monica and Santa Ana Mountains: Relation to Oligocene Santa Barbara basin. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 65-86.

- Trumpy, R., 1960. Paleotectonic evolution of the central and western Alps. Geol. Soc. Amer. Bull., 71, 834-908.
- Turcotte, D. L., and Oxburgh, E. R., 1976. Stress accumulation in the lithosphere. Tectonophys., 35, 183-199.
- Uchupi, E., Emery, K. O., Bowin, C. O., and Phillips, J. D., 1976. Continental margin off western Africa: Senegal to Portugal. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 809-878.
- Urey, H. C., 1951. The origin and development of the Earth and other terrestrial planets. Geochim. Cosmochim. Acta, 1, 207.
- Urey, H. C., 1952. The Planets: Their Origin and Development. Yale Univ. Press, New Haven, 178 pp.
- Urey, H. C., 1956. Diamonds, meteorites, and the origin of the solar system. Astrophys. J., 124, 625.
- Urey, H. C., 1959. Primary and secondary objects. J. Geophys. Res., 64, 1721-1737.
- Urey, H. C., 1960. Criticism of the melted moon theory. J. Geophys. Res., 65, 358-359.
- Ustiyev, Ye. K., 1970. Relations between volcanism and plutonism at different stages of the tectonomagmatic cycle. In: G. Newall and N. Rast (Editors), Mechanism of Igneous Intrusions. Gallery Press, Liverpool, 372 pp.
- Uyeda, S., 1976. Magnetic studies of the Pacific area. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 173-175.
- Vajner, V., 1976. Epeirogeny, orogeny, and the tectonic development of the Kaapvaal basin. Southern Africa Geol. Rundsch., 65, 333-360.
- Valdiya, K. S., 1976. Himalayan transverse faults and folds and their parallelism with subsurface structures of north Indian plains. Tectonophys., 32, 353-386.
- Valencio, D. A., 1976. Global synthesis of evidence leading to the reconstruction of distribution of continents and oceans through time. In: Drake (Editor) (q. v.), Op., 229-234.
- Van Bemmelen, R. W., 1966. On mega-undations: A new model for the Earth's evolution. Tectonophys., 3, 83-127.

Van Bemmelen, R. W., 1969. Origin of the western Mediterranean Sea. Verhandel Koninkel Nederlande Mijnbouw Genoot, 26, 13-52.

Van Bemmelen, R. W., 1974. Driving forces of orogeny, with emphasis on blueschist facies of metamorphism (Test case III: The Japan Arc). Tectonophys., 22, 83-125.

Van Bemmelen, R. W., 1976. Plate tectonics and the undation model: A comparison. Tectonophys., 32, 145-182.

Van der Voo, R., Mauk, F. J., and French, R. B., 1976. Permian-Triassic continental configurations and the origin of the Gulf of Mexico. Geology, 4, 177-180.

Van Houtie, F. B., 1976. Late Cenozoic volcanoclastic deposits, Andean foredeep, Colombia. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 481-495.

Vassilkovsky, N. P., 1960. Study of geosynclines in the light of modern geology. Sibirsk. Nouchn. Issled. Inst. Geol. Geofiz. i Mineral Syrya, 13, 5-56.

Vening-Meinesz, F. A., 1964. The Earth's Crust and Mantle Elsevier, Amsterdam, 124 pp.

Verma, R. K., Mukhopadhyay, M., and Ahluwalia, M. S., 1976. earthquake mechanisms and tectonic features of northern Burma. Tectonophys., 32, 387-399.

Vine, F. J., and Matthews, D. H., 1963. Magnetic anomalies over ocean ridges. Nature, 199, 947-949.

Vinogradov, A. P., 1967. The formation of the ocean. Izv. Akad. Nauk SSSR, Geol., 1967(4), 3-9.

Vinogradov, A. P., and Udintsev, G. B. (Editors), 1975. Rift Zones of the World Ocean. Wiley, New York, 512 pp.

Vlaar, N. J., and Wortel, M. J. R., 1976. Lithospheric aging, instability, and subduction. Tectonophys., 32, 331-351.

Vogt, P. R., 1976. Increasing evidence for global magmatic synchronism. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 348.

Vogt, P. R., 1976a. Plumes, subaxial pipe flow, and topography along the Mid-Atlantic ridge. Earth Planet. Sci. Ltr., 29, 309-325.

Vogt, P. R., Higgs, R. H., and Johnson, G. L., 1971. Hypotheses on the origin of the Mediterranean basin: Magnetic data. J.

Geophys. Res., 76, 3207-3228.

Vogt, P. R., Lowrie, A., Bracey, D. R., and Hey, R. N., 1976. Subduction of aseismic ridges: Effects on shape, seismicity, and other characteristics of consuming plate boundaries. Geol. Soc. Amer., Boulder, 60 pp.

Von Weizsacker, C. F., 1944. Evolution of the solar system from a dust cloud. Z. Astrophys., 22, 319.

Walcott, R. I., 1968. The gravity field of Northern Saskatchewan and Northeastern Alberta with maps. Gravity Map Series Numbers 16-20. Dominion Observatory, Canada.

Walcott, R. I., 1970. Flexural rigidity, thickness, and viscosity of the lithosphere. J. Geophys. Res., 75, 3941-3954.

Walker, W. (Editor), 1976. Metallogeny and Global Tectonics. Wiley, New York, 413 pp.

Walper, J. L., 1976. Geotectonic evolution of the Wichita aulacogen, Oklahoma. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 60, 327-328.

Watkins, N. D., 1968. Short period geomagnetic polarity events in deep-sea sedimentary cores. Earth Planet. Sci. Ltr., 4, 341-349.

Watts, A. B., 1976. Gravity and bathymetry in the central Pacific Ocean. J. Geophys. Res., 31, 1533-1553.

Watts, A. B., and Weissel, J. K., 1976. Mid-Cenozoic evolution of the south Fiji basin. Trans. Amer. Geophys. Un., 57, 333.

Weeks, L. G., 1952. Factors of sedimentary basin development that control oil occurrence. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 36, 2096.

Weeks, L. G., 1965. World offshore petroleum resources. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 49, 1680-1693.

Weeks, L. G., 1971. World offshore scene in rapid change. Oil Gas J., 69(50), 91-94, 99.

Wegener, A., 1915. Die Entstehung der Continente und Ozeane. Sammlung Vieweg, Braunschweig, 94 pp.

Wegmann, C. E., 1935. Zur Deutung der Migmatite. Geol. Rundsch., 26, 20-350.

Wehlage, E. F., 1976. The Basics of Applied Geothermal

Engineering. Geothermal Information Services, West Covina, Calif., 211 pp.

Welin, E., and Gorbatshev, R., 1976. The Rb-Sr age of the Hastefjorden granite and its bearing on the Precambrian evolution of southwestern Sweden. Precamb. Res., 3, 187-195.

Wertz, J. B., 1976. Detection and significance of lineaments and lineament intersections in parts of the northern Cordillera. In: Hodgson et al. (Authors) (q. v.), pp. 42-53.

Wetherill, G. W., 1975. Late heavy bombardment of the Moon and terrestrial planets. Presented at 6th Lunar Science Conference, Houston, March.

Whipple, F. L., 1967. Meteoritic environment of the Moon. Proc. Roy. Soc. Lond., A-296, 304-315.

Whitehead, J. A., Jr., 1976. Convection models: Laboratory versus mantle. Tectonophys., 35, 215-228.

Whiteman, A., Naylor, D., Pegrum, R., and Rees, G., 1975. North Sea troughs and plate tectonics. Tectonophys., 26, 39-54.

Whittaker, E. T., 1937. Analytical Dynamics. Cambridge, London, pp. 406 et seq.

Whitten, E. H. T., 1976. Cretaceous phases of rapid sediment accumulation, continental shelf, eastern USA. Geology, 4, 237-240.

Wickham, J., Roeder, D., and Briggs, G., 1976. Plate tectonics models for the Ouachita foldbelt. Geology, 4, 173-176.

Wilkening, L. L., 1975. Genetic relationship among various types of clasts in some meteoritic breccias. Trans. Amer. Geophys. Un., 56, 1016.

Williams, D. L., 1976. Submarine geothermal resources. J. Volcanol. Geotherm. Res., 1, 85-100.

Wilshire, H. G., and Pike, J. E. N., 1975. Upper-mantle diapirism: Evidence from analogous features in alpine peridotite and ultramafic inclusions in basalt. Geology, 3, 467-470.

Wilson, J. T., 1957. Origin of the Earth's crust. Nature, 179, 228-229.

Wilson, J. T., 1963. A possible origin of the Hawaiian Islands.

Can. J. Phys., 41, 863-870.

Wilson, J. T., 1965. Convection currents and continental drift Evidence from ocean islands suggesting movement in the Earth. Phil. Trans. Roy. Soc., A-258, 145-155.

Wilson, J. T., 1967. Theories of building of continents. In: Gaskell (Editor) (q. v.), pp. 445-473.

Wilson, J. T., 1968. Static or mobile Earth: The current scientific revolution. Proc. Amer. Phil. Soc., 112, 309-320.

Wilson, J. T., 1972. New insights into old shields. Tectonophys., 13, 73-94.

Wilson, H. D. B., 1974. Archean volcanic sequences. Annual Report, Univ. of Manitoba Centre for Precambrian Studies, pp. 58-60.

Winterer, E. L., 1976. Anomalies in the tectonic evolution of the Pacific. In: Sutton et al. (Editors) (q. v.), pp. 269-278.

Witherspoon, P. A., Pezzotti, C. P., and Wroth, L. M., 1975. Abstracts: Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. Univ. of Calif, Berkeley, 194 pp.

Wolery, T. J., and Sleep, N. H., 1976. Hydrothermal circulation and geochemical flux at mid-ocean ridges. J. Geol., 84, 249-275.

Wood, J. A., Dickey, J. S., Jr., Marvin, U. B., and Powell, B. N., 1970. Lunar anorthosites. Science, 167, 602-604.

Woollard, G. P., 1969. Tectonic activity in North America as indicated by earthquakes. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 125-133.

Woollard, G. P., 1969a. Regional variation in gravity. In: Hart (Editor) (q. v.), pp. 320-341.

Woollard, G. P., 1969b. A regional analysis of crustal structure in North America. Hawaii Institute of Geophysics, HIG-69-12, 55 pp.

Woollard, G. P., Furumoto, A. S., Sutton, G. H., Rose, J. C., Malahoff, A., and Kroenke, L. W., 1967. Cruise report on the 1966 Seismic Refraction Expedition to Solomon Sea, Hawaiian Institute of Geophysics, HIG-67-3, 67 pp.

Wynne-Edwards, H. R. (Editor), 1969. Age Relations in High-

Grade Metamorphic Terrains. Geol. Assoc. Can., Toronto, 228 pp.

Wynne-Edwards, H. R., and Hasan, Z., 1970. Intersecting orogenic belts across the North Atlantic. Amer. J. Sci., 268, 289-308.

Yanshin, A. L., 1975. Composition of Phosphate Crusts of Weathering and Associated Phosphate Deposits. USSR Acad. Sci., Novosibirsk, 210 pp.

Yoshii, T., 1975. Regionality of group velocities of Rayleigh waves in the Pacific and thickening of the plate. Earth Planet. Sci. Ltr., 25, 305-312.

Young, G. M., 1976. Iron-formation and glaciogenic rocks of the Rapidan Group, Northwest Territories, Canada. Precambr. Res., 3, 137-158.

Yuen, D. A., and Schubert, G., 1976. Mantle plumes: A boundary layer approach for Newtonian and non-Newtonian temperature-dependent rheologies. J. Geophys. Res., 81, 2499-2510.

Yungul, S. H., 1976. Tectonic implications of gravity anomalies associated with some continental rift valleys: A model study. Tectonophys., 32, 321-329.

Zeck, H. P., and Malling, S., 1976. A major global suture in the Precambrian basement of SW Sweden? Tectonophys., 31, T35-T40.

Zijderveld, J. D. A., Hazeu, G. J. A., Nardin, M., and Van der Voo, R., 1970. Shear in the Tethys and the Permian paleomagnetism in the southern Alps, including new results. Tectonophys., 10, 639-661.

#### ABBREVIATIONS USED IN THE ABOVE REFERENCES

Alabama Acad. Sci. J. = Alabama Academy of Science Journal

Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. = American Association of Petroleum Geologists Bulletin

Amer. Inst. Min. Metal. Petr. Engrs. = American Institute of Mining, Metallurgy, and Petroleum Engineers

Amer. J. Sci. = American Journal of Science

Amer. Sci. = American Scientist

Ann. Rev. Earth Planet. Sci. = Annual Review of Earth and

Planetary Sciences

Ann. Rev. Fluid Mech. = Annual Review of Fluid Mechanics

Astrophys. J. = Astrophysical Journal

Austral. Min. = Australian Mining

Ber. Natur. Ges. Freiburg = Berichten Naturforschungen  
Gesellschaft, Freiburg

Bol. Comis. Mapa Geol. Esp. = Boeetin de la Comision de Mapa  
y Geologia de Espana

Bull. Geol. Soc. France = Bulletin of the Geological Society  
of France

Bull. Inst. Roy. Col. Belg. = Bulletin of the Institute of  
the Royal College, Belgium

Bull. Seis. Soc. Amer. = Bulletin of the Seismological Society  
of America.

Bull. Volcanol. = Bulletin of Volcanology

Bu. Sci. Publ. = Bureau of Science Publication

Can. Inst. Min. Metall. Trans. = Canadian Institute of Mining  
and Metallurgy Transactions

Can. J. Earth Sci. = Canadian Journal of Earth Science

Can J. Phys. = Canadian Journal of Physics

Can. Min. Metall(urg). Bull. = Canadian Mining and Metallurgical  
Bulletin

Can. Min. J. = Canadian Mining Journal

Chem. Geol. = Chemical Geology

Contr. Mineral. Petrol. = Contributions to Mineralogy and  
Petroloey

Dokl. Acad. Nauk SSR = Doklady Academia Nauk USSR

Earth Planet. Sci. Ltr. = Earth and Planetary Science Letters.

Earth Sci. Rev. = Earth Science Reviews

Econ. Geol. = Economic Geology

15 Ann. Rpt. Inst. Af. Geol. Leeds = 15th Annual Report of the  
Research Institute of African Geology, Leeds

Geochem. = Geochemistry

Geochem. Internat. = Geochemistry International

Geochim. Cosmochim. Acta = Geochimica et Cosmochimica Acta  
 Geogr. Rev. = Geographical Reviews  
 Geol. Assoc. Can. Spl. Ppr. = Geological Association of Canada  
 Special Paper  
 Geol. Jahrb. = Geologisches Jahrbuch  
 Geol. Mag. = Geological Magazine  
 Geol. Rund. = Geologische Rundschau  
 Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog. = Geological Society of America  
 Abstracts with Programs  
 Geol. Soc. Amer. Bull. = Geological Society of America Bulletin  
 Geol. Soc. Amer. Mem. = Geological Society of America Memoir  
 Geol. Soc. Amer. Spl. Ppr. = Geological Society of America  
 Special Paper.  
 Geol. Surv. Borneo Reg. Malaysia Mem. = Geological Survey of  
 the Borneo Region of Malaysia Memoir  
 Geol. Surv. Can. = Geological Survey of Canada  
 Geol. Surv. Can. Spl. Ppr. = Geological Survey of Canada  
 Special Paper  
 Geol. Surv. Dept. Brit. Terr., Borneo Bull. = Geological Survey,  
 Department of British Territory of Borneo Bulletin  
 Geophys. Res. Ltr. = Geophysical Research Letters  
 Geotherm. En. = Geothermal Energy  
 Gron. Geol. Undersog. Rapp. = Gronalndes Geologiske Under-  
 sogelse Rapport  
 GSA Spl. Ppr. = Geological Society of America Special Paper  
 Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans. = Gulf Coast Association  
 of Geological Societies Transactions  
 Hung. Geophys. Inst. Geophys. Trans. = Hungarian Geophysical  
 Institute, Geophysical Transactions  
 Inst. Min. Metall. Trans. = Institute of Mining and Metallurgy  
 Transactions  
 Internat. Geol. Cong. Abstr. = International Geological  
 Congress Abstracts  
 Internat. Symp. Hydrochem. Biochem. = International Symposium

of Hydrochemistry and Biochemistry.

Izv. Acad. Sci. USSR = Izvestiya, Academy of Sciences, USSR

Japan Soc. Min. Geol. = Japanese Society of Mining and Geology

J. Astronaut. Sci. = Journal of Astronautical Sciences

J. Geol. = Journal of Geology

J. Geol. Soc. Austral. = Journal of the Geological Society of  
Australia

J. Geol. Soc. Lond. = Journal of the Geological Society of  
London

J. Geomag. Geoelect. = Journal of Geomagnetism and Geoelectri-  
city

J. Geophys. Res. = Journal of Geophysical Research

J. Petrol. = Journal of Petrology

J. Res. U. S. Geol. Surv. = Journal of Research, U. S. Geolo-  
gical Survey

J. Roy. Astron. Soc. Can. = Journal, Royal Astronomical Society  
of Canada

J. Volcanol. Geotherm. Res. = Journal of Volcanological and  
Geothermal Research

Koninkl. Ned. Meteorol. Inst. Mededel. en Verh. = Koninklijke  
Nederlandse Meteorologie Institut Mededelingen en Verhandlungen

Nat. Acad. Sci. Mem. = National Academy of Science Memoir

Nat. Phys. Sci. = Nature, Physical Science

Min. Dep. = Mineralium Deposits

Mon. Not. Roy Astron. Soc. = Monthly Notices, Royal Astrono-  
mical Society

Mtg. Roy. Soc. Lond. = Meeting of the Royal Society of London

Nat. Res. Cncl. Philippines Bull. = National Research Council,  
Philippines, Bulletin

Oil Gas J. = Oil and Gas Journal

Ore. Dept. Geol. Min. Res. Bull. = Oregon Department of Geology  
and Mineral Resources Bulletin

Pac. Sci. = Pacific Science

Paleogeog. Paleoclim. Paleocol. = Paleogeography, Paleoclima-

tology, and Paleocology

Philippine Geol. = Philippine Geology

Philippine J. Sci. = Philippine Journal of Science

Philippine Weather Bu. Sci. Ppr. - Philippine Weather Bureau

Scientific Papers

Phil. Mag. = Philosophical Magazine

Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. = Philosophical Transactions of  
the Royal Society of London

Phys. Earth Planet. Int. = Physics of the Earth and Planetary  
Interiors

Precambr. Res. = Precambrian Research

Proc. Cambr. Phil. Soc. = Proceedings of the Cambridge Philoso-  
phical Society

Proc. Pac. Sci. Cong., Pac. Sci. Assoc. = Proceedings of the  
Pacific Scientific Congress, Pacific Scientific Association.

Proc. Roy. Soc. Lond. = Proceedings of the Royal Society of  
London

Proc. USSR Acad. Sci. Geol. = Proceedings of the USSR Academy  
of Sciences, Geology

Prog. Theor. Phys. = Progress in Theoretical Physics

Publ. Dom. Obs. Ottawa = Publications of the Dominion Observa-  
tory, Ottawa

Quart. J. Geol. Soc. Lond. = Quarterly Journal of the Geolo-  
gical Society of London

Rev. Gen. Sci. = Reviews of General Science

Rev. Geophys. = Reviews of Geophysics

Rev. Geophys. Space Phys = Reviews of Geophysics and Space  
Physics

Rept. Internat. Geol. Congr. = Report of International Geolo-  
gical Congress

Roy. Astron. Soc. Geophys. J. = Royal Astronomical Society  
Geophysical Journal

Roy. Soc. Lond. Phil. Trans., = Royal Society of London Philo-  
sophical Transactions

Seis. Soc. Amer. Bull. = Seismological Society of America  
Bulletin

Soc. Geol. France Bull. = Society of Geologists of France  
Bulletin.

Southern African Geol. Rund. - Southern African Geologische  
Rundschau

Tectonophys. = Tectonophysics

Trans. Amer. Geophys. Un. = Transactions of the American Geo-  
physical Union

Trans. Inst. Min. Metall. = Transactions of the Institute of  
Mining and Metallurgy

Univ. Chile Comunic. Esc. Geol. = Universidad de Chile Comuni-  
caciones de la Escuela de Geologia

Univ. Tok. Fac. Sci. J. = University of Tokyo Faculty of  
Science Journal

U. S. Geol. Surv. Prof. Ppr. = U. S. Geological Survey Pro-  
fessional Paper

WHOI Contr. = Woods Hole Oceanographic Institute Contributions

Z. Astrophys. = Zeitschrift für Astrophysik

[ G e n e r a l I n f o r m a t i o n ]

书名 = 地球的构造圈

作者 =

页数 = 2 5 6

S S 号 = 0

出版日期 =

V s s 号 = 9 5 9 0 7 3 9 6

封面  
书名  
版权  
前言  
目录  
正文