

· 专题研究 ·

赣南珠兰埠复式岩体成因及其构造意义

王洪作^{1,2}, 赵友东^{2,3}, 陈培荣², 凌洪飞², 吴俊奇²

- (1. 核工业北京地质研究院, 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029;
2. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023;
3. 核工业203研究所, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 会昌地区位于南岭北部, 该区出露有富城岩体和珠兰埠岩体, 其中后者的研究程度低且时代与成因方面存在较多争议。珠兰埠复式岩体包括主体粗粒黑云母二长花岗岩和补体细粒二长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示两者分别形成于印支期(228 Ma)和燕山晚期(135 ~ 133 Ma), 而富城复式岩体的主体和补体花岗岩均形成于印支期。对珠兰埠主体与补体花岗岩开展主量元素与微量元素分析, 结果显示两者均富 Si、Al、K, 低 Ca、Mg, 属弱过铝-强过铝质, 富集 Rb、Th、U 而亏损 Sr、Ba、P、Ti、Eu 等元素, ΣREE (平均值 $< 165 \times 10^{-6}$) 和 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 含量较低 ($< 350 \times 10^{-6}$), 表明两者均为 S 型花岗岩。全岩 Sr-Nd 同位素分析结果表明, 珠兰埠主体粗粒黑云母二长花岗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值大于补体细粒二长花岗岩 (分别为 0.715 6 ~ 0.726 0 和 0.710 5 ~ 0.716 4), 但 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值基本一致 (-10.0 ~ -7.0), 锆石原位 Hf 同位素分析结果显示两者 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -12.9 ~ -7.7 和 -15.1 ~ -10.5, t_{DM}^{C} 分别为 2.0 ~ 1.7 Ga 和 2.1 ~ 1.8 Ga。元素和同位素分析结果表明珠兰埠复式岩体可能源自古元古代的混合源区(变泥质岩为主, 夹少量变质杂砂岩)部分熔融而成, 印支期珠兰埠主体粗粒黑云母二长花岗岩和富城复式岩体均形成于古亚洲-特提斯构造域挤压构造背景, 而燕山晚期珠兰埠补体细粒二长花岗岩则形成于古太平洋构造域的板内开张环境。

关键词: 珠兰埠复式岩体; S 型花岗岩; Sr-Nd-Hf 同位素; 岩石成因; 印支期; 燕山期

中图分类号: P588.12⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0175-22

Petrogenesis of the Zhulanbu composite pluton and its implications for tectonic setting

WANG Hong-zuo^{1,2}, ZHAO You-dong^{2,3}, CHEN Pei-rong², LING Hong-fei² and WU Jun-qi²

- (1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology, Beijing 100029, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

Abstract: There are two composite plutons, Fucheng and Zhulanbu, emplaced in the Huichang region of the northern Nanling Mountains. Nevertheless, very insufficient researches have been conducted on the Zhulanbu composite pluton, and its age and petrogenesis remain problems of much controversy. The Zhulanbu composite pluton consists of early intrusive coarse-grained biotite monzonite and late intrusive fine-grained monzonite, and LA-ICP-MS zircon dating suggests that they were formed in Indosinian (228 Ma) and Late Yanshanian (135 ~ 133 Ma), respectively; however, the Fucheng composite pluton was emplaced in Indosinian. Chemical analyses of major and trace elements

收稿日期: 2017-08-30; 接受日期: 2017-12-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41703042); 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金(2017-LAMD-K06)

作者简介: 王洪作(1987-), 男, 博士, 工程师, 岩石地球化学、铀矿床学方向, E-mail: wanghz1004@163.com.

indicate that both the early and late granitic intrusive bodies of the Zhulanbu composite pluton are characterized by intermediate-strong peraluminous nature, high content of Si, Al, K, low content of Ca, Mg, enrichment of Rb, Th, U, and depletion of Sr, Ba, P, Ti, Eu. They also have lower ΣREE ($<165 \times 10^{-6}$ on average) and Zr + Nb + Ce + Y content ($<350 \times 10^{-6}$). These geochemical characteristics suggest S-type granites. The whole rock Sr-Nd isotopic analysis results show that the early intrusive granite exhibits higher ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i than the late counterparts (0.715 6 ~ 0.726 0 and 0.710 5 ~ 0.716 4, respectively), but they exhibit the same variation of $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values (ranging from -10.0 to -7.0). Zircon in-situ Lu-Hf isotopic analysis indicates their similarities of $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values (-12.9 ~ -7.7 and -15.1 ~ -10.5, respectively) and t_{DM}^{C} (2.0 ~ 1.7 Ga and 2.1 ~ 1.8 Ga, respectively). The elemental and isotopic results suggest that the Zhulanbu composite pluton probably originated from the partial melting of a mixed crustal source involving the Paleoproterozoic metapelite and minor metagreywacke. The Fucheng composite pluton and the early intrusive granite of Zhulanbu composite pluton were formed in a compressive background of the Tethys tectonic domain during the Indosinian; in contrast, the late intrusive granite of Zhulanbu composite pluton was formed in the intraplate extensional environment of the paleo-Pacific tectonic domain during the Yanshanian period.

Key words: Zhulanbu composite pluton; S-type granite; Sr-Nd-Hf isotopes; petrogenesis; Indosinian; Yanshanian
Fund support: Natural Science Foundation of China Youth Fund(41703042); Open Fund of State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University(2017-LAMD-K06)

中生代以来,中国东南部大陆边缘经历了重大的构造体制转变事件,即古亚洲-特提斯构造域向古太平洋构造域的转换,并留下来一系列物质印记(Zhou and Li, 2000; 舒良树等, 2002; 舒良树等, 2004; Zhou *et al.*, 2006),如印支期EW向的构造带和花岗岩带(周新民等, 2007),过渡为燕山期NE向的拉张盆地和火山-侵入岩带(舒良树等, 2004; Wang and Shu, 2012),并以南岭地区保存的记录尤为典型。南岭地区在印支晚期、燕山早期、燕山晚期先后经历了3次大的岩浆作用,这些岩浆活动具有自西向东变新的趋势(周新民等, 2007)。印支晚期在南岭地区侵入的花岗岩主要为强过铝S型花岗岩,燕山早期(中晚侏罗世)则以双峰式火山岩和A型花岗岩的出现为标志(陈培荣等, 1998),而燕山晚期(早白垩世)则是全区性的成岩-成矿大爆发时期,形成了巨量的火山-侵入岩。整个南岭地区的花岗岩以燕山期花岗岩为主,印支期为辅,其中大规模的燕山期花岗岩多是在印支期东西向断裂带基础上侵入而形成的岩体。

会昌地区位于南岭3条东西向构造-岩浆岩带的北带,该地区的花岗岩分成两个部分,以会昌红盆为界,东部为富城复式岩体而西部为珠兰埠复式岩体(图1)。前人对富城岩体做了大量研究工作,结果显示富城复式岩体的主体与补体花岗岩均形成于印支期,为强过铝质S型花岗岩,形成于挤压造山背

景(于津海等, 2007; 章邦桐等, 2010; 任海涛等, 2013; 赵友东等, 2016)。但是对于珠兰埠复式岩体的研究相对较少,成岩时代仍然存在争议(何伟相等, 2007; 王登红等, 2012)。另外,富城岩体西部同橄榄玄粗质火山岩带接触部位产出大量铀矿床(图1),是赣南重要的铀矿产地,部分学者通过研究认为富城岩体是重要的铀源岩,成矿物质可能来自岩体本身(陈迪云等, 1997; 张万良, 2005; 章邦桐等, 2011a, 2011b; 张运涛等, 2012; 赵友东等, 2016),而红盆西侧相隔仅几公里的珠兰埠岩体至今未发现铀矿床。作为铀源岩重要载体的花岗岩,珠兰埠岩体与富城岩体均为复式岩体,两者在成岩时代、矿物学、地球化学特征以及岩石成因等方面是否存在差异,也值得深入研究,因此本文对珠兰埠岩体开展了系统性的矿物学、年代学、元素和同位素地球化学研究,以确定岩体的成岩时代并探讨其成因及构造背景。

1 地质背景与岩相学特征

1.1 断陷盆地

赣南会昌地区的珠兰埠和富城岩体位于南岭3个EW向花岗岩带的北带(周新民等, 2007),两者之间被近NNE向弧形会昌断陷红盆所分割,西侧为珠兰埠岩体,东侧为富城岩体。会昌盆地为一弧形的

单向断陷盆地, 总体呈 NNE 向展布, 盆地的形态和分布特征基本上受区域性河源-邵武深大断裂以及北东向断裂控制, 盆地两侧叠覆在花岗岩上, 底部为变质岩基底。盆地内地层产状呈西倾, 少数倾向南东, 盆地局部产状较紊乱可能同后期断裂改造有关。

盆地东西两侧的地层倾角较陡(约 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$)而中心缓(约 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$), 沉积中心由东向西迁移, 西部地层相对较厚。盆地内地层主要为白垩系, 包括茅店组、周田组和河口组。

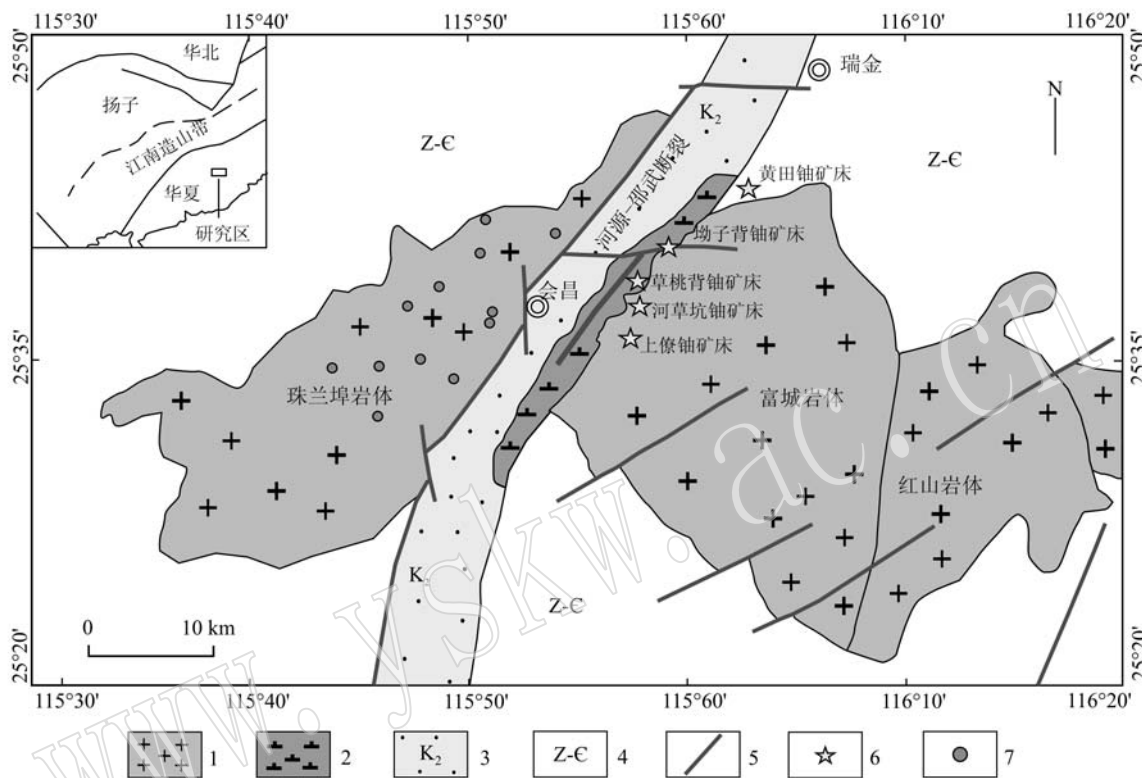


图1 赣南珠兰埠岩体与富城岩体地质简图(修改自江西省地质矿产局, 1989)^①

Fig. 1 Sketch geological map of the Zhulanbu and Fucheng composite plutons, southern Jiangxi Province (after Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province, 1989)^①

1—花岗岩; 2—早白垩世橄榄玄粗质火山岩; 3—晚白垩世赣州组红色碎屑沉积岩; 4—震旦系-寒武系地层; 5—断裂; 6—铀矿床; 7—采样点

1—granite; 2—Early Cretaceous shoshonite volcanic rock; 3—red beds of Late Cretaceous Ganzhou Formation; 4—Sinian-Cambrian strata; 5—fault; 6—uranium deposit; 7—sampling location

1.2 区内两大复式岩体

(1) 富城复式岩体

富城复式岩体位于南岭北部, 区域性河源-邵武深大断裂通过岩体西部并形成会昌断陷红盆, 岩体内部发育大量次级断裂, 导致多期的岩浆及热液活动(梅勇文, 1997; 舒良树等, 2004; 张万良, 2006)。平面上富城岩体呈不规则椭圆形, 近 NW 向展布。岩体北部呈侵入接触的地层为寒武系牛角河组和震旦系坝里组地层, 东侧与闽西红山花岗岩相接, 北西侧被早白垩世赣州组橄榄玄粗质火山岩覆盖(图

1)。岩体主体为中粗粒黑云母花岗岩, 似斑状结构, 块状构造, 岩石中可见原生白云母, 为强过铝质 S 型花岗岩(于津海等, 2007; 章邦桐等, 2010)。

(2) 珠兰埠复式岩体

珠兰埠复式岩体与富城复式岩体相距仅 6 km, 位于会昌断陷红盆的北西侧(图 1)。该岩体同震旦系和寒武系的围岩地层呈侵入接触, 在岩体边部可见围岩捕虏体, 岩体总体上同围岩变质岩界线清晰。珠兰埠岩体为多期多旋回的复式岩基, 主体岩性为中粗粒黑云母二长花岗岩, 晚期侵入的补体为细粒

① 江西省地质矿产局. 1989. 江西省区域地质调查报告 1: 5 万会昌幅.

二长花岗岩。主侵入期中粗粒黑云母二长花岗岩为涌动侵入,而晚期补体相的细粒二长花岗岩则为脉动侵入,刺穿主体花岗岩和震旦系、寒武系的变质围岩,形成刺穿构造。岩体主体为粗粒黑云母二长花岗岩,粗粒结构,块状构造,造岩矿物主要为石英(20%~25%)、条纹长石(35%~45%)、斜长石(25%~35%)、黑云母(3%~5%)等(图2a、2b),轻微蚀变的黑云母边部可见少量白云母(图2b)。斜长石多交代成鳞片状绢云母(图2a)。钾长石多为

条纹长石,蚀变较轻,颗粒较大(图2a、2b)。石英呈他形粒状结构,偶见波状消光。黑云母含量较少,常见绿泥石化蚀变,呈黑云母假像(图2b)。副矿物含量少,主要有磷灰石、锆石和磁铁矿等。晚期补体细粒二长花岗岩为细粒结构,块状构造,主要造岩矿物为石英(35%~40%)、条纹长石(25%~30%)、斜长石(30%~35%),石英他形粒状,条纹长石和斜长石粒度明显小于主体粗粒黑云母二长花岗岩,可见轻微绢云母化蚀变(图2c),副矿物主要有锆石、磷灰石等。

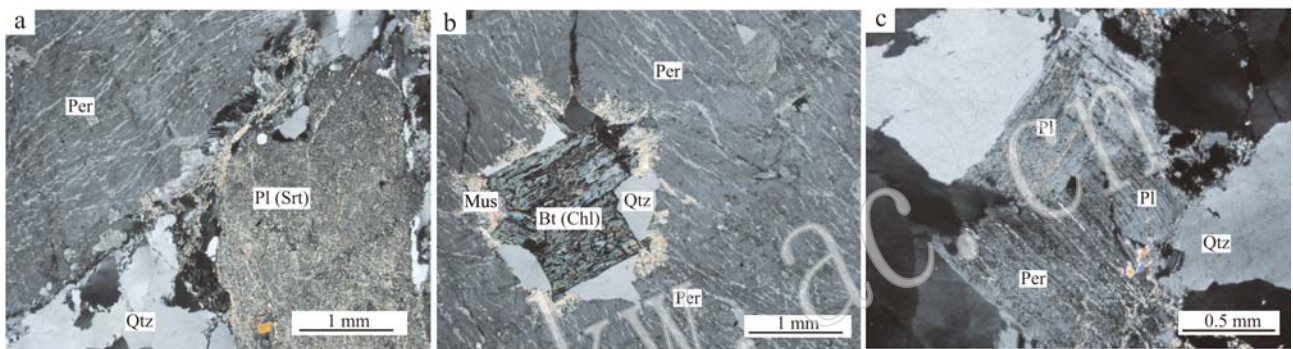


图2 珠兰埠复式岩体粗粒黑云母二长花岗岩(a、b)和细粒二长花岗岩(c)岩相学特征(正交偏光)

Fig. 2 Petrographical features of coarse-grained biotite monzonite (a, b) and fine-grained monzonite (c) in the Zhulanbu composite pluton (crossed nicols)

Pl—斜长石; Per—条纹长石; Qtz—石英; Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Srt—绢云母; Mus—白云母

Pl—plagioclase; Per—perthite; Qtz—quartz; Bt—biotite; Chl—chlorite; Srt—sericite; Mus—muscovite

2 分析测试方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

采用人工重砂并结合磁选、电磁选法从花岗岩样品中把锆石分选出来,然后在双目镜下人工进行挑纯。挑选晶型较完整、自形程度较好的锆石,然后运用环氧树脂和固化剂把锆石做成锆石靶。锆石使用砂纸打磨并进行精磨和抛光,获得其最大横截面。先进行透射光和反射光对比观察,拍摄 CL 图像,综合分析图像上锆石的晶型特征以及内部结构特征,对无裂隙和包裹体、具有清晰震荡环带的岩浆锆石开展测年工作。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行,ICP-MS 型号为 Agilent 7500 型质谱仪,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP-231 固体激光剥蚀系统,激光脉冲频率为 5 HZ,脉冲能量为 0.08~0.10

mJ,剥蚀孔径为 35 μm 。U-Pb 同位素分馏根据澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 608.5 \pm 0.4 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 599.8 \pm 4.5 Ma) 进行校正 (Jackson *et al.*, 2004), 锆石标样 Mud Tank (735 Ma) 作为内标 (Black and Gulson, 1978), 以控制分析精度。每个测试流程的开头和结尾分别测 2 个 GJ 标样、1 个 Mud Tank 标样,中间测 10 个待测样品点。锆石原位 U-Pb 定年的激光剥蚀原理和具体实验方法见 Jackson 等 (2004)。质谱仪分析得到的数据通过分析软件 Glitter (ver 4.0) 程序 (Van Achterbergh *et al.*, 2001) 计算获得同位素比值、年龄和误差。普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法,校正后的结果用 Isoplot 程序 (V. 3.23) (Ludwig, 2003) 计算年龄和绘制谐和图。

2.2 主量元素与微量元素分析

在手标本观察和显微镜鉴定的基础上,选取比较新鲜的岩石样品开展元素和同位素地球化学分析。主量元素测试在广州澳实分析测试中心完成,

分析方法采用 XRF 法, 测试精度优于 5%。微量元素分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室进行, 使用 Finnigan Element II 型高分辨等离子质谱 (ICP-MS) 完成, 测试精度一般 5% ~ 10%, 大部分元素优于 5%, 详细的分析步骤参阅高剑峰等 (2003)。

2.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

Sr-Nd 同位素测试在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成。将烘干后的样品称取 100 mg 完全溶解于 HF + HNO₃ 混合酸溶液后, 采用传统的阳离子交换树脂技术将 Sr 和 Nd 分离提纯出来。分离产物采用 Finnigan 公司热电离子质谱仪 (TIMS 型号为 Finnigan Triton TI) 进行 Sr 同位素比值测定, Nd 同位素比值采用电感耦合等离子质谱 (MC-ICP-MS) 测定, 详细的实验流程见濮巍等 (2004, 2005)。测定过程中的质量分馏效应分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行校正, Rb、Sr 和 Sm、Nd 的全流程实验本底分别小于 100 pg 和 50 pg。计算过程中所用的常数为: $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}/\text{a}$; $\lambda_{\text{Rb}} = 1.42 \times 10^{-11}/\text{a}$; 亏损地幔 (DM) $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.21370$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.51315$ 。

2.4 锆石 Lu-Hf 同位素

已开展过 LA-ICP-MS 定年的锆石又进行了原位 Lu-Hf 同位素分析, 分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 Thermo Neptune plus 多接收等离子质谱 (MC-ICP-MS) 进行, 激光剥蚀系统为 New wave UP 193, 分析中采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 采用的剥蚀直径为 35 μm , 激光频率为 8 Hz, 剥蚀时间为 30 s, 使用锆石标样 MT-1 和 91500 作为标样, 实验过程中获得的上述 2 个标样的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282436 ± 0.000021 ($n = 12, 2\sigma$) 和 0.282260 ± 0.000025 ($n = 12, 2\sigma$), 相关仪器的测试条件及详细分析流程参考侯可军等 (2007)。

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算采用球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 (0.282772) 及 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值 (0.0336) (Bouvier *et al.*, 2008), Hf 模式年龄计算时采用当前亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值 (0.28325) 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值 (0.0384) (Griffin *et al.*, 2000)。两阶段模式年龄采用平均大陆地壳的 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c = 0.015$ (Griffin *et al.*, 2002) 进行计算。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

本文选择珠兰埠岩体中 1 件粗粒黑云母二长花岗岩样品 (ZLB-6) 和 2 件细粒二长花岗岩样品 (13ZLB-9、ZLB-2) 进行了锆石 U-Pb 年代学研究, 分析结果见表 1, U-Pb 年龄谱和图及其锆石阴极发光 (CL) 图像见图 3。

样品 ZLB-6 采样坐标为北纬 $25^{\circ}37'24.55''$ 、东经 $115^{\circ}43'41.26''$ 。锆石晶型完好, 一般透明-半透明状, 晶型以长柱状为主 (个别可达 250 μm), 长宽比一般为 3:1 ~ 2:1。锆石边部可见清晰的震荡环带结构 (图 3d), 表明其为岩浆成因锆石。少量锆石显示有核边结构, 且边部震荡环带不明显, 可能遭受过后期热液蚀变的影响 (吴元保等, 2004; 汪相等, 2008), 也有可能为源区部分熔融过程中残留的继承锆石。Th/U 值通常被用来判断锆石成因, 因为在流体中 U 的活动性强而 Th 的活动性较弱, 锆石受变质作用影响往往导致其 Th/U < 0.1, 而未变质的岩浆锆石的 Th/U 值一般 > 0.1 (Belousova *et al.*, 2002)。本次分析的粗粒黑云母二长花岗岩锆石样品 (ZLB-6) 中 3 个锆石核部测点的年龄远大于锆石边部年龄, 属继承锆石 (其中 1 个核部测点的 Th/U < 0.1, 其原岩可能经受过变质作用的影响, 而其他所有测点的 Th/U 值变化于 0.4 ~ 1.5 之间, 均大于 0.1, 属于岩浆锆石), 在计算加权平均年龄的时候予以排除, 其余 16 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 232 ~ 226 Ma, 加权平均年龄为 228.3 ± 1.0 Ma (MSWD = 0.8, $n = 16$), 表明主体粗粒黑云母二长花岗岩形成于印支期。

补体细粒二长花岗岩样品 13ZLB-9 取样位置坐标为北纬 $25^{\circ}39'6.2''$ 、东经 $115^{\circ}46'1.5''$ 。样品中锆石颗粒一般呈透明-半透明, 短柱状为主, 晶型较好, 个别长度可达 300 μm 以上, 长宽比一般 2:1 ~ 3:1。锆石边部均发育有清晰的震荡环带 (图 3e), 指示其为岩浆成因。在所有分析的 18 个锆石测点中, 除去 1 个捕获锆石年龄为 948 Ma 外, 其余年龄分成两组 (图 3b): 一组为印支晚期的捕获锆石, 其 Th/U 值为 0.19 ~ 1.84, 平均 1.06, 进一步表明其为岩浆锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 219.8 ± 4.6 Ma (MSWD = 1.4, $n = 4$); 另一组锆石的 Th/U 值为 0.5 ~ 2.26, 平均值为 1.06, 也是岩浆锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 133.4 ± 1.3 Ma (MSWD = 1.9, $n = 13$)。

表1 珠兰埠复式岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Zhulanbu composite pluton

测点	$u_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
ZLB-6 粗粒黑云母二长花岗岩															
ZLB-6-1	232	153	1.52	0.061 9	0.001 7	0.900 6	0.022 5	0.105 6	0.001 2	670	34	652	12	647	7
ZLB-6-2	120	101	1.19	0.050 2	0.001 6	0.252 3	0.007 6	0.036 5	0.000 4	204	49	228	6	231	3
ZLB-6-3	233	184	1.27	0.052 5	0.001 3	0.261 6	0.005 9	0.036 2	0.000 4	305	33	236	5	229	2
ZLB-6-4	193	171	1.12	0.052 9	0.001 4	0.262 8	0.006 4	0.036 1	0.000 4	324	36	237	5	228	2
ZLB-6-5	229	618	0.37	0.048 7	0.000 9	0.243 7	0.003 8	0.036 3	0.000 3	132	21	221	3	230	2
ZLB-6-6	179	194	0.92	0.048 8	0.001 3	0.243 8	0.005 9	0.036 3	0.000 4	137	38	222	5	230	2
ZLB-6-7	149	382	0.39	0.049 9	0.001 1	0.248 4	0.004 9	0.036 1	0.000 3	192	29	225	4	229	2
ZLB-6-8	237	186	1.27	0.051 1	0.001 4	0.251 7	0.006 3	0.035 7	0.000 4	246	38	228	5	226	2
ZLB-6-9	63	139	0.46	0.159 0	0.002 6	10.591 2	0.151 1	0.483 3	0.004 1	2 445	13	2 488	13	2 542	18
ZLB-6-10	335	548	0.61	0.050 8	0.001 0	0.252 2	0.004 5	0.036 0	0.000 3	230	25	228	4	228	2
ZLB-6-11	190	474	0.40	0.050 5	0.001 1	0.249 7	0.005 1	0.035 9	0.000 3	219	30	226	4	227	2
ZLB-6-12	232	203	1.14	0.052 6	0.001 3	0.259 7	0.005 8	0.035 8	0.000 3	310	33	234	5	227	2
ZLB-6-13	200	282	0.71	0.053 3	0.001 2	0.261 6	0.005 3	0.035 6	0.000 3	341	30	236	4	226	2
ZLB-6-14	295	311	0.95	0.050 3	0.001 0	0.253 8	0.004 4	0.036 6	0.000 3	208	25	230	4	232	2
ZLB-6-15	196	230	0.85	0.050 9	0.001 1	0.251 3	0.004 9	0.035 8	0.000 3	235	29	228	4	227	2
ZLB-6-16	311	677	0.46	0.050 0	0.001 0	0.250 9	0.004 3	0.036 4	0.000 3	197	24	227	3	230	2
ZLB-6-17	391	445	0.88	0.049 6	0.001 0	0.247 4	0.004 5	0.036 2	0.000 3	177	27	224	4	229	2
ZLB-6-18	356	690	0.52	0.050 5	0.000 9	0.248 6	0.003 8	0.035 7	0.000 3	216	21	225	3	226	2
ZLB-6-19	33	549	0.06	0.056 2	0.001 0	0.543 9	0.008 1	0.070 2	0.000 6	460	19	441	5	437	3
13ZLB-9 细粒二长花岗岩															
13ZLB-9-1	295	235	1.25	0.052 2	0.002 3	0.149 9	0.006 1	0.020 9	0.000 3	292	67	142	5	133	2
13ZLB-9-2	329	239	1.38	0.049 2	0.001 7	0.142 7	0.004 6	0.021 0	0.000 2	159	55	135	4	134	2
13ZLB-9-3	413	529	0.78	0.048 0	0.001 3	0.140 3	0.003 4	0.021 2	0.000 2	101	39	133	3	135	1
13ZLB-9-4	324	381	0.85	0.048 7	0.001 8	0.144 4	0.005 1	0.021 5	0.000 3	131	60	137	5	137	2
13ZLB-9-5	342	186	1.84	0.050 5	0.001 7	0.244 4	0.007 7	0.035 1	0.000 4	219	51	222	6	222	2
13ZLB-9-6	386	389	0.99	0.062 5	0.003 6	0.177 0	0.009 4	0.020 6	0.000 4	691	80	165	8	131	3
13ZLB-9-7	284	125	2.26	0.057 4	0.004 7	0.161 2	0.012 7	0.020 4	0.000 5	506	130	152	11	130	3
13ZLB-9-8	208	169	1.23	0.052 1	0.001 8	0.252 1	0.007 9	0.035 1	0.000 4	292	51	228	6	222	2
13ZLB-9-9	242	185	1.31	0.050 7	0.002 0	0.148 7	0.005 6	0.021 3	0.000 3	225	65	141	5	136	2
13ZLB-9-10	536	540	0.99	0.067 8	0.001 8	0.192 6	0.004 5	0.020 6	0.000 2	863	31	179	4	131	1

续表 1
Continued Table 1

测点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ			
ZLB-6 粗粒黑云母二长花岗岩															
13ZLB-9-11	259	289	0.90	0.052 0	0.001 9	0.145 0	0.005 1	0.020 2	0.000 3	284	57	137	4	129	2
13ZLB-9-12	84	447	0.19	0.051 7	0.001 4	0.246 3	0.005 9	0.034 6	0.000 3	270	37	224	5	219	2
13ZLB-9-13	472	271	1.74	0.063 1	0.006 7	0.179 8	0.017 9	0.020 7	0.000 7	713	153	168	15	132	5
13ZLB-9-14	376	380	0.99	0.054 1	0.001 1	0.254 6	0.004 8	0.034 2	0.000 3	375	26	230	4	216	2
13ZLB-9-15	356	585	0.61	0.197 5	0.002 8	4.364 6	0.051 5	0.160 3	0.001 2	2 738	51	1 662	24	948	9
13ZLB-9-16	388	771	0.50	0.049 3	0.001 1	0.142 5	0.002 9	0.021 0	0.000 2	163	30	135	3	134	1
13ZLB-9-17	212	164	1.29	0.048 7	0.003 1	0.140 2	0.008 5	0.020 9	0.000 4	131	102	133	8	133	2
13ZLB-9-18	206	189	1.09	0.048 9	0.002 4	0.143 8	0.006 6	0.021 3	0.000 3	144	79	136	6	136	2
ZLB-2 细粒二长花岗岩															
ZLB-2-1	144	200	0.72	0.049 2	0.001 6	0.146 3	0.004 3	0.021 6	0.000 2	157	48	139	4	138	2
ZLB-2-2	487	771	0.63	0.073 1	0.001 4	0.222 4	0.003 8	0.022 1	0.000 2	1 016	20	204	3	141	1
ZLB-2-3	1 590	3 106	0.51	0.051 9	0.001 1	0.102 9	0.001 9	0.014 4	0.000 1	282	26	99	2	92	1
ZLB-2-4	112	129	0.87	0.050 5	0.003 1	0.164 1	0.009 4	0.023 6	0.000 5	220	96	154	8	150	3
ZLB-2-5	194	204	0.95	0.049 1	0.002 0	0.145 2	0.005 6	0.021 5	0.000 3	152	64	138	5	137	2
ZLB-2-6	303	300	1.01	0.055 3	0.002 5	0.155 7	0.006 6	0.020 4	0.000 3	426	67	147	6	130	2
ZLB-2-7	96	110	0.88	0.052 2	0.002 6	0.150 9	0.007 0	0.021 0	0.000 3	294	76	143	6	134	2
ZLB-2-8	293	373	0.78	0.048 6	0.001 2	0.144 9	0.003 2	0.021 6	0.000 2	129	35	137	3	138	1
ZLB-2-9	242	318	0.76	0.051 7	0.001 4	0.150 5	0.003 7	0.021 1	0.000 2	273	38	142	3	135	1
ZLB-2-10	376	308	1.22	0.049 3	0.001 5	0.146 4	0.004 1	0.021 5	0.000 2	162	45	139	4	137	2
ZLB-2-11	100	113	0.89	0.051 3	0.004 2	0.146 6	0.011 6	0.020 7	0.000 5	255	138	139	10	132	3
ZLB-2-12	653	974	0.67	0.053 2	0.001 1	0.152 9	0.002 9	0.020 8	0.000 2	339	27	145	3	133	1
ZLB-2-13	161	267	0.60	0.051 9	0.001 6	0.256 1	0.007 5	0.035 8	0.000 4	281	46	231	6	227	3
ZLB-2-14	1 766	2 257	0.78	0.066 5	0.001 2	0.186 9	0.002 8	0.020 4	0.000 2	823	18	174	2	130	1
ZLB-2-15	266	356	0.75	0.049 7	0.001 3	0.150 3	0.003 5	0.021 9	0.000 2	181	37	142	3	140	1
ZLB-2-16	503	276	1.82	0.049 4	0.004 7	0.155 4	0.014 0	0.022 8	0.000 7	167	148	147	12	145	4
ZLB-2-17	175	218	0.80	0.050 7	0.001 6	0.146 9	0.004 3	0.021 0	0.000 2	228	47	139	4	134	1
ZLB-2-18	115	132	0.87	0.445 2	0.010 0	2.028 8	0.035 9	0.033 1	0.000 5	320	320	100	18	105	2

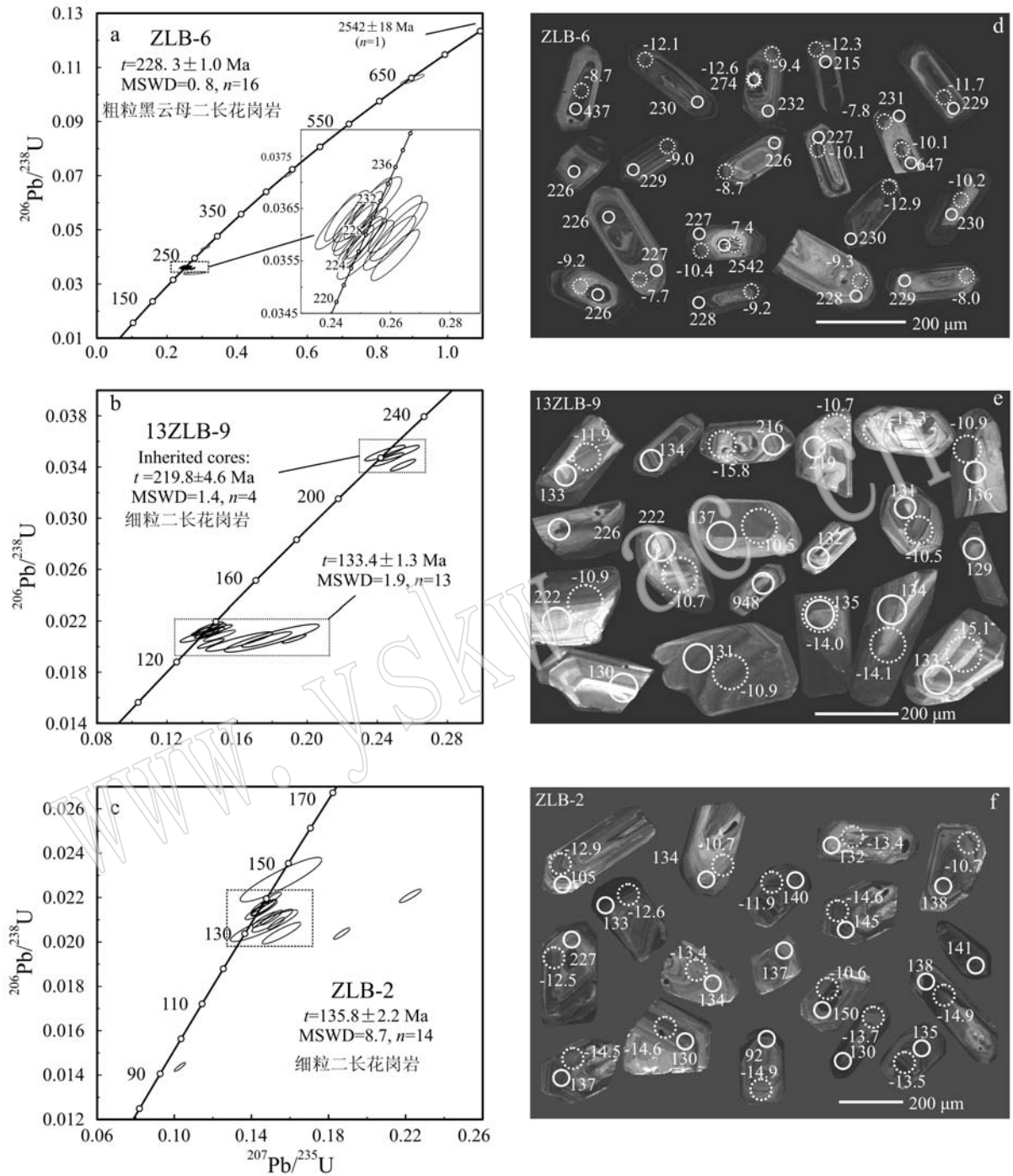


图3 珠兰埠粗粒黑云母二长花岗岩(a)与细粒二长花岗岩(b,c)锆石 U-Pb 年龄谱和图及其 CL 图像
 Fig. 3 U-Pb concordia diagram and CL images of coarse- (a) and fine-grained (b, c) granite of the Zhulanbu composite pluton
 CL 图像上实线圈为 U-Pb 同位素定年点位,虚线圈为 Hf 同位素分析点位
 white circle and dashed circle on CL images denote U-Pb and Hf analysis spots, respectively

样品 ZLB-2 取样位置为北纬 25° 37' 11.34"、东经 115° 43' 54.74", 样品中锆石颗粒一般呈透明-半透明,短柱状和长柱状均有,晶型较好,长度一般 200 ~ 300 μm,长宽比一般 2:1 ~ 3:1。锆石边部可见清晰

的震荡环带(图 3f),指示其为岩浆成因。该样品共分析 18 个测点,除去 4 个谐和性较差的锆石,其余锆石 Th/U 值变化于 0.63 ~ 1.82 之间,平均值为 0.9,表明这些锆石为岩浆锆石,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄

为 135.8 ± 2.2 Ma (MSWD = 8.7, $n = 14$)。两个细粒二长花岗岩锆石定年结果均表明, 晚期细粒二长花岗岩形成于燕山晚期。

3.2 主量元素与微量元素特征

珠兰埠复式岩体的主量、微量元素分析测试结果列于表2。由表2可以看出, 主体粗粒黑云母二长

表2 赣南珠兰埠岩体主量元素($w_B/\%$)与微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) analytical results of the Zhulanbu composite pluton

样品 岩性	粗粒黑云母二长花岗岩				细粒二长花岗岩				
	ZLB-7	13ZLB-4	13ZLB-5	13ZLB-13	ZLB-2	ZLB-4	13ZLB-10	13ZLB-11	13ZLB-9
SiO ₂	74.90	75.40	74.40	76.00	75.00	75.10	75.80	75.40	75.80
TiO ₂	0.21	0.08	0.14	0.04	0.16	0.10	0.07	0.06	0.08
Al ₂ O ₃	12.40	12.85	13.15	12.45	12.85	12.70	12.60	12.75	12.60
Fe ₂ O ₃ ¹	2.26	1.30	2.21	1.44	1.86	1.43	1.63	1.44	1.28
MnO	0.04	0.07	0.09	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.06
MgO	0.23	0.11	0.21	0.06	0.21	0.14	0.08	0.07	0.12
CaO	0.79	0.83	0.59	0.57	0.20	0.84	0.58	0.62	0.75
Na ₂ O	2.62	3.36	3.24	3.68	3.07	3.26	3.75	3.74	3.48
K ₂ O	5.12	4.68	4.94	4.82	5.31	5.20	4.70	4.71	4.66
P ₂ O ₅	0.08	0.01	0.09	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
LOI	0.73	0.61	0.53	0.53	0.69	0.78	0.87	0.73	0.56
Total	99.57	99.39	99.66	99.69	99.53	99.88	100.15	99.60	99.50
A/NK	1.26	1.21	1.23	1.10	1.19	1.16	1.12	1.13	1.17
A/CNK	1.10	1.06	1.12	1.01	1.15	1.01	1.02	1.03	1.04
ALK	7.74	8.04	8.18	8.50	8.38	8.46	8.45	8.45	8.14
K ₂ O/Na ₂ O	1.95	1.39	1.52	1.31	1.73	1.60	1.25	1.26	1.34
FeO _t /MgO	8.84	10.64	9.47	21.60	7.97	9.19	18.34	18.51	9.60
CaO/Na ₂ O	0.30	0.25	0.18	0.15	0.07	0.26	0.15	0.17	0.22
FeO ¹ + MgO + TiO ₂	2.47	1.36	2.34	1.40	2.04	1.53	1.62	1.43	1.35
Li	74.06	173.40	47.16	3.01	7.26	37.53	2.69	6.84	17.91
Be	4.81	5.07	10.96	16.97	4.70	76.69	5.65	5.53	5.82
Sc	3.81	3.96	5.37	2.63	3.10	2.87	2.23	2.16	3.71
Ti	1 236.9	509.24	792.16	240.23	963.78	561.56	399.28	347.99	466.92
V	8.39	4.23	6.17	2.88	9.25	3.24	3.55	1.30	3.30
Cr	85.64	16.73	20.03	14.65	77.87	80.60	16.77	14.02	13.93
Mn	393.03	1 045.12	1 303.77	115.58	284.79	243.48	222.80	433.48	898.84
Co	2.14	0.36	1.16	0.00	2.00	0.88	0.04	0.01	0.18
Ni	1.50	2.35	1.71	1.57	2.14	2.78	1.67	2.14	1.36
Cu	73.40	13.79	2.06	4.27	38.18	15.05	1.19	1.12	4.82
Ga	19.34	15.93	18.98	18.08	13.78	14.51	17.60	18.70	12.87
Rb	386.37	502.90	358.30	351.23	269.26	438.60	407.01	470.21	293.67
Sr	56.49	32.90	30.77	18.37	91.80	51.58	18.49	12.96	29.71
Y	51.41	53.98	50.29	156.56	26.56	37.60	68.97	83.90	48.70
Zr	169.19	80.36	98.68	85.45	153.74	104.06	87.22	93.17	77.53
Nb	18.86	26.60	18.63	41.97	15.34	20.06	47.47	48.72	24.06
Mo	3.16	1.09	2.16	2.98	1.14	1.62	4.68	2.89	1.74
Sn	14.83	16.45	8.54	5.72	20.98	12.29	7.19	6.28	6.74
Cs	21.31	9.31	10.37	2.27	5.55	9.58	2.80	3.78	6.11
Ba	214.27	51.75	146.51	55.16	328.32	102.27	59.47	57.01	32.74
La	49.02	14.12	25.69	18.39	31.63	22.68	16.33	15.98	9.76
Ce	99.30	25.98	54.73	42.90	59.63	48.73	41.36	39.09	19.18
Pr	11.70	3.91	6.98	7.28	6.48	5.24	6.92	6.67	3.27
Nd	42.45	16.20	23.94	25.37	23.74	20.28	22.98	22.02	12.65
Sm	8.89	5.37	5.41	8.96	4.51	4.91	7.41	7.38	4.68

续表 2
Continued Table 2

样品 岩性	粗粒黑云母二长花岗岩				细粒二长花岗岩				
	ZLB-7	13ZLB-4	13ZLB-5	13ZLB-13	ZLB-2	ZLB-4	13ZLB-10	13ZLB-11	13ZLB-9
Eu	0.54	0.33	0.30	0.10	0.65	0.40	0.16	0.15	0.23
Gd	8.53	5.81	5.45	10.37	4.40	4.96	7.50	7.71	5.05
Tb	1.54	1.31	1.16	2.46	0.73	0.96	1.74	1.83	1.16
Dy	9.57	9.06	8.43	17.74	4.42	6.22	12.07	13.03	8.14
Ho	1.88	1.87	1.82	3.78	0.90	1.28	2.45	2.71	1.67
Er	5.63	5.77	5.84	11.91	2.83	4.01	7.55	8.62	5.16
Tm	0.83	0.93	0.97	1.96	0.45	0.65	1.25	1.47	0.85
Yb	5.23	6.22	6.51	13.08	3.01	4.4	8.5	10.17	5.84
Lu	0.76	0.95	0.97	2.00	0.48	0.69	1.28	1.56	0.9
Hf	6.00	4.47	3.99	5.41	5.06	4.27	4.87	5.70	4.6
Ta	2.34	3.36	1.97	5.66	1.70	2.65	7.35	8.37	3.62
W	4.02	5.61	3.63	3.49	1.55	1.33	1.81	1.52	2.99
Pb	43.20	56.02	30.60	23.21	13.11	54.53	29.34	41.37	41.52
Bi	30.15	1.35	0.46	0.09	1.05	0.20	0.19	0.04	0.87
Th	36.73	30.71	23.97	33.87	21.34	26.12	39.09	38.84	26.52
U	10.30	8.55	8.76	13.76	3.40	13.44	11.45	13.11	11.17
Zr + Nb + Ce + Y	338.8	186.9	222.3	326.9	255.3	210.5	245.0	264.9	169.5
ΣREE	245.9	97.8	148.2	166.3	143.9	125.4	137.5	138.4	78.5
Eu/Eu*	0.19	0.18	0.17	0.03	0.45	0.25	0.07	0.06	0.14
$t_{Zr}/^{\circ}C$	778	775	779	772	784	773	774	775	778
M	1.27	1.31	1.26	1.38	1.21	1.38	1.36	1.36	1.34

注: $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$, $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$, $ALK = Na_2O + K_2O$, $M = (2Ca + Na + K) / (Si \cdot Al)$ 。

花岗岩与补体细粒二长花岗岩在主量元素组成上有一定共性: ① 富硅, 主体与补体花岗岩样品的 SiO_2 含量均大于 74%, SiO_2 平均含量分别为 75.18% 和 75.42%; 而两者的 CaO 和 MgO 含量均较低, 主体粗粒黑云母二长花岗岩分别为 0.57% ~ 0.83% 和 0.06% ~ 0.23%, 补体细粒二长花岗岩分别为 0.20% ~ 0.84% 和 0.07% ~ 0.21%; ② 相对富钾, 钾大于钠, 主体粗粒黑云母二长花岗岩 $K_2O/Na_2O = 1.31 \sim 1.95$, 补体细粒二长花岗岩 $K_2O/Na_2O = 1.25 \sim 1.73$; 在 $Na_2O + K_2O - SiO_2$ 图上, 所有数据点都投于花岗岩区域(图 4a); ③ 富铝, 铝饱和指数较高, 主体粗粒黑云母二长花岗岩 A/CNK 值为 1.01 ~ 1.12, 补体花岗岩为 1.01 ~ 1.15(表 2), 在 A/NK - A/CNK 图解上, 数据点都位于过铝质区域内(图 4b), 变化于弱过铝质到强过铝质, 不同于会昌红盆东侧强过铝质富城岩体(于津海等, 2007; 任海涛等, 2013)。④ 低 Ti(主体和补体花岗岩 TiO_2 含量分别为 0.04% ~ 0.21% 和 0.06% ~ 0.16%) 和 P(主体和补体花岗岩 P_2O_5 含量分别为 0.01% ~ 0.09% 和 0.01% ~ 0.04%)。⑤ 较低的锆饱和温度, 在 Zr -

SiO_2 图解上, 珠兰埠岩体主体与补体花岗岩样品均表现出负相关性(图 4c), 表明岩浆锆饱和, 根据主量元素组成及 Zr 含量计算了锆饱和温度(Watson and Harrison, 1983), 结果显示两者岩浆温度均较低, 变化于 772 ~ 784 $^{\circ}C$, 平均值为 776 $^{\circ}C$ (图 4d), 成岩温度相对较低。

珠兰埠岩体主体和补体花岗岩的稀土元素总量均较低, 主体粗粒黑云母二长花岗岩 ΣREE 为 $97.8 \times 10^{-6} \sim 245.9 \times 10^{-6}$, 平均值为 164.6×10^{-6} , 补体细粒二长花岗岩 ΣREE 为 $78.5 \times 10^{-6} \sim 143.9 \times 10^{-6}$, 平均值为 124.7×10^{-6} , 两者都低于全球花岗岩稀土元素的平均含量 250×10^{-6} ; 主体与补体花岗岩均表现出显著的 Eu 亏损, 且亏损程度基本一致, 前者 $\delta Eu = 0.03 \sim 0.19$, 平均值为 0.14, 后者 $\delta Eu = 0.06 \sim 0.45$, 平均值为 0.19。轻稀土元素较重稀土元素轻微富集, 分馏不明显, 在稀土元素配分曲线上呈极弱的右倾型分布(图 5a)。微量元素组成上, 珠兰埠花岗岩以富集大离子元素 Rb、Th、U、K, 明显亏损 Ba、Sr、P、Ti 为特征(图 5b), 与会昌红盆东部的富城岩体相似; 珠兰埠岩体主体粗粒黑云母二长花

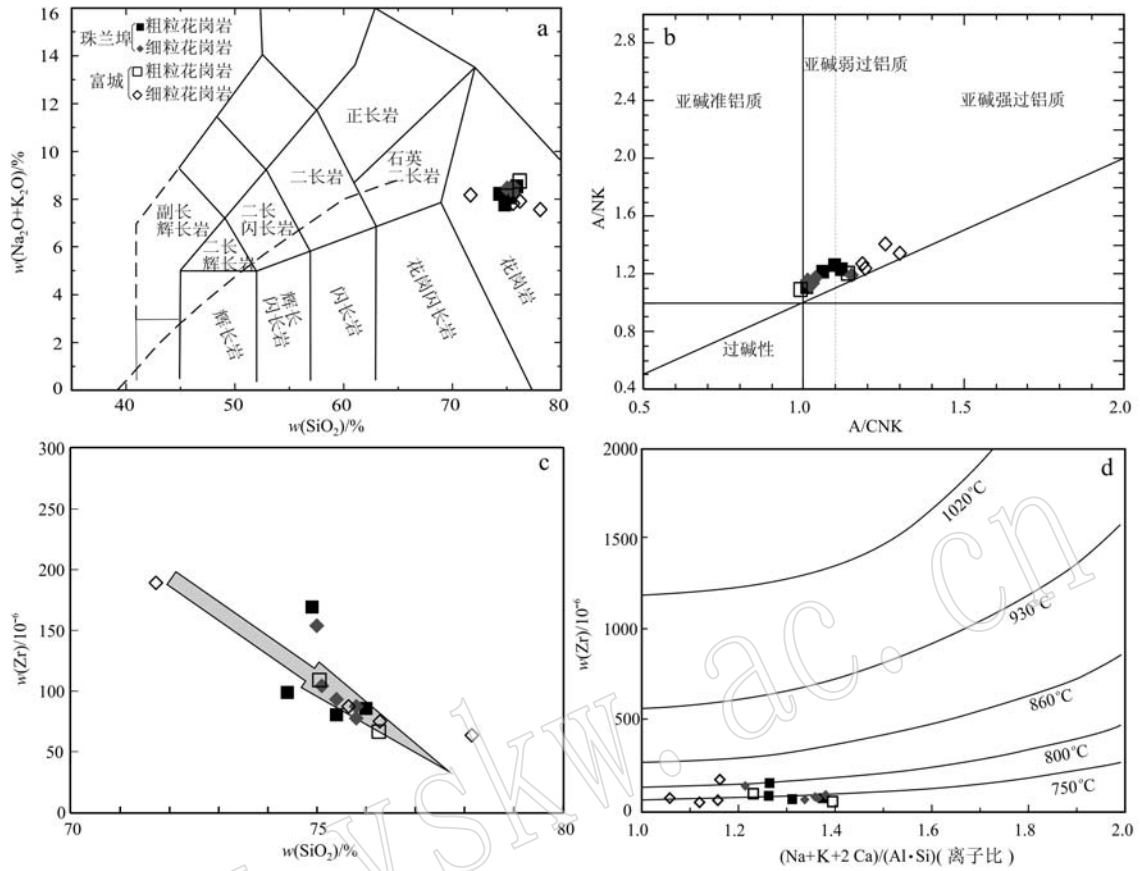


图 4 珠兰埠复式岩体主量元素相关图解

Fig. 4 Major element diagrams of the Zhulanbu composite pluton

a— $(K_2O + Na_2O) - SiO_2$ 图(Middlemost, 1994); b— $A/NK - A/CNK$ 图(Maniar and Piccoli, 1989); c— $Zr - SiO_2$ 图;
 d— $Zr - (Na + K + 2 Ca)/(Al \cdot Si)$ (离子比)图(Watson and Harrison, 1983);富城花岗岩数据引自任海涛等(2013)
 a— $(K_2O + Na_2O) - SiO_2$ diagram (after Middlemost, 1994); b— $A/NK - A/CNK$ diagram (after Maniar and Piccoli, 1989); c— $Zr - SiO_2$ diagram;
 d— $Zr - (Na + K + 2 Ca)/(Al \cdot Si)$ (cation ratio) diagram (after Watson and Harrison, 1983); data of Fucheng granite after Ren Haitao *et al.*, 2013

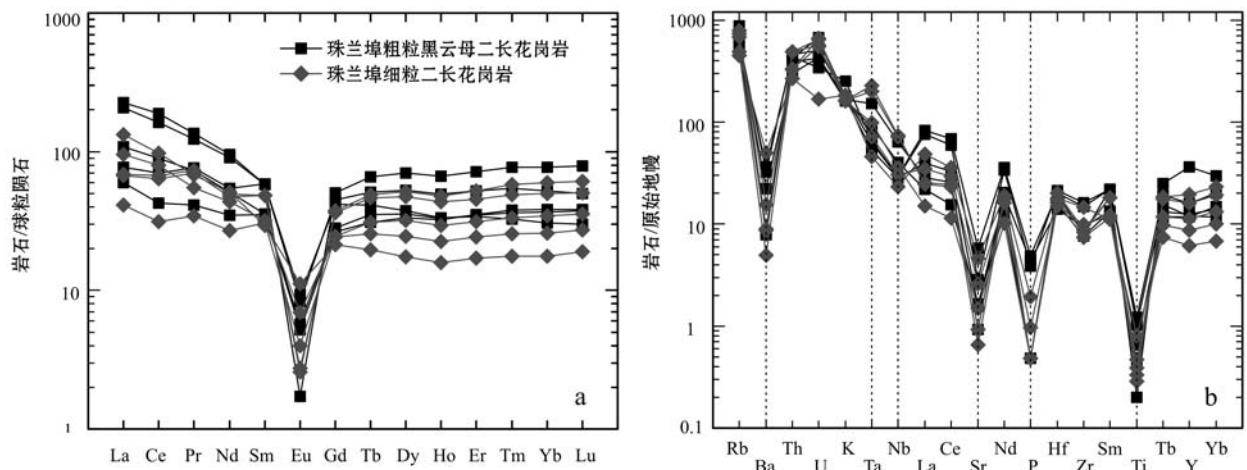


图 5 珠兰埠岩体的稀土元素球粒陨石标准化图(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized incompatible element patterns (b) of the Zhulanbu composite pluton

球粒陨石数据引自 Sun 和 McDonough(1989);原始地幔数据引自 McDonough 和 Sun(1995)
 chondrite after Sun and McDonough(1989); primitive mantle after McDonough and Sun(1995)

岗岩的 U 和 Th 含量分别为 $8.6 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$ 和 $24.0 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$, 补体花岗岩的 U 和 Th 含量分别为 $3.4 \times 10^{-6} \sim 13.4 \times 10^{-6}$ 和 $21.3 \times 10^{-6} \sim 39.1 \times 10^{-6}$, 两者 U 和 Th 的含量基本一致, 均明显高于中国东部上地壳的平均值 ($U = 1.5 \times 10^{-6}$, $Th = 8.95 \times 10^{-6}$) (高山等, 1999)。

3.3 全岩 Sr-Nd 同位素特征

珠兰埠岩体 Sr-Nd 同位素测试结果列于表 3。粗粒黑云母二长花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.715 6

$\sim 0.726 9$, 稍高于细粒二长花岗岩 ($0.710 5 \sim 0.716 4$)。全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围较小, 且两者基本一致, 变化于 $-10 \sim -7$ 之间 (表 3, 图 6a)。主体粗粒黑云母二长花岗岩与补体细粒二长花岗岩的 Nd 同位素两阶段模式年龄 t_{DM}^{C} 差别不大, 分别为 1 818 ~ 1 647 Ma 和 1 663 ~ 1 509 Ma。在 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图 (图 6a) 上, 样品点均投于华南 S 型花岗岩变化范围内, 而在 $\epsilon\text{Nd}(t) - t$ 图 (图 6b) 上, 样品点都分布于南岭前寒武纪地壳演化区域内, 反映珠

表 3 珠兰埠复式岩体 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the Zhulanbu composite pluton

样品编号	岩性	年龄/Ma	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$
ZLB-1		228	116.4	244.9	1.38	0.720 0	6	0.715 6
ZLB-7	粗粒黑云母	228	386.4	56.5	19.79	0.790 3	5	0.726 9
13ZLB-2	二长花岗岩	228	333.5	114.9	8.40	0.749 1	3	0.722 2
13ZLB-4		228						
ZLB-2		133	269.3	91.8	8.49	0.732 8	5	0.716 5
ZLB-4	细粒二长	133	438.6	51.6	24.61	0.758 3	4	0.711 0
13ZLB-9	花岗岩	133	293.7	29.7	28.60	0.765 4	5	0.710 5
13ZLB-10		133						
样品编号	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 σ	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$
ZLB-1	7.39	38.02	0.117 440	0.512 115	11	0.511 942	-7.9	1 647
ZLB-7	8.89	42.45	0.126 534	0.512 058	13	0.511 872	-9.3	1 758
13ZLB-2	8.9	44.49	0.120 868	0.512 024	11	0.511 846	-9.8	1 799
13ZLB-4	5.37	16.2	0.200 283	0.512 129	10	0.511 834	-10.0	1 818
ZLB-2	4.51	23.74	0.114 784	0.512 131	23	0.512 030	-8.5	1 618
ZLB-4	4.91	20.28	0.146 284	0.512 138	12	0.512 009	-8.9	1 651
13ZLB-9	4.68	12.65	0.223 532	0.512 199	16	0.512 002	-9.0	1 663
13ZLB-10	7.41	22.98	0.194 828	0.512 271	8	0.512 099	-7.1	1 509

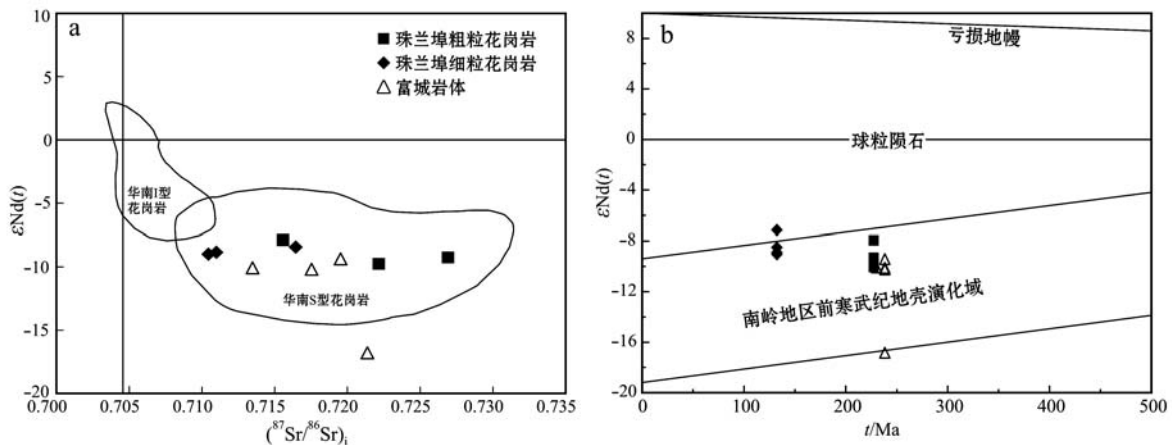


图 6 珠兰埠复式岩体 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 关系图(a)与 $\epsilon\text{Nd}(t) - t$ 关系图(b)

Fig. 6 $\epsilon\text{Nd}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) and $\epsilon\text{Nd}(t) - t$ (b) diagrams for the Zhulanbu composite pluton

华南 I 型和 S 型花岗岩的 Sr-Nd 同位素范围据 Ling 等(2001)及其参考文献; 南岭地区前寒武纪地壳演化域据孙涛等(2003); 富城岩体 Sr-Nd 同位素数据引自于津海等(2007)

Sr-Nd isotopic data of I- and S-type granites of South China after Ling *et al.*, 2001 and references therein; Pre-Cambrian crustal evolution domain after Sun Tao *et al.*, 2003; Sr-Nd isotopic data of the Fucheng composite pluton after Yu Jinhai *et al.*, 2007

兰埠岩体的成岩物质来源于地壳。

Hf 同位素组成变化范围见图 7。分析结果显示, 粗粒黑云母二长花岗岩样品中的 17 个印支期年龄测

3.4 锆石 Hf 同位素特征

珠兰埠岩体的锆石 Lu-Hf 同位素分析结果列于表 4,

点对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 $-12.9 \sim -7.7$ 之间, 平

表 4 珠兰埠复式岩体锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 4 Lu-Hf isotopic analysis results of the Zhulanbu composite pluton

分析点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)\text{error}$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$
ZLB-6 粗粒黑云母二长花岗岩								
ZLB-6-01	647	0.282 103	0.001 740	0.045 293	0.282 082	-10.1	1.7	2 210
ZLB-6-02	231	0.282 411	0.000 610	0.017 716	0.282 408	-7.8	1.0	1 749
ZLB-6-03	229	0.282 407	0.000 523	0.015 119	0.282 405	-8.0	0.9	1 759
ZLB-6-04	228	0.282 371	0.000 860	0.025 784	0.282 367	-9.3	0.8	1 843
ZLB-6-05	230	0.282 271	0.001 666	0.048 576	0.282 264	-12.9	0.9	2 069
ZLB-6-06	230	0.282 343	0.000 793	0.023 040	0.282 340	-10.2	0.8	1 902
ZLB-6-07	229	0.282 305	0.001 122	0.035 542	0.282 300	-11.7	1.2	1 989
ZLB-6-08	226	0.282 390	0.000 864	0.025 018	0.282 387	-8.7	0.9	1 800
ZLB-6-09	2 542	0.281 392	0.000 546	0.015 772	0.281 366	7.4	1.4	2 581
ZLB-6-10	228	0.282 379	0.001 904	0.057 320	0.282 371	-9.2	1.2	1 834
ZLB-6-11	227	0.282 342	0.000 893	0.026 100	0.282 338	-10.4	0.9	1 907
ZLB-6-12	227	0.282 415	0.000 633	0.018 655	0.282 412	-7.7	0.8	1 744
ZLB-6-13	226	0.282 376	0.000 862	0.026 419	0.282 372	-9.2	0.9	1 833
ZLB-6-14	215	0.282 300	0.002 322	0.070 743	0.282 291	-12.3	1.1	2 020
ZLB-6-15	274	0.282 252	0.001 244	0.035 293	0.282 246	-12.6	1.1	2 082
ZLB-6-16	232	0.282 366	0.000 972	0.029 158	0.282 362	-9.4	0.9	1 851
ZLB-6-17	227	0.282 351	0.001 315	0.039 158	0.282 345	-10.1	1.0	1 891
ZLB-6-18	230	0.282 293	0.001 427	0.040 579	0.282 287	-12.1	0.9	2 019
ZLB-6-19	229	0.282 382	0.001 259	0.036 564	0.282 376	-9.0	0.9	1 821
ZLB-6-20	437	0.282 261	0.000 701	0.020 100	0.282 255	-8.7	0.9	1 960
13ZLB-9 细粒二长花岗岩								
13ZLB-9-01	133	0.282 269	0.002 505	0.085 033	0.282 263	-15.1	1.4	2 132
13ZLB-9-02	134	0.282 293	0.001 063	0.028 715	0.282 291	-14.1	1.4	2 069
13ZLB-9-03	135	0.282 296	0.001 153	0.034 038	0.282 293	-14.0	1.4	2 063
13ZLB-9-04	137	0.282 393	0.001 185	0.030 309	0.282 390	-10.5	1.4	1 848
13ZLB-9-05	222	0.282 334	0.000 653	0.017 541	0.282 331	-10.7	1.5	1 925
13ZLB-9-06	131	0.282 385	0.001 054	0.030 133	0.282 383	-10.9	1.4	1 868
13ZLB-9-07	222	0.282 328	0.000 720	0.022 170	0.282 325	-10.9	0.8	1 940
13ZLB-9-08	136	0.282 383	0.001 136	0.034 303	0.282 380	-10.9	1.3	1 871
13ZLB-9-09	131	0.282 397	0.001 670	0.053 941	0.282 393	-10.5	1.6	1 845
13ZLB-9-10	219	0.282 341	0.001 889	0.054 889	0.282 333	-10.7	1.5	1 924
13ZLB-9-11	132	0.282 341	0.009 279	0.276 199	0.282 318	-13.2	1.6	2 011
13ZLB-9-12	216	0.282 194	0.000 870	0.026 108	0.282 191	-15.8	0.9	2 238
13ZLB-9-13	135	0.282 343	0.000 980	0.029 490	0.282 341	-12.3	1.0	1 958
13ZLB-9-14	133	0.282 358	0.001 525	0.041 512	0.282 354	-11.9	0.9	1 930
ZLB-2 细粒二长花岗岩								
ZLB-2-01	138	0.282 385	0.000 696	0.019 008	0.282 384	-10.7	1.4	1 862
ZLB-2-02	150	0.282 384	0.001 617	0.047 123	0.282 380	-10.6	1.4	1 863
ZLB-2-03	137	0.282 310	0.001 369	0.039 948	0.282 306	-13.5	1.1	2 033
ZLB-2-04	130	0.282 282	0.001 268	0.036 450	0.282 279	-14.6	1.2	2 097
ZLB-2-05	134	0.282 312	0.001 137	0.032 822	0.282 309	-13.4	1.1	2 029
ZLB-2-06	138	0.282 270	0.001 544	0.042 267	0.282 266	-14.9	1.2	2 122
ZLB-2-07	135	0.282 308	0.001 102	0.028 986	0.282 305	-13.5	0.9	2 037
ZLB-2-08	137	0.282 283	0.002 200	0.060 151	0.282 278	-14.5	1.0	2 096
ZLB-2-09	132	0.282 313	0.000 834	0.023 464	0.282 311	-13.4	1.1	2 026
ZLB-2-10	133	0.282 337	0.000 885	0.023 563	0.282 334	-12.6	1.0	1 974
ZLB-2-11	227	0.282 284	0.001 792	0.049 090	0.282 277	-12.5	1.0	2 042
ZLB-2-12	130	0.282 309	0.001 285	0.035 093	0.282 305	-13.7	1.0	2 039
ZLB-2-13	140	0.282 351	0.001 007	0.026 633	0.282 349	-11.9	1.0	1 937
ZLB-2-14	145	0.282 272	0.001 061	0.028 595	0.282 269	-14.6	0.9	2 110
ZLB-2-15	134	0.282 388	0.000 685	0.017 497	0.282 386	-10.7	0.9	1 859
ZLB-2-16	105	0.282 345	0.001 371	0.036 679	0.282 343	-12.9	1.4	1 973

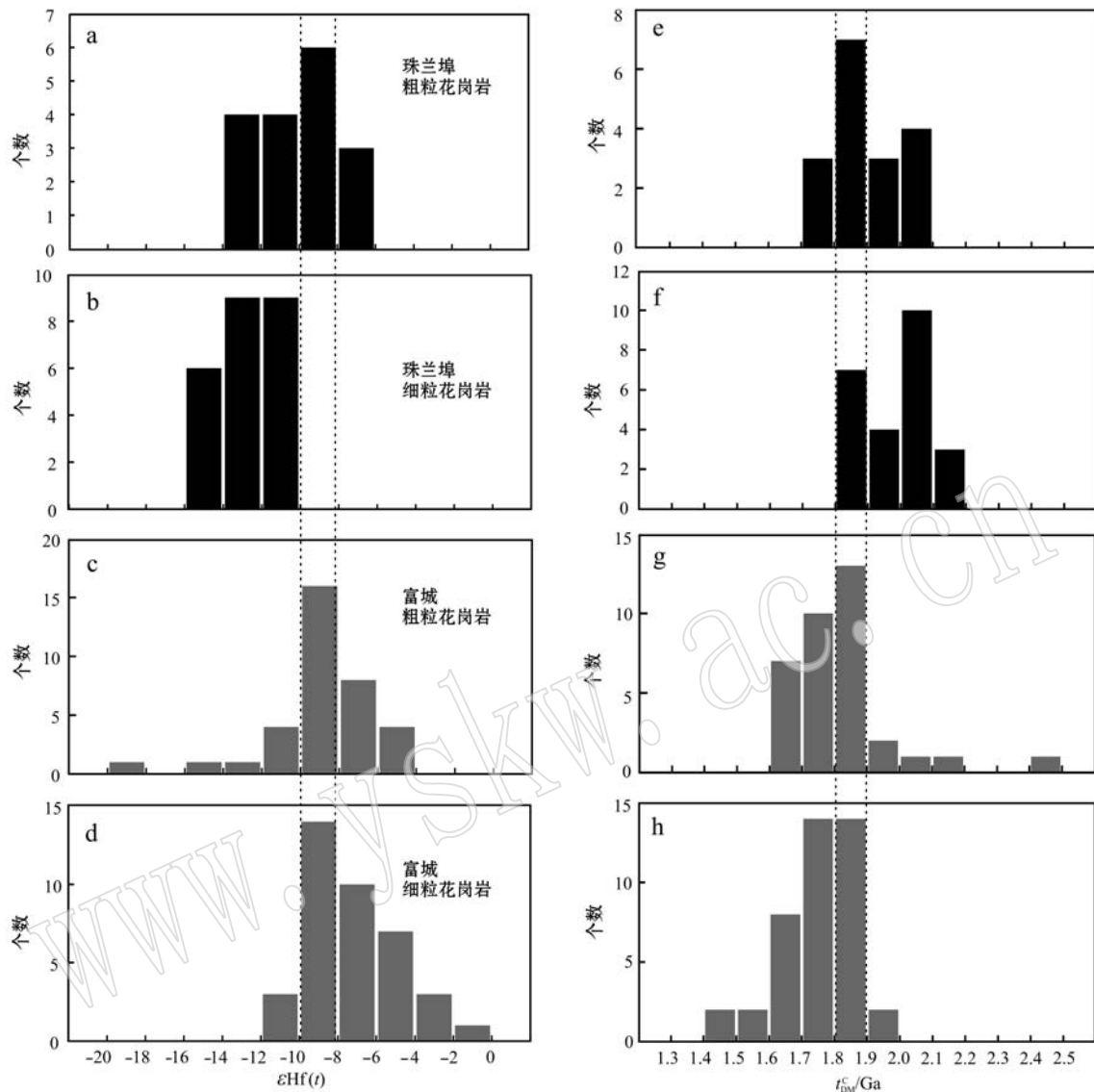


图7 珠兰埠和富城复式岩体的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值和两阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM}^{c}) 统计直方图

Fig. 7 Histogram of zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)$ and t_{DM}^{c} for the Zhulanbu and Fucheng composite pluton

富城岩体锆石 Hf 同位素数据引自任海涛等(2013)

zircon Hf isotopic composition of the Fucheng composite pluton after Ren Haitao *et al.*, 2013

均为 -10.0 , 两阶段 Hf 模式年龄为 $2.0 \sim 1.7$ Ga, 平均值为 1.8 Ga。细粒二长花岗岩共计分析两件样品, 13ZLB-6 和 ZLB-2, 两件样品分别分析了 14 个和 16 个测点, 除去 6 个捕获老锆石测点, 剩余共计 24 个点的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-15.1 \sim -10.5$, 平均值为 -12.7 , 两阶段 Hf 模式年龄为 $2.1 \sim 1.8$ Ga, 平均值为 1.9 Ga。以上数据表明, 珠兰埠岩体的主体与补体花岗岩都是古元古代地壳组分部分熔融的产物。

4 讨论

4.1 珠兰埠岩体的成岩时代与成因类型

前人对赣南会昌红盆西侧的珠兰埠岩体和东侧的富城岩体开展了一系列的研究工作, 其中富城岩体年代学研究较多, 且定年方法较成熟, 取得大量成果(何伟相等, 2007; 于津海等, 2007; 黄凡等, 2012;

任海涛等, 2013), 基本可以确定富城复式岩体的主体与补体花岗岩均形成于印支期。而珠兰埠岩体相关年代学数据报道较少(何伟相等, 2007; 王登红等, 2012), 定年方法多为 Rb-Sr、K-Ar、锆石全溶法等, 结果变化大且质量参差不齐。锆石对 U-Pb 同位素体系的封闭温度较高, 一般认为至少 $650 \sim 800^{\circ}\text{C}$ (吴福元等, 2007), 且经过近些年的发展已趋于成熟, 采用锆石原位定年技术获得的结果相对可靠。本文得到的珠兰埠岩体主体粗粒黑云母二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果为 $228.3 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.8, $n = 16$), 说明其形成于印支晚期。补体细粒二长花岗岩样品 13ZLB-9 的结晶年龄为 $133.4 \pm 1.3 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.9, $n = 13$), 该样品中同时发现印支晚期的捕获锆石, 年龄为 $219.8 \pm 4.6 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.4, $n = 4$); 样品 ZLB-2 的结晶年龄为 $135.8 \pm 2.2 \text{ Ma}$ (MSWD = 8.7, $n = 14$), 与样品 13ZLB-9 定年结果基本一致, 表明珠兰埠细粒二长花岗岩形成于燕山晚期。据此认为珠兰埠岩体主体粗粒黑云母二长花岗岩形成于印支晚期, 与会昌红盆东侧的富城岩体(何伟相等, 2007; 于津海等, 2007;

黄凡等, 2012; 任海涛等, 2013) 形成于同一时期, 而补体细粒二长花岗岩则形成于燕山晚期。

花岗岩的 I-S-A-M 分类体系到目前仍然是使用最广的花岗岩分类方案(Hine *et al.*, 1978; Loiselle and Wones, 1979; Whalen *et al.*, 1987; White *et al.*, 1991; Chappell and White, 1992; Bonin, 2007)。A 型花岗岩往往具有独特的矿物学特征, 如碱性矿物或反映岩浆贫水特征的填隙状黑云母等, 地球化学特征上明显富集 Na_2O 和 K_2O , Ga、Zr、Nb、Ce、Y 等高场强元素含量高, 具有高的稀土元素总量, 然而这些特征与珠兰埠岩体的矿物学和地球化学特征截然不同。珠兰埠岩体的主体和补体花岗岩未见填隙状黑云母(图 2), 其 $\sum \text{REE}$ 含量较低, 平均值分别为 164.6×10^{-6} 和 124.7×10^{-6} , Zr + Nb + Ce + Y 含量平均值分别为 268.7×10^{-6} 和 229.1×10^{-6} (表 2), 明显低于 Whalen 等(1987)划定的 A 型花岗岩最低值 350×10^{-6} , 在 $\text{FeO}^*/\text{MgO} - \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y}$ 图上(Whalen *et al.*, 1987), 数据点主要投于非 A 型花岗岩区域(图 8a), 因此可以排除成因类型为 A 型花岗岩的可能。

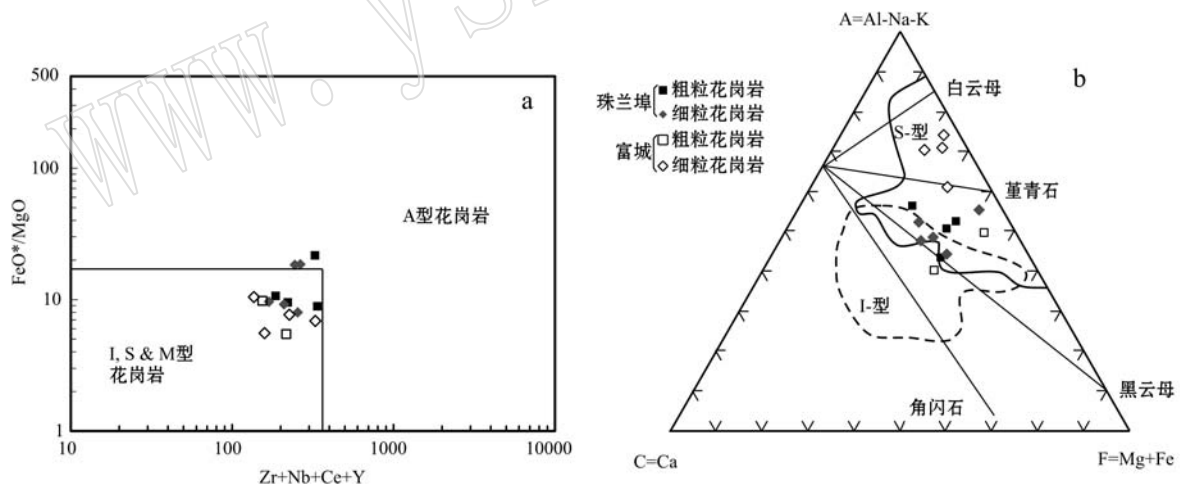


图 8 珠兰埠复式岩体岩石成因类型判别图

Fig. 8 Discrimination diagram of genetic type for the Zhulanbu composite pluton

a—据 Whalen 等(1987); b—据 White 和 Chappell(1977)

a—after Whalen *et al.*, 1987; b—after White and Chappell, 1977

S 型花岗岩主要以富铝为特征, 铝饱和指数一般大于 1.1, 属强过铝质花岗岩。另外富 K, 其 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值较高, Ca 和 Mg 含量较低。而大部分 I 型花岗岩矿物中含有角闪石, 相对富集 Na、Ca, 较低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 ACNK 值 (< 1.1), 多表现为准铝-弱过铝质花岗岩(Clemens, 2003; Clemens and Elburg, 2013)。珠兰埠岩体铝饱和指数全部大于

1.0, 部分大于 1.1, 变化于弱过铝到强过铝之间, 稍低于富城强过铝质花岗岩(图 4b); $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值平均大于 1.4, Ca、Mg 含量较低, 矿物组成上未见角闪石; 微量元素富集 Rb、Th、U 等, 而亏损 Sr、Ba、Eu、P、Ti 等元素(图 5b), 表明岩浆经历了钛铁矿和磷灰石等矿物的分离结晶作用或者部分熔融过程中在源区残留了这些矿物, 以上特征同 S 型花岗岩的典型特

征相近。在 ACF 图解(图 8b)中(White and Chappell, 1977), 样品点亦全部投影在 S 型花岗岩区域内, 此外在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon\text{Nd}(t)$ 判别图(图 6a)上, 珠兰埠岩体与富城岩体的样品点都投于华南典型 S 型花岗岩的变化范围。因此, 珠兰埠复式岩体无论是主体粗粒黑云母二长花岗岩还是补体细粒二长花岗岩, 均属于 S 型花岗岩, 其主要特征与会昌红盆东侧的富城花岗岩体(于津海等, 2007; 任海涛等, 2013)十分相似。

4.2 源区物质组成

稳定大陆地壳的化学风化一般较物理风化强烈, 主要形成贫斜长石的黏土质泥岩, 而活动大陆边缘表现出截然相反的风化作用, 再循环程度弱往往形成成熟度较低的沉积物, 多以富斜长石的砂岩形式出现。根据这一特征, Sylvester(1998)曾提出运用 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值和 $\text{FeO}^I + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 总含量来判断花岗岩的源区物质组成。当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} > 0.3$ 、 $\text{FeO}^I + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 总含量 $> 4\%$, 源区属贫黏土岩石; 如果

$\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} < 0.3$ 、 $\text{FeO}^I + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 总含量 $< 4\%$, 源区则属于富黏土岩石。珠兰埠岩体主体粗粒黑云母二长花岗岩和补体细粒二长花岗岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值分别为 $0.15 \sim 0.30$ 和 $0.07 \sim 0.26$, 全部小于 0.3 , $\text{FeO}^I + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 含量分别为 $1.36\% \sim 2.47\%$ 和 $1.35\% \sim 2.04\%$, 均小于 4% , 说明珠兰埠岩体源区以富黏土质岩石为主。在 $\text{Rb}/\text{Ba} - \text{Rb}/\text{Sr}$ 图解(图 9a)中, 数据点主要投影于富黏土源区内, 而在 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}^I)$ (分子比) - $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^I)$ (分子比)图解(图 9b)中, 珠兰埠岩体样品点分布区域变化于变泥质岩源区到变质杂砂岩源区, 而且主体粗粒黑云母二长花岗岩与补体细粒二长花岗岩变化范围基本一致, 表明两者具有一致的源区物质组成, 可能都是由混合源区(变泥质岩为主和变质杂砂岩为辅)部分熔融而形成。这种源区组成同会昌红盆东侧的富城岩体差异明显(图 9b), 富城岩体是由变泥质岩部分熔融而成(于津海等, 2007; 任海涛等, 2013)。

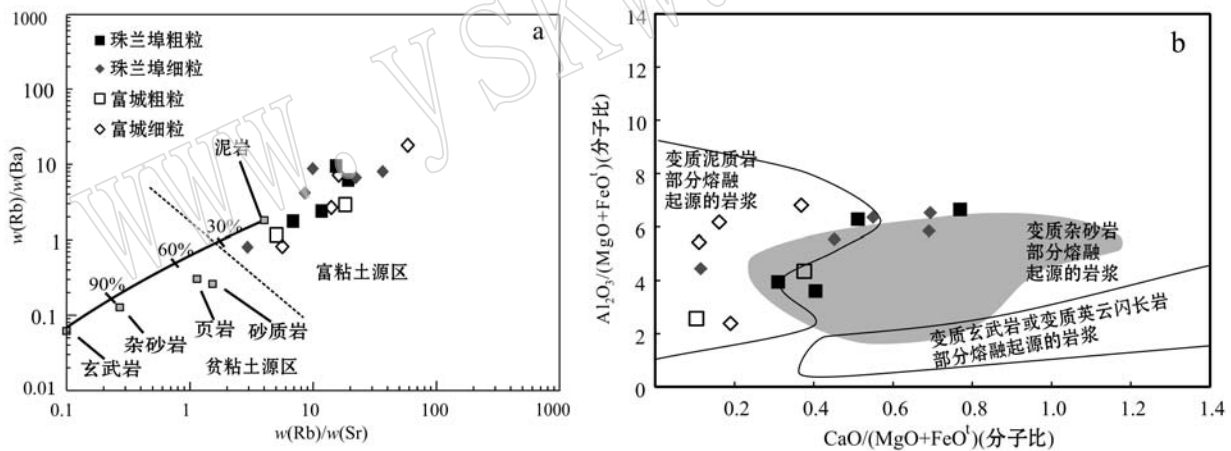


图9 珠兰埠复式岩体源区类型判别图

Fig. 9 Source discrimination diagram for the Zhulanbu composite pluton

底图据 Sylvester, 1998; 富城岩体数据引自任海涛等, 2013

base map after Sylvester, 1998; Fucheng composite pluton after Ren Haitao *et al.*, 2013

珠兰埠岩体为 S 型花岗岩, A/CNK 值大部分大于 1.0, 部分大于 1.1, 为弱过铝到强过铝质花岗岩, 粗粒黑云母二长花岗岩的全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 $0.7156 \sim 0.7269$, 稍高于细粒二长花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值 $0.7105 \sim 0.7164$; 全岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围较小, 且两者基本一致, 变化于 $-10.0 \sim -7.0$ 之间(图 6a), 主体粗粒黑云母二长花岗岩与补体细粒二长花岗岩的 Nd 同位素两阶段模式年龄

t_{DM}^c 差别不大, 分别为 $1818 \sim 1647$ Ma 和 $1663 \sim 1509$ Ma, 珠兰埠岩体全岩 Sr-Nd 同位素组成与富城岩体基本一致, 均源自古元古代地壳物质的部分熔融作用。

对于岩浆起源的同位素示踪研究, 锆石 Hf 同位素示踪是一种较可靠的方法。锆石抗风化能力强且广泛存在于各类中、酸性岩石中, 其原始组成受地质事件的影响较小, 即使经历多次构造-热事件, 仍可

以较好地得到保存。此外, Lu-Hf 同位素体系在锆石中的封闭温度较高(吴福元等, 2007), 即使在各类高级变质条件下, 锆石仍可保持原始 Hf 同位素组成, 使其在示踪岩浆演化方面较全岩分析更具有优势。珠兰埠岩体主体与补体花岗岩的锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值分别为 $-12.9 \sim -7.7$ (平均值 -10.0) 和 $-15.1 \sim -10.5$ (平均值 -12.7), 两阶段 Hf 模式年龄 t_{DM}^{C} 分别为 $2.0 \sim 1.7$ Ga (平均值 1.8 Ga) 和 $2.1 \sim 1.8$ Ga (平均值 1.9 Ga), 在 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值和 t_{DM}^{C} 频数统计直方图上(图7), 印支晚期形成的珠兰埠主体粗粒黑云母二长花岗岩和富城岩体分布情况基本一致, 表明它们具有相同时代的古老地壳源区, 但是燕山晚期形成的珠兰埠补体细粒二长花岗岩具有更低的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值和更老的两阶段模式年龄 t_{DM}^{C} , 暗示其源区物质可能来自更古老的地壳物质。

4.3 构造背景

随着研究工作的深入, 不断有新的岩体被报道, 对于华南中生代花岗岩形成的地球动力学背景也提出了多种模式, 可以概括为太平洋板块斜向俯冲模式(Wang *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2006)、陆壳碰撞加厚模式(王岳军等, 2002, 2005; 邓希光等, 2004)、太平洋板块平板俯冲模式(Li and Li, 2007)等。早中生代时期华南板块经历了强烈的印支构造运动, 华南板块碰撞并拼接于 Sibumasu 板块, 碰撞边界位于今红河以南的金沙江—墨江—松马—一线, 随后华南板块又与华北板块发生碰撞并拼接在一起, 进而形成著名的秦岭—大别造山带。在这一系列的构造运动中, 其中华南板块最早的碰撞缝合时间为 $258 \sim 243$ Ma (Carter *et al.*, 2001), 秦岭—大别碰撞造山带的形成时间约为 $230 \sim 226$ Ma (Zheng *et al.*, 2004; 刘福来等, 2004)。南北两大板块的碰撞挤压使华南板块内部应力增大, 引发一系列的变形作用, 两次碰撞造山事件影响到整个华南地区, 使得华南 D-T₂ 的盖层沉积岩广泛发生褶皱变形(任纪舜, 1990), 并出现大量 NW 向逆冲推覆构造以及厚度达 50 km 左右加厚地壳(孙涛等, 2003; 王岳军等, 2002)。两次碰撞缝合事件在华南板块内部对应印支早期和印支晚期两次主要的造山运动。于津海等(2007)通过对华南印支期岩浆活动时间的统计, 发现存在两个显著的变质—岩浆作用活跃期($249 \sim 225$ Ma 和 $225 \sim 207$ Ma), 它们稍微滞后于两次板块碰撞事件, 是大规模变质—造山运动对印支构造事件的远程反应。

印支期这两次活跃的岩浆作用, 形成于不同的

成岩构造环境: 印支早期($249 \sim 225$ Ma)花岗岩主要是挤压构造背景下由加厚地壳部分熔融而形成, 而印支晚期($225 \sim 207$ Ma)花岗岩则形成于后造山伸展环境(丁兴等, 2005; Zhou *et al.*, 2006; 王丽娟等, 2007)。珠兰埠岩体主体粗粒黑云母二长花岗岩的形成年龄为 228 Ma, 富城复式岩体的成岩时代为 227 Ma(任海涛等, 2013), 两者时代与华南板块和华北板块的碰撞峰期时间($230 \sim 226$ Ma)基本一致, 赣南珠兰埠岩体可能是华南板块与华北板块发生碰撞挤压后应力传递远程效应的产物, 形成于碰撞挤压背景之下。两大板块的碰撞挤压使陆壳加厚, 但是叠置加厚形成的高温不足以使元古宙地壳物质发生脱水熔融(王岳军等, 2002), 且不利于岩浆上涌。珠兰埠岩体在构造上处于 3 组区域大断裂叠加部位(河源—邵武、大余—会昌以及会昌—云霄断裂), 使得该地区出现局部应力消减, 降低了源区物质的熔点, 得以发生减压脱水熔融而形成岩浆。应力消减的部位也是岩浆上升的通道, 最终冷凝固晶形成珠兰埠主体粗粒黑云母二长花岗岩和富城花岗岩。

在 Rb-(Y+Ta) 判别图解(图10)中, 228 Ma 的珠兰埠粗粒黑云母二长花岗岩和富城岩体的样品点主要落入同碰撞花岗岩区域内(1 个数据点落入板内花岗岩区域), 显示两者具有一致的成岩构造背景, 两者均是在挤压构造背景下形成的 S 型花岗岩。而形成于燕山晚期($135 \sim 133$ Ma)的珠兰埠细粒二长花岗岩的数据点则分布在同碰撞到板内花岗岩区域, 其构造背景同印支晚期的珠兰埠主体粗粒黑云母二长花岗岩不同, 可能同板内拉张环境有关。南岭地区从三叠纪开始受到特提斯洋和古太平洋板块的联合作用(任纪舜等, 1990; 舒良树等, 2002), 由 EW 向构造逐渐过渡为 NE 向构造, 到燕山晚期(早白垩世)整个华南已处于完全不同的构造体制下, 基本从古亚洲—特提斯构造域转变为 NE 向古太平洋构造域。南岭地区存在一系列证据, 例如南岭纬向山系中晚燕山期花岗岩体和白垩纪—古近纪红色盆地呈 NE 向雁行排列(舒良树等, 2002; 舒良树等, 2004; Wang and Shu, 2012), 双峰式火山岩和 A 型花岗岩(陈培荣等, 1998)等, 这些证据很好地说明了南岭地区在早白垩世已处于板内拉张构造背景, 而形成于燕山晚期的珠兰埠补体二长花岗岩($135 \sim 133$ Ma)正处于这一拉张背景下。Zhou 和 Li (2000)、Zhou 等(2006)认为古太平洋板块最早于侏

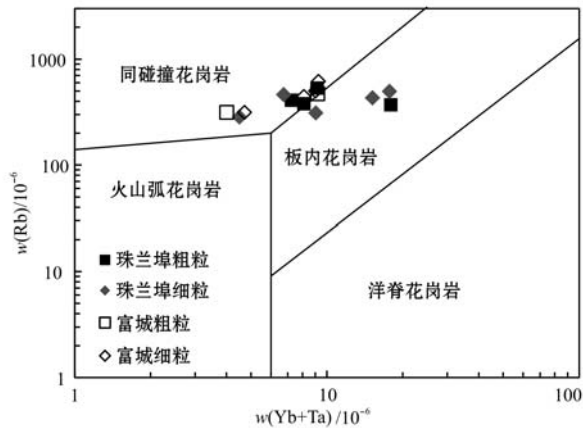


图 10 珠兰埠复式岩体构造环境判定

Fig. 10 Tectonic discrimination diagram for the Zhulanbu composite pluton

富城岩体数据引自任海涛等(2013)

Fucheng composite pluton after Ren Haitao *et al.*, 2013

罗纪开始对欧亚大陆板块进行低角度俯冲及消减作用,并提出用地幔楔熔融、玄武岩底侵和地壳物质部分熔融相结合的模式来解释华南燕山期拉张构造背景下的花岗质岩浆活动。地壳拉张在南岭地区形成了一系列深大断裂,呈北东向展布的会昌红盆即是在深大断裂基础上发育而成,珠兰埠补体细粒二长花岗岩即位于该红盆的西侧。深大断裂一方面造成地壳减压诱发地壳物质部分熔融,另一方面又是岩浆上升的通道,导致比印支期岩浆源区更古老的变泥质岩源区(可能混合少量变质杂砂岩)发生减压脱水部分熔融,形成珠兰埠燕山晚期补体细粒二长花岗岩。

5 结论

通过岩相学、年代学、元素地球化学以及 Sr-Nd-Hf 同位素的分析和研究,探讨了珠兰埠复式岩体的成因及成岩构造环境,并与富城复式岩体进行对比研究,获得如下几点认识:

(1) 珠兰埠复式岩体的主体黑云母二长花岗岩形成于 228 Ma,与富城岩体的主体和补体花岗岩相近,均形成于印支期;但珠兰埠补体细粒二长花岗岩则明显不同,其定年结果为 135 ~ 133 Ma,形成于燕山晚期。

(2) 珠兰埠复式岩体富硅、铝、钾,亏损 Sr、Ba、Eu 等元素,低锆石饱和温度以及低的 Ga/Al 值和 Zr

+ Nb + Ce + Y 含量,表明其为 S 型花岗岩,同富城 S 型花岗岩相近。元素和同位素地球化学特征表明,珠兰埠主体与补体花岗岩可能均为古元古代的混合源区(变泥质岩为主和变质杂砂岩为辅)部分熔融而形成。

(3) 印支晚期形成的珠兰埠粗粒黑云母二长花岗岩和富城复式岩体具有一致的成岩构造背景,两者均是在挤压构造背景下形成的 S 型花岗岩,属于古亚洲-特提斯构造域;而形成于燕山晚期的细粒二长花岗岩其构造背景不同于印支期花岗岩,形成于板内拉张环境,属于古太平洋构造域。

致谢 南京大学地球科学与工程学院朱志勇博士在锆石 Hf 同位素分析过程中给予指导,野外工作得到冯尚杰博士的帮助,微量元素分析得到兰鸿锋的热心帮助,在此一并表示感谢。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Black L P and Gulson B L 1978. The age of the mud tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory, Bureau of Mineral Resources, Australia[J]. *Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3: 227~232.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1~2): 1~29.
- Bouvier A, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1~2): 48~57.
- Carter A, Roques D, Bristow C, *et al.* 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam[J]. *Geology*, 29(3): 211.
- Chappell B W and White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83(1~2): 1~26.
- Chen Diyun, Zhang Bangtong, Sun Dazhong, *et al.* 1997. Geochemistry and relation to uranium mineralization of Gaoxi and Fucheng granites

- in Wuyi Mountains, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 72 ~ 85 (in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Zhang Bangtong, Kong Xinggong, *et al.* 1998. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaibei A-type granitic intrusive in South Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 22 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- Clemens J D and Elburg M A. 2013. Comment—Origin of enclaves in S-type granites of the Lachlan Fold Belt[J]. *Lithos*, 175 ~ 176: 351 ~ 352.
- Clemens J D. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence[J]. *Earth-Science Reviews*, 61(1 ~ 2): 1 ~ 18.
- Deng Xiguang, Chen Zhigang, Li Xianhua, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Darongshan-Shiwandashan granitoid belt in southeastern Guangxi, China[J]. *Geological Review*, 50(4): 426 ~ 432 (in Chinese with English abstract).
- Ding Xing, Chen Peirong, Chen Weifeng, *et al.* 2005. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating of the Weishan granite, Hunan Province: Petrogenesis and implications[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 35(7): 606 ~ 616 (in Chinese).
- Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingyuan, *et al.* 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39(6): 844 ~ 850 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, *et al.* 1999. Structure and composition of the East China crust[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 29(3): 204 ~ 213 (in Chinese).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 ~ 147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3 ~ 4): 237 ~ 269.
- Hine R, Williams I S, Chappell B W, *et al.* 1978. Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko Batholith[J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 25: 3 ~ 4, 219 ~ 234.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation MC-ICP-MS technique for Hf isotopic microanalysis of zircon and its geological application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595 ~ 2 604 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fan, Hou Kejun, Chen Zhenghui, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age, tectonic setting and ore potentiality of the Dafuzu (or Fucheng) uranium-bearing rock mass in the southeastern Jiangxi Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(2): 518 ~ 524 (in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, *et al.* 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1 ~ 2): 47 ~ 69.
- Li Z X and Li X. H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179 ~ 182.
- Ling H, Shen W, Wang R, *et al.* 2001. Geochemical characteristics and genesis of Neoproterozoic granitoids in the northwestern margin of the Yangtze Block[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9 ~ 10): 805 ~ 819.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.* 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific drilling Project and its adjacent area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9 ~ 26 (in Chinese with English abstract).
- Loiselle M C and Wones D R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Abstracts with Programs-Geological Society of America*, 11(7): 468.
- Ludwig K R. 2003. *Isoplot 3.0: A geochronology toolkit for Microsoft Excel*[J]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, Berkeley.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological society of America bulletin*, 101(5): 635 ~ 643.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3 ~ 4): 223 ~ 253.
- Mei Yongwen. 1997. A study on the nappe (sliding nappe) structural system in the Southern Jiangxi Province[J]. *Jiangxi Geology*, 11(3): 52 ~ 60 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3 ~ 4): 215 ~ 224.
- Pu Wei, Gao Jianfeng, Zhao Kuidong, *et al.* 2005. Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd using DCTA and HIBA[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 41(4): 445 ~ 450 (in Chinese with English abstract).
- Pu Wei, Zhao Kuidong, Ling Hongfei, *et al.* 2004. High Precision Nd Isotope Measurement by Triton TI Mass Spectrometry[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2): 271 ~ 274 (in Chinese with English abstract).

- Ren Haitao, Wu Junqi, Ye Xifang, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of peraluminous fine-grained granite in western part of the Fucheng pluton, Jiangxi Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 19(2): 327 ~ 345(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Chen Tingyu and Niu Baogui. 1990. *Tectonic Evolution and Metallogeny of East China and Adjacent Area*[M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 205(in Chinese).
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic Tectonism of Southeast China[J]. *Geological Review*, 48(3): 249 ~ 260(in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhou Xinmin, Deng Ping, *et al.* 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic Basins in Southeastern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 876 ~ 884(in Chinese with English abstract).
- Soderlund U, Patchett J P, Vervoort J D, *et al.* 2004. The Lu-176 decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3 ~ 4): 311 ~ 324.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313 ~ 345.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, *et al.* 2003. Petrogenesis and tectonic implications of strongly peraluminous granites in the eastern Nanling Range[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 33(12): 1 209 ~ 1 218(in Chinese).
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45: 29 ~ 44.
- Van Acherbergh E, Ryan C G, Jackson S E, *et al.* 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS[A]. Sylvester P J. *Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry in the Earth Sciences: Principles and Applications* [C]. Mineralog. Assoc. Canada (MAC) Short Course Series, Ottawa, Ontario, Canada, 29 (2001): 239 ~ 243.
- Wang Denghong, Qin Yan, Chen Zhenyu, *et al.* 2012. U-Pb isotopic age and a further understanding of the ore-forming mechanism in granite from the southern Jiangxi Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(4): 699 ~ 704(in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi and Shu Liangshu. 2012. Late Mesozoic basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China[J]. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 109 ~ 124.
- Wang Lijuan, Yu Jinhai, Xu Xisheng, *et al.* 2007. Formation age and origin of the Gutian-Xiaotao granitic complex in the Southwestern Fujian Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 470 ~ 1 484(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Li Jianwei, Jian Ping, *et al.* 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(3 ~ 4): 339 ~ 354.
- Wang Xiang, Chen Jie and Luo Dan. 2008. Study on petrogenesis of zircons from the Danzhu granodiorite and its geological implications [J]. *Geological Review*, 54(3): 387 ~ 398(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Fan Yuming, Liang Xinquan, *et al.* 2005. Zircon SHRIM U-Pb dating and petrogenesis of Indosinian granite in Hunan Province [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1 259 ~ 1 266(in Chinese with English abstract).
- Wang Yuejun, Zhang Y H, Fan Yuming, *et al.* 2002. Petrogenesis of Indosinian peraluminous granite: modeling of magmatic underplating and heating influence related to crust thickening[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 32(6): 491 ~ 499(in Chinese).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited-temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 ~ 304.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407 ~ 419.
- White A J R and Chappell B W. 1977. Ultrametamorphism and granitoid genesis[J]. *Tectonophysics*, 43(1 ~ 2): 7 ~ 22.
- White A J R, Chappell B W and Wyborn D. 1991. *Enclaves of S-type Granites in the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia*[M]. *Enclaves and Granite Petrology*, Didier J, Barbarin B, Amsterdam: Elsevier.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and its application in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 ~ 220(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Mineralogical studies on zircon genesis and its constrain on interpretation of U-Pb dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, (16): 1 589 ~ 1 604(in Chinese with English abstract).
- Yu Jinhai, Wang Lijuan, Wang Xiaolei, *et al.* 2007. Geochemistry and geochronology of the Fucheng complex in the Southeastern Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 1 441 ~ 1 456(in Chinese with English abstract).
- Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2010. Petrological discrimination between primary and secondary muscovites and its geolog-

ical implications: A case study of Fucheng peraluminous granite pluton in southern Jiangxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29 (3): 225 ~ 234 (in Chinese with English abstract).

Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Honfei, *et al.* 2011a. New cognition for uranium geochemical characteristics of granite: Taking the Fucheng uranium-bearing granite pluton in southern Jiangxi as an example [J]. *Resources Survey & Environment*, 32(3): 157 ~ 168 (in Chinese with English abstract).

Zhang Bangtong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2011b. Detection of micro and super-micro-grained uraninite in Fucheng granite pluton, southern Jiangxi Province, China and its genetic implication [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(2): 166 ~ 172 (in Chinese with English abstract).

Zhang Wanliang. 2005. Ore-forming geological features and prospecting target types of Hecaokeng ore field in Southern Jiangxi Province [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 20(3): 192 ~ 194 (in Chinese with English abstract).

Zhang Wanliang. 2006. Petrogeochemistry and tectonic environment of Dafuzu rock mass in southern Jiangxi Province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(1): 98 ~ 107 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yuntao, Zhang Xiaoping, Pei Rongfu, *et al.* 2012. Uranium metallogenic condition and ore-search prospect of western Dafuzu massif in southern Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 32(2): 369 ~ 379 (in Chinese with English abstract).

Zhao Youdong, Wu Junqi, Ling Hongfei, *et al.* 2016. Mineral chemistry of biotite and chlorite in western part of Fucheng granite, southern Jiangxi Province: Implications for uranium mineralization [J]. *Mineral Deposits*, 35(1): 153 ~ 168 (in Chinese with English abstract).

Zheng Yongfei, Wu Yuanbao, Chen Fukun, *et al.* 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale 180 event in igneous rocks during the Neoproterozoic [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(20): 4 145 ~ 4 165.

Zhou Xinmin, Chen Peirong, Xu Xisheng, *et al.* 2007. Petrogenesis of the Late Mesozoic Granites in Nanling Range and Geodynamic Evolution of Lithosphere [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).

Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 326(3): 269 ~ 287.

Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 29(1): 26 ~ 33.

附中文参考文献

陈迪云, 章邦桐, 孙大中, 等. 1997. 武夷山高溪和富城花岗岩体地球化学及其与铀成矿的关系 [J]. *岩石学报*, 13(1): 72 ~ 85.

陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 等. 1998. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义 [J]. *岩石学报*, 14(3): 22 ~ 31.

邓希光, 陈志刚, 李献华, 等. 2004. 桂东南地区大容山 - 十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年 [J]. *地质论评*, 50(4): 426 ~ 432.

丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 等. 2005. 湖南沩山花岗岩中锆石 LA-ICPMSU-Pb 定年: 成岩启示和意义 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 35(7): 606 ~ 616.

高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 等. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 39(6): 844 ~ 850.

高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部地壳的结构和组成 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 29(3): 204 ~ 213.

何伟相, 黄文虹. 2007. 富城岩体、珠兰埠岩体的对比和侵位年代的讨论 [A]. 2007 年华东六省一市地学科技论坛论文集 [C]. 中国安徽合肥.

侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. *岩石学报*, 23(10): 2 595 ~ 2 604.

黄凡, 侯可军, 陈郑辉, 等. 2012. 赣东南大富足成铀岩体锆石 U-Pb 定年和构造背景与含矿性 [J]. *岩矿测试*, 31(2): 518 ~ 524.

刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别 [J]. *岩石学报*, 20(1): 9 ~ 26.

梅勇文. 1997. 江西南部推(滑)覆构造系统研究 [J]. *江西地质*, 11(3): 52 ~ 60.

濮巍, 高剑峰, 赵葵东, 等. 2005. 利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr、Sm-Nd 的方法 [J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 41(4): 445 ~ 450.

濮巍, 赵葵东, 凌洪飞, 等. 2004. 新一代高精度高灵敏度的表面热电离质谱仪 (Triton TI) 的 Nd 同位素测定 [J]. *地球学报*, 25(2): 271 ~ 274.

任海涛, 吴俊奇, 叶锡芳, 等. 2013. 江西富城岩体西部过铝质细粒花岗岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征 [J]. *高校地质学报*, 19(2): 327 ~ 345.

任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿 [M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 205.

舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用 [J]. *地质论*

- 评, 48(3): 249 ~ 260.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 23(9): 876 ~ 884.
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(12): 1 209 ~ 1 218.
- 汪相, 陈洁, 罗丹. 2008. 浙西南淡竹花岗闪长岩中锆石的成因研究及其地质意义[J]. 地质论评, 54(3): 387 ~ 398.
- 王登红, 秦燕, 陈振宇, 等. 2012. 赣南部分岩体的锆石铀-铅同位素年代学研究及其对成岩成矿机制的再认识[J]. 岩矿测试, 31(04): 699 ~ 704.
- 王丽娟, 于津海, 徐夕生, 等. 2007. 闽西南古田-小陶花岗岩杂岩体的形成时代和成因[J]. 岩石学报, 23(6): 1 470 ~ 1 484.
- 王岳军, Zhang Y H, 范蔚茗, 等. 2002. 湖南印支期过铝质花岗岩的形成: 岩浆底侵与地壳加厚热效应的数值模拟[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 32(6): 491 ~ 499.
- 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示[J]. 科学通报, 50(12): 1 259 ~ 1 266.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185 ~ 220.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, (16): 1 589 ~ 1 604.
- 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 等. 2007. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究[J]. 岩石学报, 23(3): 1 441 ~ 1 456.
- 张万良. 2005. 赣南河草坑铀矿田成矿地质特征及找矿目标类型[J]. 地质找矿论丛, 20(3): 192 ~ 194.
- 张万良. 2006. 赣南大富足岩体岩石地球化学特征及其构造环境判别[J]. 大地构造与成矿学, 30(1): 98 ~ 107.
- 张运涛, 张小平, 裴荣富, 等. 2012. 赣南大富足花岗岩体西部铀成矿条件及找矿前景[J]. 矿床地质, 32(2): 369 ~ 379.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2010. 花岗岩中原生与次生白云母的鉴别特征及其地质意义——以赣南富城强过铝质花岗岩体为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(3): 225 ~ 234.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2011a. 花岗岩铀地球化学特征新认识——以赣南富城产铀花岗岩体为例[J]. 资源调查与环境, 32(3): 157 ~ 168.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2011b. 赣南富城花岗岩中显微-超显微晶质铀矿的厘定及成因[J]. 矿物学报, 31(2): 166 ~ 172.
- 赵友东, 吴俊琦, 凌洪飞, 等. 2016. 赣南富城岩体黑云母及其蚀变产物绿泥石的矿物化学研究——对铀成矿的指示意义[J]. 矿床地质, 35(1): 153 ~ 168.
- 周新民, 陈培荣, 徐夕生, 等. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社.