

峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省 地球化学特征的比较及其成因启示

张招崇^{1,2}, 王福生¹, 郝艳丽¹, John J. Mahoney³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083;

3. School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA)

摘要: 峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省是发生于二叠-三叠纪之交的重要岩浆事件。它们在主要元素、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素特征上具有相似性, 但是峨眉山大火成岩省的不相容元素比值和同位素比值的变化范围相对要小一些。相对而言, 峨眉山玄武岩具有高的 Fe_8 和 Sm/Yb 值, 暗示了其熔融深度较西伯利亚大火成岩省深, 而熔融程度较低, 两者的源区均为石榴石二辉橄榄岩。根据 Nd 同位素特征估算峨眉山和西伯利亚地幔柱的 $\epsilon Nd \approx 2$, 接近于原始地幔特征。综合其他地球化学特征, 认为两个大火成岩省可能起源于同一个来自于核-幔边界的超级地幔柱。

关键词: 地球化学特征; 地幔柱; 成因; 峨眉山大火成岩省; 西伯利亚大火成岩省

中图分类号: P594; P588.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)01-0012-09

A geochemical comparison between the Emeishan and Siberian large igneous provinces and its petrogenetic implications

ZHANG Zhao-chong^{1,2}, WANG Fu-sheng¹, HAO YAN-li¹ and John J. Mahoney³

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences,

Beijing 100083, China; 3. School of Ocean and Earth Science and Technology, University of Hawaii, Honolulu, HI 96822, USA)

Abstract: The Emeishan and the Siberian large igneous provinces (LIP) represent two major magmatic events close to the Permian-Triassic boundary. They are characterized by similar major element, microelement, and Sr, Nd and Pb isotopic compositions. However, the variation ranges of the incompatible element ratios and isotopic ratios are much narrower in the Emeishan LIP than in the Siberian LIP. Compared with the Siberian LIP, the Emeishan basalts have somewhat higher Fe_8 , and Sm/Yb ratios, suggesting a relatively greater depth and a lower degree of melting. Their source regions are garnet lherzolite. Based on the Nd isotopic characteristics, the ϵNd value of Emeishan and Siberian plume is estimated to be approximately 2, close to that of the primitive mantle. In combination with other geochemical characteristics, it is proposed that the two LIPs might have originated from the same super-plume derived from the core-mantle boundary.

Key words: geochemical characteristics; mantle plume; petrogenesis; Emeishan large igneous province; Siberian large igneous province

收稿日期: 2004-02-23; 修订日期: 2004-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40273020); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043205); 国土资源部百名优秀青年计划资助

作者简介: 张招崇(1965-), 男, 研究员, 主要从事火成岩岩石学和有关矿床学研究。

地球上周期性的、短时间(1~2 Ma)内巨量喷发形成的大火成岩省(Large Igneous Province, LIP)内岩浆的体积超过了全球洋中脊形成的岩浆,如此大规模喷发的地球动力学背景一直是地质学家研究的热点课题之一。峨眉山大火成岩省的喷发时代为二叠纪和三叠纪之交,基本上与俄罗斯西伯利亚暗色岩(Siberian Traps)和印度的Panjal暗色岩相当。这3个LIP在喷发时间上如此接近自然会引出这样的问题,即为什么二叠纪和三叠纪之交全球会发生如此大规模的火山喷发?这种大规模火山喷发的全球地幔动力学和地球动力学背景又是什么?火山岩的地球化学研究可以对这些问题提供重要约束。

目前,对西伯利亚大火成岩省已经进行了大量的地球化学研究,在国际刊物上发表了大量的相关论文。相比之下,我国的峨眉山大火成岩省研究尽管起步较早(梅厚均,1973;刘秉光等,1982;熊舜华等,1984;沈发奎等,1984;骆耀南,1985;朱中一等,1986;李昌年,1986),但其研究程度要低得多,积累的地球化学资料少而不系统。而印度的Panjal由于自然地理条件等原因,目前有关资料极少,无法进行

对比研究。尽管峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省喷发时间的接近已引起人们的关注(如Chung *et al.*, 2002;徐义刚等,2001),但是系统的地球化学对比还未进行。本文试图通过两个大火成岩省已发表的主要元素、微量元素和同位素特征的对比研究,揭示它们的成因信息。

1 地质特征

两个大火成岩省的特征前人均已做过介绍(骆耀南,1985;Zolotukhin and Al'mukhamedov,1988;Naldrett *et al.*,1992;汪云亮等,1993;Sharma,1997;张招崇等,2001)。为了更好地进行地球化学对比,在此简单介绍两者的地质特征。

峨眉山大火成岩省位于扬子地块的西缘(图1),出露面积约250 000 km²,估计喷发体积在 $0.3 \times 10^6 \sim 0.5 \times 10^6$ km³(Yin *et al.*,1992;Jin & Shang,2000)。火山岩覆盖在早二叠世茅口组灰岩之上。熔岩具有西厚东薄的特点。在西部的云南丽江和宾川一带厚度可达5 000余米。火山岩主要由溢流的

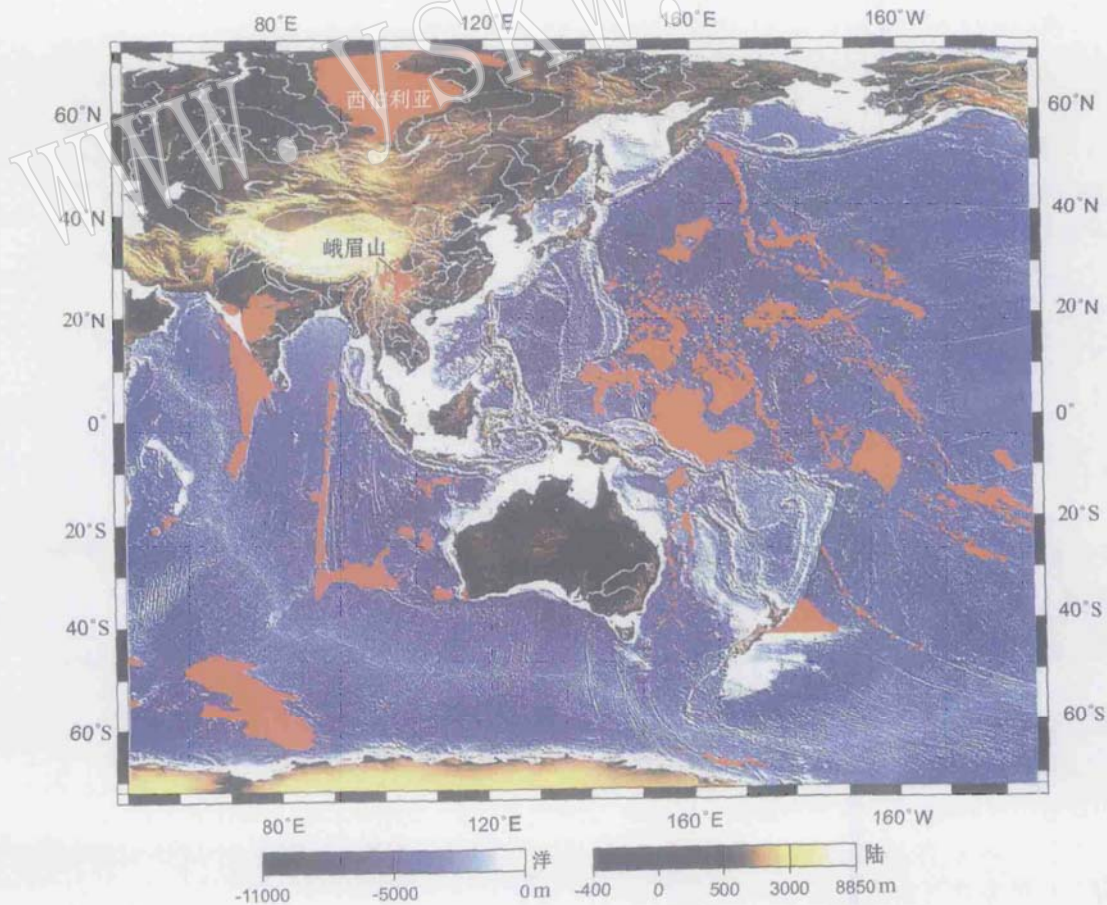


图1 峨眉山大火成岩省和西伯利亚大火成岩省的地理位置(据Mahoney,1997)

Fig.1 Geographic locations of the Emeishan and the Siberian large igneous provinces(after Mahoney, 1997)

拉斑玄武岩组成,早期出现少量的碱性玄武岩,晚期在火山岩的顶部出露少量的粗面岩和流纹岩。另外,在云南丽江一带还出现少量的苦橄岩(张招崇等,2002)。峨眉山大火成岩省中部的攀西地区出露大量与之有关的基性-超基性层状岩体,这些岩体赋存有世界储量最大的钒钛铁矿床。目前,峨眉山大火成岩省的形成时代还没有很好的约束,Lo等(2002)测得其上部层位的年龄为251~253 Ma,与之有关的含钒钛铁矿的层状岩体形成时代为256~258 Ma(Zhou *et al.*, 2002),所以由此推测层状岩体可能代表了岩浆房的产物。

西伯利亚大火成岩省位于西伯利亚地台的西北缘,分布面积大于 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图1),熔岩最大厚度3 km以上,平均厚度为1 km。火山岩的主体由相对均匀的无斑、多斑的拉斑玄武岩组成,包括苦橄岩、拉斑玄武岩、碱性橄辉玄武岩、粗面玄武岩、粗安岩、碧玄岩和麦美奇岩。与峨眉山大火成岩省相似的是,碱性岩石形成于早期。与峨眉山大火成岩省不同的是,火山岩中没有沉积夹层。最引人注目的是,在Tunguska盆地中出现大量的玄武质凝灰岩,其最大厚度达700 m。与峨眉山大火成岩省的层状岩体不同的是,该层状侵入岩赋存有世界著名的Noril'sk大型Cu-Ni-PGE矿床。目前,西伯利亚大火成岩省已有很好的测年结果,主期玄武岩的U-Pb锆石年龄为 $251.2 \pm 0.3 \text{ Ma}$ (Kamo *et al.*, 1996), ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 $250.0 \pm 1.6 \text{ Ma}$ (Renne *et al.*, 1994),而早期的碱性橄辉玄武岩的年龄为 $253.3 \pm 2.6 \text{ Ma}$ (Basu *et al.*, 1995),所以Sharma(1997)认为75%以上的岩浆是在1 Ma年之内喷出的。

2 地球化学特征比较

2.1 主量元素

由于峨眉山和西伯利亚两个大火成岩省的岩石组合特征相似,所以在主量元素特征上也基本相似,表现在 TiO_2 含量的变化范围大,为1%~5%(Sharma, 1997; 徐义刚等, 2001; 张招崇等, 2001); MgO 含量的变化范围也大,为4%~25%(Lightfoot *et al.*, 1993; 张招崇等, 2004)。和大多数溢流玄武岩一样,这两个大火成岩省均具有高铁的特征(>10%),指示了其深源以及地幔柱源,因为地幔柱源比一般的MORB源富铁(Scarraw and Cox, 1995)。

大多数溢流玄武岩是分离结晶作用的产物,为

了消除分离结晶效应对研究源区的影响,通常利用线性回归的方法,将其回归到 $\text{MgO}=8\%$,得到的相应氧化物值分别写成 Fe_8 、 Na_8 等(Klein & Langmuir, 1987, 1989)。如果地幔柱源区的主要元素成分和洋中脊玄武岩(MORB)的源区成分相似,那么由于地幔柱起源比MORB深,其形成的熔体和MORB比较应该具有高的 Fe_8 、 $(\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3)_8$ 和低 Na_8 。由图2可知,两个大火成岩省均位于MORB右侧, Fe_8 均较高,反映了二者形成压力较高,指示二者可能与地幔柱有关(Lassiter & Depaolo, 1997)。但是,峨眉山大火成岩省的 Fe_8 和 $(\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3)_8$ 比西伯利亚大火成岩省高,暗示了前者的形成压力也相对较高。另外,峨眉山大火成岩省内不同地区的玄武岩,其 Fe_8 有些差别,位于西部的丽江地区比位于其东部的宾川、永胜和二滩一带的 Fe_8 相对要高,

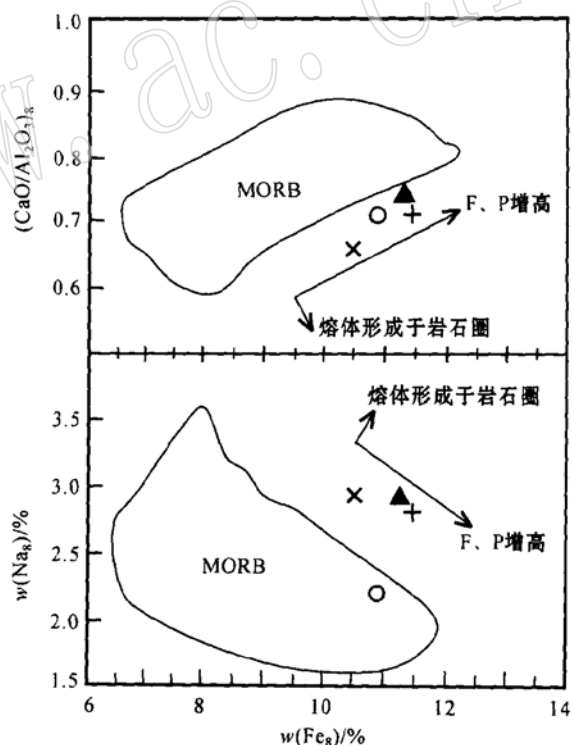


图2 $(\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3)_8$ 和 Na_8 对 Fe_8 图解

Fig.2 Diagram of $(\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3)_8$ and Na_8 versus Fe_8
 +—丽江玄武岩(Zhang *et al.*, 2004); ×—宾川和永胜玄武岩;
 ▲—二滩玄武岩; ○—西伯利亚玄武岩
 用于计算的数据来源: Xu等(2001)、Zhang & Wang(2002)、
 汪云亮等(1993)和 Lassiter & DePaolo(1997)
 +—basalts from Lijiang(Zhang *et al.*, 2004); ×—basalts from
 Binchuan and Yongsheng; ▲—basalts from Ertan; ○—basalts from
 Siberian. The data sources for calculation: Xu *et al.* (2001), Zhang
 & Wang (2002), Wang Yunliang *et al.* (1993) and Lassiter & De-
 Paolo (1997)

暗示了前者形成深度较后者高,另一方面也可能与后者的源区有岩石圈地幔物质的加入有关。

2.2 微量元素

不相容元素因具相似的分配系数,所以其比值不受分离结晶作用的影响,并且在地幔部分熔融过程中只有很小的变化,因而可以用来指示源区特征。相对于中稀土元素(如 Sm),轻稀土元素 La 无论与石榴石还是尖晶石均不相容,而中稀土元素相对于重稀土元素(如 Yb)的富集程度则取决于部分熔融时是否有石榴石作为残留矿物相,因为重稀土元素倾向于富集于石榴石中而不是绝大多数矿物相[根据 McKenzie & O'Nions (1991)的分配系数推断]。另外,分离结晶作用导致的 La/Sm 和 Sm/Yb 值变化较小,用这两个比值可以了解其源区性质和部分熔融程度。为了消除地壳混染作用对判断地幔源区的影响,去除在微量元素原始地幔标准化图解上显示明显的具 Nb、Ta 负异常的样品。由图 3 可以看出,两个大火成岩省均落在由石榴石二辉橄榄岩组成的原始地幔熔融线上,但是峨眉山大火成岩省中丽江地区玄武岩的 Sm/Yb 值较高,而宾川、永胜和二滩地区与西伯利亚大火成岩省接近。这暗示丽江

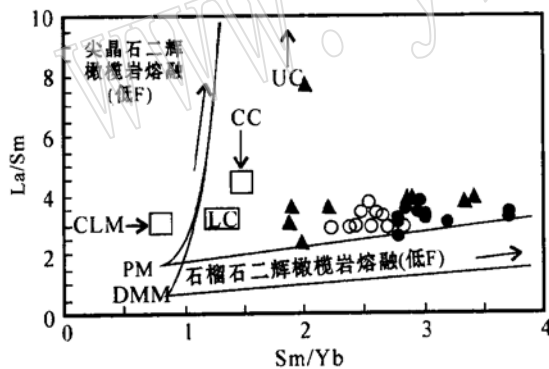


图 3 La/Sm 对 Sm/Yb 图解(底图据 Lassiter & Depaolo, 1997)

Fig. 3 Diagram of La/Sm versus Sm/Yb (after Lassiter & Depaolo, 1997)

PM—原始地幔(McKenzie & O'Nions, 1991); DMM—亏损地幔(McKenzie & O'Nions, 1991); CLM—大陆岩石圈地幔(McDonough, 1990); LC—下地壳; CC—整个地壳; UC—上地壳(Taylor & McLennan, 1985); ●—丽江苦橄岩和玄武岩; ▲—宾川和永胜玄武岩; ○—西伯利亚玄武岩

PM—primary mantle (McKenzie & O'Nions, 1991); DMM—depleted mantle (McKenzie & O'Nions, 1991); CLM—continental lithospheric mantle (McDonough, 1990); LC—lower crust; CC—bulk crust; UC—upper crust (Taylor & McLennan, 1985); ●—picrites and basalts from Lijiang; ▲—basalts from Binchuan and Yongsheng; ○—basalts from Siberia

玄武岩部分熔融程度相对较低。由于地幔中石榴石的稳定深度在 75 km 以上(Nickel, 1986),所以该图也说明两个大火成岩省是在厚的岩石圈下由异常热的地幔经低部分熔融形成的。

2.3 同位素

两个大火成岩省的 Sr、Nd、Pb 同位素组成特征见图 4。两个大火成岩省的同位素特征具有一定相似性,均有相当数量的样品落在 OIB 之内。但是西伯利亚大火成岩省的同位素成分变化范围要大得多,其中一个可能原因是与峨眉山大火成岩省积累的数据较少有关。然而从目前的数据来看,两个大火成岩省低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 和高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 与地壳的混染有关(Naldrett *et al.*, 1992; Lightfoot *et al.*, 1990, 1993)。在 Pb 同位素组成上,两个大火成岩省虽然均落在北半球参考线之上,但是西伯利亚大火成岩省没有一个落在 DUPAL OIB 内,而峨眉山大火成岩省有少部分样品落在其中,这一点与 Parana, Deccan, Columbia River 大火成岩省相似。

在峨眉山大火成岩省内,不同地区玄武岩的 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成有所区别,相比而言,丽江地区的苦橄岩和玄武岩具有相对低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 、 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 和 Pb 同位素比值。

3 讨论和初步结论

通常认为,以短时间内(往往 < 1 Ma)巨量喷发为特征的溢流玄武岩(CFB)是地幔柱作用的结果(Griffiths, 1986; Mutter & Zehnder, 1988; White & McKenzie, 1989; Griffiths and Campbell, 1990),但是西伯利亚大火成岩省由于缺少与地幔柱作用有关的地质证据,如喷发前的地表大幅度隆起,所以一些学者并不认为其与地幔柱有关(Lightfoot *et al.*, 1990; Czamanske *et al.*, 1998)。然而也有一些学者认为,由于西伯利亚大火成岩省喷发出的巨大熔岩质量(体积 > $2 \times 10^6 \text{ km}^3$, Fedorenko *et al.*, 1996)会使地壳下沉,从而抵消了喷发前的大幅度隆起,而且短时间内的巨量喷发(约 $1.7 \text{ km}^3/\text{a}$, Renne and Basu, 1991)也只有地幔柱才能解释(Basu *et al.*, 1995; Fedorenko *et al.*, 1996; Sharma, 1997)。相比之下,峨眉山大火成岩省的研究尽管起步比西伯利亚大火成岩省要晚得多,但最近已取得重要进展。何斌等(2003)根据茅口组灰岩的空间分布特征提出峨眉山玄武岩喷发之前,有一个快速的穹状隆起,从而为地幔柱的存在提供了可靠的证

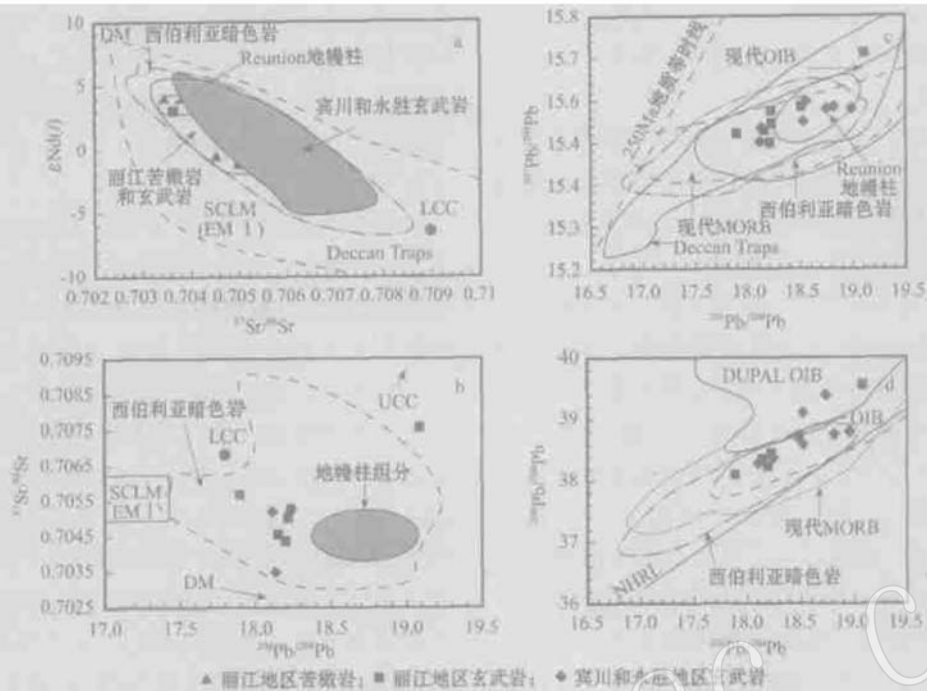


图4 峨眉山和西伯利亚大火成岩省的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 和 Pb 同位素组成图解

Fig. 4 Diagrams showing $\epsilon\text{Nd}(t)$ versus $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$, versus $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$, and Pb isotopic compositions of the Emeishan and the Siberian large igneous provinces

数据来源:西伯利亚和Deccan大火成岩省分别引自 Sharma 等 (1992), Sharma (1997) 和 Mahoney (1988) 及其内引用的文献;峨眉山大火成岩省引自 Xu 等 (2002), 张招崇等 (2004), 张招崇等 (2003); OIB、MORB 和 DUPAL OIB 的范围根据 Hart (1984), Zindler & Hart (1986)、Ito 等 (1987), NHRL—北半球参考线, 根据 Hart (1984); SCLM—大陆岩石圈下地幔; UCC—上地壳; DM—亏损地幔; LCC—下地壳
Data of Siberian and Deccan LIPs from Sharma *et al.* (1992), Sharma (1997), and Mahoney (1988) respectively; data of the Emeishan LIP from Xu *et al.* (2002), Zhang *et al.* (2004) and Zhang *et al.* (2003); data of OIB, MORB and DUPAL OIB after Hart (1984), Zindler & Hart (1986), Ito *et al.* (1987); NHRL is northern hemisphere reference line, it is from Hart (1984); SCLM—subcontinental lithospheric mantle; UCC—upper crust; DM—depleted mantle; LCC—lower crust

据。张招崇和王福生(2004)通过对苦橄岩中高镁橄榄石的研究得出,其形成的液相线温度为 1600°C ,这个温度高于全球软流圈的温度 $250 \sim 320^{\circ}\text{C}$,也说明峨眉山大火成岩省的形成与地幔柱有关。

由图2可以看出,两个大火成岩省的主要元素均显示出高 Fe_8 ,表明它们可能来自于地幔柱;稀土元素特征也表明其源区不是岩石圈地幔(图3),而是由接近原始地幔成分的石榴石二辉橄榄岩低程度熔融形成的。相对而言,峨眉山大火成岩省岩浆形成的压力要大,熔融程度要低。

通常认为,由于大洋岩石圈较薄,所以大洋溢流玄武岩(OFB)大多来自于地幔柱,受岩石圈物质污染的程度较低(Mahoney, 1995; Lassiter *et al.*, 1995)。因此,峨眉山和西伯利亚两个大火成岩省较低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值可以解释为受岩石圈地幔或地壳物质污染的结果(Sharma *et al.*, 1992),而西伯利亚大

火成岩省较低的负值是混入了较多地壳物质的结果,其中的正值则可以认为是地幔柱物质熔融的结果。无论是 OFB 还是 CFB,均有一个相同的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 范围($0 \sim +4$, 图5),这个共同的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值可能代表了地幔柱的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值。由图5可以看出,两个大火成岩省 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 出现频率最大的均在 $+2$ 左右,暗示了其在地幔柱的同位素成分相似,大约在 $+2$ 左右。因此,其较高的正值可能是少量软流圈地幔混入的结果。另一方面,估算的地幔柱的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值表明其成分接近未脱气的原始地幔成分,而不是 MORB 型的亏损地幔,这与其稀土元素投影在原始地幔熔融线上的特征一致(图3)。

对于地幔柱的起源,目前有两种观点:一种认为其起源于上、下地幔边界(White and McKenzie, 1989),另一种认为其起源于核-幔边界(Campbell *et al.*, 1990)。尽管西伯利亚大火成岩省积累了大量

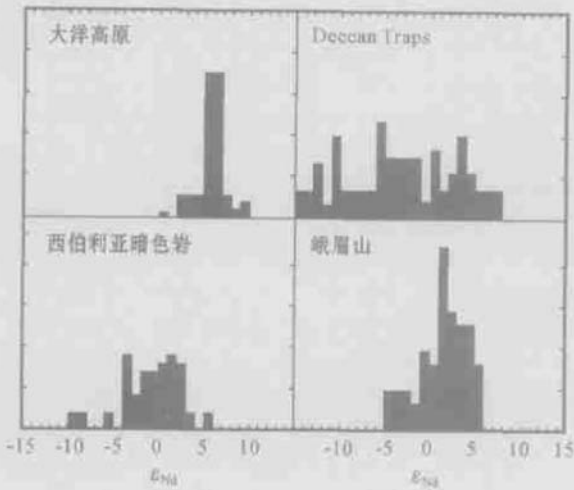


图 5 几个大火成岩省和大洋溢流玄武岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 比较

Fig. 5 Comparison of $\epsilon_{Nd}(t)$ values between several large igneous provinces and oceanic plateaus

峨眉山数据据 Zhang 等 (2004), 张招崇等 (2004) 和 Xu 等 (2001); 其他数据据 Lassiter & DePaolo (1997)

Data sources: Emeishan LIP from Zhang *et al.* (2004), Xu *et al.* (2001), and other data from Lassiter & DePaolo (1997)

的地球化学资料,但目前对于西伯利亚地幔柱的起源问题还没有进行过讨论。Horan 等 (1995) 对西伯利亚大火成岩省中早期苦橄岩的 Os 同位素分析表明,其 γ_{Os} 为 $+5.3 \sim +6.1$, 该值与夏威夷苦橄岩相似 (Norman & Garcia, 1999), 而后者被认为有外核物质的加入 (Brandon *et al.*, 1998; Norman & Garcia, 1999), 因此推测西伯利亚地幔柱也可能有外核物质的加入, 亦即来自核-幔边界。张招崇等 (2003) 对峨眉山大火成岩省中的高 Os 苦橄岩进行了理论模拟, 得出峨眉山苦橄岩的源区也可能有外核物质加入, 认为峨眉山地幔柱可能起源于核-幔边界。尽管目前讨论有关两个大火成岩省地幔柱的起源问题为时尚早, 但根据它们的地球化学相似性可初步推测, 两个大火成岩省可能起源于同一个来自于核-幔边界的超级地幔柱。当这个超级地幔柱上升到上、下地幔边界时分支成 3 个小的地幔柱, 这 3 个小的地幔柱上升到岩石圈之下时发生熔融并与岩石圈发生不同程度的作用, 由此形成了二叠-三叠纪之交全球 3 个大火成岩省 (图 6)。在非裂谷环境, 岩石圈是地幔柱上升的天然“屏障”, 所以岩石圈的厚度制约着岩浆的形成深度和部分熔融程度 (McKenzie and O'Nions, 1995), 因而地幔柱上升到厚而刚性的岩石圈之下时所经历的熔融程度比上升到薄的岩石圈要低, 其起始熔融的深度则较深 (Ellam, 1992;

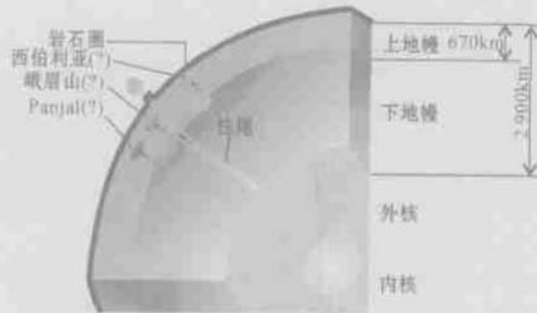


图 6 峨眉山和西伯利亚大火成岩省可能成因的地幔柱模型 (据 Arndt, 2000)

Fig. 6 A possible mantle plume model for explanation of the origin of the Emeishan and Siberian large igneous provinces (after Arndt, 2000)

Saunders *et al.*, 1992)。根据以上对两个大火成岩省的地球化学特征讨论推测, 峨眉山大火成岩省的岩石圈相对较厚, 其开始发生部分熔融的深度较大 (15 km), 熔融程度相对较低; 而西伯利亚大火成岩省的岩石圈相对薄一些, 因此熔融的深度较小 (75 ~ 100 km) (Sharma, 1997), 并且熔融程度略高一些。但是相对于大洋溢流玄武岩, 这两个大火成岩省的熔融程度相对要低, 熔融深度相对要大, 因为大洋岩石圈要薄得多 (Neal *et al.*, 2002)。当然随着时间和空间的演化, 岩浆的源区会发生相应的变化, 有时可能以岩石圈地幔为主。另外岩浆在上升过程中, 也会发生不同程度的地壳混染作用。由于两个大火成岩省的地质背景不同, 所以它们经历了不同的演化过程, 其中西伯利亚大火成岩省的地壳混染程度相对要高一些。可能正是由于它们经历了不同的演化过程, 才导致了两个大火成岩省产出不同的矿床类型。

References

Arndt N T, Naldrett A J and Pyke D R. 1977. Komatiite and iron-rich tholeiitic lavas of Munro Township, northeast Ontario [J]. *J. Petrol.*, 18: 319-369.
 Basu A R, Poreda R J, Renne P R, *et al.* 1995. High-³He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts [J]. *Science*, 269: 822-825.
 Brandon A D, Walker R J, Morgan J W, *et al.* 1998. Coupled ¹⁸⁶Os and ¹⁸⁷Os evidence for core-mantle interaction [J]. *Science*, 280: 1570-1573.
 Campbell I H and Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume

- structure for the evolution of flood-basalts[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 99: 79~83.
- Chung S L, Jahn B M, Wu G Y, *et al.* 2002. 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[A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, *et al.* *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*[C]. AGU Geodynamics Series, 27: 47~58.
- Czamanske G K, Gurevitch A B, Fedorenko V, *et al.* 1998. Demise of the Siberian plume, paleogeographic and paleotectonic reconstruction from the prevolcanic and volcanic record, north-central Siberia [J]. *International Geology Review*, 40: 95~115.
- Ellam R M. 1992. Lithospheric thickness as a control on basalt geochemistry[J]. *Geology*, 20: 153~156.
- Griffiths R W. 1986. Thermals in extremely viscous fluids, including the effects of temperature-dependent viscosity [J]. *J. Fluid Mech.*, 166: 115~138.
- Griffiths R W and Campbell I H. 1990. Stirring and structure in mantle starting plumes[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 99: 66~78.
- Hart S R & Staudigel H. 1989. Isotopic characterization and identification of recycled components[A]. Hart & Gulen. *Crust/Mantle Recycling at Convergence Zones*[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 15~28.
- He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, *et al.* 2003. Mechanism and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: new evidence from sedimentary strata[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 194~202 (in Chinese with English abstract).
- Horan M F, Walker R J, Fedorenko V A, *et al.* 1995. Osmium and neodymium isotopic constraints on the temporal and spatial evolution of Siberian flood basalt sources [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 5159~5168.
- Ito E W, White W M and Gopel C. 1987. The O, Sr, Nd and Pb isotope chemistry of MORB[J]. *Chem. Geol.*, 62: 157~176.
- Jin Y and Shang J. 2000. The Permian of China and its interregional correlation[A]. Yin H. *Permian-Triassic Evolution of Tethys and Western Circum-Pacific*[C]. *Dev. Palaeo. Strat.*, 18: 71~98.
- Kamo S L, Czamanske G K and Krough T E. 1996. A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism[J]. *Geochim. Geochim. Acta*, 60: 3505~3511.
- Klein E M & Langmuir C H. 1987. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with the axial depth and crustal thickness[J]. *J. Geophys. Res.*, 92: 8089~8115.
- Klein E M & Langmuir C H. 1989. Local versus global variations in ocean ridge basalt composition: a reply[J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 4241~4252.
- Lassiter J C, Depaolo D J and Mahoney J J. 1995. Geochemistry of the Wrangellia flood basalt province: Implications for the role of continental and oceanic lithosphere in flood basalt genesis[J]. *J. Petrol.*, 36: 983~1009.
- Lassiter J C & Depaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotope constraints[A]. Mahoney J J. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*[C]. *Geophysical Monography* 100, American Geophysical Union, 335~355.
- Li Changnian. 1986. Study on the petrology and petrogenesis of the Emeishan basalts in the western Panzhihua rift belt in Sichuan province[J]. *Earth Sciences*, 11(6): 577~584 (in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Devey N W, *et al.* 1990. Source and differentiation of Deccan Traps lavas: Implications of geochemical and mineral chemical variations[J]. *J. Petrol.*, 31: 1165~1200.
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Herg T J, *et al.* 1993. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-Nd- and Pb-isotope evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 171~188.
- Liu Bingguang and Huang Kainian. 1981. Emeishan basalts and rifting [A]. *Selected Works of the Fruits of Geological Sciences*[C]. Beijing: Cultural Relic Publishing House, 208~212 (in Chinese).
- Lo C H, Chung S L, Lee T Y, *et al.* 2002. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian-Triassic boundary events[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 198: 449~458.
- Luo Yaonan. 1985. Ancient rift belt of the Panzhihua-Xichang of China[A]. *Collecting of the Panxi Rift in China (No.1)*[C]. Beijing: Geological Publishing House, 1~25 (in Chinese).
- Mahoney J J. 1988. Deccan Traps [A]. Macdougall J D. *Continental Flood Basalts*[C]. Kluwer Academic Publishers, 151~194.
- Mahoney J J. 1995. Cretaceous plateau volcanism in the Southeast Indian Ocean: Geochemical characteristics of lavas from Broken Ridge, the Naturaliste Plateau, and southernmost Kerguelen Plateau[J]. *Chem. Geol.*, 120: 315~345.
- Mahoney J J. 1997. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism[J]. *Geophysical Monography* 100, American Geophysical Union.
- McDonough W F. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle[J]. *Earth Sci. Planet. Lett.*, 101: 1~18.
- Mckenzie D and O'Nions K. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations[J]. *J. Petrol.*, 32: 1021~1091.
- Mckenzie D and O'Nions K. 1995. The source regions of ocean island basalts[J]. *J. Petrol.*, 36: 133~159.
- Mei Houjun. 1973. Petrochemical characteristics of two series of deep differentiation of the Southwest Traps and its relation to Fe-Ni mineralization[J]. *Geochimica*, (4): 219~253 (in Chinese with English abstract).
- Mutter J C & Zehnder C M. 1988. Deep crustal structure and magmatic processes: the inception of seafloor spreading in the Norwegian-Greenland[J]. *Bull. Geol. Soc. Denmark*, 23: 175~190.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V, *et al.* 1992. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk Region, with implications for the origin of the Ni-Cu ores [J]. *Econ. Geol.*, 87: 975~1004.

- Neal C R, Mahoney J J and Chazey W J. 2002. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: results from ODP Leg 183[J]. *J. Petrol.*, 43: 1 177~1 205.
- Nickel K G. 1986. Phase equilibria in the system $\text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ (SMACCR) and their bearing on spinel/garnet lherzolite relationships[J]. *Neues Jahrb. Miner. Abh.*, 155: 259~287.
- Norman M D & Garica M O. 1999. Primitive magmas and source characteristics of the Hawaiian plume: petrology and geochemistry of shield picrites [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168: 27~44.
- Renne P R and asu A R. 1991. Rapid eruption of the Siberian Traps flood basalts at the Permo-Triassic boundary[J]. *Science*, 253: 176~179.
- Renne P R, Deino A L, Walter B D, *et al.* 1994. Intercalibration of astronomical and radio-isotopic time. *Geology*[J]. 22: 783~786.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, *et al.* 1992. Consequences of plume-lithosphere interaction [A]. Storey B C, Alabaster and Pankhurst R J. *Magmatism and the Causes of Continental Break-up* [C]. *Spec. Publ.*, Geological Society of London, 68: 41~60.
- Scarrow J H and Cox K G. 1995. Basalts generated by decompressive adiabatic melting of a mantle plume: a case study from Isle of Skye, NW Scotland[J]. *J. Petrol.*, 36: 3~22.
- Sharma M A. 1997. Siberian Traps [A]. Mahoney J J. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism* [C]. *Geophysical Monography* 100, American Geophysical Union, 273~295.
- Sharma M A, Basu R and Nesternko G V. 1992. Temporal Sr-Nd- and Pb-isotopic variations in the Siberian flood basalts: implications for the plume-source characteristics [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 113: 365~381.
- Shen Fakui and Liu Ta. 1984. Bimodal volcanic rocks in the Panzhihua rift belt[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 4(1): 1~15 (in Chinese with English abstract)
- Song X, Zhou M, Hou Z, *et al.* 2001. Geochemical constraints on the mantle source of the upper Permian Emeishan continental flood basalts, southern China[J]. *Inter. Geol. Rev.*, 43: 213~225.
- Taylor S R & McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 312.
- Wang Yunliang, Li Junchu, Zhou Rongsheng, *et al.* 1993. *Principle of Trace Element Geochemistry of Magma Rocks—Discussion on the Petrogenesis of the Emeishan Basalts* [M]. Chengdu Sciences and Technology University Press (in Chinese with English Abstract).
- White R S & McKenzie D P. 1989. Magmatism at rift zones: the generation of volcanic continental margins and flood basalts [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 7 685~7 730.
- Xiao L, Xu Y, Chung S L, *et al.* 2003. Chemostratigraphic correlation of Upper Permian lavas from Yunnan Province, China: Extent of the Emeishan large igneous province [J]. *Inter. Geol. Rev.*, 45: 753~766.
- Xiong Shunhua and Li Jianlin. 1984. Characteristics of basalts from the margin of continental rift in Late Permian in the Emeishan province [J]. *Acta of Chengdu College of Geology*, 17(1): 43~57 (in Chinese with English).
- Xu Y, Chung S, Jahn B, *et al.* 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Perian-Triassic Emeishan flood basalts in southern China [J]. *Lithos*, 58: 145~168.
- Xu Yigang and Chung Sunlin. 2001. The Emeishan large igneous province: evidence for mantle plume activity and melting conditions [J]. *Geochimica*, 30: 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Yin H F, Huang S, Zhang K, *et al.* 1992. The effects of volcanism on the Permo-Triassic mass extinction in South China [A]. Sweet W C. *Permo-Triassic Events in Eastern Tethys* [C]. Cambridge University Press, 146~157.
- Zhang Zhaochong, Hao Yanli and Wang Fusheng. 2003. Picrites in large igneous provinces and implications [J]. *Frontiers of Geosciences*, 10(3): 347~358 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2001. A discussion on some problems concerning the study of the Emeishan basalts [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 239~246 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2002. Geochemistry of the two types of basalts of the Emeishan Basaltic Province: evidences for mantle plume-lithosphere Interaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 138~147.
- Zhang Zhaochong and Wang Fusheng. 2002. Discovery of picritic lavas in the Emeishan large igneous province [J]. *Geological Review*, 48(4): 448 (in Chinese).
- Zhang Zhaochong & Wang Fusheng. 2003. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of Emeishan basalt province and discussion on their source region [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 431~440 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong & Wang Fusheng. 2004. High-Mg olivines and high-Cr spinels of the picritic rocks from the Emeishan large igneous province [J]. *Progress in Natural Science*, 14(1): 70~74 (in Chinese).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, *et al.* 2004. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Emeishan continental flood basalts, Southwestern China: evidence for activity of mantle plume [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78: 40~51.
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, *et al.* 2004. Geochemistry of the picrites and associated basalts from the Emeishan large igneous basalt province and constraints their source regions [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 171~180 (in Chinese with English abstract).
- Zhou M F, Malpas J and Song X Y. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupean mass extinction [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196: 113~122.
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical dynamics [J]. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 14: 493~571.
- Zhu Zhongyi and Liu Ta. 1986. *Petrological characteristics of the basalts*

in Longzhoushan basalts of Sichuan Province and discussion on their origin[J]. Earth Sciences, 11(6):570~576(in Chinese with English abstract).

Zolotukhin V V and Al' mukhamedov A I. 1988. Traps of the Siberian Platform[A]. Macdougall J D. Continental Flood Basalts[C]. New York: Kluwer Academic Publishers, 273~310.

附中文参考文献

何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 2003. 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, 77: 194~202.

李昌年. 1986. 四川攀西裂谷带峨眉山玄武岩的岩石学及成因研究[J]. 地球科学, 11(6):577~584.

刘秉光, 黄开年. 1982. 峨眉山玄武岩与裂谷作用[A]. 地质科学成果选集(第1集)[C]. 北京: 文物出版社, 208~212.

骆耀南. 1985. 中国攀枝花—西昌古裂谷带[A]. 中国攀西裂谷文集(第1集)[C]. 北京: 地质出版社, 1~25.

梅厚均. 1973. 西南暗色岩分异两个系列的岩石化学特征与铁镍矿化的关系[J]. 地球化学, (4):219~253.

沈发奎, 刘林. 1984. 攀枝花裂谷双峰式火山岩[J]. 矿物岩石, 4(1):1~15.

汪云亮, 李巨初, 周蓉生, 等. 1993. 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]. 成都科技大学出版社.

熊舜华, 李建林. 1984. 峨眉山区晚二叠世大陆裂谷边缘玄武岩系的特征[J]. 成都地质学院学报, (1):43~57.

徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融的条件[J]. 地球化学, 30(1):1~9.

张招崇, 郝艳丽, 王福生. 2003. 大火成岩省中苦橄岩的研究意义[J]. 地学前缘, 10(3): 347~358.

张招崇, 王福生. 2002. 峨眉山大火成岩省中发现苦橄质熔岩[J]. 地质论评, 48(4): 448.

张招崇, 王福生. 2004. 峨眉山大陆溢流玄武岩省苦橄质岩石的高镁橄榄石和高铬尖晶石及其意义[J]. 自然科学进展, 14(1): 70~74.

张招崇, 王福生, 范蔚茗, 等. 2001. 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, 20(3):239~246.

张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2003. 峨眉山玄武岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其物源探讨[J]. 地球科学, 28(4): 431~439.

张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. 地质学报, 78(2): 171~180.

朱中一, 刘林. 1986. 四川龙舟山玄武岩的岩石学特征及成因探讨[J]. 地球科学, 11(6):570~576.

· 简讯 ·

1:400 万中国地质图(第二版)现已正式出版

由中国地质科学院地质研究所编制的 1:400 万中国地质图(第二版)现已正式出版。

为全面反映 1988 年以来我国区域地质调查和区域地质综合研究取得的新成果和新资料, 切实展现我国 20 世纪末期的区域地质研究程度, 从而为国民经济可持续发展、为地质行业的工作部署和地球科学研究提供一份资料翔实可靠的小比例尺公益性基础地质图件, 编制第二版 1:500 万中国地质图项目(中国地质科学院大地调项目)自 2000 年 6 月开始实施。为确保编图质量, 采用了放大编绘(1:400 万)的工作程序, 编制出了 1:400 万和 1:500 万两种比例尺内容相同的图件正式送审。根据专家评审组的建议, 最后正式出版了 1:400 万中国地质图。该图件保持了与第一版之间的继承关系, 地理底图原则上未做大的变动, 只补充十余年来地理要素的新资料, 系统收集了 20 世纪 90 年代以来区域性地质图件百余件、区域地质(及构造)专著和论文近 300 份, 其中重点以中国地质调查局 1999 年完成的全国 1:50 万分省(区)数字地质图为基础, 并应用了大量专著和论文以及青藏高原 40 多幅 1:25 万地调阶段性新资料, 进行了全面系统的综合研究和修改补充。地质资料使用截止 2002 年 6 月底, 地理资料使用截止于 2002 年 12 月。较之第一版, 该图在以下方面取得了显著进展: (1) 图面内容更加详细, 精度更高, 除了原有的地层、构造、火成岩等基础地质内容外, 扩充和增加了一些具有应用意义的内容, 例如与第四系有关的沉积、新的活动断层内容等, 并表示了近年来地球科学的一些重大新发现和进展, 例如生物地层学的四项重大新发现、构造岩石学的一项重大新发现和我国乃至亚洲第一项大陆科学钻探的重大新进展等。(2) 除显示出全国地质研究程度都有了明显提高、地质内容普遍丰富外, 在前寒武纪地质和中生代火成岩研究方面也有了更为明显的进展, 青藏高原地区的研究程度有了更显著的提高。

该图内容丰富, 资料翔实, 适合广大地质工作者及相关行业人士使用, 由地质出版社出版, 定价 98 元。如有意购买, 请直接与地质出版社联系。如有意进行资料交换, 可与中国地质科学院地质研究所 1:400 万中国地质图编图组联系, 电话: 010-68999728, 68993220。