

关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论

张招崇

(中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:峨眉山大火成岩省(ELIP)近几年来取得了许多新的进展,但在一些重要的问题上仍存在着争论,笔者列举了 ELIP 火山喷发的时间、分布范围、高钛和低钛玄武岩、层状岩体与玄武岩以及成矿作用的关系、大火成岩省与生物绝灭的关系以及与地幔柱的关系等方面存在的问题,以及由此引发的相关争论。这些问题的解决对于大火成岩省研究的深入将会起到重要作用。

关键词:峨眉山大火成岩省;玄武岩;地幔柱;岩浆矿床;生物灭绝;岩石圈地幔

中图分类号:P588.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)03-0634-13

大火成岩省(LIP)一直是国际地学界研究的热点,而位于中国西南云、贵、川三省的峨眉山大火成岩省(ELIP)是中国唯一被国际地学界承认的大火成岩省,因而受到国内外学者的广泛关注,特别在 2000 年以来,更是成为中国研究的热点地区之一,同时也取得了许多重要的进展,并在国内外重要杂志上发表了一系列高质量的论文(据初步统计^①,1919—1999 年发表在国内刊物的论文有 70 余篇,国际刊物 5 篇;2000 年以后发表在国内刊物的相关论文达 270 余篇,国际刊物近 60 篇)。笔者曾经于 2001 年在《岩石矿物学杂志》上发表过题为“峨眉山玄武岩研究过程中一些问题的讨论”^[1],在该文中笔者提出了当时峨眉山大火成岩省研究中存在的一些问题。8 年过去了,尽管近年来在很多重要的问题上取得了许多新的、重要的进展,但是以前提到的部分问题仍然没有得到较好的解决,甚至随着研究的深入还出现了一些新的问题,本文的主要目的是将这些问题提出来,以供国内外同行进一步深入研究和讨论。

1 火山喷发时间

大火成岩省的一个重要标志是短时间内的巨量喷发,也就是 <3 Ma、甚至在 1 Ma 内完成。但是近年来 ELIP 内取得的大量同位素年龄数据表明,其变化范围很宽:251~263 Ma。其中对火山岩的测定结果为 251~263 Ma,层状镁铁-超镁铁质岩体的年龄为 254~263 Ma。岩墙的年龄数据目前较少,只有 2 个,分别为 (262 ± 3) Ma 和 (242 ± 2) Ma。一些碱性岩体则相对较为年轻,大多为印支期(表 1)。范蔚茗等^[2]认为该火成岩省的大规模快速喷发发生在 253~256 Ma,251~253 Ma 的中酸性岩石代表了该火成岩事件的晚期产物。Shellnutt et al^[3]认为,260 Ma 左右代表了地幔柱活动时间,252 Ma 可能是镁铁质岩浆底侵作用时期,而晚期的 242 Ma 则是华南和华北板块碰撞后松弛阶段的产物。但是这些数据也存在着一些矛盾,如 He et al^[4]对 ELIP 东部覆盖在峨眉山玄武岩之上的二叠纪宣威组底部的碎屑岩年龄为 (257 ± 3) Ma,而厚层峨眉山玄武岩顶部的熔结凝

收稿日期:2008-10-29;改回日期:2009-03-02

基金项目:教育部新世纪人才基金(NCET-04-0728)、111 Project(B07011)和教育部创新团队计划资助。

作者简介:张招崇,男,1965 年生,教授,博士生导师,主要从事火成岩岩石学以及相关金属矿床的教学和研究;E-mail:zczhang@cugb.edu.cn。

①国内刊物据 CNKI 统计,国际刊物据 GSW 数据库统计(统计时间 2008 年 10 月 20 日)。

表 1 峨眉山大火成岩省火山岩、岩体和岩墙的形成年龄
Table 1 Formation ages of volcanic rocks, intrusions and dykes in the Emeishan large igneous province

	地点	岩石名称	方法	年龄/Ma	数据来源	
火山岩和沉积岩	广西西部阳圩剖面上部	玄武岩	Ar-Ar	253.6±0.4	[2]	
		玄武岩	SHRIMP	253.7±6.1		
	广西玉凤剖面下部	玄武岩	Ar-Ar	255.4±0.4		
	广西民安剖面下部	玄武岩	Ar-Ar	256.2±0.8		
		四川二滩剖面顶部	玄武岩	Ar-Ar	251.5±0.9	[7]
		四川二滩剖面顶部	粗面岩	Ar-Ar	252.8±1.3	
		越南西北部	玄武岩	Rb-Sr 等时线	257±24	[8]
		云南宣威组底部	碎屑岩	SHRIMP	257±3	[4]
镁铁-超镁铁侵入岩和碱性岩	四川攀枝花	正长岩	Ar-Ar	255.9±5.7	[7]	
		辉长岩中的斜长石	Ar-Ar	246±4	[9]	
		辉石岩中的金云母	Ar-Ar	254±5		
		辉长岩	SHRIMP	263±3	[10]	
	四川新街	辉长岩	SHRIMP	259±3	[11]	
	四川力马河岩体	辉长岩	SHRIMP	263±3	[12]	
	云南白马寨	辉石岩	SHRIMP	258.5±3.5	[13]	
	云南朱布	辉长岩	SHRIMP	261±2	[12]	
	四川白马	辉长岩	SHRIMP	262±2	[12]	
	云南富宁	辉长岩	SHRIMP	260±3	[14]	
	四川茨达	辉长岩中黑云母	Ar-Ar	256	[15]	
	四川太和	辉长岩	SHRIMP	215		
	四川猫猫沟	钠质碱性岩	Ar-Ar	224.8		
	四川鸡街岩体和大向坪	霞辉岩	Ar-Ar	214~193		
四川红格	碱性岩	SHRIMP	239	[16]		
	辉长岩	SHRIMP	259.3±1.3	[17]		
岩墙	四川盐源	辉绿岩	SHRIMP	262±3	[18]	
	四川白马	辉绿岩	SHRIMP	242±2	[3]	

灰岩年龄为(263±5) Ma。由此看来,与 ELIP 时代接近的西伯利亚大火成岩省相比,ELIP 的时代还没有完全确定,其变化范围较宽的年龄到底是火山作用本身造成的(或者是多期次的岩浆喷发活动),还是同位素年龄测定误差造成的,目前尚不清楚。西伯利亚大火成岩省已有很精确的年龄结果(在 251 Ma 之内)^[6],其同位素数据主要是 Ar-Ar 方法测定的,但是该方法在 ELIP 似乎不太适合,因为受中生代热事件的扰动较大,所以测定的数据大多是中生代的^[6],即使测定的时代为二叠纪,其测定的时代与 SHRIMP 方法相比,仍然偏年轻(表 1)。另一方面,如果考虑同位素年龄测定的误差,那么 He et al^[4]测定的年龄则仍在误差范围内,这也从另一个侧面可

能反映了火山喷发的持续时间小于 SHRIMP 年龄的误差。

2 分布范围

有关 ELIP 的分布范围,目前基本达成一致的认知,西界为哀牢山—红河断裂,西北界则为龙门山—小菁河断裂,但是对于分布面积的具体数据尚无定论,一般认为其为(2.5~3.0)×10⁵ km²。但是钻孔发现其东南部和东北部也有隐伏的玄武岩,说明峨眉山玄武岩省的初始覆盖面积可能远大于现在的残留面积。最近多数学者认为越南西北部的 Song Da 地区的二叠纪玄武岩(Rb-Sr 等时线年龄为(257±24) Ma^[8]),是印支板块沿哀牢山—红河断裂带的大规模

倾向挤出的结果^[19-21]。但是已经发表的一些地球化学数据似乎并不支持这样的解释:越南北部的科马提岩具有强烈亏损轻稀土和大离子亲石元素的特征^[20],而峨眉山玄武岩和苦橄岩均为富集型。尽管其 Os 同位素初始值 ($\gamma Os(t)$) 与 ELIP 接近,前者为-0.5~+0.6,后者为-0.4~-2.4,但是其 Re/Os 比值(0.03~0.25)则明显高于后者(0.006~0.028)^[22]。如果两者起源于同一源区,则根据它们的稀土和微量元素特征要求前者的熔融程度要高于后者,但若是根据其 Re/Os 比值,则得出前者的熔融程度低于后者,因为 Re 在地幔中是中等相容元素,而 Os 则是高度相容元素(尽管目前尚无它们在硫化物中准确的分配系数数据,但 Os 在硫化物-硅酸盐熔体中的分配系数总是比 Re 高^[23])。因此,如果单从它们的地球化学特征来看,该地区的二叠纪玄武岩和峨眉山玄武岩并不存在成因联系。另外,由于受自然条件的限制,对于位于青藏高原东缘的松潘—甘孜地区(如甘孜—理塘和木里地区)的二叠纪变质玄武岩研究程度较低,但是相关的地球化学研究暗示,他们可能是 ELIP 的一部分^[24-25],是由于峨眉山地幔柱作用导致扬子克拉通裂解的结果^[24]。

3 高钛和低钛玄武岩

Cox 等^[26]在研究南非 Karoo 大火成岩省(侏罗纪)时最先发现,根据 TiO₂ 的含量高低,可以将其划分为高钛和低钛两类玄武岩,并且这两种类型玄武岩在空间上存在明显的分带,即北部为高钛玄武岩,南部为低钛玄武岩。后来有一些学者在其他一些大火成岩省(LIP)中也鉴别出这两类玄武岩,并发现了类似的具有空间分布的特点,如巴西的 Paraná(早白垩世)、南极(Queen Maud Land, 侏罗纪)^[27-28]。这些所谓的高钛玄武岩和低钛玄武岩均是指在相似的 MgO 或 SiO₂ 下,其 TiO₂ 含量有明显的区别(图 1-a),但是另外一些大火成岩省,如美国的哥伦比亚河和印度的德干虽然其 TiO₂ 含量变化范围很大,但在相似的 SiO₂ 时,很难分出高钛和低钛两种类型玄武岩(图 1-b,c)。

峨眉山玄武岩和其他大火成岩省一样,其 TiO₂ 变化范围很宽,基本上在 1%~5%,但是是否可以将其划分为高钛玄武岩和低钛玄武岩两种类型以及它们的成因仍然是值得进一步探讨的问题。由于 TiO₂ 含量的变化是连续的,显然按照某一含量作为界线

明显带有人为的因素。尽管如此,不同学者仍然根据 TiO₂ 或 Ti/Y 比值将其划分为两种类型。由于 TiO₂ 和 P₂O₅ 具有明显的正相关(图 2),所以 Zhang et al^[30]将其分为高 Ti 高 P 型和低 Ti 低 P 型;李杰等^[25]以 Ti/Y 比值 520 为界限将木里苦橄岩划分为高钛型和低钛型;而 Xu et al^[31]根据 Ti/Y 比值 500 以及 TiO₂ 含量>2.5%为界限将峨眉山玄武岩划分

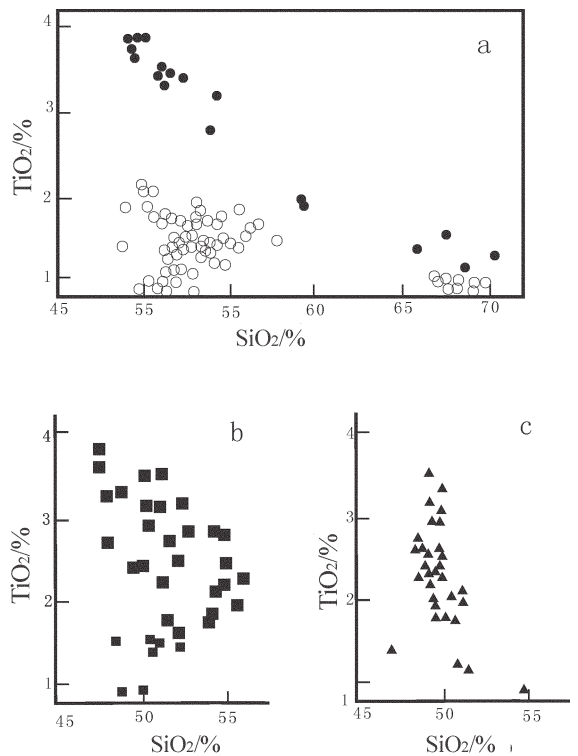


图 1 SiO₂-TiO₂ 图解。

a—巴西 Paraná; b—美国的哥伦比亚河; c—印度德干^[29]

Fig.1 SiO₂ versus TiO₂ diagram

a—Paraná, Brazil; b—Columbia River, U.S.A.; c—Deccan, India^[29]

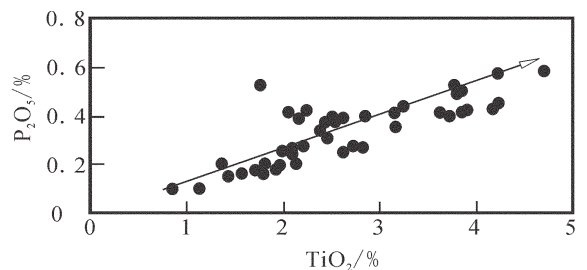


图 2 TiO₂ 对 P₂O₅ 图解

Fig.2 TiO₂ versus P₂O₅ diagram

为高钛和低钛玄武岩,但是该标准似乎不太适合于 ELIP 的其他剖面,如在丽江地区的大具剖面,所有玄武岩的 Ti/Y 比值均大于 500,而他们绝大多数的 TiO₂ 含量<2.5%^[32]。

另一方面,有关高钛和低钛玄武岩的成因也存在诸多不同认识。Xu et al^[31]认为低钛玄武岩是地幔柱在浅部(<60 km)高程度部分熔融(16%)形成的,而高钛玄武岩则是地幔柱在相对深部低部分熔融形成的;Xu et al^[33]通过 Re-Os 同位素研究得出,低钛玄武岩主要来自地幔柱,而高钛玄武岩则主要来自大陆岩石圈地幔或者是地幔柱熔体被大量岩石圈地幔所污染。李杰等^[25]通过对木里地区苦橄岩的 Re-

Os 同位素研究则得出了完全相反的结论:高 Ti/Y 型苦橄岩直接来源于一个地幔柱源区;低 Ti/Y 型苦橄岩则可能主要来自于大陆岩石圈地幔。郝艳丽等^[34]根据岩相学和主要元素变化特征认为,高钛和低钛玄武岩是分离结晶作用的结果。笔者通过薄片观察也发现,高钛玄武岩均存在大量的磁铁矿,有的甚至可达 5%~10%,而低钛玄武岩的磁铁矿含量往往较低。如宾川和永胜剖面的玄武岩 TiO₂ 和全 FeO 含量呈明显的正相关(图 3-a),可能反映了 Ti 主要赋存在铁钛氧化物中。虽然单斜辉石中也含有一定量的 TiO₂ (0.8%~2.9%)^[32,35],但不会导致全岩 TiO₂ 的含量超过 3%。尽管 TiO₂ 和 Y 具有一定的正

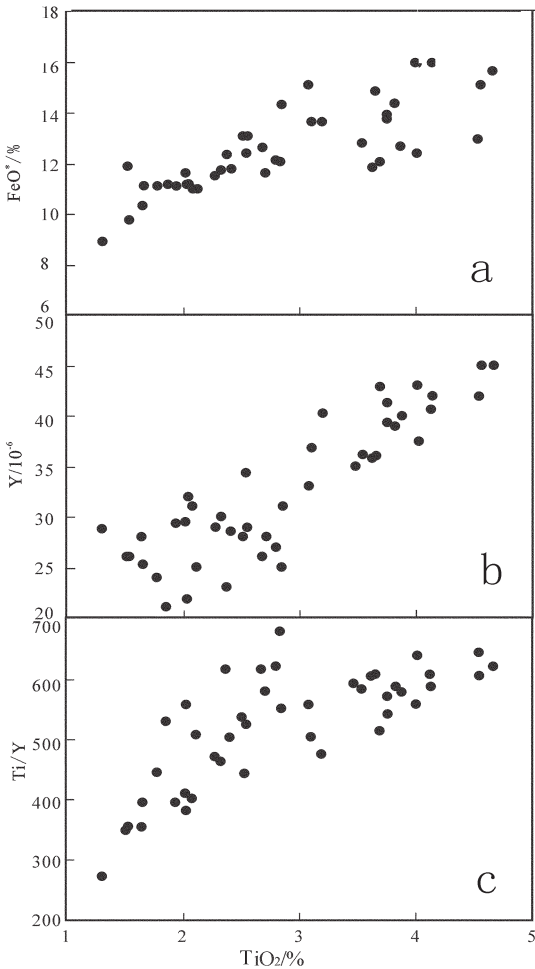


图 3 宾川和永胜剖面火山岩的 TiO₂ 对全铁、Y 和 Ti/Y 图解(数据来自[28, 31])

Fig.3 Diagrams of TiO₂ versus total FeO, Y and Ti/Y of volcanic rocks from the Binchuan and Yongsheng sections (data from [28, 31])

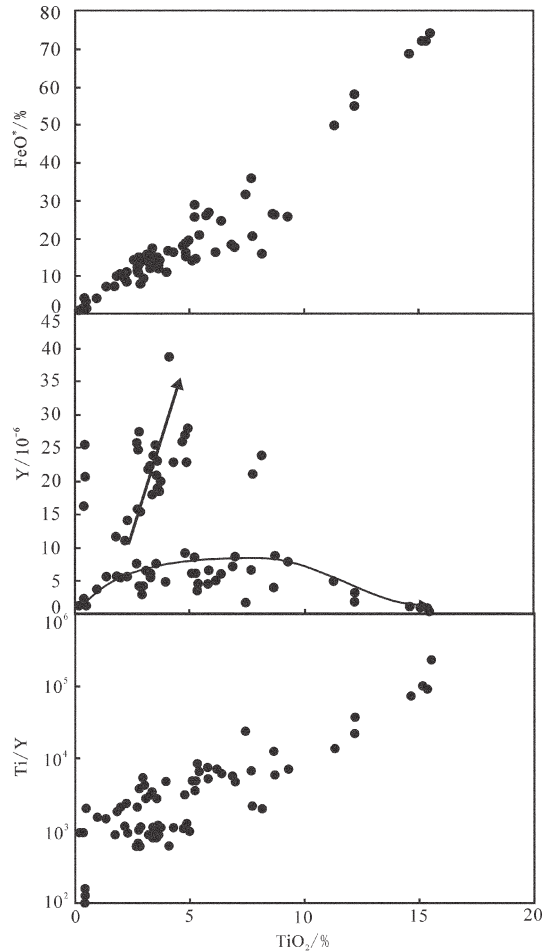


图 4 攀枝花层状辉长岩的 TiO₂ 对全铁、Y 和 Ti/Y 图解(数据来自[10, 36])

Fig.4 Diagrams of TiO₂ versus total FeO, Y and Ti/Y of gabbros from the Panzhihua layered intrusion (data from([10, 36])

相关(图 3-b),但是 Ti/Y 比值则随 TiO₂ 含量的增高而增高(图 3-c),说明铁钛氧化物的分离结晶对 Ti/Y 比值具有明显的控制作用。类似的情况也同样存在于以攀枝花岩体为代表的含钒钛磁铁矿的岩体中(图 4)。这些都说明铁钛氧化物的分离结晶作用或堆积作用对 Ti/Y 比值产生明显的影响,该比值也许不能完全反映源区的特征。

4 层状岩体与溢流玄武岩以及成矿作用的关系

ELIP 内存在近南北走向分布的一系列层状镁铁-超镁铁质岩体,目前大量的同位素测年结果表明,这些岩体与峨眉山玄武岩同期,是 ELIP 的重要

组成部分。按照岩石组合和成矿特征,大致可以分为两种类型:一是与辉长质岩石有关的岩体,此类岩体规模一般较大,含钒钛磁铁矿矿床;另一类是以超镁铁质岩石为主,其规模一般较小,含铜镍硫化物(铂族元素)矿床。多数学者认为,前一类岩体与区域上的高钛玄武岩有关,而后一类岩体则与低钛玄武岩有关^[12]。但是 Tao 等^[17]根据含铜镍硫化物矿床的力马河岩体的 Ti/Y 比值大于 500,认为其与高钛玄武岩有关。Zhang 等^[38]从相平衡的角度,提出含钒钛磁铁矿的岩体具有 SiO₂ 强烈不饱和的特征,而高钛的玄武岩则往往是 SiO₂ 过饱和的(图 5),所以前者不可能是由后者演化而成;相反,含铜镍硫化物的岩体的 SiO₂ 也是不饱和的,因而可以通过 SiO₂ 不饱和

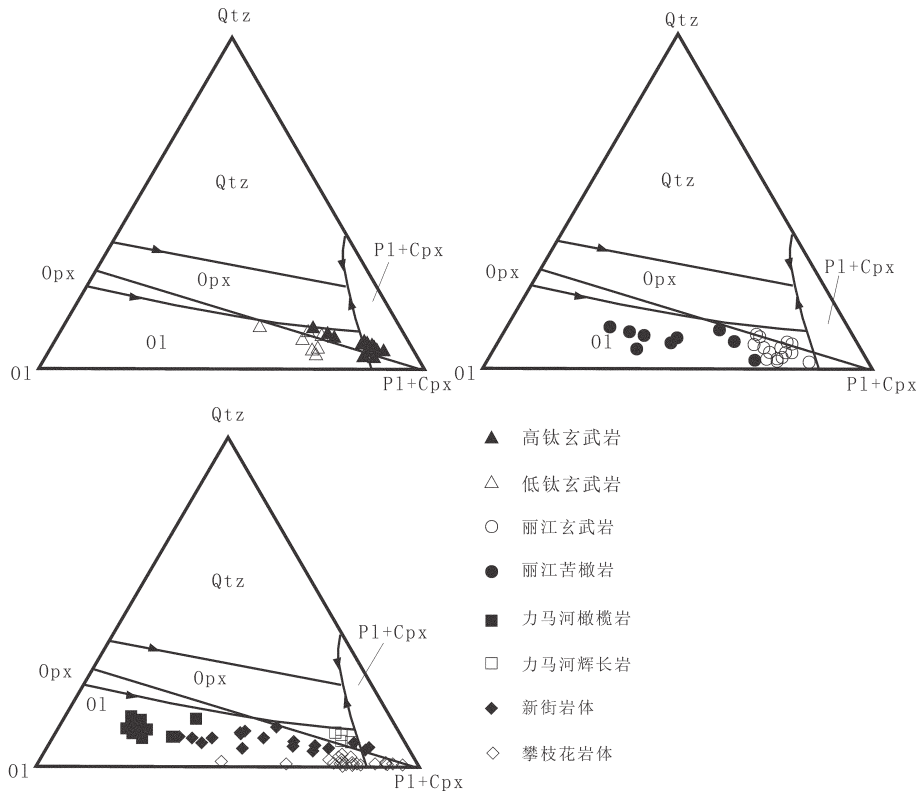


图 5 Ol-Qtz-Pl+Cpx 相图^[38]

Opx-Cpx-Pl 将此相图中可以分为两部分,即 SiO₂ 饱和(Opx-Cpx-Pl-Qtz)和不饱和两部分(Ol-Opx-Cpx-Pl),这两部分不能互相演化。高钛玄武岩和力马河辉长岩落在 SiO₂ 饱和区域,而其他岩石均落在 SiO₂ 不饱和区域,而攀枝花岩体则落在 Ol 和 Pl+Cpx 的同结线上,显示出 SiO₂ 强烈不饱和的特点,橄榄石和单斜辉石、斜长石共生的特点与其岩相学特征一致

Fig.5 Phase diagram of Ol-Qtz-Pl+Cpx^[38]

The diagram is separated into two sections, i.e., SiO₂ over-saturated (Opx-Cpx-Pl-Qtz) and SiO₂ unsaturated fields (Ol-Opx-Cpx-Pl), by the silica-saturation plane Opx-Cpx-Pl. The two contrast magmas with primary compositions in the two different sections cannot differentiate into each other. The high-Ti basalts and the Limahong gabbros are plotted in the Opx-Cpx-Pl-Qtz section, the other rocks fall in the Ol-Opx-Cpx-Pl section, and all Panzhihua samples are plotted in the cotectic Ol-Cpx-Pl plane, characterized by SiO₂ unsaturation, which is consistent with the petrographic observation of olivine, clinopyroxene and plagioclase association

的苦橄质岩浆演化而成。由此可见,这两类岩体的形成机制还不清楚是源区不同还是演化过程不同。

另一方面,ELIP 在成矿特征上明显不同于与其时代相近的西伯利亚大火成岩省,前者产出世界级的钽铌磁铁矿床,而后者则产出世界级的铜镍硫化物-铂族元素矿床。那么一个问题也随之而来:ELIP 是否有可能发现类似 Noril'sk 型的超大型铜镍硫化物-铂族元素矿床?还是由于地质的背景不同(如 ELIP 不存在 Noril'sk 地区的膏盐层,而膏盐层则被认为是使岩浆中硫饱和的关键因素)ELIP 本身就不可能形成此类大型矿床?

5 与生物大规模绝灭的关系

地质历史上,有很多大火成岩省与生物大规模绝灭在时间上较为接近(图 6),所以一些学者认为,是大火成岩省导致了生物的大规模绝灭^[39-41]。在中国华南地区的二叠纪—三叠纪边界,普遍存在中酸性的火山灰,这些火山灰被认为来自于 ELIP^[19,42-43]。然而,近

年来对 ELIP 的喷发时间的准确厘定无疑指示了其形成于中—晚二叠世边界,因而在时间上和二中叠世的 Guadalupian 生物灭绝时间的末期吻合,所以目前大家基本上都认为两者存在成因联系^[11,19,39-40,42]。但是对于导致生物绝灭的原因尚不清楚,是重金属或者火山喷发释放出的有毒气体导致生物中毒^[44]还是爆发形成的火山灰或者释放出的气体导致环境的突然变化(气温升高或降低)造成的^[45-47]?Wignall 认为,由于火山喷发,导致了海平面的上升,由此导致了生物的大规模绝灭^[39]。另外,现代火山观察表明,大量的火山灰可以停留在平流层阻挡太阳光而导致温度的突然降低。但是目前对于 ELIP 的研究表明,并不存在厚的火山灰,只是在宾川剖面底部以及盐源百林山地区玄武岩夹层中观察到厚约 0.5 m 的火山灰(图 7),而未出现现象西伯利亚大火成岩省那样 15~25 m 厚的粗粒中酸性火山灰层^[48]。所以此种机制的可能性似乎不大,尽管我们无法排除在 ELIP 的外围有可能存在迄今没有发现厚层的火山灰的可能性。至于由火山气体

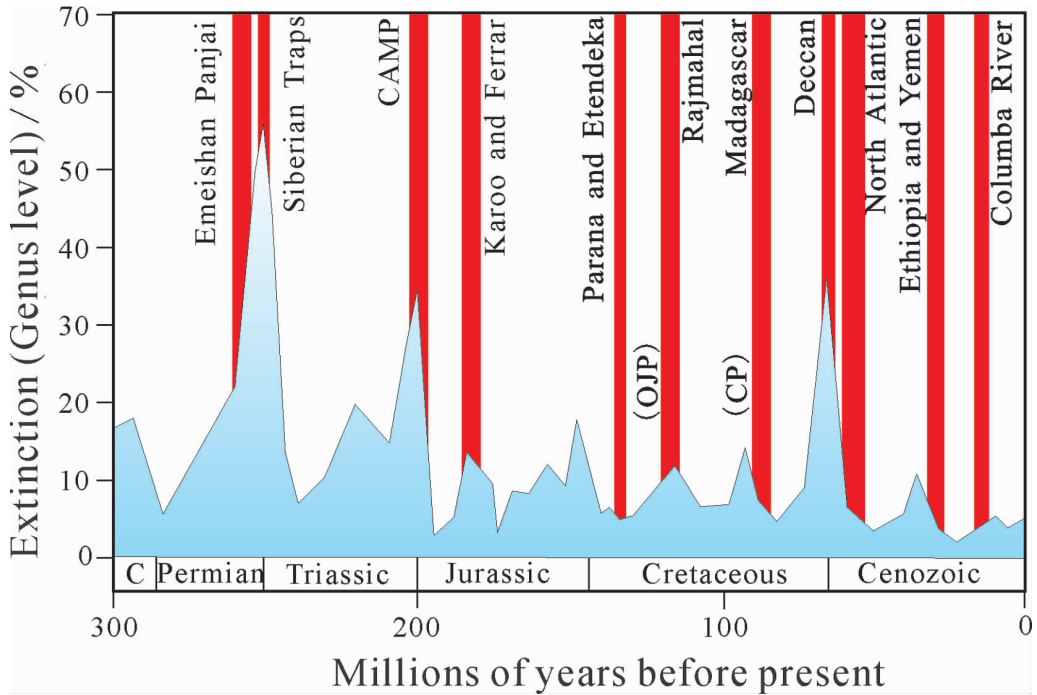


图 6 大火成岩省的喷发时间(红色带)和生物灭绝的速率(绿色区)关系图解^[49]
三次大的生物灭绝事件分别为二叠纪—三叠纪边界、三叠纪—侏罗纪边界和白垩纪—新近纪边界,分别对应西伯利亚大火成岩省、中大西洋大火成岩省和德干大火成岩省

Fig.6 Relationship between eruption ages of continental flood basalts (red bands) and mass extinction rates (green areas) ^[49]

Three largest mass extinction events, i.e., Permian-Triassic, Triassic-Jurassic and Cretaceous-Tertiary boundaries, correspond to eruptions of Siberian Traps, Central Atlantic Magmatic Province (CAMP), and Deccan Traps, respectively

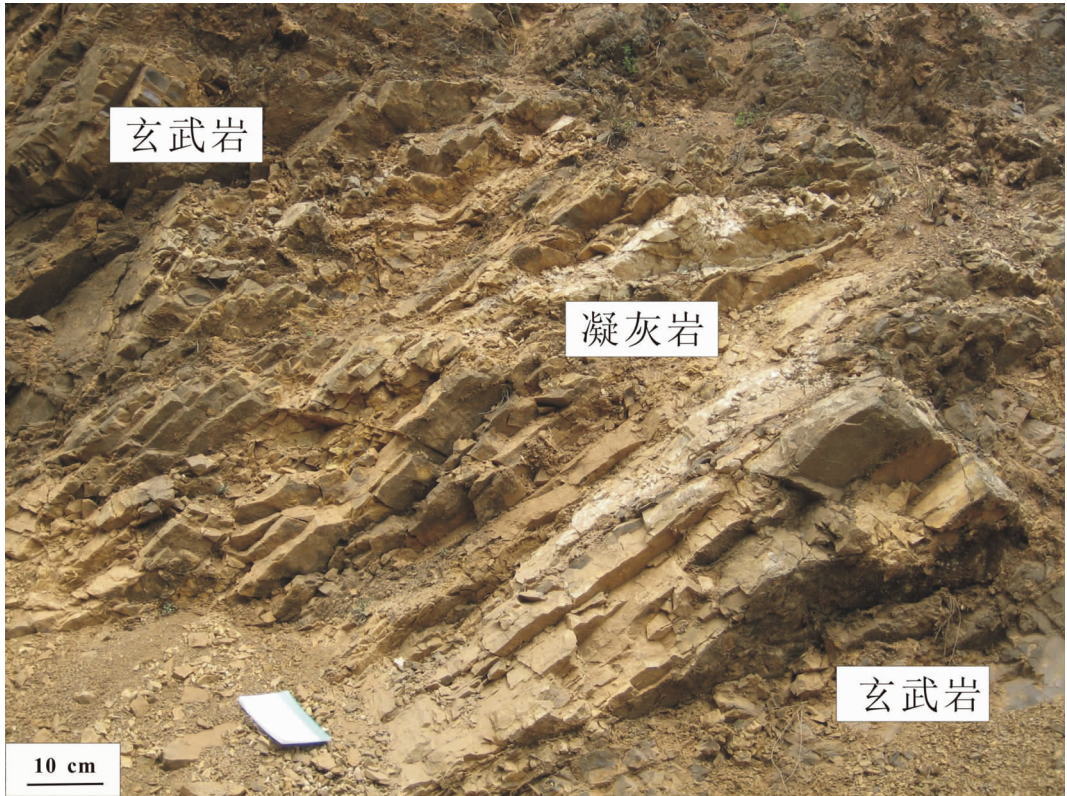


图 7 四川盐源百林山地区玄武岩夹层中的火山灰

Fig.7 Tuff intercalated with basalts in Bailinshan area, Yanyuan County, Sichuan Province

导致环境效应目前还没有相应的研究成果。

6 与地幔柱的关系

大火成岩省与地幔柱的关系一直存在着争论^[50-64]。ELIP 是不是地幔柱作用的结果也一直存在着争论。近年来多数学者支持地幔柱的观点,重要的证据有很多,如大规模火山作用前的地壳抬升、高温、地球物理和化学成分特征等^[21],但是目前峨眉山地幔柱存在最重要的证据是喷发前地壳的千米级隆升^[67-68]和高温苦橄岩的存在^[69]。因为根据理论模型,由于地幔柱上升对刚性的岩石圈发生撞击,导致地表的隆升幅度在 500 m 以上^[70]。徐义刚及其课题组的同事根据对峨眉山玄武岩下伏的茅口组灰岩的厚度的研究,证明峨眉山玄武岩喷发前地壳的隆升幅度在 1000 m 以上,从而为地幔柱的存在提供了又一个重要的证据。另一方面,由于地幔柱来自于深部(上下地幔边界或核幔边界^[71-72]),具有极高的温度(至少大于正常软流圈地幔温度 300℃),理论上应该存在代表高温条件下产物的高镁火山岩——苦橄岩或科马提岩。然

而,这种高镁的火山岩密度大很难上升到地表,因此在自然界中非常稀少,目前并没有在所有的 LIP 中都发现了这种高镁的火山岩。而且,自然界并不是所有的苦橄岩或科马提岩都是高温条件下的产物,有些可能是堆晶作用形成的,如曾被作为经典地区地幔柱存在重要证据的印度德干苦橄岩后来就被证明是橄榄石堆晶的结果^[73]。Zhang 等利用橄榄石-熔体平衡原理恢复了丽江苦橄岩原始岩浆成分,证明了部分苦橄岩代表了原始岩浆的成分,在此基础上,利用不同的方法估算了其形成温度在 1600℃ 以上^[32],这样就从另一方面为峨眉山地幔柱的存在提供了一个关键证据。

然而,最近苦橄岩的 Os 同位素数据却为峨眉山地幔柱的存在带来了挑战。众所周知,地核分为内核和外核,外核是液态的,而内核是固态的。在地核分异过程中,Re 比 Os 更倾向于进入液态的外核中,所以如果地幔柱起源于核-幔边界,那么来自于地幔柱的岩浆就应该带来 Re 富集的信息,即在同位素特征上表现为 ¹⁸⁷Os 的富集 (¹⁸⁷Os 由 ¹⁸⁷Re 衰变

而成)^[74-75],然而代表地幔柱熔融产物的苦橄岩却没有显示 ¹⁸⁷Os 富集迹象(其 $\gamma_{Os}(t)$ 为 $-0.4\sim-2.4$)^[30],史仁灯等据此认为,岩浆来自于亏损的岩石圈地幔,玄武岩中 Os 同位素的富集^[24]是地壳混染的结果^[74],并且认为 ELIP 并没有象其他大火成岩省那样具有短时间内的巨量喷发现象也说明其与地幔柱无关^[74]。但是值得注意的是,如果地幔柱不是起源于核-幔边界,而是起源于上-下地幔边界,那么就有可能没有 ¹⁸⁷Os 富集的地球化学信号。此外,最近的高温高压实验研究表明,在漫长的地球分异过程中(4.5 Ga),¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 的富集并不明显,大约只有 1.4% 的升高,

所以即使来自于外核,实际上我们也很难观察到这种 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 的富集^[77]。

另外,即使都承认 ELIP 和地幔柱有关,但是有关其模型也还存在着一些矛盾之处,比如按照地幔柱的模型,苦橄岩应该产于地幔柱的中心位置,因为温度最高,并向两侧由于温度降低,苦橄岩的数量降低^[78]。同时地幔柱的中心应该是地表隆升幅度最大^[79],但是 ELIP 苦橄岩的产出位置并不和地表隆升幅度最大的位置吻合,而明显偏西(图 8)。如何解决这种矛盾?这可能需要对多种信息进行综合分析,一个重要的证据就是放射状岩墙群,因为其收敛点指示了地幔

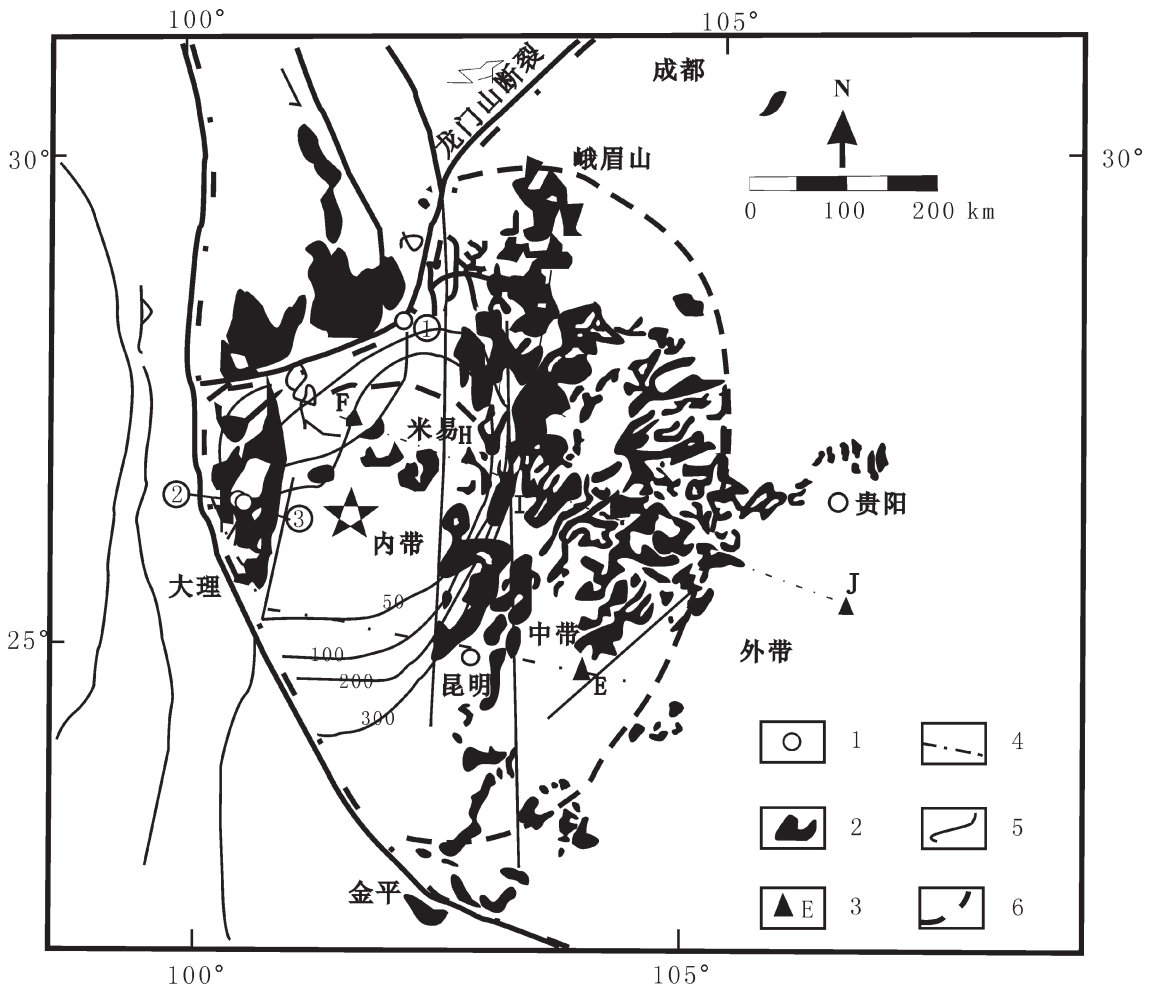


图 8 峨眉山大火成岩省玄武岩分布图(据文献[81]修改)和苦橄岩产出位置

1—苦橄岩产出位置:①—木里^[25];②—丽江^[32];③—五郎河^[82];2—峨眉山玄武岩;3—茅口灰岩剖面位置;
4—茅口灰岩剖面线;5—茅口灰岩厚度等值线;6—差异剥蚀带分界线。五角星表示 He 等推测的地幔柱的中心位置

Fig.8 Distribution of basalts in the Emeishan large igneous province (modified from reference [81]), showing sites of picrites
1—Localities of picrites:①—Muli^[25]; ②—Lijiang^[32]; ③—Wulanghes^[82]; 2—Emeishan; 3—Localities of Maokou Formation limestone;
4—Section line of Maokou Formation limestone; 5—Isopachous line of Maokou Formation limestone;
6—Boundary of differential erosion zone. The star represents center of the mantle proposed by He et al

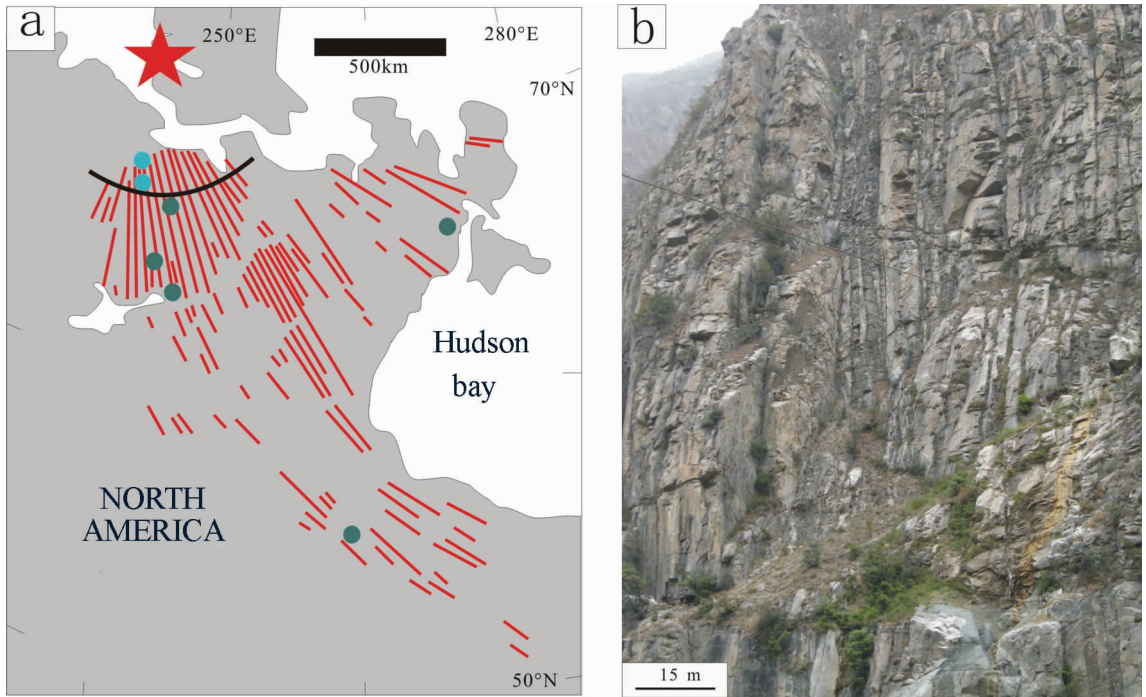


图 9 MacKenzie 岩墙群分布图(a)^[83]和峨眉山大火成岩省岩墙群照片(b)
 Fig.9 Distribution of MacKenzie dyke swarm (a)^[83] and photograph of the dyke swarm in the ELIP (b)

柱的中心位置^[80],如著名的 MacKenzie 岩墙群(图 9-a)。但是 ELIP 还没有观察到类似的现象,所发现的岩墙大多较为零散,即使局部形成岩墙群(图 9-b),其年龄以及空间上有没有类似 MacKenzie 岩墙群的收敛特征,目前均不清楚。由此看来有关 ELIP 是否和地幔柱有关以及地幔柱的模型等的争论还将持续下去。

除上述问题之外,还有一些问题也没有答案,如火山喷发迁移的轨迹如何?它与塔里木二叠纪玄武岩的关系如何?

7 结 语

尽管峨眉山大火成岩省近年来成为研究的热点地区之一,也取得了很多新的重要的进展,并为国际地质学界所瞩目,但是和国外的其他一些大火成岩省(如俄罗斯的西伯利亚、印度的德干、美国的哥伦比亚河、巴西的 Paraná 和南非的 Karoo 等)相比,其研究程度仍相对较低,在一些重要的基础地质问题和科学问题上还未查清或达成共识。为了推动峨眉山大火成岩省研究的进一步深入,必须加强不同学科的结合(如岩石学、矿物学、矿床学、地球化学、沉积

学、古生物学、构造地质学和地球物理学等)以及国际间的合作对比,同时也应加强基础地质的调查和研究,如 1:5 万的区域地质调查等。笔者深信,在不远的将来,随着研究的进一步开展,峨眉山大火成岩省的研究必将迈上一个新的台阶。

参考文献(References):

- [1] 张招崇,王福生,邓海琳,等. 峨眉山玄武岩研究过程中一些问题的讨论 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3):239-246.
 Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Deng Hailin, et al. A discussion on some problems concerning the study of the Emeishan Basalts [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3):239-246 (in Chinese with English abstract).
- [2] 范蔚茗,王岳军,彭头平,等. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束[J]. 科学通报, 2004, 49:1892-1900.
 Fan Weiming, Wang Yuejun, Peng Touping, et al. Ar-Ar and U-Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 20(3):239-246 (in Chinese).
- [3] Shellnutt J G, Zhou M F, Yan D P, et al. Longevity of the Permian Emeishan mantle plume (SW China): 1Ma, 8Ma or 18Ma? [J]. Geological Magazine, 2008, 145:373-388.

- [4] He B, Xu Y G, Huang L X, et al. 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*, 2007, 255:306-323.
- [5] Saunders A D, Jones S M, Morgan L A, et al. Regional uplift associated with continental large igneous provinces: The roles of mantle plumes and the lithosphere [J]. *Chemical Geology*, 2007, 241:282-318.
- [6] Ali J R, Thompson G M, Zhou M, et al. Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 2005, 79:475-489.
- [7] Lo C, Chung S, Lee T, et al. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198:449-458.
- [8] Polyakov G V, Balykin P A, Tran Trong Hoa, et al. Evolution of the Mesozoic-Cenozoic magmatism in the Song Da rift and its contouring structures (northwestern Vietnam) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 1998, 39:695-706 (in Russian).
- [9] Boven A, Pasteels P, Punzalan L E, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the age and evolution of the Permo-Triassic Emeishan volcanic province, southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20:157-175.
- [10] Zhou M F, Robinson P T, Leshner C M, et al. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Province, SW China [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46:2253-2280.
- [11] Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196:113-122.
- [12] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, et al. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Lithos*, 103:352-368.
- [13] Wang C Y, Zhou M F. Genesis of the Permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China [J]. *Miner Deposita*, 2006, 41:771-783.
- [14] Zhou M F, Zhao J H, Qi L, et al. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151:1-19.
- [15] 刘红英, 夏斌, 张玉泉. 攀西裂谷带内超基性碱性岩和层状辉长岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄——以鸡街、大向坪和太和岩体为例 [J]. *地质论评*, 2004, 50:175-179.
Liu Hongying, Xia Bin, Zhang Yuquan. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Ages of the ultrabasic alkalic rock and layered gabbro in Panzhihua-Xichang rift zone: examples from the Jijie, Daxiangping and Taihe pluton [J]. *Geological Review*, 2004, 50:175-179 (in Chinese with English abstract).
- [16] 夏斌, 刘红英, 张玉泉. 攀西古裂谷带钠质碱性岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义——以红格、白马和鸡街岩体为例 [J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28:149-154.
Xia Bin, Liu Hongying, Zhang Yuquan. SHRIMP dating of apatitic alkalic rocks in Panxi rift zone and its geological implications——examples for Hongge, Baima and Jijie rock bodies [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28:149-154 (in Chinese with English abstract).
- [17] Zhong H, Zhu W G. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Mineralium. Deposita*, 2006, 41:599-606.
- [18] Guo F, Fan W M, Wang Y J, et al. When did the Emeishan plume activity start? Geochronological evidence from ultramafic-mafic dikes in Southwestern China [J]. *International Geology Review*, 2004, 46:226-234.
- [19] Chung S L, Jahn B M, Wu G Y, et al. The Emeishan Flood Basalt in SW China: A mantle plume initiation model and its connection with continental breakup and mass extinction at the Permian-Triassic boundary [C]//Flower M F J, Chung S L, Lo CH, et al (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Tectonics in East Asia*, AGU Geodynamics Series, 1998, 27: 47-58.
- [20] Hanski E, Walker R J, Huhma H, et al. Origin of Permian-Triassic komatiites, northwestern Vietnam [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147: 453-469.
- [21] 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 等. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说 [J]. *地学前缘*, 2007, 14:1-9.
Xu Yigang, He Bin, Huang Xiaolong, et al. The debate over mantle plumes and how to test the plume hypothesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14:1-9 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈雷, 支霞臣, 张招崇, 等. 云南丽江苦橄岩 Re-Os 同位素地球化学初步研究 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13:337-343.
Chen Lei, Zhi Xiachen, Zhang Zhaochong, et al. Preliminary study on Re-Os isotope geochemistry of picrites from Lijiang Area, Yunnan Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13:337-343 (in Chinese with English abstract).
- [23] Brenan J M. Re-Os fractionation by sulfide melt-silicate melt partitioning: A new spin [J]. *Chemical Geology*, 2008, 248:140-165.
- [24] Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? [J]. *Journal of Geological Society, London*, 2004, 161: 773-781.
- [25] 李杰, 许继峰, 何斌, 等. 藏东南木里地区二叠纪苦橄岩的 Sr-Nd-Os 同位素地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24 (2):337-347.
Li Jie, Xu Jifeng, He Bin, et al. Sr-Nd-Os isotope geochemistry of Permian picrites from Muli area, southeast Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 337-347 (in Chinese with English abstract).
- [26] Cox K G, MacDonald R, Hornung G. Geochemical and petrographic provinces in the Karoo basalts of southern Africa [J]. *American Mineralogist*, 1967, 52: 1451-1474.
- [27] Ford A B, Kistler R W. K-Ar age, compositional and origin of

- Mesozoic mafic rocks related to Ferrar Group, Pensacola Mountains, Antarctica [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1980, 23: 371-390.
- [28] Mantovani M S M, Marques L S, De Sousa, et al. Trace element and strontium isotope—constraints on the origin and evolution of the Parana continental flood basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil) [J]. *Journal of Petrology*, 1985, 26: 187-209.
- [29] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London Unwin Hyman, 1989.
- [30] Zhang Zhaochong, Wang Fusheng. Geochemistry of the two types of basalts of the Emeishan Basaltic Province: evidences for mantle plume—lithosphere Interaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76 (2): 138-147.
- [31] Xu Y, Chung S, Jahn B, et al. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southern China [J]. *Lithos*, 2001, 58:145-168.
- [32] Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, et al. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47:1997-2019.
- [33] Xu J F, Suzuki K, Xu Y G, et al. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts: insights into the source of a large igneous province [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71:2104-2119.
- [34] 郝艳丽, 张招崇, 王福生. 等. 峨眉山大火成岩省高钛和低钛玄武岩成因探讨 [J]. *地质论评*, 2004, 50:587-592.
Hao Yanli, Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, et al. Petrogenesis of high-Ti and low-Ti basalts from the Emeishan large igneous province [J]. *Geological Review*, 2004, 50:587-592 (in Chinese with English abstract).
- [35] 汪云亮, 李巨初, 周蓉生, 等. 岩浆岩微量元素地球化学原理及其应用——兼论峨眉山玄武岩的成因 [M]. 成都:成都科技大学出版社, 1993.
Wang Yunliang, Li Juchu, Zhou Rongsheng, et al. *Principle of Trace Element Geochemistry of Magma Rocks—Discussion on the Petrogenesis of the Emeishan Basalts* [M]. Chengdu: Chengdu Sciences and Technology University Press (in Chinese with English Abstract).
- [36] 艾羽, 张招崇, 王福生, 等. 攀枝花层状辉长质岩体的微量元素和 Sr-Nd-Pb-O 同位素系统: 对地幔源区和矿床成因的约束 [J]. *地质学报*, 2006, 80(7):995-1004.
Ai Yu, Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, et al. Trace Element and Sr-Nd-Pb-O isotopic systems of the Panzhihua layered gabbro intrusion: constraints on the mantle source regions and origin of V-Ti-Fe oxide deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(7):995-1004 (in Chinese with English abstract).
- [37] Tao Y, Li C, Song X, et al. Mineralogical, petrological and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and the associated Ni-Cu sulfide ores, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 43: 849-872 (in press).
- [38] Zhang Z C, Hao Y L, Ai Y, et al. Phase equilibria constraints on relations of ore-bearing intrusions with flood basalts in the Pan-Xi Region, SW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(1) (in press).
- [39] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions [J] *Earth Science Reviews*, 2001, 53:1-33.
- [40] Wignall P B. The Link between large igneous province eruptions and mass extinctions [J]. *Elements*, 2005, 1:293-297.
- [41] Ali J R, Thompson G M, Song X Y, et al. Emeishan basalts (SW China) and the 'end-Guadalupian' crisis [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 159: 21-29.
- [42] Chung S L, Jahn B. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23, 889-893.
- [43] Yin H F, Huang S, Zhang K, et al. The effects of volcanism on the Permo-Triassic mass extinction in South China [C]//Sweet W C (ed.). *Permo-Triassic Events in the Eastern Tethys*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1992:146-157.
- [44] Vogt P R. Evidence for global synchronism in mantle plume convection and possible significance for geology [J]. *Nature*, 1972, 240: 338-342.
- [45] Budyko M I, Pivivariva Z I. The influence of volcanic eruptions on solar radiation incoming to the Earth's surface [J]. *Meteorology Hidrology*, 1967, 10:3-7.
- [46] Axelrod D I. Role of volcanism in climate and evolution [J]. *Geologic Society of American, Special Paper*, 1981, 185:1-59.
- [47] Pollock J B, Toon O B, Sagan C, et al. Volcanic explosions and climate change: a theoretical assessment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81:1071-1083.
- [48] Kozur H W. Some aspects of the Permian-Triassic boundary PTB and of the possible causes for the biotic crisis around this boundary [J]. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 1998, 143, 227-272.
- [49] Saunders A D. Large igneous provinces: origin and environmental consequences [J]. *Elements*, 2005, 1:259-263.
- [50] Richards M A, Duncan R A, Courtillot V E. Flood basalts and hot-spot tracks; plume heads and tails [J]. *Science*, 1989, 246: 103-107.
- [51] Cordery M J, Davies G F, Campbell I H. Genesis of flood basalts from eclogite-bearing mantle plumes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102:20179-20120.
- [52] Farnetani C G. Excess temperature of mantle plumes; the role of chemical stratification across D'' [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 24:1583-1586.
- [53] Farnetani C G, Richards M A. Numerical investigations of the mantle plume initiation model for flood basalt events [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99:13813-13833.
- [54] Hill R I. Starting plumes and continental break-up [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104:398-416.
- [55] DePaolo D, Manga M. Deep origin of hotspots—Is only seeing believing? [J]. *Science*, 2003: 300.
- [56] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, et al. On causal links between flood basalts and continental breakup [J]. *Earth and*

- Planetary Science Letters, 1999, 166:177-195.
- [57] Olsen P E. Giant lava flows, mass extinctions, and mantle plumes [J]. Science, 1999, 284: 604-605.
- [58] Anderson D L. The edges of the mantle[C]// Gurnis M, Wyssession M E, Knittle E, et al (Eds.), The Core-Mantle Boundary Region. Washington, D C: Geodynamics 28, AGU, 1998:255-271.
- [59] Boutillier R, Keen C E. Small scale convection and divergent plate boundaries [J]. Journal of Geophysics Research, 1999, 104: 7389-7403.
- [60] King S D, Anderson D L. An alternative mechanism of flood basalt formation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 136: 269-279.
- [61] King S D, Anderson D L. Edge-driven convection [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 160: 289-296.
- [62] Keskin M. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey [J]. Geophysics Research Letter, 2003, 30: 8046-8049.
- [63] Corti G, van Wijk J W, Bonini M, et al. Transition from continental break-up to punctiform seafloor spreading: How fast, symmetric and magmatic [J]. Geophysics Research Letter, 2003, 30: 1604-1607.
- [64] Jone A P. Meteorite impacts as triggers to large igneous provinces [J]. Elements, 2005, 1:277-281.
- [65] Jones A P, Wunemann K, Price G D. Modeling impact volcanism as a possible origin for the Ontong Java Plateau [C]//Foulger G R, Natland J H, Presnall D C, et al (eds.). Plates, Plumes and Paradigms [J]. Geological Society of America, Special Paper, 2005, 388:711-720.
- [66] Alvarez W. Comparing the evidence relevant to impact and flood basalt at times of major mass extinctions [J]. Astrobiology, 2003, 3: 153-161.
- [67] He B, Xu Y, Xiao L, et al. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213: 391-405.
- [68] Xu Y, He B, Chung S L, et al. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province [J]. Geology, 2004, 32: 917-920.
- [69] 张招崇, 王福生. 峨眉山大火成岩省中发现二叠纪苦橄岩[J]. 地质论评, 2002, 48:448.
Zhang Zhaochong, Wang Fusheng. Discovery of the Permian picrites in the Emeishan large igneous province [J]. Geology Review, 2002, 48: 448.
- [70] Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 99:79-93.
- [71] Allègre C H, Turcotte D L. Geodynamic mixing in the mesosphere boundary layer and the origin of oceanic islands [J]. Geophysical Research Letters, 1985, 97:10997-11009.
- [72] Hofmann A W. Mantle plumes from ancient oceanic crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 57: 421-436.
- [73] Anderson D L. Large igneous provinces, delamination and fertile mantles [J]. Elements, 1:271-275.
- [74] Walker R J, Storey M, Kerr A C, et al. Implications of 187Os isotopic heterogeneities in a mantle plume: Evidence from Gorgona Island and Curaçao [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 713-728.
- [75] Walker RJ, Morgan JW, Hanski EJ, et al. Re-Os systematics of Early Proterozoic ferropicrites, Pechenga Complex, NW Russia: evidence for ancient ¹⁸⁷Os enriched plumes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61: 3145-3160.
- [76] 史仁灯, 郝艳丽, 黄启帅. 峨眉山大火成岩省壳幔相互作用的 Re-Os 同位素证据及成因构造背景探讨[J]. 岩石学报, 2008, 24 (11): 2515-2523.
Shi Rendeng, Hao Yanli, Huangqishuai. Re-Os systematics constrains the crust-mantle interaction in the Emeishan large igneous province and its tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 24(11): 2515-2523.
- [77] Van Orman J A, Keshav S, Fei Y W. High-pressure solid/liquid partitioning of Os, Re and Pt in the Fe-S system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 274: 250-257.
- [78] Campbell I H. Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis [J]. Elements, 2005, 1: 265-269.
- [79] Griffiths R W, Campbell I H. Interaction of mantle plume heads with the Earth's surface and onset of small scale convection [J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96 (B11): 18295-18310.
- [80] Ernst R E, Head J W, Parfitt E, et al. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus [J] Earth Science Reviews, 1995, 39: 1-59.
- [81] 何斌, 徐义刚, 肖龙. 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据 [J]. 地质学报, 2003, 77:194-202.
He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, et al. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: New evidence from stratigraphic records [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77: 194-202 (in Chinese with English abstract).
- [82] 姜常义, 钱壮志, 姜寒冰. 等. 云南宾川—永胜—丽江地区低钛玄武岩和苦橄岩的岩石成因与源区性质 [J]. 岩石学报, 2007, 23: 777-792.
Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, Jiang Hanbing, et al. Petrogenesis and source characteristics of low-Ti basalts and picrites at Binchuan-Yongsheng-Lijiang region, Yunnan, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23:777-792 (in Chinese with English abstract).
- [83] Baragar W R A, Ernst R E, Hulbert L, et al. Longitudinal petrochemical variation in the Mackenzie dyke swarm, northwestern Canadian Shield [J]. Journal of Petrology, 1996, 37 (2): 317-359.

A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province

ZHANG Zhao-chong

(State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Although researches on the Emeishan large igneous province (ELIP) have been fruitful in recent years, some important problems remain controversial. This paper has dealt with such important problems as the eruption age, distribution, high-Ti and low-Ti basalts, the relationship between the layered intrusions, basalts and mineralization, the connection to mass extinction and mantle plume, and related issues. The solution of these problems is likely to play a key role in further studies of large igneous provinces.

Key words: Emeishan large igneous province; basalt; magmatic deposits; mass extinction; mantle plume; lithospheric mantle

About the first author: ZHANG Zhao-chong, male, born in 1965, professor, supervisor of Ph.D. candidates, engages in the study of igneous petrology, geochemistry and economic geology; E-mail: zczhang@cugb.edu.cn.