

文章编号: 1001-8166(2005)10-1095-05

# 热柱、超级热柱及其成因的研究进展\*

谢鸿森, 侯 渭, 周文戈

(中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:** 从 20 世纪地幔热柱假说问世, 经过 30 多年的发展, 在地幔热柱的全球分布、鉴别特征、形态学和成因理论方面都有了长足的进步。特别是通过下地幔不均匀性的研究, 发现了下地幔中存在的超级热柱和下地幔底部中的超低速带, 为探讨热柱成因提供了重要依据。

**关 键 词:** 热柱; 超级热柱; 地幔底部超低速带

**中图分类号:** P54      **文献标识码:** A

20 世纪 60 年代板块构造学说建立以后不久, 为了解释与板块运动没有直接关系的热点火山链的成因(当时主要针对夏威夷热点火山链), 莫根提出了地幔热柱假说<sup>[1]</sup>。30 多年来, 无论对于地球表面热点火山岩的观测和研究, 还是运用地球物理方法, 特别是地震层析法对地幔热柱的形态学及其它物性特征进行的探测活动, 都取得了长足的进展。并且通过下地幔不均匀性的研究, 发现了超级热柱和地幔底部的超低速带, 从而为探讨地幔热柱成因提供了新的依据。本文拟对近年来有关方面的研究结果作简要介绍和评述。

## 1 根据来源深度对地幔热柱进行分类

大量观测资料表明, 并不是所有热点之下的热柱都有很深的来源。在近年来发表的一些论文中, 大多学者列出的全球最重要的热点在 45 ~ 50 个。这其中有 7 ~ 9 个热点之下的热柱直接来源于下地幔底部, 研究较多的是夏威夷(Hawaii)热点和冰岛(Iceland)热点<sup>[2-4]</sup>。而美国的黄石公园(Yellowstone)热点之下的热柱被认为是最典型的来源较浅的热柱(一般在 200 km 深度以内)<sup>[2]</sup>。此外, 还有一些热点之下的热柱是从过渡带(410 ~ 670 km)之下大的穹隆状超级热柱中升起的, 这种热柱往往成群出现, 在地表形成规模较大的火山岩省, 非洲大陆

隆起是其中较典型的代表, 而超级热柱的根也源于下地幔底部<sup>[3,5]</sup>。

按照不同来源深度, Courtillot 等<sup>[3]</sup>将热柱分为以下 3 种类型: ①深成型热柱, 即根部位于下地幔底部的热柱; ②过渡带型热柱, 即根部位于地幔过渡带, 其成因与超级热柱密切相关的热柱; ③上地幔热柱, 即根部位于岩石圈底部, 其成因可能与软流层有关的热柱。据 Courtillot 等统计, 与深成型热柱相关的热点约占全球热点总数的 20%, 其余两类热点一热柱各占约 40%。本文主要介绍深成型热柱和过渡带型热柱的研究进展情况。

## 2 深成型热柱和过渡带型热柱的分布和主要特点

### 2.1 深成型热柱和过渡带型热柱的全球分布

被公认为深成型的热柱有 3 个分布在太平洋所处的半球, 它们是夏威夷、复活节岛(Easter)和路易斯维尔(Louisville), 与它们对应的热点都表现为大洋岛。有 4 个深成型热柱分布于大西洋和印度洋所处的半球, 它们是冰岛(Iceland)、阿费尔(Afar)、留尼旺岛(Reunion)和特里斯坦岛(Tristan)。阿费尔位于非洲大陆东北部(埃塞俄比亚境内), 留尼旺岛

收稿日期: 2004-11-02; 修回日期: 2005-06-13.

\* 基金项目: 国家自然科学基金重大项目“地球内部几个重要界面物质的高温高压物性研究”(编号: 10299040); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“同步辐射高压高温实验技术及地幔地核重要矿物的物性研究”(编号: KJCX2-SW-No. 3)资助。

作者简介: 谢鸿森(1937-), 男, 河北景县人, 研究员, 主要从事地球深部物质科学研究. E-mail: xiehongsen@sina.com

位于印度洋,冰岛和特里斯坦岛分别位于北大西洋和南大西洋岛中<sup>[3]</sup>。

过渡带型热柱也称为次生热柱。该类热柱的根部一般发源于顶部在地幔过渡带的穹隆状超级热柱中。由于超级热柱能在有限的范围内提供大量的岩

浆物质,从而在一个超级热柱之上可以出现成群的过渡带型热柱。据 Courtillot 等统计,全球过渡带型热柱大约有 20 个。除分布于非洲大陆外,其余多集中在中太平洋。表 1 列出全球主要深成型热柱和过渡带型热柱的名称和相关参数。

表 1 全球主要深成型热柱和过渡带型热柱一览表<sup>[3,4]</sup>

Table 1 Main superplume and plume of the transition zone in the globe

	相应热点名称	经纬度	具体地理位置描述	火山岩年龄 (Ma)
深成型热柱	Afar	10°N, 43°E	非洲东部(埃塞俄比亚境内)	30
	Easter	27°S, 250°E	太平洋(复活节岛)	100
	Hawaii	20°N, 204°E	太平洋(夏威夷群岛)	> 80
	Iceland	65°N, 340°E	北大西洋(冰岛)	61
	Louisville	51°S, 219°E	南太平洋	122
	Reunion	21°S, 56°E	印度洋(留尼旺岛)	65
	Tristan	37°S, 348°E	南大西洋(特里斯坦岛)	133
待确定的深成型热柱	Galapagos	0, 268°E	太平洋(加拉帕戈斯群岛)	90
	Kerguelen(Heard)	49°S, 69°E	南印度洋(凯尔盖朗岛)	118
	Marquesas	10°S, 222°E	南太平洋(马克萨斯群岛)	
过渡带型热柱	Hoggar	23°N, 6°E	非洲大陆(阿尔及利亚南部)	
	Azores	39°N, 332°E	北大西洋(亚速尔群岛)	
	Bermuda	33°N, 293°E	大西洋(百慕大群岛)	
	Bouvet	54°S, 2°E	南大西洋(岛)	
	Bowie	53°N, 225°E	北太平洋加拿大西海岸	
	Canary	28°N, 340°E	大西洋(加纳利群岛)	
	Crozet/Pr. Edward	45°S, 50°E	南印度洋(克罗泽群岛)	183
	Fernando	4°S, 328°E	大西洋	201
	Caroline	5°N, 164°E	太平洋(岛)	
	Macdonald	30°S, 220°E	太平洋(岛)	
	Pitcairn	26°S, 230°E	太平洋(岛)	
	Samoa	14°S, 190°E	太平洋(萨摩亚岛)	14
	Tahiti/Society	18°S, 210°E	太平洋(岛)	

地理位置的中文名称来自文献[6]

## 2.2 深成型热柱和过渡带型热柱的鉴别

深成型热柱也被称为原始热柱。深成型热柱具有以下判别标志<sup>[3,4]</sup>:①在地表,沿岩石圈板块运动方向,分布着年龄值呈单向增长的火山链。如 Hawaii 热柱的热点火山链的年龄从现代逐渐过渡至 80 Ma; Iceland 热柱的热点火山链的年龄从现代逐渐过渡至 60 Ma;②火山链上分布着溢流玄武岩,也称为洋岛玄武岩(OIB)。与大洋中脊玄武岩(MORB)比较,有较大不同。MORB 成分比较一致,而 OIB 从时间和空间上都变化较大。MORB 在成分上属于拉斑玄武岩系列,而 OIB 属于拉斑—碱性玄武岩系列<sup>[1]</sup>;③OIB 和 MORB 的稀有气体同位素比较,也有明显不同。如 MORB 的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值大约

为大气该比值的 7~10 倍。OIB 的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值范围大部分高于 MORB 的比值,个别低于 MORB 的比值。表 1 列出的 7 个深成型热柱中,只有特里斯坦岛热点火山岩的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比值低于 MORB 的比值,而其余 6 个均高于 MORB 的比值;④热柱的地幔部分存在明显的地震波速的负异常,说明有柱状高温熔体存在。如观测表明,夏威夷热点之下 200 km 深处 S 波速(横波速度)比热点隆起部分低 5%。冰岛热点之下,直至 350~400 km 深处,存在直径约 200 km 的柱状 P 波(纵波速度)异常,比周围低 2%~2.5%,S 波速比周围低 4%;⑤理论计算表明,来自地幔底部的热柱的上升物质通量必须大于 1 000 kg/s。低于此通量的热柱可能在未到达岩石圈之前

就被地幔横向流所冲断,而不能到达地表形成热点火山链。

与其它两类热柱比较,过渡带型热柱有以下特征:①过渡型热柱相关的热点不仅可以分布在洋岛,也可以分布于大陆上;②过渡型热柱的根部的深度大于 410 km,再向下往往能与下地幔中的 2 个超级热柱(非洲大陆之下的超级热柱、中太平洋之下的超级热柱)相呼应;③过渡型热柱的热点火山岩没有明显的年龄排序现象,其火山岩成分复杂,既可能是洋岛型的,也可能是大陆型的溢流玄武岩。

要说明的是,7 个深成型热柱中有 5 个热柱(Hawaii、Iceland、Louisville、Reunion 和 Tristan)在位置上难以与两大超级热柱在成因上发生联系,特别是冰岛热柱位于大西洋洋中脊附近。因此,虽然有的深成型热柱由于其干部很细,难以确定其根部最大深度,但它们符合上述 5 个条件中的大部分内容,也认为它们的根部深度达到下地幔底部。此外,也有的深成型热柱的位置刚好在超级热柱之上,如阿费尔热柱因具有上述 5 个鉴别条件,因而被 Courtillot 等<sup>[3]</sup>确定为深成型热柱。而按照 Burk 的观点,阿费尔热柱是非洲大陆之下超级热柱在地表的表现之一,它在几千万年里的活动使埃塞俄比亚抬升了 1 000 km,并且撕开了红海、亚丁湾和东非裂谷<sup>[5]</sup>。因而,阿费尔热柱也可以看作为过渡带型热柱。

### 2.3 深成型热柱的形态特征

深成型热柱主要分布于比较薄的、运动着的岩石圈之下,具有蘑菇状的头部和细长的干。热点火山岩分布和地震学测量发现,热柱头部偏向岩石圈板块运动方向,最大扩展直径达 1 000 km<sup>[3,4]</sup>。夏威夷和冰岛热点火山岩岩石学研究推断,在最上部地幔,热柱温度高于一般地幔温度 250 K,相应引起的 P 波和 S 波的波速下降分别为 2.25% 和 2.75%。热柱在上地幔中的直径一般为 100 ~ 300 km。对于 410 km 以下热柱的形态学和物性特征,还没有完全统一的看法。根据 Nataf<sup>[4]</sup>的观点,综合目前对于地幔底部的观测结果(见下一节),将 410 km 以下深成型热柱的形态作以下描述:①热柱向下穿过地幔过渡带(410 ~ 670 km)时,由于热柱温度比周围地幔高,因此,过渡带的厚度将在热柱范围内变薄。其原因是,高压矿物物理研究表明,410 km 和 670 km 处的 2 个地震不连续面相当于地幔矿物的 2 个相变界面。410 km 为橄榄石的  $\beta$  相向  $\gamma$  相转变的界面,670 km 为橄榄石  $\gamma$  相向钙钛矿结构相转变的界面。在  $Mg_2SiO_4$  的相图上,前者的相变曲线为正斜率(温

度增高,相变压力增加),后者的相变曲线为负斜率(温度增高,相变压力降低)。由于热柱区温度较高,过渡带的上限(410 km)下降,而过渡带的下限(670 km)上升,从而热柱穿过的过渡带区域变薄(图 1);②下地幔(670 ~ 2 900 km)中物质的粘度大约为上地幔的 30 倍。因此,在下地幔,热柱直径应变大,最大可能达 500 km 或更大;③热柱的根在下地幔底层中,热柱根部的温度比周围地幔物质高出 600 K 左右;④熔体可能出现在热柱的 2 个位置:热柱根部和热柱干部上升的地方;⑤由于下地幔底层的不均匀性,在此处热柱将发生偏斜;⑥在热柱中,除了顶部和底部边界外,各处热的物质流是近于垂直的。其结果是矿物近于定向排列,从而能够引起地震波传播的各向异性。地幔中,在大尺度地幔对流发生的地方有热柱上升时,热柱可能被所谓“地幔流”作用而偏斜。现代全球环流预测,热柱的根部相对于它在地表出露的地方的垂直方向偏离约 1 500 km。图 1 就是具有上述特征的深成型热柱的轮廓图。

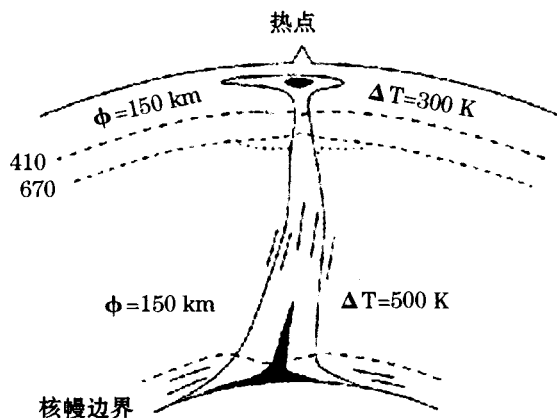


图 1 深成型热柱理想垂直剖面图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 A sketch of what a deep plume look like

## 3 超级热柱和地幔底层超低速带的发现及其空间关系

超级热柱是由地震层析发现的,英文名称为 superplume 或 megaplume,最大的 2 个超级热柱分别位于非洲大陆之下和中太平洋之下的下地幔中,根部在核幔界面之上。这两个超级热柱所表现出的地震波速异常十分明显,S 波速比周围低约 1%,而且界线清楚,说明它们不是单纯的由高温热上升流引起的,在化学成分上也与周围介质不同。与一般的热上升流密度比较,超级热柱的密度是异常高的<sup>[7]</sup>。

也有的学者曾认为,超级热柱是没有根的,下部成为巨型岩浆囊(megablob)<sup>[8,9]</sup>。从地震层析给出的地幔结构图上看,除了非洲大陆之下和中太平洋之下的 2 个超级热柱外,还存在一些从核幔界面之上升起的、S 波速比周围低约 1% 的较小的柱状体<sup>[7]</sup>。这些类似于超级热柱的小的柱体目前被称为下地幔上升流。

在下地幔不均匀性的研究中,发现下地幔底部存在着超低速带(ULVZ)。在 ULVZ 中 P 波和 S 波速下降 10% 或更多,而与 ULVZ 相邻的 D'区则具有高的 S 波速。所以,可将地幔底部看作为由 ULVZ 与 D'区交替组成的,具有地形起伏的层,本文中暂称之为地幔底层。ULVZ 的厚度在 5 ~ 50 km 之间(也可能还存在着目前还无法鉴别出来的更薄的 ULVZ 区)。ULVZ 的厚度在横向上变化剧烈,在 100 km 之内,厚度的变化可达 40 km。据作图统计,ULVZ 占据全球地幔底层的 12%。根据 ULVZ 的低波速特点,判断 ULVZ 可能是地幔底部物质的部分熔融引起的,也不能排除其化学成分与上覆地幔物质存在差别。而 D'区被认为是下降消减岩石圈板块的最终归宿地<sup>[10,11]</sup>。

Panning 等<sup>[12]</sup>应用全球波型层析方法对地幔底层进行了横向各向异性的研究,发现除中心太平洋和非洲之下的 2 个大的低速区(即 ULVZ)外,其余的范围内(即 D'区),水平极化 S 波速( $V_{SH}$ )均高于(约 1%)垂直极化 S 波速( $V_{SV}$ )。因而,认为 D'区对于地幔对流来说是一个机械界面。并且认为,地幔底层具有类似于上地幔的结构,即 D'区是固态的,类似于上地幔的岩石圈,而 ULVZ 类似于上地幔的软流层。此外,Panning 等<sup>[12]</sup>将地幔底层中的 ULVZ 直接称为超级热柱。由此可见,地幔底层中的 ULVZ 可以直接看作超级热柱的根部。

#### 4 热柱成因观点简介

近年来,随着对下地幔和地幔底层各类观测资料的积累,提出了多种热柱成因观点。大致可归纳为以下 4 个方面:

(1)如本文第 1 节所述,认为上地幔热柱的成因与岩石圈之下的软流层有关;深成型热柱来源于下地幔底层的超低速带(ULVZ);过渡带型热柱来源于下地幔超级热柱,而超级热柱是由下地幔底层的 ULVZ 升起的<sup>[3,12]</sup>。据 Williams 等<sup>[11]</sup>统计,下地幔底层 ULVZ,主要与地球表面以下 6 个地区对应:北大西洋之下、中大西洋之下、非洲之下、澳大利亚

之下、南太平洋之下和北太平洋之下,这些地区也是地表热点相对分布比较多的地区,而地表热点相对较少的美洲之下和南亚及中亚之下,没有发现 ULVZ。ULVZ 与地表热点分布的这种相关性,为确定 ULVZ 与深成热柱和超级热柱的成因关系提供了新的依据。图 2 表示出了热柱、超级热柱和下地幔底层 ULVZ 的空间关系。同时也表示出了板块构造中消减带的下降深度以及与 D'区的关系。

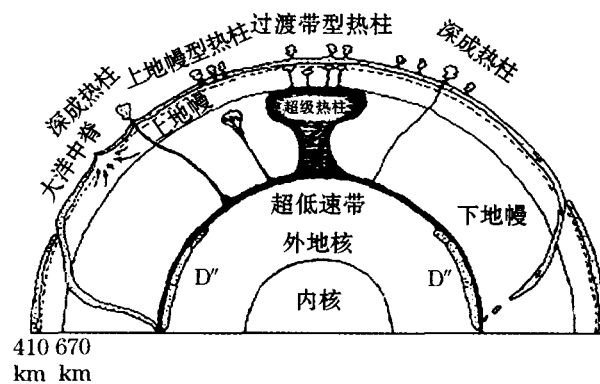


图 2 热柱、超极热柱和下地幔底层 ULVZ 的空间关系示意图  
Fig. 2 A schematic cross-section of spatial relationships between plume, superplume and lowermost mantle

(2) Romanowicz 等通过对地震波振幅的研究,获得了上地幔非弹性结构的三维模式图。发现与 2 个超级热柱有关的热上升流一直可持续至上地幔过渡带,并且在岩石圈之下水平偏斜。并以此为据,解释了太平洋中心地带特有的 S 波横向各各异性的现象。从而推断,2 个超级热柱不仅是提供各类热点—热柱热能的源区,也供给软流层热能,从而起到降低软流层粘度和促进板块在软流层之上滑动的作用。因此,Romanowicz 等<sup>[13]</sup>认为,核幔界面通过 2 个超级热柱提供的热能远远大于由热点热流所估算出的地幔热流的量。

(3)下地幔底层的不均匀性突出表现为 D'区和 ULVZ 的同时存在,大多学者认为这种特点是核—幔物质相互强烈作用的结果。所以,地幔底层 ULVZ 的物质和能量来源也可以归因于核—幔间的化学反应<sup>[14]</sup>。对于核—幔间的化学反应的性质和特点方面的研究,主要通过高温高压实验进行,因篇幅所限,在此不作专门介绍。

(4)关于地幔热柱的形态特征以及成因的认识是在逐步深入的。特别是随着地震层析技术的进步,新的观测结果和认识正在不断出现。如 Ni 等<sup>[15]</sup>根据地震资料,进一步确定非洲之下的超级热

柱的直径达 1 200 km,不规则边界可扩展至 1 500 km。这个超级热柱是从核—幔边界上升的,它具有一个 3% 横波速度下降。它的东侧边界清晰,宽度小于 50 km,并向中心倾斜,这种倾斜表明在地质历史这个大的结构是不稳定的。Zhao<sup>[16]</sup>根据地震层析作图指出,与非洲超级热柱比较,太平洋超级热柱有更大的空间范围,更强的低速异常。夏威夷群岛热柱是一个孤立的全地幔热柱,这个热柱向南偏斜。夏威夷群岛热柱不是太平洋超级热柱的一部分。但在中地幔深度,夏威夷群岛热柱与太平洋超级热柱之间可能有一些热或物质的交换。Schubert 等<sup>[17]</sup>依据新的地震层析资料,将超级热柱分解为若干个更小的热柱,非洲之下的超级热柱至少由 2 个或 3 个小的热柱组成,而太平洋之下的超级热柱至少由 6 个小热柱组成。因而他们认为超级热柱实际上是地震探测能够分辨出的小热柱群,它们的头部可能合并成为一个巨大的热区,并且物质是上浮的。

#### 参考文献 (References):

- [1] Xie Hongsen. An Introduction to Material Science in the Earth's Interior [M]. Beijing: Science Press, 1997. 173,227-229,278-284. [谢鸿森. 地球深部物质科学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1997. 173,227-229,278-284.]
- [2] Richard A K. Plume from the core lost and found [J]. *Science*, 2003, 299:35-36.
- [3] Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205:295-308.
- [4] Nataf H C. Seismic imaging of mantle plumes [J]. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 2000, 28: 391-417.
- [5] Richard A K. From Earth's core to African oil [J]. *Science*, 2001, 294:287.
- [6] Chinese Map Press, ed. World Atlas [M]. Beijing: Chinese Map Press, 2003. [中国地图出版社编制. 世界地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2003.]
- [7] Tackley P. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory [J]. *Science*, 2000, 288: 2 002-2 007.
- [8] Manga M. Shaken, not stirred [J]. *Nature*, 2001, 410: 1 041-1 043.
- [9] Montagner J P, Ritsema J. Interactions between ridges and plumes [J]. *Science*, 2001, 294:1 472-1 473.
- [10] Garnero E J. Heterogeneity of the lowermost mantle [J]. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 2000, 28:509-537.
- [11] Williams Q, Revenaugh J, Garnero E. A correlation between ultra-low basal velocities in the mantle and hot spots [J]. *Science*, 1998, 281:546-549.
- [12] Panning M, Romanowicz B. Inference on flow at the base of Earth's mantle based on seismic anisotropy [J]. *Science*, 2004, 303:351-353.
- [13] Romanowicz B, Gung Y. Superplumes from the core-mantle boundary to the lithosphere: Implications for heat flux [J]. *Science*, 2002, 296:513-516.
- [14] Keken P E V, Hauri E H, Ballentine C J. Mantle mixing: The generation, preservation, and destruction of chemical heterogeneity [J]. *Annual Review Earth Planetary Sciences*, 2002, 30:493-525.
- [15] Ni S, Tan Eh, Gurnis M, et al. Sharp sides to the African superplume [J]. *Science*, 2002, 296:1 850-1 852.
- [16] Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics [J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146:3-34.
- [17] Schubert G, Masters G, Olson P, et al. Superplumes or plume clusters? [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 146:147-162.

## DEVELOPMENT OF STUDIES OF PLUME, SUPERPLUME AND THEIR ORIGIN

XIE Hong-sen, HOU Wei, ZHOU Wen-ge

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In the last thirties years great advances of the studies of mantle plumes have been made. Based on the depth of origin, the mantle plumes have been subdivided into three groups. These are deep plume, transition zone origin plume and uppermantle plume. In this paper the criteria used to diagnose deep plumes and transition zone origin plumes are induced. The distribution of these plumes around the Earth surface and their shape are described. In addition, the superplumes in lower mantle and ultra-low velocity zones in mostly lower mantle found by the investigation of seismic tomography give an important evidence for the origin of plumes.

**Key words:** Hotspot; Plume; Superplume; Ultra-low velocity zones in lowermost mantle.