

地幔柱的研究现状、基本特征及研究意义

朱明珺

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林
Email: 505329536@qq.com

收稿日期: 2021年8月31日; 录用日期: 2021年9月17日; 发布日期: 2021年9月24日

摘要

本文对地幔柱的发展和来源进行了阐述, 这些年来, 许多的学者针对地幔柱的问题作出假设, 并且运用深部探测的方式来不断完善地幔柱模型, 以及利用正确的模拟方式证明了该假说的正确性, 以及对于地幔柱理论进行了一系列的研究, 例如地幔柱的化学成分特征、形态特征、形成的过程、证据、以及动力学模式。由于有重力分离的作用和地球的自传影响, 会发生差异的旋转和圈层的分化, 是因为地球的动能会逐渐靠近地核, 地球的质量会逐渐靠近地心。地幔柱和液核对流需要很大的能量才能进行, 而正是靠地核旋转时产生的强大的能量, 旋转时产生的阻力会逐渐变成热能, 这些热能在核幔边界的位置集聚成所需要的能量。同时地幔柱就来源于这个能量强大的位置。还阐明了地幔柱可以更好地解释太古宙科马提岩的形成过程、大陆溢流玄武岩的形成原因、海平面上升和全球气候变暖以及地磁极性的变化等。对研究地球的深部动力学机制产生了重大意义。

关键词

地幔柱, 基本特征, 研究意义, 研究现状, 地幔柱假说

Research Status, Basic Characteristics and Significance of Mantle Plume

Mingjun Zhu

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi
Email: 505329536@qq.com

Received: Aug. 31st, 2021; accepted: Sep. 17th, 2021; published: Sep. 24th, 2021

Abstract

This paper expounds the development and source of mantle plume. In recent years, many scholars

have made assumptions about the problem of mantle plume, continuously improved the mantle plume model by means of deep exploration, proved the correctness of the hypothesis by using the correct simulation method, and conducted a series of studies on the theory of mantle plume, such as the chemical composition characteristics of mantle plume Morphological characteristics, formation process, evidence, and dynamic model. Due to the effect of gravity separation and the influence of the earth's autobiography, differential rotation and sphere differentiation will occur because the earth's kinetic energy will gradually approach the earth's core and the earth's mass will gradually approach the earth's core. The convection of mantle plume and liquid core requires a lot of energy, and it is the strong energy generated by the rotation of the earth's core that the resistance generated during the rotation will gradually become heat energy, which will gather into the required energy at the position of the core mantle boundary. At the same time, the mantle plume comes from this powerful position. It is also clarified that the mantle plume can better explain the formation process of Archean komatiite, the formation cause of continental overflow basalt, sea-level rise, global warming and the change of geomagnetic polarity. It is of great significance to study the deep dynamic mechanism of the earth.

Keywords

Mantle Plume, Basic Characteristics, Research Significance, Research Status, Mantle Plume Hypothesis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

Morgan 发现海洋底部出现了链状分布的死火山脉,其所根据的事实是:洋底有一系列海山,即呈链状分布的死火山脉,它一端连接着现代活火山,沿此链距离活火山越远,其年龄就越老[1]。这被认为是当岩石圈板块运动时,固定不动的地幔柱在板块表面留下的热点迁移的轨迹,简而言之是由一系列死火山组成的无震海岭。因为在太平洋板块西移而在洋底留下一条由死火山形成的海山链,经年龄值 4000 万年的中途岛转折而形成,同时向北西延伸到皇帝海岭,一直到阿留申岛的西端,年龄增加了 7500 万年[2]。

2. 地幔柱概念的起源

为了更好地阐述 Wilson 所发现的一种地幔热点都是在运动板块下的,摩根提出关于地幔柱的一个假设,该理论认为地幔的热点来自于不断向上升移动的地幔边界中流体,摩根主义者认为地幔柱就好像植物生长过程中的根一样,并且它们是深深扎进地下的根,来自更深部并且相对固定的地区,同时也更好地解释了地幔柱本身是否具有相对固定的特征[2]。地幔柱的建立给那些由于板块活动而引发的火山活动做了很好的阐述。在 1990 年,出现了由坎贝尔制造的对地幔柱进行一种动态模拟的仿真模型,他认为地幔热柱是由蘑菇状的头和细长的尾组成的(见图 1) [3]。

有人支持的同时,也存在着反对的声音。一些反对的学者通过发表文章,表达自己的观点来与那些支持者进行争辩。Foulger 在努力寻找可以代替地幔柱模型的其它方法来解释,最后找到了 7 种方法[3]。另外, Davies 通过尝试各种实验方法来证明地幔柱是真的存在[4]。

还有其它的学者有不同的观点,肖龙认为,地幔柱的最大特点就是具有穿透上地幔和下地幔之间的平衡带,从而会对岩石圈起作用,同时解释了地球到达核幔边界时的运动方式[5]。Anderson 认为地幔柱

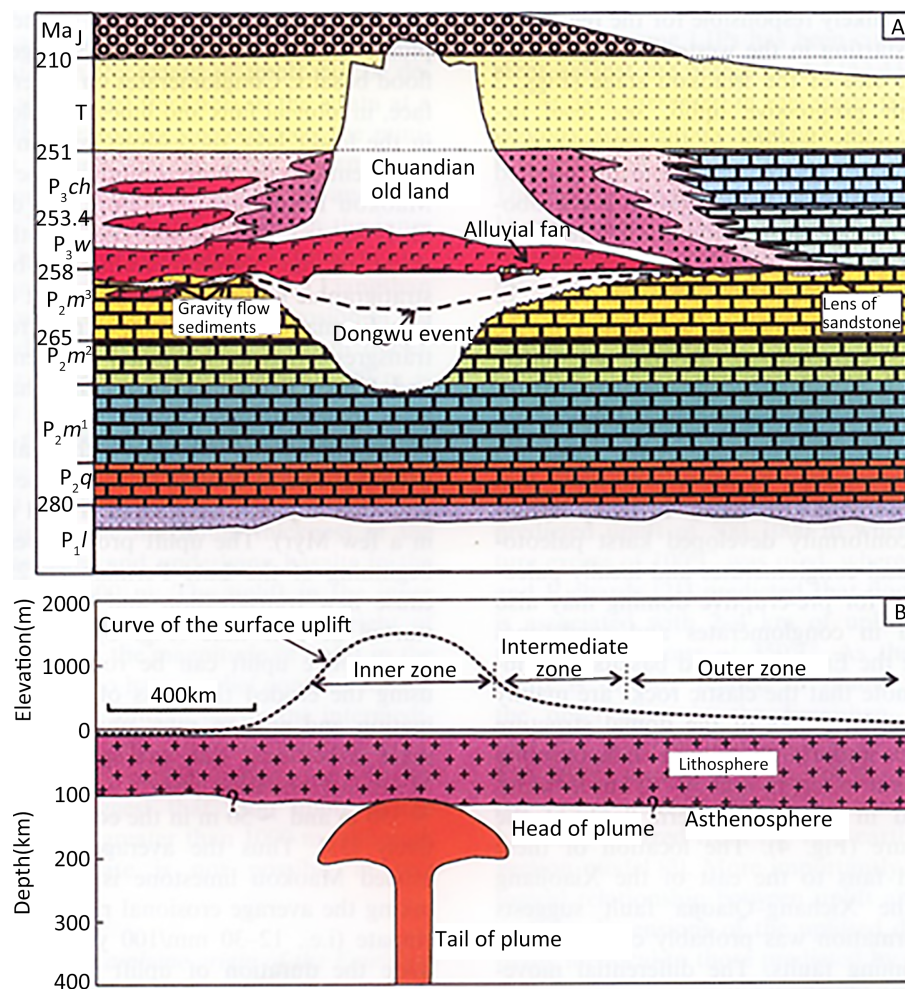


Figure 1. Dome formation mechanism [2]

图 1. 穹隆形成机制[2]

在运动的时候会逐渐变形，最终变成并巨大的柱头，但是大部分在到达之前就会消失不见，少部分会发生反应，最后在地表被发现，或者还可能出现巨大的爆发，大火成岩省就这样出现了[4]。地幔柱并不一定就是温度很高，还高于周边环境的，有日本学者认为有冷地幔柱的观点；因此，日本的学者对冷地幔柱的观点进行研究，并且有了在卡林型金矿矿集区、与基性超基性岩有关的 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床、条带状铁建造等方面的重大的进展[6]。李建康等专注于地幔柱的研究在数值模拟这个方面有了重大成果，他认为地幔柱的出现是因为冷物质碰到“D”层(核幔边界)引起流体局部剧烈搅动；地幔中上升流体的黏度明显低于外围的介质流体时，上升的流体将变成细长的尾部和巨大的球体的冠部；很多学者都是利用地球物理学的方法来进行地球的深部探测，但是由于时间较久远，很多地幔柱的柱体因为发生反应而变得统一，那些在地表的地幔柱的标记也被许多专家接受[7]。结合地质学、地球化学、地球物理学，地幔柱的活动会体现这些特点：岩浆的高喷发速率、高氦同位素比值、长时间的火山活动形成火山链、垂向低速低阻体，在地表的表现形式为地壳隆升、溢流玄武岩、火山-岩浆活动、大陆裂解、大规模成矿等[8]。

French 等使用从核幔边界到地表下 1000 km 的地幔成像技术，解释出许多热点之下为竖直方向的管状通道，通道上部发生水平偏移，可能受到上地幔循环运动的影响，通道底部深入超低速横波区[9]。目前，Eric 称某个核磁共振层析成像研究项目用 273 个地震剖面数据分析了地球内部结构，认为地球分布着 28 个地幔柱，

并表示地幔柱是地核冷却的通道[10]。Bourdon 等人(2006 年)用铀元素地幔动力学证明了地幔柱的存在[11]。

3. 地幔柱的研究现状

近年来,地幔柱在国内外的研究处于重大变革的前夜,或者说国内外的地学界正在从不同的角度、不同的学科领域对地幔柱的基本概念、理论与方法进行检验[4]。有两个动向值得注意,日本的地质学家特别是地球物理学家多从现代地球物理资料出发来研究地幔柱的结构,而欧美的地质学家以及独联体国家多从地球化学的角度来研究地幔柱在地球演化进程中的地位,其结论也不完全相同,比如日本人特别强调的冷幔柱观点在欧美反映平平,并在 10 年前就被认为“存在明显的差错”[11]。查阅了在 1999 年全年的 *Nature*, *Geology*, *Science* 等刊物上发表的有关地幔柱的文章,发现几乎无人引用“冷幔柱”的概念,多数意见认为,冷幔柱的存在还需要更多的事实依据,至少可以认为目前还没有地壳(包括洋壳)能够俯冲到下地幔乃至核幔边界的依据。显然,地幔不是自由空间可以任板块自由活动。另外,欧洲的地质学家以往较少研究地幔柱,但目前也已经对欧洲大陆上的新生代地幔柱活动引起了重视[12]。

国外近年来在地幔柱与成矿作用研究方面,如在卡林型金矿集区、与基性超基性岩有关 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(以 Naldrett 为首的研究组在 31 届国际地质大会上对近年来取得重大突破的 Voisey Bay Ni-Cu-Co-PGE 矿床与地幔柱的关系进行了系统介绍)、条带状铁建造等方面取得了显著进展[10] [11] [12]。国内近年来对于地幔柱概念的响应也比较积极,除了邓晋福等人较早开始运用地幔柱理论研究岩石圈运动之外,《地幔柱及其成矿作用》一书的出版对于国内广大读者比较系统地了解地幔柱理论具有现实意义[13]。

2000 年以后,即便是那些更多考虑板块构造对撞理论的地球科学家也都承认地幔柱的存在。后来有学者深入研究了地球表层的物质与地球深处的物质之间的联系有了极大的进展[14]。实际上,为了弄清可能与地幔柱相关的地质特征的原始生成地,Torsvik 与他的同事曾将地球部分板块构造的研究回溯至 2 亿多年前。地球化学分析及其链状结构揭示了当今 11 个热点地区中的 10 个可能深深地扎根于地幔中[14]。Torsvik 与同事发现同样数量的热点地区所处位置在熔岩堆之上或其附近。25 个大火成岩省中的 23 个在熔岩堆边缘处喷发,德国因茨市马克斯·普朗克学会生物化学研究所的名誉地球化学家 Albrecht Hofmann 认为这是一个强有力的地理学联系,两个巨大圆块边缘的联系强烈地说明这一切的形成存在着因果联系,加利福尼亚理工学院地球动力学家 Michael Gurnis 也认为可以合理地推断非边缘部分也存在着地幔柱[15]。

来自地球动力学、地球化学以及地质学三个方面的证据促使学界认真研究地幔柱的存在问题:究竟是像地震学所说的那样必定存在还是根本不存在?加利福尼亚大学圣克鲁斯分校地震学家 Thorne Lay 认为那里存在着相当分量的地底物质。唯一可以解释这一现象的便是地幔柱[12]。一个比较新的且至今仍在不断提供证据证明地幔柱存在的科研项目于 2012 年 3 月 15 日在《地球与行星科学通讯》上发表了研究成果[13]。来自新墨西哥大学的 Brandon Schmandt 同包括 Humphreys 在内的同事们通过一种独一无二的资源—移动式阵列来观测地幔柱,该阵列由 400 台地震仪组成,并以位于黄石国家公园附近的地震仪为补充,宽 800 公里,在加拿大和墨西哥边境展开[14]。为了更进一步的探究黄石公园的地表下到底有哪些未知物质,借助这种检查手段可以很好的提供必要的帮助。

加州大学伯克利分校地震学家 Barbara Romanowicz 被该结果深深地震撼,她从未被任何地幔柱证据所说服,但是在那周之后召开的一次研讨会上听到 Schmandt 所作的关于黄石国家公园的研究报告后,她改变了想法[15]。她开始逐渐相信这两种观点,并坚信两者之中会有一个极具正确性的。

4. 地幔柱的基本特征

4.1. 地幔柱形成的机制和证据

认识地幔柱就必须了解重力分异,正是因为有重力分异启动使得地幔柱和液核才能进行正常的运动

[16]。地核周期性热膨胀使地壳地幔胀裂, 形成全球性大洋和大陆裂解事件, 为地幔柱上涌打开了通道, 裂隙在核幔边界造成的突然减压使重元素迅速气化, 并在液核膨胀内压下随轻元素一起上喷到地表, 产生了反重力分异运动[17]。所以, 全球发生的地表中内能的释放和地球自身的重力引起的分离是不一样的状态, 并且是相互对立的情况, 也体现了地球中从地表浅处到深处会发生能量和物质的转移和变化。区分这两种状态对研究地球物理化学十分重要。

因为大约受到了潮汐的影响, 当日夜在变长时就是地球的自传速度变化了, 发生这种改变是不可避免的[15]。地球各个圈层受到重力分异的影响会变得速度不一样, 地壳、地核和上地幔速度都会改变最终会导致地幔角降低速度, 地核会逐渐像东部前进[16]。这样会使地球各个圈层之间发生不同的速度运转。地球外部的变化可以加速地核, 各圈层中地核比地壳速度更快, 由于速度太快会发生离心作用, 会逐渐远离赤道前进, 两极处下降的液核旋涡形对流我们称之为离心对流, 地球内部物质理化状态变化就是重力分异与化学分异使地核自转加速, 导致核幔角动量交换的结果, 地球地核增速旋转导致外核发生的急剧地液化[16]。地球各个圈层被受影响, 各圈层有不同的速度, 地幔柱产生的热能, 从赤道往南极和北极前进, 到达的时候就进入了旋涡, 另外一部分就从两级出发到达赤道周围, 这样就变成了一个封闭的环形圈[13]。前者那种从赤道出发到达两级的类型能够对中间的大陆产生影响, 最终生成叫做古陆[17]。正是因为地幔柱的活动如此强烈, 造成了向极运动, 也就此产生了西伯利亚和澳大利亚往南部前行的状态[16]。因此, 可以发现在当时大部分会往南极和北极靠近, 接着发生大规模的冰期。

离心对流与重力分异一样, 也会产生上升流西移、下降流东移、向极运动东移、离极运动西移的科氏效应[17]。可以发现赤道地表下的地壳活动在逐渐的往西边移动, 是因为上地幔和地壳都在不断的像西边移动, 从而造成影响, 而平行赤道的水平地幔却是在往东部移动[15]。从前面的研究可以知道, 由南极北极移动至赤道的地幔活动程度较小, 造成的动能和热能也小, 而从赤道往两级的地幔活动造成的活动剧烈, 其引起的动能和热能较大, 最终会造成地核的速度减小[16]。因此, 这个机制起到了十分关键的作用, 特别是对于地幔活动造成的影响。这个机制可以时地球各个圈层之间的能量进行交换, 之后每个圈层就会有一样的角速度, 最后导致机制自动停止。

因为地幔柱的活动剧烈, 机会发生动能之间的变化, 当产生变化时, 多数的能量变成了热能, 流失到了地球的各个圈层, 每个圈层又因为会增加更多的能量变得和有温度差, 最后会形成热量的相互移动[17]。地幔柱活动使热量相互转移, 就会造成地磁往正极偏转, 热量之间也会有差异, 接着温度慢慢降低, 活动停止, 地幔柱又开始产生下一次的能量转移[16]。有学者认为在能量转移时产生的科氏效应, 中心的能量向两边释放, 再发生两边的能量向中心靠拢, 地磁的极性就会变成反向[15]。如果先发生了离心对流, 接着又产生了液核热对流, 那么在这两种机制的影响下, 会出现一种叫做地磁极性倒转的现象[17]。因此, 地幔柱会发生剧烈的活动, 使核幔边界的热能被释放, 温差被增加了, 导致热能对流时间过久, 影响了地磁的极性的变化。

简而言之, 正是因为核幔边界容易产生角动能互换与旋转时制造的热积累, 假设离心对流和液核热对流连续发生, 那么在这两种机制的影响下, 会出现一种叫做地磁极性倒转的现象, 以及还影响了地幔柱的剧烈活动, 都可以用地磁极性的改变来解释。

4.2. 地幔柱的形态特征

从地幔柱的形态特征方面来说, 当前对地幔柱进行了很多的实验研究和对地幔柱产物的观察, 了解了部分的地幔柱的基本特征。有学者认为是流体的强度是可以变化的, 同时也可以是一种稳定的一种有关于地幔柱活动时的结构组成, 他们重点研究了有关地幔柱活动产生的能量从深部往浅部移动的状态[11]。有学者 Whitehead-Luther 用被颜色侵染的水从高粘度和高密度的葡萄糖浆底部注入, 结果产生大头细尾形态。他们认为从地球深部高温低粘度 D 层产生的地幔柱的形态相似。同时还证明了, 地幔柱的头部的大

小和尾部粗细之间的比例与地幔柱与周围物质的粘度有关,粘度越大的话,尾柱就越细[12]。Yuen 和 Schubert (1976)建立了一种可变粘度流体二维的地幔柱的理想化模型方法。Li 和 Guan (1983)同时进行恒定粘度的流体轴对地幔柱的影响,也建立了可变粘度流体的二维地幔柱的模型。Olson 等人利用计算机得出的结果,与之前的学者也是相似的[13]。有研究表明,还有国外的学者丸山茂德等人借助地震层析成像技术去推测地幔柱的形态特征。

4.3. 地幔柱的化学成分特征

从地幔柱的化学成分方面来说,有许多学者认为地幔柱的头部在上升的时候是有自己源区的成分和从外界捕获的成分,而尾部则是一直不断变化,并且含有外部的成分,与大洋中脊玄武岩相比,大洋岛玄武岩富含大离子不相容元素,并且有较高的 $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ 和较高 $143\text{Nd}/144\text{Nd}$ [12]。据此 Compbell-Griffiths (1992)研究认为地幔柱的化学成分特征反映元素源于富集型地幔(相当于下地幔),因此可以构成热点的大洋岛玄武岩的化学成分也可以更好地反映出地幔柱的化学成分特征(地幔探针) [14]。最近,Griffiths 与 Campbell (1990)用自己的实验模型证实了上述结论,他们进行了大量的实验,终于在他们通过底部向冷的高粘度流体中注射热的低粘度染色同种流体时,最后形成的液体柱球状头部真的捕获一定量的周围流体,而尾部基本不含外来物质[13]。头冠的核部或尾柱的熔融物以苦橄质或科马提质为特征,而头冠外表层的熔融物以反映源区成分和周围地幔成分混合性质的玄武质为特征。通过这次实验,两位研究学者表明,地幔柱的不同的位置产生的熔融物是具有不同的化学成分。

4.4. 地幔柱的运动特征

从地幔柱的运动特征来说,从之前的研究可以发现,上地幔和下地幔的边界和核幔边界的不连续层都是地幔柱的起源位置,地幔柱要开始运动要借助一个热变层[13]。但是大多数的学者主要认为是源自核-幔边界的 D 层: 1) 研究分析表明,地幔柱的巨大头部的产生要依靠下地幔底部才会形成,并且还可以产生溢流玄武岩。2) 地幔柱之间相互固定的特征并不能表明地幔柱来源于上地幔底部。3) 从地幔柱的化学成分可以看出,它主要来源于下地幔的物质,而不符合上地幔的元素。地幔柱在上升时,会受到岩石圈的阻碍,不断吸收周边的物质,头部会逐渐变大,再加上地幔柱是高温、低密度的状态,很容易就成了巨大球状头部和细长尾部的地幔柱[14]。

有研究认为,假如 D 层由于外界条件的改变受到某种热扰动,其物质的流动性会增加,粘度会下降,在热梯度的驱动下,全部受影响的高温低粘度物质会向热边界层最低处聚集起来,不断的就会形成地幔柱(见图 2) [15]。而且近年来研究结果认为,地幔柱往上前进的速度很慢,认为一个典型的热幔柱从 D 层到达地表(或近地表)大约需要 100 Ma,其相对移动速度一般必须低于 1 cm/a,之所以会产生大规模的溢流玄武岩是地幔柱长时间的慢速流动汇聚形成的,在这个过程中,地幔柱的速度是不会加速的,因为受到大规模的喷发和往上延伸的影响,让地幔柱失去很多的热量,使得地幔柱不可以加速前进[17]。

在地幔柱的研究进展中有了重大的突破,研究表明,地幔柱是单一波形式向上脉冲式运动特征[12]。在实验中,Scott (1986)用一个非常细的针管进行实验,他把针管扎进蜂蜜容器的底部,这个时候产生了单波,但当他加速时,从线性的单波变成了非线性的程度,所以他的结论是地幔柱以单波脉冲形式向上运动的。他的观点在后面的学者研究中被证实了可信性[13]。Larson (1991)等人研究表明,地幔柱的单电子波段和脉冲波的运动周期特征可能是如何使地极和磁极导致温度周期方向反转、气候和全球海平面温度周期反转变化的一个重要科学原因[14]。

许多学者认为地幔柱上升至地表是需要穿过 D 层,并且在上升的过程中由于会受到阻碍而发生弯曲,所以他们还觉得大洋中的孤立火山也是由于同样的原因形成的[13]。但是在后来的专家学者研究证实了,

地幔是对流时是整体对流并不是分层的情况，并且速度不快，特别是下地幔是无应力条件下的对流[14]。所以，大部分学者认为地幔对流不会对地幔柱产生影响，正是因为地幔柱这种状态，所以才更能成为测量全球板块运动的最佳坐标。

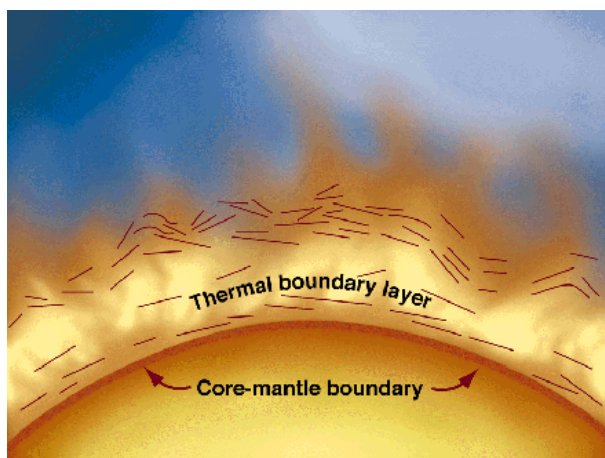


Figure 2. High temperature and low viscosity materials converge to form mantle plumes [9]

图 2. 高温低粘度物质汇聚形成地幔柱[9]

5. 地幔柱的研究意义

5.1. 太古宙科马提岩的成因探讨

一般认为，科马提岩尤其是来自太古宙绿岩带就是同时产生的拉板玄武岩的早期堆积产物。还有很多学者通过观察到绿岩带中有富含高镁元素的科马提岩，认为在太古宙时期的地幔温度比现在的地幔温度大约要高 200℃，现在的研究却推翻了之前的结论，科马提岩并不是拉板玄武岩的早期堆积物，现在的地幔温度与太古宙时期的温度差不多，并没有高出很多[15]。通过实验测试表科马提岩和太古宙玄武岩之间是断开的，他们的同位素组成也是明显不一样，其中科马提岩的氧化镁含量大于百分之十八，太古宙玄武岩氧化镁含量小于百分之十四。也说明了其中的绿岩带不会有许多的橄榄石矿物的分裂[17]。从此，因此，Campbell 认为地幔柱巨大蘑菇状头部的熔融物才是太古宙绿岩带中的玄武质岩石，地幔柱细长的尾部中的熔融物则是科马提岩。他的这种观点在后来被许多学者认同，都认为是科马提岩的真正成因[16]。

5.2. 热点构造和大陆溢流玄武岩

大陆溢流玄武岩的具体成因一直以来是一个谜题，板块理论始终无法很好的解释其原因。Morgan 作为地幔柱的创造者，他发现在全世界大部分的大陆溢流玄武岩区的周围存在着相对于的热点构造，如北大西洋三叠纪玄武岩/冰岛热点、RCuinon 热点、Karoo 玄武岩/Marion 热点、Yellows tone 热点、Rajmahaly 玄武岩/Kerguelen 热点、ParanaEtendek 玄武岩/Frist andaCunha 热点等等[15]。当然，地幔柱与地表作用时自然产生了这些热点火山岩链和大陆玄武岩[14]。不同的作用效果也不一样，地幔柱的长期活动会造成热点火山链，而地幔柱向地表上升会产生熔融物即大陆溢流玄武岩。许多学者研究证实了该观点，并且在发现所以热点构造中都出现了这种情况，因此热点火山岩的发生要晚于大陆溢流玄武岩[17]。

5.3. 地磁极性变化

一位外国学者 Larson 详细地深入研究了全球范围内的大洋洲的火山群和台地，海洋和火山链和大陆溢流的玄武岩的形成时间、体积和速率体积，与地磁极性变化时间之间是否存在关系，最后结果表明地

6. 结论

地幔柱除了上述的几个地质效应以外,还有很多其他的地质效应。纵观现在,实验、模拟手段使人们可以更加直接和精确地了解岩浆岩的矿物组成、物理化学、同位素、稀有和稀土元素构成等细节,研究视野从传统岩浆岩岩石学发展到壳-幔相互作用过程;但在板块构造学说面对人类社会对地球科学提出的严峻新挑战和板块构造解释大陆地质(如板内岩浆活动)遇到新的问题这样一个总背景下,20世纪90年代开始,跨世纪的研究目标是固体地球科学的大陆动力学,地质学者的研究重点则从岩石圈板块的运移及其地质影响转变为地幔对流的作用力和流体作用(如地幔柱岩浆作用)等全球地质作用。

在前人的研究理论基础上,本文更全面地总结了地幔柱的起源和发展,以及拓宽了对地幔柱的研究意义,认为受大陆动力学理论及大量高新实验测试技术与先进研究方法的推动,岩浆岩地质研究已逐渐转入到以壳-幔相互作用为突破口,探索岩浆岩带形成演化及其动力学的新阶段,更加完善了地幔柱的研究方向,对后期研究地球的深部地质作用提供了理论依据,随着科学技术的进步,未来关于地幔柱的研究将会取得更大的进步。

参考文献

- [1] Gillian R. Foulger. 地幔柱: 为什么现在怀疑[J]. 科学通报, 2005, 50(17): 1814-1819.
- [2] Geoffrey F. Davies. 地幔柱存在的依据[J]. 科学通报, 2005, 50(17): 1801-1813.
- [3] 肖龙. 地幔柱构造与地幔动力学——兼论其在中国大陆地质历史中的表现[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 239-245.
- [4] 王登红. 地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿——对中国西南部的探讨[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 67-72.
- [5] 李建康, 王登红. 地幔柱数值模拟研究进展[J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 13-20.
- [6] French, S.W. and Romanowicz, B. (2015) Broad Plumes Rooted at the Base of the Earth's Mantle beneath Major Hotspots. *Nature*, **525**, 95-99. <https://doi.org/10.1038/nature14876>
- [7] 徐学义, 杨军录. 地幔柱理论研究概述[J]. 西安工程学院学报, 1997(2): 46-51.
- [8] Eric, H. (2015) Mantle Plumes Seen Rising from Earth's Core. *Science*, **349**, 1032-1033. <https://doi.org/10.1126/science.349.6252.1032>
- [9] Loper, D.E. (1991) Mantle Plume. *Tectonophysics*, **187**, 373-384. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90476-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90476-9)
- [10] Wedepohl, K.H. and Baumann, A. (1999) Central European Cenozoic Plume Volcanism with OIB Characteristics and Indications of a Lower Mantle Source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **136**, 225-239. <https://doi.org/10.1007/s004100050534>
- [11] Gary L. Oppliger, 王登红, 王平安. 内华达大盆地中第三纪卡林型矿化与黄石公园古热点有关吗?[J]. 地质科学译丛, 1998, 15(1): 22-25.
- [12] 王登红. 卡林型金矿找矿新进展及其意义[J]. 地质地球化学, 2000, 28(1): 92-96.
- [13] Murphy, J.B., Oppliger, G.L., Brimhall, G.H., et al. (1998) Plume Modified Orogeny: An Example from the Western United States. *Geology*, **26**, 731-734. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0731:PMOAEF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0731:PMOAEF>2.3.CO;2)
- [14] Isley, A.E. and Abbott, D.H. (1999) Plume Related Mafic Volcanism and the Deposition of Banded Iron Formation. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 15461-15477. <https://doi.org/10.1029/1999JB900066>
- [15] 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 罗照华, 莫宣学, 吴宗絮. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. 现代地质, 1992, 6(3): 267-274.
- [16] 赵国春, 吴福元. 热幔柱构造——一种新的大地构造理论[J]. 世界地质, 1994, 13(1): 25-34.
- [17] Bonatt, I.E. (1990) Not So Hot "Hot Spots" in the Oceanic Mantle. *Science*, **250**, 107-111. <https://doi.org/10.1126/science.250.4977.107>
- [18] 王少怀. 地幔柱假说及地质意义[J]. 地质找矿论丛, 2005(S1): 1-6.