



板块构造理论的诞生

郑永飞^{*}, 李振新

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 岩石圈与环境协同演化全国重点实验室, 合肥 230026

^{*} 通讯作者, E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

收稿日期: 2025-05-06; 收修改稿日期: 2025-05-13; 接受日期: 2025-05-16; 网络版发表日期: 2025-05-20

国家自然科学基金项目(92155306)资助

摘要 板块构造理论诞生于20世纪60年代, 已经成为地球科学的支柱理论. 这个理论经历了从大陆漂移经海底扩张到板块俯冲的半个世纪发展历程, 认识到地球外壳岩石圈的演化符合简单的刚性块体运动学规律, 从而引起了地球科学的一场革命. 解读导致这个理论诞生的6篇经典论文, 可以重温先驱们如何站在巨人的肩膀上实现科学创新的光辉历史. 此外, 作为兴趣驱动导致科学创新的范例之一, 板块构造理论在建立之后的50多年得到不断的发展和完善. 进入21世纪之后, 人们不仅认识到板块构造与地幔对流之间存在时间和空间上的耦合关系, 而且认识到离散与汇聚板块边缘之间存在转化关系, 还有刚性板块边缘在高的地温梯度下可以变得韧性. 正是这些认识的集成将板块构造理论从传统的运动学版本升级成为一个功能整合的板块构造运动学-动力学版本.

关键词 大陆漂移, 海底扩张, 板块俯冲, 地幔对流, 固体地球

1 引言

板块构造理论是一门认识地球外壳(岩石圈)的运动学和动力学的科学. 它的原始版本在20世纪60年代推出, 为理解山脉、火山和地震的形成以及地球表面的演变和重建其过去的大陆和海洋提供了一个统一的框架(Le Pichon等, 1973; Cox和Hart, 1986; Oreskes, 2003), 从而导致了固体地球科学在60年代晚期的一场革命. 尽管这个理论经过50多年的发展已经日趋完善(Hawkesworth和Brown, 2018; Zheng, 2018, 2021; 郑永飞, 2023), 但是它在建立之初经历了一个从概念到假说的论证过程.

板块构造理论是在地质学家描述大陆造山带很久之后从对海底的观察中得到的. 海洋地壳变形、地震

和火山活动位于粘性软流圈之上的刚性海洋岩石圈板块之间的边界处. 岩石圈和软流圈对构造、引力和热载荷的响应在很大程度上取决于它们的流变学行为, 导致现代与古代板块构造之间的构造行为存在一系列差异(Zheng和Zhao, 2020; 郑永飞, 2023). 此外, 地球是太阳系中唯一具有板块构造的类地行星, 虽然金星的大小和密度与地球大致相同, 火星可能存在过板块构造, 但它们现在是停滞层盖的行星. 巨型气态行星的一些冰冷卫星在构造上很活跃, 可能具有冰板构造.

在过去的40亿年里, 板块构造一直主导着地球岩石圈的构造行为(Hawkesworth和Brown, 2018; 郑永飞, 2023). 通过板块离散-汇聚耦合体系中海底扩张和板块俯冲, 可以合理地解释海洋岩石圈的形成和破坏(郑永飞, 2023). 在这段漫长的时期里, 大陆地壳沿汇聚板

中文引用格式: 郑永飞, 李振新. 2025. 板块构造理论的诞生. 中国科学: 地球科学, 55(6): 2104–2110, doi: [10.1360/SSTe-2025-0128](https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0128)

英文引用格式: Zheng Y F, Li Z X. 2025. Birth of plate tectonics theory. Science China Earth Sciences, 68(6): 2054–2060, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1594-0>

块边缘不仅通过大陆弧岩浆的垂直增生, 而且通过加厚洋壳的再造而产生(郑永飞, 2023, 2024). 一般来说, 超大陆的聚合在时空上与早期较低地温梯度下的区域变质作用和晚期镁铁质岩浆作用有关, 而超大陆的裂解和其试图裂解则与早期较高地温梯度下的区域变质作用和晚期长英质岩浆作用在时空上耦合(郑永飞等, 2022). 尽管这种对岩石圈演化的认识是以笃定的笔调阐述, 但是在板块构造理论流行之前却争议了很长一段时间. 关于板块构造是如何在早期地球开始的, 依然还有很多不同的观点.

2 历史背景

地质学成为一门科学伴随着Hutton(1788)的《地球的理论》和Lyell(1830–1833)的《地质学原理》的出版. 这两部不朽的著作共同奠定了地质学的基本原理, 主要包括以下5个方面: (1) 地壳侵蚀作用对地形的刻画是一个自然的循环, 沉积物在岩层或地层中的迁移和沉积记录了过去特定时期的特有化石组合; (2) 这些地层局部变形和隆起形成山脉, 一系列沉积物就是从中衍生出来的; (3) 现代可观察的自然过程可以用来解释过去的地质过程(均变论: 现在是通往过去的); (4) 完成这些自然过程需要非常长的时间; (5) 可以通过绘制地质图和剖面图来说明地球任何地区岩石类型的分布.

Wegener(1912)强调, 大西洋周围的大陆曾经拼合

在一起, 并漂移到现在的相对位置(图1). 尽管这一概念在当时听来似乎荒诞至极, 但大陆漂移不仅是20世纪上半叶的主要争论焦点, 而且即使是那些接受这个想法的人在当时也看不到该理论在解释地球地质学方面有任何用处. Argand(1911)是一个例外: 认识到造山带通常表现出非常大量的水平缩短和逆冲, 并得出喜马拉雅山是由印度半岛与亚洲在海洋(特提斯)关闭后碰撞形成的这一结论. 到20世纪20年代后期, 人们已经对大陆可以裂解、漂移形成开阔海洋, 以及开阔海洋可以闭合形成山脉的想法了然于胸.

凭借来自第二次世界大战以来海洋探索的数据积累和古地磁学的使用, Dietz(1961)和Hess(1962)提出了海底扩张导致洋壳增长的概念. Dietz(1961)独立提出了海底扩张的术语, 认为洋中脊是新洋壳形成和横向扩张的区域; 它将洋壳的年轻化(与大陆相比)与海沟的连续循环联系起来, 强调了洋中脊在地壳形成中的作用和海沟在俯冲中的作用. Hess(1962)正式将海底扩张过程作为大陆漂移的一种机制, 提出地幔对流驱动地壳运动; 它解释了海洋沉积物的稀薄性、海底地壳的年轻性以及海沟作为俯冲带的作用, 表明洋壳在洋中脊形成并在海沟中再循环; 海底扩张在地球表面构成了动态的“传送带”, 化解了长期以来对大陆漂移的反对意见.

Vine和Matthews(1963)将平行于洋中脊的“对称磁条带”解释为海底扩张的证据, 将磁异常模式与地球的地磁反转时间线相匹配, 从而提供了海底扩张的第一

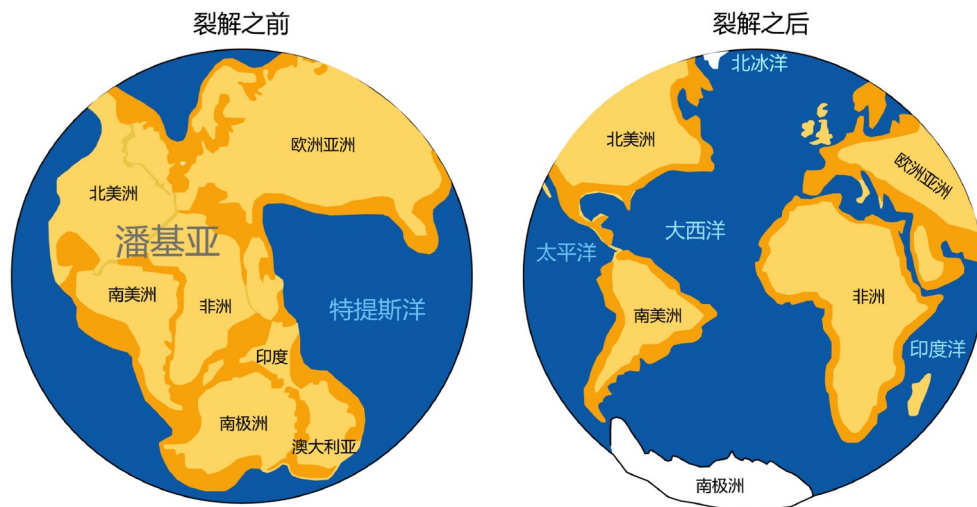


图1 潘基亚超大陆裂解之后的大陆漂移形成大西洋之假设示意图(改编自Wegener, 1912)

个直接观测证据。对海底扩张的革命性认识导致了Wilson(1965)和Bullard等(1965)的伟大集成,从而诞生了板块构造假说。到1967~1968年,McKenzie和Parker(1967)、Morgan(1968)、Isacks等(1968)和Le Pichon(1968)对该假说进行了整理和完善。20世纪60年代末70年代初,板块构造理论的基本框架得以确立轮廓,并用于解释裂解大陆边缘、岛弧、碰撞带的地质学以及火成岩和变质岩的多样性(Hamilton, 1969; Dewey和Bird, 1970; Atwater, 1970)。

3 经典解读

20世纪60年代下半部分是板块构造理论发展和接受的关键时期。以下是那个时代的6篇经典论文,每篇论文都提供了基础思想和证据。

Wilson(1965)将“转换断层”作为第三种板块边界

(图2),与洋中脊和海沟一起,解释了为什么洋中脊上的地震只发生在偏移的洋中脊段之间(而不是沿着整个断层),并将洋中脊分割统一到一个全局运动学框架中。这篇论文提出,转换断层是刚性板块在球体上运动的自然结果;其几何形态和地震活动为板块运动的真实存在提供了直接证据。该文将转换断层与欧拉定理相联系,指示板块运动可以被描述为围绕极点的旋转。这证明了转换断层是全球特征而非局部异常,加强了统一行星构造系统的认识。这篇论文对三种类型板块边界的出色概括,为板块运动模型奠定了基础。

Vine(1966)给出了新的证据来加强海底扩张的磁异常证据,将其与地磁反转时间尺度相关联,提供了来自多个地点的额外数据,并增强了模型的预测能力。通过将磁异常与地磁反转时间尺度相关起来,这篇论文提供了一个可预测、可检验的海底扩张框架(图3)。它架起了古地磁学、海洋地质学和地质年代学的桥梁,

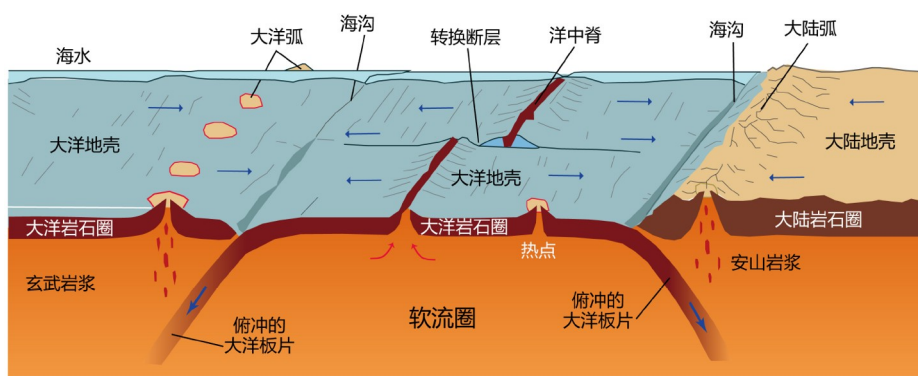


图2 洋中脊、海沟和转换断层组成的三种类型的板块边界(改编自Wilson, 1965)

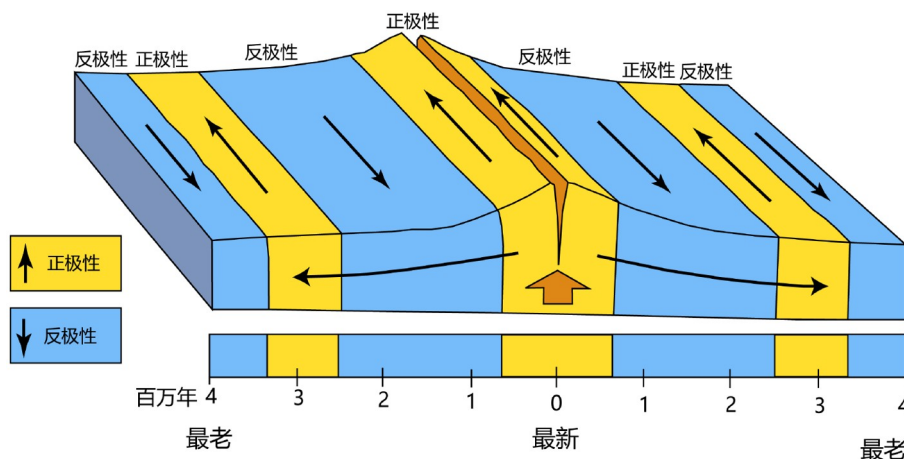


图3 沿洋中脊发生的海底扩张及其两侧对称磁条带示意图(改编自Vine, 1966)

展示了如何使跨学科的数据汇集到一个理论中. 因此, Vine(1966)通过解决早期存在的空白或批评, 显著推进了对海底扩张的接受度, 为海底扩张提供了确凿的证据, 将其从假设转变为公认的机制. 正是这篇论文将海底扩张固化为板块构造的引擎, 将磁异常转化为解码地球表面运动的里程碑.

McKenzie和Parker(1967)证明, 构造板块在球形地球上作刚体运动, 服从欧拉旋转定理; 它分析了北太平洋(例如, 阿留申海沟)的地震滑动矢量以导出欧拉极, 表明板块运动可以通过围绕欧拉极(旋转轴)的旋转来描述, 从而对板块边界和运动进行精确的数学建模. 该文首次为板块运动提供了严密的数学框架, 弥补了定性地质观察与定量地球物理学之间的鸿沟. Morgan(1968)正式提出了在球形地球上移动的刚性“构造板块”的概念, 引入了欧拉极来描述它们沿洋中脊、海沟和转换断层的旋转. 该文绘制了全球板块边界并提出了板块旋转的欧拉极, 提出了第一个全球尺度的板块模型, 首次将运动学与地质学联系起来. 这两篇论文都应用了18世纪瑞士数学家欧拉发现的定理, 即在球体上的刚体运动可以被描述为绕通过球体中心的轴的旋转. 因此, 这两篇论文都独立地建立了板块运动的定量模型: 地壳运动可以被理解为在球形地球上的刚体旋转(图4).

Isacks等(1968)将地震学数据(例如, 深源地震、

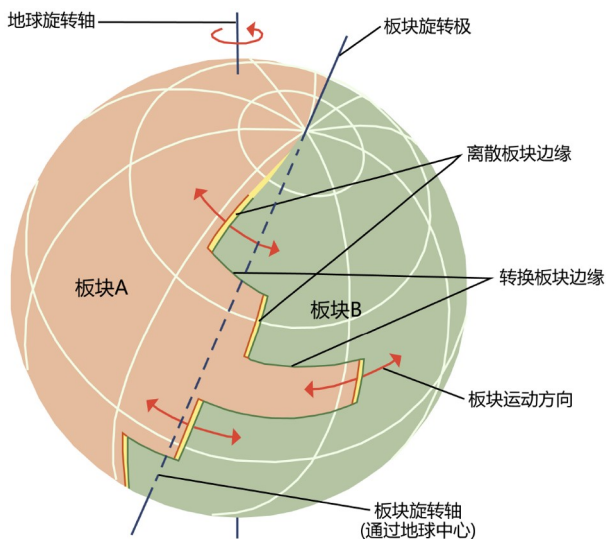


图4 刚性板块在球形地球上运动示意图(改编自Morgan, 1968)

Wadati-Benioff带)与板块构造统一起来, 表明地震集中在汇聚板块边界的俯冲带(图5), 压缩/伸展机制与板块运动相匹配. 该文首次系统地应用板块构造论来解释全球构造现象, 将板块构造设置为理解地球动力学的框架; 提出板块构造假设能够解释地球上发生的大部分地震现象, 并且不与主要的观察事实相冲突. 可能正是该文首次真正地影响了地质学界.

Le Pichon(1968)综合了全球数据来计算六个巨型板块的运动(图6), 其中结合扩张速率、地磁异常和地震滑动矢量来推导出欧拉极点和速度. 这篇论文展示, 板块构造可以在全球范围内提供一种连贯的运动学图景, 从而产生了第一个定量的全球板块运动模型. 该文部分成功地尝试应用板块构造假说来理解新生代时期地球部分板块演变的古动力学.

4 经典验证

上述6篇论文属于板块构造理论的核心, 它们与相关论文集成起来, 将一个有争议的假说(大陆漂移)变成了固体地球动力学的统一理论, 将板块构造从概念到假说直至发展为理论.

J. Tuzo Wilson是板块构造理论发展的关键人物. 在20世纪60年代, 大陆漂移假说正在得到接受, 板块构造的概念也正在形成. Wilson(1965)提出了转换断层的概念, 认为这是第三种类型的板块边界. 在此之前, 人们只知道两种类型的板块边界, 即沿着洋中脊发育的离散边界和沿着海沟发育的汇聚边界. 转换断层的识

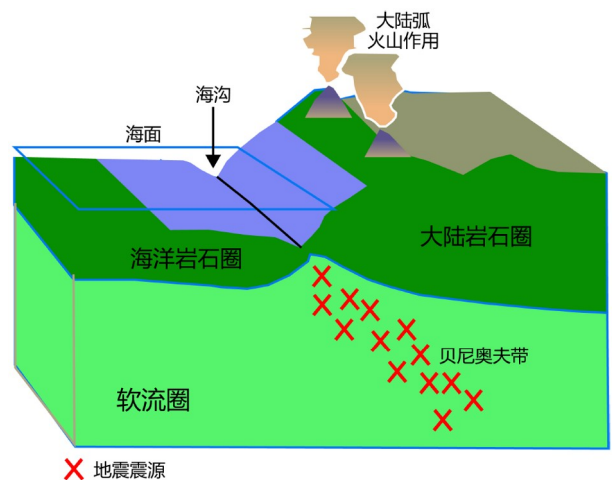


图5 地震在俯冲带分布示意图(改编自Isacks等, 1968)

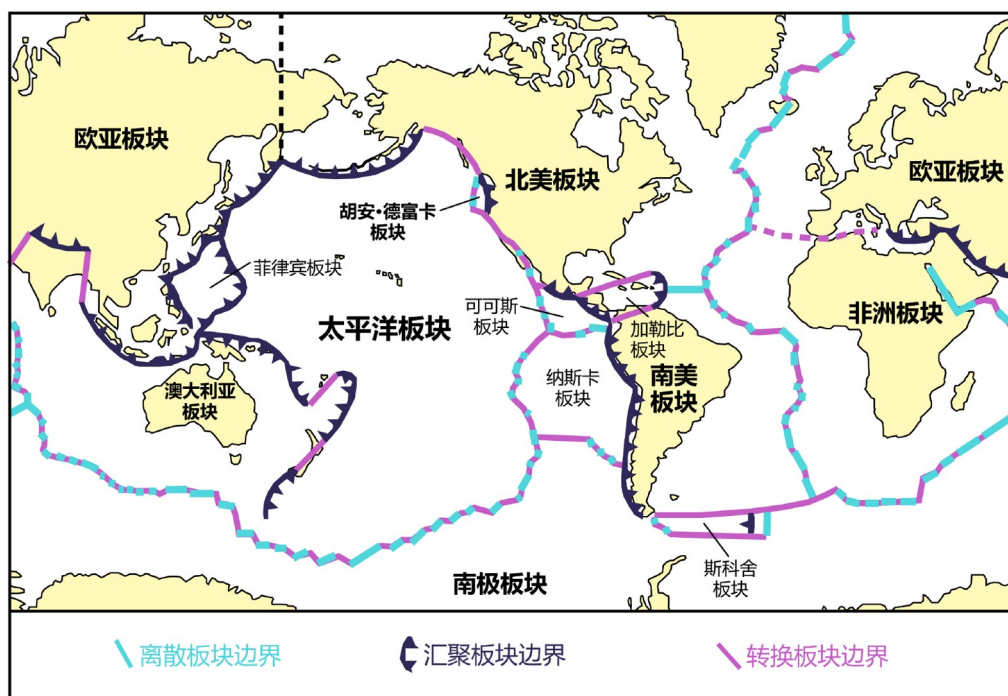


图 6 六大板块在地球上的分布示意图(改编自 Le Pichon, 1968)

别解释了板块如何能水平地相互移动, 以及断层如何连接了其它两种板块边界, 比如两个洋中脊或一个洋中脊和一个海沟。关键的洞察是, 尽管转换断层只存在于两个相连的板块边界之间, 但沿着转换断层的运动与更大的板块运动是一致的。这有助于解释这些断层的地震机制, 因为地震活动只会发生在洋中脊或其它板块边界之间, 而不是沿着整个断层线。

通过解释大陆和海洋如何作为更大的、相互连接的板块的一部分移动, Wilson(1965)将Wegener(1912)的大陆漂移假设与新兴的海底扩张范式(Dietz, 1961; Hess, 1962; Vine和Matthews, 1963)链接起来。Sykes(1967)使用地震数据证实了转换断层预测的运动并反驳了其它理论, 使用地震震源机制来显示与Wilson(1965)预测一致的洋中脊上的走滑运动, 从而在地震学上验证了板块构造的运动学。因此, Wilson(1965)解决了板块运动学中的一个主要难题, 并提供了一个机制来解释板块如何在没有内部变形的情况下移动。通过整合大陆漂移、海底扩张和地震学, 这篇论文将板块构造从一组松散连接的观点转变为一个具有全球一致性的预测理论。该文经常被引用为最终确定板块构造革命的“缺失环节”, 它在板块构造的发展中起到了

奠基石的作用。

通过进一步的板块运动学模拟研究, 板块构造假说被转化为可定量预测的理论(McKenzie和Parker, 1967; Morgan, 1968; Le Pichon, 1968)。全球集成观测和解释使得使板块构造能够解释造山作用、火山活动、地震和海洋/大陆演变(Isacks等, 1968; Hamilton, 1969; Dewey和Bird, 1970; Atwater, 1970)。这些工作整合了地质学、地球物理学和地震学, 导致了固体地球科学在20世纪60年代晚期的这场革命。当时, Morgan(1968)将球形地球上的刚性岩石圈称为“块体”, 而McKenzie和Park(1967)将其称为“板块”。鉴于其相对较小的厚度, 后者似乎更为合适。板块构造假说本身被McKenzie和Park(1967)称为“铺路石”理论, 而被Isacks等(1968)称为“全球新构造”。“俯冲”这个词则是由White等(1970)在稍晚一点的时间引入的。

正是这些经典论文共同建立了板块构造理论的基本原理, 将海底扩张、地磁异常、断层力学和地震学整合到板块构造理论的统一框架中。它们将地质学从一门描述性科学转变为一门具有预测能力的科学。现在看来很明显, 传统的板块构造理论在20世纪只是一个简单的运动学理论(Le Pichon等, 1973; Cox和

Hart, 1986; Oreskes, 2003). 它具有以下五个方面的特点: (1) 在几何学上, 垂直方向上刚性岩石圈位于韧性软流圈的顶部, 但在水平方向上可分为 6~15 个大板块; (2) 在运动学上, 刚性板块围绕地球表面的欧拉极以小圆圈形式做水平移动; (3) 在变形性上, 板块内部是刚性的, 变形集中在韧性板块边缘; (4) 在质量守恒方面, 海洋板块在洋中脊产生, 并在俯冲带被破坏; (5) 在动力学上, 大陆漂移是被动的, 而海底扩张是主动的。

5 经典延伸

如果一个科学问题很重要, 那么会有多个人被吸引来解决这个科学问题。无论是兴趣驱动还是利益导向, 有时甚至有多个人在同一时间或几乎同一时间找到了解决方案。想解决这个科学问题的人越多, 他们之间的知识和交流就越深入; 相关数据的公开程度越高, 这种情况发生的可能性就越大。板块构造理论建立过程中的多重同时发现案例, 就是在这样的背景下产生的: 许多聪明人在一些机构中密切合作, 而这些机构又掌握了关键的观察和解释。大量的专业人员参与了板块构造理论的建立, 其中个人兴趣是概念创新的关键动力。这导致开发新理论的一种常见做法: 同时发现。一个典型实例就是 McKenzie 和 Parker (1967) 在斯克里普斯、Morgan (1968) 在普林斯顿的工作。正是这两篇经典论文对地壳运动的定量分析, 才赋予了构造板块这个名字。

作为一个简单的运动学理论, 板块构造理论在 20 世纪 60 年代末 70 年代初就能够对现代地球上岩石圈板块的构造行为给予合理解释 (Isacks 等, 1968; Hamilton, 1969; Dewey 和 Bird, 1970; Atwater, 1970)。但是, 随着对板块构造理论研究的深入, 人们逐渐发现其中的一些假定值得推敲 (例如板块运动驱动力), 其地质学应用有待完善 (例如大陆地质)。正是对这些问题的思考和解决, 导致传统的板块构造理论在 21 世纪升级为功能整合的运动学-动力学理论 (郑永飞, 2023)。然而, 对岩石圈在前寒武纪时期的行为仍然存在争议, 特别是早期地球在太古宙时期的构造行为 (郑永飞, 2024)。主要问题是“板块构造是什么时候开始的?” “如果有一段时间板块构造没有运作, 那么哪种构造在早期地球上流行?”。关于板块构造开始的时间, 可从冥古宙时期的岩浆海洋形成地球岩石圈后不

久, 到新元古代罗迪尼亚超大陆的裂解, 不仅涉及的时间范围很大, 而且用于判别起始时间的标准也不一致。不过, 这两个时间起点分别以古代和现代板块构造风格为特征 (Zheng 和 Zhao, 2020; 郑永飞, 2024), 可能指示地幔温度和对流型式在地球历史上的一系列差异。

研究前寒武纪构造学的一个传统问题是缺乏可用于测定沉积地层年代和关联地层的化石记录。这导致了太古宙不存在板块构造这样一个认识, 这个幻想依然是现在世界上许多地质学家持有的观点。直到最近, 锆石 U-Pb 定年和地球化学示踪技术的广泛应用才允许对前寒武纪记录和事件时间之间的相关性提出新的见解。因此, 基于野外观察和室内分析, 有希望解决前寒武纪构造问题, 并推进关于球形地球上板块离散-汇聚耦合体系运行的论证。在太古宙与显生宙时期, 板块构造可能表现为不同的范式 (Zheng 和 Zhao, 2020; 郑永飞, 2024)。古老板块构造可能在太古宙较为流行 (Kusky 等, 2018; Windley 等, 2021; 郑永飞, 2024), 而现代板块构造虽然起始于古元古代时期的哥伦比亚超大陆聚合和裂解, 但是其流行可能是自罗迪尼亚超大陆聚合和裂解的新元古代才开始。

6 结语

在 20 世纪 60 年代之前, 没有普遍接受的全球理论来解释地球的主要特征: 大陆和海洋, 山脉和山谷, 火山和地震。到了 60 年代, 一个新的理论出现了, 解释了所有这些事情以及更多, 这是由移动的地球外壳块体的相互作用引起的, 这些块体在 60 年代被称为构造板块。尽管板块构造理论的发展经历了很长时间——自 20 世纪初以来已经认识到大陆漂移的科学证据, 但是在 70 年代初, 它被迅速接受且几乎绝对地接受。在那个时候, 全世界几乎所有的地球科学家都接受了这种新理论, 从而导致了各种相关教科书在 70 年代的重写。据说在大约 1965 年之前, 如果一个人接受大陆漂移假说, 那么这个人就无法在北美学术界找到工作。但是在 1970 年之后, 情况变得正好相反。

板块构造理论是一个全球理论, 是地球科学历史上首个被普遍接受的全球理论。将相关的观察和解释整合在一起, 是一项创新性的集成工作, 涉及来自许多地方的多种观察和解释。使板块构造理论如此引人

注目的是它统一了来自地球几乎所有地区的不同种类的观察和解释。观察的重要性指向了新理论诞生的关键主题: 数据的作用——大量且大量的数据。在历史、哲学和科学的社会学中, 一般习以为常地说观察是“理论负载的”, 并且人们可能对不符合其认知框架的信息产生抵抗。在许多论述中, 概念创新不仅是重新解释数据的前提, 而且是识别数据的前提。这种观点的一个流行版本有时被印在T恤上, 写着“如果我不相信它, 我就不会看到它”。20世纪中后期的科学哲学家几乎放弃了观察可以推动科学的观念, 转而关注假设或理论在指导观察中的作用, 建议检验它们。板块构造理论的诞生和验证, 证明兴趣驱动的研究是产生科学理论的有效途径。

参考文献

- 郑永飞, 陈伊翔, 陈仁旭, 戴立群. 2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应. *中国科学: 地球科学*, 52: 1213–1242
- 郑永飞. 2023. 21世纪板块构造. *中国科学: 地球科学*, 53: 1–40
- 郑永飞. 2024. 太古宙地质与板块构造: 观察与解释. *中国科学: 地球科学*, 54: 1–30
- Argand E. 1911. Les nappes de recouvrement des Alpes Pennines et leurs prolongements structuraux. *Beitr Geol Karte Schweiz NF*, 31: 1–26
- Atwater T. 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol Soc Am Bull*, 81: 3513–3536
- Bullard E, Everett J E, Smith A G. 1965. The fit of the continents around the Atlantic. *Phil Trans Roy Soc London*, A258: 41–51
- Cox A, Hart R B. 1986. *Plate Tectonics: How It Works*. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 392
- Dewey J F, Bird J M. 1970. Mountain belts and the new global tectonics. *J Geophys Res*, 75: 2625–2647
- Dietz R S. 1961. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature*, 190: 854–857
- Hamilton W. 1969. Mesozoic California and the underflow of Pacific Mantle. *Geol Soc Am Bull*, 80: 2409–2430
- Hawkesworth C J, Brown M. 2018. Earth dynamics and the development of plate tectonics. *Phil Trans R Soc A*, 376: 20180228
- Hess H H. 1962. History of ocean basins. In: *Petrologic Studies*. *Geol Soc Am*, 559–620
- Hutton J. 1788. *Theory of the Earth*. *Trans Roy Soc Edinburgh*, 1: 209–304
- Isacks B, Oliver J, Sykes L R. 1968. Seismology and the new global tectonics. *J Geophys Res*, 73: 5855–5899
- Kusky T M, Windley B F, Polat A. 2018. Geological evidence for the operation of plate tectonics throughout the Archean: Records from Archean paleo-plate boundaries. *J Earth Sci*, 29: 1291–1303
- Le Pichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. *J Geophys Res*, 73: 3661–3697
- Le Pichon X, Francheteau J, Bonnin J. 1973. *Plate Tectonics*. Amsterdam: Elsevier. 300
- Lyell C. 1830–1833. *Principles of Geology*, 3 volumes. London: John Murray
- McKenzie D P, Parker R L. 1967. The North Pacific: An example of tectonics on a sphere. *Nature*, 216: 1276–1280
- Morgan W J. 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J Geophys Res*, 73: 1959–1982
- Oreskes N. 2003. *Plate Tectonics, An Insider's History of the Modern Theory of the Earth*. Boulder: Westview Press
- Sykes L R. 1967. Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges. *J Geophys Res*, 72: 2131–2153
- Vine F J, Matthews D H. 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199: 947–949
- Vine F J. 1966. Spreading of the ocean floor; new evidence. *Science*, 154: 1405–1415
- Wegener A. 1912. *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane*. Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn
- White D A, Roeder D H, Nelson T H, Crowell J C. 1970. Subduction. *Geol Soc Am Bull*, 81: 3431–3432
- Wilson J T. 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 207: 343–347
- Windley B F, Kusky T, Polat A. 2021. Onset of plate tectonics by the Eoarchean. *Precambrian Res*, 352: 105980
- Zheng Y F. 2018. Fifty years of plate tectonics. *Natl Sci Rev*, 5: 119
- Zheng Y F, Zhao G. 2020. Two styles of plate tectonics in Earth's history. *Sci Bull*, 65: 329–334
- Zheng Y F. 2021. Plate tectonics. In: Alderton D, Elias S A, eds. *Encyclopedia of Geology*. 2nd ed. United Kingdom: Academic Press. 744–758

(责任编辑: 朱茂炎)