

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.178>



湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征

程顺波^{1,2}, 付建明^{1,2}, 崔森^{1,2*}, 卢友月^{1,2}, 马丽艳^{1,2}, 刘阿睢^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿研究中心, 湖北武汉 430205

摘要: 湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩时空分布和岩石成因目前还不明确。以该时期花岗岩为研究对象, 进行了岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素组成研究。研究结果显示, 印支期花岗岩主要分布在湘桂边界以北区域, 形成时代 236~222 Ma。岩性以含电气石的二长花岗岩为主, 副矿物组合为锆石、(斜)黝帘石、磷灰石、石榴石, 并具有高硅、富碱, 贫钙、镁和磷, 弱一强过铝质的地球化学特征。早阶段花岗岩源岩主要为变质杂砂岩, 可能混入了少许新生地壳组分; 晚阶段花岗岩源岩由不同比例的变质泥质岩石和变质杂砂岩组成。花岗岩具有负且稳定的锆石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-9.3 \sim -10.6$) 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-5.4 \sim -11.9$), 反映源区平均地壳存留年龄为 1.8 Ga 左右。花岗质岩浆的形成受控于华南印支期后造山加厚地壳背景下变沉积岩中云母类矿物的脱水熔融过程, 其运移和就位与岩基旁侧深大断裂的松弛调整密切相关。

关键词: 锆石 U-Pb 年代学; 地球化学; Nd-Hf 同位素; 印支期; 湘桂边界。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)07-2330-20

收稿日期: 2018-03-15

Zircon U-Pb Chronology, Geochemistry of the Indonesian Granitic Rocks from Northern Yuechengling Batholith in Guangxi-Hunan Junction

Cheng Shunbo^{1,2}, Fu Jianming^{1,2}, Cui Sen^{1,2*}, Lu Youyue^{1,2}, Ma Liyan^{1,2}, Liu A'sui^{1,2}

1. Wuhan Center of Chinese Geological Survey, Wuhan 430205, China

2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, Chinese Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: The temporal and spatial distribution of Indonesian granitoid in northern Yuechengling batholith is still uncertain. In this paper, a compilation of petrology, zircon U-Pb chronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes was used on the granitoid to solve this uncertainty. The result shows Indonesian granitoid spreads in north area of the border with the age of 236–222 Ma, and mainly consists of medium to fine grained tourmaline-bearing monzogranites, with accessory minerals assemblage of zircon, zoisite (and/or clinzozoisite), apatite and garnet. The granitic samples have characteristics of high SiO_2 , alkaline, low CaO , MgO , P_2O_5 contents, and weak to strong peraluminous ($A/\text{CNK} = 1.07 \sim 1.17$), with enrichment of Rb, Th, U and strong depletion of Ba, Sr, Eu, Nb, Ti elements. Source of early stage of Indonesian granitic rocks mainly consisting of metagreywackes, with small amount of new crustal component. Those of late stage are inhomogeneous mixing of metagreywackes and metapelites. Granitic rocks of both stage have stable high negative $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-9.3 \sim -10.6$) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-5.4 \sim -11.9$) ratios with source's average crustal residence age of ca 1.8 Ga. Integrated with Indonesian tectonic involvement of South China, formation of granitic magma is perhaps due to dehydration melting of mica-riched metasediments during post-orogenic thickened

基金项目: 中地质调查局项目(Nos. 121201009000150002, 121201009000150012)。

作者简介: 程顺波(1983—), 男, 助理研究员, 从事华南地质过程与成矿作用研究. ORCID: 0000-0002-1854-5952. E-mail: chsb2007@qq.com

* 通讯作者: 崔森, E-mail: 30831317@qq.com

引用格式: 程顺波, 付建明, 崔森, 等, 2018. 湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征. 地球科学, 43(7): 2330–2349.

crust environment, migration and emplacement of the magma is controlled by relaxation of deep fault adjacent to the batholith.

Key words: zircon U-Pb chronology; geochemistry; Nd-Hf isotope; Indosinian; Guangxi-Hunan junction.

印支运动最早在越南被识别出来(Fromaget, 1932), Carter et al.(2001)认为与印支地块和华南地块的碰撞有关。它不仅使华南地块隆升成陆(郭福祥, 1998),还将华南地块北推与华北地块碰撞对接形成秦岭造山带(Meng and Zhang, 2000; Carter et al., 2001)。受此影响, 华南泥盆纪—早三叠世地层以及部分下古生界卷入其中, 发育近东西向宽缓褶皱(张岳桥等, 2009)和近北东向大型左旋压扭性构造(Wang et al., 2005, 2007a), 并伴有大规模过铝质岩浆侵入活动(江西省地质矿产局, 1984; 广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 湖南省地质矿产局, 1988; 王岳军等, 2002; 周新民, 2003; 孙涛, 2003; Zhou et al., 2006; Wang et al., 2007b, 2013)。随着华南地区印支期花岗岩研究工作的逐步深入, 各地学者对华南内陆印支期花岗岩形成机制提出过多种假说, 包括: 碰撞造山模式(Hsü et al., 1990; 李继亮, 1993); 岩石圈伸展减薄和基性岩浆底侵模式(郭锋等, 1998); 陆壳加厚模式(王岳军等, 2002; 孙涛, 2003; Wang et al., 2007b); 板块水平俯冲模式(Li and Li, 2007)等。

越城岭—苗儿山岩基是湘桂内陆典型的以加里东期和印支期花岗岩为主体的多旋回复式岩基, 出露面积超过3 000 km²。受加里东期成钨事件的影

响, 区内加里东期花岗岩, 包括成岩期次、地球化学特征、岩石成因、成岩构造环境、成矿专属性等方面, 得到了科研院所的广泛关注(杨振, 2012; Zhao et al., 2013; 柏道远等, 2014, 2015; 程顺波等, 2016; 陈文迪等, 2016; 杜云等, 2017)。相比之下, 印支期花岗岩一直是区内花岗岩研究的一个薄弱环节, 目前仅见部分成钨小岩体的年龄(程顺波等, 2013; 张迪等, 2015; 陈文迪等, 2016)和产铀岩株的地球化学和岩石成因报道(谢晓华等, 2008)。鉴于上述花岗岩体均为成岩作用晚期产物, 内部各种蚀变发育, 无法准确代表区内印支期花岗岩的总体特征。为此, 本文选取越城岭岩基北部的印支期花岗岩体为研究对象, 采集不同花岗岩性样品进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学、地球化学和Nd-Hf同位素组成研究, 以便深入理解该地区印支期花岗岩的岩石成因及成岩构造环境。

1 区域和岩体地质

越城岭—苗儿山岩基位于湘桂边界地区, 大地构造上位于扬子地块与华夏地块的结合部位, 向西距安化—罗城深大断裂约150 km(图1)。从新元古

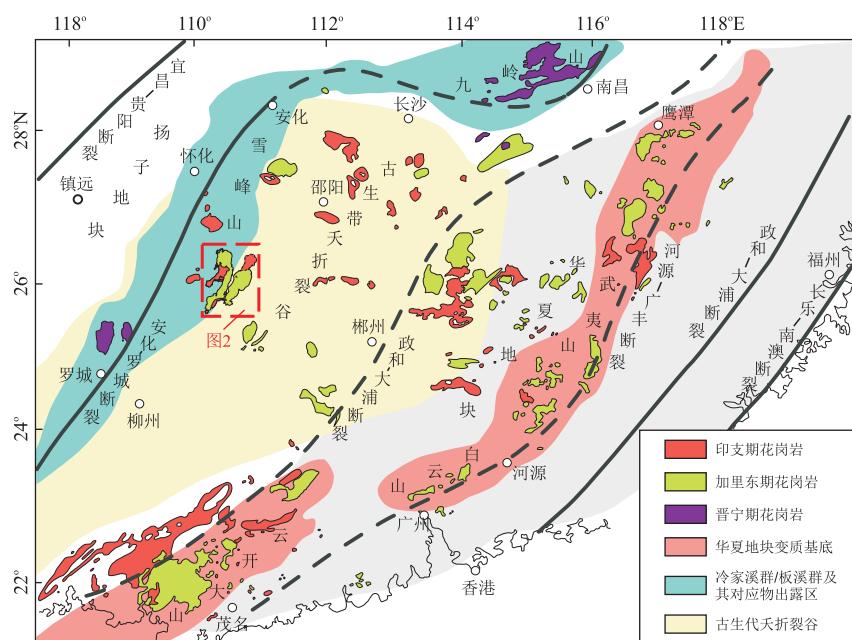


图1 越城岭—苗儿山岩基大地构造位置

Fig.1 Tectonic location of Yuechengling-Miaoershan batholiths

底图据 Wang et al.(2007b)

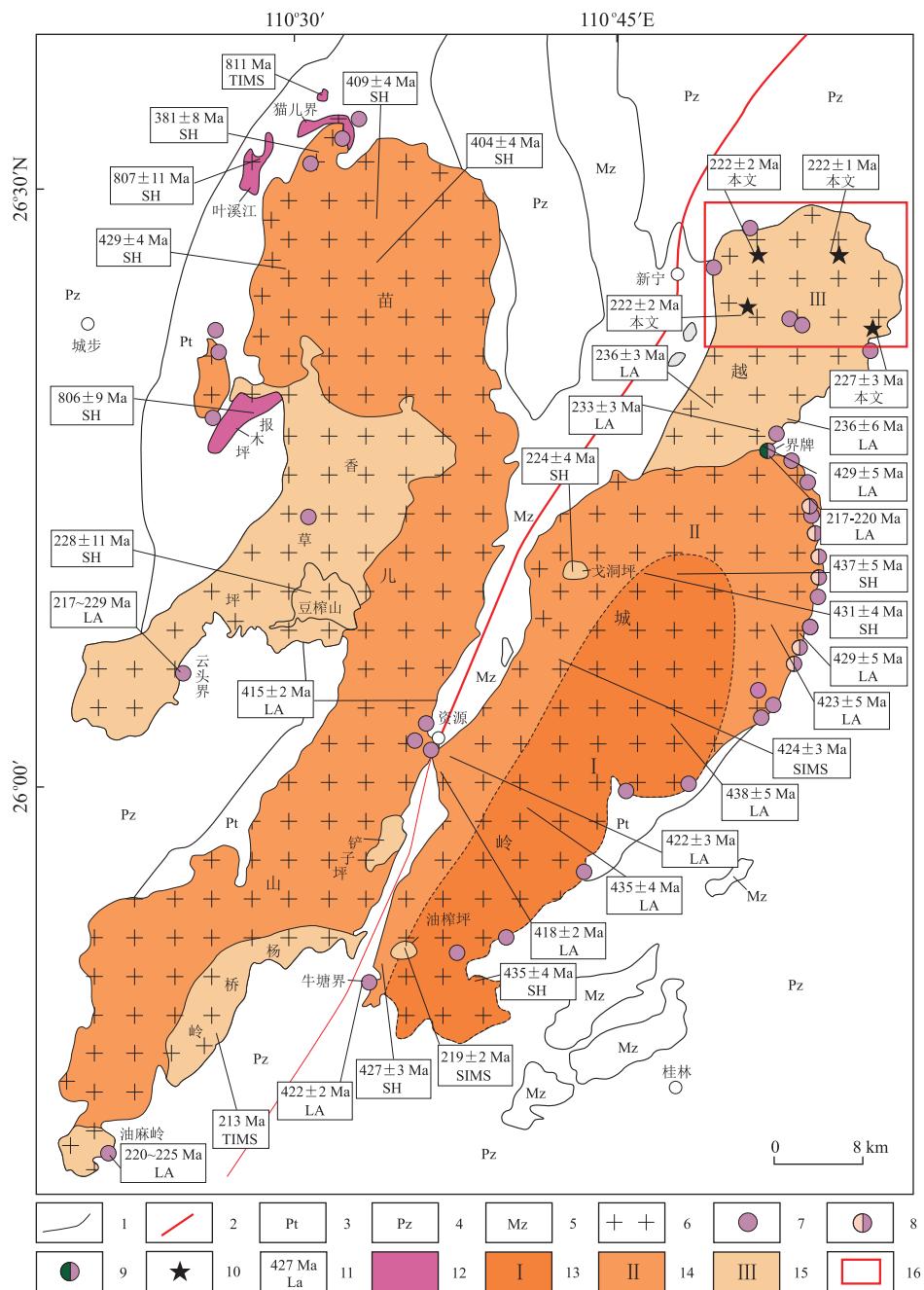


图 2 越城岭—苗儿山岩基地质简图

Fig.2 Geological sketch of Yuechengling-Miaoershan batholiths

1. 地质界线; 2. 涟源—资源断裂; 3. 元古界; 4. 古生界; 5. 中生界; 6. 花岗岩; 7. 钨矿床(点); 8. 锡矿床(点); 9. 铜矿床(点); 10. 采样地点; 11. 花岗岩年代及方法; 12. 晋宁期花岗岩; 13. 加里东期 I 阶段花岗岩; 14. 加里东期 II 阶段花岗岩; 15. 印支期花岗岩; 16. 工作区. LA 为 LA-ICP-MS; SH 为 SHRIMP; TIMS 为热电离质谱法; SIMS 为二次离子质谱法. 年代学数据据赵葵东等(2006)、谢晓华等(2008)、柏道远等(2010, 2014, 2015)、石少华等(2010)、伍静等(2012)、杨振(2012)、Chu *et al.*(2012)、程顺波等(2013, 2016)、Zhao *et al.*(2013)、寇晓虎等(2014)、张迪等(2015)、陈文迪等(2016)、杜云等(2017)

代起, 研究区相继经历了新元古代早期 (1.0 ~ 0.8 Ga) 板块俯冲—碰撞阶段、新元古代晚期 (0.8 ~ 0.68 Ga) 大陆裂解—陆内裂谷阶段、早古生代陆内天折裂谷 (Wang *et al.*, 2007b) — 陆内褶皱造山阶段、早中生代陆内褶皱—推覆阶段和晚中生代构造

转换阶段这 5 个构造演化阶段 (舒良树, 2012). 在整个研究区, 岩体侵入上元古界和古生界, 被泥盆系跳马洞组和白垩系不整合覆盖 (广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 湖南省地质矿产局, 1988), 长轴方向呈北北东向展布, 与区域构造线方向一致 (图 2). 涟

表 1 越城岭—苗儿山岩基成岩期次简表
Table 1 Diagenetic stage of Yuechengling-Miaoershshan batholiths

成岩期次	位置	产出形式	岩性组合	形成时间	参考文献
晋宁期	苗儿山岩体西北部猫儿界、叶溪江和报木坪等地	小型岩株	片麻状花岗闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩	811~806 Ma	李福顺和周厚祥,2002;柏道远等,2010;刘伟等,2011
加里东期	越城岭、苗儿山岩体大部	大型岩基	花岗闪长岩、(含电气石)二长花岗岩	438~381 Ma	Zhao et al., 2013; 程顺波等,2016 及其引用文献
印支期	越城岭北部,中部戈洞坪等,苗儿山南部油麻岭、杨桥岭,中部香草坪、豆榨山等地	岩基和中型岩株	(含电气石)二长花岗岩、正长花岗岩	236~211 Ma	谢晓华等,2008;石少华等,2010;伍静等,2012;程顺波等,2013;寇晓虎等,2014 以及本文

源一资源断裂从越城岭岩体与苗儿山岩体之间穿过,新化—城步断裂从苗儿山岩体西侧穿过。

越城岭—苗儿山岩体是由多期次岩浆侵入活动形成的复式岩基,已有精确年龄有晋宁期、加里东期和印支期 3 个成岩期次(表 1)(赵葵东等,2006;柏道远等,2010, 2014, 2015;刘伟等,2011;伍静等,2012;杨振,2012; Chu et al., 2012; Zhao et al., 2013; 程顺波等,2013, 2016; 陈文迪等,2016).晋宁期花岗岩主要分布在苗儿山复式岩基西北角,从南至北有报木坪、叶溪江和猫儿界岩株 3 处,总面积约 35 km²(李福顺和周厚祥,2002;柏道远等,2010).常见岩性有花岗闪长岩、二长花岗岩和花岗斑岩,岩石普遍发育片麻状构造(柏道远等,2010).加里东期花岗岩是越城岭—苗儿山岩体的主体,主要岩性为(粗)中粒斑状二长花岗岩和(含电气石)中细粒(斑状—含斑)二长花岗岩,次为花岗闪长岩(广西壮族自治区地质矿产局,1985;程顺波等,2016).中粒斑状二长花岗岩中可见暗色包体,中细粒(斑状—含斑)二长花岗岩中常见电气石.在靠近新宁—资源断裂处,花岗岩遭受了较强的动力变质,形成强烈的片麻状构造带.印支期花岗岩主要分布在越城岭复式岩基中北部(湖南省地质矿产局,1988)和苗儿山岩基中部香草坪(谢晓华等,2008;石少华等,2010;伍静等,2012),岩性主要为(含电气石)的中细粒(斑状—含斑)二长花岗岩.在杨桥岭、油麻岭、戈洞坪、界牌等地(赵葵东等,2006;杨振,2012;程顺波等,2013),印支期花岗岩常呈椭圆状、长条状和不规则状小岩株产出.

2 岩性描述与样品采集

根据野外侵位关系,研究区花岗岩可分为早阶段和晚阶段.早阶段花岗岩占岩体出露面积的 90%以上,岩体边部内接触带发育宽度不等的细粒冷凝边.花岗岩由不同粒度的二长花岗岩组成(图 3a,

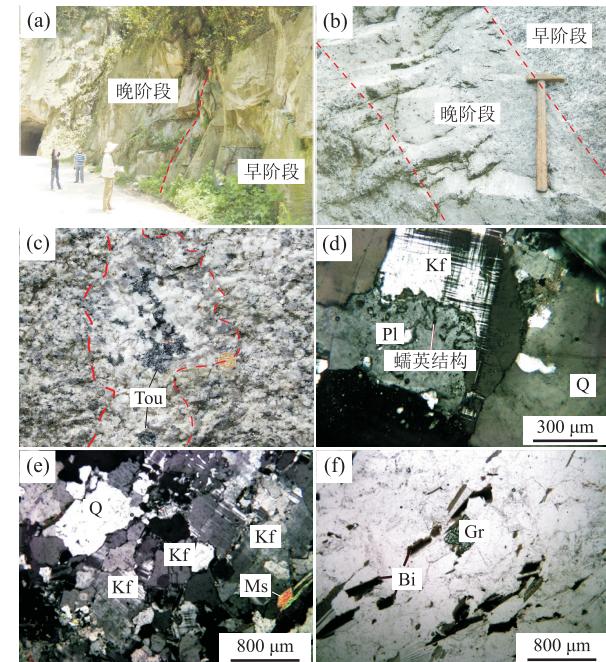


图 3 越城岭岩基北部印支期花岗岩岩石学和矿物学照片
Fig.3 Photographs of Indosian granitic rocks of northern Yuechengling batholiths, and their micrographs under microscope

a.晚阶段细粒二长花岗岩岩株侵入到早阶段中细粒少斑二长花岗岩中(14D504);b.晚阶段细粒二长花岗岩岩脉侵入到早阶段中粒斑状花岗岩中(14D686);c.早阶段中细粒含斑二长花岗岩中电气石英钾长石伟晶岩团块(14D545);d.早阶段中粒斑状二长花岗岩显微照片(14D529)(+);e.晚阶段细粒正长花岗岩显微照片(14D561)(+);f.样品 14D561 副矿物含石榴石(—).Tou.电气石;Pl.斜长石;Kf.正长石;Ms.白云母;Q.石英;Gr.石榴子石;+为正交偏光, -为单偏光

3b).岩石普遍具有似斑状结构,斑晶在粗中粒二长花岗岩中主要为钾长石和/或斜长石,含量变化较大,从 2% 到 35%,一般小于 20%;在中细粒二长花岗岩中,斑晶石英开始出现,含量在 2%~5%.基质均为花岗结构,粒径 1~8 mm 不等,少部分小于 1 mm.岩石主要由斜长石(35%~45%)、钾长石(30%~40%)、石英(25%~30%)、黑云母(2%~5%)组成(图 3d).副矿物种类丰富,主要为锆石、

(斜)黝帘石、磷灰石,此外还含有金红石、石榴石、不透明矿物等。岩石中常见椭圆状—不规则状含电气石伟晶岩(图 3c),长轴大小 5~60 cm,岩体西侧发育 2~10 km 宽的韧性剪切带。

晚阶段花岗岩主要呈岩株(图 3a)或者岩脉(图 3b)侵入到早阶段花岗岩中,出露面积不到岩体面积的 10%。岩株一般近椭圆状,面积小于 1 km²。岩脉方向有北东向、北西向、近于东西向和近南北向 4 组。花岗岩岩性由二长花岗岩(图 3b)、正长花岗岩(图 3e)以及少量花岗斑岩组成。其中,二长花岗岩和正长花岗岩含少量钾长石斑晶,含量 1%~4%。基质具花岗结构,粒径 0.1~2.0 mm 不等,由斜长石(15%~35%)、钾长石(30%~65%)、石英(25%~30%)、黑云母(1%~2%)组成。副矿物包括磷灰石、锆石、石榴石(图 3f)、(斜)黝帘石和不透明矿物等。岩石中常见椭圆状—不规则状含电气石伟晶岩团块。

3 样品整理与测试方法

花岗岩样品破碎和锆石挑选由廊坊峰之源矿物分选技术服务公司完成。将环氧树脂和乙二醇胺按照 1:7 混合均匀,然后灌注到已经排好的锆石靶上,放至恒温箱(60 °C)约 12 h 固结成型。磨蚀和抛光树脂靶,直至锆石核心部位暴露。阴极发光图像在北京锆石领航技术服务公司拍摄,并结合透射光和反射光图像观察锆石内部结构。

锆石 U-Pb 同位素定年分析在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 LA-ICP-MS 仪器上完成,激光剥蚀系统为 Newwave UP213, ICP-MS 型号为 Finnigan Neptune, 所用斑束直径为 32 μm, 以 He 为载气。采样方式为单点剥蚀,数据采集采用时间分辨动态模式接收。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。样品分析前用锆石 NIST610 进行仪器调试,分析时以锆石 GJ-1 为外标。每测定 10 个样品点前后重复测定两个锆石 GJ-1 对样品进行校正,中间测量一个锆石标样 Plesovice。²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U 的测试精度(2σ)小于 2%。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMS DataCal (Liu *et al.*, 2008), 年龄谐和图制作和年龄权重平均计算采用软件 Isoplot 3.0

(Ludwig, 2003)。

主量、微量元素和 Sr、Nd 同位素分析在中国地质调查局中南矿产资源监督检测中心完成。Si 和烧失量采用重量法;Al 和 Fe²⁺ 采用容量法;Fe³⁺、Ti 和 P 采用分光光度法;K、Na、Ca、Mg 和 Mn 采用原子吸收光谱法。微量元素和稀土元素测试在 Thermo X series 2 型电感耦合等离子质谱仪上完成,标样采用 10 mg/L 多元素混合内标(美国 PerkinElmer 公司配制), 相对偏差(RSD)均小于 10%。Sr、Nd 同位素分析在 MAT261 多接收质谱仪上完成,用⁸⁸Sr/⁸⁶Sr=8.375 2 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 对 Sr 和 Nd 作质量分馏校正,计算机自动进行数据采集,采用美国标准样 NBS987(Sr)和本实验室标准样 ZkbzNd(Nd)监测仪器工作状态,国家一级标准物质 GBW 04411(Rb-Sr)和 GBW 04419(Sm-Nd)监测分析流程。精度⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 优于 1%,¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 优于 0.5%,衰变常数采用 $\lambda(^{87}\text{Rb}) = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $\lambda(^{147}\text{Sm}) = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ 。地球化学参数计算与图解生成使用 GeoKit 软件(路远发等,2004)完成。

锆石 Hf 同位素分析在南京聚谱检测科技有限公司 Nu Plasma II 型多接收 MC-ICP-MS 仪器上进行。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面,能量密度为 6.0 J/cm², 束斑直径为 50 μm, 频率为 8 Hz, 共剥蚀 40 s, 剥蚀气溶胶由氦气送入 MC-ICP-MS 完成测试。测试过程中每隔 10 颗样品锆石,交替测试 2 颗标准锆石(包括 GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai), 以检验锆石 Hf 同位素比值数据质量。对分析数据的离线处理采用软件 ICP MS DataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成。采用的计算参数分别为: (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.033 2, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.282 772; (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.038 4, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.283 25 (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2002)。¹⁷⁶Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004)。外标 GJ-1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试值为 0.282 007 ± 14 (N=5)。

4 锆石 U-Pb 年龄

本次研究共采集了早阶段中粒—中粗粒斑状二长花岗岩(14D529、14D548)(110°54'52"E, 26°27'11"N; 110°58'38"E, 26°27'02"N)、细粒少斑二长花岗岩(14D503)(111°01'36"E, 26°25'01"N)和晚阶段细粒正长花岗岩(14D561-1)(110°54'03"E, 26°25'48"N)这 4

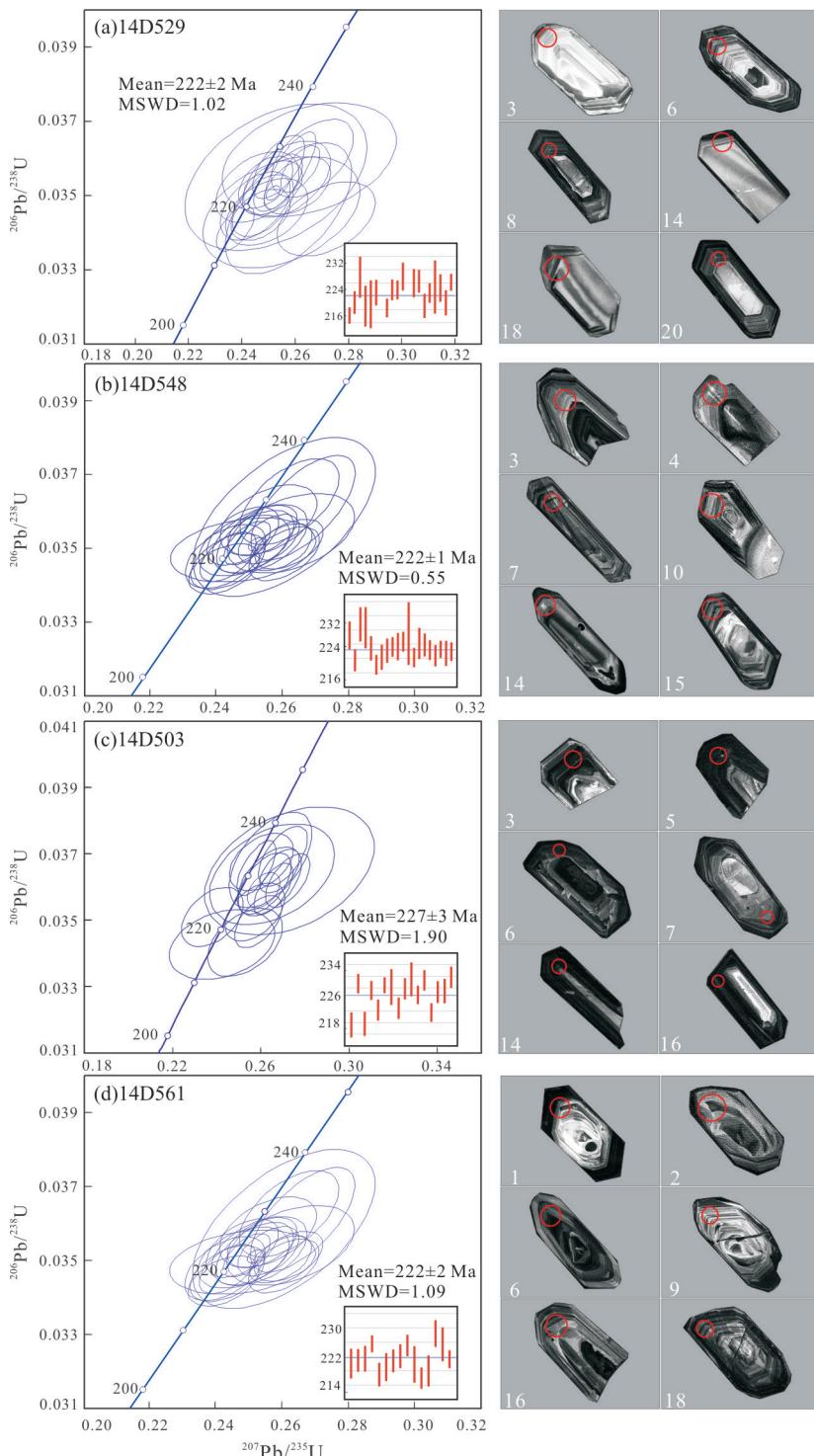


图 4 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图及代表性锆石阴极发光照片

Fig.4 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia age plots and cathodoluminescence (CL) images of samples of Indonesian granites from northern Yuechengling batholith

束斑大小 $30 \mu\text{m}$

个花岗岩样品用于定年测试。4 个样品锆石颜色为棕色到深棕色,形态也比较相似,均表现为自形一半自形短柱状,长宽比为 2~5,部分锆石呈碎片状。锆石中常见磷灰石包裹体。CL 图像显示绝大多数被测锆石

为具有韵律环带的岩浆锆石(Corfu and John, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004)(图 4)。少部分为具有“老核新壳”的复合型锆石,核部已基本圆化,无环带或显示云雾状分带,边部具有比较明显的岩浆韵律环带。每个

表 2 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 U-Th-Pb isotopic analysis of zircons from northern Yuechengling batholith

分析点	Pb [*] (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	Th/U 比值		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 比值 (10 ⁻⁵)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 比值 (10 ⁻⁵)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 比值 (10 ⁻⁵)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U 年龄(Ma)	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄(Ma)	1σ
				中粒斑状二长花岗岩样品(14D529)(坐标 110°54'52"E, 26°27'11"N)	1σ							
1	82.5	461	2 653	0.17	0.050 25	104	0.237 56	465	0.034 11	40	216	2
2	29.6	607	803	0.76	0.052 03	176	0.247 88	764	0.034 74	55	225	6
3	11.4	290	280	1.03	0.055 99	492	0.265 22	2 159	0.035 97	101	239	17
4	9.8	210	258	0.81	0.054 90	448	0.254 76	1 948	0.034 55	99	230	16
5	5.5	124	146	0.85	0.057 80	441	0.257 47	1 563	0.034 65	117	233	13
6	16.6	278	472	0.58	0.051 92	245	0.245 86	1 031	0.035 23	63	223	8
7	21.0	229	634	0.36	0.057 59	264	0.271 70	1 214	0.034 37	66	244	10
8	29.3	174	911	0.19	0.051 83	158	0.247 07	734	0.034 48	45	224	6
9	61.9	231	1 960	0.12	0.052 13	138	0.253 65	602	0.035 34	51	230	5
10	59.1	189	1 881	0.10	0.050 83	142	0.248 89	672	0.035 35	46	226	5
11	49.1	180	1 475	0.12	0.053 42	211	0.266 43	1 017	0.036 01	69	240	8
12	33.7	188	1 018	0.18	0.054 04	188	0.260 90	823	0.035 27	51	236	7
13	31.6	284	826	0.34	0.052 94	221	0.286 24	1 185	0.039 94	97	256	9
14	101.0	322	3 083	0.10	0.052 55	157	0.257 99	64	0.035 68	69	233	5
15	93.0	165	2 879	0.06	0.051 45	143	0.253 86	644	0.035 78	56	230	5
16	24.3	177	726	0.24	0.052 90	224	0.249 25	102	0.034 56	59	226	8
17	45.3	126	1 403	0.09	0.051 94	161	0.251 43	746	0.035 20	48	228	6
18	13.1	274	323	0.85	0.053 45	531	0.252 77	2 255	0.035 50	130	229	18
19	20.8	244	592	0.41	0.053 75	247	0.257 04	1 071	0.035 44	68	232	9
20	24.7	156	749	0.21	0.051 81	194	0.244 50	866	0.034 72	61	223	7
中粗粒斑状二长花岗岩样品(14D548)(坐标 110°58'38"E, 26°27'02"N)												
1	18.3	97	537	0.18	0.052 60	215	0.255 85	962	0.035 77	63	231	8
2	32.5	390	936	0.42	0.051 44	168	0.243 57	741	0.034 64	50	221	6
3	27.4	158	789	0.20	0.053 07	247	0.262 24	987	0.036 26	77	236	8
4	18.6	174	517	0.34	0.054 89	249	0.266 25	1 040	0.036 10	94	240	8
5	22.8	92	708	0.13	0.052 24	159	0.251 79	771	0.035 18	56	228	6
6	23.0	122	712	0.17	0.051 35	152	0.242 50	703	0.034 44	45	220	6
7	33.6	240	1 008	0.24	0.050 99	188	0.242 93	802	0.034 78	57	221	7
8	17.8	149	528	0.28	0.051 97	193	0.248 44	904	0.035 08	54	225	7
9	54.5	248	1 659	0.15	0.052 62	128	0.255 98	609	0.035 25	44	231	5
10	20.7	157	612	0.26	0.052 45	205	0.253 27	945	0.035 29	62	229	8
11	53.3	1 551	0.17	0.052 16	158	0.254 10	691	0.035 48	45	230	6	
12	26.9	463	669	0.69	0.054 52	440	0.260 58	1 816	0.035 85	142	235	15
13	60.4	268	1 806	0.15	0.050 79	120	0.243 69	561	0.034 77	44	221	5
14	29.0	359	769	0.47	0.054 08	280	0.262 64	1 267	0.035 41	71	237	10
15	26.4	237	746	0.32	0.051 38	160	0.248 10	716	0.035 33	52	225	6
16	53.8	347	1 573	0.22	0.054 35	150	0.262 07	677	0.035 11	45	236	5
17	65.2	185	1 945	0.10	0.053 95	141	0.260 58	703	0.034 85	48	235	6
18	118.0	481	3 442	0.14	0.051 20	95	0.249 48	462	0.035 14	39	226	4
19	21.2	124	607	0.20	0.051 80	330	0.248 22	1 448	0.034 95	57	225	12
20	88.1	469	2 560	0.18	0.053 55	131	0.259 68	617	0.035 03	42	234	5

续表2

分析点	Pb*	Th	U	Th/U 比值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (10^{-6})	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (10^{-5})	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 1σ	
	(10^{-6})	(10^{-6})	(10^{-6})	(10^{-6})	(10^{-5})	(10^{-5})	(10^{-5})	(10^{-5})	(10^{-5})	(10^{-5})	(10^{-5})	
细粒少斑二长花岗岩样品(14D503)(坐标111°01'36"E,26°25'01"N)												
1	36.3	1160	809	1.43	0.05128	346	0.24236	1.577	0.03426	69	220	13
2	134.0	378	3623	0.10	0.06997	174	0.36446	1.048	0.03713	53	316	8
3	129.0	493	3721	0.13	0.05117	119	0.25810	5799	0.03657	54	233	5
4	27.2	378	749	0.50	0.05386	247	0.25285	1120	0.03432	68	229	9
5	99.3	499	2088	0.24	0.13160	378	0.69211	2092	0.03792	54	534	13
6	87.8	478	2454	0.19	0.05455	143	0.27229	6633	0.03619	53	245	5
7	22.7	289	622	0.46	0.05000	200	0.23808	921	0.03509	59	217	7
8	42.3	303	606	0.50	0.05575	192	0.49850	1606	0.06516	86	411	11
9	131.0	358	3738	0.10	0.05344	127	0.26852	593	0.03648	44	242	5
10	40.5	445	1036	0.43	0.05334	393	0.26510	1871	0.03638	100	239	15
11	45.0	368	1261	0.29	0.05426	207	0.25743	886	0.03525	58	233	7
12	448.0	469	8667	0.05	0.12023	513	0.78175	3871	0.04561	86	586	22
13	23.3	369	559	0.66	0.05382	456	0.27299	2535	0.03648	128	245	20
14	43.6	232	1187	0.20	0.05260	281	0.26439	1234	0.03681	95	238	10
15	137.0	551	3994	0.14	0.05327	100	0.29575	581	0.03594	52	239	5
16	73.4	404	2066	0.20	0.05091	177	0.26035	951	0.03675	57	235	8
17	80.0	642	2300	0.28	0.05342	143	0.25887	704	0.03496	52	234	6
18	68.1	458	1947	0.23	0.05247	166	0.26180	792	0.03610	61	236	6
19	28.7	265	817	0.32	0.05337	196	0.26395	962	0.03616	68	238	8
20	49.8	1162	1189	0.98	0.05321	152	0.27009	733	0.03692	59	243	6
细粒正长花岗岩样品(14D561)(坐标110°54'03"E,26°25'48"N)												
1	128.0	994	3717	0.27	0.06646	167	0.32566	735	0.03558	43	286	6
2	12.8	206	357	0.58	0.05308	226	0.25145	1105	0.03472	68	228	9
3	20.0	198	590	0.34	0.05120	189	0.24489	881	0.03487	51	222	7
4	100.0	328	3106	0.11	0.05217	174	0.25228	882	0.03494	58	228	7
5	167.0	321	5253	0.06	0.05181	87	0.25511	442	0.03561	38	231	4
6	26.9	224	815	0.27	0.05187	170	0.24455	786	0.03422	53	222	6
7	31.5	201	960	0.21	0.05329	231	0.25410	1099	0.03456	63	230	9
8	20.1	629	0.26	0.04404	243	0.20020	994	0.03352	68	185	8	
9	39.1	397	528	0.75	0.05586	183	0.25579	1711	0.06873	112	429	7
10	63.0	405	1737	0.23	0.05080	177	0.23940	832	0.03407	48	218	7
11	57.9	201	1681	0.12	0.05109	150	0.24723	754	0.03506	53	224	6
12	57.4	460	1563	0.29	0.05329	137	0.25957	617	0.03553	48	234	5
13	25.8	287	677	0.42	0.05143	259	0.24295	1157	0.03469	82	221	9
14	63.0	405	1737	0.23	0.05080	177	0.23940	832	0.03407	48	218	7
15	37.2	190	1010	0.19	0.05148	277	0.24577	1047	0.03484	51	237	8
16	21.9	210	536	0.39	0.05145	224	0.25528	1106	0.03607	60	231	9
17	104.0	68	747	0.09	0.06575	162	1.16347	2599	0.12800	152	784	12
18	38.8	268	1063	0.25	0.05128	265	0.22541	1082	0.03213	58	206	9
19	35.9	355	839	0.42	0.05096	229	0.24988	1145	0.03559	77	226	9
20	123.0	290	3161	0.09	0.05136	130	0.24724	594	0.03492	40	224	5

注:Pb*代表放射性成因铅。

样品均选取了 20 颗锆石颗粒进行分析,分析点都位于锆石边部。各样品锆石的 U-Th-Pb 同位素分析结果见表 2。

4.1 细中粒—中粗粒斑状二长花岗岩(14D529、14D548)

14D529 样品锆石的 Th 含量为 $97.4 \times 10^{-6} \sim 607.0 \times 10^{-6}$, U 含量为 $146 \times 10^{-6} \sim 3442 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.06~1.03(表 2), 所有测点数据比较一致, 15D529 样品 20 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 $222 \pm 1 \text{ Ma}$ (95% 置信度, MSWD=1.02), 15D548 样品 20 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $222 \pm 2 \text{ Ma}$ (95% 置信度, MSWD=0.55)(图 4a, 4b)。

4.2 细粒少斑二长花岗岩(14D503)

15D503 样品锆石的 Th 含量为 $232 \times 10^{-6} \sim 1162 \times 10^{-6}$, U 含量为 $622 \times 10^{-6} \sim 8667 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.10~1.43(表 2). 2.1、5.1 和 12.1 测点数据明显不谐和, 可能是锆石中混入了普通铅所致。8.1 测点给出了比较谐和的加里东年龄。鉴于测点位于锆石核部, 该信息可能指示加里东期深变质岩卷入了此次熔融事件。利用剩下的 16 个测点计算获得样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $227 \pm 3 \text{ Ma}$ (95% 置信度, MSWD=1.90)(图 4c)。

4.3 细粒正长花岗岩(15D561)

15D561 样品锆石的 Th 含量为 $67.6 \times 10^{-6} \sim 994 \times 10^{-6}$, U 含量为 $528 \times 10^{-6} \sim 5253 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.09~0.75(表 2). 1.1 测点数据明显不谐和, 可能是锆石中混入了普通铅所致。8.1 测点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值明显偏小, 可能与锆石 ^{207}Pb 选择性丢失有关。18.1 测点获得了 203 Ma 的孤立谐和年龄, 在处理年龄加权平均值时将其删除。9.1、17.1 分别给出了 430 Ma 和 780 Ma 的谐和年龄。由于它们均是晶形完好的岩浆锆石, 将其解释为岩浆上升途中捕获的锆石较为合理。利用剩下的 15 个测点计算获得样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $222 \pm 2 \text{ Ma}$ (95% 置信度, MSWD=1.09)(图 4d)。

花岗岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $227 \pm 3 \text{ Ma}$ 到 $222 \pm 2 \text{ Ma}$, 并在误差范围内一致, 充分说明研究区花岗岩形成于晚三叠世。

5 地球化学和 Nd、Hf 同位素

5.1 地球化学特征

研究区印支期花岗岩的主量和微量元素分析结

果见表 3. 无论早阶段还是晚阶段, 印支期花岗岩样品普遍具有高的 SiO_2 (72.98%~75.63%) 和 K_2O 含量(4.34%~5.17%), 低的 Al_2O_3 (12.30%~13.69%)、 TiO_2 (<0.30%)、 CaO (<1.50%)、 MgO (<0.55%) 和 P_2O_5 含量(<0.10%) 以及较为一致的 Na_2O 含量(2.75%~3.06%)(表 3). 在图 5a 中, 印支期花岗岩样品均落入高钾钙碱性区域。只是早阶段样品投影点偏高, 反映其具有更高的钾含量。早阶段样品为弱过铝质, A/CNK 值介于 1.07 到 1.10, 晚阶段样品为强过铝质, A/CNK 值介于 1.11 到 1.15(图 5b). 此外, 早阶段样品的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(0.30~0.51) 略高于晚阶段样品 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(0.28~0.31)。

相对于全球大陆地壳组成(Rudnick and Gao, 2003), 印支期花岗岩样品均显著富集元素 Rb($364 \times 10^{-6} \sim 558 \times 10^{-6}$)、Th($19.2 \times 10^{-6} \sim 39.7 \times 10^{-6}$)、U($5.0 \times 10^{-6} \sim 25.6 \times 10^{-6}$)、Nb($13.8 \times 10^{-6} \sim 21.4 \times 10^{-6}$) 和 Ta($2.81 \times 10^{-6} \sim 7.72 \times 10^{-6}$), 明显亏损 Ba($58.7 \times 10^{-6} \sim 266.0 \times 10^{-6}$)、Sr($22.1 \times 10^{-6} \sim 71.8 \times 10^{-6}$). 在图 6a 中, 印支期花岗岩样品也表现出强烈富集元素 Rb、K、Th、U, 相对亏损元素 Ba、Sr、Nb、Ti 的特征。样品富 Rb 特征可能与样品的高 K 含量有关, 亏损 Ba、Sr 可能与斜长石低钙属性相关。样品的 Nb/Ta 值(2.77~5.12) 和 Zr/Hf 值(23.00~27.52) 都明显低于大陆地壳平均值(分别为 11.42 和 35.68; Rudnick and Gao, 2003)。

印支期花岗岩样品的 ΣREE 含量在 $132.54 \times 10^{-6} \sim 222.19 \times 10^{-6}$ 之间, 并表现出早阶段样品含量高于晚阶段样品的特征, 可能与早阶段花岗岩样品副矿物含量相对较高有关。在图 6b 中, 早阶段和晚阶段花岗岩样品都具有比较类似的右倾配分曲线, 前者 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 5.11~11.17, 后者 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 5.47~8.02, 以前者略高。早阶段样品 δEu 值介于 0.15~0.32, 晚阶段样品 δEu 值介于 0.12~0.23, 显示后者铕亏损更加强烈。

5.2 Nd、Hf 同位素特征

越城岭北部印支期花岗岩 Sm-Nd 同位素组成如表 4 所示。5 个样品的实测 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值介于 0.1151~0.1364, 与大陆上部地壳 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 平均值(0.118 ± 0.017)(Jahn and Condie, 1995) 比较相近。早阶段花岗岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -9.3~ -10.2, 晚阶段花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值稍低, 为 -10.3~ -10.6. 在图 7 中, 所有样品均落入华南元古代地壳演化域内, 与岩

表3 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Table 3 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) of Indosinian granitic samples from northern Yuechengling batholith

期次 样品号	早阶段					晚阶段	
	14D529	14D548	14D503	462 *	464 *	14D504	14D561-1
SiO ₂	74.71	74.46	72.98	74.66	73.66	75.63	74.52
TiO ₂	0.173	0.223	0.288	0.230	0.250	0.216	0.149
Al ₂ O ₃	12.74	12.74	13.48	12.95	13.69	12.30	13.37
Fe ₂ O ₃	0.356	0.217	0.966	0.330	0.600	0.602	0.645
FeO	2.55	2.64	2.10	1.45	1.23	2.23	1.68
MnO	0.078	0.071	0.064	0.050	0.040	0.081	0.064
MgO	0.360	0.472	0.546	0.450	0.490	0.420	0.332
CaO	0.914	1.150	1.490	0.960	0.900	0.788	0.939
K ₂ O	4.54	4.72	4.62	5.17	5.08	4.34	4.90
Na ₂ O	3.04	2.83	2.94	2.82	2.75	2.79	3.06
P ₂ O ₅	0.082	0.100	0.098	0.070	0.120	0.092	0.085
灼失	0.118	0.037	0.103	0.730	1.060	0.234	0.037
Σ	99.66	99.66	99.68	99.87	99.87	99.72	99.78
FeOT ^T	2.87	2.84	2.97	1.75	1.77	2.77	2.26
A/CNK	1.10	1.07	1.07	1.08	1.17	1.15	1.11
CaO/Na ₂ O	0.30	0.41	0.51	0.34	0.33	0.28	0.31
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	73.64	57.13	46.81	56.30	54.76	56.94	89.73
Rb	558	497	364	501	416	484	500
Sr	29.9	44.6	71.8	39.9	50.6	22.1	37.4
Ba	95.3	171.0	266.0	171.0	221.00	58.7	155.0
U	21.4	14.7	25.6			12.9	5.0
Th	31.5	30.8	33.5	39.7	35.1	23.0	19.2
Nb	21.4	15.9	14.4	19.6	14.7	16.6	13.8
Ta	7.72	4.44	2.81	3.40	2.52	4.43	4.52
Zr	112.0	130.0	142.0	149.0	129.0	99.5	97.8
Hf	4.87	4.97	5.16	5.38	4.52	4.11	4.18
Y	29.7	21.7	32.8	35.7	30.0	26.9	18.0
Nb/Ta	2.77	3.58	5.12	5.76	5.83	3.75	3.05
Zr/Hf	23.00	26.16	27.52	27.70	28.54	24.21	23.40
La	28.9	30.2	45.5	40.8	44.4	27.0	25.5
Ce	71.9	73.8	103.0	95.6	100.0	64.2	61.9
Pr	7.22	7.29	10.00	10.60	11.10	6.61	6.06
Nd	24.6	25.2	33.2	37.4	39.1	22.5	20.7
Sm	5.50	5.19	6.60	8.23	8.02	4.96	4.39
Eu	0.260	0.370	0.660	0.432	0.538	0.190	0.31
Gd	4.76	4.37	5.82	6.84	6.52	4.30	3.61
Tb	0.92	0.78	1.04	1.08	1.00	0.82	0.64
Dy	5.82	4.48	6.50	6.43	5.55	5.21	3.74
Ho	1.19	0.89	1.35	1.19	1.04	1.05	0.74
Er	3.37	2.52	3.74	3.34	2.95	2.99	2.02
Tm	0.60	0.42	0.60	0.54	0.45	0.53	0.35
Yb	4.06	2.75	3.70	3.59	2.85	3.54	2.28
Lu	0.540	0.370	0.480	0.516	0.391	0.470	0.300
ΣREE	159.64	158.63	222.19	216.58	223.91	144.37	132.54
(La/Yb) _N	5.11	7.88	8.82	8.15	11.17	5.47	8.02
δEu	0.15	0.23	0.32	0.17	0.22	0.12	0.23

注: * 样品引自寇晓虎等(2014)。

基南部加里东期花岗岩较为相似。为了减少地壳阶段 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化对模式年龄计算的影响,笔者用二阶段模式年龄来代表花岗岩源区的平均地壳存留年龄($T_{\text{DM}2}^{\text{Nd}}$)(Chen and Jahn, 1998)。其中,早阶

段花岗岩样品的 $T_{\text{DM}2}^{\text{Nd}}$ 值为1.75~1.82 Ga,晚阶段花岗岩的 $T_{\text{DM}2}^{\text{Nd}}$ 值稍高,为1.84~1.86 Ga。

本次研究选取中粒斑状二长花岗岩样品14D529和细粒少斑二长花岗岩样品14D503共38

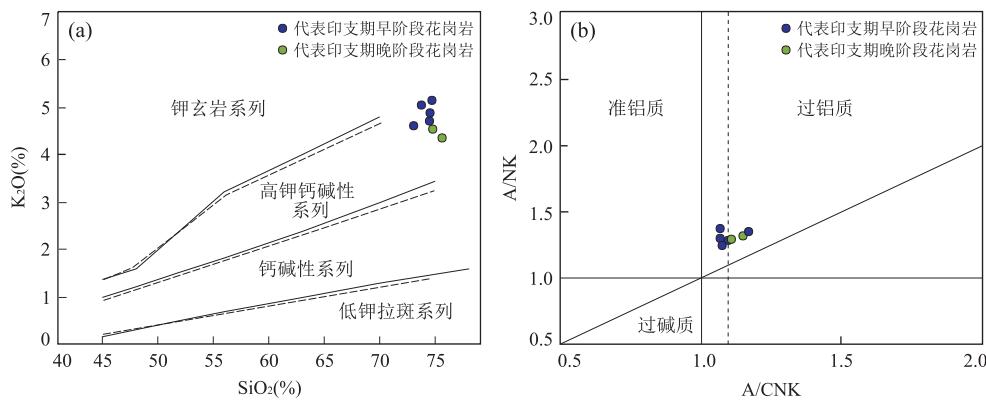
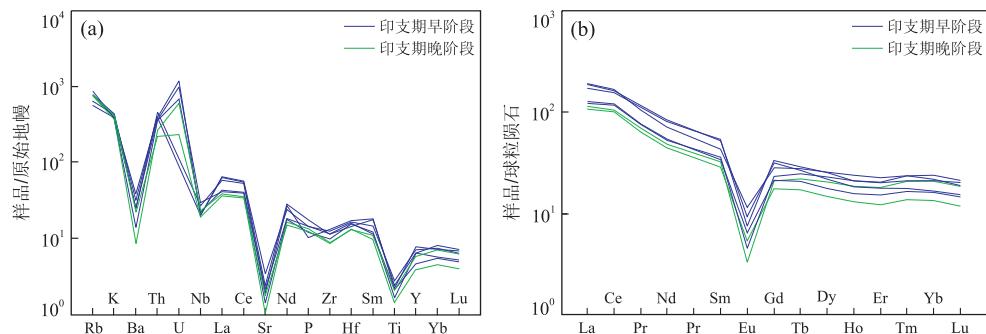
图 5 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品的 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(a)和 $\text{A/CNK}\text{-A/NK}$ 图解(b)Fig.5 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram (a) and $\text{A/CNK}\text{-A/NK}$ diagram (b) of Indosinian granitic samples of northern Yuechengling batholith

图 6 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品的微量元素蜘蛛网图解(a)和稀土元素配分图解(b)

Fig.6 Primitive mantle-normalized spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Indosinian granitic samples of northern Yuechengling batholith

原始地幔和球粒陨石标准值据 Sun and McDonough(1989)

表 4 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品的 Sm-Nd 同位素组成

Table 4 Sm-Nd isotopic compositions of Indonesian granitic samples from northern Yuechengling batholith

时代	样号	成岩期次	t (Ma)	$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	T_{DM} (Ga)	T_{DM2} (Ga)	$f_{\text{Sm/Nd}}$
印支期	14D529-1	早阶段	222	0.115 1	0.512 045	-9.3	0.511 878	1.71	1.75	-0.41
	14D548	早阶段	222	0.133 5	0.512 026	-10.2	0.511 832	2.14	1.82	-0.32
	14D503	早阶段	227	0.136 4	0.512 038	-10.0	0.511 835	2.19	1.81	-0.31
	14D504	晚阶段	222	0.133 1	0.512 017	-10.3	0.511 824	2.14	1.84	-0.32
	14D561-1	晚阶段	222	0.130 7	0.512 000	-10.6	0.511 810	2.11	1.86	-0.34

个测点进行了原位 Hf 同位素分析, 测点的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及二阶段模式年龄一般按测点年龄来计算。结果显示, 绝大部分分析点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} \leq 0.002$ (表 5), 指示锆石形成后放射成因 Hf 积累十分有限 (Kinny and Maas 2003; 吴福元等, 2007), 14D529-19 号点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} \geq 0.004$, 统计时予以排除。样品 14D529 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.282 329~0.282 463 之间, 平均值为 0.282 394, 计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中分布在 -6.1~ -11.1 之间, 平均值为 -9.1 (图 8a), Hf 二阶段模式年龄 (T_{DM2}) 在 1.64~1.95 Ga, 平均值为 1.80 Ga (图 8b)。样品 14D503 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比

值在 0.282 298~0.282 485 之间, 平均值为 0.282 371, 计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值略为分散, 分布在 -5.4~-11.9 之间, 平均值为 -8.6 (图 8c), T_{DM2} 在 1.59~2.01 Ga 之间, 平均值为 1.84 Ga (图 8d)。

6 讨论

6.1 岩基内印支期花岗岩时空分布

前人地质工作 (广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 湖南省地质矿产局, 1988; 钱惠林, 1993) 证实, 越城岭岩体是一个从加里东期到印支期的多旋回复

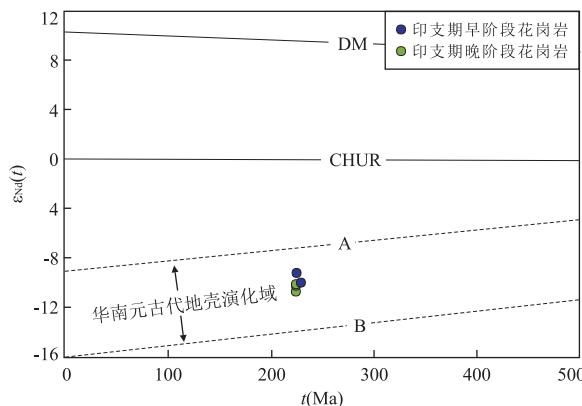


图 7 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 关系
Fig.7 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t diagram of various granitic rocks of Indonesian granitic samples from northern Yuechengling batholith

底图据沈渭渊等(1994)

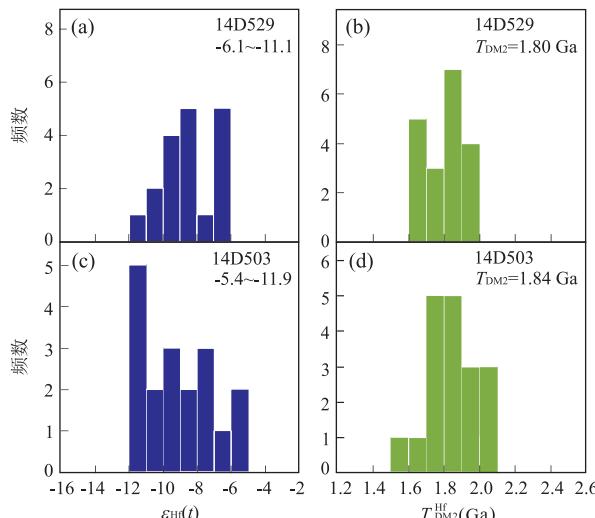


图 8 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $T_{\text{DM2}}^{\text{Hf}}$ 直方图
Fig.8 Histograms of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ and Hf modal ages of zircons from Caledonian granitic rocks of northern Yuechengling batholith

式岩基,区内钨锡成矿作用显著(杨振,2012;程顺波等,2013),进一步促进了该岩基成岩年龄精确厘定工作.已有的高精度年龄数据(杨振,2012;Chu *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013;寇晓虎等,2014;柏道远等,2015;程顺波等,2016;陈文迪等,2016)显示(图2),加里东期花岗岩是越城岭复式岩基的主体,分布在湘桂边界以南的广袤区域内,形成时代为418~437 Ma.它明显分为两个阶段,第Ⅰ阶段花岗岩主要分布在岩基东南部,形成时间为431~438 Ma,岩性有(粗)中粒二长花岗岩、中细粒二长

花岗岩和少量花岗闪长岩;第Ⅱ阶段花岗岩分布在岩基中部和西南部,形成时间为418~429 Ma,岩性以中细粒二长花岗岩为主(程顺波等,2016).

越城岭岩基湖南部分的印支期花岗岩最早由湖南省地质矿产局418地质队在1:5万新宁幅区调中识别出来,其形成年龄包括237±9 Ma、214±9 Ma、220±6 Ma、193±25 Ma这4个全岩Rb-Sr年龄和190 Ma的锆石U-Pb年龄(钱惠林,1993).受当时测试方法和测试样本的限制,越城岭岩基内印支期成岩作用时空范围一直未被明确限定.2010—2012年,中国地质大学(武汉)地调院在岩基中北部1:5万窑市幅区调中做了大量的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年工作,获得印支期花岗岩的形成时间为233~236 Ma(寇晓虎等,2014),它们与加里东期花岗岩的岩相界线大致沿湘桂两省界线分布.本次工作在北部新宁幅内采集了4个花岗岩样品,获得222~227 Ma的成岩年龄.依据这些数据,可将越城岭岩基湖南部分全部划入印支期花岗岩分布区.在越城岭岩基广西境内,印支期花岗岩分布比较零星,有准确年龄报道的只有油榨坪、戈洞坪和界牌3处,均以岩枝或岩瘤的形式存在于加里东花岗岩中,侵位时间分别为219±2 Ma、224±4 Ma和217~220 Ma(赵葵东等,2006;陈文迪等,2016).

6.2 岩石成因

研究区印支期花岗岩样品具有强—弱过铝质($A/\text{CNK}=1.07\sim 1.17$),富钾($K_2\text{O}>4\%$)的地球化学特征. $T_{\text{DM2}}^{\text{Nd}}$ 值(平均1.82 Ga)与中国东南部变质基底的 $T_{\text{DM2}}^{\text{Nd}}$ 值(1.8~2.2 Ga)(Chen and Jahn, 1998)非常接近.此类花岗岩,可能的成因有3种(王岳军等,2002):(1)二云母片岩和片麻质岩石的部分熔融(Miller, 1995);(2)准铝质的花岗质岩浆通过贫铝矿物(如角闪石等)的分离结晶演化而形成,或(3)含水条件下角闪岩—麻粒岩的部分熔融所致(Ellis and Thompson, 1986).通常准铝质花岗质岩浆的分异作用和斜长角闪岩、基性麻粒岩等在0.1~1.0 GPa下熔融将形成富Na、Sr的弱过铝长英质熔体,不大可能产生过铝质高钾熔体(Zen, 1986; Rutter and Wyllie, 1988; 钟应先等,1993).同时,许多实例表明大陆下地壳即使含水达4%,其深熔作用仅产生2%~5%的熔体体积(Carter *et al.*, 1981; Patino *et al.*, 1990),难以形成大体积的过铝质富钾花岗岩基(Carter *et al.*, 1981; 钟应先等,1993; Zen, 1986).因此,研究区印支期花岗岩的形成主要受地壳内云母类矿物脱水熔融,而不是角闪

表 5 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 MC-ICP-MS Hf isotopic analysis of zircons from Indonesian granitic rocks of northern Yuechengling batholith

	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值	$2\sigma(10^{-6})$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值	$t(\text{Ma})$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	$T_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$
14D529 中粒斑状二长花岗岩										
1	0.282 345	10	0.001 047	0.039 851	216	-10.5	0.4	1 913	46	-0.97
2	0.282 385	8	0.001 312	0.056 730	220	-9.1	0.3	1 824	37	-0.96
3	0.282 417	9	0.000 691	0.028 108	228	-7.7	0.3	1 742	40	-0.98
4	0.282 465	8	0.000 594	0.027 083	219	-6.1	0.3	1 639	37	-0.98
5	0.282 444	9	0.000 747	0.032 394	220	-6.9	0.3	1 686	39	-0.98
6	0.282 337	9	0.001 057	0.040 007	223	-10.7	0.3	1 927	42	-0.97
7	0.282 329	7	0.001 325	0.052 851	218	-11.1	0.2	1 949	30	-0.96
8	0.282 446	8	0.000 786	0.037 774	219	-6.8	0.3	1 684	34	-0.98
9	0.282 374	9	0.001 470	0.060 459	224	-9.4	0.3	1 848	40	-0.96
10	0.282 341	8	0.001 622	0.057 732	224	-10.6	0.3	1 923	36	-0.95
11	0.282 366	8	0.001 370	0.049 643	228	-9.6	0.3	1 862	37	-0.96
12	0.282 356	8	0.001 212	0.055 329	223	-10.0	0.3	1 885	37	-0.96
13	0.282 368	7	0.001 552	0.070 197	252	-9.0	0.3	1 845	33	-0.95
14	0.282 409	8	0.000 876	0.039 117	226	-8.0	0.3	1 762	38	-0.97
15	0.282 391	7	0.001 379	0.055 278	227	-8.7	0.3	1 806	32	-0.96
16	0.282 451	8	0.000 697	0.027 186	219	-6.7	0.3	1 673	36	-0.98
17	0.282 463	8	0.000 913	0.035 409	223	-6.2	0.3	1 645	36	-0.97
18	0.282 396	9	0.001 369	0.047 421	225	-8.6	0.3	1 796	39	-0.96
19	0.282 146	10	0.004 480	0.154 253	225	-17.9	0.3	2 379	43	-0.87
20	0.282 390	7	0.001 137	0.052 076	220	-8.9	0.3	1 811	32	-0.97
14D503 细粒少斑二长花岗岩										
1	0.282 307	10	0.001 531	0.075 226	217	-11.9	0.3	2 001	44	-0.95
2	0.282 350	10	0.001 286	0.057 883	237	-9.9	0.3	1 892	42	-0.96
3	0.282 351	8	0.001 587	0.062 218	231	-10.1	0.3	1 895	38	-0.95
4	0.282 487	10	0.000 547	0.026 019	218	-5.4	0.3	1 591	43	-0.98
5	0.282 298	8	0.000 964	0.040 256	240	-11.7	0.3	2 003	33	-0.97
6	0.282 373	8	0.001 491	0.054 791	229	-9.3	0.3	1 846	37	-0.96
7	0.282 438	11	0.000 602	0.028 837	222	-7.0	0.4	1 699	48	-0.98
8	0.282 363	9	0.000 429	0.018 505	407	-5.6	0.3	1 750	39	-0.99
9	0.282 298	8	0.001 450	0.061 492	231	-11.9	0.3	2 013	37	-0.96
10	0.282 426	9	0.000 700	0.032 060	230	-7.3	0.3	1 721	41	-0.98
11	0.282 430	8	0.001 230	0.046 437	223	-7.4	0.3	1 721	37	-0.96
13	0.282 391	8	0.001 056	0.038 332	231	-8.6	0.3	1 801	38	-0.97
14	0.282 403	9	0.000 675	0.026 493	233	-8.1	0.3	1 771	38	-0.98
15	0.282 372	8	0.001 802	0.063 456	228	-9.4	0.3	1 853	36	-0.95
17	0.282 332	8	0.001 369	0.050 538	221	-10.9	0.3	1 942	34	-0.96
18	0.282 304	8	0.001 314	0.052 672	229	-11.7	0.3	1 998	37	-0.96
19	0.282 434	8	0.000 933	0.038 990	229	-7.1	0.3	1 706	35	-0.97
20	0.282 315	9	0.001 635	0.072 530	234	-11.3	0.3	1 974	41	-0.95

石的脱水熔融所控制(王岳军等, 2002)。

对源于变质沉积岩的花岗岩, Sylvester(1998)根据全岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值将其源岩进一步分为杂砂岩(>0.3)和泥岩(<0.3)两类。早阶段花岗岩样品的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $0.30\sim0.51$, 显示其源区主要为变质杂砂岩; 晚阶段花岗岩样品的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $0.28\sim0.31$, 显示其源区为不同比例变质杂砂岩和变质泥岩混合而成。在图 9 中, 绝大多数早阶段样品点落入变质杂砂岩区域, 晚阶段样品点落入变质泥岩和变质杂砂岩的过渡区域, 与前述论证

结果一致。

相比全岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-9.3\sim-10.2$)和 $T_{\text{DM2}}^{\text{Nd}}$ 值($1.75\sim1.82$ Ga), 早阶段花岗岩样品锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($-5.4\sim-11.9$)和 $T_{\text{DM2}}^{\text{Hf}}$ 值($1.59\sim2.01$ Ga)显得更加分散。主要原因在于锆石的封闭温度高, 通过锆石 Hf 同位素可以察觉出岩石中更细微的同位素变化情况。从这个角度讲, 早阶段花岗岩样品锆石中低负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值端元可能代表其源区混入了少许新生地壳组分。

此外, 研究区花岗岩样品的 Nb/Ta 值($2.77\sim$

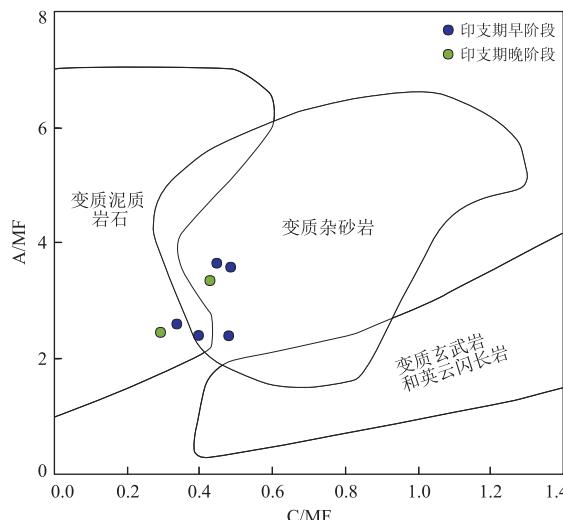


图9 越城岭岩基北部印支期花岗岩样品 C/MF-A/MF 图解图解

Fig. 9 Diagram of C/MF vs A/MF of Indonesian granitic rocks of northern Yuechengling batholith

据 Altherr *et al.* (2000)

5.12) 和 Zr/Hf 值(23.00~27.52) 都明显低于大陆地壳平均值(分别为 11.42 和 35.68; Rudnick and Gao, 2003), 说明在花岗质岩浆的形成及其演化过程中存在副矿物分离结晶(Green, 1995; Linnen and Keppler, 2002) 和/或熔体和流体之间的相互作用(Dostal and Chatterjee, 2000), 导致 Nb-Ta、Zr-Hf 这两组元素出现分馏。

6.3 成岩构造环境

虽然越来越多的印支期地质事件被发现,但是不同学者对华南印支期花岗岩的形成机制有着不同的理解。早中生代碰撞造山作用模式(Hsü *et al.*, 1990; 李继亮等, 1993) 支持印支期花岗岩形成于岛弧环境。但是越来越多的资料不支持华南内部存在早中生代洋盆或洋陆俯冲事件(Rowley *et al.*, 1989; Gilder *et al.*, 1996)。而且华南印支期花岗岩的整体呈面状分布以及缺乏同期火山岩(周新民, 2003)也不支持这一观点。岩石圈伸展减薄和基性岩浆底侵模式(郭峰等, 1998)可以很好地解释华南早侏罗世近 EW 向双峰式岩浆岩的成岩环境。但是研究区印支期花岗岩体出露面积超过 200 km², 未见同期中基性岩浆岩包体或者基性岩, 可见这种模式也不适用于研究区过铝质花岗岩。板块水平俯冲模式(Li and Li, 2007) 支持中生代花岗岩均为太平洋板块西向水平俯冲的结果。但是太平洋从约 140 Ma 才开始向西俯冲(孙卫东等, 2008 及其引用文献), 而且俯冲形成的火成岩带宽度不超过 150 km(李武

显和周新民, 2000), 不能合理解释研究区花岗岩的成岩环境。

还有一种观点认为华南 240~220 Ma 的过铝质花岗岩形成于加厚地壳环境(王岳军等, 2002; 孙涛等, 2003; 邓希光等, 2004; Wang *et al.*, 2005, 2007b), 证据包括赣湘桂粤地区以浅海台地沉积为特征, 缺失中三叠统; 华南内陆地区早三叠世以前的地层普遍褶皱变形并伴随一系列的逆冲推覆构造(Chen, 1999), 韧性推覆(/走滑)断裂带内云母的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄介于 249~195 Ma(彭少梅等, 1995; Wang *et al.*, 2005); 湘中沩山、关帝庙唐市单元和白马山龙潭超单元岩体内普遍发育挤压变形石英闪长质包体和似片麻状构造, 以及石英波状消光、云母扭曲等特征(Wang *et al.*, 2007a)。除韧性断裂年龄未知外, 其他证据均可在研究区找到, 如穿过研究区的涟源—资源—新化—城步等断层组在印支期具有西向逆冲推覆的特点(李三忠等, 2011)、岩体西部存在多条左旋韧性剪切带(张桂林等, 2002) 等, 因此加厚地壳模式可以用来解释研究区印支期花岗岩成岩环境。

印支期变质峰期在不同地区存在差异, 如桂南旧州岩体麻粒岩相变质时间为 253 Ma 左右(Zhao *et al.*, 2010), 浙西南中元古带变质基底角闪岩相变质时间为 251~235 Ma(向华等, 2008), 而秦岭一大别造山带含柯石英超高压相变质时间为 239~231 Ma(刘福来等, 2006)。研究区花岗岩的形成时间(227~221 Ma) 略晚于区域印支期变质峰期时间的上限, 同时还稍早于云开地区逆冲推覆构造挤压活动时间(D₂) 上限(~220 Ma) 和走滑活动(D₃) 的下限(~218 Ma)(Wang *et al.*, 2007a)。在岩体西侧 14D561 点处, 可见晚阶段花岗岩岩株沿早阶段花岗岩中的韧性剪切带侵入, 并被更晚的、强度明显变弱的另一期韧性剪切带所切割的地质现象。据此进一步分析, 研究区花岗岩的侵位很可能与印支期后造山加厚地壳背景下岩基旁侧深大断裂的松弛调整相关。

7 结论

越城岭岩基中印支期花岗岩主要分布在湘桂边界以北区域, 形成时代 236~222 Ma。岩性以含电气石的二长花岗岩为主, 副矿物组合为锆石、(斜) 黜帘石、磷灰石、石榴石, 并具有高硅、富碱、贫钙、镁和磷, 弱一强过铝质的地球化学特征。早阶段花岗岩源

区主要为变质杂砂岩,可能混入了少许新生地壳组分,晚阶段花岗岩源区由不同比例的变质泥质岩石和变质杂砂岩组成。花岗质岩浆的形成受控于华南印支期后造山加厚地壳背景下变沉积岩中云母类矿物的脱水熔融过程,其运移和就位与岩基旁侧深大断裂的松弛调整密切相关。

致谢:匿名审稿人对文章修改提出了许多宝贵建议,在此致以衷心的感谢!

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1–3): 51–73. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00052-3)
- Bai, D.Y., Jia, B.H., Liu, W., et al., 2010. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of the Igneous Rocks from Chengbu, Hunan: Constraint on the Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Jiangnan Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1715–1726 (in Chinese with English abstract).
- Bai, D.Y., Zhong, X., Jia, P.Y., et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Geochemistry of Caledonian Miao’Ershan Pluton in the Western Part of the Nanling Mountains and their Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(3): 407–423 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6524.2014.03.001>
- Bai, D.Y., Zhong, X., Jia, P.Y., et al., 2015. The Zircon SHRIMP U-Pb Dating, Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Caledonian Yuechengling Pluton in the Western Segment of the Nanling Mountains. *Geochimica*, 44(1): 27–42 (in Chinese with English abstract).
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 243–258. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00040-x)
- Carter, A., Roques, D., Bristow, C., et al., 2001. Understanding Mesozoic Accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic Thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29(3): 211–214. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029-0211](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029-0211)
- Carter, N.L., Anderson, D.A., Hansen, F.D., 1981. Creep and Creep Rupture of Granitic Rocks. In: Carter, N. L. ed., Mechanical Behavior of Crustal Rocks. *Geophysical Monograph*, 24: 61–102.
- Chen, A., 1999. Mirror-Image Thrusting in the South China Orogenic Belt: Tectonic Evidence from Western Fujian, Southeastern China. *Tectonophysics*, 305(4): 497–519. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(99\)00036-0](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(99)00036-0)
- Chen, J.F., Jahn, B.M., 1998. Crustal Evolution of Southeastern China: Nd and Sr Isotopic Evidence. *Tectonophysics*, 284(1–2): 101–133. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(97\)00186-8](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(97)00186-8)
- Chen, W.D., Zhang, W.L., Wang, R.C., et al., 2016. A Study on the Dushiling Tungsten-Copper Deposit in the Miao’ershansh-Yuechengling Area, Northern Guangxi, China: Implications for Variations in the Mineralization of Multi-Aged Composite Granite Plutons. *Science China Earth Sciences*, 46(12): 1602–1625 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5360-3>
- Cheng, S.B., Fu, J.M., Ma, L.Y., et al., 2013. Indosinian Metallogenesis Activity in Yuechengling-Miaoershansh Area, Northeastern Guangxi: Implications from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Constraint on Ore-Forming Granites in Youmaling and Jiepai Deposits. *Geology in China*, 40(4): 1189–1201 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S.B., Fu, J.M., Ma, L.Y., et al., 2016. Origin of the Yuechengling Caledonian Granitic Batholith, Northeastern Guangxi: Constraint from Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Nd-Hf Isotopes. *Geotectonica et Metallogenesis*, 40(4): 868–887 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2016.04.017>
- Chu, Y., Lin, W., Faure, M., et al., 2012. Phanerozoic Tectonothermal Events of the Xuefengshan Belt, Central South China: Implications from U-Pb Age and Lu-Hf Determinations of Granites. *Lithos*, 150: 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.005>
- Corfu, F., John, M.H., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. In: Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., eds., *Zircon Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500.
- Deng, X.G., Chen, Z.G., Li, X.H., et al., 2004. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Darongshan-Shiwangdashan Granitoid Belt in Southeast Guangxi, China. *Geological Review*, 50(4): 426–432 (in Chinese with English abstract).
- Dostal, J., Chatterjee, A.K., 2000. Contrasting Behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf Ratios in a Peraluminous Granitic Pluton (Nova Scotia, Canada). *Chemical Geology*, 163(1–4): 207–218. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(99\)00113-8](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(99)00113-8)
- Du, Y., Luo, X.Y., Huang, G.F., 2017. Petrological, Geochemical Characteristics and Formation Tectonic Setting of Neoproterozoic Jinning Granite in the Northern Section

- of Miaoershan Pluton in Southwestern Hunan. *Geological Science and Technology Information*, 36(6):136—147 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.2017.0614>
- Ellis, D. J., Thompson, A. B., 1986. Subsolidus and Partial Melting Reactions in the Quartz-Excess $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ System under Water-Excess and Water-Deficient Conditions to 10 kb: Some Implications for the Origin of Peraluminous Melts from Mafic Rocks. *Journal of Petrology*, 27(1):91—121. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.1.91>
- Fromaget, J., 1932. Surla Structure des Indosinides. *Comptes Rendus de l' Académie des Sciences*, 195:538.
- Gilder, S.A., Gill, J., Coe, R.S., et al., 1996. Isotopic and Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic Tectonic Evolution of South China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B7):16137—16154. <https://doi.org/10.1029/96jb00662>
- Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3—4):347—359. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00145-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00145-x)
- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3—4):237—269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Guangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, 1985. Regional Geology of the Guangxi Zhuang Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing, 409 (in Chinese).
- Guo, F., Fan, W. M., Lin, G., 1998. Nature of the Precambrian Crust and Underplating of Early Mesozoic Basaltic Magmas in South Hunan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(Suppl.): 19—22 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.1998.s1.004>
- Guo, F. X., 1998. On the Indosian Movement of Southeast China. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 18(4):313—322 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., Li, J. L., Chen, H. H., et al., 1990. Tectonics of South China: Key to Understanding West Pacific Geology. *Tectonophysics*, 183(1—4):9—39. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90186-c](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90186-c)
- Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988. Regional Geology of Hunan. Geological Publishing House, Beijing, 385 (in Chinese).
- Jahn, B. M., Condie, K. C., 1995. Evolution of the Kaapvaal Craton as Viewed from Geochemical and Sm-Nd Isotopic Analyses of Intracratonic Pelites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(11):2239—2258. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00103-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00103-7)
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources, 1984. Regional Geology of Jiangxi. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Kinny, P.D., Maas, R., 2003. Lu-Hf and Sm-Nd Isotope Systems in Zircon. In: Hanchar, J. M., Hoskin, P. W. O., eds., *Zircon Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53:327—341.
- Kou, X. H., Luo, M. S., Ji, J. L., et al., 2014. Program Report of 1:50 000 Regional Geological Survey in Meixi, Yaoshi, Jiangtoucun, Ziyuanxian, Longshui, Huangshahe Area, Guangxi, 208 (in Chinese with English abstract).
- Li, F. S., Zhou, H. X., 2002. The Characteristics and Its Fixed Mechanism of Granite Unit and Super-Unit of Miaoershan Mountain. *Hunan Geology*, 21(1):20—25 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., 1993. Lithospheric Texture and Geological Envolve-ment of South China. Metallurgical Industry Press, Beijing, 47—123 (in Chinese).
- Li, S. Z., Wang, T., Jin, C., et al., 2011. Features and Causes of Indosian Intracontinental Structures in the Xuefengshan Precambrian Basement and its Neighboring Regions. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(1):93—105 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.2011.01.003>
- Li, W. X., Zhou, X. M., 2000. Genesis of Coastal Igneous Rock Province of Fujian and Zhejiang, China: Constraint from Geochemistry. *Advance in Earth Science*, 10(7):630—641 (in Chinese).
- Li, Z. X., Li, X. H., 2007. Formation of the 1 300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduc-tion Model. *Geology*, 35(2):179. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- Linnen, R. L., Keppler, H., 2002. Melt Composition Control of Zr/Hf Fractionation in Magmatic Processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(18):3293—3301. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(02\)00924-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(02)00924-9)
- Liu, F. L., Xue, H. M., Xu, Z. Q., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Dating from Eclogite Lens in Marble, Shuanghe Area, Dabie UHP Terrane: Restriction on the Prograde, UHP and Retrograde Metamorphic Ages. *Acta Petro-logica Sinica*, 22(7):1761—1778 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Liu, Y. R., Zhang, X. Y., et al., 2011. New Progresses in 1:50 000 Regional Geological Survey in Chengbu Area, Hunan Province. *Geology and Mineral Resources*

- of South China*, 27(4): 307—313 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571 <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Lu, Y.F., 2004. Geokit: A Geochemical Toolkit for Microsoft Excel. *Geochemistry*, 33(5): 459—464 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, 39.
- Meng, Q. R., Zhang, G. W., 2000. Geologic Framework and Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, Central China. *Tectonophysics*, 323(3—4): 183—196. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(00)00106-2)
- Miller, C. F., 1985. Are Strongly Peraluminous Magmas Derived from Pelitic Sedimentary Sources? *The Journal of Geology*, 93(6): 673—689. <https://doi.org/10.1086/628995>
- Patino, D. A. E., Humphreys, E. D., Johnston, D. A., 1990. Anatexis and Metamorphism in Tectonically Thickened Continental Crust Exemplified by the Sevier Hinterland, Western North America. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(3—4): 290—315. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(90\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(90)90048-3)
- Peng, S. M., Fu, L. F., Zhou, G. Q., 1995. Tectonic Envolve-ment and Genesis of Gneissic Granitoids. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Qian, H. L., 1993. Syntectonic Migmatization in the Ductile-Shear Zone at Western Margin of Yuechengling Uplift. *Hunan Geology*, 12(1): 11—14 (in Chinese with English abstract).
- Rowley, D.B., Ziegler, A.M., Gyoo, N., et al., 1989. Comment and Reply on “Mesozoic Overthrust Tectonics in South China”. *Geology*, 17(4): 384. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017-0384](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017-0384)
- Rudnick, R.L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R.C., ed., *The Crust*, Elsevier Pergamon, Oxford, 1—56.
- Rutter, M. J., Wyllie, P. J., 1988. Melting of Vapour-Absent Tonalite at 10 kbar to Simulate Dehydration-Melting in the Deep Crust. *Nature*, 331(6152): 159—160. <https://doi.org/10.1038/331159a0>
- Shen, W.Z., Xu, S.J., Wang, Y.X., et al., 1994. Nd-Sr Isotopes of Xihuashan Granites, Southern Jiangxi. *Chinese Science Bulletin*, 39(2): 154—156 (in Chinese).
- Shi, S. H., Hu, R. Z., Wen, H. J., 2010. Geochronology of the Shazijiang Uranium Ore Deposit, Northern Guangxi, China: U-Pb Ages of Pitchblende and Their Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1175—1182 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035—1053 (in Chinese with English abstract).
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., et al., 2004. The ¹⁷⁶Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 311—324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- Sun, T., 2003. Petrogenesis and Tectonic Significance of Mesozoic Strong Peraluminous Granites in Eastern Nanling Range. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209—1218 (in Chinese).
- Sun, W.D., Ling, M.X., Wang, F.Y., 2008. Pacific Plate Subduc-tion and Mesozoic Geological Event in Eastern China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(3): 218—225 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sylvester, P.J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1—4): 29—44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Cawood, P.A., et al., 2007a. Indosini-an High-Strain Deformation for the Yunkaidashan Tectonic Belt, South China: Kinematics and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronological Constraints. *Tectonics*, 26(6): 229—247. <https://doi.org/10.1029/2007tc002099>
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Sun, M., et al., 2007b. Geochronolog-ical, Geochemical and Geothermal Constraints on Petro-genesis of the Indosinian Peraluminous Granites in the South China Block: A Case Study in the Hunan Prov-ince. *Lithos*, 96(3—4): 475—502. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.11.010>
- Wang, Y.J., Fan, W.M., Zhang, G.W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observa-

- tions and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305. <https://doi.org/10.13039/501100002367>
- Wang, Y.J., Zhang, Y.H., Fan, W.M., et al., 2005. Structural Signatures and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of the Indosinian Xuefengshan Tectonic Belt, South China Block. *Journal of Structural Geology*, 27(6): 985–998. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.04.004>
- Wang, Y.J., Zhang, Y.H., Fan, W.M., et al., 2002. Numerical Modeling of the Formation of Indo-Sinian Peraluminous Granitoids in Hunan Province: Basaltic Underplating Versus Tectonic Thickening. *Science in China (Series D)*, 32(6): 491–499 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/bf02911241>
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrological Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1000-0569/2007/023\(02\)-0185-20](https://doi.org/10.1000-0569/2007/023(02)-0185-20)
- Wu, J., Liang, H.Y., Huang, W.T., et al., 2012. Indosinian Isotope Ages of Plutons and Deposits in Southwestern Miaoershan-Yuechengling, Northeastern Guangxi and Implications on Indosinian Mineralization in South China. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1126–1136 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/s11434-011-4968-z>
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1007/bf03184122>
- Xiang, H., Zhang, L., Zhou, H.W., et al., 2008. U-Pb Zircon Geochronology and Hf Isotope Study of Metamorphosed Basic-Ultrabasic Rocks from Metamorphic Basement in Southwestern Zhejiang: The Response of the Cathaysia Block to Indosinian Orogenic Event. *Science in China (Series D)*, 38(4): 401–413 (in Chinese). <https://doi.org/10.1007/s11430-008-0053-0>
- Xie, X.H., Chen, W.F., Zhao, K.D., et al., 2008. Geochemical Characteristics and Geochronology of the Douzhashan Granite, Northeastern Guangxi Province, China. *Acta Petrological Sinica*, 24(6): 1302–1312 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., 2012. Pre-Yanshanian Magmatism and Its Mineralization in the Miaoershan-Yuechengling Area, Northern Guangxi Province (Dissertation). Nanjing University, Nanjing. 1–54 (in Chinese with English abstract).
- Zen, E.A., 1986. Aluminum Enrichment in Silicate Melts by Fractional Crystallization: Some Mineralogic and Petrographic Constraints. *Journal of Petrology*, 27(5): 1095–1117. [https://doi.org/10.1093/petrology/](https://doi.org/10.1093/petrology/10.1093/petrology/)
- 27.5.1095
- Zhang, D., Zhang, W.L., Wang, R.C., et al., 2015. Quartz-Vein Type Tungsten Mineralization Associated with the Indosinian (Triassic) Gaoling Granite, Miao'ershan Area, Northern Guangxi. *Geological Review*, 61(4): 817–834 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2015.04.009>
- Zhang, G.L., Liang, J.C., Feng, Z.H., et al., 2002. Discovery of Detached Ductile Shear Zone and Its Structural Mechanism in the West of Yuechengling Granite Pluton. *Geotectonic et Metallogenetic*, 26(2): 131–137 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Xu, X.B., Jia, D., et al., 2009. Deformation Record of the Change from Indosinian Collision-Related Tectonic System to Yanshanian Subduction-Related Tectonic System in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Sun, T., et al., 2006. The Phenomenon of Hf-Nd Isotopic Decoupling of Indosinian Granites in the Western Nanling Range and Its Petrogenesis. National Conference Collection of Petrology and Geodynamics, Beijing, 435 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Sun, T., et al., 2013. Zircon U-Pb Dating, Trace Element and Sr-Nd-Hf Isotope Geochemistry of Paleozoic Granites in the Miao'ershan-Yuechengling Batholith, South China: Implication for Petrogenesis and Tectonic-Magmatic Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 244–264. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.12.026>
- Zhao, L., Guo, F., Fan, W.M., et al., 2010. Crustal Evolution of the Shiwandashan Area in South China: Zircon U-Pb-Hf Isotopic Records from Granulite Enclaves in Indo-Sinian Granites. *Chinese Science Bulletin*, 55(19): 2028–2038. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3225-1>
- Zhong, Y.X., Liu, Y.C., Cai, X.L., 1993. Study of the Granulite Xenoliths from the Lower Crust in Basalt, Hunan, China. *Journal of Chengdu College of Geology*, 20(1): 56–61 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., 2003. My Thinking about Granite Geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556–565 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29: 26–33. <https://doi.org/10.18814/epigsi/2006/v29i1/62224>

附中文参考文献

- 柏道远,贾宝华,刘伟,等,2010.湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其对江南造山带新元古代构造演化的约束.地质学报,84(12): 1715—1726.
- 柏道远,钟响,贾朋远,等,2014.南岭西段加里东期苗儿山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义.岩石矿物学杂志,33(3): 407—423.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6524.2014.03.001>
- 柏道远,钟响,贾朋远,等,2015.南岭西段加里东期越城岭岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地质地球化学特征及其形成构造背景.地球化学,44(1): 27—42.
- 陈文迪,张文兰,王汝成,等,2016.桂北苗儿山—越城岭地区独石岭钨(铜)矿床研究:对复式岩体多时代差异性成矿的启示.中国科学:地球科学,46(12): 1602—1625.
- 程顺波,付建明,马丽艳,等,2013.桂东北越城岭—苗儿山地区印支期成矿作用:油麻岭和界牌矿区成矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约.中国地质,40(4): 1189—1201.
- 程顺波,付建明,马丽艳,等,2016.桂东北越城岭岩体加里东期成岩作用:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约.大地构造与成矿学,40(4): 868—887.
<https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2016.04.017>
- 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.地质论评,50(4): 426—432.<https://doi.org/10.16509/j.georeview.2004.04.017>
- 杜云,罗小亚,黄革非,2017.湘西南苗儿山岩体北段新元古代晋宁期花岗岩岩石学、地球化学特征及其形成构造背景.地质科技情报,36(6): 136—147.
- 广西壮族自治区地质矿产局,1985.广西壮族自治区区域地质志.北京:地质出版社,409.
- 郭锋,范蔚,林舸,1998.湘南前寒武纪地壳性质与早中生代玄武岩浆底侵作用.大地构造与成矿学,22(S1): 19—22.<https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.1998.s1.004>
- 郭福祥,1998.关于华南东部的印支运动.桂林工学院学报,18(4): 313—322.
- 湖南省地质矿产局,1988.湖南省区域地质志.北京:地质出版社,385.
- 江西省地质矿产局,1984.江西省区域地质志.北京:地质出版社.
- 寇晓虎,骆满生,季军良,等,2014.广西 1:5 万梅溪、窑市、江头村、资源县、龙水、黄沙河幅区域地质调查成果报告,208.
- 李福顺,周厚祥,2002.苗儿山花岗岩体单元—超单元特征及其定位机制.湖南地质,21(1): 20—25.
- 李继亮,1993.东南大陆岩石圈结构与地质演化.北京:冶金工业出版社,47—123.
- 李三忠,王涛,金宠,等,2011.雪峰山基底隆升带及其邻区印支陆内构造特征与成因.吉林大学学报(地球科学版),41(1): 93—105.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5888.2011.01.012>
- 李武显,周新民,2000.浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约.自然科学进展,10(7): 630—641.<https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-008X.2000.07.007>
- 刘福来,薛怀民,许志琴,等,2006.大别超高压变质带的进变质、超高压和退变质时代的准确限定:以双河大理岩中榴辉岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年为例.岩石学报,22(7): 1761—1778.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2006.07.002>
- 刘伟,刘耀荣,张晓阳,等,2011.湖南城步地区 1:5 万区调主要成果与进展.华南地质与矿产,27(4): 307—313.
- 路远发,2004.GeoKit:一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包.地球化学,33(5): 459—464.
- 彭少梅,符力奋,周国强,1995.云开陆块构造演化及片麻状花岗质岩石的剪切深熔成因.武汉:中国地质大学出版社.
- 钱惠林,1993.论越城岭隆起西缘同构造混合岩化韧性剪切带.湖南地质,12(1): 11—14.
- 沈渭洲,徐士进,王银喜,等,1994.西华山花岗岩的 Nd-Sr 同位素研究.科学通报,39(2): 154—156.
- 石少华,胡瑞忠,温汉捷,等,2010.桂北沙子江铀矿床成矿年代学研究:沥青铀矿 U-Pb 同位素年龄及其地质意义.地质学报,84(8): 1175—1182.
- 舒良树,2012.华南构造演化的基本特征.地质通报,31(7): 1035—1053.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2012.07.003>
- 孙涛,2003.南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义.中国科学(D辑),33(12): 1209—1218.
- 孙卫东,凌明星,汪方跃,等,2008.太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件.矿物岩石地球化学通报,27(3): 218—225.
- 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.中国科学(D辑),32(6): 491—499.
- 吴福元,李献华,郑永飞,2007.Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2): 185—220.
- 伍静,梁华英,黄文婷,等,2012.桂东苗儿山—越城岭西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析.科学通报,57(13): 1126—1136.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学和微量元素地球化学.科学通报,49(16): 1589—1604.
- 向华,张利,周汉文,等,2008.浙西南变质基底基性—超基性变质岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素研究:华夏地块变质基底对华南印支期造山的响应.中国科学(D辑),38(4): 401—413.
- 谢晓华,陈卫锋,赵葵东,等,2008.桂东北豆乍山花岗岩年代

- 学与地球化学特征.岩石学报,24(6): 1302—1312.
- 杨振,2012.桂北苗儿山—越城岭地区前燕山期岩浆活动及其成矿作用的研究(硕士学位论文).南京:南京大学,1—54.
- 张迪,张文兰,王汝成,等,2015.桂北苗儿山地区高岭印支期花岗岩及石英脉型钨成矿作用.地质论评,61(4): 817—834.<https://doi.org/10.16509/j.georeview.2015.04.009>
- 张桂林,梁金城,冯佐海,等,2002.越城岭花岗岩体西侧滑脱型韧性剪切带的发现及其形成的构造体制.大地构造与成矿学,26(2): 131—137.<https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1552.2002.02.004>

- 张岳桥,徐先兵,贾东,等,2009.华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录.地质学报,16(1): 234—247.
- 赵葵东,蒋少涌,孙涛,等,2006.南岭西段印支期花岗岩 Hf-Nd 同位素解耦现象及岩石成因意义.全国岩石学与地球动力学会议论文集,北京,435.
- 钟应先,刘援朝,蔡学林,1993.湖南道县玄武岩中壳源麻粒岩包体初步研究.成都地质学院学报,20(1): 56—61.
- 周新民,2003.对华南花岗岩研究的若干思考.高校地质学报,9(4): 556—565.

《地球科学》与《中国知网》签订“网络首发”与“合作共建”协议

为加快本刊录用稿件发布的速度,提升学术期刊出版能力和质量,促进数字出版转型,《地球科学》与《中国知网》(中国学术期刊光盘版电子杂志社)签订了“网络首发学术期刊合作协议”与“合作共建与学术期刊数字出版合作协议”.自 2018 年协议生效时间起,期刊定稿的文章将优先在中国知网实现数字首发出版.作者的录用稿件将第一时间内通过中国知网发布到网上.

网络首发,是指先将论文网络出版,按出版网址和发布时间确认论文首发权,之后将论文全部在期刊印刷版出版的出版方式.网络首发的稿件可以是录用定稿、排版稿、整期定稿(已确定出版年、卷、期、页),以最早稿件为准赋予每篇文献国际 DOI 编号,按录用定稿、排版稿、整期定稿分别注明引用规范,均可被引,各稿次均在中国知网长期保存.