关于地幔柱大辩论

牛耀龄

(Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK. E-mail: yaoling.niu@durham.ac.uk)

地质过程最终是地球热演化的结果. 板块构造理论之所以能解释板块边缘所有地质现象, 正是因为地幔冷却的缘故. 例如, 大洋板块在洋中脊形成, 这些板块的运动和生长以及最终通过俯冲消减进入地幔是使地幔冷却降温的有效机理, 从而导致大规模的地幔对流. 地幔柱能解释如板内岩浆活动等另外一些地质现象, 则是地球深部(可能是地核)冷却降温的结果, 它们代表地幔热对流的另一种形式. 因此, 板块构造理论和地幔柱假说相互补充, 可解释多数地球内部过程和地质现象.

上述说法代表了当今全世界有关地球运动和地质过程的主流观点. 许多地球科学家同时也认识到板块构造理论和地幔柱假说都不完美, 均需继续发展和完善. 然而, 近年来地幔柱假说遇到了巨大的挑战. 该挑战也并非毫无道理. 目前"地幔柱辩论"越争越热, 愈辩愈烈. 这一争论也许是固体地球科学发展史上最激烈的争论之一. 为此, 也为了恰当地向地球科学界准确介绍这一争论的核心, 我邀请了两位知名科学家各抒己见, 由他们撰写文章讨论地幔柱是否存在, 是否可以存在, 以及板内岩浆活动等地质现象是否非地幔柱解释不可. Anderson[1]主张地球内部不存在地幔柱. 在本期里, Geoff F. Davies, 地幔柱假说的积极倡导者, 提供了地幔柱存在的依据[2], 而 Gillian R. Foulger, 地幔柱的强烈怀疑者, 解释为什么地幔柱假说值得怀疑[3]. 以下, 我简要介绍这两位作者, 然后提供一些背景信息和基本概念以助读者更好地理解这场辩论, 特别是理解这两篇文章. 我不会就两篇文章中支持或反对地幔柱假说的争论发表任何评述.

1 作者简介

Geoff F. Davies 是澳大利亚国立大学地球科学研究院地球物理流体动力学高级研究员. 他 1966 年和 1968 年分别获得澳大利亚 Monash 大学学士和硕士学位, 并于 1973 年获得美国加州理工学院(Caltech)博士学位. 他的博士论文主题是矿物物理学, 题目为"高温高压下固体的弹性: 理论、测试方法和地球物理应用". 他在 1983 年获得现职位之前, 分别在美国哈佛大学、罗彻斯特大学和华盛顿大学工作. 他是矿物物理学专家, 又熟知地质学和地球化学, 对地幔动力学及其演化(如板块构造、地幔对流和化学演化)有浓厚的兴趣. 同时, 他对壳幔相互作用、早期地球过程和其他行星也很有兴趣, 并进行过研究. 在过去几年里, Geoff 专注于地幔对流模拟及地幔对流的物理和化学意义. 他 1992 年获得美国地球物理联合会会员荣誉, 并于 2005 年因其在地球动力学方面的卓著成就获得欧洲地质科学联合会 Augustus Love Medal 奖. 他在国际著名杂志上发表文章 100 余篇, 并出版了值得一读并非常易懂的专著《动力地球: 板块、地幔柱和地幔对流》(剑桥大学出版社, 1999). 有兴趣的读者可以浏览他的个人网站, 其中有他关于地球对流的模拟动画可欣赏(http://rses.anu.edu.au/gfd/members/davies/index.html).

Gillian R. Foulger 是英国 Durham 大学地球物理学教授. 她分别于 1974 年和 1978 年获得剑桥大学文学学士和硕士学位, 并分别于 1976 年和 1985 年获得 Durham 大学理学硕士和博士学位. 她曾在冰岛大学、美国地质调查所和 Durham 大学工作过. 她是地震学专家, 应用 GPS 研究板块边界带的变形以及地震和水热活动. 她对冰岛"热点"的"毕生"观察和地球物理数值模拟使得她开始怀疑"冰岛热点"是来自地幔深部地幔柱的产物. 她在所有这些领域都有重要贡献, 特别是她证明了非剪切地震的重要性, 这与流行的地震皆由断层剪切引起的观点不一致. 与之有关的经典文章发表在《Nature》和其他权威杂志上. 她是许多著名学会的成员和英国皇家天文学会的会员, 最近又获得英国皇家天文学会的 Price Medal 奖, 以奖励她在重新认识地幔柱假说中的领导作用. Gillian 发表了许多与之有关的文章, 并号召和组织了诸多以多学科为手段来认识地幔柱假说的学术活动. 这在她最近发表的一篇文章中(Foulger G R. 地幔柱或板块构造过程? Astronomy & Geophysics, 2002, 43: 619~623)有系统的总结. 她的网站 www.mantleplumes.org 提供了一个崭新的探讨基本地球问题的论

坛. 她在国际著名杂志上发表论文 100 多篇, 而且还在继续撰写. 她鼓励年轻科学家要独立思考而不要盲从流行观点.

2 地幔柱假说: 起源、有限性和其他可能模型

近 40 年前, 板块构造理论的诞生对地球科学的思维方式产生了革命性的影响, 它为理解地球如何运作奠定了基本框架. 按照定义, 板块是一些刚性强、内部不变形但彼此相互运动的岩石圈块体. 所以, 板块构造理论简单明了地解释了沿板块边界分布的地震和火山活动, 但难以解释板块内部出现的地震和火山活动. 广阔的太平洋板块上的夏威夷洋岛以及向西北方向年龄逐渐变老的夏威夷-皇帝岛链是地球上最著名的板块构造理论解释不了的板内岩浆活动. 在板块构造理论问世的同时[4~7], Wilson[4,5]将这些类似夏威夷的板内火山产物解释为“热点”, 起源于相对固定的深部地幔源区, 从而不受太平洋板块漂移的影响. Morgan[8,9]进一步倡导这一观点, 认为热点是下地幔圆柱状地幔柱在地表的表现, 并在地球上鉴别出大约 20 个这种热点或地幔柱[10]. 因地球内部冷却所需要, 热地幔柱也许确实存在. 但正如Davies强调的那样, 地幔柱的数量应该是有限的. 这与根据热流数据分析和模拟暗示的约 5200 个地幔柱的观点明显不同[11]. 另一方面, 地幔柱的数量被许多地幔柱爱好者夸大了, 他们有意无意地认为板块构造解释不了的火山活动就必定是由地幔柱引起的, 只要这些火山岩浆富集所谓的不相容元素 (如轻稀土元素、挥发份和大离子亲石元素), 也不管是否存在足够的地球物理证据支持地幔柱来源. Foulger 认为地幔柱存在的实质性证据难以找到, 许多板内火山活动与地幔柱的概念不符, 也不能被地幔柱假说所预测[8,9,12~14]. 从这个意义上讲, 现已取得一些共识, 至少很多所谓的地幔柱不是真正的地幔柱. 故还需要其他可能的模型来解释这些非地幔柱的板内现象.

2.1 其他可能模型和警告

Davies 认识到“化学组成地幔柱”的潜在重要性[15]. Foulger[3]认为许多其他模型均可以解释板内火山活动, 并不需要地幔柱. 这些模型包括 “边缘对流”、“熔体汇集”、“大规模熔体聚集”、“大陆岩石圈拆沉”、“板片断离”、“裂谷” 和 “陨石撞击” 等. 这些类似的名词和概念实际上在文献中早已存在. 对诸多模型的需要意味着能解释板内火山活动的普遍理论尚未问世. 这些模型的正确与否必须检验, 但有时则难以检验. 这需要我们根据现有的地质观察、基本物理学和逻辑推理来分析判断其可能性. 但如果我们能客观地解剖这些模型并不断地询问为什么和怎样建立这些可能的模型的话, 这种分析判断才会奏效. 后者有助于避免不假思索地接受某些观点, 而并不理解其有效性.

总体上, 这场争论的许多方面在本期Davies和Foulger的文章中都有所涉及. 然而, 争论双方包括所有地幔柱的支持者和怀疑者所谈论的地幔柱是否指的同一回事仍然不清楚. 例如, “化学组成地幔柱”的提出和地幔柱可以来源于几乎所有深度, 暗示这里指的地幔柱不同于起源于热边界层 (TBL)[12~14]的热地幔柱. 因此, 如果辩论者天真地将苹果和橘子进行比较或将大象的不同部分当作整个大象的话, 争论不会有结果. 经常出现在文献中的这些名词, 如“热地幔柱”、“冷地幔柱”、“高^{3}He/^{4}He地幔柱”、“低^{3}He/^{4}He地幔柱”、“无头地幔柱”、“无尾地幔柱”、“深地幔柱”、“浅地幔柱”、“小地幔柱”、“超级地幔柱”等, 可能的确反映地幔柱的多样性. 然而, 我们应该注意我们头脑中的地幔柱是否和争论的地幔柱是一回事. 否则, “地幔柱的大辩论”就不会有结果. 因此, 需要澄清与地幔柱假说有关的一些概念.

2.2 地幔柱大辩论有关的定义和概念

我们用图 1 来讨论地幔柱假说的某些关键因素. 左图示意全地幔对流模型地温分布的情形, 右图示意分层地幔对流模型地温分布的情形. 纵坐标显示从地表到地核中心的深度. 水平轴为近似温度, 向右增高.

(ⅰ) 全地幔对流模型

严格说来, 没有直接证据支持或者反对全地幔对流或分层地幔对流. 如果 660 km地震不连续面(660-D, 起因于压力引起的相转变)不是阻止物质流通障碍的话, 那么地幔对流一定是全地幔规模, 因为上地幔物质能够进入下地幔, 而为了保持物质平衡下地幔物质则必须进入上地幔. 在许多俯冲带, 地震层析观测到[16,17]大洋岩石圈穿过 660-D不连续面进入下地幔的现象支持全地幔对流. 660-D界面上下大规模物质交换意味着有效的热交换, 其结果是下地幔就会有效地冷却降温, 而不会聚集过多热量. 这说明660-D不连续面不是一个传导热边界层. 因此, 在图 1 左图中, 地幔只有两个热边界层, 以陡的地温梯

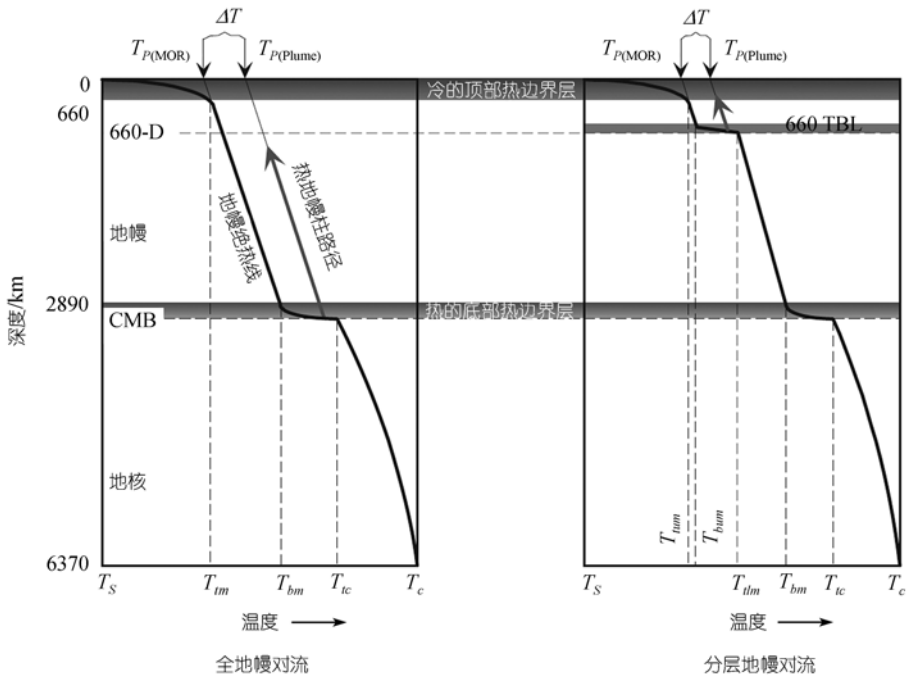

图 1 示意地幔温度剖面(粗实线)和来源于深部热边界层(TBL)热地幔柱的上涌路径(灰色带箭头线)

如果是全地幔对流，该深部热边界层为核幔边界(CMB 或 D″) (左图)，但如果是分层地幔对流的话，该热边界层为 660 km 地震不连续面(右图). 水平轴表示的温度代表：地表(s)，地幔顶部(tm)，地幔底部(bm)，地核顶部(tc)，地球中心(c)，上地幔顶部(tum)，上地幔底部(bum)，下地幔顶部(tlm). $T_{P(Plume)}$代表热地幔柱的地幔潜在温度，$T_{P(MOR)}$代表正常地幔潜在温度，如洋中脊物质源区. 详见正文部分

度为特征(粗实线). 顶部冷的热边界层是地幔热传导/损失到地表所至，而底部热的热边界层则是由于地核热传导/加热地幔而成的. 两个热边界层之间地幔绝大部分的温度剖面一般认为可以用地幔绝热地温梯度来代表. 也就是说温度沿绝热线变化不是由于热的损失或获得，而是来源于压力(深度)的变化：在恒定熵的情况下压缩(向下)或膨胀(向上). 在实际情况下，地幔主要部分的温度剖面因为放射性生热的缘故可能不是严格的绝热，但将其示为绝热梯度在这里尚合理. 图 1 左图说明如果地幔上涌是按绝热地温梯度进行的，而且如果地幔柱源区物质(地幔柱的潜在温度：$T_{P(Plume)}$)比周围“正常”地幔如洋中脊下地幔(即$T_{P(MOR)}$)热的话，那么，热地幔柱(粗灰带箭头线，在较高温度下平行于地幔绝热线)必须从底部热边界层即D″区或核幔边界(CMB)上升. 这是因为起源于热边界层以外地幔任何部分的物质都将会沿着绝热梯度(粗实线)上升，从而不会比周围正常地幔(即$T_{P(MOR)}$)热. 所以，我们可以说如果地球中的确存在热地幔柱的话，他们必然起源于热边界层. 如果是这样的话，热点火山活动得到的$T_{P(Plume)}$一定比$T_{P(MOR)}$高.

另一方面，如果来源于远离热边界层的地幔主要部分的物质具有较轻的化学组成并含有大量水(因此具有较高的不相容元素丰度)，而且体积足够大(Stokes法则)的话，这些物质将会沿绝热梯度限定的路径(粗实线) 上升，并在较浅的部位发生部分熔融，从而产生地表火山活动. 如果这些火山活动出现在板块内部，人们就可能用地幔柱来解释其成因. 然而，这和热地幔柱的概念截然不同. 如果要评判能否应用地幔柱一词时，那么这种板内熔融异常应该是化学组成地幔柱(而非热地幔柱)的产物. 因为它不是起源于热边界层的，其潜在温度就会类似于$T_{P(MOR)}$，但比$T_{P(Plume)}$要低. 这一概念可能有助于解决有关从火山产物推测[18~21]$T_{P(MOR)}$和$T_{P(Plume)}$的矛盾. 值得注意的是这化学组成异常的地幔温度可能稍高于 $T_{P(MOR)}$，因为会有较高丰度的生热元素所产生的过热，但仍然不会高于$T_{P(Plume)}$.

(ⅱ) 分层地幔对流

正如上面讨论的，如果 660-D 不是上下地幔物质交换的物理屏障的话，那么分层地幔对流就不会发生. 然而，除了层析成像暗示大洋岩石圈可能进入下地幔以外，没有直接证据表明上下地幔物质的 “自由”交换. 地震层析成像暗示太平洋俯冲岩石圈呈水平方向滞留在东亚大陆下的过渡带内西延大于 2000 km[17]. 俯冲板片在许多其他地区也有滞留在过渡的迹象. 这意味着 660-D可能是阻止上下地幔物质交换的局部或暂时的屏障，从而也有可能是一个热传导边界层. 这就意味着分层对流在地球历史中可能也很重要[22,23]. 因此，图 1 右图的分层对流模型也值得考虑. 从这个意义上说，起源于不同热边界层 (例如,

660-D或CMB)的地幔柱也许能够很好地解释不同特征的热点火山活动[24].

图 1 右图显示 660-D可能是热传导边界层. 形成这种热边界层是因为板块构造诱发的冷却仅限于上地幔, 而热以传导方式从下地幔进入上地幔既不有效也很有限. 因此, 在 660-D界面上会形成巨大的温度差而产生热边界层. 热地幔柱因此只能从 660 km热边界层形成. 来源于 660 km热边界层的地幔柱可能不如来源于核幔边界的地幔柱热. 化学组成地幔柱有可能也能在上地幔内形成, 但不会比 $T_{P[MOR]}$热. 尽管如此, 上地幔起源的热地幔柱(或地幔底辟上升)是否能够引起短时限内岩石圈大规模的熔融, 尚需检验和定量研究.

3 结语

“地幔柱大辩论”现在很热. 这场辩论也许是固体地球科学历史上最激烈的争论之一. 无疑, 科学辩论提供了发掘真理的动力. 在这个特殊的例子中(即地幔柱在地球中到底是否存在), 我们首先都应该明白地幔柱到底是什么东西. 我们热情的辩论者, 无论是地幔柱支持者还是反对者, 应该明确我们辩论的地幔柱在概念上指的是一回事. 否则, 争论就不会有结果. Davies 和 Foulger 的文章为这场争论开了个非常好的头. 这是首次将完全不同的观点同时发表在同一科学杂志上. 在这场辩论中, 我们需要记住热地幔柱, 如果存在的话, 的确能够解释某些板内火山活动, 但所有板内火山活动一定起源于热地幔柱的推论是站不住脚的. 如果热地幔柱不能解释板内火山活动, 包括热地幔柱在地球上不存在的可能性, 那么就有必要寻找其他可能的机理. Davies 提到的“化学组成地幔柱”当然是一种可能的机理, 但必须明确定义“化学组成地幔柱”是什么? Foulger 建议的许多其他可能的机理也必须经得起观察、物理原理和逻辑推论的检验. 不假思索地接受任何可能的模型无益于科学发展. 同样, 任何地幔柱模型用来解释火成岩岩石成因也必须能接受大量地质学、岩石学、地球化学和地球物理观察的严格检验.

致谢 感谢张宏福翻译中文稿.

参 考 文 献

1 Anderson D L. 地球动力学中的简单尺度关系: 压力在地幔对流和地幔柱形成中的作用. 科学通报, 2004, 49(20): 2025~2028[摘要] [PDF]
2 Davies G F. 地幔柱存在的依据. 科学通报, 2005, 50(17): 1801~1813[摘要]
3 Foulger G R. 地幔柱: 为什么现在怀疑? 科学通报, 2005, 50(17): 1814~1819[摘要]
4 Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian Islands. Canadian Journal of Physics, 1963, 41: 863~870
5 Wilson J T. Evidence from islands on the spreading of the ocean floor. Nature, 1963, 197: 536~538
6 McKenzie D P, Parker R L. The north Pacific: An example of tectonics on a sphere. Nature, 1967, 216: 1276~1280
7 Morgan W J. Rises, trenches, great faults and crustal blocks. Journal of Geophysical Research, 1968, 73: 1959~1982
8 Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle. Nature, 1971, 230: 42~43
9 Morgan W J. Plate motions and deep mantle convection. Mem Geol Soc Am, 1972, 132: 7~22
10 Morgan W J. Hotspot tracks and the opening of the Atlantic and Indian Oceans. In: Emiliani C, ed. The Sea 7. New York: Wiley, 1981, 443~487
11 Malamud B D, Turcotte D L. How many plumes are there? Earth Planet Sci Lett, 1999, 174: 113~124[DOI]
12 Hill R I, Campbell I H, Davies G F, et al. Mantle plumes and continental tectonics. Science, 1992, 256: 186~193
13 Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. Earth Planet Sci Lett, 1990, 99: 79~83[DOI]
14 Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle plumes. Earth Planet Sci Lett, 1990, 99: 66~78[DOI]
15 Farnetani C G, Samuel H. Beyond the thermal plume paradigm. Geophys Res Lett, 2005, 32: L07311, doi:07310.01029/02005GL022360
16 van der Hilst R D, Widiyantoro S, Engdahl E R. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. Nature, 1997, 386: 578~584[DOI]
17 Kárason H, van der Hilst R. Constraints on mantle convection from seismic tomography Geophys Monogr, 2000, 121: 277~288
18 Green D H, Falloon T J, Eggins S M, et al. Primary magmas and mantle temperatures. Eur J Mineral, 1999, 13: 437~451[DOI]
19 Herzberg C, O'Hara M J. Plume-associated ultramafic magmas of Phanerozoic age. J Petrol, 2002, 43: 1857~1883[DOI]
20 Green D H, Falloon T J. Primary magmas at mid-ocean ridges, ‘‘hot spots’’ and other intraplate settings: Constraints on mantle potential temperature. In: Foulger G R, et al, eds. Plates, Plumes and Paradigms. Spec Pap Geol Soc Am, 2005 (in press)
21 Putirka K D. Mantle potential temperatures at Hawaii, Iceland, and the mid-ocean ridge system, as inferred from olivine phenocrysts: Evidence for thermally driven mantle plumes. Geochem Geophys Geosystems, 2005, 6: Q05L08, doi:10.1029/2005GC000915
22 Machetel P, Weber P. Intermittent layered convection in a model mantle with an endothermic phase change at 670 km. Nature, 1991, 350: 55~57
23 Davies G F. Punctuated tectonic evolution of the earth. Earth Planet Sci Lett, 1995, 136: 363~379[DOI]
24 Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. Earth Planet Sci Lett, 2003, 205: 295~308[DOI]

(2005-07-19 收稿)