

地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说

徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇, 朱丹, 马金龙, 邵辉

中国科学院广州地球化学研究所 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广东 广州 510640

Xu Yigang, He Bin, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu, Zhu Dan, Ma Jinlong, Shao Hui

Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China

Xu Yigang, He Bin, Huang Xiaolong, et al. The debate over mantle plumes and how to test the plume hypothesis. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(2): 001-009

Abstract: Current debates over mantle plumes are centered on three assumptions namely: (1) cylindrical thermally-anomalous materials which arise from the core-mantle boundary; (2) high temperature of mantle plumes; (3) mantle plumes are stationary. A full test of the validity of these assumptions requires a comprehensive evaluation using techniques including high-resolution seismic tomography, petrology and paleomagnetism. It is argued in this paper that the plume hypothesis can fairly well explain first-order geologic observations. Geoscientists against the plume hypothesis often tend to over-emphasized some details that may be also influenced by other factors, in addition to mantle plumes. Five criteria can be used to identify ancient mantle plumes: (1) crustal uplift prior to volcanism; (2) dyke swarms; (3) volcanic chain; (4) physical characteristics of volcanism and (5) chemical characteristics of plume-derived basalts. Our investigation shows that at least three, and perhaps, four of these criteria are met for the Emeishan large igneous province, suggesting that a mantle plume played a central role in the generation of the Emeishan basalts.

Key words: mantle plumes; large igneous province; testing; identification of ancient plumes; Emeishan basalts

摘要:目前关于地幔柱存在与否的争论主要集中在地幔柱学说的三个假设上:(1)起源于地球核幔边界缓慢上升的细长柱状热物质流;(2)热点下具有异常高温地幔;(3)地幔柱是相对静止的。这三个方面的验证需要今后深部地球物理探测、岩石学和古地磁等学科的综合运用和进一步的工作。文中认为,地幔柱学说依然能合理地解释地球上一级地质现象,反对地幔柱的学者过分强调了一些小尺度的与地幔柱理论不符的细节,而小尺度地壳特征显然还受到其他许多因素的影响。可以从以下5个方面来鉴别老地幔柱:(1)大规模火山作用前的地壳抬升;(2)放射状岩墙群;(3)火山作用的物理特征;(4)火山链的年代学变化;(5)地幔柱产出岩浆的化学组成。研究表明,峨眉山大火成岩省满足其中的3到4个指标,因此地幔柱是形成峨眉山玄武岩的主要动力学机制。

关键词:地幔柱;大火成岩省;验证;鉴别古老地幔柱;峨眉山玄武岩

中图分类号:P542.5;P588.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2007)02-0001-09

Wilson (1963)^[1]根据太平洋、大西洋和印度洋中一些火山岛屿和火山具有线状分布特征以及喷发年龄顺序变化的现象,提出了热点假说。他认为这些热点相对静止,所以当岩石圈板块漂移经过这

些热点时就形成了链状火山岛屿。差不多 10 年之后, Morgan(1971)^[2] 正式提出了地幔柱假说, 认为 Wilson 的热点是地球内部存在起源于地球核幔边界缓慢上升的细长柱状热物质流(即地幔柱)在地表的表现形式, 并进一步推测地幔柱是由地幔对流体系中上升流构成的。20 世纪 90 年代初, Griffiths 和 Campbell(1990)^[3] 成功地解决了热驱动和大粘滞度对比这两大模拟热柱的基本问题, 建立了动态热柱结构模型。根据其实验结果和数值模拟, 认为热柱由巨大的蘑菇状柱头和细长的热柱尾两部分组成。之后, Larson(1991)^[4] 提出了超级地幔柱概念, 认为在白垩纪中期, 地幔对流系统曾遭受过一次大规模的扰动, 而该事件是源自于核幔边界的多个大规模地幔热柱上涌的结果。在超地幔柱活动期间, 洋底扩张和黑色页岩沉积速率显著加快, 全球温度上升, 海平面上升。超地幔柱活动开始时间与白垩纪长期正地磁极期的起始时间相吻合。这一相关性的形成与从核幔边界以超地幔柱形式导致大量热量的释放和大量深部物质的提取有关。自地幔柱学说提出以来, 一直被广泛接受, 并认为是形成大火成岩省的动力学机制。由于地幔柱系统独立于板块构造系统, 地幔柱运动的驱动力在于地核向下地幔的热能转移, 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。此外, 由于大火成岩省的形成时间与地球历史上几次大陆裂解、生物灭绝事件相吻合^[5-6], 所以大火成岩省和地幔柱研究成为地球系统和深部研究的“时尚”。虽然自诞生之日起, 地幔柱学说就遭到了以 Anderson 为首的“非地幔柱”学派的怀疑^[7], 但“反对”的声音大多被淹没在地幔柱研究的热潮中。直到 2000 年以来, 几篇地震层析论文的发表^[8-10], 导致了关于地幔柱存在与否的大辩论日趋激烈, 其中最具代表性的成果和争论文于 2004 年在冰岛和英国卡的夫以及 2005 年在苏格兰召开的专题研讨会, 以及会后出版的论文集。本文简要地介绍这场大辩论涉及的焦点问题, 评述地幔柱的鉴别标志, 最后以峨眉山大火成岩省研究为例来讨论地幔柱活动在该大火成岩省形成过程中的所起的作用。关于详细的讨论, 感兴趣的读者也可浏览 www.mantleplumes.org 等网站。

1 关于地幔柱争论的焦点问题

Morgan 的地幔柱学说主要有三个假设: (1) 起

源于地球核幔边界缓慢上升的细长柱状热物质流; (2) 热点下具有异常高温地幔; (3) 地幔柱是相对静止的, 因此当板块在地幔柱上方移动的时候, 形成年龄沿板块运动方向逐渐变小的火山链。然而这三个方面均受到了质疑。例如, 地震层析显示在黄石 (Yellowstone) 地区地幔热异常仅局限于 200 km 以上的浅部地幔^[8], 在冰岛则局限于 400 km 以上的地幔^[9]。热流测量发现冰岛地区的热流值与其他非地幔柱活动地区的热流值没有什么差别。夏威夷-皇帝海火山链是地幔柱学说的发源地, 两者之间呈 60° 相交。长期以来认为这是太平洋板块在 ~ 50 Ma 时改变运移方向所致。但是磁条带、断裂走向以及板块运动重建不支持这一板块运移方向的改变。由此认为夏威夷地幔柱不是人们想象中不是静止的, 而是每年以几个 cm 的速度相对运动。

除此之外, Anderson 对地幔柱存在的各条证据进行了逐一的批评, 并提出了新的非地幔柱解释。这里择几点展开论述。(1) 大火成岩省的一个特点是在短时间内喷发巨量岩浆, 地幔柱学派认为这些特点只有地幔柱这一特殊动力学过程才能解释。但 Anderson 认为, 短时间内喷发可能与板块的应力变化或板块重组有关。板块边缘和裂谷诱发的地幔对流也能产生大量岩浆^[11]。此外, 地幔源区如果含有榴辉岩等其他低熔点物质^[12-13], 那么不需要异常高温也能形成大规模的玄武岩省。(2) 年龄成线性变化的火山链的形成也与地幔柱无关, 而是岩石圈断裂 (cracks) 和引力释放导致的地幔物质发生减压熔融的结果^[7, 9, 14-16]。(3) 一些大火成岩省具有异常高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值, 这被地球化学家认为是地幔柱物质来自下地幔的有力证据。Anderson 却认为高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值可以来自于上地幔^[17]。(4) 与地幔柱有关的热异常会导致在岩浆喷发之前有地壳的抬升, 但一些大火成岩省并没有地壳抬升的地质记录, 而这一现象可以用无地幔柱参与前提下的板块应力作用来解释^[18]。(5) 物理模型认为地幔深部的巨大压力阻碍了热物质的浮力, 因而地幔柱模型在动力学和流变学上是不可能的^[7]。

由此可见, 对地幔柱学说的主要质疑主要来自于深部地球物理探测的结果。关键的问题是现有的

地球物理技术能否探测到地幔柱这样的在全球尺度上较小($<100\text{ km}$)的热异常。由于不同研究小组采用的技术和方法不同,因此对同一地区的探测结果存在很大的差别。例如,Foulger 等(2000)^[19]对冰岛的地震层析结果显示地幔异常只局限于浅部地幔,而 Zhao (2001)^[20]和 Wolfe 等(1997)^[21]却认为这一地区地幔热异常一直延续到核幔边界。因此不同的观点可能与地震层析技术的不完善有关^[22-23]。尽管如此,从所有的地幔热异常出现在火山链或大火成岩省的观察事实似乎支持地幔柱学说,因为起源于深部的地幔热异常并没有随机出现在地球的任何位置。值得一提的是,美国普林斯顿大学的科学家声称,采用新的层析技术在夏威夷等十几个地方探测到了源自核幔边界的细长柱状异常体^[24],这给地幔柱假说提供了支持。但普林斯顿的结果也显示一些“热点”地区的异常深度在下地幔内部或上下地幔界线,而非核幔边界。对此不同学派有不同的反应和解释,在某种程度上反映了超乎学术的不同心理。反对地幔柱学说的学者将此作为地幔柱不存在的主要证据,而另一些学者认为地幔柱理论预测的地幔柱尾的直径在 100 km 左右,现有的技术可能还达不到这样的分辨率,因此现阶段出现不同的认识应该是正常的现象。另一些学者^[25]则认为存在三种不同类型的热点,分别起源于核幔边界,上下地幔边界和上地幔(图 1),起源于核幔边界的热点被称为原始热点,现今地球上至少有 7 个这样的热点,如夏威夷、冰岛、阿法等,不加区分地讨论地幔柱是导致目前存在重大分歧的主要原因。

地幔柱是否具有热异常是另一个激烈争论的问题。根据传统的岩石学观点,形成科马提岩的地幔温度被估计为 $>1\,700\text{ }^{\circ}\text{C}$,高镁岩石如苦橄岩的出现/存在是高温地幔的证据^[26],但是另一些人则认为科马提岩形成于岛弧环境,这暗示其形成不一定需要异常高温环境,水的加入是产生高镁岩浆的主要原因^[27]。但是,科马提岩的岩石学和地球化学特征要求其源区为石榴石稳定区,并通过大程度($>30\%$)部分熔融形成,而从俯冲带的脱水作用发生的深度一般小于 100 km ,因此 Parman 等的模式似乎难以解释科马提岩的超深来源^[28]。

对于地幔柱假说中关于地幔柱静止的假设,Sleep (2003)^[23]认为同刚性板块一样是一个有用的假设,但不一定是错误的。从来没有人因为板块的蠕动而否认板块构造。从动力学角度讲,地幔柱通

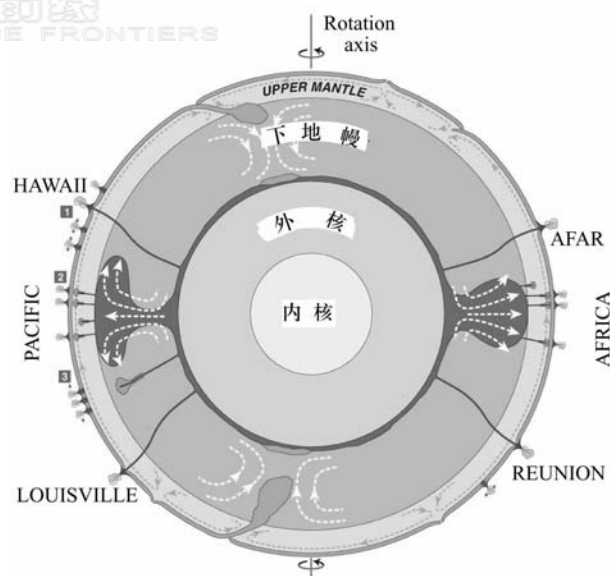


图 1 三种不同类型的地幔柱^[25]

Fig. 1 Three distinct mantle plumes^[25]

道会受到其他地幔对流的影响。对从海沟回返的地幔流的模拟发现存在所谓的地幔风^[29],从而影响到地幔柱的流体动力体系。

本文认为,地幔柱学说可以解释地球上一级地质现象(first order observation,如火山链),因此在大的尺度上较为合理地解释了地球动力学的内在本质。反对地幔柱的学者过分强调了一些小尺度的与地幔柱理论不符的细节,由于小尺度地壳特征也与地幔柱以外的其他许多因素和过程有关,因此,多少有点只见树木不见森林的味道。当然,他们所提出的一些问题的确是地幔柱假说今后需要考虑和完善的。

2 如何鉴别古老地幔柱

与现代地幔柱的鉴别方法不同,鉴别古老地幔柱时不再主要依靠地球物理手段,而更注重地质记录。Campbell^[30]提出了鉴别古老地幔柱的五个标志。

(1)大规模火山作用前的地壳抬升:实验室和理论模拟表明上升地幔柱通常造成大规模的地壳抬升并形成穹状隆起^[3, 31],地壳抬升的机理主要为地幔热柱对岩石圈的动力冲击。因此,地壳快速抬升及其所形成的穹状隆起是地幔柱作用区别一般壳幔作用的重要标志。此外,上升地幔柱在几百万 km^2 内发生公里规模的地表抬升必然对地表的沉积环境及

沉积作用产生重大影响,所以对大火成岩省浅表沉积记录的研究是证实和研究地幔柱活动的一种独立而可靠的手段。Anderson 在其反对地幔柱学说的诸多理由中,其中之一就是大多数大火成岩省形成之前缺乏地壳抬升的证据。

(2)放射状岩墙群:地幔柱的上升会导致上覆岩石圈处于引张状态。如果岩石圈是均一的,而且区域上没有外来力的作用,那么就会沿垂直引力最小的方向发育放射状的岩墙群或断裂^[32]。然而,在实际情况下,岩石圈总是有外力的作用,从而形成不规则的放射状的岩墙群,著名的 MacKenzie 岩墙群就是最典型的例子。此外,岩墙群的延伸方向还受到区域内原先存在的薄弱带的影响。与溢流玄武岩共生的放射状岩墙群与一般拉张构造背景下形成的岩墙的单一走向不同,因此是鉴别古老地幔柱的重要标志。放射状岩墙群的收敛点指示地幔柱头的位置^[32]。

(3)火山作用的物理特征:虽然大多数现代地幔柱活动的产物主要以火山链和高原的形式出现在大洋环境,但早于 2 亿年的洋壳上却很少有这样的地质记录^[30]。大多数被保存下来的与地幔柱有关的玄武岩主要出现在大陆环境。这一特点可以用来区分与地幔柱有关的火山作用和洋中脊(MORB)/岛弧玄武岩(IAB),因为后者主要是海相喷发。当某个特定的火山系列中发现有风化和剥蚀的特征,那它不可能是 MORB,反之则不然,因为地幔柱活动发生在大洋背景下的可能性不可排除。另一方面,MORB 是蛇绿岩套中特征的岩石组合之一,因此它通常与斜长花岗岩,辉长岩,超基性堆晶岩和方辉橄榄岩相共生,这些都是大陆溢流玄武岩所不具备的。

俯冲带玄武岩具有相对较低的温度,并富含挥发份,因此火山碎屑岩是其最主要的喷发相。此外,由于俯冲带玄武岩具有较高的粘滞系数,岩浆不可能长距离流动。相反,与地幔柱有关的岩浆的粘滞系数低,挥发份含量也低,因此火山碎屑岩占喷发岩的比例相对较小,岩浆可以长距离(>100 km)流动,形成大范围内可以对比的火山地层。

与地幔柱有关的岩浆与大陆地壳相互作用会导致地壳的深熔和长英质岩浆的形成。这些酸性岩浆同与 MORB 和 IAB 相伴生的酸性岩浆明显不同。地幔柱来源的岩浆停留在地壳中时,只要岩浆房上方地壳物质的熔点足够低,无论何种物质均会发生熔融,因此酸性岩浆的成分变化很大。另一方面,由

于地壳岩浆房的双对流机制^[33],因此岩浆分异作用的结果是形成双峰式岩浆岩,中性成分的岩石很少。这与岛弧环境中以中性岩为主的岩石组合明显不同。

(4)火山链的年代学变化:喷发年龄顺序变化的线状火山链是提出热点假说的主要依据之一,这一鉴别标志同样适用于大陆环境中地幔柱的判别。

(5)地幔柱产出岩浆的化学组成:总的来说,地球化学成分并不是鉴别地幔柱存在与否的最好手段。例如,虽然与地幔柱有关的岩浆的 Sr, Os, Pb 同位素组成总体上要比 MORB 的相应成分更高,而 Nd 同位素组成比 MORB 更低,但两者之间成分相重叠的地方也很大。不过 MORB、IAB 和地幔柱产出岩浆的微量元素组成存在很大的差异,但地壳混染等因素使微量元素组成的意义变得复杂化。此外,一些无热点作用的板内岩浆的微量元素组成与 OIB 相似,暗示玄武岩的地球化学特征的动力学意义具有多解性。

3 以峨眉山 LIP 为例验证地幔柱假说

广泛分布于西南三省(云南,四川和贵州)的二叠纪峨眉山玄武岩是我国唯一被国际学术界认可的大火山岩省。峨眉山玄武岩出露于扬子克拉通西缘,出露面积 2.5×10^5 km²。一般认为该大火成岩省的西界为哀牢山—红河断裂,西北界则为龙门山—小菁河断裂。但是在羌塘板块,思茅盆地和越南北部发现有峨眉山玄武岩,另外,有一些超镁铁质/镁铁质至长英质侵入岩体。其中,超镁铁质和镁铁质岩体和大型钕钛磁铁矿相共生。钻孔发现东南部和东北部也有隐伏玄武岩,一般认为它们与出露玄武岩同期。这说明峨眉山玄武岩省的初始覆盖面积远大于现在的残留面积。该火山岩省的西延部分因后期构造事件而被“支解”。在云南西南部和越南境内发现的二叠纪玄武岩就是印支板块沿哀牢山—红河断裂带的大规模侧向挤出的结果。野外观察表明,岩体不整合于早二叠茅口组之上。根据野外地质关系和层状岩体/碱性岩体的锆石 U-Pb 年龄测试结果暗示峨眉山玄武岩的喷发年龄为 260 Ma 左右^[34]。

3.1 火山作用前的地壳抬升

对峨眉山玄武岩下伏茅口灰岩进行了生物地层

对比,发现扬子西缘茅口灰岩在玄武岩喷发前存在差异剥蚀,而且茅口灰岩等厚线呈似圆状分布(图2)。剥蚀程度在空间上呈有规律的变化,自西到东可分为深度剥蚀带(内带)、部分剥蚀带(中带)、古风化壳或短暂沉积间断带(外带)和连续沉积带;整个剥蚀区的范围同峨眉山玄武岩分布区基本一致。通过剥蚀地层的厚度和热带环境下灰岩岩剥蚀速率估计地壳抬升发生的时限 < 3 Ma。通过川滇古陆东北缘的冲积扇和茅口灰岩的剥蚀特征确定地壳抬升高度大于 1 km^[37]。由此可见,在峨眉山玄武岩喷发之前,扬子西缘有过一次快速的,公里级的穹状隆起,这与地幔柱上升导致地表抬升的理论模型^[3, 31]十分吻合,从而为峨眉山大火成岩省形成的地幔柱撞击的成因模式提供了强有力的证据。

3.2 温度

(1)苦橄岩和原始岩浆的性质:实验岩石学和理论模型表明,原始岩浆的性质取决于地幔温度和压力^[38-39]。大部分峨眉山玄武岩的 $Mg^\#$ 变化于 0.33~0.63^[40-41],显然不代表与橄榄岩平衡的原始岩浆($Mg^\# > 0.7$),而是原始岩浆经不同程度分异结晶后的残余熔体。在峨眉山 LIPs 的西部(宾川、永胜、二滩、丽江和大具等地)有少量苦橄岩产出^[39, 42-43]。这些岩石的 MgO 含量为 15%~25%^[36, 42-43],因而有可能记录了峨眉山玄武岩原始岩浆的信息。根据苦橄岩中橄榄石斑晶的成分和橄榄石斑晶中的熔体包裹体的成分确定的原始岩浆成分(MgO 质量分数为 16%~18%)^[44]。高镁原始岩浆的确证对探讨峨眉山玄武岩形成条件和岩浆演化均有重要的指示意义。实验岩石学研究表明,原始岩浆的 MgO 和 FeO 含量随熔融温度和压力的增高而增高^[38]。将原始岩浆成分和橄榄岩熔融实验结果的对比,可以估计出峨眉山玄武岩熔融压力为~3.0 GPa,温度 > 1 450 °C,高于正常软流圈的潜能温度(1 280 °C)^[37]。

(2)玄武岩 REE 反演:地幔的潜能温度也可以通过玄武岩稀土组成反演获得。采用 McKenzie 和 O’Nions (1991)^[44]的分异熔融反演模型,对峨眉山两类玄武岩(未污染或污染程度小, MgO 质量分数 > 6% 的样品)的稀土(REE)组成分别进行了反演计算。低钛玄武岩的熔体分布曲线表明地幔熔融始于 140 km 深处,终于 60 km^[45]。最大熔融程度为 16.5%,产出熔体的总厚度为 5 km。熔体分布曲线同理想的地幔减压熔融对比表明,形成低钛玄武岩

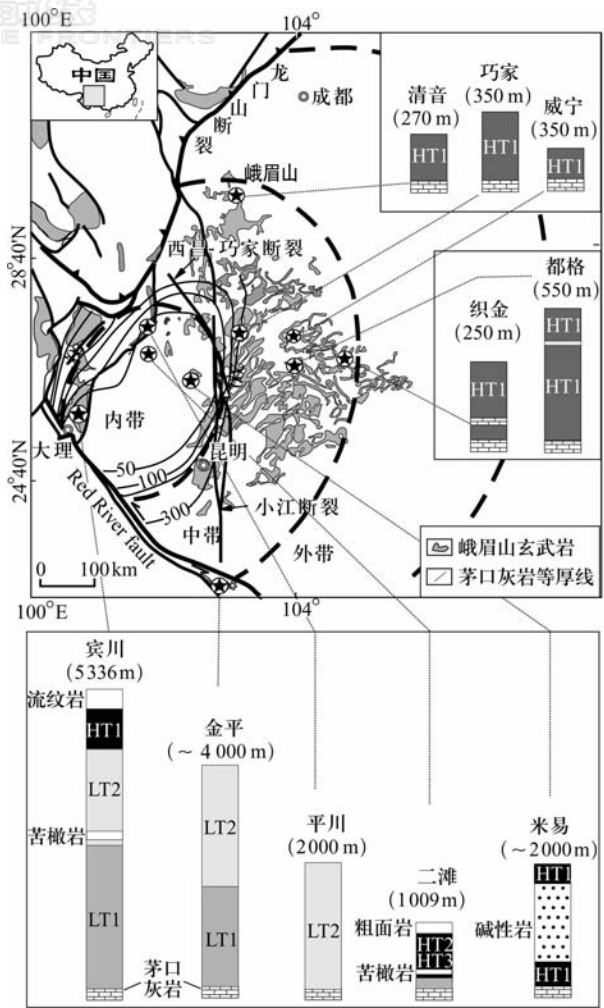


图2 峨眉山玄武岩的分布简图及代表性岩石柱状剖面^[35]
内带、中带和外带的划分据^[36]

Fig. 2 The distribution of the late Permian Emeishan basalts in SW China and stratigraphic variation of ten representative lava successions^[35]

的地幔温度>1 550 °C。这一异常高温显然与地幔热柱活动有关。高钛玄武岩的形成条件与低钛岩石截然不同。地幔熔融始于 100 km,终于 70 km,熔融程度较低(1.5%),产出熔体的总厚度仅为 500 m。与高钛玄武岩形成有关的地幔的潜能温度也相对较低(<1 500 °C)。

3.3 地幔柱参与峨眉山玄武岩浆作用的地球化学证据

峨眉山玄武岩具有非常复杂的元素和同位素地球化学组成,反映不同的地幔熔融条件,源区不均一性和程度各异的热柱-岩石圈相互作用^[45-46]。正是岩石圈组分的加入,掩盖了原始岩浆及其源区的地球化学性质。不过,我们仍能从中鉴别出地幔热柱

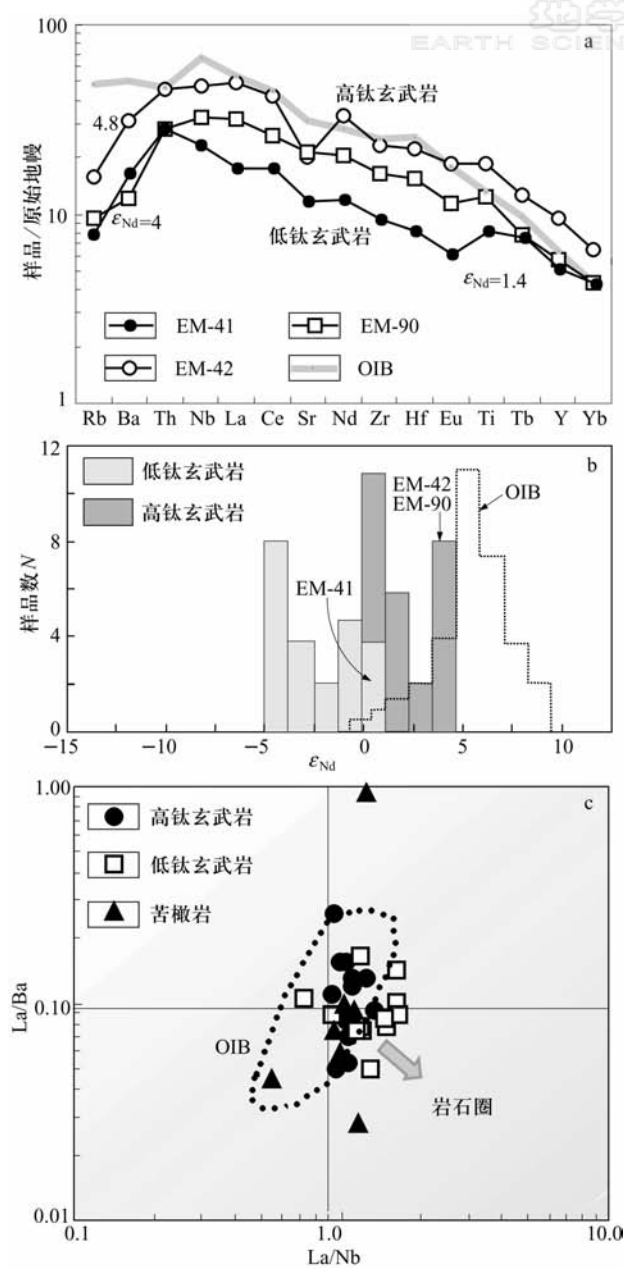


图3 (a)未受污染的峨眉山玄武岩的微量元素分布模式;
(b)峨眉山两类玄武岩与OIB的同位素组成对比;
(c)La/Ba-La/Nb图解

Fig. 3 (a)Trace element distribution patterns of the uncontaminated basalts from Emeishan; (b)Comparison of isotopic composition of two series of basalts from Emeishan and OIB; (c)La/Ba versus La/Nb

参与峨眉山玄武岩浆作用的地球化学证据。图3a展示的是一些未受污染(或污染程度较小)高钛和低钛玄武岩以及苦橄岩的微量元素分布模式。这些岩石具有平滑的分布曲线,与洋岛玄武岩(OIB)的微量元素分布模式十分相似。同时它们的 ϵ_{Nd} 值在各自岩类(即高钛和低钛)中是最高的(图3b),落在

OIB的同位素组成范围,因而可能记录了地幔热柱的地球化学信息。值得指出的是,未受污染的高钛($\epsilon_{Nd}(t) \approx +5$)和低钛($\epsilon_{Nd}(t) \approx +2$)玄武岩具有不同的同位素组成,暗示这两类岩石可能来源于不同的地幔源区。

如前所述,大多数峨眉山玄武岩不是原始岩浆,一些样品显示的Sr负异常(图3a)暗示其地球化学组成受到了分异结晶作用的改造。在这种情况下,用微量元素比值能更好地反映地幔源区的成分变化,因为两个不相容程度相似的元素之比基本上不受分异结晶和部分熔融程度的影响。在La/Ba-La/Nb图解(图3c)中,大多数高钛玄武岩落在OIB区域,说明它们起源于软流圈,受岩石圈混染的程度不大。相反,多数低钛玄武岩投影在OIB区域之外,暗示其成岩过程中有来自岩石圈(地幔和地壳)

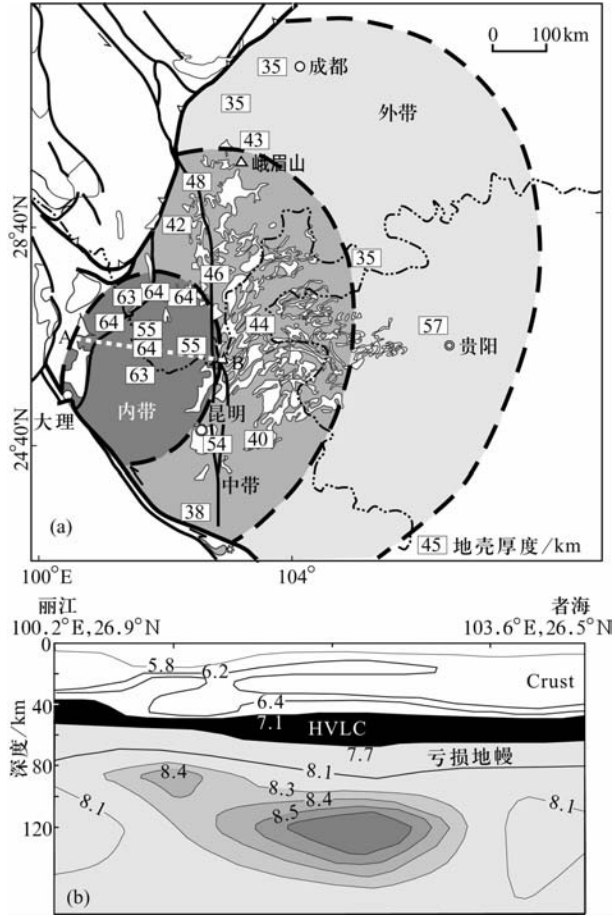


图4 (a)峨眉山大火成岩省不同剥蚀带的地壳厚度;
(b)图a中沿A-B线的下地壳地震波速结构^[35]

Fig. 4 (a)Crustal thickness data plotted over the domal area of the Emeishan large igneous province; (b)Seismic velocity (v_p) structure of the lower crust along the profile A-B shown in (a)^[35]
HVLC=高速下地壳

的贡献。不过, 仍有少数低钛玄武岩落在 OIB 区域内, 这充分说明低钛玄武岩也源自软流圈或热柱, 只是因其微量元素含量低而易受岩石圈组分的混染。

3.4 峨眉山火山作用的特征

峨眉山大火成岩省中主要以陆相溢流玄武岩为主, 火山碎屑岩占的比重不大。这些特征不同于俯冲带火山岩, 而与前面总结的与地幔柱有关的火山学物理特征相似。

3.5 放射状岩墙群和火山链

峨眉山大火成岩省中尚未发现放射状岩墙群。世界上典型的放射状岩墙群的年龄多数为前寒武纪, 因此二叠纪峨眉山玄武岩缺乏放射状岩墙群可能与剥蚀程度不够有关。峨眉山玄武岩也没有形成线状的火山链, 而是大规模的溢流玄武岩, 这是许多大陆大火成岩省的共同特征, 可能是地幔柱柱头熔融的结果, 而火山链则是地幔柱柱尾的熔融产物^[30]。此外, 较厚的大陆岩石圈也可能是难以形成火山链的原因之一。

3.6 峨眉山地幔柱存在的其他证据

地壳快速穹状隆起为峨眉山大火成岩省提供了一个天然的分区方案。如前所述, 根据茅口组灰岩的剥蚀程度在空间上呈现的有规律的变化, 将峨眉山大火成岩省分为内带、中带和外带。其中内带的位置对应地壳抬升幅度最大, 应该是地幔柱柱头的位置。根据这样的分区, 我们考察了现有地球物理资料, 发现地壳厚度随隆起区的不同位置而有规律的变化。在内带地壳厚度为 55~64 km, 中带地壳厚度为 38~54 km, 外带 35~43 km (图 4)。地震层析表明内带厚地壳包含有平均厚度为 20 km 左右的高速下地壳 ($v_p = 7.1 \sim 7.8$ km/s)^[35]。此外, 在内带岩石圈地幔存在一个高速异常透镜体 ($v_p = 8.2 \sim 8.6$ km/s), 其东西两侧的地理位置与内带和中带分界位置相重叠。壳幔结构的空变化与地壳穹隆结构之间的协调关系暗示两者受同一动力学机制——地幔柱活动的影响。在内带, 地幔柱头的熔融程度大, 岩浆产出量大, 一部分岩浆喷出到达地表, 而另一部分则底侵至壳幔边界成为下地壳的一部分。

根据岩相学、主量元素、微量元素特征, 将峨眉山玄武岩分成两个大类 (即高钛和低钛)^[45]。低钛玄武岩可能形成于温度最高、岩石圈最薄的地幔柱轴部。而高钛玄武岩的母岩浆是热柱 ($\epsilon_{Nd} = 5$) 在较大的深度 (> 80 km, gt 稳定区) 经小程度部分熔融

形成 ($< 5\%$), 可能代表了热柱边部或消亡期地幔小程度部分熔融 (1.5%) 的产物。对峨眉山大火成岩省 18 个火山岩剖面进行了系统采样和地球化学分析, 通过化学地层对比, 发现低钛玄武岩主要局限于峨眉山大火成岩的内带, 岩性自下而上的总体变化趋势为: 低钛 $\rightarrow$ 高钛玄武岩; 而中带主要由高钛玄武岩组成 (图 2)。中岩区则由高钛玄武岩和碱性玄武岩组成。根据高钛和低钛玄武岩不同的熔融条件, 推测地幔柱的核部内带。值得一提的是, 根据玄武岩岩类空间分布规律推测的地幔柱活动部位与根据地层剥蚀程度推断的地幔柱核部位置相吻合, 暗示所获结论的可靠性^[47]。

综上所述, 在鉴别老地幔柱的 5 个方面上, 峨眉山大火成岩省满足其中的 3 到 4 个指标, 加上其他独立参数之间的吻合, 因此我们有理由相信地幔柱构造可以很好地解释峨眉山玄武岩的形成。

References:

- [1] Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian islands[J]. Can J Phys, 1963, 41: 863-870.
- [2] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 1971, 230: 42-43.
- [3] Griffiths R W, Campbell I H. Stirring and structure in mantle starting plumes[J]. Earth Planet Sci Lett, 1990, 99: 66-78.
- [4] Larson R L. Geological consequences of superplumes[J]. Geology, 1991, 19: 963-966.
- [5] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions[J]. Earth-Science Reviews, 2001, 53: 1-33.
- [6] XU Y G. Mantle plume tectonics, large igneous province and their geological consequence[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 341-353(in Chinese).
- [7] Anderson D L. Look Again[J]. Astron Geophys, 2003, 44: 1. 10-1. 11.
- [8] Christiansen R L, Foulger G R, Evans J R. Upper mantle origin of the Yellowstone hotspot[J]. Bull Geol Soc Am, 2002, 114: 1245-1256.
- [9] Foulger G R. Plumes, or plate tectonic processes[J]? Astron Geophys, 2002, 43: 6. 19-6. 23.
- [10] Foulger G R, Natland J H. Is "hotspot" volcanism a consequence of plate tectonics[J]? Science, 2003, 300: 921-922.
- [11] King S D, Anderson D L. An alternative mechanism of flood basalt formation[J]. Earth Planet Sci Lett, 1995, 136: 269-279.
- [12] Takahashi E, Nakajima K, Wright T L. Origin of the Columbia River basalts: melting model of a heterogeneous

- plume head[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 162: 63-80.
- [13] Yaxley G M. Experimental study of the phase and melting relations of homogeneous basalt plus peridotite mixtures and implications for the petrogenesis of flood basalts[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 2000, 139 (3): 326-338.
- [14] Smith A D, Lewis C. The planet beyond the plume hypothesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48: 135-182.
- [15] Anderson D L. Lithosphere, asthenosphere and perisphere[J]. *Rev Geophys*, 1995, 33: 125-149.
- [16] Anderson D L. Scoring hotspots: the plume and plate paradigms[M]//Foulger G, Natland J H, Presnall D C, et al. *Plates, plumes & paradigms*. GSA special paper, 2005, 388: 31-54.
- [17] Anderson D L. The thermal state of the upper mantle; no role for mantle plumes[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3623-3626.
- [18] Anderson D L. The sublithospheric mantle as the source of continental flood basalts: the case against the continental lithosphere and plume head reservoir[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 123: 269-280.
- [19] Foulger G R, Pritchard M J, Julian B R, et al. The seismic anomaly beneath iceland extends down to the mantle transition zone and no deeper[J]. *Geophys J Int*, 2000, 142: F1-F5.
- [20] Zhao D P. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192: 251-265.
- [21] Wolfe C, Bjarnason I, Vandecar J C, et al. Seismic structure of the iceland mantle plume[J]. *Nature*, 1997, 385: 245-247.
- [22] Depaolo D, Manga M. Deep origin of hotspots—is only seeing believing[J]? *Science*, 2003, 300: 920-921.
- [23] Sleep N. Mantle plumes[J]? *Astron Geophys*, 2003, 44: 1. 11-1. 13.
- [24] Montelli R, Nolet G, Dahlen F A, et al. Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle[J]. *Science*, 2004, 303: 338-343.
- [25] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 205: 295-308.
- [26] Arndt N T, Nesbitt R W. Geochemistry of Munro Township basalts[M]//Arndt N T, Nisbet E G, Komatiites. Concord, Mass; Allen and Unwin, 1982: 309-330.
- [27] Parman S, Grove T L, Dann J. The production of Barberton komatiites in an Archean subduction zone[J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2513-2516.
- [28] Arndt N T. Komatiites, kimberlites, and boninites[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2293, doi: 10. 1029/2002JB002157.
- [29] Steinberger B, O'Connell R J. Advection of plumes in mantle flow; implications for hotspot motion, mantle viscosity, and plume distribution[J]. *Geophys J Int*, 1998, 132: 412-434.
- [30] Campbell I H. Identification of ancient mantle plumes[M]//*Mantle plumes; their identification through time*. GSA special paper, 2002, 352: 5-22.
- [31] Farnetani C G, Richards M A. Numerical investigation of the mantle plume initiation model for flood basalt event[J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 13813-13883.
- [32] Ernst R E, Head J W, Parfitt E, et al. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus[J]. *Earth-Science Reviews*, 1995, 39: 1-59.
- [33] Campbell I H, Turner J S. A laboratory investigation of assimilation at the top of a basaltic magma chamber[J]. *J Geol*, 1987, 95: 155-172.
- [34] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 196: 113-122.
- [35] Liu J H, Liu F T, He J K, et al. Study of seismic tomography in Panxi paleo-rift area of southwestern China—structural features of crust and mantle and their evolution[J]. *Science in China; Series D*, 2001, 44: 277-288.
- [36] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary[J]. *Geology*, 1995, 23: 889-892.
- [37] He B, Xu Y G, Chung S L, et al. Sedimentary evidence for a rapid crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 213 (3/4): 389-403.
- [38] Takahashi E, Shimazaki T, Tsuzaki Y, et al. Melting study of a peridotite KLB-1 to 6.5 GPa, and the origin of basaltic magmas[J]. *Phil Trans R Soc London*, 1993, A342: 105-120.
- [39] McKenzie D P, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. *J Petrol*, 1988, 29: 625-679.
- [40] Cong B L. The formation and evolution of the Panxi paleo-rift system[M]. Beijing: Science Press, 1988(in Chinese).
- [41] Zhang Y X, Luo Y N, Yang C X. The Panxi rift[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 466(in Chinese).
- [42] Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, et al. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China[J]. *J Petrol*, 2006, 47: 1997-2019.
- [43] Xu Y G, Chung S L. The Emeishan Large Igneous Province: evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. *Geochimica*, 2001, 30: 1-9 (in Chinese).
- [44] McKenzie D P, O'Nions K. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations[J]. *J Petrol*, 1991, 32: 1021-1091.
- [45] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. Petrological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Emeishan Per-

mo-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. Lithos, 2001, 58: 145-168.

参考文献:

- [46] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume-lithosphere interaction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 228: 525-546.
- [47] Xu Y G, He B, Chung S L, et al. The geologic, geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood basalt province[J]. Geology, 2004, 30(10): 917-920.

- [6] 徐义刚. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 341-353.
- [40] 从柏林. 攀西古裂谷的形成与演化[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [41] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 466.
- [43] 徐义刚, 钟孙霖. 二叠纪峨眉山大火成岩省的形成: 地幔热柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.

致《地学前缘》爱思唯尔(Elsevier)英文版作者

尊敬的作者:您好!

《地学前缘》被世界最大的科技出版公司 Elsevier 选入中国合作期刊,并获得了国际标准刊号(ISSN 1872-5791)。从 2007 年起入选的《地学前缘》文章英文版将在 ScienceDirect 在线全文平台上发表,Elsevier 的 1 700 万用户,包括全球著名的大学、图书馆、科研机构等都可以进行在线阅读。

中国期刊在全球科技网 ScienceDirect 上发表,将会扩大中国期刊的读者范围,提高中国期刊论文的国际引用率,促进中、外科技界间的学术交流。

送交 Elsevier 发表的稿件是从被《地学前缘》录用的中文稿件中选出并同步译成的英文稿件。英文稿件要求:

(1)译文的标题、姓名、单位、关键词、公式、插图、表格、引文、编号及参考文献等应与《地学前缘》中文原文保持一致,译文内容应与中文主要内容相同,但参考文献的著录格式要遵从下面(6)之规定。

(2)摘要一般为 50~200 个英文词,应能概括全文内容(研究目的、过程、方法、结论);不能含有方程、图表、参考文献等;如用缩略语,应有说明;第一句话不应与题名重复;尽量使用简单句和主动语态,并使动词靠近主语。英文版文章摘要可以与中文原文的英文摘要不同。

(3)关键词一般为 3~8 个;除专有名词大写外,全部小写;缩略语应先写全称再写简称;关键词之间用“;”分隔。具体要求与中文文章的关键词一致。

(4)图中文字的正斜体要与正文统一,图中文字用 7.5 磅 Times New Roman 字体;坐标轴标题和图中每段注释文字的首字母大写;图中字体:江河湖海左斜,山脉右斜;在坐标系中,坐标原点用 O,坐标名称用物理量与其单位之比,量符号用斜体,单位用正体,如“ p/MPa ”,标线刻度统一朝内侧。

(5)图件要求提供 CorelDRAW 或 Illustrator 软件制图格式,或上述软件可处理的矢量图,灰度图存为 600 dpi,彩图存为 300 dpi。双栏排图图不宽于 8 cm;通栏排图图不宽于 16.5 cm,整版图请控制在 16.5 cm $\times$ 22.5 cm 内。表名在表的上方居中排,表头表述方式一般用物理量与其单位之比,如“ p/MPa ”。

(6)参考文献。英文版文章的文后参考文献应与中文原文的尽量保持一致。参考文献采用阿拉伯数字依其在文中第一次出现的先后顺序编号;参考文献中的期刊名用全称或标准缩略形式表示;对于已经同意发表或出版的文章、图书但尚未正式出版的,参考文献列表中应该标明“in press”以说明。参考文献的基本格式示例如下:

For a book: Cover T, Thomas J. Elements for Information Theory. New York:Wiley,1991.

For a paper in a journal: Zadeh L A. Towards a generalized theory of uncertainty (GTU)—an outline. Information Sciences, 2005, 172:1-40.

For a paper in a contributed volume: Keene A J. A brief comparison of some evolutionary optimization methods. In: Rayward-Smith V, Osman I, Reeves C, et al. Modern Heuristic Search Methods, New York:Wiley, 1996:255-272.

For a paper in a conference proceedings: Ishibuchi H, Nozaki K, Tanaka H. Fuzzy data mining: effect of fuzzy discretization. In: Proc. 1st IEEE International Conference on Data Mining, San Jose, CA, 2001:241-248.

For an unpublished paper: Kryszkiewicz M. Knowledge reduction in information systems. Acta Mathematica Scientia, in press.

《地学前缘》Elsevier 英文版编辑部

联系人:杨永强

电话:82321855

电子信箱:xue_bao88@sina.com