

论地幔柱构造与板块构造的矛盾性和相容性

高明¹, 陈亮^{1,2}, 孙勇^{1,2}

(1. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069; 2 西北大学 大陆动力学实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 为了揭示地幔柱构造与板块构造的内在关系, 针对地幔柱独特的地球物理和地球化学特征, 通过与板块构造的对比, 阐明了两者虽然在许多方面存在着矛盾, 但在诠释岩石圈的解体和俯冲带的演化过程中都发挥着重要的作用; 拆沉的冷板片聚集产生了超级冷地幔柱, 由此导致了超级热地幔柱, 冷热两个超级地幔柱的活动又控制了板块的运动和发展。由此可见, 地幔柱构造理论对板块构造理论起着重要的补充和拓展作用。

关键词: 地幔柱构造; 板块构造; 俯冲带; 超级地幔柱

中图分类号: TP541 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274X(2000)06-0514-05

地幔柱构造最初是Wilson在1963年以热点假说提出来的, 它的提出与板块构造的提出基本同期, 但限于当时的条件人们对于地幔柱的认识非常有限, 地球的表层构造因相对易于研究而板块构造得以迅速发展。进入20世纪90年代以来, 为了解决板块驱动力和大陆地质问题, 借助于三维地震层析、超高压矿物相变、地幔对流的实验和理论模拟以及全球范围地幔地球化学的研究, 人们对地幔的直接认识有了突破性进展, 于是热点理论得到了更新和发展, 地幔柱构造理论体系日臻成熟。

1 地幔柱特征

地幔柱在地表表现为高地形隆起, 当其上升至近地表时, 变成“蘑菇”状, 头部粗大而颈干细小。目前, 人们对地幔柱直径大小的观点不一, 估计量从十几千米至几千千米都有。板块构造主要研究的是地球的表层构造, 而地幔柱所涉及的深度和范围显然要大得多。地质学家们认为地幔柱起源于地幔的D层, D层从地核吸收热量, 使其具有较高的温度和较低的粘度, 因此地幔柱具有高热流、低速带的特征^[1~5]。在上升的地幔柱头部范围内, 近地表的减压熔融作用会导致产生大陆高原玄武岩和大洋玄武岩台地。在地幔柱颈干范围内, 上升的较热物质产生的

熔融作用会导致热点行迹。玄武岩和科马提岩都是由太古代地幔中上升的地幔柱形成的^[6,7]。进一步的研究表明, 玄武岩是地幔柱头部的产物, 而科马提岩是热轴熔融的产物。

地幔柱成因的岩石在岩石学上的特征, 主要是通过洋中脊玄武岩、俯冲带玄武岩等的对比而体现的。如夏威夷热点拉斑玄武岩(HT)与东太平洋洋隆拉斑玄武岩(MORB)在岩石学上的区别为: HT具有较高的锆初始比值; HT的不相容元素(包括稀土)含量高, 而MORB的含量低; 在球粒陨石标准化稀土配分图解上, HT呈轻稀土富集型, 而MORB呈轻稀土亏损型^[5]。在MgO含量相同的前提下, HT比MORB具有较低的CaO和Al₂O₃, 较高的全铁和TiO₂含量。在成因上: MORB是通过痕量元素亏损的二辉橄榄岩源区部分熔融而形成的, 残余组分主要是橄榄石和斜方辉石; HT则是通过未熔地幔与MORB残留地幔混合源区的部分熔融而形成的, 混合源区实质上已被地幔柱来源的霞石质流体、角闪石、少量磷灰石和含铁矿物交代^[5]。

2 地幔柱与板块构造

2.1 板块构造与地幔柱构造的不相容性

1994年, 以Maruyama为代表的研究群体发表

收稿日期: 1999-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(47932080); 西北大学科研基金资助项目(99NW 28)

作者简介: 高明(1975-), 男, 江苏盐城人, 西北大学硕士生, 主要从事岩石大地构造学研究。

了一系列跨学科综合性的研究成果^[3],从而提出了一种全新的构造观,即地幔柱构造。最近,他们又指出,地幔柱构造是继魏格纳提出大陆漂移学说和板块构造理论之后人类认识地球的第三次浪潮。但是,地幔柱构造理论自提出之日起,在许多观点上与板块构造理论就有很大分歧。这两者之间充斥着以下矛盾:

(1) 板块构造的驱动力是地幔的热损耗,而地幔柱构造似乎是由地核的热损失驱动的。

(2) 板块构造以存在转换断层、洋中脊、海沟及沿板块边缘发生岩浆作用为特点,而地幔柱构造以缺乏转换断层,存在地幔上隆、地幔下沉或海沟为特点,但海沟没有俯冲带火山作用。

(3) 板块是运动的,而地幔柱的显著特点之一是相对固定的,即其之间的相对移动速度很小,仅为板块移动速度的 $1/5$ 。

(4) 板块构造学说局限于威尔逊旋回模式,是由上、下地幔各自形成对流层的双层地幔对流模式,而地幔柱构造是深部过程不平衡导致的,幕式地穿透上下地幔的巨旋回全地幔对流模式。

(5) 板块构造拥护者用过渡带的地球动力学特征解释地幔的非均一性,而地幔柱构造理论用深部分异作用和交代作用、地幔柱活动、壳幔相互作用,以及上地幔软流圈部分的“枯竭”解释。

(6) 板块构造成矿理论仍局限于矿床内生与外生的传统分类框架内,地幔柱构造成矿理论范围已不再局限于地壳,而已深入到了地幔,甚至于核幔边界,而且成矿物质的输送在水平和垂直方向都有,从而构成内生内成、内生外成、外生内成、外生外成等丰富多采的成矿现象^[5]。

(7) 板块构造学说认为挥发性和大离子亲石元素来源于俯冲的岩石圈板块,而地幔柱构造拥护者则认为它们来自下地幔。

(8) 板块构造理论认为地质作用的周期性可用地幔对流系统的更替加以解释,地幔柱构造理论则认为这种周期性可以归结为地幔脉动。

由于板块构造理论只能对 200 km 深度的地表给予解释,对于深部地质现象无能为力,所以将底侵作用和拆沉作用引入板块构造中,扩大板块在纵向的作用范围。尽管地幔柱构造理论和板块构造理论在许多方面格格不入,存在着不相容性,但如果把两者结合起来,地幔柱构造理论可以作为板块构造理论有力的补充和拓展。

2.2 地幔柱与板块运动和解体

地幔柱的密度因热膨胀比周围地幔小而具有较强的上浮力,使上部物质发生变形,当其上侵到岩石圈底部或上地幔顶部时,地幔柱温度比周围的物质高得多。因此,它不仅能衍生出玄武岩浆,而且还会造成地壳上隆甚至裂开,但产生上述地幔柱构造现象要取决于地幔柱本身头部的大小和上覆岩石圈的厚薄。一般,普通的地幔柱不可能穿透(哪怕是正常厚度)大洋岩石圈,只有那些异常“强劲”的地幔柱才能做到,这就是为什么夏威夷链是太平洋北部地区见到的现今惟一活动的地幔柱的原因。当大洋岩石圈异常薄时(如太平洋南部),地幔柱的穿透相对容易。在岩石圈更厚的大陆区,绝大多数地幔柱一般都不会穿透大陆岩石圈,而只能在岩石圈下面聚集,地表效应仅仅表现为上升。因此,时代明显递变的地幔柱行迹在大陆很少见,但大陆上所有体积巨大的大陆溢流玄武岩都是由超级地幔柱形成的。

根据计算,假若有一个直径 2 500 km、与周围温差超过 100 的地幔柱头部上升 1 000 km,并在大陆岩石圈下面聚集的大规模地幔柱,却仍不能立刻产生足以形成一新裂谷所需的水平方向的作用力,地幔柱必须对上覆岩石圈施以加热和软化相结合的作用。由于岩石圈具有一定的厚度和缓慢的热传导,所以形成一全新的扩张脊一般要孕育 10~40 Ma。然而,如果地幔柱在一个老的扩张中心下上升,那么再次扩张所需要的时间要短得多,大约为几个百万年。若当地幔柱位于洋中脊附近时,地幔柱物质会尽量避开巨厚的岩石圈向洋中脊方向偏移,从而促进了洋中脊的扩张。所以,对典型 MORB 的岩石组分进行研究时,要全面考虑,看其中是否含有地幔柱的物质来源。如果地幔柱远离活动的扩张脊,那么扩张作用很可能被延迟或阻止。这可能是因为地幔柱上侵而形成过量地壳变形所造成的极大驱动力引起的。

另外,地幔柱的上侵力可作为缺乏软流圈地区的大陆板块漂移的动力。例如,1992 年巴西利用远震波研究巴西地盾时发现其下没有软流圈,因而岩石圈运动不可能受软流圈驱动和控制,但在该地盾之下却存在一个至少向下延伸 500~600 km 的已“石化”的地幔柱,其年龄为 130 Ma。正是这个古地幔柱的上侵力导致了巴西大陆的裂解、漂移和变形。

2.3 地幔柱与俯冲作用

由于俯冲带的复杂性和后期强烈的构造演化作用,而且深度超过 300 km 的热点用地面波层析摄

影图像无法检测出来,所以地幔柱在俯冲带的直接证据目前知之甚少。但是,俯冲作用的最大下插深度为 670 km,而地幔柱是从 2 900 km 深度的核幔边界产生的,所以其上升位置对上覆岩石圈没有选择性,在俯冲带地幔柱同样可以上侵并产生作用。同时,地幔柱在俯冲带的就位位置不同,因而其对俯冲过程的影响和作用效果也相应不同。由此笔者提出 5 种地幔柱与俯冲带相互作用的模式作为参考,从而对板块俯冲作用过程提供一些新的思路。

(1) 若洋壳向陆壳下俯冲,地幔柱在洋壳板底部发生就位,由于其加大了洋壳的净浮力,从而阻止了俯冲作用的进行,最后导致老的俯冲带活动停止。同时,洋壳由于受俯冲驱动力作用和本身的惯性,仍沿原方向运动,从而在远离老俯冲带的地幔柱边缘形成一新的俯冲带(见图 1A, a)。若地幔柱对洋壳的上托力大到使洋壳所受负浮力小于陆壳的负浮力时,陆壳有可能向洋壳下面俯冲。这可以解释板块构造理论所无法解释的在有些洋壳底部存在陆壳残片的现象^[8](见图 1A, b)。

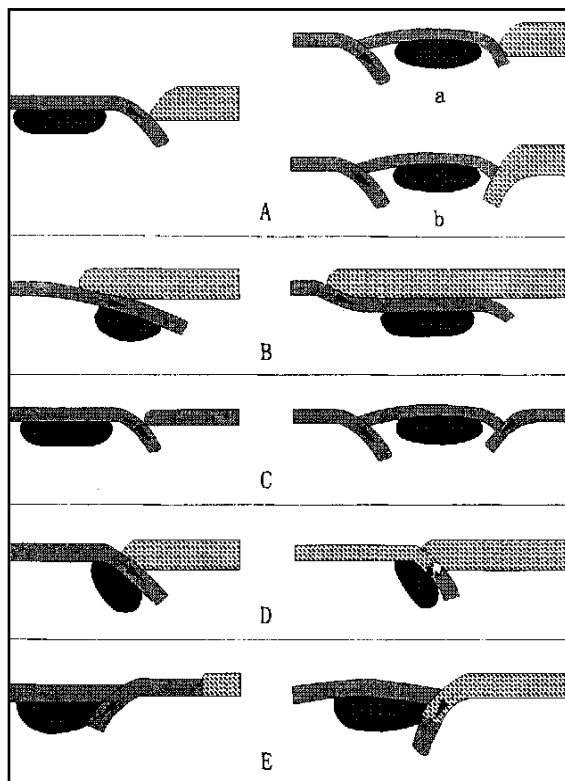


图 1 地幔柱与俯冲带相互作用的若干模式

Fig 1 Some conceptual models of the action between plumes and subduction belts
灰色区域代表洋壳 短线黑色区域代表地幔柱
短线白色区域代表陆壳

(2) 当洋壳向陆壳下面俯冲时,地幔柱在下插的洋壳下面聚集(见图 1B),由于受到地幔柱的上托和加热作用,洋壳的俯冲速度和力度逐渐变小,这时地幔柱上覆的板片俯冲角度会变得相当小。这种模式可以很好地解释美国西部拉拉米造山带向东推进的平缓岩板的形成原因。

(3) 当洋壳向洋壳下面俯冲时,地幔柱在洋壳下面聚集,这时除在远离老俯冲带的地幔柱边缘产生一新的俯冲带外,同时在老俯冲带俯冲的极性将发生反转,整体上形成双俯冲(见图 1C)。陆壳向陆壳俯冲的情况也与之相似。

(4) 地幔柱在洋壳俯冲转折部位聚集(见图 1D),洋壳在向陆壳俯冲的过程中,除受到地幔柱的上托力外,同时下插洋壳底部的加热熔融对洋壳俯冲起着润滑剂的作用。以上两种力的作用是相反的,前者让俯冲变得困难,后者有利于俯冲,但其作用的总效果要看谁占主导地位。当俯冲洋壳在一定深度相变为榴辉岩时,由于其温度低且密度大于软流圈,将发生拆沉作用,而地幔柱强大的上侵力对拆沉过程中板片的断开能给予很大帮助。如果拆沉下来的岩石碎片贴近或混入地幔柱,将随快速上升的地幔柱向地表折返。这也许可以成为一些超高压岩石快速冷却及折返机制的原因。

(5) 在洋壳与洋壳相互作用的俯冲带(如图 1E),由于地幔柱对上覆板片的上托力,使其与俯冲板片间的作用力减少(即俯冲板片所受阻力减少),因而俯冲将进行得很彻底,甚至部分大陆岩石圈也会随之俯冲下去,且俯冲板片的物质几乎未被刮下来。这可以解释为什么在许多缝合带地区却很难找到洋壳残片的证据。

当然,地幔柱与俯冲带相互作用的方式也许比我们想像的要复杂得多,以上只考虑了几种简单的模式,在俯冲带或许会出现两个甚至更多的地幔柱同时起作用,不过只要抓住地幔柱和俯冲带间的位置并套用以上模式综合分析,同样可以做出合理的解释。

2.4 超级地幔柱与板块构造

现今地球上存在着规模巨大的大陆溢流玄武岩和高原玄武岩,例如印度德干高原暗色岩、西伯利亚暗色岩、非洲卡鲁玄武岩,以及北美西部哥伦比亚高原玄武岩,对其形成的解释是由超级地幔柱造成的^[5,9,10]。Maruyama 等人指出,在地球内部除了存在超级热地幔柱外还存在超级冷地幔柱,认为超级冷地幔柱是板块向下俯冲至 670 km 深度时,由于

重力不稳定性导致岩石圈地幔、大陆下地壳或洋壳沉入下伏软流圈或地幔, 有的甚至能沉入到 2 900 km 的核幔边界。这种下沉的板片由于比周围物质的温度低, 因而形成了冷地幔柱。如果许多下沉的冷地幔柱汇聚将合并为一个超级冷地幔柱, 就会控制全球的地幔对流, 并且所有上覆岩石圈的运动方向都将指向这个超级冷地幔柱, 从而控制整个板块的运动(见图 2)。根据全球 P-波层析资料所作地质解释, 在南太平洋及非洲存在两大超级上升地幔柱, 而在亚洲存在一个超级下沉地幔柱, 大西洋中脊则是一个次一级的上升地幔柱, 且在南美的俯冲过程仍在继续之中。这一格局也许主宰了今日的全球构造^[5]。

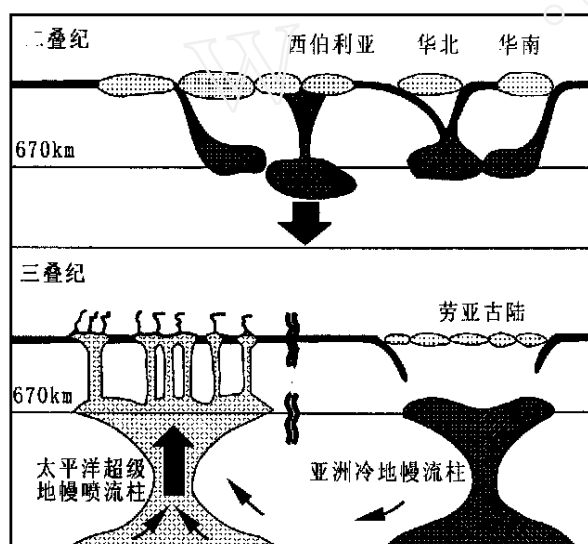


图 2 冷、热地幔柱及其与板块间的关系
(据 Maruyama 等, 1994)

Fig 2 The relationship among cold plumes and hot plumes and plates(after Maruyama, et al, 1994)

对地幔柱的分类和起源提出了一些新的见解。Maruyama, Fukao et al 等以地幔底界(2 900 km)、上地幔底界(670 km)和地壳底界(100 km)为限划分为一、二、三次热柱^[11]; Coffin 和 Eldholm 基于地球多层对流系统的模型, 提出源自 400 km, 670 km 和 CMB 的 3 类地幔柱^[12]。然而, 上述划分是以地震层析成像研究地球深部构造得出的, 只是现象上的归类, 并没有在动力机制上给出证据。笔者认为, 地幔柱从 D 层处产生后, 在其后上升过程中遇到地幔或岩石圈不均一时, 地幔柱整体会发生分叉产生次级地幔柱, 而这种分叉位置并不仅仅局限于 670, 400 和 100 km。同时, 地幔或岩石圈不均一性的差异, 会影响和决定着次级地幔柱的规模和大小。魏格纳所设想的, 在地史时期存在一个联合大陆和泛大洋组成的单一性海陆分布的时空结构状态, 而其可能存在的机制是否与超级冷、热地幔柱的控制有关? 同时, 先有板块的汇聚而后相继产生超级冷、热地幔柱, 还是先有超级地幔柱而后才驱动板块的运动? 先有超级冷地幔柱还是先有超级热地幔柱, 或者两者同时出现? 这些显然是地质学家们需要解决的, 类似先有鸡还是先有蛋的恼人的问题。

目前, 人们对地幔柱的研究主要还着重于热点链和规模巨大的大陆溢流玄武岩和高原玄武岩, 而对于复杂的俯冲带, 研究者通常则很谨慎。尽管还存在一些争论, 但中国的地质学家已经用地幔柱理论在青藏^[13, 14]、松潘—甘孜^[13, 14]和中国东部造山带^[4, 11, 15]等地区解释了一些板块构造理论所棘手的问题。今后, 在证明地幔柱的存在及其所发生作用的研究过程中, 加强地球化学和地球物理的研究, 从而提高检测技术的精度和深度将显得至关重要。

3 问题和思考

最近, 地质学家们对地幔柱展开了深入的研究,

参考文献:

- [1] ANDERSON D L. Chemical plumes in the mantle[J]. Geol Soc Am Bull, 1975, 86: 1 593-1 600
- [2] LOPER D E, STACEY F D. The dynamical and thermal structure of mantle plumes[J]. Phys Earth Planet Inter, 1983, 33: 304-317.
- [3] MARUYAMA S. Plume tectonics[J]. J Geol Soc Japan, 1994, 100(1): 24-49
- [4] 孙爱群, 牛树根. 地幔柱热柱成矿作用研究进展[J]. 地质科学情报, 1997, 16(1): 65-71.
- [5] 王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社, 1998
- [6] CAMPBELL I H. Melting in an Archean mantle plume: head it's basalts, tails it's komatites[J]. Nature, 1998, 339: 697-699.

- [7] GRIFFITH R W, Richards M A. The adjustment of mantle plumes to changes in plate motion[J]. *Geophys Res Lett*, 1989, 16: 437-440
- [8] 杜乐天 幔壳溃瘍诱发地球动力学问题集成[A]. 北京大学地质学系 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集[C]. 北京: 地震出版社, 1998 29-38
- [9] COX K G. The role of mantle plumes in the development of continental drainage patterns[J]. *Nature*, 1989, 342: 873-876
- [10] 周新华 壳-幔深部过程化学地球动力学与大陆圈研究[A]. 郑永飞 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社, 1999 15-29
- [11] 邓晋富, 莫宣学, 赵海玲, 等. 壳-幔物质与深部过程[J]. *地学前缘*, 1998, 5(3): 67-75
- [12] 周瑶琪, 宋晓东. 地幔动力系统与演化最新进展评述[J]. *地学前缘*, 1998, 5(增刊): 11-39
- [13] 吕庆田, 蒋 枚, 高 锐. 青藏高原莫霍面形态的重力模拟及其对探讨高原隆升机制的意义[J]. *地球学报*, 1997, 18(1): 78-86
- [14] 吕庆田, 蒋 枚, 马开义, 等. 青藏高原中部岩石圈结构、变形及地球动力学模式的天然地震学研究[J]. *地球科学*, 1998, 23(3): 242-247
- [15] 邓晋福, 赵海玲, 吴宗絮. 中国北方大陆下的地幔柱与岩石圈运动[J]. *现代地质*, 1992, 6(3): 267-274

(编辑 张银玲)

The discussion about the compatibility and incompatibility between plume theory and plate theory

GAO Ming¹, CHEN Liang^{1,2}, SUN Yong^{1,2}

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Plumes have their own geochemical and geophysical features. To elucidate the internal relationship between plume theory and plate theory, through the contrast between plumes and plates, some incompatibility can be found in many aspects between them. Although there exists some difference between them, plume theory is an important implement and development to plate theory. Both of them have effect on lithosphere and subduction belts simultaneously. Delaminated cold plates get together and then generate the cold superplumes; subsequently the cold superplumes cause the hot superplumes. Hot and cold superplumes may control the motion of the plates.

Key words: plume tectonics; plate tectonics; subduction belt; superplume

· 学术动态 ·

全国第六届大学化学教学研讨会在我校举行

由西北大学主办的全国第六届大学化学教学研讨会, 于 9 月 21~23 日在我校举行, 来自北京大学、南京大学、吉林大学、复旦大学、西北大学等 100 余所高等院校的 150 多名专家教授出席了会议。大会由中国化学教育委员会副主任朱文祥致开幕词, 我校副校长惠泱河教授致欢迎词。

这次会议以中国高等化学教育和教学改革为主题, 对面向 21 世纪教学内容、教学方法、教学手段和课程体系改革诸多问题进行了深入的理论探讨和交流。会上, 代表分别就化学教学改革、教学实验管理体制和教学体系、化学专业本科教学改革的研究与实践、21 世纪无机化学教学改革与教材创新、化学专业基础科研和教学人才“3422 培养模式”、“533 建设模式”和第 16 届国际化学教育大会情况等 10 个专题作了大会报告。

这次大会共收到论文近 300 篇, 我校出版社编辑出版了论文集《高校化学教学成果撷英》一书。

(高立勋)