

地幔柱：为什么现在怀疑？

Gillian R. Foulger

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

摘要 对地幔柱假说的重新评价也许是当今地球科学争论最激烈的问题。尽管如此，需要对地幔柱假说进行重新评价的根本原因对大部分学者而言并非十分清楚。主要原因可归结为：(1) 许多观察与地幔柱最初模型的预测结果不符，(2) 地幔中产生热地幔柱所需要的那种对流可能并不存在，(3) 很多最初模型的衍生体被用来容纳相互矛盾的资料，以致于地幔柱假说实际上根本无法检验，以及 (4) 其他行之有效的模型均被长期忽视。不管最终结果如何，现在的激烈争论都应受欢迎，因为争论有助于新的发现，而不质疑地接受传统地幔柱模型则有碍于新发现。

关键词 地幔柱 火山活动 热点 对流 地幔 板块构造

目前对地幔柱假说^[1]的重新评估可以说是自 20 世纪 60 年代板块构造理论诞生以来地球科学最重要的进展。地幔柱理论的根基源于 1963 年。当时 Wilson^[2]认为夏威夷海岛及其西北部海山逐渐变老的现象能够通过太平洋海底漂移经过地幔中一个热的区域来解释，该热区域被命名为“热点”。地幔柱理论诞生于 1971 年，Morgan^[3]提出全球约有 20 个“热点”，并认为热点源区物质对流上升，其结构类似于“直达深部地幔的管子”。他设想这些“管子”根植于地幔深部，且位置相对固定从而解释地表“热点”位置相对固定的特点。尽管当时缺乏同位素年龄数据，Morgan 还是假设许多火山链像夏威夷和皇帝岛链那样具有在空间上年龄递变的规律。

地幔柱假说提出后的起初 20 年里，大家兴趣不大^[4](图 1)。然而，当在装满流体的容器里进行的模拟地幔柱对流实验的文章发表后^[5]，即大约 1990 年，地幔柱假说开始盛行。该假说认为地幔柱携带很高的 ^3He 同位素，即原始地幔示踪计^[6]。其结果是发表倡导地幔柱假说的文章数几乎增加了几十倍，随后一直维持在很高的水平。

尽管如此，反对地幔柱假说的声音也从未间断，其中不乏那些在发展板块构造理论中做出过重要贡献者。在整个 20 世纪 90 年代，怀疑者是少数。绝大多数发表的有关地幔柱的文章假设地幔柱假说是正确的，并试图证实它，而不是检验它。他们的任务是发现更多的地幔柱，而不是认真检测现有的地幔柱是否属实。

然而，近十年怀疑者掀起了高潮。为什么这时候，即地幔柱假说从初创期经过大量深入研究进入到普

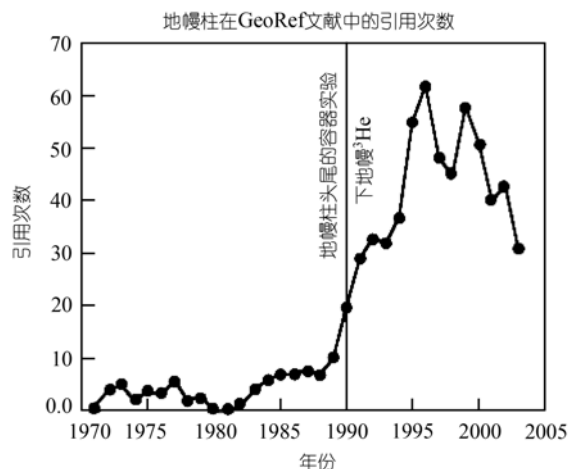


图 1 “地幔柱”自 1971 年以来以年为单位在美国地质研究所在线数据库 GeoRef 文献中出现在题目、参考文献中的引用数

垂直线是 Campbell 等人^[5]描述地幔柱头和柱尾的文章发表的那一年。同一年 Kellogg 等人^[6]发表文章指出地幔柱是下地幔 ^3He 去气的有效通道。地幔柱假说随着这些文章的发表很快被广泛接受(引自 Anderson 等人^[4])

遍接受期，出现怀疑？这有如下 4 个主要原因。

1 观察与经典地幔柱模型的预测结果不符

经典地幔柱模型可预测很多地质现象。然而，观察表明其预测性难以得到证实。这时大多数最初提出的 19 个地幔柱^[3]是如此，对随后增加的诸多地幔柱^[7]更是如此：

() 预测的火山轨迹应从活火山活动(“热点”)的现今位置向外延伸，并具有空间上年龄递变的规律。这在很多地方如冰岛和 Ascension 并未观察到。此外，许多用来定义“热点轨迹”年龄的可靠性令人

怀疑^[8,9]。

() 预测“热点”彼此间的位置是相对固定的,并不随时间而变化。然而,相对固定程度是变化的,例如大西洋“热点”相对太平洋“热点”在大约 50 Ma^[10]前就不固定。

() 目前活动“热点”下应该存在垂直的、近似圆柱状的、从核-幔边界延伸至地表的热异常物质。然而尽管经过 30 多年的持续努力,而且方法不断更新,地震学并没有观测到令人信服的这种结构。例如,冰岛、Tristan 和 Afar 下的地震异常仅限于上地幔,而许多其他“热点”如 Reunion 和 Hoggar 之下根本就没有任何异常。

() “热点”地区的熔岩应该来自比其他地区如大洋中脊的熔岩更热的源区。然而,对此岩石学几乎没有提供任何无争议的证据。夏威夷是惟一个现代还在活动的并具有苦橄质玻璃的“热点”,这暗示着高温,但苦橄质岩石和其他玄武岩的空间关系不清。冰岛玄武岩的地幔源区可能比典型洋中脊热几十度,但这点异常可能对一个地幔柱来说太小,也许是区域而非局部特征^[11,12]。这可能也适合夏威夷。在大多数其他“热点”地区,根本就不存在任何过热岩浆的岩石学证据,甚至对大体积的拉斑玄武岩亦如此,说明高热流并不存在^[13,14]。

() 有些地幔柱缺失代表“地幔柱柱头”的大火成岩省(LIPs),如夏威夷。其他大火成岩省缺失与“地幔柱柱尾”有关的随时间变年轻的火山岩轨迹,如 Ontong Java 海台和西伯利亚大火成岩省。

除了这些困惑外,许多常见的地质现象在经典的地幔柱模型中可解释为巧合。例如美国黄石“轨迹”出现在盆岭省的北部边缘,Azores“热点”位于三个洋中脊的结合部。

在有些情况下,观察与地幔柱假说如此明显不符,以致于他们不能忽略或归结为不完全取样。例如没有任何证据表明 Ontong Java 海台(地球上最大的大火成岩省: $60 \times 10^6 \text{ km}^3$)曾有过地幔柱抬升的先驱^[15]。对于西伯利亚大火成岩省(Ontong Java 海台的陆上姊妹)而言,地质证据暗示就位前反而沉降^[16,17]。尽管这只是地球上许多大火成岩省中的两个,但如果地幔柱假说不能解释它们的成因,那么就需要其他机理来解释。自然,这些机理也适应于其他大火成岩省。

其实,有些观察与地幔柱假说的预测还是一致

的^[18]。尽管如此,许多科学家发现经典地幔柱假说的预测能力不能令人满意。

2 地幔的物理特性不支持产生经典地幔柱模型需要的对流

地幔中所有区域很可能以某种方式对流。然而,就已知地球内部的物性特征来看,对流上涌是否能从地幔深处上升到地表,并产生局部火山活动即“热点”^[19],还值得怀疑。更值得怀疑的是深部上涌能否产生火山活动的某些具有规则性特征,如空间上数公里之大,时间上数百万年之久。还应该指出的是地幔柱假说要求相互排斥的假设,亦即,地幔柱起源于比对流上地幔更深的位置,以此来解释地表“热点”的相对固定性,但对流上地幔与热点的相对固定性有冲突^[20]。

地幔深部高压对对流的影响十分重要。压力对热膨胀、传导和黏滞度都有很大非线性的影响。在高压下,温度对密度的影响不大,因此地核传导热不会导致受热物质热浮力的增加。同样,热传导随压力的升高而增加,从而降低了热被对流带走的趋势。黏滞度在地幔深部增加 1~2 个数量级,这也进一步阻止对流。压力对物质特性的影响进一步暗示下地幔可能是化学分层的。地幔深部温度的变化可能引起密度的变化,但这种变化小于穿过化学界面的变化,从而阻止或排除了热物质从地幔深部上升。

地球内部物理特性的这些变化暗示,尽管在上地幔对流规模达几百公里和对流持续时间达几亿年,但在下地幔对流具有缓慢和大规模特征,其时间持续几十亿年,空间规模达数千公里。

全地幔层析成像支持这一结论,成像显示地幔下部三分之一是以全球规模地体为特征的^[21]。这些地体该怎么解释?地震成像观测到的南太平洋和南大西洋“超级地幔柱”是否真是下地幔的热上涌?剪切波速受温度、密度和化学组成的影响,但剪切波速不能有效地反映这些参数中的任何一个。温度和化学组成对剪切波速影响很小,特别是在地幔深部。剪切波速与密度的关系可能是正相关也可能是负相关^[22]。最近对“超级地幔柱”的地震研究表明他们可能是缓慢形成的古老地体,而且可能因密度大而不上浮^[23]。为地表“热点”提供物源的那种热柱必须从热边界层上升并应清晰地反映在地震层析成像里。然而据已知深部地幔物理特性,提供“热点”物质的

源区应该浅而非深处。地幔中主要地震不连续面是矿物相转变造成的,而非温度和化学组成变化所致。除了地表和核-幔边界外,没有证据表明地球内其他部位有热边界层存在。

这一观点与靠地核散热来驱动地核“发电机”的要求并不矛盾。地幔最底部加热缓慢,因而导致的低的热浮力引起巨大的缓慢上涌,造成了既非传导也非辐射方式的热散失。这并不是Morgan^[3]提出的那种经典地幔柱,也不会造成普遍认为的由地幔柱引起的地表现象。也许我们过高地估计了地核的热散失,地球表面大部分热散失可能源于中、上地幔放射性衰变产生的热^[24]。McKenzie等人^[20]也指出地幔柱模式内部与加热的流体行为不一致,而且与期望的相反,有助于形成狭窄的下降柱和扩散型上涌。

没有实验室、也没有几个地幔柱式对流数值模拟能真实地模拟地球的实际情况。许多模拟没有包括上述描述的所有关键参数。实验室的对流模型在20世纪90年代初期推广地幔柱模型中起过重要作用^[25],涉及到将低密度的流体注入到含有高密度流体的容器中。实验室产生的柱体不能维持很久,而且容器不能模拟地球内部压力的影响。建立能包括温度压力对所有有关物理特性影响的数值对流模型,并结合地幔深部热膨胀性的变化以及传导和黏滞度的提高,将是非常有意义的。

总之,地幔中任何部位都可能存在某种形式的对流,这一点没必要争论。问题是地幔是否能够产生持续的狭窄对流结构,并能穿过整个地幔将核-幔边界物质带到地球表面。如果假设提供“热点”物质的热柱不是从地球内部某个热边界层上升的话,那么就不清楚热柱从何处上升。因此,热地幔柱在地球上可能根本不存在的结论将不可避免。

3 当代地幔柱假说如此宽泛以致不能反驳

我对最初的经典地幔柱假说和当代地幔柱的内涵加以区分。柱在流体动力学中是一个有严格限定的名词,Morgan的最初含义也很清楚^[3]。然而,随后“地幔柱”一词已被应用到非常宽泛的领域,在很多情况下它只是象征,只要它位于火山区之下^[26]。实际上,地幔柱假说已处于无法检验和反驳的状况。

地幔柱被认为几乎可来源于地幔任何深度,包括核-幔边界、下地幔化学不连续面、下地幔“超级地幔柱”顶部、410 km和650 km矿物相转变界面、岩石

圈底部和地幔中任何分界面^[20,27]。地幔柱被认为是垂直的或倾斜的,对某些“热点”不同文章认为倾斜方向是不同的。例如,冰岛地幔柱被认为向西^[28]、向南^[29]和向东南^[30]倾斜的都有。有些熔融异常区很局限(如夏威夷)。尽管如此,分散的火山活动产物被解释为上千公里的横向流动(如冰岛^[31])或存在多个相互位置很近的地幔柱(如Azores地区)。不同的研究者对地幔柱宽度的理解也完全不同。地震层析实验^[32]认为地幔柱宽达1000公里级,但单个的直径仅几公里的火山亦认为代表地幔柱中心即“热点”(如冰岛、夏威夷和黄石)。各个时间尺度稳定的或不稳定的熔岩流都被认为是合理的。夏威夷火山喷发量在最近的5百万年里增加了一个数量级。冰岛地幔柱的周期性喷发行为被认为是冰岛洋脊向南和向北深度变化不同造成的^[33]。Ontong Java海台熔岩观测到的120 Ma和90 Ma两组年龄被认为该大火成岩省是由两个柱头的地幔柱形成的^[34],但最近证明后一个年龄是错误的^[35],所以又回到只有一个柱头的地幔柱模型上。

相对固定是最初地幔柱假说的基本特征之一,但后来发现很多“热点”位置并不固定。所以,这已不再被认为是一个障碍,但被解释为地幔中对流物质的波动(“地幔风”),洋中脊的侧向流动或“地幔柱捕获”。例如,夏威夷“热点”被认为向南迁移了近800 km,其根据是最老的皇帝洋岛(Detroit洋岛,75.8 Ma)和夏威夷-皇帝转折点(47 Ma)^[36]喷发时地球磁极资料。一些,但并不是全部,被解释为地幔流动偏向。大西洋中脊冰岛熔融异常的持续性归因于从地幔柱中心的侧向流动。该地幔柱中心或许在西部格陵兰之下或位于格陵兰-冰岛-Faeroe洋脊之下^[37]。

地幔柱的假想寿命从8千万年(如夏威夷)到仅几百万年(如太平洋上的Caroline链)不等。地幔柱柱头-柱尾模型起源于实验室对流实验,被应用于某些熔融异常区,例如Deccan Traps-Laccadive-Chagos洋脊-Reunion system,这些例子似乎与模型吻合的很好。然而,许多没有岛链的大火成岩省或缺失大火成岩省的岛链也被认为是地幔柱的产物。此外,地幔柱预测的先期公里规模的隆起在有些地方存在^[18],但在其他地方又不存在^[17]。甚至最近又有人认为伴随地幔柱柱头到达岩石圈底部造成的简单穹隆状隆起不是必需的^[38]。

早在20世纪70年代就发现“热点”、岛弧和岛链火山岩^[39]的地球化学特征与MORB不同,这被归因于地幔柱来自化学组成不同的源区。尽管如此,许多“热点”熔岩的化学组成与MORB重叠被解释为地幔柱携带有上地幔MORB源区物质。夏威夷高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的玄武岩被认为起源于下地幔地幔柱源区。地幔柱源具有很高的原始 ^3He 。然而,在某些“热点”如Tristan da Cunha,未发现具有高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值的玄武岩。这被解释为受到过地壳来源的高放射性 ^4He 的混染或不完全取洋。岩石学和其他方法也早已用来寻找“热点”下局部高温的证据。证据仅存在于少量的地幔柱中,而在其他地幔柱不存在,这被解释为不完全取样或基本上采不到所需的样品。

很少有科学家继续倡导经典地幔柱假说应为其纯粹原始的形式,正如少数人准备完全放弃地幔柱模型一样。合理的应该是地幔柱原始假说有所发展,并随着新资料的积累不断修改。尽管如此,所有科学假说必须保持基本的东西不能被驳倒,否则就永远是假说,从而变成一个永远的假设。如果错了,他们可能会阻止进一步的发展。很多人感到现代地幔柱假说实际上已变得非常宽泛,也很难反驳^[26]。对地幔柱的定义取得共识是讨论地幔柱是否存在以及对其进行检验是否有意义的必要前提。

4 其他可替代的模型

大量研究熔融异常的工作集中在用地幔柱假说来解释这些异常,很少考虑并发展其他模型。结果是许多模型仍然只是定性的。这些理论模型的量化是一个新的发展很快的课题。这些模型包括:

4.1 边缘对流

当大陆裂解时,有时在边缘地区会形成线状分布的火山。在新的海洋如北大西洋的某些部位会出现异常岩浆活动。边缘对流理论是基于下列观察:当厚的冷的大陆岩石圈碰到热的大洋软流圈时在大陆边缘就形成小规模的对流,从而引起强烈的与时间有关的岩浆活动^[40]。

4.2 板块构造过程

洋岛玄武岩的地球化学组成很早以前就被认为与俯冲板片有关,俯冲板片为包括地壳和地幔的岩石圈。此外,需要这些易熔物质来解释较大体积的喷发,所有熔融异常均具有原始特性。深部地幔柱假说需要这种易熔物质被带到核幔边界,然后再带到地

表。板块构造过程模型(又称“板块模型”)认为这种易熔物质是在浅得多的深度循环的。该模型认为“异常”火山作用在板块伸展的地方就会出现,不管伸展是在板块内部还是边缘,产生的岩浆的体积取决于捕获的源区物质的饱满程度和易熔程度。如果捕获的是浅部地幔古老的俯冲物质,火山作用将具有洋岛玄武岩的地球化学特性,并具有比源区全是地幔橄榄岩熔融时较大的体积^[41]。

4.3 熔体集中

熔融异常通常位于复杂的构造结合部,例如三个洋脊结合部、洋脊与转换断层交汇处和微板块(如Azores, Bouvet, Easter 微板块和冰岛)。很早以前就认为熔体集中出现在洋中脊地区,即垂直洋脊纵剖面呈三角形的两维区域内。定量模拟预测三维岩浆集中在某些板块边界结合部的锥形区域,如洋脊-转换断层和三个洋脊的结合部,可期望产生大量熔融^[42,43]。

4.4 大规模熔体聚集

数值模拟未能模拟出体积巨大的熔体和与Ontong Java海台那样的大火山岩省有关的巨量喷发,即使假设易熔源区也困难^[44]。如果正确估计熔体的体积和喷发速率,熔融形成时间比喷发时间要长得多就不可避免。这说明大体积熔体聚集是可能的,尽管通常假设在低程度部分熔融情况下熔体一旦形成就会从源区抽取^[45]。为了支持这一点,最近工作显示结构不平衡的岩石可能含有高达11%的熔体组分^[46]。如果岩石圈下部处于积压状态熔体可能在岩石圈底部聚集。

4.5 大陆岩石圈拆沉和板片断离

除了巨大的喷发速率,还必须解释从某些地区观察到的大火成岩省喷发前缺乏抬升^[15,16]。岩石圈拆沉能够符合大陆大火成岩省的观测事实。如果大陆岩石圈被加厚并转换成密度较大的岩石如榴辉岩,拆沉就能够发生,然后突然下沉和拆离。数值模拟显示大量的岩浆活动会伴随地表沉降^[47]。一个类似的观察是板片断离,板片断离会快速改变碰撞带地幔的流动状态,导致岩浆大量喷发^[48]。

4.6 裂谷减压熔融

大陆裂解伴随的裂谷的数值模拟表明,减压熔融的熔体体积、熔融时间和熔融区域与岩石圈厚度、

组成和状态有关. 计算的熔体体积足够解释那些观察到的大火成岩省和被动火山边缘, 暗示产生这些熔融异常并不需要地幔柱^[49].

4.7 陨石撞击

最近对陨石撞击产生大火成岩省大量岩浆的可能性再次进行了讨论, 因为这种机理能够非常漂亮的解释短时限内大规模岩浆活动. 压力释放(减压)熔融的可能性在早期的模型中被忽略了, 最近的工作证明减压熔融能够造成大火成岩省观察到的熔体体积和熔融速率^[50].

有人认为如此多且机理各异的模型更增加了模型的复杂性, 从而可能迷失了方向. 然而, 自然界的确存在各种各样的熔融异常, 这些异常从小体积短寿命的板内碱性火山链(如 Caroline 岛)到大体积长寿命以洋中脊为中心的拉斑玄武岩(如冰岛)都有. 所有这些不同的岩浆活动不可能由同种过程造成的. 任何熔融异常都不敢说一种理论(地幔柱或其他可替代的模型)能够解释所有观测事实而不留下任何问题. 正是这个原因, 重要的是要考虑多种假说而不只假设一个模型而完全排除其他模型.

5 结语

在该短文中, 我试图描述为什么许多科学家现在开始寻找其他可替代地幔柱的模型来解释“热点”岩浆活动的起源问题. 很难适当地表达吸引许多实际工作者热心和激情的那种气氛, 这些实际工作者感到他们自己的工作和研究主题被提出的新的问题所鼓舞. 该领域批判性的和创新性的想法的大量出现主要应归因于地球科学大量数据的获得以及新的网络数据传输和通讯工具的出现. 这改变了我们所有工作的方式. 新的议题还应该感谢许多新来者的慷慨和大公无私的对该领域的关心, 那些在几十年间每当争论兴趣较低时保持火炬燃烧的人更应该受到尊敬. 现在该议题已成为全球激烈辩论的议题. 不管最终结果如何, 这种争论都是重要的; 只有理论受到批判和检验, 才能有新的发现和真正的进展.

致谢 感谢牛耀龄邀请我撰写本文, 感谢 Ian Campbell 和其他两位评审人对本文的评审. 中文稿由张宏福翻译, 牛耀龄校对.

参 考 文 献

- 1 Foulger G R, Sheth H C, Anderson D L, et al. *www. Mantle-Plumes.org*, 2005

- 2 Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian Islands. *Canadian Journal of Physics*, 1963, 41L 863~870
- 3 Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 1971, 230: 42~43
- 4 Anderson D L, Natland J H. A brief history of the plume hypothesis and its competitors: Concept and controversy. In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al, eds. *Plates, Plumes & Paradigms*. Geol Soc Amer, Spec Paper, 2005 (in press)
- 5 Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 79~93[DOI]
- 6 Kellogg L H, Wasserburg G J. The role of plumes in mantle helium fluxes. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 276~289[DOI]
- 7 Sleep N H. Hotspot volcanism and mantle plumes. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1992, 20: 19~43[DOI]
- 8 Baksi A K. Reevaluation of plate motion models based on hotspot tracks in the Atlantic and Indian Oceans. *J Geol*, 1999, 107: 13-26
- 9 Baksi A K. <http://www.mantleplumes.org/ArAr.html>. 2004
- 10 Raymond C A, Stock J M, Cande S C. Fast Paleogene motion of the Pacific hotspots from revised global plate circuit constraints. In: Richards M A, Gordon R G, van der Hilst R D, eds. *History and Dynamics of Plate Motions*. Geophys Monogr, 2000, 121: 359~375
- 11 Foulger G R, Vinnik L P, Du Z. The mantle potential temperature anomaly beneath Iceland is insufficient for a thermal plume. *EOS Trans AGU, Fall Meet Suppl, Abstract*, 2004, 85: V51B-0569
- 12 Vinnik L P, Du Z, Foulger G R. Seismic boundaries in the mantle beneath Iceland: A new constraint on temperature. *Geophy J Int*, 2005, 160: 533~538[DOI]
- 13 Herzberg C. How Many Hotspots are on Present-day Earth, and are all Plumes hot? *EOS Trans AGU, Fall Meet Suppl, Abstract*, 2004, 85: V43G-04
- 14 Foulger G R. <http://www.mantleplumes.org/PlumesOrNot/PlumesOrNotOrals.html>, 2004
- 15 Ingle S, Coffin M F. Impact origin for the greater Ontong Java Plateau? *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 218: 123~134[DOI]
- 16 Czamanske G K. Demise of the Siberian plume: Paleogeographic and paleotectonic reconstruction from the prevolcanic and volcanic records, north-central Siberia. *Int Geol Rev*, 1998, 40: 95~115
- 17 Czamanske G K, Fedorenko V A. <http://www.mantleplumes.org/Siberia.html>, 2003
- 18 He B, Xu Y G, Ching S L, et al. Sedimentary evidence for rapid crustal doming prior to the eruption of the Emeishan floods basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 213: 319~405
- 19 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]
- 20 McKenzie D P, Weiss N. Speculations on the thermal and tectonic history of the Earth. *Geophys J R Astr So.*, 1975, 42: 131~174
- 21 Ritsema J, van Heijst H J, Woodhouse J H. Complex shear wave velocity structure imaged beneath Africa and Iceland. *Science*, 1999, 286: 1925~1928[DOI]

- 22 Ishii M, Tromp J. Constraining large-scale mantle heterogeneity using mantle and inner-core sensitive normal modes. *Phys Earth Planet Inter*, 2004, 146: 113~124[DOI]
- 23 Trampert J, Deschamps F, Resovsky J, et al. Probabilistic tomography maps chemical heterogeneities throughout the lower mantle. *Science*, 2004, 306L: 853~856
- 24 Hofmeister A M, Criss R E. Heat flow and mantle convection in the triaxial Earth. In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al, eds. *Plates, Plumes & Paradigms*. Geol Soc Amer, Spec Paper, 2005 (in press)
- 25 Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 99: 66~78[DOI]
- 26 Foulger G R. <http://www.mantleplumes.org/DefinitionOfAPlume.html>, 2004
- 27 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]
- 28 Bijwaard H, Spakman W. Tomographic evidence for a narrow whole mantle plume below Iceland. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 166: 121~126[DOI]
- 29 Shen Y, Solomon S C, Bjarnason I T, et al. Seismic evidence for a tilted mantle plume and north-south mantle flow beneath Iceland. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 197: 261~272[DOI]
- 30 Helmberger D V, Wen L, Ding X. Seismic evidence that the source of the Iceland hotspot lies at the core-mantle boundary. *Nature*, 1998, 396: 251~255[DOI]
- 31 White R S, Morton A C. The Iceland Plume and Its Influence on the Evolution of the North Atlantic. *J Geol Soc*, 1995, 152: 933~933
- 32 Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, et al. Finite frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, 2004, 303: 338~343[DOI]
- 33 White R S, Bown J W, Smallwood J R. The temperature of the Iceland plume and origin of outward-propagating V-shaped ridges. *J Geol Soc*, 1995, 152: 1039~1045
- 34 Tejada M L G, Mahoney J J, Castillo P R, et al. Pin-pricking the elephant: Evidence on the origin of the Ontong Java Plateau from Pb-Sr-Hf-Nd isotopic characteristics of ODP Leg 192 basalts. In: Fitton G, Mahoney J, Wallace P, et al, eds. *Origin and Evolution of the Ontong Java Plateau*. Geol Soc Lond, Spec Publ, 2004, 229: 133~150
- 35 Fitton J G, Mahoney J J, Wallace P J, et al. Origin and evolution of the Ontong Java Plateau: Introduction. In: Fitton J G, Mahoney J J, Wallace P J, et al, eds. *Origin and Evolution of the Ontong Java Plateau*. Geol Soc Lond Spec Publ, 2004, 229: 1~8
- 36 Tarduno J A, Cottrell R D. Paleomagnetic evidence for motion of the Hawaiian hotspot during formation of the Emperor seamounts. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 153: 171~180[DOI]
- 37 Vink G E. A hotspot model for Iceland and the Voring Plateau. *J Geophys Res*, 1984, 89: 9949~9959
- 38 Burov E, Guillou-Frottier L, Burov E, et al. The plume head-continental lithosphere interaction using a tectonically realistic formulation for the lithosphere. *Geophys J Int*, 2005 (in press)
- 39 Schilling J G. Iceland mantle plume. *Nature*, 1973, 243: 141~143
- 40 King S D, Anderson D L. Edge-driven convection. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 160: 289~296[DOI]
- 41 Foulger G R. <http://www.mantleplumes.org/PTProcesses.html>, 2004
- 42 Beutel E K. Stress induced seamount formation at ridge-transform-intersections. In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al, eds. *Plates, Plumes & Paradigms*. Geol Soc Amer, Spec Paper, 2005 (in press)
- 43 Georgen J E, Lin J. Three-dimensional passive flow and temperature structure beneath oceanic ridge-ridge-ridge triple junctions. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 204: 115~132[DOI]
- 44 Cordery M J, Davies G F, Campbell I H. Genesis of flood basalts from eclogite-bearing mantle plumes. *J Geophys Res*, 1997, 102: 20179~20197[DOI]
- 45 McKenzie D. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 95: 53~72[DOI]
- 46 Cheadle M J, Elliott M T, McKenzie D. Percolation threshold and permeability of crystallizing igneous rocks: The importance of textural equilibrium. *Geology*, 2004, 32: 757~760[DOI]
- 47 Elkins-Tanton L T. Continental magmatism caused by lithospheric delamination. In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al, eds. *Plates, Plumes & Paradigms*. Geol Soc Amer, Spec Paper, 2005 (in press)
- 48 Keskin M. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 8046~8049[DOI]
- 49 Corti G, van Wijk J W, Bonini M, et al. Transition from continental break-up to punctiform seafloor spreading: How fast, symmetric and magmatic. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1604~1607[DOI]
- 50 Jones A P, Wunemann K, Price D. Impact volcanism as a possible origin for the Ontong Java Plateau (OJP). In: Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al, eds. *Plates, Plumes & Paradigms*. Geol Soc Amer, Spec Paper, 2005 (in press)

(2005-01-18 收稿, 2005-06-09 收修改稿)