

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

肖 龙

中国地质大学 地球科学学院, 武汉 430074

摘 要:地幔柱构造是基于全地幔对流模式、主要依据热点火山活动提出的新的全球构造理论。它的主要表现形式和产物是地幔柱头上部地壳抬升、岩浆活动形成大火成岩省、大型放射状岩墙群,并导致大陆裂解、板块运动和大规模成矿,是生物灭绝、磁极倒转的诱因。中国大陆的地质演化历史中保存了多期地幔柱活动印记,它们主要是华南新元古代 Rodinia 地幔柱、古生代古特提斯和峨眉山地幔柱和中—新生代中国东部地幔柱构造事件。上述地幔柱活动产生了地壳抬升、强烈岩浆活动、大陆伸展与裂解、岩石圈剧烈减薄和大规模成矿等重要地质事件。

关 键 词:地幔柱;地幔柱构造;地幔动力学;岩浆活动;成矿作用;古特提斯;中国东部

中图分类号:P594 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2004)03-0239-07

传统的板块构造理论立足于岩石圈,板块运动指岩石圈板块在软流圈上的运动。而全球地震层析新资料揭示了岩石圈板片可以从地球表面俯冲到核幔边界,超级地幔柱也可以从核幔边界直接上涌到地壳表层并导致大量热点的产生;同时,全球范围内地幔中地震波高速异常和低速异常的连续出现,表明物质可以从上往下或者从下往上穿过 670 km 深处的不连续带。这一发现进一步证实了 670 km 边界可以抵抗但不能阻止大规模物质从上地幔进入下地幔;反之亦然。因此,研究板块运动动力必须考虑整个地幔的动力学背景。

那么,地球内部究竟存在什么样的物质运动方式?长期以来,地学家用地球内部的对流来解释地球热历史、地球内部物质成分及分异过程。最初的板块观点认为,地球表面板块运动的几何学是简单的,板块的水平位移使冷板块插入热地幔中;又因为大洋中脊的热物质上升而得以补偿,曾提出“双层对流”模式。“双层对流”是由上地幔中的小对流环与下地幔的大对流环所组成,两个对流体系是独立的。但最新的全球地震层析资料揭示了板块可俯冲到过去不可想象的深度,这对于“双层对流”模式无疑是一种挑战。本文结合中国大陆的地质演化历史评述

了地幔柱构造及其地幔动力学过程。

1 地幔柱构造与地幔动力学

地幔柱概念与板块构造学说既有本质上的不同,又密不可分。Holmes(1931)用地幔对流解释大陆漂移的驱动机制,成为解释海底扩张和板块构造学说的重要理论之一。但对地幔对流方式的认识还很肤浅。自 J. T. Wilson 和 W. J. Morgan 根据对夏威夷群岛—皇帝海链火山岩的年代学研究提出热点和地幔柱学说以来,对地幔柱的研究成为 20 世纪七八十年代地球深部研究的热点。地幔柱的早期模型认为存在有来自板内下地幔的上升热流和产生火山岩浆作用,它的位置是固定的,由于上覆板块的移动而在其上留下链状火山(岛),或形成大溢流玄武岩省。其后,由于大量地震层析资料的获得和实验模拟与认识上的新突破,提出了超级地幔柱和地幔柱构造等新概念和新理论^[3~8]。且这一认识已在火星和金星上得到验证^[9]。

地幔柱构造^[8]理论是通过地球和行星体内部物质和能量不同的转换运动方式,如以垂向翻转方式(MOMO, Major Overturn/ Major Orogeny^[10])来研究地球及行星体演化中的重大阶段及相应事件的

收稿日期:2004-02-09 收到,05-18 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40272040,40234052)

第一作者简介:肖龙(1963—),男,博士,教授,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:longxiao@cug.edu.cn.

新的全球和比较行星学构造理论。它与板块构造不同的是后者应用威尔逊旋回(一种由岛弧俯冲、海底扩张双层地幔对流所组成的板块构造图景),而地幔柱构造强调由于深部过程不平衡(主要起源于核幔边界的D层)导致的巨旋回幕式地壳穿透上、下地幔之间的间断面,从而对岩石圈与地壳产生作用。前者只说明了地球表层200 km内的现象,而后者揭示了地球深达核-幔边界的物质和能量运动方式,其幕式幔源物质流活动及其地球化学特征与主要地壳造山事件间的MOMO模式,成功地解释了深部过程控制地壳主要造山运动的机制,并可能为板块运动的原动力作出合理解释。地幔地震层析资料揭示了洋陆板块汇聚边界及大陆板块汇聚边界的俯冲板片可抵达地幔深部不同层次,乃至核幔边界超深俯冲的证据。其中大陆板块汇聚边界的地幔柱构造,为研究大陆板块汇聚边界的深部状态提供了更多的途径^[9]。这表明从“岩石圈动力学”到“地幔动力学”的地学研究新阶段已经到来^[11]。

2 地幔柱构造的表现形式

地幔柱构造是当今国际地学界研究的热点,也是一个争论的焦点。尽管有不少证据表明地幔柱可能起源于核幔边界,但最新的地震层析研究在对冰岛和黄石热点之下并没有追踪到超过600 km的低速体^[12,13],而且不同的研究者得出了完全不同的结论和解释,造成了地幔柱构造研究的新困惑^[14]。综合地质和地球物理对地幔柱的理解,地幔柱活动应该具有以下特点:长期火山活动轨迹(如夏威夷-皇帝岛链)、初期的溢流玄武岩、岩浆的高喷发速率、高氦同位素比值和垂向低速体。结合地幔柱上涌及其与岩石圈的相互作用过程,应该有早期上覆地壳的抬升、随后短时间内的大规模的岩浆活动、后期热垮塌和横向地幔对流导致的大陆裂解等地壳浅部地质响应。其中地壳抬升、大规模火山-岩浆活动和大陆裂解是常见的宏观地质现象,下面结合全球和我国的情况予以讨论。

(1) 地壳隆升:这是地幔柱模型所要求的最重要的地质响应之一^[15]。由于未能在全球典型的热点地区证实这一现象,所以持反对意见的科学家据此作为一个主要证据反对地幔柱理论。徐义刚等^[16~18]对我国峨眉山地幔柱的研究取得了突破性的进展。何斌等^[17]发现,峨眉山地幔柱上升对岩石圈地幔的撞击造成了短时间内(3 Ma以内)上覆地

壳1000m以上的抬升;为地幔柱构造的理论和实验模型提供了直接的地质证据,引起了国际地学界的广泛关注。

(2) 火山-岩浆活动:这是对地幔柱研究最多的内容^[1,2]。当前,岩石学家把洋岛火山岩和大陆大火成岩省解释为地幔柱岩浆活动的产物。因为从热点和大陆大火成岩省的产出位置、喷发速率和岩浆类型等都无法用板块构造得到圆满的解释。这一研究已经取得了很多成果^[19,20],尽管还存在某些不同的认识^[21~23]。

地幔柱岩浆活动的主要表现是形成大火成岩省(LIPs)和大型放射状岩墙群。LIPs主要由镁铁质的喷出岩和侵入岩组成^[15],包括大洋盆地溢流玄武岩及火山岛链、洋脊高地、大陆溢流玄武岩、火山型被动大陆边缘等。其岩石类型是以玄武质熔岩为主,也有苦橄岩、霞石岩和流纹岩等^[24]。其中苦橄质岩石通常形成于岩浆活动的早期,来源于较高温的地幔源区,并指示有异常高温地幔存在,即地幔柱型的岩浆作用。

大型放射状岩墙群的形成与地幔柱对岩石圈的撞击作用形成的放射状断裂系统有关,并成为识别前中生代大火成岩省和地幔柱的重要标志^[9]。

(3) 大陆裂解:超级大陆在历史上经历了多次的聚合和离散,尽管讨论较多和有较好地地质记录的是最近两次,即冈瓦纳-潘基亚和Rodinia^[25]。普遍认为超级大陆多次的聚合和离散循环与地幔过程有关,包括对流和地幔柱。200 Ma左右潘基亚大陆的聚合-离循环和地幔深部热状态的研究表明,当超级大陆之下的地幔较正常地幔更热时,超级大陆会影响到其下的地幔热状态,并使之扩张,产生大地水准面高地^[9,27,28],随之造成地幔柱的活动,并可能造成大陆裂解^[17],或至少有助于克拉通的支解^[17]。尽管地幔柱对大陆裂解所起的作用还缺乏很好的认识,但许多研究者认为,通常的地幔对流很难提供足够的力量使大陆岩石圈裂解,而地幔柱可能起到了主动作用^[29~31]。地幔柱活动可能造成大陆裂解的假说还得到了数值模拟结果的支持^[28]。

李正祥等^[32]和李献华等^[33,34]认为新元古代Rodinia超级地幔柱活动造成了超级大陆的裂解;张本仁等^[35]认为元古代西秦岭地区的几个块体是受地幔柱驱动从扬子地块裂解出去的;笔者^[36,37]曾指出古特提斯的开启可能是受地幔柱构造所控制,如川西中咱地块可解释为峨眉山地幔柱构造作用下从

扬子西缘裂解出去的^[18]。

(4) 大规模成矿: 由于地幔柱活动伴随的高温和高强度的岩浆活动, 必然造成大规模的成矿作用。F. Pirajno^[38]指出与地幔柱有关的成矿作用可分为两类: 与之有直接联系的岩浆矿床和与之有间接联系的热液矿床。前者又可分为与大型层状火山杂岩体有关的(如津巴布韦的大岩墙、南非布什维尔德 Cr-PGE 矿床和中国的攀枝花 V-Ti 磁铁矿矿床)、与溢流玄武岩中基性-超基性岩体有关的(如西伯利亚火成岩省中的诺里耳斯克-塔尔纳赫 Cu-Ni-PGE 矿床、东格陵兰的斯开尔里卡德和 Kap Edvard Holm Au-PGE 矿床)。热液矿床有板内非造山岩浆热液矿床(如与碱性环状岩体和碳酸岩有关的纳米比亚 Sn-W-Cu-REE 矿床、元古代奥林匹克坝 Cu-Au-U-REE-Fe 矿床、南非 Sabie-Pilgrim's Rest 中深成热液 Au 矿床、美国内华达和意大利 Tuscany 卡林型金矿)、大陆裂谷系统下的热液矿床(纳米比亚新元古代 Damara 和 Irumide 造山带和北美中大陆裂谷系金多金属矿床)和太古代脉状金矿床(如南非、西澳、津巴布韦、加拿大和俄罗斯等)。

朱炳泉等^[39]认为地幔柱产生大面积软流圈上涌, 沿深断裂形成岩浆房, 导致大规模溢流玄武岩裂隙式喷发。良好的地幔柱成矿系统常出现在岩石圈不连续界面和三叉拼接裂谷, 表现为地球化学急变带。地幔柱资源系统包括: 1) 地幔柱岩浆分异成矿系统, 从封闭到开放环境的岩浆分异形成了富钛、富镁和低钛三个岩浆端员, 构成了 Cu-Ni (PGE) 硫化物、Fe-Ti-V 氧化物和 Cu-Ag 自然金属三个成矿体系; 2) 地幔柱同生火山热液成矿系统, 包括赤铁矿-阳起石-硅化氧化铜、沥青化-绿泥石-浊沸石化自然铜和碳酸盐硫化物三个成矿体系; 3) 地幔柱同构造盆地油气系统, 巨量岩浆的快速成溢流导致地壳的快速沉降, 形成同构造热盆地, 具油气前景; 4) 地幔柱火山岩、硅质岩和富有机质砂页岩组合为优势生态体系提供了地质环境。

中国西南峨眉山大火成岩省的大规模成矿作用也很明显, 如位于地幔柱中心、扬子地块西缘的岩浆铜-镍硫化物和 PGE 矿床(白马寨、金宝山)^[40]、攀西地区的 V-Ti 磁铁矿和中部及东部外围(贵州-广西)的热液型 Pb-Zn 和卡林型金矿等。这些矿床在区域上构成了大致以地幔柱为中心, 向外依次出现岩浆型矿床、中低温热液矿床和低温热液矿床的趋势。因此对区域成矿研究和找矿预测也很有意义。

华南中生代有大量花岗质岩浆的侵位和成矿, 形成了以柿竹园钨多金属矿床、大厂和个旧超大型锡-多金属矿床和锡矿山铋矿床为代表的一大批稀有、稀土、铜、钨-锡-铋-铅-锌及金矿床。从空间上展示出以南岭中部为核心向四周的分布性, 即稀土、稀有、钨-锡、锡-钨-铅-铋-银、铋-金-钨。这一现象也被解释为与地幔柱作用有关^[41]。

地幔柱活动对成矿作用的间接作用表现于提供热源和形成板内裂谷盆地, 为成矿作用提供热动力条件和成矿物质聚集场所。形成的矿床类型以中-低温热液矿床为主, 如 Pb、Zn 和 Au、Ag、Sb 矿床等, 在时间上一般要明显晚于岩浆热液矿床。F. Pirajno^[38]对纳米比亚 Damara 新元古代地幔柱及其变质与成矿作用的研究发现, 该地区发育以地幔柱头为中心约 400 km 宽的变质梯度带, 而且金及其它金属的矿化空间上分布在角闪岩相和绿片岩相之间, 中心产出与花岗岩有关的 U-Th 和伟晶岩型 Sn-Ta-W 矿, 外围为 VMS 型 Zn-Cu-Au 矿床和时间上稍晚的热液型 Cu-Ag-Pb-Zn 矿床。

3 中国大陆的地幔柱构造

3.1 元古代: Rodinia 地幔柱

近年来夏林圻^[42~44]、夏祖春^[45]和张本仁等^[34]通过对祁连山中-新元古代火山岩、秦岭地区中-新元古代火山岩(包括碧口群、西乡群、郧西群、耀岭群和宽坪群等)的岩石和地球化学研究, 表明扬子板块西部岩石圈于新元古代早期发生裂开与扩张, 形成秦岭古洋盆; 上述火山活动及其产物的地质地球化学特征说明为地幔柱所驱动。李献华等^[32]根据对川西康定地区新元古代玄武质岩石和双峰式火山岩的研究, 指出其成因与地幔柱活动有关, 并可能是 Rodinia 期与超大陆裂解有关的岩浆活动的产物。能否将秦岭和祁连山地区的地幔柱成因火山岩也与 Rodinia 期的大陆裂解相联系, 是一个值得进一步探讨的问题。因为该地区火山岩的年龄跨度明显偏大(1228~800 Ma)^[35]。如果理解为同一个地幔柱构造事件的产物, 其活动时间能否有如此长乃是一个疑问。张本仁等^[34]的最新研究表明, 古元古代秦岭群、华北地块南缘的中元古代熊耳群^[46]火山岩形成于板内裂谷环境, 也可能是地幔柱作用的产物。这样, 如何从更大尺度、甚至全球构造演化的角度来解释这些地幔柱构造的形成与演化就显得十分重要。

3.2 古生代:特提斯-峨眉山地幔柱

古生代峨眉山地幔柱火山岩浆活动事件已经被广泛接受^[16,35~37,47~54]。笔者^[55]最近的研究表明,与之毗邻的三江古特提斯的地质演化也受地幔柱构造所控制。

滇川西部古特提斯域(造山带)保存了很好的地幔柱幕式活动的岩浆记录,证明地幔柱的活动主导了特提斯的演化进程。笔者将这一超级地幔柱暂称为“特提斯超级地幔柱”。它的活动始于约 420 Ma,终止于 250 Ma,历时约 170 Ma。鉴于早期形成的火山岩可能大都在大洋消减、闭合过程中潜入地幔进行再循环,现在给我们的印象是地幔柱活动的大部分时间里主要通过两期地幔上涌导致大陆块体的裂解(保山地块和昌都-思茅地块相继向南裂解)和诱发基性岩浆活动(如卧牛寺组玄武岩和孟连苦橄岩)^[54~56]。最后的表现形式则是地表隆升、裂解和玄武岩浆的大喷发“三箭齐发”(即晚二叠世峨眉山地幔柱事件),结束了其漫长的活动历史。

特提斯域几大陆块聚合、离散和再聚合不是随机的。从古地磁和古大陆再造的成果^[58]可知,早期聚合时多数地块由南向北漂移,到达赤道附近时由于特提斯超级地幔柱的活动扰乱了软流圈的地幔对流,失去了继续北上的推动力而在此会聚。随着超级地幔柱上涌力度的加强,位于其头部之上的保山、昌都-思茅和中咱-义敦地块先后从联合大陆上向南裂解出去,而华北地块则继续向北漂移。在晚二叠纪超级地幔柱活动结束后,软流圈地幔对流逐渐恢复到裂解前的状况,各地块继续向北快速漂移,于三叠纪晚期汇集于北纬 20~30°。侏罗纪-白垩纪由于新生地幔柱(北纬 25°左右)的活动,又打开了松潘海和怒江洋,进入新特提斯演化阶段。

3.3 中-新生代:中国东部地幔柱

中国东部中-新生代发生了岩石圈剧烈减薄、强烈的岩浆活动、大范围盆地和边缘海的形成和成矿作用大爆发^[58~65]。这些板内构造-岩浆事件最合理的解释是起因于其下的地幔柱活动。由于这些现象普遍出现在太平洋西北侧的(中国)大陆边缘,故可能同时受到太平洋俯冲板块和地幔柱的作用(subduction + plume,如美国西部盆岭地区就是黄石地幔柱与向东俯冲的太平洋板块相互作用的结果^[66])。从上述构造-岩浆事件的时空展布看,似乎与由于板块俯冲、弧后引张、扰动地幔对流并引起了地幔柱的活动的地幔动力学过程有关。可能有两种

机制,一是这种地幔上升流是平行于大陆边缘的线(带)状地幔上升流,所以不同于传统意义上的热点火山活动。二是地幔热柱起源于华北地块之下并导致了岩石圈的大规模拆沉和岩浆活动^[60,61];来自软流圈的新生玄武岩的底侵作用造成了华北地区的地壳加厚(55 km)^[63],或东侧太平洋板块的俯冲作用导致了地壳的侧向加厚增生^[58,59]为埃达克岩的形成提供了条件;其后继续受太平洋板块俯冲引起的弧后扩张效应影响,地幔柱头部水平方向的地幔流沿弧后扩张地区扩展和活动,形成更加广泛的面型岩浆活动和盆地与边缘海的形成。根据现有的地质资料,这两种解释都存在一些难以回答的问题。第一种解释提出了线性地幔上升流,有别于传统的地幔柱理论,但在世界其它地区还没有得到验证;中生代太平洋板块的俯冲引起的中国东部大陆地幔动力学过程还缺乏足够的证据进行全面的制约。第二种解释没有回答加厚的地壳为什么只出现在华北?华南的情形如何(没有出现指示厚地壳的埃达克岩)?显然这些困扰地质学界多年的问题还需要不断的研究和资料积累,才能逐渐完善提出的模型;或者提出新的、更加合理的模型。

参考文献(Reference):

- [1] Willson J T. A possible origin of the Hawaiian Island[J]. Can. J. Phys., 1963, 41: 863 - 870.
- [2] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. Nature, 1971, 280: 42 - 43.
- [3] Cox K G. A superplume in the mantle[J]. Nature, 1991, 352: 564 - 565.
- [4] Fuller M, Weeks R. Superplumes and superchrons[J]. Nature, 1992, 356: 16 - 17.
- [5] Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume[J]. Geology, 1991, 19: 54 - 550.
- [6] Hill R I. Mantle plume and continental tectonics[J]. Lithos., 1993, 30: 193 - 206.
- [7] Hill R I. Starting mantle plume and continental break-up[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1991, 104: 398 - 416.
- [8] Maruyama S. Plume tectonic[J]. J. Geol. Soc. Japan, 1994, 100: 24 - 49.
- [9] Condie K C. Mantle plumes and their record in Earth history [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1 - 306.
- [10] Stein M, Hofmann A W. Mantle plumes and episodic crustal growth[J]. Nature, 1994, 372: 63 - 68.
- [11] 许志琴, 赵志兴, 袁学诚, 姜枚. 板块下的构造及地幔动力学[J]. 地质通报, 2003, 22(3): 148 - 158.
Xu Zhiqin, Zhao Zhixin, Yuan Xuecheng, Jiang Mei. Tectonics beneath plates and mantle tectonics [J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(3): 148 - 158. (in Chinese with English abstract)

- [12] Foulger G R, Pritchard M J, Julian B R, Evans J R, Allen R M, Nolet G, Morgan W J, Bergsson B H, Erlendsson P, Jakobsdotti S, Ragnarsson S, Stefansson R, Vogfjord K. The seismic anomaly between Iceland extends down to the mantle transition zone and no deeper[J]. *Geophys. J. Int.*, 2000, 142: F1 - F5.
- [13] Foulger G R, Pritchard M J, Julian B R, Evans J R, Allen R M, Nolet G. Seismic tomography shows that upwelling beneath Iceland is confined to the upper mantle[J]. *Geophys. J. Int.*, 2001, 146: 504 - 530.
- [14] Ritsema J, Allen R M. The elusive mantle plume[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, 207: 1 - 12.
- [15] Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, 99: 79 - 93.
- [16] Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos.*, 2001, 58: 145 - 168.
- [17] He B, Xu Y G, Chung S L, Xiao L, Wang Y M. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, 213: 391 - 405.
- [18] Xiao L, Xu Y G, He B, He B, Pirajno P. Chemostratigraphy of flood basalts in the Ganze-Litang region and Zhongza block: implications for a western extension of the Emeishan Large Igneous Province, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78: 61 - 67.
- [19] Coffin F, Eldholm R W. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences [J]. *Rev. Geophys.*, 1994, 32: 1 - 36.
- [20] Sheth H C. Flood basalts and large igneous province provinces from deep mantle plumes: fact, fiction, and fallacy[J]. *Tectonophysics*, 1999, 311: 1 - 29.
- [21] Macdougall J D. Continental flood basalts[M]. *Norwell: Kluwer Academic*, 1988. 1 - 341.
- [22] 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.
- [23] Jones A P, Price G D, Price N J, DeCarli P S, Clegg R A. Impact induced melting and the development of large igneous provinces[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 202: 551 - 561.
- [24] Courtillot V, Feraud G, Maluski H, *et al.* Decan flood basalts and Cretaceous / Tertiary boundary [J]. *Nature*, 1988, 333: 843 - 846.
- [25] Hoffman H J. Speculations on Laurentia's first gigayear (2.0 - 1.0 Ga) [J]. *Geology*, 1989, 17: 135 - 138.
- [26] Roger J J W. A history of continents in the past three billion years[J]. *Journal of Geology*, 1996, 104: 91 - 107.
- [27] Anderson D L. Hotspots, polar wander, Mesozoic convection and the geoid[J]. *Nature*, 1982, 297: 391 - 393.
- [28] Gurnis M. Large-scale mantle convection and the aggregation and dispersal of supercontinents[J]. *Nature*, 1988, 332: 695 - 699.
- [29] Richards M A, Jones D L, Duncan R A, Depaolo D J. A mantle plume initiation model for the Wrangellia flood basalt and other ocean plateaus[J]. *Science*, 1991, 254: 263 - 267.
- [30] Storey B C. The role of mantle plumes in continental breakup: Case histories from Gondwana [J]. *Nature*, 1995, 377: 301 - 308.
- [31] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, Tapponnier P, Besse J. On causal links between flood basalts and continental breakup [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 166: 177 - 195.
- [32] Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. The Breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. *Earth Sci. Planet. Lett.*, 1999, 173: 171 - 181.
- [33] 李献华, 周汉文, 李正祥, 刘颖. 川西新元古代双峰式火山岩的微量元素和 Sm-Nd 同位素制约及其大地构造意义[J]. *地质科学*, 2002, 37(3): 264 - 276.
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Li Zhengxiang, Liu Ying. Late Proterozoic bi-modal volcanic rocks from western Sichuan: trace element and Sm-Nd isotopic evidences and tectonic implication [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(3): 264 - 276. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李献华. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *地球化学*, 1999, 28: 1 - 9.
- Li Xianhua. Late Proterozoic granites from western Guangxi Province: Zircon U-Pb chronology and tectonic implication [J]. *Geochimica*, 1999, 28: 1 - 9. (in Chinese with English abstract)
- [35] 张本仁, 高山, 张宏飞, 等. 秦岭造山带地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2002, 1 - 187.
- Zhang Benren, Gao Shan, Zhang Hongfei, *et al.* *Geochemistry of Qinling Orogen* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 1 - 187.
- [36] 肖龙, 徐义刚, 何斌. 峨眉地幔柱—岩石圈的相互作用: 来自低钛和高钛玄武岩的 Sr-Nd 和 O 同位素证据[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 207 - 217.
- Xiao Long, Xu Yigang, He Bin. Emei mantle plume-subcontinental lithosphere interaction: Sr-Nd and O isotopic evidences from low-Ti and high-Ti basalts [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(2): 207 - 217. (in Chinese with English abstract)
- [37] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 何斌. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉地幔柱关系——地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2003, 19(1): 38 - 48.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, He Bin. Late Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: Geochemical evidences [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 38 - 48. (in Chinese with English abstract)

- [38] Pirajno F. Ore deposits and Mantle plumes[M]. Kluwer Academic Publishers, 2000. 1 - 556.
- [39] 朱炳泉,常向阳,胡耀国,张正伟. 地球化学急变带与地幔柱资源系统[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,22(4): 287 - 293.
Zhu Binquan, Chang Xiangyang, Hu Yaoguo, Zhang Zhengwei. Geochemical steep zone and resource systems of mantle plumes[J]. Bulletin of Mineral. Petrol. and Geochem. 2003, 22(4): 287 - 293. (in Chinese with English abstract)
- [40] 陶琰,高振敏,罗泰义,祁敬东. 金宝山岩体铂族元素特征及成因意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,2004,23(1):28 - 31.
Tao Yan, Gao Zhenmin, Luo Tai Yi, Qi Jingdong. PGE in Jinbaoshan intrusion: possible evidence of mantle plume origin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(1):28 - 31. (in Chinese with English abstract)
- [41] 毛景文,李红艳,王登红,彭聪. 华南地区中生代多金属矿床形成与地幔柱关系[J]. 矿物岩石地球化学通报,1998,17(2):130 - 132.
Mao Jinwen, Li Hongyan, Wang Denghong, Peng Cong. Ore forming of Mesozoic polymetallic deposits in south China and its relationship with mantle plume [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1998, 17(2):130 - 132. (in Chinese with English abstract)
- [42] 夏林圻,夏祖春. 祁连-秦崕山系海相火山岩[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1991. 1 - 304.
Xia Linqi, Xia Zuchun. Submarine volcanic rocks of Qinglin orogen [M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1991. 1 - 304. (in Chinese)
- [43] 夏林圻,夏祖春,徐学义. 南秦岭中晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. 中国科学(D辑),1996,26(3): 237 - 243.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Middle-late Protozoic volcanic rocks form southern Qinglin and their relation to Precambrian continental breakup [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(3): 237 - 243. (in Chinese)
- [44] 夏林圻,夏祖春,徐学义. 南秦岭元古宙西乡群大陆溢流玄武岩的确定及其地质意义[J]. 地质论评,1996,42(6):513 - 522.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Protozoic Xixiang formation continental flood basalt from southern Qinglin: determination and implication [J]. Geological Review, 1996, 42(6):513 - 522. (in Chinese with English abstract)
- [45] 夏祖春,夏林圻,徐学义,赵江天. 碧口群火山岩性质及形成环境[J]. 地质论评,45(增刊):1999,681 - 688.
Xia Zuchun, Xia Linqi, Xu Xueyi, Zhao Jiangtian. Properties of Bikou Formation volcanic rocks and its geological setting [J]. Geological Review (supplement), 1999,45:681 - 688. (in Chinese with English abstract)
- [46] 金成伟,翟明国,夏斌,周美夫,赵太平. 华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因[J]. 岩石学报,2002,18(1):59 - 69.
Jin Chengwei, Zhai Mingguo, Xia Bin, Zhou Meifu, Zhao Taiping. Geochemistry and petrogenesis of Xionger Formation volcanic rocks from southern North China Block [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(1): 59 - 69. (in Chinese with English abstract)
- [47] 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.
Xu Yigang. Mantle plumes, large igneous provinces and their geological consequences [J]. Earth Science Frontier, 2002, 9(4): 341 - 353. (in Chinese with English abstract)
- [48] 卢记仁. 峨眉山地幔柱的动力学特征[J]. 地球学报,1996,17: 424 - 438.
Lu Jiren. Dynamics characteristics of the Emeishan mantle plume [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1996, 17: 424 - 438. (in Chinese with English abstract)
- [49] Song X Y, Zhou M F, Hou Z Q, Cao Z M, Wang Y L, Li Y G. Geochemical constraints on the mantle source of the Upper Permian Emeishan continental flood basalts, southwestern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75: 506 - 517.
- [50] 肖龙,徐义刚,梅厚钧,沙绍礼. 云南宾川地区峨眉山玄武岩的地球化学特征及时空演化[J]. 地质科学,2003,38(4): 478 - 494.
Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, Sha Shaoli. Geochemistry of Emeishan flood basalts at Binchuan area, SW China: rock types and temporal evolution[J]. Chinese J. Geology, 2003, 38(4): 478 - 494. (in Chinese with English abstract)
- [51] Xiao L, Xu Y G, Chung S L, He B. Chemostratigraphic correlation of Upper Permian lavas from Yunnan Province, China: Extent of the Emeishan large igneous province[J]. International Geology Review, 2003, 45: 753 - 766.
- [52] 何斌,徐义刚,肖龙,沙绍礼,王康明. 峨眉山大火成岩省形成和空间分布:来自沉积学的新证据[J]. 地质学报,2003,77(2): 194 - 202.
He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, Sha Shaoli, Wang Kangming. Timing and spatial distribution of Emeishan large igneous province: new evidence from sedimentary geology [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 194 - 202. (in Chinese with English abstract)
- [53] 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.
- [54] 肖龙,徐义刚,梅厚钧,于荣萍. 云南保山卧牛寺组玄武岩成因:地幔柱活动的产物? [J]. 岩石矿物学杂志,2003,22(1): 20 - 28
Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, Yu Rongping. Woniusi basalts from Baoshan, Yunnan Province: Plume origin? [J]. Petrological and Mineralogical Magazine, 2003, 22(1): 20 - 28. (in Chinese with English abstract)
- [55] 肖龙,徐义刚,何斌. 试论地幔柱构造与川滇西部古特提斯的演化[Z]. 2004.
Xiao Long, Xu Yigang, He Bin. On mantle plume tectonics and evolution of Paleo-Tethys of western Yunnan and Sichuan provinces [Z]. 2004. (in Chinese)

- [56] Fang Nianqiao, Niu Yaoling. Late Palaeozoic ultramafic lavas in Yunnan, SW China, and their geodynamic significance [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(1): 141 - 157.
- [57] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1 - 231.
Zhong Dalai. Paleotethys orogen of western Yunnan and Sichuan Provinces [M]. Beijing: Science Press, 1998. 1 - 231. (in Chinese)
- [58] 吴福元, 孙德有, 张广良, 何向文. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 379 - 388.
Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, He Xiangwen. Deep geodynamics of Yanshanian movement [J]. *Geological Journal of China Universities*. 2000, 6(3): 379 - 388. (in Chinese with English abstract)
- [59] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 51 - 60.
Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, Guo Chunli. Discussion on the lithosphere thinning in eastern China [J]. *Earth Science Frontier*, 2003, 10(3): 51 - 60. (in Chinese with English abstract)
- [60] 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 王宝德, 许传诗, 谢汝斌, 杨志宏, 毕伏科. 幔枝构造理论与找矿实践[M]. 北京: 地震出版社, 2002. 1 - 243.
Niu Shuyin, Li Hongyang, Sun Aiqun, Wang Baode, Xu Chuanshi, Xie Rubin, Yang Zhihong, Bi Fuke. Plume-branch structure theory and exploration practice [M]. Beijing: Seismic Press, 2002. 1 - 243. (in Chinese)
- [61] 董树文, 吴锡浩, 吴珍汉, 邓晋福, 高锐, 王成善. 论东亚大陆的构造翘变 - 燕山运动的全球含义[J]. *地质评论*, 2000, 46(1): 8 - 13.
Dong Shuwen, Wu Xihao, Wu Zhenhan, Deng Jinfu, Gao Rui, Wang Chengshan. On tectonic seesawing of the east Asia continent - Global implication of the Yanshanian Movement [J]. *Geological Review*, 2000, 46(1): 8 - 13. (in Chinese with English abstract)
- [62] 邓晋福, 赵海玲, 吴宗絮, 赖绍聪, 罗照华, 莫宣学. 中国大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. *现代地质*, 1992, 6(3): 267 - 273.
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Wu Zongxu, Lai Shaocong, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue. Mantle plume and lithospheric movement beneath Chinese continent [J]. *Geoscience*, 1992, 6(3): 267 - 273. (in Chinese with English abstract)
- [63] 邓晋福, 苏尚国, 赵海玲, 莫宣学, 肖庆辉, 周肃, 刘翠, 赵国春. 华北地区燕山期岩石圈减薄的深部过程[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 41 - 50.
Deng Jinfu, Su Shangguo, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, Xiao Qinghui, Zhou Su, Liu Cui, Zhao Guochun. Yanshanian lithosphere thinning and deep processes of northern China [J]. *Earth Science Frontier*, 2003, 10(3): 41 - 50. (in Chinese with English abstract)
- [64] Menzies M, Fan W, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithosphere and loss of > 120 km of Archean lithosphere, Sino - Korean Craton[A]. Pichard H, Alabaster T, Harris N, eds. *Magmatic precesses and plate tectonic* [M]. *Geol. Soc. Specil Pub.*, 1993, 76: 71 - 78.
- [65] Menzies M A, Xu Y. Geodynamics of the North China Craton [A]. Flower M, Chang S L, Lo C H, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia* [M]. *Am. Geophys. Union Geodynamic Series*, 1998, 27: 155 - 165.
- [66] Oppliger G L, Murphy J B, Brimhall G H. Is the ancestral Yellowstone hotspot responsible for the Tertiary "Carlin" mineralization in the Great Basin of Nevada? [J]. *Geology*, 1997, 25: 627 - 630.

Plume Tectonics and Mantle Dynamics : On Their Records in Chinese Continent

XIAO Long

Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract : Plume tectonic is a new global tectonic theory that was proposed based on whole mantle convection and hotspot volcanisms. Plume activity usually results in crustal uplift, extensive magmatism and forming large igneous provinces and giant dyke swarms, continental breakup, plate motion, and intensive metallogenesis. Mass extinction and magnetic polar reversion may also be related to plume tectonics. Multistage plume activities take place in the geological evolution of Chinese continent. They are Neoprotozoic Rodinia plume, Paleozoic Tethys and Emeishan plume, and Mesozoic and Cenozoic plume activity in eastern China. These plume tectonics had caused crustal uplift, extensive magmatism, continental extension and breakup, significant lithosphere thinning and mineralization.

Key words : mantle plume; plume tectonics; mantle dynamics; magmatism; Paleotethys; Eastern China