



地幔柱模型的诞生与发展

冷伟*, 朱沛荣

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 精密大地测量与定位全国重点实验室, 合肥 230026

* 通讯作者, E-mail: w leng@ustc.edu.cn

收稿日期: 2025-07-11; 收修改稿日期: 2025-09-09; 接受日期: 2025-09-18; 网络版发表日期: 2025-09-24

国家自然科学基金项目(42241117、42425402)资助

摘要 地幔柱模型描述了地球内部物质和能量自下而上运动的一种重要形式, 与俯冲板片自上而下运动一起共同构成了地表和深部地幔之间物质和能量输送的主要上行和下行通道, 并在地表产生剧烈的火山活动和气候环境效应. 地幔柱模型的建立和完善经历了较为长期的过程, 产生了一系列重要的论文. 我们从这些论文中挑选出6篇具有典型代表性的论文进行解读, 试图向读者展示地幔柱模型建立、验证和效应等关键记录. 这些论文包括地幔柱模型的提出、地幔柱头部-尾部形态的建立、地球化学观测对地幔柱化学成分的约束、地震学观测对地幔柱形态结构的约束、地幔柱在地表的表现形式以及地幔柱对地表环境施加的影响. 它们从不同侧面构成了地幔柱模型发展过程中的基石, 为这一理论框架提供了关键支撑节点, 并为后续的研究提供了重要的启示与参考.

关键词 地幔柱, 头部-尾部结构, 地震学观测, 岩石圈, 环境效应

1 引言

地幔柱模型定义了地球深内部(一般为核幔边界处)物质和能量上升到地表的一种重要的运动形式, 它与俯冲板片相对应, 分别构成了岩石圈和地幔对流系统的上行通道和下行通道, 对地球的地核和地幔整体起到冷却作用(Koppers等, 2021; 冷伟和刘浩, 2023). 在板块构造理论提出的同时期(郑永飞和李振新, 2025), 学者们注意到地表板块的内部存在着一些活跃的火山活动, 如夏威夷群岛区域的火山活动, 难以应用新建立的板块构造理论进行解释, 从而直接导致了用以解释板内火山活动的地幔柱模型的诞生(Wilson, 1963; Morgan, 1971). 随后的研究发现, 地幔柱不仅能造成小规模持续性的板内火山活动, 还导致了地质历

史上各个时期规模巨大的溢流玄武岩的喷发以及大火成岩省的形成(Coffin和Eldholm, 1994; Black等, 2021). 地幔柱构筑了地球深内部与地球表面的一座桥梁, 其起源于核幔边界的热边界层, 携带热流和深部物质上升穿过整个地幔, 影响地表热流和地形, 导致岩石圈熔融并改造地表环境. 因此, 研究地幔柱对认识地球内部的物质能量循环过程、重大火山活动等地质灾害的成因, 以及地表宜居性环境的形成等都具有极为重要的科学意义.

在地幔柱模型建立和完善的过程中, 不同时期发表的一系列重要论文可以被视为地幔柱模型的基石性工作. 在此我们挑选出6篇具有典型代表性的论文进行解读, 主要包括地幔柱模型的提出(Morgan, 1971)、地幔柱头部-尾部形态的建立(Richards等, 1989)、地球化

中文引用格式: 冷伟, 朱沛荣. 2025. 地幔柱模型的诞生与发展. 中国科学: 地球科学, 55(10): 3552-3558, doi: 10.1360/SSTe-2025-0213

英文引用格式: Leng W, Zhu P. 2025. Birth and development of the mantle plume model. Science China Earth Sciences, 68(10): 3418-3424, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1709-9>

学观测对地幔柱化学成分的约束(Hart等, 1992)、地震学观测对地幔柱形态结构的约束(Montelli等, 2004)、地幔柱在地表的表现形式(Sleep, 1990)以及地幔柱对地表环境施加的影响(Sobolev等, 2011)。这6篇经典论文对地幔柱模型的诞生和发展作出了重要贡献, 其中每一篇均在固体地球科学乃至整个地球科学领域产生了重要的影响, 得到学界的广泛关注并被后来的论文所大量引用, 构建了地幔柱模型这一理论框架的关键支点。

2 经典解读

2.1 地幔柱模型的建立

Morgan(1971)明确提出了地表的热点是由来自于下地幔的柱状热物质通道, 即地幔柱造成的。这篇论文指出, 当地表的板块运动经过地幔柱上方时, 地幔柱的热物质造成岩石圈的熔融和火山活动, 在地表留下可以观测到的热点轨迹, 这些轨迹为识别过去的板块运动速度和方向提供了重要的约束。这篇论文还认为, 这些地幔柱是由于自身浮力导致的主动上升流, 与在洋中脊处由于俯冲板片牵引而造成的被动上升流具有明显差异, 其熔融产生的化学成分分别反映了下地幔的原始地幔成分和软流圈的浅部地幔成分。虽然大家一般将该篇论文作为开创地幔柱模型的起点, 但是事实上该论文只是一系列工作的代表, 在这篇短文中, 对地幔柱的基本特征没有进行描述, 也没有给出地幔柱模型的图片。在Morgan(1971)提出地幔柱模型之前, Wilson(1963)已经提到夏威夷火山岛链可能是由于地表板块在对流导致的深部热源上方移动造成的。但是, Wilson(1963)并没有给出上升柱体的概念, 也没有指出这种柱体来自于下地幔。Morgan(1972a)的工作对地幔柱模型进行了更为详细的叙述, 认为典型地幔柱的半径约为75km, 上升速度约2m/a, 从地幔的最深处上升到对流地幔顶部的软流圈并水平扩展作用于岩石圈底部。据此, 地幔柱模型正式诞生, 图1a较为准确地反映出Morgan(1971, 1972a)所提出的地幔柱模型的基本特征。

地幔柱模型提出后, Richards等(1989)将地表多条热点轨迹与大规模溢流玄武岩的喷发和大火成岩省的形成联系在一起, 建立了地幔柱经典的头部-尾部结构。基于实验室模拟实验, 这篇论文提出地幔柱从核

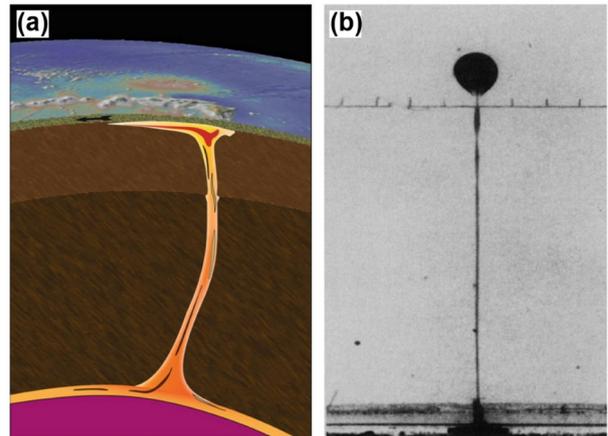


图1 地幔柱的形态与基本特征

(a) Morgan(1971, 1972a)提出的地幔柱模型的基本特征, 图片来自于White(2014), Copyright © 2014 Springer Science Business Media Dordrech; (b) 实验室模拟实验给出的低黏滞系数的地幔柱物质上升过程中会产生巨大的头部和较细的尾部(引自Richards等, 1989, Copyright © 1989 The American Association for the Advancement of Science)

幔边界上升的过程中, 会形成一个巨大的头部牵引着一条细细的尾部(图1b)。地幔柱头部的大量热物质到达岩石圈底部后在短时间内(1~2个百万年)发生水平扩展, 并造成大范围的熔融和地表溢流玄武岩喷发事件形成大火成岩省; 之后地幔柱尾部与岩石圈持续作用, 形成年龄随距离变化的火山热点轨迹(图2)。在Richards等(1989)之前, Morgan(1972b)就提到溢流玄武岩事件可能与地幔柱的起始相关, 并且早期实验室模拟实验结果也显示地幔柱上升过程中能够产生一个较大的头部(Whitehead和Luther, 1975)。Richards等(1989)的经典之处在于从观测出发, 针对地表主要热点轨迹和与之相联系的大火成岩, 收集整理分析了各个大火成岩省的初始溢流玄武岩的喷发量、喷发持续时间、喷发速率, 以及伴随热点的当前喷发速率, 发现不同的大火成岩省和伴随热点的这些定量数据十分相似, 由此指向了同一个形成机制, 即地幔柱的头部-尾部结构模型。Richards等(1989)发表后短时间内引发了多个研究组的跟进, 对地幔柱的头部-尾部结构的细节及其与地表大火成岩省-热点轨迹的关系进行系统性研究(如Campbell和Griffiths, 1990; Griffiths和Campbell, 1990); 这些研究进一步验证了地幔柱的形态模型, 最终导致了地幔柱经典的头部-尾部形态结构的确立。地幔柱尾部形成的热点和热点轨迹被进一步用来建立热

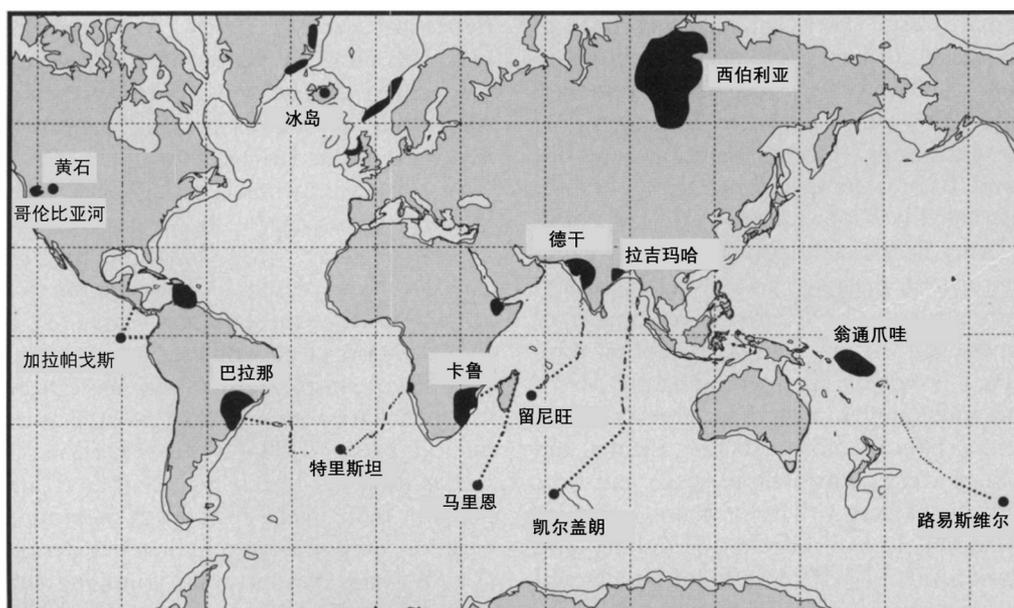


图2 地表主要的热点轨迹和对应的大火成岩省的位置(修改自Richards等, 1989)

黑色区域标识大火成岩省的位置, 黑色圆点标识当前活动热点的位置, 点线标识热点轨迹. Copyright © 1989 The American Association for the Advancement of Science

点参考框架, 为重构地表板块的运动历史提供了重要约束.

2.2 地幔柱模型的验证

地幔柱模型提出后, 人们基于地球化学分析和地球物理成像两种地表观测方法对其进行了多方面的研究和验证. 在地球化学分析方面, Hart等(1992)针对Sr-Nd-Pb同位素体系, 对比研究了地表483个洋岛玄武岩样品和89个洋中脊玄武岩样品. 结果显示, 洋中脊玄武岩的成分较为均一, 而从不同热点区域采集到的洋岛玄武岩的Sr-Nd-Pb同位素组成与洋中脊玄武岩显著不同, 包括低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值以及高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值等. 由于洋中脊玄武岩是上地幔亏损组分的熔融产物, Hart等(1992)的结果揭示了洋岛玄武岩的源区物质不是来自于上地幔. 由此推断, 洋岛玄武岩的Sr-Nd-Pb同位素组成特征很可能是由地幔柱从下地幔和核幔边界处抽取携带的富集地幔组分, 在到达岩石圈浅部熔融所形成的. Hart等(1992)的经典之处是基于同位素地球化学体系清晰地区分了洋岛玄武岩和洋中脊玄武岩这两种典型的地幔熔融产物, 证实了它们的源区物质来自于截然不同的两种地幔区域, 进而支撑了洋岛玄武岩源自于深部地幔起源的地幔柱理

论. 该论文关于洋中脊玄武岩和洋岛玄武岩的地球化学二分法, 在识别来自地球内部的地球化学研究中得到了广泛应用, 这在Hofmann(1997)的评述文章及其中的参考文献中得到充分体现.

地球物理成像方面, Montelli等(2004)使用P波地震层析成像技术, 对全球地幔中地幔柱的分布和形态进行了成像. 结果显示, 至少在6个主要热点的下方, 存在着延伸到下地幔底部的柱状P波低速异常区域, 很可能是由热的地幔柱物质所导致(图3). 该论文的经典之处在于, 它证实了地幔柱起源于核幔边界区域, 以柱体形态从核幔边界延伸到地表, 并与热点相连. 这一基础概念由Morgan(1971)提出, 但是由于地震数据和台站分布的不均匀性和地震射线对深部地幔区域覆盖有限, 清晰的展示出贯穿整个地幔的地幔柱结构体一直是地震学研究的重点和难点. French和Romanowicz(2015)进一步应用高分辨率全波形地震层析成像技术, 发现地幔柱在下地幔中的半径较粗, 在上地幔则半径变细, 且在部分区域的上地幔中出现了明显的分叉现象. 这种地幔柱的形态变化是对经典地幔柱形态的重大改进, 地幔柱在上下地幔中的半径差异很可能来自于上下地幔的黏滞系数具有明显的区别(Leng和Gurnis, 2012), 而地幔柱穿越地幔过渡带时产生的分叉现

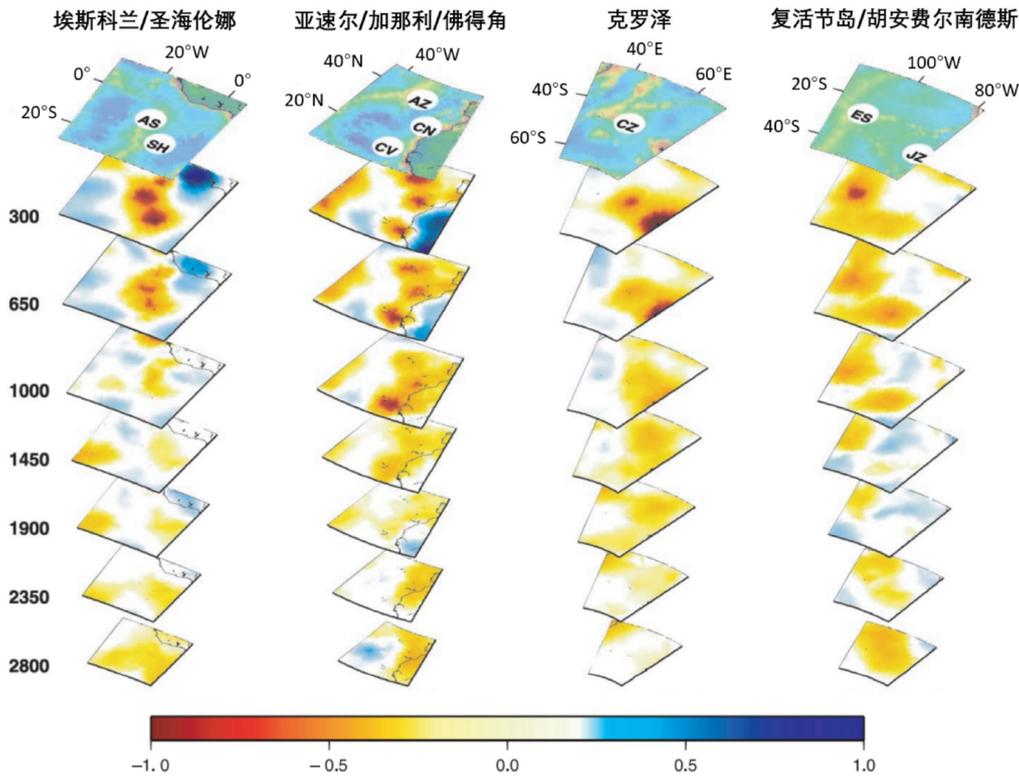


图3 基于地震层析成像技术得到的P波速度异常在各个深度的水平切面(修改自Montelli等, 2004)

显示了多个地表热点下方存在延伸到下地幔底部的P-波低速异常区域, 其中左侧的数字为公里深度, 下方的色标显示了P波速度异常的百分比. Copyright © 2004 The American Association for the Advancement of Science

象可以通过过渡带底部存在的低黏滞系数层进行解释 (Liu和Leng, 2020).

2.3 地幔柱对地表的影响

地幔柱得到人们广泛关注的最主要原因是其对地表具有重要的影响. 地幔柱尾部在上覆板块上方产生高地形、高热流和持续的火山活动, 而地幔柱头部则导致短时间内剧烈的火山喷发和显著的气候环境效应. Sleep(1990)针对全球30多个活跃的地幔柱热点进行了系统全面的分析, 整理和归纳了地幔柱尾部导致的主要地表观测数据, 以此建立量化模型对这些观测数据与地幔柱的动力学特征进行有机联系. 结果显示, 基于地幔柱作用于地表的地形、热流和大地水准面异常, 可以计算得到全球地幔柱导致的热流约占地表总热流的5%; 如果这些热流全部来自于地核, 能够造成地核每10亿年冷却50°C左右. Sleep(1990)的经典之处在于将Morgan(1971)的定性化概念模型通过适当

的物理假设使用数学公式进行了量化约束, 将地幔柱的温度异常、物质通量和地表可观测的地形、热流、大地水准面的空间分布特征紧密地联系起来, 使得地幔柱模型成为一种可以通过观测数据进行检测和验证的标准数学物理模型. 该论文提出了用以描述地幔柱的理论模型, 为后续大量的地幔柱相关研究提供了重要启示. 例如, Ribe和Christensen(1994)应用三维模型进一步研究了夏威夷地幔柱的地表作用, Leng和Zhong(2008)建立了地幔柱从核幔边界到地表的冷却过程模型, Asaadi等(2011)基于夏威夷区域的地形反演得到上地幔的黏滞结构等.

地幔柱头部导致的溢流玄武岩喷发和大火成岩省的形成, 对地表的地形和气候环境具有重大影响. Sobolev等(2011)针对大陆上最大的西伯利亚大火成岩省, 应用动力学数值模拟方法研究了地幔柱头部对大陆岩石圈作用产生的喷发前地表地形的隆起特征、喷发的岩浆量, 以及释放到大气中的挥发分如CO₂和HCl

等气体的通量. 结果显示, 当地幔柱头部携带大量的俯冲到深部地幔的循环洋壳物质时, 这种异常化学组分一方面大幅降低了地表地形隆升的幅度, 另一方面导致大量的挥发性气体的排放, 并可能造成了二叠纪-三叠纪交界时期地表灾难性的气候环境巨变和生物大灭绝事件(图4). Sobolev等(2011)的经典之处表现在两个方面. 第一, 它展示了地幔柱导致溢流玄武岩喷发事件之前未必能在地表产生显著的地形隆升, 这与传统的模型结果(如Farnetani和Richards, 1994)具有显著差异, 但是与西伯利亚区域观测到的地形演化一致. 第二, 也是十分重要的一点, 它建立了地幔柱头部作用于岩石圈的过程中挥发分气体的释放过程和释放通量, 创造性地将地球内部动力学过程产生的大气环境效应进行了定量化建模. 由此, 该论文将已有的两个研究领域, 即地球内部动力学过程和地表气候环境演变, 深度耦合到一起, 为研究地球内部过程诱发的地表环境巨变提供了研究范例. 该论文的发表启发了后续多个关于二叠纪-三叠纪交界时期气候环境巨变的重要研究成果, 例如发现了三叠纪早期存在严重的温室效应导致地表温度大幅上升和海洋酸化(Sun等, 2012; Hönisch等, 2012), 并进而造成了生物大灭绝事件(Joachimski等, 2012; Bond和Grasby, 2017).

3 经典延伸

3.1 地幔柱模型的争议

在地幔柱模型的发展过程中, 也遇到过不断的质疑和挑战. 其中反对地幔柱模型的代表性人物之一是加州理工学院的Don L. Anderson教授. Anderson教授发表过多篇论文(如King和Anderson, 1995; Anderson, 2000等), 认为地表不易被板块构造理论所解释的热点和火山活动不需要应用来自于深部的地幔柱模型, 浅部的相关地幔对流过程就能够解释大多数观测. 例如, King和Anderson(1998)提出的边缘驱动地幔对流(edge-driven convection), 用另一种可能的机制来解释大陆边缘区域分布的溢流玄武岩事件和大火成岩省的成因. Courtillot等(2003)将热点火山作用的源区分为三个深度, 分别为地核-地幔边界、下地幔-过渡带边界和岩石圈-软流圈边界. 还有一些学者也支持这种地表热点浅部地幔起源的说法(如Foulger和Natland, 2003). 这些质疑和挑战从对立面出发, 为进一步验证和完善地幔柱模型提供了动力和指引.

如果将地幔柱看作为地幔对流的一种表现形式, 那么就可以将源于下地幔深度的热点与地幔极向(pole-ward)对流联系起来. 与此同时, 边缘驱动地幔对流也

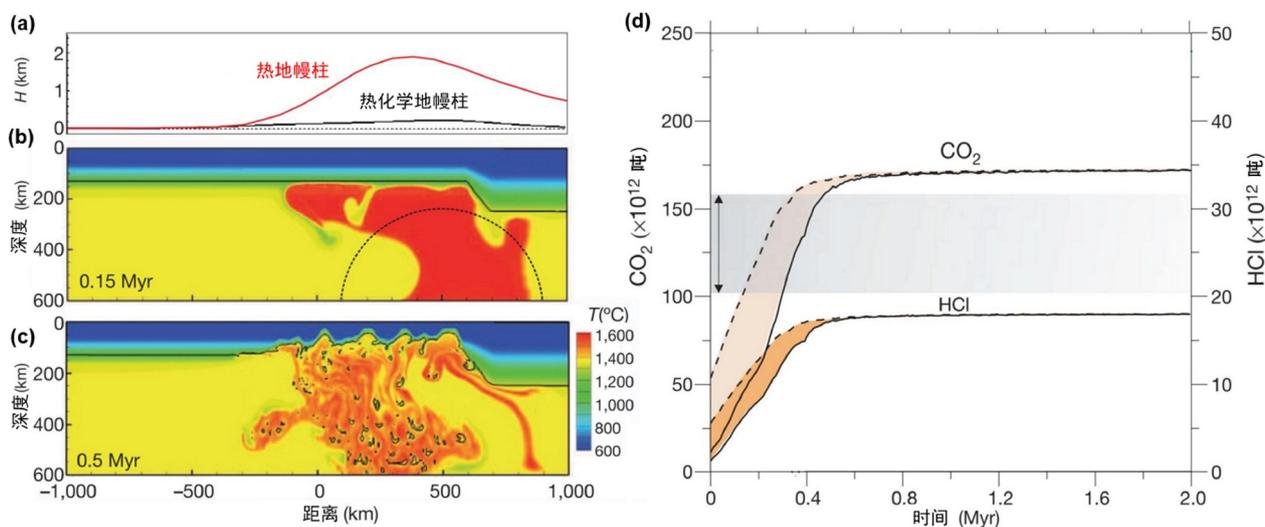


图4 地幔柱的地表地质和环境效应(修改自Sobolev等, 2011)

(a) 不含异常化学成分(热地幔柱)和含有循环洋壳成分(热化学地幔柱)的地幔柱头部在地表产生的地形隆升差异. (b)和(c)分别为地幔柱头部在0.15和0.5百万年(Myr)的温度场分布, 其中的黑色实线标出了岩石圈的底部; (b)中的半圆形点线标出了初始的地幔柱头部的形状. (d)模型给出的大火成岩省形成过程中向地表释放的CO₂和HCl等气体随时间的演化路径, 其中的黑色虚线和实线分别代表了可能的最大和最小排放量. 灰色阴影区域标出了前人研究估计的二叠纪-三叠纪交界时期生物大灭绝事件中的CO₂排放量的可能范围. Copyright © 2011 Springer Nature Limited

是地幔在浅部发生极向对流的一种可能形式,而这种模式在相对较为苛刻的模型设置下也能够产生相关的火山活动.因此,岩石圈板块之下的极向对流可能启动于不同的深度,应用地幔极向对流到浅部地幔,例如极向对流过程中俯冲板片的回卷、撕裂和断离(Tackley, 2000; Long和Becker, 2010)造成的地幔上涌会诱发各个区域的岩石圈地质构造环境变化,可以解释某些板块内部和边缘玄武岩中的软流圈地幔信息(郑永飞, 2023).随着地幔柱研究的不断深入,并且得到越来越多的观测数据的验证,当前地幔柱模型已经得到了学界较为一致的认可,认为其具有扎实的理论基础和观测约束,代表了地幔极向对流的极深部起源形式,是地球内部最为重要的运动形式之一.

3.2 地幔柱模型的发展

地幔柱模型仍在持续的发展演进中,本文涉及的6篇经典文献构成了这个演进过程的重要支点,后续经典的基石性工作还会不断地涌现.未来模型首先需要建立地幔柱的全生命周期动力学模型,研究其在地球整体演化历史中不断地产生、发展和消亡的过程;其次,需要应用精确的地球化学和地球物理分析方法识别地幔柱在地表留下的痕迹,通过地幔柱这一桥梁,认识地球深内部特别是核幔边界区域的物理和化学的演化过程;最后,需要与地表演化系统如大气和海洋系统进行紧密耦合,探讨地幔柱活动对宜居地球形成过程的影响.

4 结语

从代表地幔柱理论诞生和发展的重要节点的这6篇经典论文可以看出,地幔柱模型的建立与很多重要理论模型的建立过程一致,即来源于观测、验证于观测、并可以用来预测新的观测.一方面,观测是理论模型最重要的根基.地幔柱模型的诞生,起源于人们观测到板内火山活动,观测到热点轨迹与大火成岩省之间的成因联系;理论模型提出后,大量的地球化学和地球物理观测数据被用来检验该模型的正确性.另一方面,预测是理论模型最强有力的用途.地幔柱模型预测地幔柱来自于核幔边界,早期的地震学结果难以识别延伸到核幔边界的柱体,更全面的数据覆盖和更先进的数据分析技术最终给出了地幔柱从核幔边界

延伸到地表的观测结果(Montelli等, 2004; French和Romanowicz, 2015);地幔柱模型预测热点轨迹连接着地幔柱头部形成的大火成岩省,夏威夷-帝王热点轨迹在地表却没有观测到伴随的大火成岩省,这推动着新的研究结果显示该大火成岩省可能已经俯冲进入地幔深处(Wei等, 2020).随着更多观测数据的产生和分析方法的提高,对地幔柱模型的认识必将更为全面、更为准确和更能够指导新的预测.

参考文献

- 冷伟,刘浩. 2023. 地幔柱数值模型的研究进展. 中国科学: 地球科学, 53: 667–686
- 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,李振新. 2025. 板块构造理论的诞生. 中国科学: 地球科学, 55: 2104–2110
- Anderson D L. 2000. The thermal state of the upper mantle; no role for mantle plumes. *Geophys Res Lett*, 27: 3623–3626
- Asaadi N, Ribe N M, Sobouti F. 2011. Inferring nonlinear mantle rheology from the shape of the Hawaiian swell. *Nature*, 473: 501–504
- Black B A, Karlstrom L, Mather T A. 2021. The life cycle of large igneous provinces. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 840–857
- Bond D P G, Grasby S E. 2017. On the causes of mass extinctions. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 478: 3–29
- Campbell I H, Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 99: 79–93
- Coffin M F, Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Rev Geophys*, 32: 1–36
- Courtillot V, Davaille A, Besse J, Stock J. 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 205: 295–308
- Farnetani C G, Richards M A. 1994. Numerical investigations of the mantle plume initiation model for flood basalt events. *J Geophys Res*, 99: 13813–13833
- Foulger G R, Natland J H. 2003. Is “hotspot” volcanism a consequence of plate tectonics? *Science*, 300: 921–922
- French S W, Romanowicz B. 2015. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots. *Nature*, 525: 95–99
- Griffiths R W, Campbell I H. 1990. Stirring and structure in mantle starting plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 99: 66–78
- Hart S R, Hauri E H, Oschmann L A, Whitehead J A. 1992. Mantle plumes and entrainment: Isotopic evidence. *Science*, 256: 517–520
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic

- volcanism. *Nature*, 385: 219–229
- Hönisch B, Ridgwell A, Schmidt D N, Thomas E, Gibbs S J, Sluijs A, Zeebe R, Kump L, Martindale R C, Greene S E, Kiessling W, Ries J, Zachos J C, Royer D L, Barker S, Marchitto Jr T M, Moyer R, Pelejero C, Ziveri P, Foster G L, Williams B. 2012. The geological record of ocean acidification. *Science*, 335: 1058–1063
- Joachimski M M, Lai X, Shen S, Jiang H, Luo G, Chen B, Chen J, Sun Y. 2012. Climate warming in the latest Permian and the Permian-Triassic mass extinction. *Geology*, 40: 195–198
- King S D, Anderson D L. 1995. An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth Planet Sci Lett*, 136: 269–279
- King S D, Anderson D L. 1998. Edge-driven convection. *Earth Planet Sci Lett*, 160: 289–296
- Koppers A A P, Becker T W, Jackson M G, Konrad K, Müller R D, Romanowicz B, Steinberger B, Whittaker J M. 2021. Mantle plumes and their role in Earth processes. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 382–401
- Leng W, Gurnis M. 2012. Shape of thermal plumes in a compressible mantle with depth-dependent viscosity. *Geophys Res Lett*, 39: L05310
- Leng W, Zhong S. 2008. Controls on plume heat flux and plume excess temperature. *J Geophys Res*, 113: B04408
- Liu H, Leng W. 2020. Plume-tree structure induced by low-viscosity layers in the upper mantle. *Geophys Res Lett*, 47: e2019GL086508
- Long M D, Becker T W. 2010. Mantle dynamics and seismic anisotropy. *Earth Planet Sci Lett*, 297: 341–354
- Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, Masters G, Engdahl E R, Hung S H. 2004. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, 303: 338–343
- Morgan W J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230: 42–43
- Morgan W J. 1972a. Deep mantle convection plumes and plate motions. *AAPG Bull*, 56: 203–213
- Morgan W J. 1972b. Plate motions and deep mantle convection. *Geol Soc Am Mem*, 132: 7–22
- Ribe N M, Christensen U R. 1994. Three-dimensional modeling of plume-lithosphere interaction. *J Geophys Res*, 99: 669–682
- Richards M A, Duncan R A, Courtillot V E. 1989. Flood basalts and hot-spot tracks: Plume heads and tails. *Science*, 246: 103–107
- Sleep N H. 1990. Hotspots and mantle plumes: Some phenomenology. *J Geophys Res*, 95: 6715–6736
- Sobolev S V, Sobolev A V, Kuzmin D V, Krivolutsкая N A, Petrunin A G, Arndt N T, Radko V A, Vasiliev Y R. 2011. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature*, 477: 312–316
- Sun Y, Joachimski M M, Wignall P B, Yan C, Chen Y, Jiang H, Wang L, Lai X. 2012. Lethally hot temperatures during the early Triassic greenhouse. *Science*, 338: 366–370
- Tackley P J. 2000. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory. *Science*, 288: 2002–2007
- Wei S S, Shearer P M, Lithgow-Bertelloni C, Stixrude L, Tian D. 2020. Oceanic plateau of the Hawaiian mantle plume head subducted to the uppermost lower mantle. *Science*, 370: 983–987
- White W M. 2014. Hot spots and mantle plumes. In: Harff J, Meschede M, Petersen S, Thiede J, eds. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Dordrecht: Springer
- Whitehead Jr J A, Luther D S. 1975. Dynamics of laboratory diapir and plume models. *J Geophys Res*, 80: 705–717
- Wilson J T. 1963. A possible origin of the Hawaiian Islands. *Can J Phys*, 41: 863–870

(责任编辑: 郑永飞)