

江西广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和 Sr-Nd-Pb-O 元素同位素特征

巫建华^{1,2} 项媛馨³ 钟志菲²

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 中国科学院 地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 华夏古板块与扬子古板块结合带内的广丰、玉山红色碎屑沉积盆地均有橄榄玄粗岩产出, SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 橄榄玄粗岩锆石 U-Pb 年龄为 93 ± 1 Ma, 属晚白垩世早期的产物。广丰盆地橄榄玄粗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.706 191~0.706 352, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 0.27~0.55, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 值为 18.045~18.080, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 值为 15.503~15.543, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 值为 38.240~38.256; 玉山盆地橄榄玄粗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值为 0.705 856~0.706 024, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 1.74~1.93, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 值为 17.956~18.063, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 值为 15.456~15.498, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 值为 38.195~38.232。在 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 和 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i - ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解中, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩均位于亏损地幔 (DMM) 和 EM II 型富集地幔之间, 而且 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 和 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 呈正相关, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 和 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 呈负相关, 指示其源区中可能均有 DMM 和 EM II 型地幔的贡献; 玉山盆地橄榄玄粗岩更偏向 DMM 端员, 指示其 DMM 端员所占的比例更高。广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩具有 EM II 型地幔的贡献, 说明华夏古板块与扬子古板块结合带的岩石圈地幔与华夏古板块的岩石圈地幔属相同类型, 为华夏古板块俯冲于扬子古板块之下提供了新的证据。

关键词: 橄榄玄粗岩; SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄; Sr-Nd-Pb-O 同位素; 广丰、玉山盆地

中图分类号: P588.14; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)04-0645-12

SHRIMP zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-O isotope characteristics of shoshonite from Guangfeng and Yushan basins in Jiangxi Province

WU Jian-hua^{1,2}, XIANG Yuan-xin³ and ZHONG Zhi-fei²

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 2. College of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Lying at the junction of the Yangtze paleoplate and the Cathaysian paleoplate, Guangfeng and Yushan basins are characterized by red clastic rocks and mafic volcanic rocks. SHRIMP U-Pb dating of zircon shows that shoshonite in Guangfeng and Yushan basins has an age of 93 ± 1 Ma, belonging to early Late Cretaceous. ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i values of shoshonite in Guangfeng are 0.706 191~0.706 352, $\epsilon\text{Nd}(t) = 0.27 \sim 0.55$, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 18.045~18.08, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 15.503~15.543, and ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 38.240~38.256, whereas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i values of shoshonite in Yushan basin are in the range of 0.705 856~0.706 024, $\epsilon\text{Nd}(t) = 1.74 \sim 1.93$, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 17.956~18.063, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 15.456~15.498, and ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 38.195~38.232. In the ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i and ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i - ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i diagrams,

收稿日期: 2013-04-26; 修订日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372071); 中国核工业集团公司项目(中核地计[2008]74号)

作者简介: 巫建华(1960-), 男, 博士, 教授, 主要从事铀矿地质和火山地质研究, E-mail: jhwu@ecit.cn.

the values fall exclusively between the DMM and EM II positions, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i and ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i show positive correlation, whereas ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i and ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i show negative correlation, which suggests that the source mantle of the shoshonite rocks probably had both DMM and EM II magma, with a higher proportion of DMM in the Yushan basin.

Key words: shoshonite; SHRIMP zircon U-Pb dating; Sr-Nd-Pb-O isotopes; Guangfeng and Yushan basins

研究表明,中国东部新生代玄武岩的地球化学特征主要体现出亏损的软流圈地幔的贡献(Tatsumoto and Nakamura, 1991; 刘丛强等, 1995; Zhou and Li, 2000), 而中生代基性岩则普遍反映富集地幔的特征(李曙光等, 1997, 1998, 1999; 杨祝良等, 1999; 葛文春等, 1999; Guo *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2001; 闫峻等, 2001; 匡少平等, 2001, 2002; 黄方等, 2002)。华南中生代铁镁质火山岩的研究表明,以郴州-临武断裂为界,扬子古板块中生代火山岩具有 OIB + EM I 混合特征,而华夏古板块中生代火山岩具有 OIB + EM II 混合特征(范蔚茗等, 2003; 彭头平等, 2004)。扬子古板块北部庐枞盆地早白垩世早期火山岩具有 EM I 型富集地幔的 Sr-Nd 同位素特征(刘洪等, 2002), Pb 同位素特征也更接近于 EM I 型富集地幔 Pb 同位素特征,但在岩浆上升过程中受到了一定的扬子下地壳物质混染(袁峰等, 2008)。华夏古板块内盛源盆地早白垩世早期橄榄玄粗岩系火山岩、赣南早侏罗世早期余田群玄武岩、赣南会昌盆地东缘中生代橄榄玄粗岩、粤北下庄与诸广铀矿田晚白垩世基性脉岩均具有亏损地幔和 EM II 型富集地幔混合的 Sr-Nd-Pb 同位素特征(章邦桐等, 2001, 2004, 2008; 贺振宇等, 2008; 朱捌等, 2008; 吴俊奇等, 2011)。可见,位于扬子古板块与华夏古板块之间的结合带(杨明桂等, 2002)的岩石圈地幔属性,不仅涉及华南中生代 EM I 型和 EM II 型富集地幔的界线识别,而且能为确认扬子古板块与华夏古板块之间的相互作用提供依据。江西广丰、玉山盆地位于扬子古板块与华夏古板块之间,均以红色碎屑沉积岩为主体,并夹有铁镁质火山岩,这为通过铁镁质火山岩的系统研究来分析该区中生代岩石圈地幔的属性创造了条件。项媛馨等(2012)通过岩相学和岩石化学组成的研究,确认广丰盆地上部铁镁质火山岩和玉山盆地的铁镁质火山岩属典型的橄榄玄粗岩系列火山岩;王佳玲等(2014)通过矿物物质组成的研究,确认广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩系列火山岩具有不同于碱性橄榄玄武岩和拉斑玄

武岩的单斜辉石特征。本文在上述研究的基础上,进一步对广丰、玉山盆地的橄榄玄粗岩系列火山岩进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,并进行 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析以查明广丰、玉山盆地之下的岩石圈地幔的属性,为扬子古板块与华夏古板块之间结合关系提供依据。

1 区域地质概况及样品信息

广丰、玉山盆地位于扬子古板块和华夏古板块之间的包括江南、浙西、赣(中)湘(东)、广丰、北武夷等变质地(块)体的结合带内。这些变质地(块)体由不同的前寒武纪地层组成,其中浙西变质地(块)体由中元古代亲洋型沉积组成,下部为细碧角斑岩组合并混杂有蛇绿岩套,上部为复理石沉积组合;广丰变质地(块)体下部为华夏结晶基底,上部为新元古代青白口纪陆相橄榄玄粗岩系列火山岩-磨拉石沉积组合和扬子型盖层(杨明桂等, 2002)。广丰盆地坐落于广丰变质地(块)体之上,由下部的红色碎屑岩与碱性橄榄玄武岩、上部的红色碎屑岩与橄榄玄粗岩系列火山岩组成,厚达数千米;玉山盆地坐落于浙西变质地(块)体之上,由红色碎屑岩和橄榄玄粗岩系列火山岩组成(图 1)(项媛馨等, 2010, 2012)。橄榄玄粗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年样品(样号 YSB001)采自玉山县城北部,地理坐标为:东经 $118^{\circ}24'$ 北纬 $28^{\circ}36'$; Sr-Nd-Pb-O 同位素分析样品是在项媛馨等(2012)进行了岩相学和主元素、微量元素组成研究的基础上选取的新鲜样品(烧失量的变化范围为 1.92% ~ 3.44% 之间)。

2 分析方法

2.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法

将样品去除表尘后用锆式碎样机破碎至 80 目左右,用人工淘洗的方法进行粗淘,分离出灰色重砂和尾砂。对灰色重砂部分在强磁环境中去除强磁性

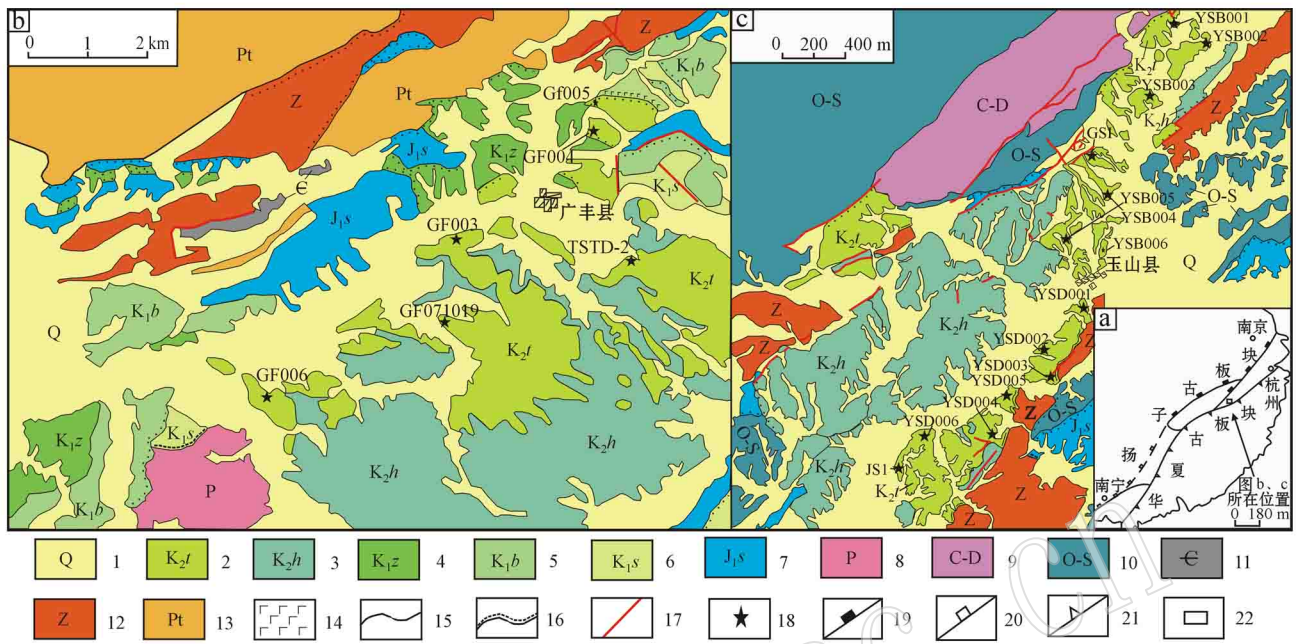


图 1 广丰、玉山盆地地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Guangfeng and Yushan basins

a—广丰、玉山盆地位置图(据杨明桂等, 2002 简化); b—广丰盆地地质图; c—玉山盆地地质图; 1—第四系; 2—上白垩统塘边组; 3—上白垩统河口组; 4—下白垩统周田组; 5—下白垩统白埠组; 6—下白垩统石溪组; 7—下侏罗统水北组; 8—二叠系; 9—泥盆-石炭系; 10—奥陶-志留系; 11—寒武系; 12—震旦系; 13—青白口系; 14—玄武岩; 15—地层整合界线; 16—地层不整合界线; 17—断层; 18—采样点位置; 19—晋宁期缝合带及蛇绿岩带; 20—推测的晋宁期缝合带; 21—加里东-印支期拼合带; 22—研究区

location of Guangfeng basin and Yushan basin (modified after Yang Minggui *et al.*, 2002); b—geological map of Guangfeng basin; c—geological map of Yushan basin; 1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous Tangbian Formation; 3—Upper Cretaceous Hekou Formation; 4—Lower Cretaceous Zhoutian Formation; 5—Lower Cretaceous Baibu Formation; 6—Lower Cretaceous Shixi Formation; 7—Lower Jurassic Shuibei Formation; 8—Permian; 9—Devonian-Carboniferous; 10—Ordovician-Silurian; 11—Cambrian; 12—Sinian; 13—Qingbaikouan System; 14—basalt; 15—conformity; 16—unconformity; 17—fault; 18—sampling site; 19—Jinningian suture belt and ophiolite belt; 20—inferred Jinningian suture belt; 21—Caledonian-Indosinian collage belt; 22—study area

矿物, 对非强磁性部分进一步用电磁选仪进行分选以去除电磁性矿物。在此基础上进行精淘, 用高频介电仪对无磁重矿物提纯分离出锆石, 然后在双目镜下进行人工精选提纯。将样品锆石与标样锆石(TEM)一起粘贴在涂有环氧树脂靶的表面, 在样品靶固结后, 打磨并抛光, 使锆石内部暴露出来。样品靶制成以后, 在光学显微镜下对所有锆石样品进行反射光和透射光观察, 然后在扫描电镜下进行阴极发光(CL)图像拍摄。在对这些样品图像综合分析的基础上, 设计选择最恰当的测点以避免包裹体或杂质、裂缝, 以此保证 SHRIMP 定年的质量。锆石挑选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成, 反射光、透射光、阴极发光研究在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针研究室完成, SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 同位素测定在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成, 原理及分析流程可见 Compston 等(1992)、Williams & Claesson(1987)和宋彪等(2002)。在锆

石的 SHRIMP 的 U-Th-Pb 同位素分析过程中, 标准样品和未知样品所采集的 9 个质量峰依次为 Zr_2O^+ 、 $^{204}Pb^+$ 、背景值、 $^{206}Pb^+$ 、 $^{207}Pb^+$ 、 $^{208}Pb^+$ 、 $^{238}U^+$ 、 $(^{232}Th\ ^{16}O)^+$ 、 $(^{238}U\ ^{16}O)^+$, 每个数据为 5 次扫描的平均值。一次离子为 4.5 nA、10 kV 的 O^{-2} , 束斑 25~30 μm 。质量分辨率约 5 000(1% 峰高)。应用 RSES 参考锆石 TEM(417 Ma)进行元素间的分馏校正, Pb/U 校正公式采用 $Pb/U = A(UO/U)_2$ 。数据处理采用 Ludwig 编写的 SQUID 1.0 及 ISO-PLOT 程序。应用实测 ^{204}Pb 的方法校正锆石中的普通铅。因年轻锆石($<1\ 000\ Ma$)中放射成因 ^{207}Pb 量较少, 分析中容易产生较大的误差, 因此对年轻锆石($<1\ 000\ Ma$)均使用其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄, 其加权平均值具 95% 的置信度。

2.2 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析方法

Rb、Sr、Sm、Nd、U、Th 和 Pb 元素含量以及同位素比值测定均在南京大学现代分析测试中心英国制

造的 VG354 同位素质谱仪上完成, O 同位素测定在中国科学院南京地质古生物研究所实验技术中心 MAT 公司制造的 MAT-253 稳定同位素质谱仪上完成。Sr、Nd 同位素测定时, 为了去除岩石表面、裂缝和裂口污染物, 用 5% HF-HBr 混合液对样品进行了清洗, 0.1 g 的粉末样品用 HF-HNO₃-HClO₄ 混合酸溶解。Sr 同位素比值采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行质量分馏校正, 对 Sr 同位素标样 NBS987 测定的结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710336 \pm 7(2\sigma)$; 对美国 La Jolla Nd 同位素标准样 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测定值为 $0.511864 \pm 3(2\sigma)$, Nd 同位素比值测定采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化。Pb 的同位素质谱分析是采用硅胶-磷酸发射技术和单铯带单接收技术, Pb 同位素质比值测定采用标样 NBS981 进行标准化。NBS981 标样的标准为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.941 \pm 0.008$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.487 \pm 0.011$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.715 \pm 0.009$ 。Sr、Nd 和 Pb 的全流程本底分别为 3×10^{-9} g、 6×10^{-11} g 和 2×10^{-10} g。Sr、Nd 和 Pb 同位素比值年龄校正

时采用本文测得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 93 ± 1 Ma。

3 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

橄榄玄粗岩样品 YSB001 中的锆石多数为淡褐色, 呈自形长柱状或双锥状, 粒度较细, 长宽比 1.5~4.0; 在阴极发光(CL)图像上, 可见锆石具明显的条带状结构(图 2), 表明其均为岩浆结晶锆石。从表 1 中可以看出, 14 颗锆石的 U、Th 含量相对较高, U 含量为 $(224 \sim 1566) \times 10^{-6}$, Th 含量为 $(362 \sim 5780) \times 10^{-6}$, Th/U 比值均大于 0.50, 也指示锆石为岩浆结晶锆石; 在 14 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据中, 除第 12 分析点(虚线所示)为 87.8 ± 1.4 Ma 偏离数据组外, 其余 13 个分析点变化于 90.2~94.6 Ma 之间, 年龄较为一致, 在 U-Pb 一致曲线之上也成群分布(图 3), 13 个分析点数据的加权平均值为 93 ± 1 Ma, MSWD=1.6。

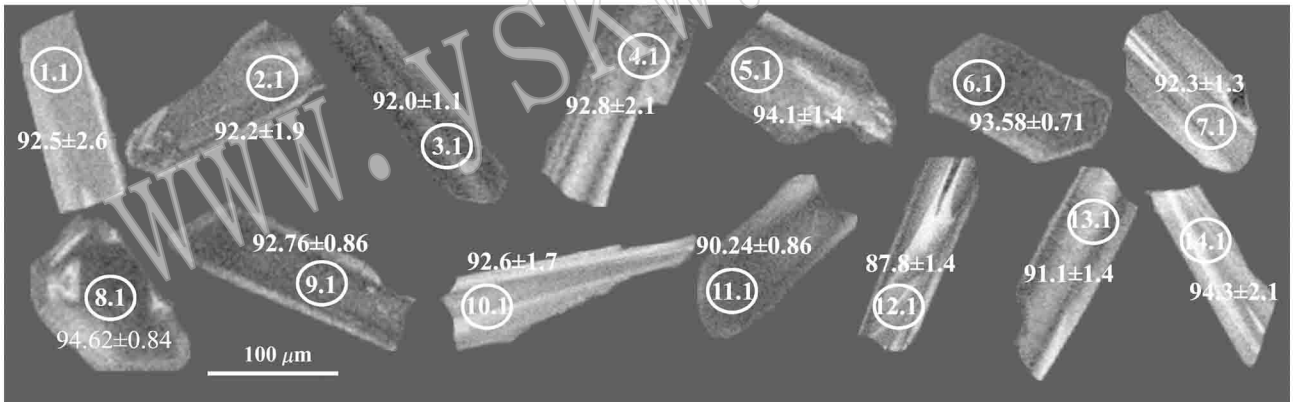


图 2 玉山盆地橄榄玄粗岩(样品 YSB001)锆石阴极发光图像、测点和年龄结果

Fig. 2 Cathodoluminescence photographs and dating spots of zircons from shoshonite in Yushan basin

4 Sr-Nd-Pb-O 同位素特征

橄榄玄粗岩 Sr、Nd、Pb 和 O 同位素分析结果和有关参数列于表 2。

(1) 广丰盆地橄榄玄粗岩 Rb 含量为 $(29.7 \sim 40.0) \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $(855 \sim 956) \times 10^{-6}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比较集中, 介于 $0.706191 \sim 0.706352$ 之间(平均为 0.706250); 玉山盆地橄榄玄粗岩 Rb 含量为 $(36.1 \sim 38.6) \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $(799 \sim 902) \times 10^{-6}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 介于 $0.705856 \sim 0.706024$ 之间

(平均 0.705935), 略低于广丰盆地橄榄玄粗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$; 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 $\Delta\text{Sr} (= [(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{样品, 现在}} - 0.7] \times 10^4)$ 值分别为 $62 \sim 64$ 、 $59 \sim 60$, 均 > 50 , 属典型 Dupal 同位素异常(Hart, 1984); 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - t$ 图解(图 4a)上, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩投影点均靠近地幔演化线。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - 10000/\text{Sr}$ 图解(图 5a)上, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的投影点均呈离散分布, 没有明显的线性关系, 指示岩浆上升侵位过程的陆壳混染不明显。

(2) 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i

表 1 玉山盆地橄榄玄粗岩样品 YSB001 的 SHRIMP 锆石 U-Th-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Th-Pb analytical results of shoshonite in Yushan basin basin

测点号	$^{206}\text{Pb}_c/10^{-2}$		$w_B/10^{-6}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}_c$		分析值	误差 ± %	分析值	误差 ± %	分析值	误差 ± %	
1.1	5.61	319.1	569	4.20	1.84	0.0170	8.0	0.034	8.0	0.01446	2.8	92.5 ± 2.6
2.1	6.18	319.8	823	4.22	2.66	0.0140	9.6	0.027	9.6	0.01440	2.1	92.2 ± 1.9
3.1	2.78	609.3	2092	7.74	3.55	0.0401	14	0.079	14	0.01437	1.2	92.0 ± 1.1
4.1	1.71	500.2	1155	6.34	2.39	0.0477	19	0.095	19	0.01450	2.3	92.8 ± 2.1
5.1	3.41	448.6	956	5.87	2.20	0.0407	18	0.083	18	0.01471	1.5	94.1 ± 1.4
6.1	1.09	1303	3112	16.5	2.47	0.0440	5.6	0.089	5.7	0.01462	0.76	93.6 ± 0.71
7.1	2.2	402.4	835	5.10	2.14	0.0434	12	0.086	12	0.01442	1.4	92.3 ± 1.3
8.1	1.18	918.5	1684	11.8	1.89	0.0448	6.7	0.091	6.7	0.01479	0.89	94.6 ± 0.84
9.1	1.28	1085	3052	13.7	2.91	0.0412	8.8	0.082	8.9	0.01449	0.93	92.8 ± 0.86
10.1	3.25	276.1	465	3.55	1.74	0.0390	24	0.078	24	0.01447	1.8	92.6 ± 1.7
11.1	0.87	1566	5780	19.1	3.81	0.0421	7.8	0.082	7.9	0.01410	0.96	90.2 ± 0.86
12.1	4.02	349.5	699	4.29	2.07	0.0357	23	0.067	23	0.01372	1.6	87.8 ± 1.4
13.1	2.15	314.8	544	3.93	1.79	0.0452	14	0.089	14	0.01422	1.5	91.1 ± 1.4
14.1	5.13	223.7	362	2.98	1.67	0.0340	39	0.069	39	0.01474	2.2	94.3 ± 2.1

注： $^{206}\text{Pb}_c$ 和 $^{206}\text{Pb}^*$ 分别表示普通铅和放射性成因铅，普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行矫正，误差为 1σ 。

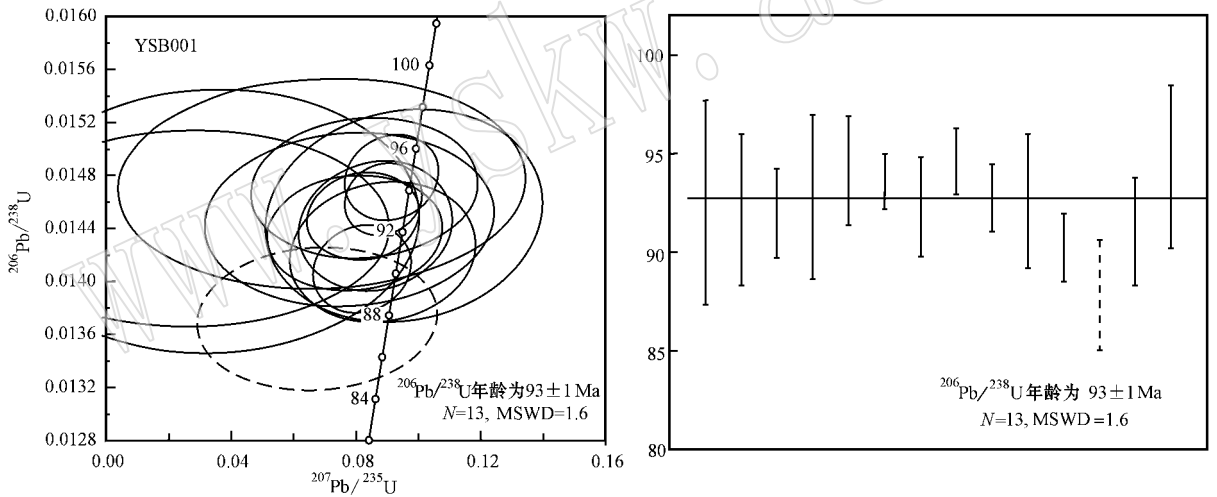


图 3 玉山盆地橄榄玄粗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagram of zircons from shoshonite in Yushan basin

分别介于 0.512 521 ~ 0.512 535 和 0.512 601 ~ 0.512 611 之间， $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值分别为 0.27 ~ 0.55、1.74 ~ 1.93。在 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - t 图解 (图 4b) 上，广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩投影点均位于球粒陨石地幔演化线之上，暗示岩浆来源于地幔。在 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $100/\text{Nd}$ 图解 (图 5b) 上，广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的投影点均呈离散分布，没有明显的线性关系，同样指示岩浆上升侵位过程的陆壳混染不明显。广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 变化范围分别为 -0.08 ~ -0.20 和 -0.49 ~ -0.50，均在 -0.6 ~ -0.2 之间，说明给出

的模式年龄基本有效，可以参与有关讨论 (Jahn *et al.*, 2000)。广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的 t_{DM1} 变化较大，分别为 1 417 ~ 2 250 Ma 和 640 ~ 642 Ma， t_{DM2} 变化较小，分别为 857 ~ 879 Ma 和 742 ~ 756 Ma，较低的 Nd 模式年龄指示两者的成岩过程均有幔源组分的参与。

(3) 广丰盆地橄榄玄粗岩的 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 介于 18.045 ~ 18.080 之间 (平均 18.063)， $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 介于 15.503 ~ 15.543 之间 (平均 15.520)， $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 介于 38.240 ~ 38.256 之间 (平均 38.248)；玉

表 2 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 Sr-Nd-Pb-O 同位素分析结果及有关参数一览表

Table 2 Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of shoshonite in Guangfeng and Yushan basins

地点 样品号	广丰盆地			玉山盆地		
	GF003	GF005	GF006	YSB001	YSB003	YSB005
$\epsilon(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	37.09	29.72	40.02	37.45	38.63	36.08
$\epsilon(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	956.2	854.8	941.9	841.8	901.7	798.6
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.112 2	0.108 1	0.123 8	0.126 5	0.123 1	0.136 3
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.706 371	0.706 348	0.706 531	0.706 032	0.706 098	0.706 214
($\pm 1\sigma$)	± 10	± 7	± 11	± 10	± 9	± 7
($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	0.706 208	0.706 191	0.706 352	0.705 856	0.705 927	0.706 024
$\epsilon\text{Sr}(t)$	26.0	25.7	28.0	20.9	21.9	23.3
ΔSr	62	62	64	59	59	60
$\epsilon(\text{Sm}) \times 10^{-6}$	2.71	2.90	3.01	9.81	12.31	10.57
$\epsilon(\text{Nd}) \times 10^{-6}$	8.9	9.6	11.5	64.6	73.5	65.9
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.180 2	0.175 6	0.158 4	0.100 5	0.099 8	0.097 9
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 655	0.512 638	0.512 636	0.512 675	0.512 671	0.512 664
($\pm 1\sigma$)	± 8	± 10	± 6	± 6	± 12	± 9
($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)	0.512 535	0.512 521	0.512 530	0.512 611	0.512 607	0.512 601
$\epsilon\text{Nd}(t)$	0.55	0.27	0.46	1.93	1.86	1.74
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.08	-0.11	-0.20	-0.49	-0.49	-0.50
t_{DM1}/Ma	2 250	2 046	1 417	641	642	641
t_{DM2}/Ma	857	879	864	742	747	756
$\epsilon(\text{U}) \times 10^{-6}$	0.91	0.57	1.02	0.57	0.55	0.50
$\epsilon(\text{Th}) \times 10^{-6}$	3.45	2.36	2.73	2.35	2.41	2.41
$\epsilon(\text{Pb}) \times 10^{-6}$	14.3	7.9	12.2	9.9	10.7	11.1
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.109	18.153	18.148	18.012	18.057	18.106
($\pm 1\sigma$)	± 28	± 26	± 29	± 24	± 28	± 24
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.506	15.547	15.519	15.501	15.473	15.458
($\pm 1\sigma$)	± 26	± 23	± 25	± 30	± 30	± 26
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.317	38.346	38.328	38.268	38.301	38.282
($\pm 1\sigma$)	± 23	± 27	± 25	± 29	± 26	± 25
($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)	18.045	18.080	18.064	17.956	18.008	18.063
($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)	15.503	15.543	15.515	15.498	15.471	15.456
($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)	38.240	38.250	38.256	38.195	38.232	38.215
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	9.10	9.66	9.53	9.52	9.38	8.71

计算 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\epsilon\text{Sr}(t)$ 和 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1]$ 的过程中 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_{UR} = 0.704 5 ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)_{UR} = 0.082 7, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{UR} = 0.512 638 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{CHUR} = 0.1967 (Jacobsen and Hunziker, 1980); 亏损地幔单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 和两阶段模式年龄 (t_{DM2}) 的计算公式为: $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \cdot \ln\{1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}]\}$, $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \cdot \ln\{1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] - [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}}] \cdot (e^{\lambda t} - 1) / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}]\}$; 式中: λ 是 ^{147}Sm 的衰变常数 ($= 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{样品} 和 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{样品} 为样品测试值, CC 代表地壳 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{CC} = 0.118, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_{DM} = 0.513 15 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)_{DM} = 0.213 7; ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s = ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_g - (U/Pb)_s × (W_{Pb}/W_U) × (A_{238U}/A_{204Pb}) × (e^{238t} - 1); ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s = ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_g - (U/Pb)_s × (W_{Pb}/W_U) × (A_{238U}/A_{204Pb}) × 137.88 × (e^{235t} - 1); ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s = ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_g - (Th/Pb)_s × (W_{Pb}/W_{Th}) × (A_{232Th}/A_{204Pb}) × (e^{232t} - 1); 式中, A_{238U}、A_{232Th}、A_{204Pb} 分别为 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{204}Pb 的相对丰度 (%), 其中 A_{238U} = 99.273 9%, A_{232Th} = 100%, ^{204}Pb 的相对丰度可以计算得出, $^{235}\text{U} = ^{238}\text{U}/137.88 = 0.720 \text{ 0\%}$; W_U、W_{Th}、W_{Pb} 为 U、Th、Pb 的原子量, 分别为 238.03、232.08、206.42; $\lambda_{238} = 1.551 25 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_{235} = 9.848 5 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, $\lambda_{232} = 0.494 75 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ 。

山盆地橄榄玄粗岩的 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s 介于 17.956 ~ 18.063 之间 (平均 18.009), ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s 介于 15.456 ~ 15.498 之间 (平均 15.475), ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s 介于 38.195 ~ 38.232 之间 (平均 38.214)。在 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s (图 6a)

($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_s (图 6b) 图解上, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的投影点都位于北半球铅参考线 (NHRL) 之上, 反映地幔源区具有铀、钍明显富集的特征, 富集了放射性成因铅 (Dupre and Allegre, 1983; Faure, 1986)。

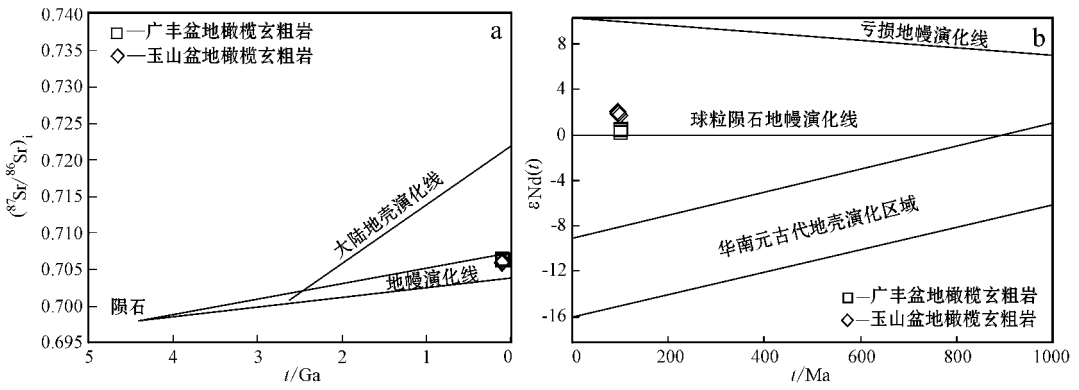


图 4 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) - t (a)和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - t (b)图解

Fig. 4 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) - t (a) and $\epsilon\text{Nd}(t)$ - t (b) diagrams of shoshonite in Guangfeng and Yushan basins

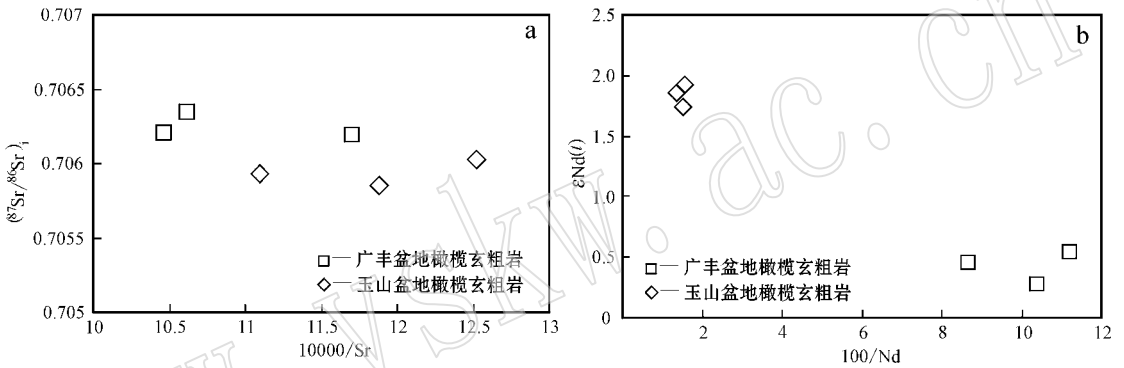


图 5 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) - $10\ 000/\text{Sr}$ (a)和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $100/\text{Nd}$ (b)图解

Fig. 5 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) - $10\ 000/\text{Sr}$ (a) and $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $100/\text{Nd}$ (b) diagrams of shoshonite in Guangfeng and Yushan basins

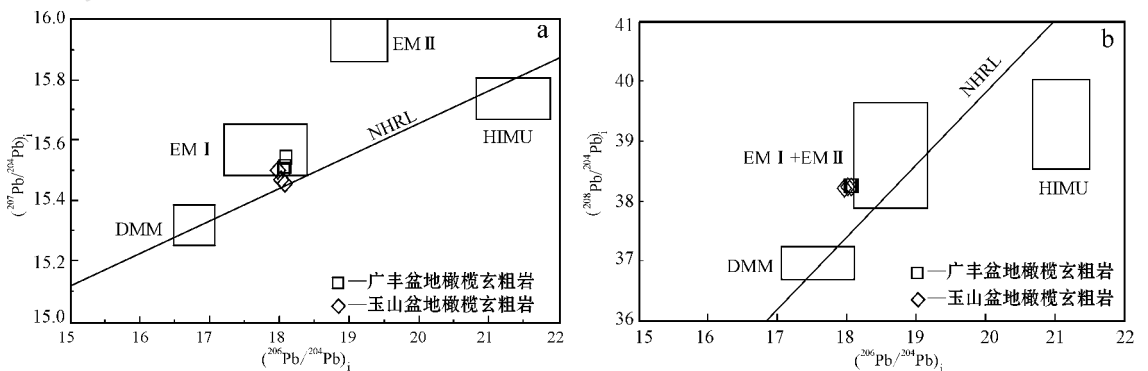


图 6 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (a)和 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (b)图解
(底图据 Zinder 和 Hart, 1986)

Fig. 6 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (a) and ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) - ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) (b) diagrams of shoshonite in Guangfeng and Yushan basins (after Zinder and Hart, 1986)

(4) 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 8.71‰ ~ 9.66‰, 平均 9.31‰, 高于地幔平均值 5.7‰(Faure, 1986), 暗示可能有部分地壳物质的加

入。结合($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) - $10\ 000/\text{Sr}$ 图解(图 5a)和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ - $100/\text{Nd}$ 图解(图 5b)指示岩浆上升侵位过程中陆壳混染不明显的特征, 暗示地壳物质的加入是源

区混合的结果。

5 问题讨论

5.1 橄榄玄粗岩的形成的地质时代

多年来,许多学者(李坤英等,1989;余达淦等;2001;王勇等,2002)对广丰、玉山盆地内的铁镁质火山岩进行了全岩 K-Ar 同位素年代学研究。李坤英等(1989)测得玉山盆地铁镁质火山岩全岩 K-Ar 年龄为 98 Ma,余达淦等(2001)测得广丰盆地铁镁质火山岩全岩 K-Ar 年龄为 99~104 Ma;王勇等(2002)测得玉山、余江一带铁镁质火山岩全岩 K-Ar 年龄为 98~102 Ma,本文获得的橄榄玄粗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 93 ± 1 Ma,小于全岩 K-Ar 法年龄。研究表明,全岩 K-Ar 法定年测试过程中通常存在仪器测量误差、测试样品的代表性、同位素体系封闭温度等多种因素的影响,且同位素体系易受热液蚀变、变质作用等后期热事件的干扰,所以对测试样品要求严格且误差较大。而锆石作为岩石中普遍存在的副矿物,具有较高的封闭温度(大于 900°C , Hourigan *et al.*, 2004; 大于 1000°C , Flowers *et al.*, 2005; 大于 850°C , 顾晟彦等, 2006), 强耐磨性和抗风化能力(章邦桐等, 2008; 肖媛媛, 2009), 因此具有较好保存成岩信息的潜力, 且锆石中较高的 Th、U 含量和较低的普通 Pb 含量, 为岩石的 U-Pb 年代学研究提供了良好的测试媒介, SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法能获得精确的年龄。因此, 本文获得的橄榄玄粗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄代表了橄榄

玄粗岩的形成年龄。根据国际地层表(Gradsrein *et al.*, 2004; 章森贵等, 2009), 晚白垩世与早白垩世的界限划在 99.6 ± 0.9 Ma, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩系列火山岩应形成于晚白垩世早期。

5.2 岩石圈地幔的性质

广丰、玉山盆地位于华夏古板块和扬子古板块之间的结合带内, 分别坐落在广丰变质地(块)体和浙西变质地(块)体之上。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ (图 7a) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) - $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ (图 7b) 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ (图 8a) 图解上, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩均位于亏损地幔(DMM)和 EM II 型富集地幔之间, 而且 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 和 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 正相关, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$ 和 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ 负相关, 意味着广丰、玉山盆地的橄榄玄粗岩可能均有 DMM 和 EM II 型富集地幔的贡献(Zhou *et al.*, 2000)。而玉山盆地更靠近 DMM 端员, 指示其 DMM 端员混合比例更高。在 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ 图解(图 8b)上, 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩落入由 Etendeka 玄武岩、赣南正长岩、盛源盆地火山岩、赣南玄武岩、粤北基性脉岩、粤北 I 型花岗岩和辉长闪长岩等来源 EM II 富集地幔岩石构成的趋势线上, 而偏离由 Hawaii 玄武岩和 Kenya、Patagonia、Walvis Ridge、Kerguelen 玄武岩、庐枞盆地富钾火山岩等来源 EM I 富集地幔岩石构成的趋势线, 进一步说明广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩来源于 EM II 型富集地幔。据此, 可以推断, 广丰、玉山盆地之下的岩石圈地幔均具华夏古板块的岩石圈地幔性质, 为华夏古板块俯冲于扬子古板块之下提供了又一证据。

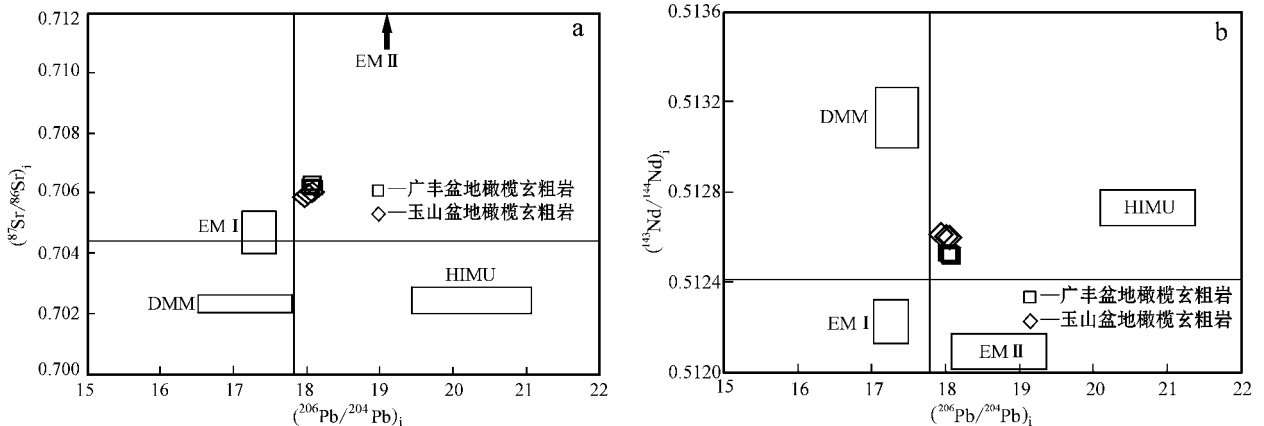


图 7 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ (a) 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ (b) 图解

Fig. 7 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ (a) and $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ (b) diagrams of shoshonite

in Guangfeng and Yushan basins

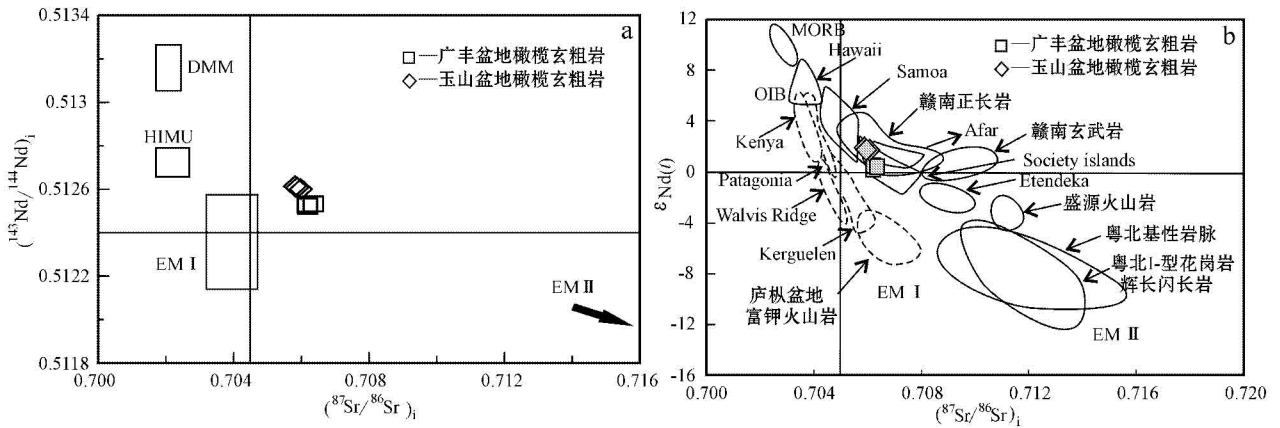


图 8 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) 和 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (b) (底图改自范蔚茗等, 2003)

Fig. 8 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) and $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (b) diagrams of shoshonite in Guangfeng and Yushan basins (after Fan Weiming *et al.*, 2003)

6 结论

综上所述, 可以得出以下结论:

(1) SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 玉山盆地橄榄玄粗岩的年龄为 93 ± 1 Ma, 属晚白垩世早期的产物;

(2) 广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩 O 同位素特征显示可能有地壳物质的加入, Sr-Nd-Pb 同位素特征指示地壳物质的加入是源区混合的结果, 且源区具有 EM II 型富集地幔的特征, 并均有亏损地幔 (DMM) 的参与;

(3) 广丰、玉山盆地 Sr-Nd-Pb 同位素特征的差异可能是 EM II 型富集地幔和亏损地幔混合比例不同所致, 它们可能均与华夏古板块岩石圈地幔有关。

致谢 感谢审稿专家的建设性修改意见, 北京离子探针中心刘建辉博士在锆石 SHRIMP 测年方面给予了大力帮助, 参加部分野外工作的还有刘帅副教授和武珺硕士研究生, 在此向他们表示诚挚的感谢。

References

Chen Jiangfeng, Yan Jun, Xie Zhi, *et al.* 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in Eastern China: constraints on Sources[J]. *Physics and Chemistry*

of the Earth, 26(9~10): 719~731.
 Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale[J]. *Geological Society*, 149: 171~184.
 Dupre B and Allegre C J. 1983. Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena[J]. *Nature*, 303: 142~146.
 Fan Weiming, Wang Yuejun, Guo Feng, *et al.* 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension[J]. *Earth Science Frontier*, 10(3): 159~169 (in Chinese with English abstract).
 Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology*[M]. New York: John Wiley and Sons.
 Flowers R M, Bowring S A and Tulloch A J. 2005. Tempo of burial and exhumation within the deep roots of a magmatic arc, Fiordland, New Zealand[J]. *Geology*, 33(1): 17~20.
 Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, *et al.* 1999. Geochemical characteristics of the Mesozoic basalts in Da Hinggan Ling: Evidence of the mantle crust interaction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(3): 397~407 (in Chinese with English abstract).
 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, *et al.* 2004. A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene [J]. *Episodes*, 27(2): 83~100.
 Gu Shengyan, Hua Renmin and Qi Huawen. 2006. Study on zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Sr-Nd isotope of the Guposhan granite in Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(4): 543~553 (in Chinese with English abstract).
 Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, *et al.* 2001. Late Mesozoic mafic intrusive complexes in North China block: constraints on the Nature of Subcontinental lithospheric mantle [J]. *Physics and*

- Chemistry of the Earth, 26(9~10):759~771.
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle[J]. Nature, 309:753~757.
- He Zhenyu, Xu Xisheng, Wang Xiaolei, et al. 2008. Geochronology and geochemistry of shoshonitic volcanics in southern Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(11):2524~2536(in Chinese with English abstract).
- Hourigan J K, Solovév A V and Ledneva G V. 2004. Timing of syenite intrusions on the eastern slope of the Sredinnyi Range Kamchatka: Rate of accretionary structure exhumation[J]. Geochemistry International, 42(2):131~141.
- Huang Fang, Li Shuguang, Zhou Hongying, et al. 2002. Geochemistry of U-Pb isotope of mafic-ultramafic from Post-Collisional in Dabie mountain: Relationship between crust-mantle reaction and LOMU component[J]. Science in China(Ser. D), 32(8):625~634(in Chinese).
- Jacobsen S B and Hunziker G J. 1980. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites[J]. Earth and Planetary Science Letters, 50:139~155.
- Jahn B M, Wu F and Hong D. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences, 109(1):5~20.
- Kuang Shaoping and Zhang Benren. 2001. Mantle Source of Late Cretaceous Basalts in South Dabie Orogenic Belts, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 36(2):203~211(in Chinese with English abstract).
- Kuang Shaoping, Zhang Benren, Ling Wenli, et al. 2002. Pb Isotopes of Late Cretaceous Basalts in Dabie Orogenic Belt, Central China[J]. Acta Geologica Sinica, 76(1):27~32(in Chinese with English abstract).
- Li Kunying, Shen Jialin and Wang Xiaoping. 1989. The isotopic geochronology of Mesozoic volcanics in Zhejiang, Fujian and Jiangxi Provinces[J]. Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources CAGS, (Sup.):87~132(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Hong Jian, Li Huimin, et al. 1999. U-Pb Zircon ages of the Pyroxenite Gabbro Intrusions in Dabie mountains and their Geological Implications[J]. Geological Journal of China Universities, 5(3):351~355(in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Nie Yonghong and Zheng Shuanggen. 1997. Interaction between subducted continental crust and the upper mantle- I Geochemistry of major and trace elements of mafic-ultramafic in Dabie mountain[J]. Science in China(Ser. D), 27(6):488~493(in Chinese).
- Li Shuguang, Nie Yonghong, Har S R, et al. 1998. Interaction between subducted continental crust and the upper mantle- II of Sr-Nd isotope geochemistry of mafic-ultramafic in Dabie mountain[J]. Science in China(Ser. D), 28(1):18~22(in Chinese).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, et al. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab?[J]. Lithos, 96(1~2):186~204.
- Liu Congqiang, Xie Guanghong and Masuda Akimasa. 1995. Geochemistry of Cenozoic Basalts from Eastern China- I. Major Element and Trace Element Compositions: Petrogenesis and characteristics of Mantle Source[J]. Geochimica, 24(1):1~19(in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Lo Chinghua, et al. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui province[J]. Geochimica, 31(2):129~140(in Chinese with English abstract).
- Peng Touping, Xi Xianwu, Wang Yuejun, et al. 2004. Geochemical characteristics of the early Mesozoic granodiorites and their tectonic implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 28(3):287~296(in Chinese with English abstract).
- Song Biao, Zhang Yuhai and Liu Dunyi. 2002. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 23(1):58~62(in Chinese with English abstract).
- Tatsumoto M and Nakamura Y. 1991. DUPAL anomaly in the sea of Japan Pb, Nd and Sr isotopic variations at the eastern Eurasian continental margin[J]. Geochimistry Acta, 55:3697~3708.
- Wang Jialing and Wu Jianhua. 2014. Mineral Chemistry and Its Geological Significance of Clinopyroxenes from the Late Cretaceous Shoshonitic Volcanic Rocks in Northern Jiangxi[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(1):163~173(in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Yu Dagan, Guan Taiyang, et al. 2002. Petrological and petrochemical characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks in northeast Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(1):31~39(in Chinese with English abstract).
- Williams I S and Claesson S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 97:205~217.
- Wu Junqi, Tan Guili, Zhang Bangtong, et al. 2011. Identification and genesis of the Early Cretaceous shoshonitic volcanic rock series in central Jiangxi Province[J]. Geological Journal of China Universities, 17(4):479~491(in Chinese with English abstract).
- Xiao Yuanyuan. 2009. Petrogenesis of High-Ti Andesites at the Bottom

- of Dabeigou Foundation in Chengde Basin and Its Dynamic Implications to North China(Master Degree Thesis [D]. Xi'an: Xibei University(in Chinese with English abstract).
- Xiang Yuanxin and Wu Jianhua. 2012. SHRIMP zircon U-Pb age of Yutian Group basalts in Longnan area of southern Jiangxi Province and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China , 35 (1): 716~725(in Chinese with English abstract).
- Xiang Yuanxin, Wu Jianhua, Yu Dagan , *et al.* 2012. Shoshonite series volcanic rocks in northern Jiangxi Province[J]. Journal of East China Institute of Technology , 35(1): 43~53(in Chinese with English abstract).
- Xiang Yuanxin, Yu Dagan and Wu Jianhua. 2010. Mineral chemistry and its geological significance of clinopyroxenes from the Early Cretaceous alkali olivine basalt on the Guangfeng , Jiangxi[J]. Journal of East China Institute of Technology , 33(2): 121~131(in Chinese with English abstract).
- Yan Jun, Zhangxun, Chen Jiangfeng , *et al.* 2001. Sr , Nd Isotopic Characteristics of the Jinan Gabbro Intrusion[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry , 20(4): 302~305(in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Wang Faning and Zeng Yong. 2002. The ore-forming environment and its process in northeast Jiangxi[J]. Resources Survey & Environment , 23(3): 122~129(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhuliang, Shen Weizhou, Tao Kuiyuan , *et al.* 1999. Sr , Nd and Pb isotopic characteristics of Early Cretaceous basaltic rocks from the coast of Zhejiang and Fujian: Evidences for ancient entereched mantle source[J]. Journal of Geology , (1): 542~597(in Chinese with English abstract).
- Yu Dagan, Ye Fawang and Wang Yong. 2001. Active succession establishment for volcanic-interusive complex in Middle-late Lower Cretaceous in Guangfeng , Jiangxi and its geological implication[J]. Geotectonica et Metallogenia , 25(3): 271~276(in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu , *et al.* 2008. Source , evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Luzong basin , Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica , 33(5): 465~476(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong , Chen Peirong , Ling Hongfei , *et al.* 2004. Pb-Nd-Sr isotopic study of the Middle Jurassic basalts in southern Jiangxi Province : Characteristics of mantle source and tectonic implication [J]. Geological Journal of China Universities , (82) 7 : 986~997 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong , Chen Peirong , Ling Hongfei , *et al.* 2008. Geochemical evidence of element and Sr-O-Nd-Pb isotopes for petrogenesis of the Huichang Early Cretaceous shoshonite , southern Jiangxi province[J]. Acta Geologica Sinica , (82) 7 : 986~997(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong , Chen Peirong , Yang Dongsheng , *et al.* 2001. Geological evidence for determination of Mesozoic shoshonite rock series from Southern Jiangxi Province[J]. Acta Geologica Sinica , 75(2): 213~220(in Chinese with English abstract).
- Zhang Sengui, Zhang Yunbai and Yan Huijun. 2009. A brief introduction to the " international stratigraphic chart (2008) [J]. Journal of Stratigraphy , 33(1): 1~10(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin and Li Wuxian. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China : implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magma[J]. Tectonophysics , 326 : 269~287.
- Zhu Ba , Ling Hongfei , Shen Weizhou , *et al.* 2008. Geochemical characteristics of Late Cretaceous diabase porphyrite dikes in the Xizhuang uranium orefield , northern Guangdong Province and its tectonic significance[J]. Geological Review , 54(1): 26~36(in Chinese with English abstract).
- Zinder A and Hart S R. 1986. Chemical Geodynamics[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences , 14 : 493~471.

附中文参考文献

- 范蔚茗,王岳军,郭 锋,等. 2003. 湘赣地区中生代铁镁质岩浆作用与岩石圈伸展[J]. 地学前缘, 10(3): 159~169.
- 葛文春,林 强,孙德有,等. 1999. 大兴安岭中生代玄武岩的地球化学特征:壳幔相互作用的证据[J]. 岩石学报, 15(3): 397~407.
- 顾晟彦,华仁民,戚华文. 2006. 广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石定年及全岩同位素研究[J]. 地质学报, 80(4): 543~553.
- 贺振宇,徐夕生,王孝磊,等. 2008. 赣南橄榄玄粗质火山岩的年代学与地球化学[J]. 岩石学报, 24(11): 2 524~2 536.
- 黄 方,李曙光,周红英,等. 2002. 大别山碰撞后铁镁-超铁镁岩的 U-Pb 同位素地球化学:壳-幔相互作用及 LOMU 端元[J]. 中国科学(D 辑), 33(8): 625~634.
- 匡少平,张本仁. 2001. 大别造山带南坡晚白垩世玄武岩源区地幔特征[J]. 地质科学, 36(2): 203~211.
- 匡少平,张本仁,凌文黎,等. 2002. 大别造山带和扬子陆块北缘中生代玄武岩铅同位素组成及构造意义[J]. 地质学报, 76(1): 27~32.
- 李坤英,沈加林,王小平. 1989. 浙闽赣中生代陆相火山岩同位素年代学[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,(增刊): 87~132.
- 李曙光,洪吉安,李惠民,等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报, 5(3): 351~355.

- 李曙光, 聂永红, Har S R, 等. 1998. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用—II 大别山同碰撞铁镁-超铁镁岩的 Sr、Nd 同位素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 28(1): 18~22.
- 李曙光, 聂永红, 郑双根. 1997. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用—I 大别山同碰撞铁镁-超铁镁岩的主要元素及微量元素地球化学[J]. 中国科学(D辑), 27(6): 488~493.
- 刘丛强, 解广轰, 增田彰正. 1995. 中国东部新生代玄武岩的地球化学—I. 主元素和微量元素组成: 岩石成因及源区特征[J]. 地球化学, 24(1): 1~19.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 等. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. 地球化学, 31(2): 129~140.
- 彭头平, 席先武, 王岳军等. 2004. 湘东北早中生代花岗闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 28(3): 287~296.
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学[J]. 质谱学报, 23(1): 58~62.
- 王佳玲, 巫建华. 2014. 赣东北晚白垩世橄榄玄粗岩系列火山岩中单斜辉石矿物化学及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 163~173.
- 王勇, 余达淦, 管太阳, 等. 2002. 赣东北早白垩世火山岩的岩石学及岩石化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 21(1): 31~39.
- 吴俊奇, 谭桂丽, 章邦桐, 等. 2011. 赣中早白垩世橄辉玄粗岩 (Shoshonite) 系列火山岩的厘定及成因研究[J]. 高校地质学报, 17(4): 479~491.
- 肖媛媛. 2009. 中国东部承德盆地大北沟高 Ti 安山岩年代学与地球化学研究及其意义(硕士论文)[D]. 西安: 西北大学.
- 项媛馨, 巫建华. 2012. 赣南龙南地区余田群玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 35(1): 716~725.
- 项媛馨, 巫建华, 余达淦, 等. 2012. 赣东北晚白垩世橄辉玄粗岩 (shoshonite) 系列火山岩厘定的地质证据[J]. 东华理工大学学报, 35(1): 43~53.
- 项媛馨, 余达淦, 巫建华. 2010. 江西广丰早白垩世碱性橄辉玄武岩中单斜辉石矿物化学及其地质意义[J]. 东华理工大学学报, 33(2): 121~131.
- 闫峻, 张巽, 陈江峰, 等. 2001. 济南辉长岩体的锶、钕同位素特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 20(4): 302~305.
- 杨明桂, 王发宁, 曾勇. 2002. 赣东北地区的成矿环境与成矿作用[J]. 资源调查与环境, 23(3): 122~129.
- 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元, 等. 1999. 浙闽沿海早白垩世玄武岩锶、钕、铅同位素特征——古老富集型地幔的证据[J]. 地质科学, (1): 542~597.
- 余达淦, 叶发旺, 王勇. 2001. 江西广丰白垩世中晚期盆地火山——侵入杂岩活动序列确认及地质意义[J]. 大地构造与成矿, 25(3): 271~276.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景[J]. 岩石学报, 24(08): 1691~1702.
- 章邦桐, 陈培荣, 杨东生, 等. 2001. 赣南中生代橄辉玄粗岩系列厘定的地质证据[J]. 地质学报, 75(2): 213~220.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2004. 赣南中侏罗世玄武岩的 Pb-Nd-Sr 同位素地球化学研究: 中生代地幔源区特征及构造意义[J]. 高校地质学报, (82)7: 986~997.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2008. 会昌早白垩世橄辉玄粗岩 (shoshonite) 成因的元素及 Sr-O-Nd-Pb 同位素地球化学证据[J]. 地质学报, (82)7: 986~997.
- 章森桂, 张允白, 严惠君. 2009. “国际地层表 (2008) 简介[J]. 地层学杂志, 33(1): 1~10.
- 朱捌, 凌洪飞, 沈渭洲, 等. 2008. 粤北下庄矿田晚白垩世辉绿玢岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质论评, 54(1): 26~36.