

·花岗岩新思维问题讨论·(8)

# 中国东部中生代大规模岩浆活动与长英质 大火成岩省问题

张 旗

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 笔者认为, 中国东部中生代大规模岩浆活动很难用太平洋板块的俯冲来解释, 中国东部中生代大规模岩浆活动可能相当于几个不同时期发育的长英质大火成岩省, 与中生代东亚超级地幔柱的活动有关。世界上存在两类大火成岩省, 一类以镁铁质岩为主(M-LIP); 另一类以长英质岩为主(F-LIP)。中国也存在上述两类大火成岩省, 二叠纪的峨眉山玄武岩属于前者, 中国东部中生代大规模的岩浆活动属于后者。二者可能均与地幔柱的活动有关, 不同在于镁铁质大火成岩省的地幔柱上升停滞在岩石圈底部, 在那里发生部分熔融形成大规模玄武岩喷发, 而与长英质大火成岩省有关的地幔柱可抵达下地壳底部直接烘烤和加热下地壳, 形成长英质成分的岩浆岩。学术界通常认为中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块向西俯冲导致的软流圈地幔上升有关, 本文却认为它可能与来自下地幔的地幔柱有关。大火成岩省矿产丰富, 与镁铁质大火成岩省有关的矿产有铜、镍、铬、铂、钯等, 与长英质大火成岩省有关的矿产有金、铜、钨、锡、钼、铋、锑、铀等。

**关键词:** 镁铁质大火成岩省, 长英质大火成岩省, 大规模岩浆活动, 中国东部, 中生代, 地幔柱

中图分类号: P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)04-0557-08

## A discussion on Mesozoic large scale magmatism and felsic large igneous province in eastern China

ZHANG Qi

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The author believes that it is very difficult to explain large-scale magmatism in eastern China during Mesozoic with the hypothesis of Pacific plate subduction, and that the magmatism might be equivalent to several felsic large igneous provinces in different periods, probably related to the Mesozoic super mantle plume activity in East Asia. There are two types of large igneous provinces in the world: one is mainly mafic LIP, and the other is felsic LIP. The two types of large igneous provinces in China are respectively represented by the Permian Emeishan basalt and the eastern China large-scale magmatic activity. Both were possibly related to the plume activities; nevertheless, in the mafic large igneous province, massive basalt eruption took place together with partial melting when the plume migrated upward to the bottom of the lithosphere, whereas in the felsic igneous province, the magmatic formation of felsic composition could directly bake and heat the lower crust when the plume reached the crustal bottom. Researchers generally consider that the large-scale magmatic activity during Mesozoic was related to westward subduction and asthenosphere uplift of Pacific plate. In this paper the author

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91014001)

作者简介: 张 旗(1937-), 男, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: zq1937@sina.com

believes that the large-scale magmatic activity was probably related to the plume from the lower mantle. The large igneous province has rich mineral resources: Resources such as copper, nickel, chromium, platinum and palladium might be related to the mafic igneous province, whereas resources like gold, copper, tungsten, tin, molybdenum, bismuth, antimony and uranium might be related to the felsic large igneous province.

**Key words:** mafic large igneous province; felsic large igneous province; large-scale magmatic activity; east China; Mesozoic; mantle plume

前文(张旗, 2013)提出,中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块俯冲无关,既然如此,那它们是怎么形成的呢?笔者认为,很可能与中生代的东亚超级地幔柱活动有关,是这个超级地幔柱引发了中国东部中生代一系列大规模岩浆活动。国内不少学者很早就敏感地意识到这个问题,指出中国东部中生代岩浆活动在规模上完全可以和火成岩省媲美,是另一类长英质的大火成岩省,与地幔柱的活动有关(谢灵克等, 1996; 陶奎元等, 1999; 毛建仁等, 1999; 毛景文等, 1999; 谢桂青等, 2001; 赵军红等, 2001; 王德滋和周金城, 2005),虽然该观点不为大多数学者所接受。其实,国外部分学者很早就提出大火成岩省可以分为镁铁质和长英质(或硅质)两类的说法(Lanphere *et al.*, 1980; Cameron *et al.*, 1980; Fisher *et al.*, 1984; Pankhurst *et al.*, 1998; Hildreth *et al.*, 1991; Bryan *et al.*, 2000, 2002; Sharma, 2004, 2005; Rajesh and Santosh, 2004; Jordan, 2005; Sensarma *et al.*, 2004; Sensarma, 2007; Sheth, 2007; Bryan and Ernst, 2008)。长英质或硅质的大火成岩省可以流纹岩为主(如南美洲南端的 Patagonia 和 West Antarctica、澳大利亚的 Whitsunday、墨西哥的 Sierra Madre Occidental),或以安山岩为主(如安第斯、印度尼西亚、美国西部的卡斯卡德斯),或为双峰式(如美国黄石公园的 Snake River-High Lava Plains)。但是,国内学术界似乎还不怎么认可。本文赞同中国东部中生代大规模中酸性岩浆活动属于大火成岩省的见解,认为它不是来自上地幔软流圈的上涌,与太平洋板块的向西俯冲无关,而是与地幔柱的活动有关(张旗和李承东, 2012)。

## 1 两类大火成岩省

大火成岩省(Large igneous province, LIP)的含义是指连续的、体积庞大的由镁铁质火山岩及伴生的侵入岩所构成的岩浆建造,包括大陆溢流玄武岩、

火山被动陆缘、大洋高原、海岭、海山群和洋盆溢流玄武岩,覆盖面积在  $10^5 \text{ km}^2$  以上(Coffin and Eldholm, 1991, 1994; Bryan and Ernst, 2008)。最初的 LIP 只限定镁铁-超镁铁质岩,不包括长英质岩浆岩。后续的研究认为, LIP 主要是镁铁质的,有少量超镁铁质的,也可以有一些长英质(或硅质)的(Bryan and Ernst, 2008)。后者主要由酸性、中酸性熔结凝灰岩及与之有成因联系的花岗岩构成,其体积可与镁铁质大火成岩省比拟。这类熔结凝灰岩省大多分布于环太平洋中生代火山岩带的后缘位置(王德滋和周金城, 2005; Sheth, 2007; Bryan and Ernst, 2008)。有人认为长英质大火成岩省可以产于板块内部,也可以产于板块边缘,与板块俯冲有关,如安第斯大规模安山岩大火成岩省(Sheth, 2007); 有人认为硅质大火成岩省产于板块内部,只与地幔柱的活动有关(Bryan and Ernst, 2008)。

最近, Sheth (2007)、Bryan 和 Ernst (2008) 分别对全球大火成岩省重新进行了分类。Sheth (2007) 的分类特别关注长英质大火成岩省,还特别强调该分类与岩浆岩的成分、构造环境及侵位机制无关。他划分出两类大火成岩省:一类为大火山岩省(LVPs, 如德干和 Whitsunday),另一类为大深成岩省(LPPs, 包括镁铁-超镁铁岩侵入岩、岩墙群、岩席群、花岗岩岩基),包括了长英质、镁铁质、超镁铁质岩,可以是亚碱性或碱性系列的,侵入在大陆或大洋环境。在此基础上,他又把大火成岩省分为 4 个亚类:① 主要或全部由镁铁质岩组成的大玄武岩省(LBPs, 如德干、翁通爪哇);② 主要由长英质火山岩组成的大流纹岩省(LRPs, 如 Whitsunday、Sierra Madre Occidental);③ 主要由安山岩组成的大安山岩省(LAPs, 如安第斯、印度尼西亚、卡斯卡德斯);④ 双峰式大玄武岩-流纹岩省(LBRPs, 如 Snake River-High Lava Plains)。在他的分类中,大花岗岩省(LGPs)被包括在大深成岩省(LPPs)中了。

分类只强调成分和规模,不包括成因的见解是正确的。Sheth (2007) 指出,处于板块汇聚边界的大

火成岩省(如安第斯)可能与俯冲带导致的软流圈上涌有关;处于板块内部的大火成岩省(不论镁铁质或长英质)可能与地幔柱的活动有关。这样的解释可能是可信的,一个最简单的理由是:大火成岩省以规模巨大著称,规模巨大表明供给源区的热流巨大。板块边缘可以受益于板块的俯冲作用,板块内部则只有地幔柱是可能的候选者了,虽然关于地幔柱的概念存在争论。但是,绝大多数规模巨大的洋底玄武岩和洋岛玄武岩以及镁铁质大火成岩省均来自660 km的上下地幔边界或2 900 km的核幔边界是争论不大的。地幔柱与非地幔柱之间最大的区别在于温度,地幔柱温度高、黏性低,必然有一个向上的浮力,地幔柱上升即是这样发生的(图1,示地幔热柱上侵到约100 km厚的大洋岩石圈底部,并在深灰色区域发生部分熔融,虚线为等温线,实线示地幔对流,箭头指示对流方向)。

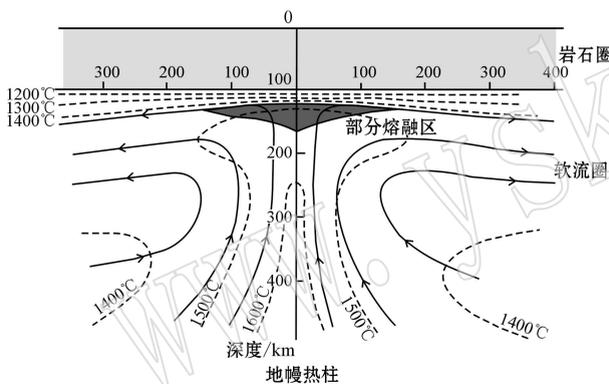


图1 地幔热柱结构图(转引自 Wilson, 1989)

Fig. 1 Structure of a thermal mantle plume (after Wilson, 1989)

镁铁质大火成岩省与长英质大火成岩省的区别大致如下(表1):

(1) 镁铁质大火成岩省以发育拉斑质玄武岩(及层状侵入体)为特征,如 Ontong Java、北大西洋第三纪玄武岩、西伯利亚玄武岩、德干高原玄武岩、南非布什维尔德层状侵入体以及峨眉山玄武岩等,而长英质大火成岩省以发育大规模中酸性岩浆活动为特征,基性岩浆活动很少,如中国东部中生代的几个大火成岩省,从大兴安岭直至华南,详见前文(张旗, 2013)。国外的长英质大火成岩省据 Bryan 等(2002)以及王德滋和周金城(2005)的归纳,几乎均与酸性、中酸性的熔结凝灰岩有关。它们的体积庞大,主要由英安岩和流纹岩组成(体积超过75%,大多是钙碱性和I型的),活动时间较长(可能超过40~50 Ma),时空上可能与镁铁质大火成岩省及板块破裂背景有关(Bryan *et al.*, 2002; Bryan and Ernst, 2008),如南美洲南端的 Patagonia 及与之毗邻的 West Antarctica、澳大利亚昆士兰州的 Whitsunday、墨西哥的 Sierra Madre Occidental 以及美国的黄石公园等。

(2) 与地幔柱有关的镁铁质和长英质大火成岩省可能均来自660 km的上下地幔边界或2 900 km的核幔边界D"层,不同之处在于镁铁质地幔柱上升并停滞在岩石圈底部,在那里发生部分熔融形成玄武质岩浆房(图2a),大火成岩省虽然是瞬间(喷发)形成的(在1~5 Ma期间),但其在岩石圈底部聚集和部分熔融可能也需要很长的时间,其持续喷发和侵入的时间可长达50 Ma(Bryan and Ernst, 2008)。

表1 镁铁质大火成岩省与长英质大火成岩省对比

Table 1 Comparing to mafic- and felsic-large igneous provinces

	镁铁质大火成岩省(M-LIP)	长英质大火成岩省(F-LIP)
表现形式	镁铁质和超镁铁质火山岩或侵入岩	长英质火山岩和/或侵入岩
时间范围	75%以上体积的岩浆在瞬间形成(<5 Ma)	长时间形成(几十Ma)
地幔柱到达部位	岩石圈底部	下地壳底部(如果与板块俯冲有关,到达下地壳底部的是软流圈地幔)
地幔特征	富集地幔	交代地幔(含更多水和挥发分)或软流圈地幔
地幔温度	较高,有苦橄岩出现	较低
岩浆熔融源区	软流圈地幔顶部	下地壳底部
矿产	金、铜、镍、铬、铂、钨、铁	金、铜、钨、钨、锡、铅、锌、铋、铈、REE
实例	德干高原玄武岩、翁通爪哇、津巴布韦大岩墙、西伯利亚暗色岩、峨眉山玄武岩、布什维尔德层状侵入体	中国东部、南美的 Patagonia、澳大利亚的 Whitsunday、墨西哥的 Sierra Madre Occidental、安第斯

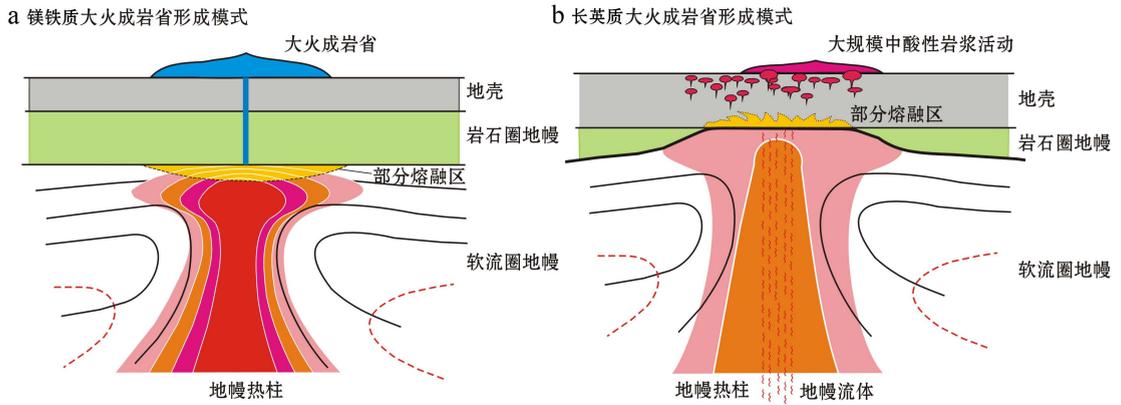


图 2 两类大火成岩省形成模式示意图

Fig. 2 Schematic model on the two types large igneous provinces

而长英质地幔柱可抵达下地壳底部(图 2b),直接烘烤和加热下地壳,使之发生部分熔融形成中酸性成分的大火成岩省。岩浆活动持续的时间取决于地幔柱在下地壳底部能够停留多久,因此,岩浆活动可以持续很长的时间(几十 Ma)。图 2 中,红色虚线为等温线(1 400℃),黑色实线示地幔对流轨迹(同图 1);地幔热柱不同颜色示温度的不同,红色最高(约 1 600℃),粉色最低(>1 400℃);红色弯曲短线示地幔流体;形成镁铁质 LIP 的地幔热柱有一个狭窄的高温柱尾(左图的红色区域),长英质 LIP 的地幔热柱没有,但可能存在地幔流体(右图的中部);镁铁质 LIP 的地幔热柱部分熔融区在岩石圈底部的软流圈内(左图的棕色区域),产生的是玄武质岩浆(左图的蓝色区域);长英质 LIP 的地幔热柱部分熔融区在下地壳底部(右图的棕色区域),形成的是中酸性岩浆。

(3) 镁铁质大火成岩省以玄武质岩浆为主且大多伴有苦橄质岩浆,表明地幔柱的温度很高,是富集地幔在干的条件下高温部分熔融形成的,水和挥发分较少。而长英质大火成岩省很少出现镁铁质组分(如中国东部中生代岩浆活动),更少见有苦橄质成分的岩浆出现,表明地幔没有发生大规模的部分熔融,地幔柱的温度也较低(图 2)。但是,地幔柱能够到达下地壳底部,需要穿过岩石圈地幔(破坏岩石圈地幔)或熔化岩石圈地幔,使岩石圈地幔转化为具有软流圈地幔的性质。中国东部长英质大火成岩省未见苦橄岩,代之出现的是橄榄安粗岩省(分布于苏浙皖鲁地区,据王德滋等,1996)和赞岐岩省(分布于晋冀鲁豫苏皖地区,据张旗等,2008),暗示部分地幔具有交代地幔的性质,地幔富水和挥发分(图 2b)。据目前的资料,中国东部中生代中基性岩浆活动规模

很小,仍然以零星的玄武质岩浆为主,橄榄安粗岩类和赞岐岩仅局部出现,说明地幔存在不均一性。

(4) 地幔柱温度高、黏性低,能够带来大量的金属矿产,大火成岩省通常是找矿的良好对象,如与镁铁质大火成岩省有关的金、铜、镍、铬、钒、钛、铁、铂、钼等。吴福元等(2000)指出,软流圈地幔的上涌直接烘烤下地壳产生两个效应:一个是使地壳发生大规模的高温变质作用和部分熔融作用,熔融作用的残留物通过拆沉作用返回地幔(注:拆沉应当仅限于有加厚地壳的部位),使地壳向成分成熟度增高的方向演化;另一个是从成矿角度来考虑的,软流圈地幔携带的大量成矿物质和幔源流体由于软流圈的热效应,还将导致壳内地壳尺度的大规模流体循环,有利于成矿作用。故中国东部长英质大火成岩省也是找矿的最佳对象,既可以寻找源于地幔的矿产(如金和铜),也可寻找来自地壳的矿产(如钨、锡、钼、铋、锑、铀等)。因此,岩石圈减薄是大规模内生成矿作用发生的最有利的地球动力学背景。

## 2 中国东部中生代 5 个长英质大火成岩省

根据目前的资料,中生代的中国东部大火成岩省大体上可分为 5 个大火成岩省(张旗和李承东,2012)(图 3,据张旗(2013)的图 4 简化,图中不同颜色示 5 个不同的长英质大火成岩省:鄂霍茨克(浅绿色)、张广才岭-小兴安岭(淡黄色)、华北-大兴安岭(淡蓝色)、华南(绿色粗虚线圈定的斜线范围)和东南沿海大火成岩省(粉色),年龄(如 160~150 Ma)代表大火成岩省集中活动的时间,红色粗虚线示中

国东部高原的范围],按时间先后为:

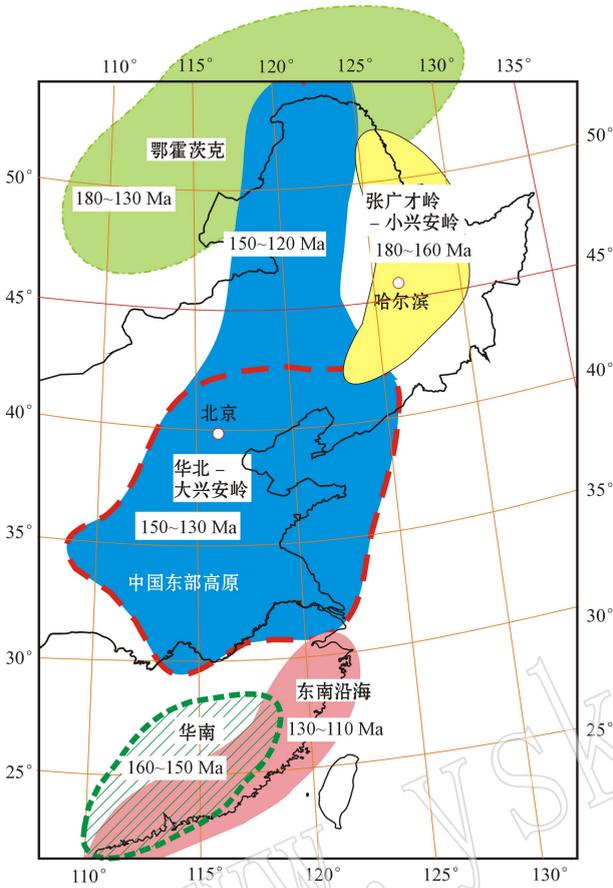


图3 中国东部中生代长英质大火成岩省分布图

Fig. 3 Distribution of Mesozoic felsic large igneous province in eastern China

(1) 张广才岭-小兴安岭大火成岩省。位于松辽盆地东部(松辽盆地底部大部可能属于该火成岩省范围)与兴凯地块-那丹哈达地块之间。南北长约1 200 km,东西最宽处500 km,面积约45万 $\text{km}^2$ 。大规模岩浆活动的时间大体在早中侏罗世(约180~160 Ma)期间。

(2) 鄂霍茨克大火成岩省。主要在俄罗斯和蒙古境内,擦大兴安岭北端而过,北东-南西向分布,长宽约900 km $\times$ 1 800 km,面积约135万 $\text{km}^2$ 。估计岩浆活动的时间在180~130 Ma期间。

(3) 华南大火成岩省。分布于湘赣粤闽4省,北东-南西向分布,长宽约600 $\times$ 1 200 km,面积约45万 $\text{km}^2$ ,岩浆活动最发育的时间大约在160~150 Ma期间。

(4) 华北-大兴安岭大火成岩省。其范围从黑龙江以北直抵长江中下游,可能是中国东部最大的大

火成岩省(图3,东西最宽达1 200 km,南北长超过3 000 km,面积约210万 $\text{km}^2$ )。南部在165~130 Ma期间崛起为高原。该大火成岩省发育的时间约在150~130 Ma之间,北部可能延续至120 Ma。

(5) 东南沿海大火成岩省。原来笔者提出的是“东部沿海大火成岩省”,该大火成岩省分为两段:南部位于浙闽赣粤四省;北部包括苏鲁辽的东部沿海地区,为一南北向狭长的大火成岩省(张旗和李承东,2012)。鉴于江苏一段大片覆盖没有资料,胶辽岩浆活动强度也远不及南方,故取消北部部分,仅将南部浙闽赣粤四省划入大火成岩省范围,长宽约300 $\times$ 1 300 km,面积约35万 $\text{km}^2$ 。岩浆活动时间在130~110 Ma,部分地区可延续到100 Ma之前。

上述资料表明,中国东部超级地幔柱活动是此起彼伏的,大规模岩浆活动最早始于东北(约180 Ma?):分别位于张广才岭-小兴安岭和大兴安岭北端(鄂霍茨克),张广才岭-小兴安岭最早结束,当张广才岭-小兴安岭结束时,正是华南大规模岩浆活动峰期(160 Ma左右),而当华南大体结束大规模岩浆活动时,华北-大兴安岭才开始大规模岩浆活动(150~130 Ma)。130 Ma之前。这之后,岩浆活动转移至东南沿海,终止于早白垩世晚期(100 Ma左右)。大火成岩省规模不同,最小约35万 $\text{km}^2$ ,最大超过210万 $\text{km}^2$ ,相差约7倍。

### 3 讨论

(1) 中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块的俯冲有关吗?

学术界用板块俯冲解释中国东部中生代大规模岩浆活动已经40年了,几个重要的问题始终没有得到合理的解释(张旗,2013),说明用板块俯冲理论解释存在巨大的困难。板块构造解释不了中国东部问题,其中的一个关键是,岛弧岩浆活动的规模主要呈带状分布,长可达几千公里(如安第斯、马里亚纳群岛、琉球群岛、千岛群岛等),宽度不超过板块俯冲引发的地幔楔对流范围,通常为300 km左右,极限不超过800 km(安第斯),包括所谓的平板俯冲在内。而中国东部岩浆活动大多呈面型分布,宽度超过1 000 km,离俯冲带很远,这是板块俯冲无法解释的,即使是平板俯冲也不可能达到。正是由于其规模巨大,板块俯冲达不到,才考虑与地幔柱的活动有关的。

(2)大火成岩省是瞬间喷发的,中国东部中酸性岩浆岩活动并非瞬间形成,不符合大火成岩省的规律。

西伯利亚暗色岩和印度德干高原玄武岩是在 1 Ma 期间喷出的,峨眉山玄武岩主要是在 258~260 Ma 期间喷出的(He *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2007)。瞬间喷发已经成为大火成岩省的重要标志之一。但是,火山岩喷出的时间虽然短暂,积蓄这么多的火山岩体积绝非瞬间能够完成的,可能需要在岩石圈之下积累相当长的一段时间才行,而且还需要与 MORB 进行充分的物质交换作用(使最后喷出的玄武岩具有 E-MORB 的特征)。喷出则是由于岩浆积累到一定程度,对上覆岩石圈的挤压造成破裂,压力释放,一涌而出的。因此,大火成岩省是瞬间喷出的,并不等于它是瞬间积累完成的。从岩浆形成的角度,大火成岩省可能经历了很长的岩浆积累的过程,镁铁质大火成岩省是瞬间喷出的,而长英质大火成岩省可能是随机喷出和侵位的,成熟一部分喷出(或侵位)一部分。因此,镁铁质大火成岩省是长期积累,瞬间形成,长英质大火成岩省则是长期积累,随机形成。

(3)地幔为什么会有大规模活动?地幔柱上涌为什么是在东亚?为什么来回漂移?

上述问题目前笔者还回答不了。笔者认为,任何问题都是可以研究的,但是,并不是任何问题都有答案的。就现在科学发展的水平来说,人们尚未认知和无法回答的自然现象还太多太多。例如,夏威夷热点为什么出现在夏威夷而不在上海?黄石公园为什么在黄石公园不在加利福尼亚?大西洋中脊位于大西洋之间,太平洋中隆为什么不在太平洋中间而在太平洋东部?峨眉山玄武岩为什么在川滇黔而不在东北?类似的问题还多得很,许多都是很有意义的,是人们不了解的,现在还无法给出令人信服的答案。有些有了答案,但是,可能不止一种答案,还存在许多不可预测的因素。人们认识世界是一个不断的过程,研究得越深入,问题越多。一个岩体只有 1~2 个年龄可能比较容易解释,如果做 20 个年龄,就可能解释不了的现象。我们做研究,首先要面对事实,然后对事实做出尽可能合理的解释。我们现在知道,中国东部存在大规模岩浆活动,人们已经尝试用太平洋板块的俯冲来解释,我们则尝试用另外的方法来解释。其逻辑推理过程大致如下:首先,我们必须承认这个基本的事实,即中生代在中国东

部存在大规模岩浆活动。其次,有一定规模的岩浆活动(例如花岗岩)必定来自下地壳,必须有热源的供给,这个热源不是底侵的玄武岩就是软流圈的上涌。板块俯冲是一个可能的来源,地幔柱也是一个可能的来源。第三,板块俯冲是一个比较好的合理的解释,但是,板块俯冲是有边界的,超过这个边界即不可能起作用了。中国东部大规模岩浆活动的位置已经远远超过板块俯冲理论上可能达到的距离,故我们必须另辟蹊径,寻求更加合理的解释。笔者认为,板块俯冲解释不了中国东部大规模岩浆活动问题,而长英质大火成岩省可能是一个比较好的解释。当然,还有许多问题不清楚,需要继续研究。

## 4 结论

(1)世界上存在两类大火成岩省:一类以镁铁质岩为主(包括少量超镁铁质和长英质岩),称为镁铁质大火成岩省;另一类以中酸性岩浆岩为主,称为长英质大火成岩省(包括极少量镁铁质岩)。两类大火成岩省可能均与地幔柱的活动有关(安第斯除外),不同在于与镁铁质大火成岩省有关的地幔柱上升停滞在岩石圈底部,在那里发生部分熔融形成玄武质岩浆房,而与长英质大火成岩省有关的地幔柱可抵达下地壳底部直接烘烤和加热下地壳,使之发生部分熔融形成中酸性成分的大火成岩省。不论镁铁质还是长英质大火成岩省,如果出现苦橄质岩浆,表明地幔柱的温度很高;如果出现橄榄安粗岩或赞岐岩,则指示地幔柱的温度较低,部分可能含水。大火成岩省矿产丰富,与镁铁质大火成岩省有关的有铜、镍、铬、铂、钯等,与长英质大火成岩省有关的有金、铜、钨、锡、钼、铋、锑、铀等。

(2)中国东部中生代大规模岩浆活动的时空分布很难用太平洋板块的俯冲来解释,而可能与东亚超级地幔柱的活动有关。本文把中国东部分为 5 个大火成岩省:张广才岭-小兴安岭大火成岩省(约 180~160 Ma)、鄂霍茨克大火成岩省(主要在俄罗斯和蒙古境内,擦大兴安岭北端而过,180~130 Ma)、华南大火成岩省(160~150 Ma)、华北-大兴安岭大火成岩省(150~130 Ma)和东南沿海大火成岩省(130~110 Ma)。时代从侏罗纪-白垩纪,东北最早,华南其次,再后是华北和东北的西部,最晚在东南沿海,规模已经大大缩小了。

(3)存在问题:首先,中国东部虽然已经积累了

相当多的中酸性岩浆岩的年龄和地球化学资料,但是,许多仍然是不清楚的,在总体把握上仍然是不充分的。例如东北大兴安岭、张广才岭和小兴安岭大规模岩浆活动的时间可能仍然有很大的不确定性。其次,各大火成岩省之间是否存在联系,是什么关系仍然是一个谜。第三,东亚超级地幔柱可能是存在的,对于它的成因我们还知之甚少,它为什么能够形成长英质大火成岩省而不是镁铁质大火成岩省,它是什么性质的仍然不清楚,需要探讨的问题还很多。

毋庸置疑,中国东部中生代岩浆活动是中国最重要的地质问题之一,国内外绝大多数学者都主张用太平洋板块的俯冲来解释。但是,几十年来累积如山的文献始终给不出令人满意的答案(张旗, 2013),故笔者才尝试换一个思路去探索这个问题。希望笔者的尝试能够打开一条缝隙,使年轻人知道,任何一个科学问题都不只有一种答案,主流的、众说一词的见解并非不可动摇,百花齐放的方针是科学研究必须坚持的。

后记 本文已三易其稿,最后一稿与原稿相比已面目全非。感谢两位审稿人,尤其是第二位审稿人严格、认真的态度,使笔者反复认真思考原文中的一些问题,回过头再去看几篇文献,并进行了大刀阔斧的修改。本文经历的审稿-修改-再审稿-再修改过程,再一次体现了人类认识真理的否定之否定规律。最后一稿否定了原稿中的错误部分,保留了原稿中的正确部分,补充了新的证据,得出了新的结论。当然,本文的结论并非终极认识,仍然属于阶段性成果,仍然可以修改。因为,人们在认识真理的道路上跋涉是永无止境的。

## References

- Bryan S E and Ernst R E. 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) [J]. *Earth Science Reviews*, 86: 175~202.
- Bryan S E, Ewart A, Stephens C J, *et al.* 2000. The Whitsunday volcanic province, central Queensland, Australia: Lithologic and stratigraphic investigations of a silicic-dominated large igneous province [J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 99: 55~78.
- Bryan S E, Riley T R, Jerram D A, *et al.* 2002. Silicic volcanism: an under-valued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins [A]. Menzies M A, Klempner S L, Ebinger C J, *et al.* Magmatic Rifted Margins [C]. Geological Society of America Special Paper, 362: 99~118.
- Cameron M, Bagby W C and Cameron K L. 1980. Petrogenesis of voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 74: 271~284.
- Coffin M F and Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences [J]. *Rev. Geophys.*, 32: 1236.
- Coffin M F and Eldholm O. 1991. Large igneous provinces: JOI/US-SAC workshop report [A]. The University of Texas at Austin Institute for Geophysics Technical Report [C], 1~114.
- Fisher R V, Fisher R V and Schmincke H U. 1984. *Pyroclastic Rocks* [M]. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag.
- He B, Xu Y G, Huang X L, *et al.* 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 306~323.
- Hildreth W, Halliday A N and Christiansen R L. 1991. Isotopic and chemical evidence concerning the genesis and contamination of basaltic and rhyolitic magma beneath the Yellowstone plateau volcanic field [J]. *J. Petrol.*, 32: 63~138.
- Jordan B T. 2005. The Oregon High Lava Plains: a province of counter-tectonic age-progressive volcanism [A]. Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, *et al.* Plates, Plumes, and Paradigms [C]. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 388: 503~515.
- Lanphere M A, Cameron K L and Cameron M. 1980. Sr isotope geochemistry of voluminous rhyolitic ignimbrites and related rocks, western Mexico [J]. *Nature*, 286: 594~596.
- Luo Z Y, Xu Y G, He B, *et al.* 2007. Geochronologic and petrochemical evidence for the genetic link between the Maomaogou nepheline syenites and the Emeishan large igneous province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(7): 949~958.
- Mao Jianren, Tao Kuiyuan, Xing Guangfu, *et al.* 1999. Petrological records of the Mesozoic-Cenozoic mantle plume tectonics in Epicontinental area of southeast China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(3): 253~258 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Hua Renmin and Li Xiaobo. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits [J]. *Mineral Deposits*, 18: 291~299 (in Chinese with English abstract).
- Pankhurst R J, Leat P T, Sruoga P, *et al.* 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province [J]. *J. Volcanology and Geothermal Research*, 81: 113~136.
- Rajesh H M and Santosh M. 2004. Charnockitic magmatism in southern

- India [ A ]. Sheth H C and Pande K. Magmatism in India Through Time [ C ]. Proc. Ind. Acad. Sci. ( Earth Planet. Sci. ), 113 : 565 ~ 585.
- Sensarma S, Hoernes S and Mukhopadhyay D. 2004. Relative contributions of crust and mantle to the origin of the Bijli Rhyolite in a Palaeoproterozoic bimodal volcanic sequence ( Dongargarh Group ), central India [ A ]. Sheth H C and Pande K. Magmatism in India Through Time [ C ]. Proc. Ind. Acad. Sci. ( Earth Planet. Sci. ), 113 : 619 ~ 648.
- Sensarma S. 2007. A bimodal LIP and the plume debate : The Palaeoproterozoic Dongargarh Group, central India [ A ]. Foulger G R and Jurdy D M. Plates, Plumes, and Planetary Processes [ C ]. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 430 : 831 ~ 840.
- Sharma K K. 2004. The Neoproterozoic Malani magmatism of the northwestern Indian shield : implications for crust-building processes [ A ]. Sheth H C and Pande K. Magmatism in India through Time [ C ]. Proc. Ind. Acad. Sci. ( Earth Planet. Sci. ), 113 : 795 ~ 807.
- Sharma K K. 2005. The Malani magmatism : an extensional lithospheric tectonic origin [ A ]. Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, *et al.* Plates, Plumes and Paradigms [ C ]. Geol. Soc. Am. Spec. Pap., 388 : 463 ~ 476.
- Sheth H C. 2007. 'Large Igneous Provinces ( LIPs )' : Definition, recommended terminology, and a hierarchical classification [ J ]. Earth-Science Reviews, 85 : 117 ~ 124.
- Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Xing Guangfu, *et al.* 1999. Strong Yanshanian volcanic magmatic explosion in east China [ J ]. Mineral Deposits, 18 : 316 ~ 322 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Dezi and Zhou Jincheng. 2005. New progress in studying the large igneous provinces [ J ]. Geological Journal of China Universities, 11 : 1 ~ 8 ( in Chinese with English abstract ).
- Wang Dezi, Ren Qijiang, Qiu Jiansheng, *et al.* 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China and their metallogenesis [ J ]. Acta Geologica Sinica, 70 : 23 ~ 34 ( in Chinese with English abstract ).
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis [ M ]. London : Unwin Hyman, 1 ~ 465.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, *et al.* 2000. Deep geodynamics of Yanshan Movement [ J ]. Geological Journal of China Universities, 6 : 379 ~ 388 ( in Chinese with English abstract ).
- Xie Douke, Ma Rongsheng, Zhang Yushen, *et al.* 1996. Continental Crust Growth Process of South China and Mantle Plume Tectonics [ M ]. Beijing : Geological Publishing House, 1 ~ 257 ( in Chinese with English abstract ).
- Xie Guiqing, Hu Ruizong, Zhao Junhong, *et al.* 2001. Mantle plume and the relationship between it and Mesozoic large-scale metallogenesis in southeastern China : A preliminary discussion [ J ]. Geotectonica et Metallogenia, 25( 2 ) : 179 ~ 186 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi. 2013. Is the Mesozoic magmatism in east China related to the westward subduction of the Pacific plate ? [ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33( 1 ) : 113 ~ 128 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi and Li Chengdong. 2012. Granites : Implications for Continental Geodynamics [ M ]. Beijing : Ocean Press ( in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi, Wang Yan, Xiong Xiaolin, *et al.* 2008. Adakite and Granite : Challenge and Opportunity [ M ]. Beijing : China Land Press, 1 ~ 344 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Junhong, Hu Ruizhong, Jiang Guohao, *et al.* 2001. Discussion of the relationship between mantle plume and uranium mineralization [ J ]. Geotectonica et Metallogenia, 25( 2 ) : 171 ~ 178 ( in Chinese with English abstract ).

### 附中文参考文献

- 毛建仁,陶奎元,邢光福. 1999. 中国东南大陆边缘中生代地幔柱活动的岩石学记录 [ J ]. 地球学报, 20( 3 ) : 253 ~ 258.
- 毛景文,华仁民,李晓波. 1999. 浅议大规模成矿与大型矿集区 [ J ]. 矿床地质, 18( 4 ) : 291 ~ 299.
- 陶奎元,毛建仁,邢光福,等. 1999. 中国东部燕山期火山岩浆大爆发 [ J ]. 矿床地质, 18( 4 ) : 316 ~ 322.
- 王德滋,任启江,邱检生,陈克荣,徐兆文,曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用 [ J ]. 地质学报, 70 : 23 ~ 34.
- 王德滋,周金城. 2005. 大火成岩省研究新进展 [ J ]. 高校地质学报, 11 : 1 ~ 8.
- 吴福元,孙德有,张广良等. 2000. 论燕山运动的深部地球动力的本质 [ J ]. 高校地质学报, 6 : 379 ~ 388.
- 谢谔克,马荣升,张禹慎. 1996. 华南大陆壳生长过程与地幔柱构造 [ M ]. 北京 : 地质出版社, 1 ~ 257.
- 谢桂青,胡瑞忠,赵军红,等. 2001. 中国东南部地幔柱及其与中生代大规模成矿关系初探 [ J ]. 大地构造与成矿学, 25( 2 ) : 179 ~ 186.
- 张旗. 2013. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗 ? [ J ]. 岩石矿物学杂志, 33( 1 ) : 113 ~ 128.
- 张旗,李承东. 2012. 花岗岩 : 地球动力学意义 [ M ]. 北京 : 海洋出版社, 1 ~ 287.
- 张旗,王焰,熊小林,李承东. 2008. 埃达克岩和花岗岩——挑战与机遇 [ M ]. 北京 : 中国大地出版社, 1 ~ 344.
- 赵军红,胡瑞忠,蒋国豪,等. 2001. 初论地幔热柱与铀成矿关系 [ J ]. 大地构造与成矿学, 25( 2 ) : 171 ~ 178.