

·学术争鸣·

地幔柱动力学机制的新思考

李 晖 朱貌贤

(湖南省地质矿产勘查开发局四一六队, 湖南 株洲 412007)

摘 要: Morgan 提出的地幔柱假说极大地推动了地球科学的发展, 但长期以来地幔柱假说一直存在争议。本文对目前有关地幔柱争论的焦点问题做了简单的讨论, 说明了火山轨迹年龄递变规律异常和“热点”位置不固定的可能原因, 同时提出了地幔柱产生及持续的一种新的可能的动力学模型——地外星体做功模型。

关键词: 地幔柱 地外星体 热点 板块运动

中图分类号: P541

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0113-06

New thinking about dynamic mechanism of the mantle plume

LI Hui and ZHU Mao-xian

(No. 416 Geological Party, Hunan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The mantle plume hypothesis proposed by Morgan has been in controversy all the time in spite of the fact that it has greatly propelled the development of earth sciences. This paper makes a tentative discussion on the focus problems, probes into the possible causes for the deviation of the volcanic tracks from the present-day locus of the active volcanism and the unfixing of the hot spots, and proposes a new possible dynamic model for the generation and continual development of the mantle plume: the result of long-term action by extraterrestrial objects.

Key words: mantle plume; extraterrestrial objects; hot spots; plate movement

自从 Morgan 提出地幔柱假说以来 (Morgan, 1971, 1972), 地幔柱是否存在一直存在着争论。地幔柱假说提出后的起初 20 年里, 并没有引起广泛的关注 (Anderson and Natland, 2005), 直到 Campbell 和 Griffiths 在 1990 年进行了著名的地幔柱模拟实验后 (Campbell and Griffiths, 1990), 地幔柱假说才逐渐引起大家的注意, 并开始广为流行 (图 1)。地幔柱假说的提出具有很重要的意义, 它能较好地回答很多其他构造学说难以解释的地质事实和自然现象, 如地幔柱活动和大火成岩省事件、大陆裂解、全球气候变迁、生物灭绝事件、磁极倒转和一些大型矿产资源的形成均有密切的联系 (徐义刚, 2002), 还可

用来解释大陆溢流玄武岩及火山岛链的成因、板块边缘地质作用、古陆再造、地壳活化区域变质作用、海底大滑坡、行星对比研究等。然而自诞生之日起, 反对地幔柱的声音就从未间断过, 特别是遭到了以 Anderson 为首的“非地幔柱”学派的质疑 (Anderson, 2003)。Morgan 提出的地幔柱学说主要有 3 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时, 形成年龄沿板块运动方向逐渐变小的火山链。然而这 3 个方面均受到了“非地幔柱”学派的质疑, 但“反对”的声音大多被淹没在地幔柱研究的热潮中。2000

收稿日期: 2011-04-22; 修订日期: 2011-07-27

作者简介: 李 晖 (1985-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 构造地质学专业, E-mail: lihui107@mails.gucas.ac.cn; 通讯作者: 朱貌贤 (1963-), 高级工程师, 长期从事地质勘查工作, E-mail: zmx720@yahoo.com.cn。

年以来,由于几篇地震层析论文的发表(Christiansen *et al.*, 2002; Foulger, 2002; Foulger and Natland, 2003),导致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见于 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及会后出版的论文集之中,并有专门讨论地幔柱的网站 www.mantleplumes.org,感兴趣的读者可以浏览。

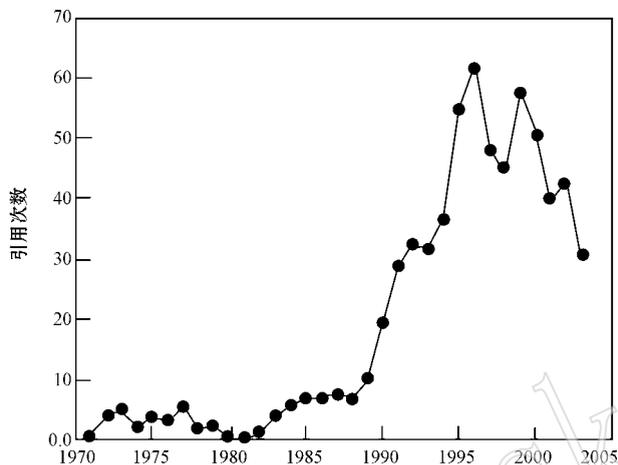


图 1 地幔柱在 GeoRef 文献中的被引用次数

(包括出现在题目及参考文献中,转引自 Foulger, 2005)

Fig. 1 Citation numbers of mantle plume in the articles listed in GeoRef of the online data base of the American Geological Institute (including those present in the titles and references, after Foulger, 2005)

这两派互相争论的观点都是根据现象所做的总结,并没有严格的证明过程。笔者认为解决两派争论的关键在于重新认识地幔柱形成的地球动力学过程。为了达到该目的,本文试图提供地幔柱成因的一种新的可能的动力学模型,并利用该模型就目前关于地幔柱争论的焦点问题做出新的解释。可能本模型并不能像逻辑学一样给予严格的证明,也不能像数学一样定量化,但一个好的假说或模型能够对特定的领域提供有益的引导,激发人们继续研究的热情。不管最终结果如何,现在的激烈争论都应受到欢迎,因为争论有助于新的发现,而不质疑地接受传统地幔柱模型则有碍于新发现(Foulger, 2005)。

1 问题的提出

传统的地幔柱模型认为地幔柱起源于地球内部

的热界面层,与热界面层间的热扰动有密切关系(Griffith, 1986)。关于地幔柱的热源问题,最早认为热源来自放射性元素的衰变热(Deffeyes, 1972),以后又提出了可能来自地核一侧的不均匀加热作用(Anderson, 1975)。不管什么观点,热扰动是地幔柱形成的一个必要条件已成为共识(Loper, 1991)。地幔对流是地球内部能量——热力和重力联合作用的结果。尽管地幔基本上是固体的,但在高温及长期应力作用下能发生缓慢的塑性流动。由于地核的温度比地幔要高(Campbell and Davies, 2006),会导致热而轻的低密度物质上升,形成上升流,上升流在岩石圈底部附近向外扩散,转变为背弛的水平流,相向而行的水平流因热传导变冷而汇聚向下,形成下降流。下降流在地幔深处分散,形成反向水平流,尔后补给上升流,如此循环往复即形成了地幔物质的对流运动,即对流环。新形成的地幔柱具有较大的“头部”和相对较小的“尾巴”(图 2)。

传统的地幔柱模型认为地幔柱形成于 30 多亿年前。Courtillot 等(2003)将全球的“热点”分为三大类,认为其相对位置保持固定(Hill *et al.*, 1992),即认为“热点”是相对固定的(图 3)。那么有一个疑问:既然“热点”保持相对固定,并且经历了漫长的历史,而地幔柱的长期维持肯定需要持续供给的能量,那么持续的能量究竟来自何处?目前比较流行的观点认为能量来自于地球内部放射性元素衰变所产生的热能。人们普遍认为经过部分熔融的地幔虽然是亏损的,但由于地幔对流作用的存在使得元素的分布是近乎均匀的(Dupre and Allegre, 1983; Hart, 1984; Zindler and Hart, 1986; Hart *et al.*, 1992; Hofmann, 1997)。如果地幔内放射性元素均匀分布的话,在其他地方放射性元素所产生的热应该与有地幔柱的地方相当,而“热点”的持续需要持续消耗能量,则其他地方的能量应该高于有地幔柱地方的能量,这样一个新的问题就产生了:为什么不在别的地方产生新的“热点”呢?也许有人认为,其他地方的能量会通过热交换或热对流的形式来补偿给地幔柱所消耗的能量。这一观点同样是站不住脚的,因为两个具有不同温度的物体经过热交换或对流后,低温物体的温度也是不可能高于高温物体温度的。

2 地幔柱动力的来源

由于地幔柱源于地球内部,学者们自然想到了

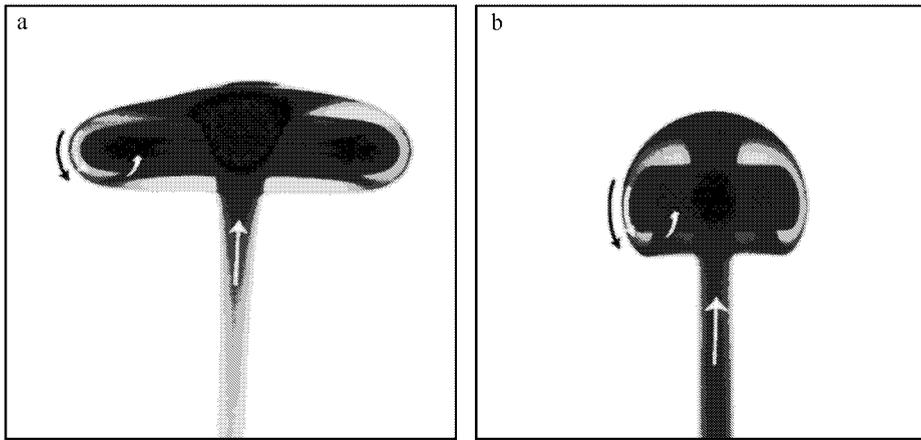


图 2 实验模拟的热柱演化及物质交换示意图(转引自 Campbell 和 Davies , 2006)

Fig. 2 Photograph of a laboratory model of a starting thermal plume and its material exchange(after Campbell and Davies , 2006)
a—热柱上升的途中 ; b—热柱上升的顶部
a—mid-way during its ascent ; b—at the top of its ascent

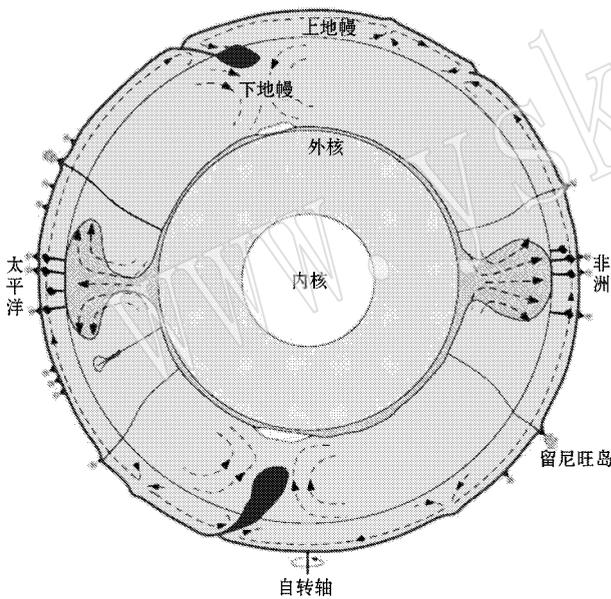


图 3 全球的地幔柱构造及其相对位置 (引自 Courtillot 等 , 2003)

Fig. 3 Global mantle plume tectonics and their relative position(after Courtillot *et al.* , 2003)

其供给的能量也来自于地球内部,想到了能产生热能的放射性元素。然而“卡西尼-惠更斯”号土星探测器的例子给了我们新的启示。如果被探测的天体离地球较远,为了节省发射能量,通常先用较小的速度飞行,然后在航行过程中借助行星的引力来加速或改变探测器飞行方向,从而最终飞向目标。这种借助行星引力支持的飞行,通常称为“引力助推”。“卡西尼”号设计了一条通往土星的智慧曲线,这条

智慧曲线的奇特之处在于:首先是它没有直接向土星飞去,而是先向内跑到了金星上空;其次是它围绕地球绕了好几个圈子,才把目标对准土星,整个行程达到了 35.2 亿千米,是地球与土星的实际距离的 2.5 倍以上,整个过程大部分的能量不是来自于自身携带的原料而是来自于其他星体的万有引力。这告诉我们供给地幔柱的能量也可能来自地外。可能下地幔具有非常高的黏滞度,其物质的受力环境不同于飞行器,但是地球受到月球不均匀的万有引力的影响可以产生潮汐,同样可以想象由于地外星体的不均匀的万有引力作用可将地幔物质“拉”出来。

如果早期的地球在核幔、壳幔分异前物质分布均匀的话,在同一球面上的物质应该具有相同的转动线速度,重力分异使轻重物质发生分离的同时,由于动能的守恒(并且重力势能还能转化为动能),使重物质在向地心运动的过程中由于转动半径减小其转动线速度和角速度均增大,形成圈层差异旋转,地壳自转速度最小,地幔次之,地核最大。地球早期由于地表温度很高而不存在刚性板块和板块构造作用,其表面可能主要受地幔柱构造所支配,这一点可由马德兰探测器发现金星等太阳系星球表面不存在转换断层等的事实得以证实。地幔柱构造可能在早期地球就存在,当分异作用完成后地表出现刚性板块,由于核幔、壳幔之间转动速度有差别,这时离心力做的功就成为了持续地幔柱的能量源。早期形成的地幔柱可能是被离心力“甩”出来的,其长期持续的原因可能是由于地外星体的做功。

那么持续的离心力做功的源泉以及保持幔核、壳幔自转速度的根本原因又是什么呢？其能量来自何处呢？是不是又成为了另一个“永动机”模型呢？要回答这些问题首先要从地球的自转说起。笔者认为“地球在自转”不等于“地球自己转”，康德-拉普拉斯关于地球自转动力来源于地球内部的“星云假说”误导了地球科学。地球无故不会转，它内部没有动力！即使地球内部有放射性元素衰变所产生的热能，但系统的内部作用力不能改变它的外部运动状态。就像一个大力士无论他有多大力量，如果他坐在椅子上他也不能将自己连同椅子一起搬离地面。然而，地球为什么会自转，自转的原因是什么，自转的动力从哪里获得，为什么选择现在的方向、姿态、速度自转，这些都是现代科学至今没有解决的问题。有人认为是因为它在以每小时 10 万多公里的速度绕日公转，且途中遇到太阳风的侧面推力，使高空产生等离子西风环流，高空西风又推动地面西风和向东涌的洋流，进而推动地球自西向东旋转。也有人认为是因为有月球绕其公转，是月球公转的牵引力使地球产生了自转。因为地球内部具有极高的温度，所以其内部物质为液态。月球的牵引力必然导致地球做圆周晃动（或叫圆周振动），而地球的圆周晃动必然引起其内部液态物质做围绕中心的旋转运动，而这一旋转运动又引起球壳产生转动，这样地球的自转就产生了，并且被不断加速。随着地球自转速度的不断增大，液体被迫向四周挤压，这样液体层面之间的相互摩擦力也就不断增大。当液体层面之间的摩擦力足以克服月球牵引给予它们的驱动力时，地球自转的加速也就宣告停止。笔者认为地球自转的动力不是来源于地球自身，而是来自于地外星体所做的功。地球自转可能经历了一个从静止到加速再到匀速的过程。当地外星体做的功大于地球的所有过程所消耗的能量（地球圈层间相互摩擦，由地表放出的热量等）时，地球的自转速度将经历一个加速的过程，当相等时自转速度持续不变。由此，笔者推测，维持地幔柱长期持续的能量可能来自于地外星体做功的一部分，这样就解释了地表的“热点”能够长期持续稳定的能量来源。

3 有关地幔柱争论焦点问题的重新评述

笔者无疑是支持地幔柱假说观点的，只是对其动力学模型做了一定的修改。下面就以 Foulger

(2005)总结的国际上对经典地幔柱模型的一些质疑做简单的讨论：

经典地幔柱模型可预测很多地质现象。然而观察表明，其预测性难以得到证实。最初提出的 19 个地幔柱 (Morgan, 1971) 中的大多数是如此，对随后增加的诸多地幔柱 (Davies and Richards, 1992) 更是如此：

(1) 预测的火山轨迹应从活火山活动（“热点”）的现今位置向外延伸，并具有空间上年龄递变的规律。这在很多地方如冰岛和 Ascension 并未观察到。此外，许多用来定义“热点轨迹”年龄的可靠性令人怀疑 (Baksi, 1999; Baksi, 2004)。

经典的地幔柱模型的最大不足之处在于认为由于下地幔具有非常高的黏滞度，因此“热点”位置绝对不变，究其原因是不清楚其完整的动力学过程，因而无法解释其可能的局部的变化。笔者认为“热点”的产生和持续始终是两个方面在起作用，一是能量的来源，另一个是喷发的“通道”。如果在地球早期地幔柱就已经存在，那么由于初始的岩浆上涌使该地区的地幔柱具有了初始的动能，如果有地外星体做功来补给，就很容易继续冲破地表形成相对固定的“热点”。这可能是地幔柱形成的主导机制，也可能是经典的地幔柱模型用来解释固定的“热点”随着板块运动形成一系列的火山链并且具有空间上年龄递变的规律的原理。但是还存在另外一个问题，就是地幔柱上升的“通道”问题。地幔柱活动的地方是岩石圈强度相对较弱的地方，由于自转速度的差异同样存在，岩浆也有向外甩出的趋势，如果在地幔柱活动的地方有个别地方因为岩石圈强度相对更弱，那么“通道”问题可能上升为主要矛盾，并且随着研究的深入发现下地幔对流的黏度也并非当初估算的那么高 (Goldreich and Toomre, 1969; Cathles, 1975)。这可能就是个别地点空间上年龄递变异常的原因。

(2) 预测“热点”彼此间的位置是相对固定的，并不随时间而变化。然而，相对固定程度是变化的，例如大西洋“热点”相对太平洋“热点”在大约 50 Ma (Raymond *et al.*, 2000) 前就不固定。

这一问题在 (1) 的解释中已经部分阐述。现代研究表明，板块的运动速度为 2~10 cm/a，而热点彼此间的运动速度相对较慢，一般不会超过 2 cm/a (Duncan and Richards, 1991)。此外板块在运动，板块下部软流圈及地幔也在运动，由于有长期稳定的

能量来源即地外星体所做的功,能供给地幔柱长期持续所需的能量,这样就不需要经典的地幔柱模型所需要的“热点”下存在热异常的物质(或放射性原始衰变所产生的热)来持续供给地幔柱所需的能量。由于板块间存在相对运动,板块间可能拉张,也可能挤压,故单个板块可能有确定的运动方向。然而就所有的板块而言并不存在确定的运动方向,如果“通道”问题上升为主要矛盾的话;“热点”彼此间的位置可能并不是相对固定的。因此“热点”的是否固定并不能作为反对地幔柱的依据。

(3) 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。然而经过 30 多年的持续努力,而且方法不断更新,地震学研究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。如果地幔柱的动力不是来自放射性元素衰变所产生的热能,则不需要延伸地表的热异常物质。

(4) “热点”地区的熔岩应该来自比其他地区如大洋中脊的熔岩更热的源区。然而,对此岩石学几乎没有提供任何毫无争议的证据。夏威夷是惟一一个现代还在活动的并具有苦橄质玻璃的“热点”,但苦橄质岩石和其他玄武岩的空间关系不清。冰岛玄武岩的地幔源区可能比典型洋中脊热几十度,但这一点异常可能对一个地幔柱来说太小,也许是区域而非局部特征(Foulger *et al.*, 2004; Vinnik *et al.*, 2005)。这可能也适合夏威夷。在大多数其他“热点”地区,根本就不存在任何过热岩浆的岩石学证据,甚至对大体积的拉斑玄武岩亦如此,说明高热流并不存在(Herzberg, 2004; Foulger, 2004)。

世界上已有许多大火成岩省存在高温成因的苦橄岩,如我国的峨眉山大火成岩省,其熔融温度达 $1\ 630\sim 1\ 690^{\circ}\text{C}$ (Zhang *et al.*, 2006)。如果地幔柱的热源不是放射性元素衰变所产生的热能,而是与地外星体做功有关的话,那么“热点”地区也不一定必须存在过热岩浆形成的岩石。

(5) 有些地幔柱缺失代表“地幔柱柱头”的大火成岩省(LIPs),如夏威夷。其他大火成岩省缺失与“地幔柱柱尾”有关的随时间变年轻的火山岩轨迹,如 Ontong Java 海台和西伯利亚大火成岩省。这个问题归根结底还是地幔柱的热源问题,是对地幔柱动力学模型认识的不足所引起的,在前面已经阐述。

4 结语及预测

理论要在实践中接受检验,在争论中不断完善。不加质疑地接受有碍于新的发现和科学的发展。地幔柱假说极大地推进了地球科学的发展,是自板块构造学说以来地球科学史上又一划时代的变革。但是经典的地幔柱模型仍然存在很多问题,有必要对地幔柱假说重新评价,其核心又在于对其动力学机制的重新认识,因为目前关于地幔柱争论的焦点问题都与其动力来源有关。滕吉文在总结第 30 届国际地质大会成果时指出,地球表面所呈现的一切地球物理、地球化学和地质现象,持续时间之长、规模之大均表明,其运动学过程和动力学机制不可能只是地表作用产生的,而必然是深部物质运移、深层过程和力系作用的产物。地幔柱持续时间之长(如夏威夷火山活动至少持续了 75 Ma),虽然夏威夷地幔柱起源的时间并不是很清楚),喷发岩浆量之大(形成大火成岩省)均表明地幔柱的产生及维持需要强大的动力,该过程是否与潮汐具有可比性?其动力是否是地外星体所做的功?这些都是很有意义且值得探讨的问题。

由于板块在运动,单个板块的运动方向有可能是确定的,但整体来说具有不确定性;“热点”的产生和持续始终是两个方面在起作用,一是能量的来源问题,另一个是喷发的“通道”问题。很多学者所讨论的“热点”的运动速度问题以及“热点”的运动和板块运动的相对方向问题可能并不存在,这些问题的存在可能是受到了地球科学数据的限制,相信随着数据的积累与新方法的应用这一问题将最终得到解决。

虽然现在关于地幔柱的争论还很激烈,但这是新理论走向成熟的必经之路。不管最终结果如何,地幔柱假说都在推动地球科学的发展上做出了不可磨灭的贡献。

References

- Anderson D L. 1975. Chemical plume in the mantle[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86: 1 593~1 600.
- Anderson D L. 2003. Look Agair[J]. *Astron. Geophys.*, 44: 1. 10~1. 11.
- Anderson D L and Natland J H. 2005. A brief history of the plume hypothesis and its competitors: Concept and controversy[A]. Foulger

- G R, Natland J H, Presnall D C, *et al.* Plates, Plumes & Paradigms Boulder [C]. Geological Society of America, Special Paper, 388 : 119~145.
- Baksi A K. 1999. Reevaluation of plate motion models based on hotspot tracks in the Atlantic and Indian Oceans [J]. *J. Geol.*, 107 : 13~26.
- Baksi A K. 2004. Guidelines for assessing the reliability of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau ages : Application to ages relevant to hotspot tracks [OL]. <http://www.mantleplumes.org/ArAr.html>.
- Campbell I H and Davies G F. 2006. Do mantle plumes exist [J]? *Episodes*, 29(3) : 162~168.
- Campbell I H and Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalt [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 99 : 79~93.
- Cathles L M I. 1975. The Viscosity of the Earth's Mantle [M]. Princeton : Princeton University Press, 390.
- Christiansen R L, Foulger G R and Evans J R. 2002. Upper mantle origin of the Yellowstone hot spot [J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 114 : 1245~1256.
- Courtillot V, Davaille A, Besse J, *et al.* 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 205 : 295~308.
- Davies G F and Richards M A. 1992. Mantle convection [J]. *J. Geol.*, 100 : 151~206.
- Deffeyes K S. 1972. Plume convection with upper mantle temperature inversion [J]. *Nature*, 240 : 539~544.
- Duncan R A and Richards M A. 1991. Hotspots, mantle plumes, flood basalts, and true polar wander [J]. *Rev. Geophys.*, 29 : 31~50.
- Dupre B and Allegre C J. 1983. Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena [J]. *Nature*, 303 : 142~146.
- Foulger G R. 2002. Plumes, or, plate tectonic processes [J]. *Astron. Geophys.*, 43 : 619~623.
- Foulger G R. 2004. [OL] <http://www.mantleplumes.org/PlumesOrNot/PlumesOrNotOrals.html>.
- Foulger G R. 2005. Mantle plumes : Why the current skepticism [J]? *Chinese Science Bulletin*, 50(15) : 1555~1560.
- Foulger G R and Natland J H. 2003. Is "hotspot" volcanism a consequence of plate tectonics [J]. *Science*, 300 : 921~922.
- Foulger G R, Vinnik L P and Du Z. 2004. The mantle potential temperature anomaly beneath Iceland is insufficient for a thermal plume [A]. *EOS Trans AGU, Fall Meet Suppl, Abstract [C]*, 85 : V51B~0569.
- Goldreich P and Toomre A. 1969. Some remarks on polar wandering [J]. *Jour. Geophys. Res.*, 74 : 2555~2567.
- Griffith R W. 1986. Thermals in extremely viscous fluid, including the effects of temperature dependent viscosity [J]. *J. Fluid Mech.*, 166 : 115~138.
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in Southern Hemisphere mantle [J]. *Nature*, 309 : 753~757.
- Hart S R, Hauri E H, Oschmann L A, *et al.* 1992. Mantle plumes and entrainment : isotope evidence [J]. *Science*, 256 : 517~520.
- Herzberg C. 2004. How many hotspots are on present-day earth, and are all plumes hot [A]? *EOS Trans AGU, Fall Meet Suppl. Abstract [C]*, 85 : V43G~04.
- Hill R I, Campbell I H, Davies G F, *et al.* 1992. Mantle plumes and continental tectonics science [J]. *New Series*, 256 : 186~193.
- Hofmann A W. 1997. Mantle geochemistry : The message from oceanic volcanism [J]. *Nature*, 385 : 219~229.
- Loper D E. 1991. Mantle plumes [J]. *Tectonophysics*, 187 : 373~384.
- Morgan W J. 1971. Convection plumes in the lower mantle [J]. *Nature*, 230 : 42~43.
- Morgan W J. 1972. Plate motions and deep mantle convection [J]. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 132 : 7~22.
- Raymond C A, Stock J M and Cande S C. 2000. Fast Paleogene motion of the Pacific hotspots from revised global plate circuit constraints [A]. Richards M A, Gordon R G and van der Hilst R D. *History and Dynamics of Plate Motions [C]*. *Geophys Monogr*, 121 : 359~375.
- Vinnik L P, Du Z and Foulger G R. 2005. Seismic boundaries in the mantle beneath Iceland : A new constraint on temperature [J]. *Geophys. J. Int.*, 160 : 533~538.
- Xu Yigang. 2002. Mantle plumes, Large Igneous Provinces and their geologic consequences [J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4) : 341~353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, *et al.* 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China [J]. *Journal of Petrology*, 47(10) : 1997~2019.
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14 : 493~571.

附中文参考文献

- 徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应 [J]. *地学前缘*, 9(4) : 341~353.