

峨眉山高钛玄武岩物源的不均一性研究

严再飞^{1,2}, 黄智龙¹, 程礼军³, 许成¹, 陈觅²

1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 重庆煤田地质研究所, 重庆 400042

【摘要】 对二滩地区高钛玄武岩物源研究表明, 该区岩石可分为高钛-1和高钛-2两种岩石类型。其反映了二滩高钛玄武岩浆物源的不均一性, 这种不均一性主要表现在: 1) 微量元素 Zr, Sr 含量明显不同; 2) 部分熔融程度和熔融压力不同; 3) 岩浆的结晶分异不同; 4) Pb 同位素比值不同。这可能是深源地幔柱(来自核-幔边界或下地幔)在上升过程中携带的不同物质发生部分熔融所致。

【关键词】 高钛玄武岩; 部分熔融程度; 结晶分异; Pb 同位素; 源区不均一

中图分类号: P588.14 文献标识码: A

文章编号: 1001-6872(2007)04-0060-06

0 引言

玄武岩可因其含钛的高低分为高钛玄武岩和低钛玄武岩, 具有不同的成因意义, 尤其是高钛玄武岩, 对地幔过程有着重要指示意义而得到重视。最早以 TiO₂ 含量高低对玄武岩进行划分来自 Cox 等^[1], 其在对南非 Karoo 大火成岩省的研究后认为这两种类型玄武岩具有明显不同的空间分布。此后, 在巴西和南极等地也发现了类似分布特点的火

成岩省^[2,3]。由于两类玄武岩的主量元素、不相容微量元素和同位素地球化学特征均存在明显差异, 因此, 许多研究者认为它们的形成机制是不同的。较早的观点认为, 高钛玄武岩为地幔部分熔融产物, 低钛玄武岩则是地壳混染的结果^[4-6]或岩石圈地幔熔融所致^[7]。Gibson 等^[8,9]则认为, 高钛玄武岩为厚岩石圈下低度熔融的产物, 而低钛玄武岩为薄岩石圈下高度熔融的产物。Holm 等^[10]对 Faroe 岛早第三纪玄武岩的研究也表明, 低钛型岩浆玄武岩为亏损地幔高度熔融形成, 而高钛型岩浆玄武岩则有

收稿日期: 2006-10-17; 改回日期: 2007-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 40372048 和 40573036)

作者简介: 严再飞, 男, 29岁, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向: 岩石地球化学。E-mail: zaifeiyan78@hotmail.com

地幔柱特征,为地幔柱物质来源。

峨眉山玄武岩是国际上所公认的大火成岩省之一^[11],峨眉山高钛和低钛玄武岩也存在不同的空间分布特征和成因^[12~14]成为玄武岩研究的热点。然而,以涉及高、低钛玄武岩之间差异的讨论较多,对相同类型玄武岩是否为同一物质来源的研究甚少。二滩地区地处峨眉山大火成岩省中部,为西岩区和东岩区的过渡,主要玄武岩类型为高钛玄武岩,通过对二滩高钛玄武岩主、微量元素及 Pb 同位素地球化学研究,探求峨眉山高钛玄武岩是否为同一物质来源,以加深对整个峨眉山溶流玄武岩的成因研究。

1 分析方法及结果

研究中,选取比较新鲜且具有代表性的玄武岩样品进行测试研究。铅同位素分析采用 HF 酸(2% HNO₃)在高温高压条件下将粉末样品完全溶解。

待溶样后,蒸干样品溶液,用 6N HCl 酸将氟化物样品转化为氯化物,蒸干后,用 0.6 N HBr 酸提取样品。在装有 80 微升 AG1x8(100 目~200 目)交换树脂的 Teflon 交换柱上,采用 0.6N HBr 和 6N HCl 酸流程分离纯化 Pb 样品。铅的全流程本底小于 50×10^{-12} g。铅同位素测量采用硅胶发射剂和铯金属带,测量温度为 1 300 °C,铅同位素质量分馏校正系数为每质量单位 1%,该校正系数源于对铅标准物质 NBS981 的大量测试所获得的数据。同位素比值测量采用德国 Finnigan 公司 MAT-262 固体源质谱计。化学流程和同位素比值测试方法见文献^[15,16]。Pb 同位素测定结果见表 1。

2 讨论

2.1 微量元素约束

据 Xu 等^[13]及严再飞等^[17]研究二滩玄武岩主

表 1 二滩玄武岩 Pb 同位素组成

Table 1 Compositions of Pb isotopes for Ertan basalts

样 品		²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2SE(M)/%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2SE(M)/%	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	2SE(M)/%
高钛-1	ERT-15	18.410 4	0.017	15.545 7	0.017	38.842 3	0.017
	ERT-22	18.358 4	0.006	15.558 0	0.007	38.818 9	0.007
	ERT-31	18.381 5	0.008	15.551 6	0.008	38.823 9	0.008
高钛-2	ERT-3	18.310 4	0.007	15.547 2	0.007	38.945 7	0.009

注:中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室检测。质量分馏 0.11%(每质量单位);2SE(M)/%为测量误差

要为高钛玄武岩,且有的岩石样品 Zr 含量偏低,而有的岩石样品 Zr 质量分数偏高^[13,17]。因此,根据 Zr 质量分数将二滩玄武岩划分为高钛-1(低 Zr 含量)和高钛-2(高 Zr 含量)两种岩石类型。在高钛-1 中,TiO₂ 对 MgO 呈现出明显负相关性,而在高钛-2 中则不存在相关性(图 1a)。这可能反映了高钛-1 和高钛-2 具有不同的岩浆演化过程。这种岩浆演化的差异在图 1b 中得到了进一步说明,高钛-2 中岩浆向贫 Si 富 Fe 方向演化,反映了 Fenner 分异趋势;而高钛-1 则向富 Si 贫 Fe 方向演化,与 Bowen 分异趋势相似。虽然这两种分异趋势还有待进一步证明,但其说明了二滩高钛玄武岩中的确存在两种不同的岩浆分异趋势。

2.2 微量元素约束

在不相容微量元素的原始地幔标准化图解中(图 2),高钛-1 和高钛-2 的 Sr 和 Zr 均显示了明显异常。在高钛-1 中,Sr 和 Zr 均显示明显负异常,而高钛-2 中 Sr 和 Zr 均无异常现象,反映了高钛-1 和高钛-2 在岩浆演化过程中具有不同的控制矿物相,即具有不同的岩浆演化。高钛-1 中的明显负 Zr 异常表明其熔体形成熔融程度较低,导致石榴石以残

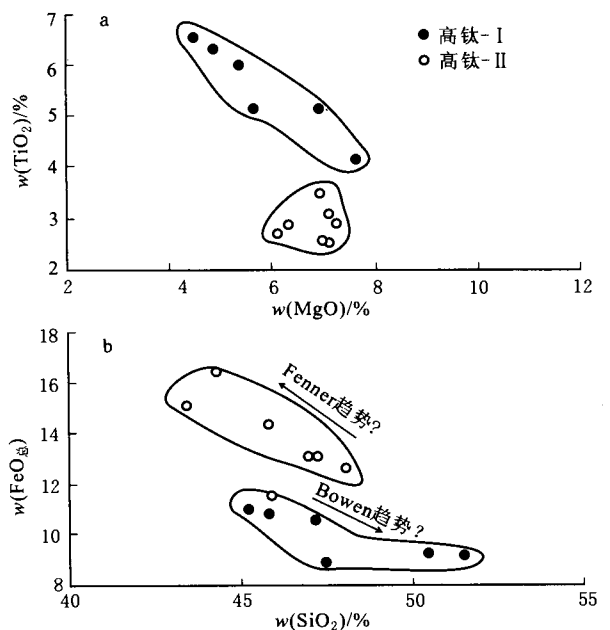


图 1 二滩玄武岩 $w(\text{TiO}_2)$ - $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{FeO})$ - $w(\text{SiO}_2)$ 图解(部分高钛-2 数据来自 Xu 等^[13])

Fig. 1 Plots of $w(\text{TiO}_2)$ vs $w(\text{MgO})$ and $w(\text{FeO})$ vs $w(\text{SiO}_2)$ for Ertan basalts

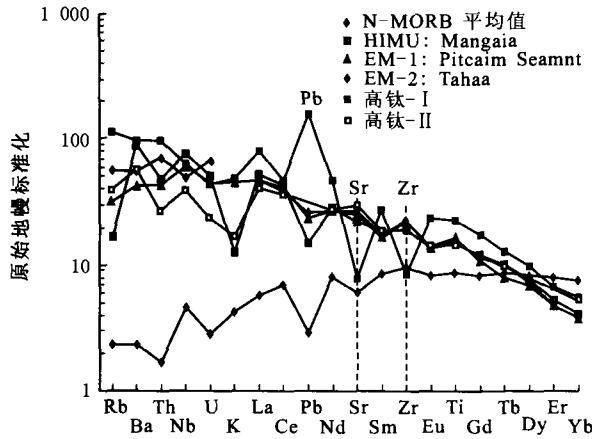


图 2 二滩玄武岩不相容微量元素原始地幔标准配分图(原始地幔值据文献[19])

Fig. 2 Patterns of incompatible trace elements for Ertan basalts

留相存在;而高钛-2 中高 Zr 含量则暗示了其具有相对较高的部分熔融程度。高钛-1 中 Pb 显示明显正异常,然而,Nb 并无异常现象。这可能表明,高钛-1 受到了地壳的轻度混染,因为 Nb 对地壳轻度混染并不灵敏。高钛-2 由于缺少微量元素 Pb,故对此不作讨论。此外,高钛-1 和高钛-2 的不相容微量元素配分曲线与富集地幔(EM)相似(图 2),说明高钛-1 和高钛-2 均与富集地幔源有关。上已述及,熔体形成的部分熔融程度是控制矿物相的重要因素。因此,根据 Zr 含量可以推断,高钛-1 的部分熔融程度要比高钛-2 的低。据 Bourdon 等^[18],La/Yb 比值对熔融程度具有指示意义,La/Yb 值随熔融度降低而增高;Tb/Yb 比值也有相似特征,且可反映石榴石的残余量。以二滩玄武岩 Tb/Yb 比值对 La/Yb 比值进行投图,其结果表明(图 3),高钛-1 分布

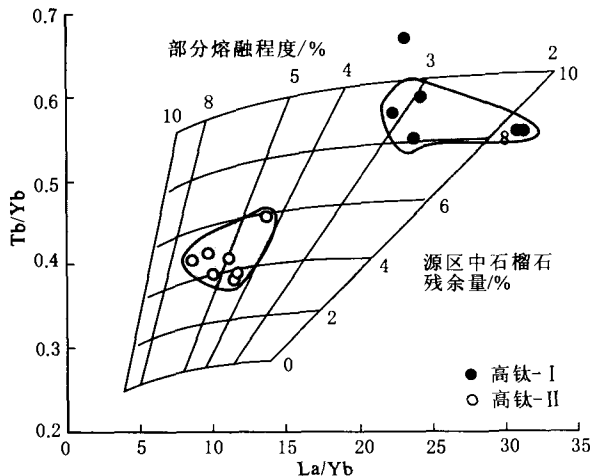


图 3 二滩玄武岩 Tb/Yb-La/Yb 图解

Fig. 3 Plots of Tb/Yb vs La/Yb for Ertan basalts

在熔融程度较低(0~3.5%)的区域,高钛-2 则分布在熔融程度相对较高(4.0%~8.0%)的区域。

除 Zr 以外,二滩玄武岩中高钛-1 和高钛-2 的 Cr 和 Ni 也有较为明显的差异。在 Cr 对 Zr 的图解中,高钛-1 和高钛-2 呈现出不同的 Cr 演化趋势(图 4a);同样地,高钛-1 和高钛-2 也显示出了不同的 Ni 演化趋势(图 4b)。这进一步说明,高钛-1 和高钛-2 为不同的岩浆演化所成。不同的结晶分异趋势对此做了进一步印证。在图 5 中,高钛-1 主要表现出斜

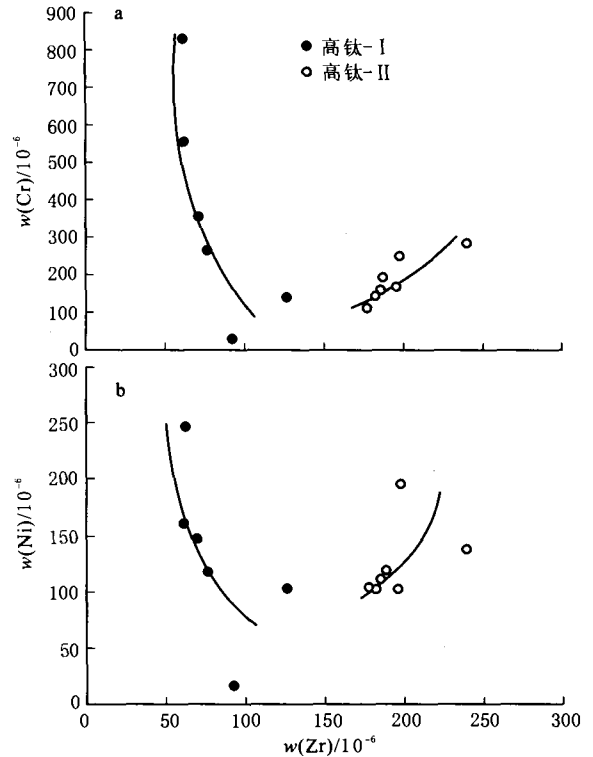


图 4 二滩玄武岩 $w(\text{Cr})-w(\text{Zr})$ (a) 和 $w(\text{Ni})-w(\text{Zr})$ (b) 图解

Fig. 4 Plots of $w(\text{Cr})$ vs $w(\text{Zr})$ (a) and $w(\text{Ni})$ vs $w(\text{Zr})$ (b) for Ertan basalts

长石结晶分异趋势,这与其 Sr 负异常吻合;高钛-2 主要表现出橄榄石结晶分异趋势,与其 Cr 和 Ni 含量较低吻合。

2.3 Pb 同位素

上述主量和微量元素特征已表明,二滩玄武岩高钛-1 和高钛-2 具有不同的部分熔融程度和结晶分异趋势。那么,这种差异是同一母岩浆的演化所还是由于两种岩浆有不同物质来源所致?

Pb 同位素数据如表 1 所示,其中 ERT-3 属于高钛-2;ERT-15,ERT-22 和 ERT-31 属于高钛-1。从表中可知,高钛-2 有相对较低的 Pb 同位素比值 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$,高钛-1 则有相对高的 Pb 同位素比值

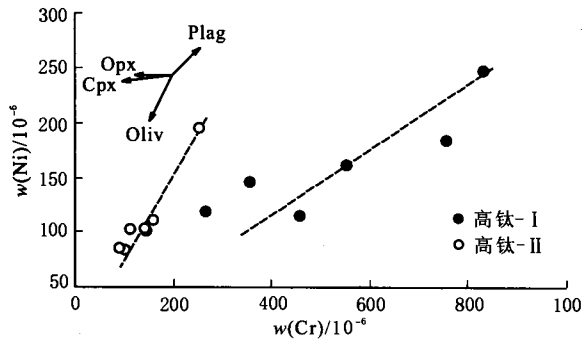


图 5 二滩玄武岩 $w(\text{Ni})-w(\text{Cr})$ 图

Plag. 斜长石; Opx. 斜方辉石; Cpx. 单斜辉石; Oliv. 橄榄石. 矢量箭头方向表示矿物结晶分异趋势

Fig. 5 Plots of $w(\text{Ni})$ vs $w(\text{Cr})$ for Ertan basalts

$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. 高钛-1 和高钛-2 的 Pb 同位素比值均在 Hart^[20] 所定义的富集地幔区域范围内。这与 Pb 同位素的投图结果也是一致的(图 6)。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中(图 6a), 高钛-1 和高钛-2 均分布在 EM-1 和 EM-2 之间; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 也显示了相似分布特征(图 6b)。这充分表明, 高钛-1 和高钛-2 具有富集地幔特征, 可能为深部地幔柱物质来源。

然而, 上述 Pb 同位素数比值特征还不足以说

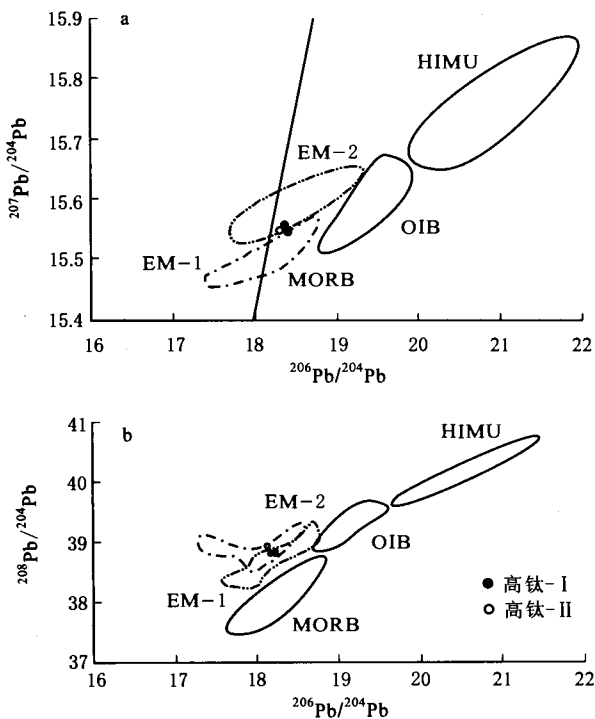


图 6 二滩玄武岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(底图据 Hofmann^[21])

Fig. 6 Plots of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for Ertan basalts

明高钛-1 和高钛-2 是否为同一物质来源。据 Eisele *et al* (2002), 不同源物质的 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 比值往往是不同的, 且 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 对 Th/U 具有不同的演化趋势。 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* = [({}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 29.475] / [({}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 9.307]$, 其中, 29.475 和 9.307 为地球原始值^[22]。在 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 对 Th/U 图解中, 高钛-1 和高钛-2 均位于地球演化线右侧(图 7a), 即它们均有富集源特征, 与上述讨论结果一致。此外, 高钛-1 和高钛-2 的 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 值表现出了明显差异(图 7b), 高钛-2 中的 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 值明显高于高钛-1 的 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 的值。这反映出高钛-1 和高钛-2 为不同的物质来源, 即二滩玄武岩的物质来源不是单一的, 其源区具有不均一性特征。对此, 提出了一个地幔柱模型(图 7b), 认为深源地幔柱上升过程中携带不同的物质导致了二滩乃至整个峨眉山高钛玄武岩源区的不均一性。这种深源地幔柱的存在已得到证实。Hart 等^[23] 的研究发现, 在 Sr-Nd-Pb 同位素三维投点图中, 不同的热点、洋岛玄武岩(OIB)和洋中脊玄武岩(MORB)是从同一区域(focal zone, FOZO)发散出来的, 即它们有共同的物质组分。“FOZO”被认为来自核幔边界或下地幔, 以地幔柱形式向上迁移过程中携带了不同物质, 从而导致了不同地幔端员不同的同位素地球化学特征。Hanan and Gra-

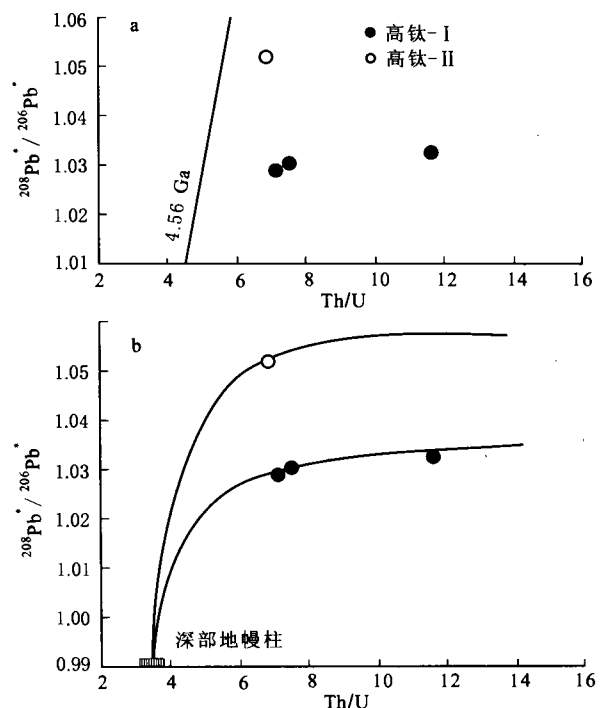


图 7 二滩玄武岩 $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ -Th/U 图解

Fig. 7 Plots of $^{208}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ vs Th/U for Ertan basalts

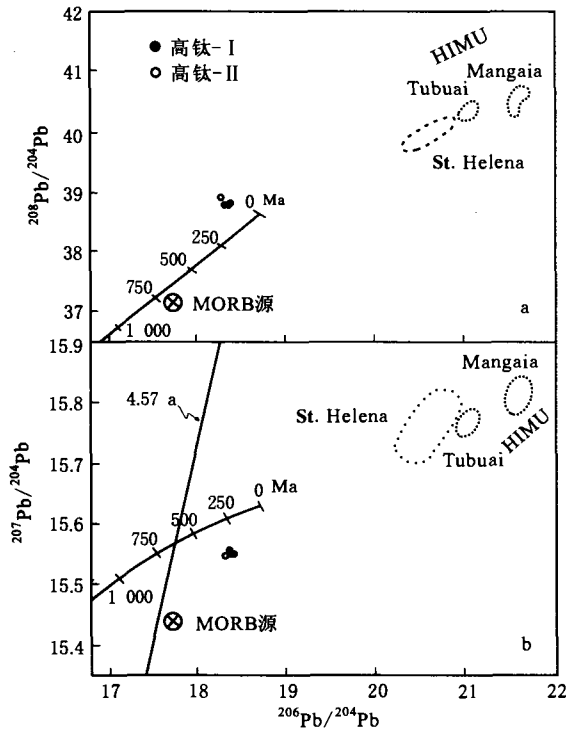


图8 二滩玄武岩的Pb同位素演化
Fig.8 Evolution of Pb isotopes for Ertan basalts

ham的研究^[24]也发现了与FOZO类似共同组分“C”组分(common component)。

值得注意的是,研究中也发现,二滩玄武岩的Pb同位素比值与深部地幔柱源C组分的Pb同位素250 Ma时的比值较为相似(图8)。这说明高钛-1和高钛-2与深部地幔柱有成因上的联系,深部地幔柱上升过程中在不同深度携带了不同的物质,这些物质发生了部分熔融,从而导致了二滩高钛玄武岩物质来源的不均一性。这与上述的地幔柱模型是一致的。

3 结论

峨眉山二滩地区的高钛玄武岩可分为高钛-1和高钛-2两种岩石类型。高钛-1的Zr含量相对较低,高钛-2的Zr含量相对较高。同时,高钛-1和高钛-2表现出了不同的熔体形成熔融程度和岩浆结晶分异趋势,其Pb同位素比值也不同。这表明,二滩高钛玄武岩为不同来源的物质熔融所形成,其源区具有不均一性特征。

参考文献

- [1] Cox K G, MacDonald R, Hornung G. Geochemical and petrographic provinces in the Karoo basalts of southern Africa[J]. *American Mineralogist*, 1967, 52: 1 451-1 474.
- [2] 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.
- [3] Mantovani M S M, Marques L S, 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.
- [4] Faure G, Bowman J R, Elliot D H, et al. Isotope composition of strontium and silica content of Mesozoic basalt and dolerite from Antarctica[D]. In: A die R H J (eds), *Antarctic Geoscience*. Oslo: Oslo University, 1972, 43-438, 617-624.
- [5] Hoefs J, Faure G, Elliot D H. Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ and initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in Kirkpatrick basalt on Mt. Falla, Transantarctic Mountains [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1980, 75: 199-203.
- [6] Allegre C J, Dupre B, Richard P, et al. Subcontinental versus suboceanic mantle, II. Nd-Sr-Pb isotopic comparison of continental tholeiites with mid-ocean ridge tholeiites, and the structure of the continental lithosphere[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 57: 25-34.
- [7] Carlson R W. Physical and chemical evidence on the cause and source characteristics of flood basalt volcanism[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1991, 38: 525-544.
- [8] Gibson S A, Thompson R N, Leonardos O H, et al. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 136: 149-165.
- [9] Gibson S A, Thompson R N, Dickin A P, et al. Erratum to High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: Key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 141: 325-341.
- [10] Holm P M, Niels H, Regin W. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic evidence for separate hot depleted and Iceland plume mantle sources for the Paleogene basalts of the Faroe Islands [J]. *Chem Geol*, 2001, 178: 95-125.
- [11] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, et al. On causal links between flood basalts and continental breakup [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 166: 177-195.
- [12] 徐玉刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 1-9.
- [13] Xu Y G, Chung Sun-Lin, Jahn Bor-ming, et al. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 58: 145-168.
- [14] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume-lithosphere interaction [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 228: 525-546.
- [15] Chen F, Hegner E, Todt W. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany-evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88: 791-802.
- [16] Chen F, Siebel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of

- the Istanbul zone[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91: 469-481.
- [17] 严再飞, 黄智龙, 许成, 等. 二滩玄武岩地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(3): 77-84.
- [18] Bourdon B, Turner S P, Ribe N M. Partial melting and upwelling rates beneath the Azores from a U-series isotope perspective[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 239: 42-56.
- [19] McDonouth W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chem Geol*, 1995, 120: 223-235.
- [20] Hart S A. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 90: 273-296.
- [21] Hofmann A W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism[J]. *Nature*, 1997, 385: 219-229.
- [22] Galer S J G, ONions R K. Residence time of thorium, uranium and lead in the mantle convection[J]. *Nature*, 1985, 316: 778-782.
- [23] Hart S R, Hauri E H, Oschmann L A, *et al.* Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence[J]. *Science*, 1992, 256: 517-520.
- [24] Hanan B B, Graham D W. Lead and helium isotope evidence from oceanic basalts for a common deep source of mantle plumes [J]. *Science*, 1996, 272: 991-995.

HETEROGENEITY OF SOURCE FOR EMEISHAN HIGH-Ti BASALTS

YAN Zai-fei^{1,2}, HUANG Zhi-long¹,
CHENG Li-jun³, XU Cheng¹, CHENG Mi²

1. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Institute of Coalfield of Chongqing, Chongqing 400042, China*

Abstract: Some new data of Pb isotopes from Ertan high-Ti basalts is presented in this paper. The study indicates that Ertan high-Ti (HT) basalts can be subdivided into HT-1 type and HT-2 type. This implies that sources of the Ertan HT basalts are heterogeneous. This heterogeneity is mainly: 1) contents of Zr and Sr for HT-1 and HT-2 are significantly different; 2) HT-1 and HT-2 have different degrees of partial melting; 3) HT-1 and HT-2 have undergone different processes of magmatic evolution, their trends of fractional crystallization are different; 4) ratios of Pb isotopes between HT-1 and HT-2 are different. This is probably related to mantle plumes (from core-mantle boundary layers or lower mantle). When plumes rose and carried different materials at different mantle depth, these materials underwent distinct degrees of partial melting, resulted in the differences for HT-1 and HT-2 basalts.

Key words: Ertan high-Ti basalts; degree of partial melting; fractional crystallization; Pb isotope; heterogeneity of source

ISSN 1001-6872(2007)04-0060-06 ; CODEN: KUYAE2

Synopsis of the first author: Yan Zaifei, male, 29 years old, a Ph D candidate of mineralogy, petrology and ore deposit. Now he is engaged in the research of litho geochemistry.