

# Theory of Mantle Plume and Seafloor Hydrothermal Activity

Wang Guohuai<sup>1\*</sup> Li Chuanshun<sup>2,3</sup> Zhang Haitao<sup>2</sup> Du Dewen<sup>2,3</sup>

Gong Shaojun<sup>1</sup> Li Wen<sup>1</sup> Liang Hao<sup>1</sup>

1. Marine Geological Survey Center of Tianjin, Tianjin;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao;

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao

**Abstract:** The appearance of mantle plume hypothesis is a significant milestone in the history of geodynamics research, which has been an important supplement to the theory of plate tectonics. However, with the development of earth science, debates on whether the mantle plume theory is credible has been more intense. Based on the achievements of mantle plume research in geochemistry, geophysics and geodynamic fields, this study summarizes 4 alternative geological models to substitute the present mantle plume model. Meanwhile, the couplings between mantle plume and hydrothermal activities in mid-ocean ridges and large low shear wave velocity provinces provide a new way to research seafloor hydrothermal activity.

**Key words:** Mantle plume; Hydrothermal activity; Alternative model

Received: 2019-12-09 ; Accepted: 2019-12-23 ; Published: 2020-01-04

# 地幔柱学说与海底热液活动

王国槐<sup>1\*</sup> 李传顺<sup>2,3</sup> 张海桃<sup>2</sup> 杜德文<sup>2,3</sup> 宫少军<sup>1</sup>  
李 稳<sup>1</sup> 梁 昊<sup>1</sup>

1. 天津市海洋地质勘查中心, 天津;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛;

3. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛

邮箱: 18306485567@sina.cn

**摘 要:** 地幔柱学说的提出对板块构造理论做了重要补充, 是地球动力学研究历程中的重大里程碑。随着地球科学的不断发展, 地幔柱学说正面临着诸多质疑与挑战。本文在总结地幔柱学说目前在地球化学、地球物理、地球动力学等研究进展的基础上, 总结了4个可以替代地幔柱进行解释的地质模型。同时本文对全球热液喷口与大型剪切波低速省的分布特征进行研究, 结果指示洋中脊的海底热液活动区与地幔柱作用区存在明显耦合关系, 这也为海底热液活动的研究提供了新思路。

**关键词:** 地幔柱; 热液活动; 可替代模型

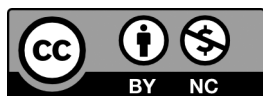
收稿日期: 2019-12-09; 录用日期: 2019-12-23; 发表日期: 2020-01-04

---

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## 1 引言

地幔柱学说诞生于1971年[1],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。Morgan[1]提出全球约有20个“热点”,并认为地球内部存在起源于核幔边界的热物质流(即地幔柱),呈细长柱状并缓慢上升,其在地表表现为“热点”,并进一步推测,地幔柱是由地幔对流体系中上升流构成的。但此时,由于热驱动和大粘度对比的问题无法解决,而无法进行结构模拟。20世纪90年代初,Griffiths和Campbell[2]成功解决了这两大问题,并建立了动态热柱的结构模型,认为热柱由两部分组成,分别为蘑菇状巨大的柱头和细长的柱尾。1991年,Larson[3]便提出了超级地幔柱概念,并认为在白垩纪中期,核幔边界的多个大规模地幔柱上涌,导致了地幔对流系统遭受了一次大规模的扰动。当超级地幔柱开始活动时,白垩纪长期正地磁极期也开始了。并且在超地幔柱活动期间,全球温度上升,海平面上升,洋底扩张和黑色页岩沉积速率显著加快。地幔柱学说提出以来,一直被广泛接受。由于地幔柱系统独立于板块构造系统,其驱动力在于地核的热释放[4],因此,地幔柱学说成为全球构造理论中不可缺少的内容,是板块构造理论的重要补充。目前,Torsvik[5]与Yoshida[6]等人分别提出了新的地幔对流及地幔柱的产生模型。

自诞生之日起,地幔柱学说就遭到了以Anderson[7][8][9][10][11]为首的“非地幔柱”学派的怀疑。直到2000年以来,几篇地震层析论文的发表[12][13][14],导致了关于地幔柱存在与否的大辩论日趋激烈。其争论的焦点在于以下几点:(1)许多现象与地幔柱最初的模型预测不相符合[8][15];(2)关于地幔柱的观测始终存在问题;(3)地幔的地球物理特征是否允许地幔柱的存在[8][16][17][18];(4)核幔边界的热能否支持地幔柱的存在[19][20][21][22][23][24];(5)地幔柱的存在尺度过于广泛[25];(6)“柱尾”的形态[26];(7)以及被人们所忽略的各种可能的模型[27][28][29][30][31][32][33][34][35]。

## 2 模型概念

“地幔柱”概念在研究中不断发展。Morgan [1] 在 1971 年提出地幔柱学说时, 认为热点源区物质对流上升, 其结构类似于“直达地幔深部的管子”, 并且设想其植根于地幔深部, 位置相对固定, 从而解释地表热点位置相对固定的特点。而 Geoffrey [36] 则提倡, 地幔柱是地幔中存在的由自身浮力驱动的地幔上涌, 其形式可以是直径约 1 000 km 的巨大圆柱状的“柱头”, 也可以是直径 100 ~ 200 km 的狭窄“柱尾”。之后随着地球物理的进步, French [37] 在 2014 年提出首个通过谱元法波形层析技术得到的全地幔径向非均质剪切速度结构模型 (SEMUCB-WM1), 为探测地幔结构及地幔柱的存在提供验证。

地幔柱最初的提出是为了解释“热点”现象, 其本质是从地幔深处向地表上涌的热物质流。伴随地幔柱的上升, 在地壳表现为区域性的隆升及热异常, 同时伴有岩石学、地球化学的异常。但随着观测及研究的深入, 人们逐渐发现无论是地幔柱自身属性还是伴随现象, 都出现许多理论与实际观察的偏差, 如岛链及无震海岭的年龄空间关系、地核热释放的量是否满足地幔柱的要求、地幔柱的相对位置等一系列问题。

## 3 地幔柱的研究手段

随着地幔柱研究的深入, 有越来越多的手段或方法用来检测和识别地幔柱, 因而地幔柱学说也逐渐被地学界奉为地幔柱理论。但到目前为止, 并没有明确一致的证据确定地幔柱的存在, 只能通过探测信息及海底调查数据, 对地幔柱的存在进行推断。

Morgan 首次提出地幔柱, 便是用于解释热点火山活动。之后人们也主要通过地壳的一些表现来判断地幔柱的存在, 如地表存在的区域性隆起及火山活动、岩石学、岩石或包体地球化学特征等。随着地球物理技术的发展, 人们逐渐采用地热、地震成像、数值模拟及计算等方法来进一步确定地幔柱的存在及分布。但是到目前为止, 这并不能终止地幔柱存在与否的大讨论, 地幔柱学说依然面临着巨大的挑战。

## 4 地幔柱学说面临的挑战

虽然地幔柱学说能够对板块理论进行完善和补充,但其在自身属性及对现象解释等方面依然存在挑战。下文将从地壳表现、地幔物理特征、地幔柱形态等8个方面进行介绍。

### 4.1 大洋岛链或无震海岭

Morgan 认为,热点是地幔柱的表层表现,从而解释 Hawaiian-Emperor, Tuamotu-Line, Austral-Gilbert-Marshall 等岛链, Walvis 山脉, Iceland-Faroe 等无震海岭的成因。其表现为海岭的年龄在空间上具有递变规律。但实际上,这一规律并不具有普适性,虽然在 Hawaiian-Emperor 海岭、Reunion 等得到较好印证,但在如冰岛和 Ascension 并未观察到,同时许多用来定义“热点轨迹”年龄的可靠性令人怀疑[15]。同时,部分学者认为,年龄线性变化的火山链与地幔柱无关,而是岩石圈断裂和引力释放导致的地幔物质发生减压熔融的结果[8][13][38][39]。

Gillian [16] 认为,“柱头”“柱尾”的缺失,是地幔柱存在的问题之一。类似夏威夷,一些地幔柱缺少“柱头”上升时形成的大火成岩省(LIPs);而类似 Ontong Java 海台,一些大火成岩省缺少板块运动导致的“柱尾”在地壳形成的线状火山链。但是,这一点是值得商榷的,因为地幔柱的“柱头”出现之后,“柱尾”可能并不会都在地表显示,而是伴随能量的减弱尾部未消散或分裂[40]。同时,由于板块运动,古老的“柱头”可能会发生破裂、俯冲等情况。Foulger 等人[13][14]也提出,必须详细检验缺少年龄递变趋势的火山链,因为这些递变趋势有可能被后期岩浆活动、构造活动等所改造,使其复杂化,难以辨别。徐义刚[41]也认为在大陆背景下,厚的岩石圈可以阻止尾部的熔融,阻碍“岛链”的形成;大火成岩省可能会在汇聚板块边缘发生俯冲;地幔柱-板块相互作用也会使头或尾消失;甚至可能存在“无头”的地幔柱。

Hawaiian-Emperor 岛链中的火山岛,出现在大约 1 km 高和 1 000 km 宽的海底隆起上,Geoffrey [36] 认为,这最可能的解释是该隆起是由板块下低密度物

质的浮力引起的,而并非是地壳加厚 [42] 或者岩石圈挤压造成 [43]。但是,造成隆起的从核-幔边界延伸至地表的热异常物质并没有通过地震观测到。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。

就已有的研究而言,大洋岛链及地壳隆起虽然存在多种解释,并且发现部分与地幔柱预测不相符的现象,但地幔柱学说仍然是解释解释这些现象的最好方法,其他的解释可能存在更多的问题。

## 4.2 地幔物理特性

Gilliam [16] 认为,地球内部的物理特性可能无法使得对流上涌从地幔深处上升到地表,并产生局部火山活动即“热点” [17],并且其产生的火山活动还能够具有规则性特征,如空间上数公里之大,时间上数百万年之久。因为在高压下,温度对密度的影响不大,因此地核导热不会导致受热物质热浮力的增加 [16]。但 Loper [44] 和 Davies [45] 等人的一些计算表明,一个新的地幔柱形成一个球状的冠,当柱头达到直径 400 km 时,便可能有足够的浮力脱离供给的热边界层,从地幔上升。同时,随着地幔柱上升,柱头随着热携带增长,达到 800 ~ 1 200 km 的直径。

地球内部物理特性显示,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。这种情况下可能无法产生普遍理解的细长的圆柱状地幔柱 [17]。而全地幔层析成像也显示地幔下部三分之一是以全球规模地质体为特征 [46]。这些地体是超级地幔柱还是在地幔缓慢形成的古老地体 [18]? 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。Gilliam [16] 认为,我们并不能确定在核幔边界产生的地幔柱能否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。

而且,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,热地幔柱在地球中可能根本不存在的结论将不可避免。

Anderson [8] 认为,地幔柱学说最大的问题在于其关于物理学和热力学性质不切实际的假设:正常的背景温度、熔融温度和上地幔的均匀性。在地幔柱的计算中,其将上地幔假定为冷的、干的,并且低于固相线,以及在给定深度基本相同的等温线,同时,将大体积的岩浆假定为深部而来的局部高温的反映,而不是岩浆的生产力、上地幔温度熔点或焦点的差异。Anderson [7] 和 Korenaga [47] 等人的研究表明,地幔的平均位势温度更可能接近 1 350 °C 而不是 1 200 °C,熔点可能低于干的地幔岩。那么正常的上地幔主体部分就已经接近或超过了固相线,当其发生正常的上下波动时,就能够产生局部的岩浆熔融,而不需要地幔柱的存在。前人提出的地幔柱头部物质 [48] 长距离的横向移动,是对于深部地幔柱假设的调整,从而使其能够对于浅的、分散式的热和岩浆源进行解释,但由于软流圈的低粘度,其可以不依靠地幔柱而向薄的岩石圈的下部流动。由于地幔柱是点源,其需要大量的横向运动来为地幔柱产生的普遍的火山作用提供能量和物质。而软流圈普遍的部分熔融则是现成的岩浆来源,仅仅需要岩石圈伸展产生局部的岩浆作用。并且这种地幔物质的化学不均一性,不需要来自核幔边界或者任何热边界层。

地幔内部的复杂性是由地幔的不均一性造成的,而这也使得我们无法准确地推测模拟地幔内部的各种过程。地幔的物理特性能否支持地幔柱的存在以及地幔内部过程是否需要地幔柱的存在都是需要讨论的问题,而这又需要对地幔性质正确的假设,最重要的一点便是对于地幔性质不均匀模型的使用。

### 4.3 地球化学证据

一些大火成岩省具有异常高的  $3\text{He}/4\text{He}$  比值,地球化学家认为这是地幔柱物质来自下地幔的有力证据 [41]。Foulger [13] 认为这是有缺陷的,因为它预测下地幔的  $3\text{He}$  与富气体的球粒陨石一样高,其推论与高温行星增生模型以及观察到的地球化学种类挥发的亏损不如 He 不相符合。一种可替代的解释是,

高的  $3\text{He}/4\text{He}$  是由于  $4\text{He}$  的亏损,其来自上地幔的低  $\text{U}+\text{Th}$  区域,其由于放射性  $4\text{He}$  添加的低速率而自地球存在的早期就保存 [49] [50]。而 Anderson [7] 认为高  $3\text{He}/4\text{He}$  比值指示下地幔的观点缺乏足够的证据,因为这是根据高  $3\text{He}/4\text{He}$  比值是在黄石、夏威夷和冰岛等与地幔柱有关的大火成岩省中发现的事实而推断的,因此,存在事实和假设之间的混淆。Anderson 指出高  $3\text{He}/4\text{He}$  比值可以来自上地幔 [7]。同时,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  $4\text{He}$  的污染或不完全取样。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,而在其他地幔柱中不存在,这被解释为不完全取样或基本上采不到所需的样品 [16]。但这样的解释显然是万金油式的,怎样的取样才能够取到合格的样品?这样按照采样的概率来对其进行证实显然是不符合现今要求的,我们可能更需要加强对其原理方面的研究,从而进行更好的解释,提出更好的验证方法。

#### 4.4 地核热能释放

如果地幔柱起源于核幔边界附近,则地幔柱携带的热量主要来自地核 [36]。那么,地幔柱携带的热应该小于地核所释放的热,同时,剩余的热应该足够维持地球的磁场以及地幔的对流,除非地核仅通过地幔柱这一种手段向外散失热量,而这显然是不可能的。所以可以对其进行独立的计算,并检验这种热是否平衡。

Davies [19] 和 Sleep [20] 等人,利用通过热点的岩浆活动来限定地幔柱尾部浮力上升的速率,认为若岩浆活动是岩石圈下轻的地幔物质上升造成的,则能够产生相当于地形测量学重量的浮力,通过这种方法计算的结果是地幔柱尾部达到岩石圈底部携带大约  $2.3 \text{ TW}$  ( $1 \times 10^{12} \text{ W}$ ) 热。而 Hill 等人 [21] 则通过大陆和大洋溢流玄武岩的证据认为上地幔地幔柱携带的热流大约为  $3.5 \text{ TW}$ 。若这两个数据都是真实的,那么上地幔地幔柱携带的多余的热量从何而来呢?由于地幔柱的热特性,其只能向外散失热量,而不能从地幔中获取更多的热量。而 Bunge 指出,地幔柱和周围地幔的热异常在深部会很大,这是因为在远离热

边界层的对流地幔具有近似绝热的地温梯度。这说明由热点活动估计的浮力流远比地幔底部地幔柱的浮力流小。他根据数值模拟的结果显示,核幔边界产生的地幔柱携带的热量可能高达  $6 \sim 9$  TW。Buffett [22] 估计地核维持地磁场所需要的能量大约为 0.1 TW 的量级,可能达到 0.5 TW,但是由于其有效能量转换不可能到达 100%,因此 Buffett 估计用于这维持的能量大约为  $2 \sim 4$  TW。而结合绝热地温梯度和在一定压力下铁的热传导估计的地核热流出大约为  $3.7 \sim 5.2$  TW [23]。显然地核释放的热量不足以支持偌大的地幔柱及地球的磁场。但也有人认为地核释放的热量能够达到  $15 \sim 20$  TW [22, 24]。就现有的计算来看,核幔边界所提供的热量不足以支撑起地幔柱的存在,而这种地幔柱是否存在的最基础的问题,迫切的需要地球物理及数值模拟方面的突破来进行支撑和验证。

## 4.5 热点的热异常

通常认为,“热点”是由地幔柱灼破地壳产生的,因此理论上热点地区的熔体应该来自于比其他地区熔体更热的源区,但 Gillian [16] 认为人们现在使用苦橄质玻璃指示更高温的熔体并不令人信服。并且在大多数其他“热点”地区,没有找到过热岩浆的岩石学证据,无法证明比周围温度更高的地幔流体的存在 [51] [52]。

按照地幔柱学说,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 [13] [14] [16]。同时,在冰岛、黄石等地区,其下部依然缺乏高温 [13] [26] (图 1、2)。图 1 中的冰岛下部,更像是浅部的地幔熔融形成的“热点”,而非地幔深部来源。但 He [53] 等人的地震研究显示,冰岛之下核幔边界以上至少 600 km 处存在一个蘑菇状的低速异常体,这是否可以作为地幔柱的来源仍需要讨论。

截面如图 2 所示,同时在地图和横截面上的紫色的点显示了位置及投影的方向。绿色的三角标记了热点的位置。参考模型对应 SEMUCB-WM1 模型的全

球一维平均 S 波速。色标选择着重强调下地幔结构, 导致了上地幔大量的饱和。虚线指示 410 km、660 km 和 1 000 km。注意到黄石热点之下明显异常的缺失。

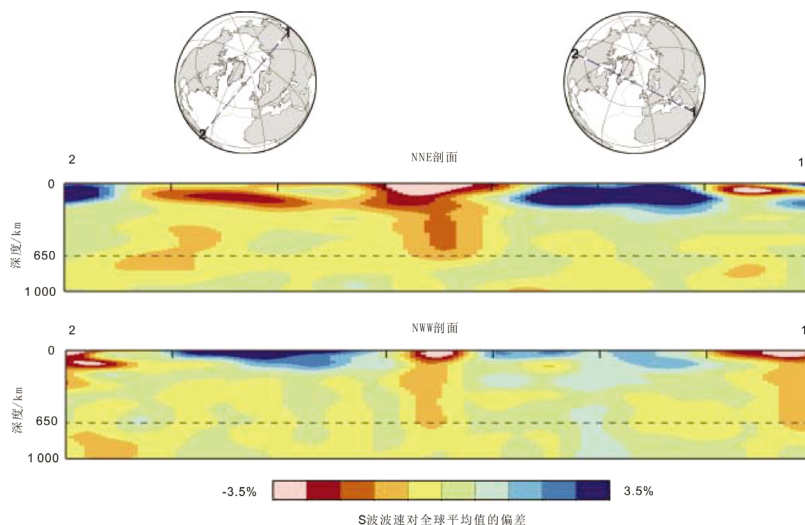


图 1 全地幔层析模型的横截面显示了冰岛之下 1 000 km 的地幔结构 ( 据文献 [ 13 ] 修改 )

Figure 1 Cross sections through a whole-mantle tomography model showing structure in the top 1 000 km of the mantle at Iceland

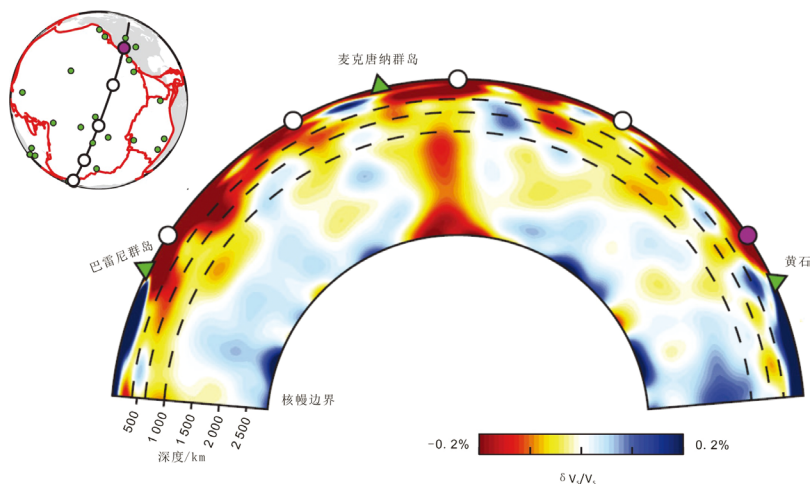


图 2 主要热点在 SEMUCB-WM1 模型下的 S 波速全地幔横截面( 据文献 [ 26 ] 修改 )

Figure 2 Whole-mantle depth cross-section of relative shear-velocity variations in model SEMUCB-WM1, in the vicinity of MacDonald hotspot

## 4.6 地幔柱相对位置

相对固定是 Morgan 最初提出地幔柱的基本假设之一，而当时人们普遍认为下地幔的粘滞度足够保持地幔柱的基本固定，这就进一步的印证了 Morgan 当时的观点。但之后 Peter、Clark 等人的计算表明，若允许下地幔对流，则粘滞度不能有保持地幔柱固定的程度那么高。之后观测表明 [26] [54] [55] [56]，地幔柱确实会发生偏移（图 3）。图 3 中 a、b 所示，在 1 000 km 处，地幔柱发生了明显的偏移。由于地幔柱本身相对于周边物质是更热、更轻的，其自身因素趋向垂直于地壳上涌，因此其发生偏移的原因是由外力造成的。部分学者将其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”。地幔柱虽然可能发源于核幔边界，但其位置并非是固定的，在上升过程中可能会发生移动。因此，地幔柱相对固定不应该作为地幔柱的基本假设之一。

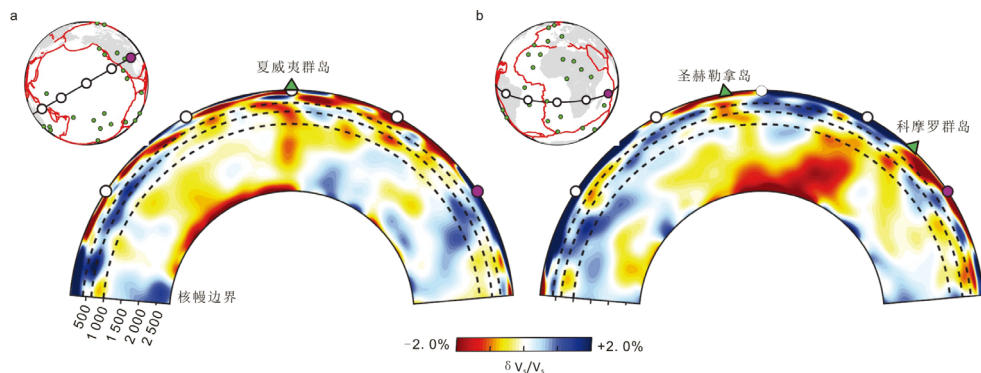


图 3 夏威夷、圣赫勒拿超级地幔柱 S 波速全地幔横截面（据文献 [26] 修改）

Figure 3 Hawaii, St Helena superplume

## 4.7 地幔柱的规模

Gillian [16] 认为，“地幔柱”一词现在被人们过于广泛的应用，Morgan 最初提出，是将其定义为地幔下部来源的，但现在只要位于火山区之下，人们总是将这种热称之为“地幔柱”。现在，地幔柱被认为几乎可以来源于地幔的任何深度。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 [25]。但这种任何尺度的“地幔柱”是不严谨的，因为在这种情况下，人们所认为的“地

幔柱”，可能会将地幔中热对流引起的热物质的上升也包含进去，而这种情况下的地幔柱将变得毫无意义。但是之后 Torsvik 和 Burke 等人 [5] 研究发现大型 S 波低速省（Large low-shear-wave-velocity provinces, LLSVP）的存在，显示了一种新的地幔柱存在的模式（图 4、5）。他们认为核幔边界有两个 LLSVP，分别是 Tuzo 和 Jason，地幔柱在其边缘地幔柱产生带（PGZs）产生，但具体位置会发生变化，该边缘是由于地壳物质的输入引起 LLSVP 边缘物质的不稳定，而产生的物质再循环。

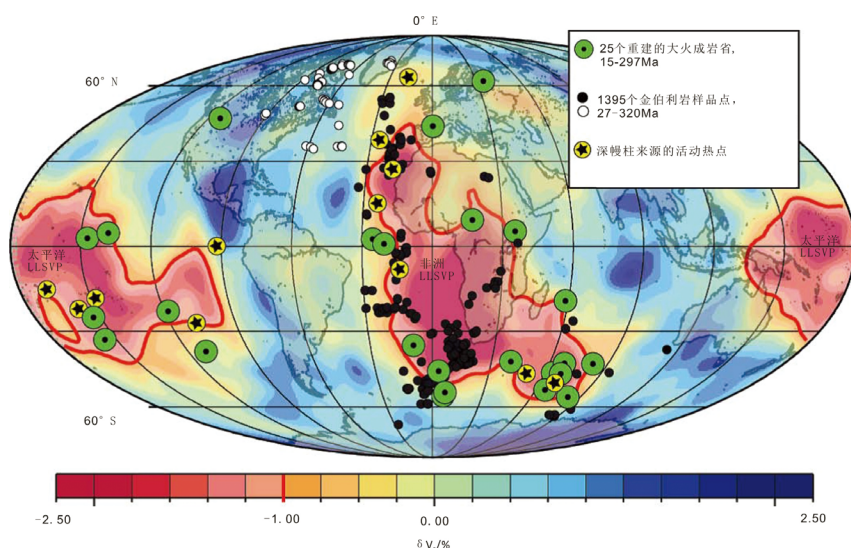


图 4 重建的大火成岩省和过去 320 My 的地幔基部的 S 波异常（据文献 [5] 修改）

Figure 4 Reconstructed large igneous provinces and kimberlites for the past 320 Myr with respect to shear-wave anomalies at the base of the mantle

注：深部地幔（SMEAN 全析模型的 2 800 km 处）受控于两个 LLSVP，分别位于非洲和太平洋之下。1% 低速等值线的轮廓（与 PGZ 接近）用粗的红线显示。现代大陆作为背景，来显示深部来源热点的分布规律和当今的 S 波异常（百分比  $\delta V_s$ ）。

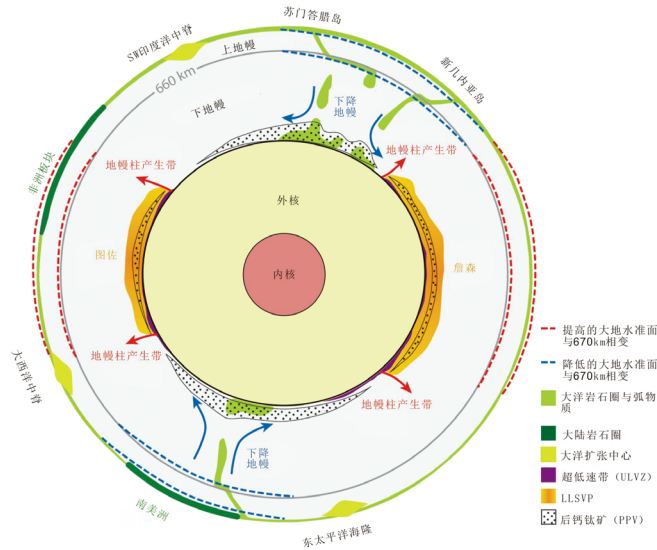


图 5 Tuzo 与 Jason 分别为非洲板块与太平洋板块之下的 LLSVP，PGZ 为 LLSVP 的边缘（据文献 [57] 修改）

Figure 5 A new plume shape– Tuzo and Jason are LLSVPs which are under the African plate and Pacific plate respectively. PGZ is the margin of LLSVP

4.8 地幔柱尾

Morgan 最初提出“地幔柱”时，认为其是细长柱状热物质流；之后，人们的实验和数值模拟也认为地幔柱有一个大的“柱头”和一个窄的“柱尾”；但是 French 等人 [26] 通过全地幔地震成像技术，认为许多突出的热点之下存在宽阔的近乎垂直的“管子”（图 2），而并非之前认为的窄的“柱尾”。在麦克唐纳群岛下部的层析成像显示，地幔柱的尾部状态类似于“锥”型，这可能代表了地幔柱在上升过程中的热量和物质的损失。

5 热液活动与地幔柱的关系

热液活动需要足够的热源，通常情况下人们将注意力放在相对较浅的洋中脊及弧后的地幔楔活动等热源，但地幔柱的存在，为热液活动的热源提供了更多的可能性。

通过对比图4和图6,可以观察到:北大西洋热液活动区与非洲LLSVP左侧的剪切速度异常为零有明显的线性重合,南大西洋热液活动区与非洲LLSVP左侧的剪切速度异常为1%有所重合;东南印度洋中脊及其北侧的热液活动区与非洲LLSVP右侧的剪切速度异常为0有明显的线性重合;西南印度洋中脊的热液活动区位于非洲LLSVP内部;东太平洋海隆、Ontong Java海台南侧的一系列热液活动区位于太平洋LLSVP的内部;与LLSVP范围完全无关的热液活动区仅占一小部分。观察显示,热液活动,尤其是洋中脊热液活动可能与地幔柱有关。

之前人们对于热液活动热源的认识,仅限于相对表层的热源,而没有考虑是否有更加深部的热源作为可能。对比显示,热液活动与地幔深部2 800 km处的LLSVP相重合显然不是偶然,可能会有更深层次的联系。如果将两个大的LLSVP边缘上涌的地幔柱作为热源,洋中脊及其上热液活动则是地幔柱在地壳热的释放的表现。在核幔边界处存在两个大型剪切波低速省[5],由于其边缘地壳冷的物质的输入,导致其边缘产生物质的不稳定,从而引起热物质的上升形成大型的线性地幔热物质流[57];其到达地壳形成地壳的线性隆起并发生破裂,产生洋中脊;线性的地幔热物质流是不均匀的,在洋中脊产生了热的不均匀性,导致洋中脊扩张速率的不同,造成大量断裂,并在不同部位产生热液活动;由于其为线性的,在3维空间里表现为“幕”型,容易被地幔对流所影响,在一定程度上影响了洋中脊的空间移动,同时也导致了热液活动在LLSVP内部的出现。洋中脊的连续并不代表这种“幕”一定是连续的,就像一张纸上有线性密集的洞,用力扯会形成线性的撕裂相同。当不稳定的部位发生改变时,可能就造成了超级大陆的破裂,形成新的洋中脊。上述洋中脊与地幔柱的关系是可能存在的。因为Whittaker[58]等人研究显示,地幔柱与洋中脊的相互作用可以形成大火成岩省,而且地幔柱能够使得缓慢飘逸的洋中脊趋于稳定。如果地幔柱带来的物质减少,如“柱尾”,就可能产生正常的洋中脊,这也可以解释为什么部分大火成岩省不存在大洋岛链,其可能是洋中脊形成时由“柱头”形成的。

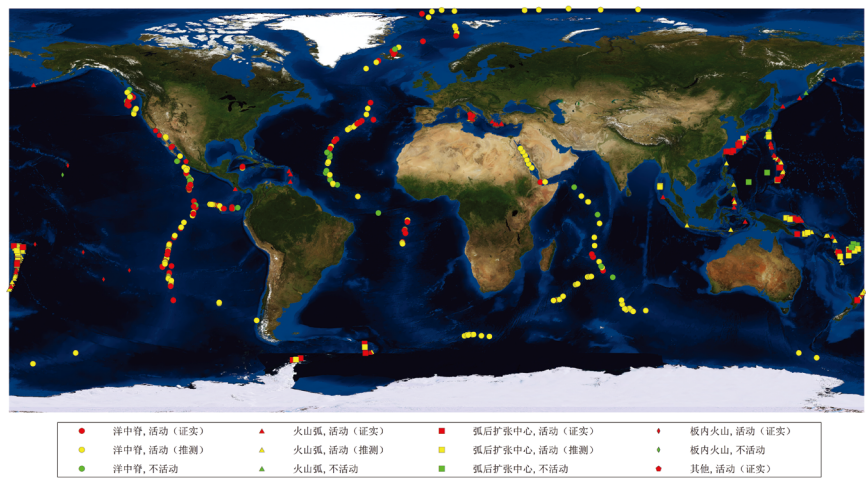


图 6 全球热液活动喷口区分布图 (据文献 [59] 修改)

Figure 6 Global distribution of hydrothermal vent fields

## 6 其他可替代的模型

由于地幔柱学说相对更好的解释了多种现象, 以及后来者大量而深入的研究, 人们迫切希望地幔柱学说能够解释板块理论所有无法解释的现象。但我们不能因此忽略其它可能存在的解释模型。下面将列举部分其他可替代地幔柱模型对各种现象进行相关解释的模型, 或可以替代地幔柱学说对部分现象进行解释, 或可以解释一些地幔柱仍然无法解释的现象。

### 6.1 构造运动模型

板块运动造成的从大陆裂解到板块俯冲的一系列阶段, 可以产生各种现象, 其可以用来替代“地幔柱”假说以解释这些现象。

数值模拟显示 [27], 大陆裂解造成的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, 而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。这也被部分学者认为是不具有年龄空间变化的岛链及无震海岭的可能成因。

板块继续运动, 使得冷的大陆岩石圈碰到热的大洋软流圈, King [28] 发现,

当其发生时,在大陆边缘就会形成小规模的对流,这会引起强烈的与时间有关的岩浆活动,在裂解大陆的边缘地区形成线状分布的火山,或者新的大洋,如北大西洋的某些位置会出现异常的岩浆活动。

大陆裂解之后,由于板块运动的复杂性,在新的大洋中往往会出现复杂的构造结合部,如三个洋脊结合部、洋脊与转换断层交汇处和微板块。Georgen [29] 和 Beutel [30] 等人的定量模拟发现,在这些位置下部的锥形区域内,可能出现大量熔融,造成熔体的大量集中。

板块俯冲之后,部分板块会残留在地幔中,而这就为岩浆熔融提供了来源,同时,可以支持大体量的岩浆喷发事件。相比于深部地幔柱学说,这种模型的物质循环更浅。而喷发的岩浆成分则主要取决于俯冲物质的年龄,若是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 [31]。

## 6.2 大规模熔体聚集模型

通常认为,在低程度部分熔融情况下熔体一旦形成就会从源区抽取 [32],但是对于 Ontong Java 海台如此大的体积来讲,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。同时, Elliott [33] 的工作显示,结构不平衡的岩石,如岩石圈下部处于积压状态的熔体,可能含有高达 11% 的熔体组分,从而在岩石圈底部大量聚集 [16]。该模型可以很好地解释冰岛、黄石等热点区域深部热异常的缺失。

## 6.3 大陆岩石圈拆沉和板片断离

地幔柱的上涌带来大量的物质输入,理论上会造成区域性地壳的隆起,但从某些地区观察到的大陆大火成岩省喷发前缺乏抬升现象 [60] [61]。而岩石圈拆沉能够对其进行解释。由于大陆岩石圈地幔密度较大,从而产生重力不稳定性或者对流减薄,发生拆沉,使得岩石圈地幔将沉入软流圈地幔中。之后在均衡作用下该地区发生沉降。这一过程不会带来地壳的抬升,而拆沉之后地幔物质的补充可以作为大火成岩省的源区。同时,数值模拟显示大量的岩浆活

动会伴随地表沉降的发生 [62]。一个类似的发现是板片断离,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 [34]。

## 6.4 陨石撞击

陨石撞击能够很好的解释短时限内大规模岩浆活动。Jones [35] 在 2005 年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。但是陨石能否穿透厚厚的海水,对大洋底造成明显的减压熔融,形成大火成岩省,还是有待商榷的。

## 7 总结

地幔柱学说无论在自身存在的属性还是伴生的现象方面,都存在无法解释或者相互矛盾的地方:部分大洋岛链或无震海岭的年龄在空间上不具有递变规律,地幔的物理特性可能不支持或者不需要地幔柱的存在,异常高的  $3\text{He}/4\text{He}$  同位素比值可能对地幔柱没有指示性意义,地核的热能释放可能不支持现有的地幔柱的热量的观察,热点下部可能没有地幔柱的存在,以及地幔柱的相对位置会发生移动,地幔柱规模的不清晰,地幔柱柱尾的形态特征可能与之前人们认识的不一致。地幔柱学说面临的挑战,为科学研究提供了一个方向,完善它,否定它,并在此过程中发展新知识。

本文结合一种新的地幔柱模型,提出了热液活动可能与地幔柱有关,为大家对于热液活动或者地幔柱的研究提供新的思路。本文也总结了一系列可能的地幔柱替代模型,其或可以替代地幔柱学说对部分现象进行解释,或可以解释一些地幔柱仍然无法解释的现象。

地幔柱学说仍然是现代地球科学系统中不可或缺的一部分,是板块理论的重要补充,我们仍需要对其进行更加深入的研究,但不局限于其中,不断提出新的模型。

## 基金项目

大西洋多金属硫化物成矿潜力与资源环境评价项目 (No.DY125-

12-R-01) ; 基于陆海统筹的海岸带“双评价”研究项目 (ML2019-HP-F162) ; 天津市海岸带现代沉积对环境变迁的指示研究项目 ; 海口江东新区综合地质调查海域综合物探项目。

## 参考文献

- [ 1 ] Morgan W J. Convection Plumes in the Lower Mantle [ J ] . Nature, 1971, 230 ( 5288 ) : 42-43. <https://doi.org/10.1038/230042a0>
- [ 2 ] Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle starting plumes [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 1990, 99 ( 1-2 ) : 66-78. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90071-5)
- [ 3 ] Larson R L. Geological consequences of superplumes [ J ] . Geology, 1991, 19 ( 10 ) : 963-966.  
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0963:GCOS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0963:GCOS>2.3.CO;2)
- [ 4 ] Cagney N, Crameri F, Newsome W H, et al. Constraining the source of mantle plumes [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2016, 435: 55-63.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.008>
- [ 5 ] Torsvik T H, Burke K, Steinberger B, et al. Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary [ J ] . Nature, 2010, 466 ( 7304 ) : 352-5.  
<https://doi.org/10.1038/nature09216>
- [ 6 ] Yoshida M, Yoshida M. A new conceptual model for whole mantle convection and the origin of hotspot plumes [ J ] . Journal of Geodynamics, 2014, 78 ( 3 ) : 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.04.004>
- [ 7 ] Anderson D L. The thermal state of the upper mantle; no role for mantle plumes [ J ] . Geophysical Research Letters, 2000, 27 ( 22 ) : 3623-3626. <https://doi.org/10.1029/2000GL011533>
- [ 8 ] Anderson D. Look again [ J ] . Astronomy & Geophysics, 2003, 44 ( 1 ) : 110-111. <https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2003.44110.x>
- [ 9 ] Anderson D L, Natland J H. Evidence for mantle plumes? [ J ] . Nature,

- 2007, 450 ( 7169 ) . <https://doi.org/10.1038/nature06376>
- [ 10 ] Anderson D L. Questioning mantle plumes [ J ] . Physics Today, 2012, 65 ( 10 ) : 10–12. <https://doi.org/10.1063/PT.3.1732>
- [ 11 ] Anderson D L. The persistent mantle plume myth [ J ] . Australian Journal of Earth Sciences, 2013, 60 ( 6–7 ) : 657–673.  
<https://doi.org/10.1080/08120099.2013.835283>
- [ 12 ] Christiansen R L, Foulger G R, Evans J R. Upper-mantle origin of the Yellowstone hotspot [ J ] . Geological Society of America Bulletin, 2002, 114 ( 10 ) : 1245–1256.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<1245:UMOOTY>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<1245:UMOOTY>2.0.CO;2)
- [ 13 ] Foulger G R. Plumes, or plate tectonic processes? [ J ] . Astronomy & Geophysics, 2002, 43 ( 43 ) : 6. 19–6. 24.  
<https://doi.org/10.1046/j.1468-4004.2002.43619.x>
- [ 14 ] Foulger G R, Natland J H. Geology. Is "hotspot" volcanism a consequence of plate tectonics? [ J ] . Science, 2003, 300 ( 5621 ) : 921–2.  
<https://doi.org/10.1126/science.1083376>
- [ 15 ] Baksi A K. <http://www.mantleplumes.org/ArAr.html.2004>.
- [ 16 ] Foulger G R. 地幔柱: 为什么现在怀疑? [ J ] . 科学通报, 2005, 50 ( 17 ) : 1814–1819. <https://doi.org/10.1360/csb2005-50-17-1814>
- [ 17 ] 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 [ J ] . 科学通报, 2004, 49 ( 20 ) : 2025–2028.  
<https://doi.org/10.1360/csb2004-49-20-2025>
- [ 18 ] Trampert J, Deschamps F, Resovsky J, et al. Probabilistic tomography maps chemical heterogeneities throughout the lower mantle [ J ] . Science, 2004, 306 ( 5697 ) : 853–6. <https://doi.org/10.1126/science.1101996>
- [ 19 ] Davies G F. Ocean bathymetry and mantle convection 1. large-scale flow and hotspots [ J ] . Journal of Geophysical Research, 1988, 93 ( 93 ) : 10467–10480.

- <https://doi.org/10.1029/JB093iB09p10467>
- [ 20 ] Sleep N H. Hotspots and mantle plumes: Some phenomenology [ J ] . Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1990, 95: 6715–6736.
- <https://doi.org/10.1029/JB095iB05p06715>
- [ 21 ] Hill R I, Campbell I H, Davies G F, et al. Mantle plumes and continental tectonics [ J ] . Science, 1992, 256 ( 5054 ) : 186–193.
- <https://doi.org/10.1126/science.256.5054.186>
- [ 22 ] Buffett B A. Estimates of heat flow in the deep mantle based on the power requirements for the geodynamo [ J ] . Geophysical Research Letters, 2002, 29 ( 29 ) : 71–74. <https://doi.org/10.1029/2001GL014649>
- [ 23 ] Stanislav I B, Paul H R. Equations governing convection in earth's core and the geodynamo [ J ] . Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 1995, 79 ( 1 ) : 1–97. <https://doi.org/10.1080/03091929508228992>
- [ 24 ] Nimmo F, Price G D, Brodholt J, et al. The influence of potassium on core and geodynamo evolution [ J ] . Geophysical Journal International, 2004, 156 ( 2 ) : 363–376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2003.02157.x>
- [ 25 ] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2003, 205 ( 3–4 ) : 295–308. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01048-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8)
- [ 26 ] French S W, Romanowicz B. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots [ J ] . Nature, 2015, 525 ( 7567 ) : 95–9. <https://doi.org/10.1038/nature14876>
- [ 27 ] Giacomo C, Jolante V W, Marco B, et al. Transition from continental break-up to punctiform seafloor spreading: How fast, symmetric and magmatic [ J ] . Geophysical Research Letters, 2003, 30 ( 12 ) : 1604. <https://doi.org/10.1029/2003GL017374>
- [ 28 ] King S D, Anderson D L. Edge-driven convection [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 1998, 160 ( 3–4 ) : 289–296.

[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00089-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00089-2)

- [ 29 ] Geogren J E, Lin J. Three-dimensional passive flow and temperature structure beneath oceanic ridge-ridge-ridge triple junctions [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2002, 204 ( 1-2 ) : 115-132.  
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00953-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00953-6)
- [ 30 ] Beutel E K. Stress-induced seamount formation at ridge-transform intersections [ J ] . Special Paper of the Geological Society of America, 2005, 388: 581-593. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.581>
- [ 31 ] Foulger G R, Vinnik L P, Du Z. The mantle potential temperature anomaly beneath Iceland is insufficient for a thermal plume [ J ] . 2004.
- [ 32 ] Dan M K. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 1989, 95 ( 1-2 ) : 53-72. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90167-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90167-2)
- [ 33 ] Elliott M T, Mckenzie D, Cheadle M J. Percolation threshold and permeability of crystallizing igneous rocks: The importance of textural equilibrium [ J ] . Geology, 2004, 32 ( 9 ) : 757-760. <https://doi.org/10.1130/G20495.1>
- [ 34 ] Keskin, Mehmet. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction - accretion complex: An alternative model for collision - related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey [ J ] . Geophysical Research Letters, 2003, 30 ( 24 ) : TUR 9-1. <https://doi.org/10.1029/2003GL018019>
- [ 35 ] Jones A P, Kai W, Price G D. Modeling impact volcanism as a possible origin for the Ontong Java Plateau [ J ] . Special Paper of the Geological Society of America, 2005, 388: 711-720. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.711>
- [ 36 ] Geoffrey F D. 地幔柱存在的依据 [ J ] . 科学通报, 2005, 50 ( 17 ) : 1801-1813. <https://doi.org/10.1360/csb2005-50-17-1801>
- [ 37 ] French S W, Romanowicz B A. Whole-mantle radially anisotropic shear velocity structure from spectral-element waveform tomography [ J ] . Geophysical Journal International, 2014, 199 ( 3 ) : 1303-1327.

- <https://doi.org/10.1093/gji/ggu334>
- [ 38 ] Smith A D, Lewis C. The planet beyond the plume hypothesis [ J ] . Earth-Science Reviews, 1999, 48 ( 3 ) : 135–182.  
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(99\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(99)00049-5)
- [ 39 ] Anderson D L. Scoring hotspots: The plume and plate paradigms [ J ] . Special Paper of the Geological Society of America, 2005, 388.  
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.31>
- [ 40 ] Whitehead J A. Instabilities of fluid conduits in a flowing earth – are plates lubricated by the asthenosphere? [ J ] . Geophysical Journal International, 1982, 70 ( 2 ) : 415–433. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb04975.x>
- [ 41 ] 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 等. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说 [ J ] . 地学前缘, 2007, 14 ( 2 ) .
- [ 42 ] Watts A B, Brink U S T. Crustal Structure, Flexure, and Subsidence History of the Hawaiian Islands [ J ] . Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1989, 94 ( B8 ) : 10473–10500. <https://doi.org/10.1029/JB094iB08p10473>
- [ 43 ] Turcotte D L, Schubert G. Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems [ M ] . New York: Wiley, 1982. 450.
- [ 44 ] Loper D E. Mantle plumes [ J ] . Tectonophysics, 1991, 187 ( 4 ) : 373–384. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90476-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90476-9)
- [ 45 ] Davies G F. Dynamic earth : plates, plumes and mantle convection [ M ] . London: Cambridge University Press, 1999.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511605802>
- [ 46 ] Ritsema J, Heijst H J V, Woodhouse J H. Complex Shear Wave Velocity Structure Imaged Beneath Africa and Iceland [ J ] . Science, 1999, 286( 5446 ): 1925–1928. <https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1925>
- [ 47 ] Korenaga J, Kelemen P B. Major element heterogeneity in the mantle source of the North Atlantic igneous province [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2000, 184 ( 1 ) : 251–268.

[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00308-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00308-3)

- [ 48 ] Sleep N H. Lateral flow and ponding of starting plume material [ J ] . Journal of Geophysical Research, 1997, 102 ( 1021 ) : 10001-10012.

<https://doi.org/10.1029/97JB00551>

- [ 49 ] Anderson D L. Theory of the Earth [ C ] // Blackwell Scientific Publications, Brookline Village, MA. 1989: 237-238.

- [ 50 ] Foulger G R, Pearson D G. Is Iceland underlain by a plume in the lower mantle? Seismology and helium isotopes [ J ] . Geophysical Journal International, 2001, 145 ( 3 ) : F1-F5.

<https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01457.x>

- [ 51 ] Herzberg C. How Many Hotspots are on Present-day Earth, and are all Plumes hot? [ J ] . EOS Trans AGU, 2004, 85: V43G-04.

<https://doi.org/10.1029/2004EO430010>

- [ 52 ] Foulger G R. [http://www.mantleplumes.org/Plumes Or Not/Plumes Or Not Orals.html](http://www.mantleplumes.org/Plumes%20Or%20Not/Plumes%20Or%20Not%20Orals.html), 2004.

- [ 53 ] He Y, Wen L, Capdeville Y, et al. Seismic evidence for an Iceland thermo-chemical plume in the Earth's lowermost mantle [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2015, 417: 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.02.028>

- [ 54 ] Tarduno J A, Gee J. Large-scale motion between Pacific and Atlantic hotspots [ J ] . Nature, 1995, 378 ( 6556 ) : 477-480.

<https://doi.org/10.1038/378477a0>

- [ 55 ] Tarduno J A, Duncan R A, Scholl D W, et al. The Emperor Seamounts: southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle [ J ] . Science, 2003, 301 ( 5636 ) : 1064-9.

<https://doi.org/10.1126/science.1086442>

- [ 56 ] O'Neill C, Muller D, Steinberger B. Geodynamic implications of moving Indian Ocean hotspots [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2003, 215 ( 1-2 ) : 151-168. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00368-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00368-6)

- [ 57 ] Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al. Geological Society of America [ J ] . 2005 ( 388 ) : 881.
- [ 58 ] Whittaker J M, Afonso J C, Masterton S, et al. Long-term interaction between mid-ocean ridges and mantle plumes [ J ] . Nature Geoscience, 2015, 8 ( 6 ) : 25–2015. <https://doi.org/10.1038/ngeo2437>
- [ 59 ] 张海桃, 杨耀民, 梁娟娟, 等. 全球现代海底块状硫化物矿床资源量估计 [ J ] . 海洋地质与第四纪地质, 2014 ( 5 ) : 107–118.
- [ 60 ] Ingle S, Coffin M F. Impact origin for the greater Ontong Java Plateau? [ J ] . Earth & Planetary Science Letters, 2004, 218 ( 1 ) : 123–134.  
[https://doi.org/10.1016/S0012-821X \( 03 \) 00629-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00629-0)
- [ 61 ] Gerald K. Czamanske, A. B. Gurevitch, ValeriFedorenko, et al. Demise of the Siberian Plume: Paleogeographic and Paleotectonic Reconstruction from the Prevolcanic and Volcanic Record, North-Central Siberia [ J ] . International Geology Review, 1998, 40 ( 2 ) : 95–115.  
<https://doi.org/10.1080/00206819809465200>
- [ 62 ] Elkinstanton L T. Continental magmatism caused by lithospheric delamination [ J ] . 2005, 388: 449–461.  
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.449>