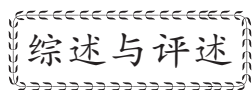


杜航, 王俊, 钱婷, 等. 地幔柱研究进展[J]. 地震科学进展, 2021, 51(6): 241-245, 251. doi:10.3969/j.issn.2096-7780.2021.06.001
Du Hang, Wang Jun, Qian Ting, et al. Research progress of mantle plume[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2021, 51(6): 241-245, 251. doi:10.3969/j.issn.2096-7780.2021.06.001



地幔柱研究进展*

杜 航^{1)*} 王 俊¹⁾ 钱 婷¹⁾ 王大伟¹⁾ 朱音杰²⁾

1) 江苏省地震局, 南京 210014

2) 河北省地震局, 石家庄 050022

摘要 地幔柱假设自提出以来, 在学术界争议很大, 对于其是否存在还没有统一答案。本文对地幔柱的起源做了详细阐述, 将质疑者的观点和地幔柱假设自身存在的问题进行罗列, 对地幔柱存在的证据进行汇总。从地球化学及岩石学方面对大陆溢流玄武岩和大洋岛玄武岩的分布进行研究, 了解地幔柱在地表的形态; 从大地构造学角度分析地幔柱如何使超大陆不断合并、分裂; 从地球物理学方面以夏威夷地幔柱、非洲超级地幔柱、海南地幔柱等典型区域阐述地幔柱研究的最新成果及地幔柱存在的证据。最后, 讨论了地幔柱的发展趋势。

关键词 地幔柱假设; 起源; 问题; 证据; 板块构造

中图分类号: P542 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2021)06-0241-05

doi: 10.3969/j.issn.2096-7780.2021.06.001

Research progress of mantle plume

Du Hang¹⁾, Wang Jun¹⁾, Qian Ting¹⁾, Wang Dawei¹⁾, Zhu Yinjie²⁾

1) Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China

2) Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050022, China

Abstract Since the mantle plume hypothesis was proposed, it has been controversial in academia, and there is no unified answer to its existence. In this paper, the origin of the mantle plume is elaborated in detail. The views of the doubters and the existing problems of the mantle plume hypothesis are listed, and the evidence of the existence of the mantle plume is summarized. The distribution of continental overflow basalts and oceanic island basalts is studied from the aspects of geochemistry and petrology to understand the morphology of mantle plume on the surface. From the perspective of geotectonics, this paper analyzes how the mantle plume makes the supercontinent merge and split continuously. From the aspect of geophysics, the latest achievements of mantle plume research and the evidence of the existence of mantle plume are described in terms of typical regions such as Hawaiian mantle plume, African super mantle plume and Hainan mantle plume. Finally, the development trend of mantle plumes is discussed.

Keywords mantle plume hypothesis; origin; problem; evidence; plate tectonics

* 收稿日期: 2021-03-11; 采用日期: 2021-05-18。

基金项目: 江苏省地震局青年科学基金(202102)资助。

* 通信作者: 杜航(1991-), 男, 助理工程师, 主要从事地震监测及噪声成像研究。E-mail: duh@mail.ustc.edu.cn。

引言

科学研究中,多数学科都可以在实验室进行严格精密的实验,而地球科学的实验室却是地球本身,科学家只能对地球本身的现象进行观察和解释。然而,地球却不会完全重复同一现象,这使得不同的科学家对结果存在不同的解释。以板块的扩散和聚拢为例,虽然全球的板块运动十分相似,但不完全相同。在此情况下,板块构造理论得以提出,该理论可以对相关现象进行很好的解释,如板块的运动、大多数地震活动和绝大多数火山活动。地球上大部分火山活动发生在板块边界、大洋中脊或俯冲带上,板块构造理论很好的解释了这类火山活动。然而,还有一类火山分布在板块内部,对此类火山板块构造理论则无法进行解释。

夏威夷岛位于太平洋板块内部,但火山活动却在此留下了一条长达 6 000 km 的小岛和海底山脉。1963 年,科学家对该处的火山岛链进行观察,提出了热点假设^[1]。该假设经过不断完善,发展成现在的地幔柱假设。由于重力分异使质量和能量同时向地心集中,产生地核热对流进而引起地幔柱活动。同时,由于地核的热对流使地核膨胀,引起地壳破裂,为地幔柱的上涌打开通道,而地壳差异性使地幔柱作用与地壳表现不同的形态。因此,地幔柱成为板块构造理论后的又一重要假说,可为研究地球动力学机制、超大陆的合并与裂解、全球性生物灭绝事件以及超大型矿床的形成机制等提供重要的理论支撑。

1 地幔柱理论发展

地球形成后,陆地呈现超级大陆的形式,而超级大陆不是固定不变的,呈现分裂和聚拢的交替往复^[2-4]。魏格纳在 1912 年提出“盘古大陆”一词用来解释大陆漂移^[5],而这一假说提出后一直深受质疑,直到 1970s 该假说才逐渐被广大学者所接受,并演变为今天的板块构造理论^[6]。板块构造理论的提出不仅证实了大陆漂移的存在,也为大陆漂移的动力来源提供了研究方向^[7]。板块构造理论虽然可以解释地球表面大部分现象,但是还有一部分现象无法对其解释。因此,板块构造理论诞生后不久,地幔柱理论则被提出,该理论可以很好的对板块构造理论无法解释的现象进行解释^[8-9]。

1963 年加拿大学者 Wilson^[1]对夏威夷附近火山岛屿的喷发时间顺序和排列顺序进行研究,提出了热点假说。1971 年 Morgan 对 Wilson 提出的热点进

行分析,认为热点是由一种起源于核幔边界的地幔柱缓慢生长到达地面的结果^[8]。一年后 Morgan 对地幔柱进行了解释说明,认为地幔柱生长于核幔边界处,该区域物质成固态向液态的转换状态,此时元素裂解释放大量热量,这些热物质由于密度原因不断抬升,直至岩石圈冷却向四周扩散,形成球状顶冠和狭窄尾柱的地幔柱^[10]。经过 20 年的讨论与发展,Griffiths 和 Campbell^[11]两位学者在 Morgan 的基础上,对地幔柱理论进行了完善,建立了动态地幔柱结构模型,认为地幔柱是由巨大的蘑菇状柱头和细长的热柱尾两部分组成,该模型解决了学者一直质疑的热驱动和大粘滞度两大问题(图 1)。Maruyama 根据地幔柱理论结合地球物理层析成像结果,于 1994 年给出了全球几个大的地幔柱地区,这些地区也成为后续人们研究地幔柱的核心地区。

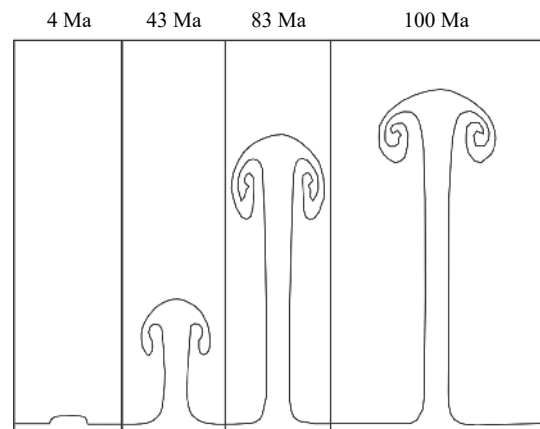


图 1 地幔柱生长过程,“柱头”和“柱尾”结构的形成和发展

Fig. 1 The growth process of mantle plume

近几年地幔柱理论不断得到发展,新的地幔柱不断被发现。全球和区域的地震层析成像结果显示,海南岛下方可能存在地幔柱,Liu 等^[12]利用卫星重力测量数据和地震面波频散数据进行联合反演和地球动力学模拟,发现中国东部至海南这一地震速度异常的线性走廊可能是由地幔柱和大陆岩石圈与较弱的下地壳相互作用而形成的,不仅从地震层析成像上证明了海南地幔柱的存在,还给出了该地幔柱的运动走向和运动速度。

2 地幔柱被质疑的主要问题

地幔柱理论虽然很好的解释了板块构造理论无法解释的问题,对其进行了很好的补充,但地幔柱理论仍然被一些科学家所质疑。主要因为地幔柱至今没有被地球物理层析成像所验证,且地幔柱建立的

理论基础也存在众多问题。

地幔柱建立的基础是Morgan提出的3个假设:①地幔柱起源于核幔边界。但是Christiansen等^[13]通过地球物理层析成像方法对在黄石地区地幔热异常进行研究,发现该地区热异常仅存在于地幔上部。②地表所观察的热点下方都有相对应的高温地幔。冰岛地区可以观察到存在热点,但在对该地区的热流值进行测量,发现该地区热流值与其他地区并未存在差别。③地幔柱是相对静止的。1963年Wilson以夏威夷附近火山岛屿为基础提出了热点假说,对该处火山链成60°夹角的现象解释为板块运动造成的。但有学者对这一地区板块构造进行重构,发现板块运动不足以造成此夹角,推测此夹角可能是由地幔柱自身运动造成的。

可见地幔柱假设构建的基础存在诸多矛盾,众多质疑者还从一些被地幔柱理论解释的地质现象中寻求非地幔柱的解释。大火成岩省可以在短时间内喷发大量岩浆,一些学者认为这一现象是因为地幔异常高温造成的,可以从侧面证明地幔柱理论的存在。

在。但是King和Anderson^[14]认为板块边缘和裂谷诱发的地幔对流也能喷发大量岩浆,Guimarães等^[15]认为大陆分裂可以促使软流层缓慢地向外排水从而变薄,也可以造成岩浆的喷发,Yaxley^[16]认为地幔处存在榴辉岩等低熔点物质,在低温状态下也能形成大规模的玄武岩省。

3 地幔柱存在的证据

地幔柱假设被质疑的主要原因在于,没有直接的地球物理学证据直观地观察到地幔柱的存在,但是越来越多的学科研究与地幔柱假设相一致。

3.1 地球化学与岩石学响应

大陆溢流玄武岩和大洋岛玄武岩(OIB)富含大离子不相容元素,是地幔柱活动的重要标识^[17]。大陆溢流玄武岩由于其熔融程度较高,分布于地幔柱核部、大火成岩省内带;大洋岛玄武岩由于其熔融程度较低,分布于远离地幔柱的大火成岩省外带(表1)。因此,对大陆溢流玄武岩和大洋岛玄武岩的分布进行研究可了解地幔柱在地表的形态。

表1 大陆溢流玄武岩和大洋岛玄武岩成因

Table 1 Origin of continental overflow basalts and oceanic island basalts

岩石名称	熔点	分布位置	成因
大陆溢流玄武岩	高	地幔柱核部、大火成岩省内带	地幔柱轴部熔融形成
大洋岛玄武岩	低	大火成岩省外带	地幔柱边缘熔融形成

3.2 大地构造响应

超大陆每200—500万年会完成合并到分裂的一个周期,该过程大陆漂移学说无法进行解释,目前众多学者认为,该现象与地幔对流有密切关系。超大陆形成后地幔柱也相应形成,由于地幔对流的作用使超大陆再次破裂,破裂的板块又向沉降流聚集重新形成超大陆^[18]。

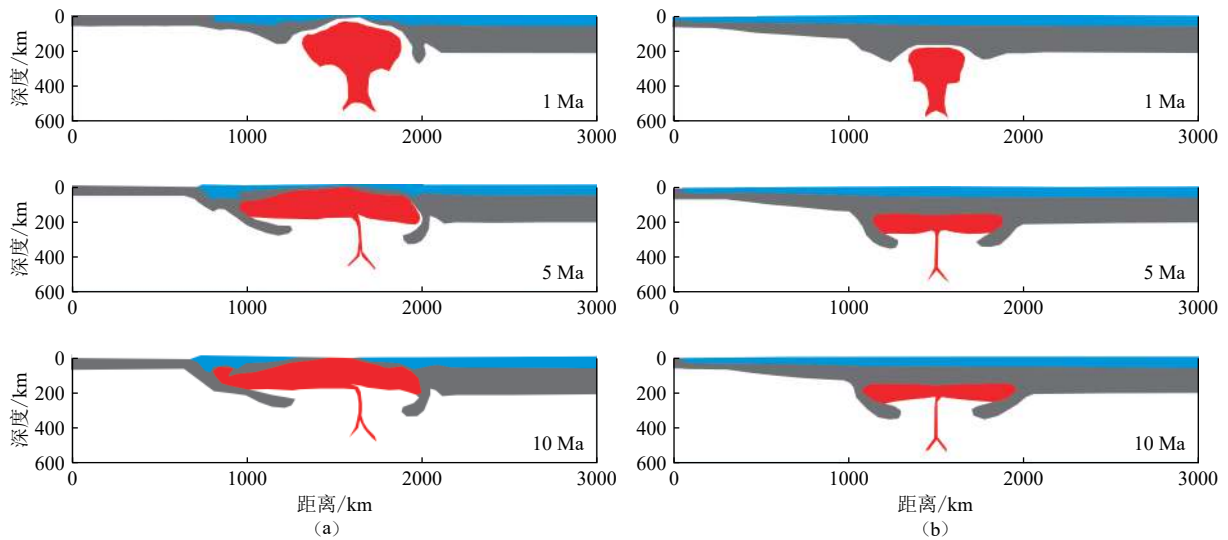
地幔柱与沉降流相互作用,使超大陆不断合并、分裂。地幔对流使超大陆破裂,产生大量板块堆积体,这些板块堆积区域形成沉降流,该沉降流又作用于堆积的板块使其分散。同时,沉降流作用的板块堆积体受元素裂变、相变及地核产生的热量作用,使堆积体熔融形成熔融体和地幔柱。地幔柱再次俯冲形成堆积体,在堆积体的集中区域形成沉降流,从而实现超大陆的合并。基于理论推理,François等^[19]通过实验模拟得出地幔柱对岩石圈的作用效果(图2)。

3.3 地球物理学响应

随着层析成像技术的发展,更加直观的证据被

发现。Zhao^[20]、French和Romanowicz^[21]通过地震层析成像技术对全球进行成像,成像结果表明垂直拉长的低速度异常区与上升的热地幔贯穿整个下地幔,这与Rostd等^[22]推测的在核幔边界处有上升地幔柱假设相一致。但随着深度的增加,层析成像的敏感性明显下降,与温度异常相关的地震异常在下地幔中也大量减少,阻碍了从上地幔通过过渡带进入下地幔的地震异常的跟踪,因此,地幔柱的确切尺寸和轨迹一直未确定^[23]。

夏威夷地幔柱是地幔柱研究的热点,Zhao^[24]利用地幔中多种震相(P、pP、PP和Pdiff等)获得了夏威夷地幔柱成像结果。Lei和Zhao^[25]在此基础上,通过增加地核震相(如PKiKP、PKKP等)获得了夏威夷地幔柱自核幔边界至地表连续的低波速异常。尽管Montelli等^[26]使用P、pP和PP等震相开展了有限频成像研究,获得了夏威夷地幔柱有意义的成像结果,但地幔底部的低波速异常有些还是不明显。因此,Agius等^[27]使用海底地震仪和地面台站联合对夏威夷



(a) 位于洋陆过渡带的地幔柱引起地幔下冲; (b) 地幔柱向较厚的岩石圈移动, 使地幔从地幔柱头部两端下冲
 (a) A mantle plume emplaced at the transition zone between oceanic and continental lithosphere triggers mantle downthrusting on the extremities of the plume; (b) A mantle plume initially shifted toward the thick continental lithosphere produces intra-continental mantle downthrusting at both ends of the flattened plume head

图2 数值实验所得地幔柱对岩石圈的作用图(改自 François^[19])

Fig. 2 Numerical experiments of plume-lithosphere interaction at passive continental margins (modified from François^[19])

夷下方 410 km 和 660 km 深度不连续面进行成像, 发现在 660 km 处存在一个双区域的上升地幔柱, 在 410 km 处汇聚成单一的地幔柱, 随着地幔柱进一步上升, 上层地幔的融化和流动导致低温物质下涌, 下沉到至少 410 km 深的地幔柱周围(图 3)。French 和 Romanowicz^[21]运用地震层析成像方法对太平洋中部地区进行三维视图构建, 可以清晰看出夏威夷下方的地幔柱形态, 且与相应的热点火山很好的对应。

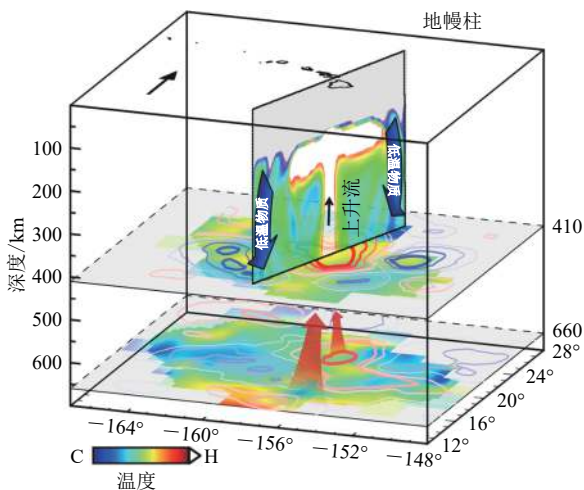


图3 夏威夷地幔柱动力学三维示意图(改自 Agius^[27])

Fig. 3 3-D schematic showing plume dynamics of Hawaii (modified from Agius^[27])

Nicolas 等^[28]使用波形层析成像方法对非洲下方的克拉通岩石圈进行成像, 通过成像看到了之前未被观测到的零星的大火成岩, 这些表明克拉通的根基曾经一度枯萎且被地幔柱掩盖。该研究证实了该区域地幔柱的存在, 并且得到了更加清晰的地幔柱形状。

我国海南地幔柱近些年不断被提出, Lei 等^[29-30]在 2009 年使用海南及邻区固定地震台站获得海南地幔柱的上地幔结构, 而在 2013 年将其与全球成像结果相结合, 较好地认识海南地幔柱的整体结构。Lebedev 和 Nolet^[31]利用地震层析成像技术对海南下方地幔柱进行研究, 发现海南下方存在 660 km 至地表浅部垂直状的低速柱状波速异常体, 与地幔柱形成、大小吻合。这些研究都支持了海南地幔柱存在的可能, 可以看出越来越多的地幔柱在被人们发现, 且证据也越来越直观和清晰。

4 结论

(1)地幔柱假设虽仍受质疑, 但地幔柱存在的证据越来越全面, 地震层析成像的结果也越来越清晰。虽然现在还没有直接证据表明地幔柱的存在, 但随着技术的发展, 众多学科的交融, 地幔柱真实的面孔将会被展现出来。

(2)地幔柱假设还存在相互矛盾的地方,但这些问题不能成为否定地幔柱存在的理由。目前地幔柱的真实情况还不清晰,因此,存在一些问题是正常的现象,随着越来越多证据的发现,地幔柱假设也将会逐步完善。

(3)地幔柱假设和板块构造理论存在相互矛盾的

地方,不能以此来否定地幔柱的存在。地球上的自然现象不会完全重复,用单一的理论很难解释所有的现象,地幔柱的存在解释了板块构造理论无法解释的现象。因此,后续研究应将两个理论相互融合,形成完善的地幔柱理论。

参考文献

- [1] Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian islands[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1963, 41(4): 863-870
- [2] Nance R D, Murphy J B, Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 4-29
- [3] Oriolo S, Oyhantçabal P, Wemmer K, et al. Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: Implications for the supercontinent cycle[J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(6): 1431-1445
- [4] Li Z X, Mitchell R N, Spencer C J, et al. Decoding Earth's rhythms: Modulation of supercontinent cycles by longer superocean episodes[J]. *Precambrian Research*, 2019, 323: 1-5
- [5] Wegener A. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane[J]. *Nature*, 1929, 124(3130): 649
- [6] Frankel H R. The Continental drift controversy, volume I: Wegener and the early debate[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012
- [7] Niu Y L. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives[J]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 2014, 10(1): 23-46
- [8] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. *Nature*, 1971, 230: 42-43
- [9] Jones T D, Davies D R, Campbell I H, et al. The concurrent emergence and causes of double volcanic hotspot tracks on the Pacific plate[J]. *Nature*, 2017, 545: 472-476
- [10] Morgan W J. Deep mantle convection plumes and plate motions[J]. *Aapg Bulletin*, 1972, 56(2): 203-213
- [11] Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle starting plumes[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, 99(1/2): 66-78
- [12] Liu H, Chen F, Leng W, et al. Crustal footprint of the Hainan plume beneath Southeast China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(4): 3065-3079
- [13] Christiansen R L, Foulger G R, Evans J R. Upper-mantle origin of the Yellowstone hotspot[J]. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 2002, 114(10): 1245-1256
- [14] King S D, Anderson D L. An alternative mechanism of flood basalt formation[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, 136(3/4): 269-279
- [15] Guimarães A R, Fitton J G, Kirstein L, et al. Contemporaneous intraplate magmatism on conjugate South Atlantic margins: A hotspot conundrum[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2020, 536: 116-147
- [16] Yaxley G M. Experimental study of the phase and melting relations of homogeneous basalt + peridotite mixtures and implications for the petrogenesis of flood basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, 139(3): 326-338
- [17] 李红阳, 牛树银, 王立峰, 等. 幔柱构造[M]. 北京: 地震出版社, 2002
Li Hongyang, Niu Shuyin, Wang Lifeng, et al. Plume tectonics[M]. Beijing: Seismological Press, 2002
- [18] Artemieva I M, Mooney W D. Discussion on the relations between cratonic lithosphere thickness, plate motions, and basal drag[J]. *Tectonophysics*, 2002, 358(1/2/3/4): 211-231
- [19] François T, Koptev A, Cloetingh S, et al. Plume-lithosphere interactions in rifted margin tectonic settings: Inferences from thermo-mechanical modeling[J]. *Tectonophysics*, 2018, 746: 138-154
- [20] Zhao D. Hotspots and mantle plumes[M]. Springer Japan, 2015
- [21] French S W, Romanowicz B. Broad plumes rooted at the base of the Earth's mantle beneath major hotspots[J]. *Nature*, 2015, 525: 95-99
- [22] Rost S, Garnero E J, Williams Q, et al. Seismological constraints on a possible plume root at the core-mantle boundary[J]. *Nature*, 2005, 435: 666-669
- [23] Tosi N, Yuen D A. Bent-shaped plumes and horizontal channel flow beneath the 660 km discontinuity[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, 312(3/4): 348-359