

赣中山庄二长花岗岩的成因与构造背景:岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年代学证据*

张建岭^{1,2} 许德如^{1,3**} 于得水^{1,2} 王智琳⁴ 叶挺威^{1,2} 于亮亮^{1,2} 朱昱桦^{1,2}

ZHANG JianLing^{1,2}, XU DeRu^{1,3**}, YU DeShui^{1,2}, WANG ZhiLin⁴, YE TingWei^{1,2}, YU LiangLiang^{1,2} and ZHU YuHua^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 东华理工大学地球科学学院, 南昌 330013

4. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

4. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

2017-05-19 收稿, 2018-5-19 改回.

Zhang JL, Xu DR, Yu DS, Wang ZL, Ye TW, Yu LL and Zhu YH. 2018. Petrogenesis and tectonic setting of the Shanzhuang monzogranites in central Jiangxi Province, South China: Evidence from lithology, geochemistry and zircon U-Pb geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6):1641–1656

Abstract This paper presents a systemic study on geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the northern monzogranite from Shanzhuang granitic pluton located on the southern part of the Qinhang Metallogenic Belt in central Jiangxi Province which comprises monzogranite and granodiorite to constrain its emplacement age, petrogenesis and tectonic setting. All zircons from the monzogranite are confirmed to be of magmatic origin by CL imaging, Th/U ratio and diagrams of $(Sm/La)_N$ -La and $Ce/Ce^*-(Sm/La)_N$ and are divided into three groups. The weighted mean age (420 ~ 419Ma) of the first group is interpreted as crystallization age of the monzogranite. The Shanzhuang monzogranite, which has SiO_2 content of 71.48% ~ 66.20%, K_2O/Na_2O ratio of 1.24 ~ 0.99 and A/CNK ratio of >1.1 , with the emergences of muscovite and garnet as well as ACF diagram and negative correlations of Rb with Th and Y, belongs to high K calc-alkaline, strongly peraluminous S-type granite. Meanwhile, this type rock defined by a depletion in large ion lithophile elements Ba and Sr and high field strength elements Nb and Ta is interpreted as a product of partial melting of the crust-derived materials. The ratios of CaO/Na_2O (0.14 ~ 0.07), Rb/Sr (8.27 ~ 3.83) and Rb/Ba (1.48 ~ 0.82), the content of $FeO^T + MgO + TiO_2$ (2.4 ~ 1.8) and the t_{2DM} ages (2031 ~ 1971Ma) together suggest that the protolith of the monzogranite is Paleoproterozoic clay-rich argillaceous rocks. Moreover, the monzogranite is likely formed at a temperature condition (722 ~ 720°C) constrained by saturation- and Ti temperatures of zircon, and a pressure condition of 2.71 ~ 3.21kbar constrained by the Ti-in-biotite geothermometer. Combined with the Paleozoic tectonic development of South China, the diagram of Rb-(Y + Nb) shows that the geological setting of Shanzhuang granitic pluton is post-collision. In summary, the Shanzhuang pluton was formed by partial melting of Paleoproterozoic clay-rich argillaceous rocks at a low temperature and a low pressure condition under post-collisional setting.

Key words Shanzhuang granitic pluton; Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; Geochemistry and Sr-Nd isotopes; Post-collision; Central Jiangxi Province of South China

摘要 赣中山庄花岗岩岩体位于钦杭成矿带的南侧, 岩性上包括二长花岗岩和花岗闪长岩。本文对岩体北部的二长花岗岩开展了年代学、地球化学及同位素研究以约束该岩体的形成时代、岩石成因及成岩构造背景。锆石 CL 图像、Th/U 比值、

* 本文受国家自然科学基金项目(41472171)和国家重点研发计划项目(2016YFC0600401)联合资助。

第一作者简介: 张建岭, 男, 1985 年, 博士生, 构造地质专业, E-mail: 854130386@qq.com

** 通讯作者: 许德如, 男, 1966 年, 研究员, 构造地质专业, E-mail: xuderu@gig.ac.cn

以及 $(\text{Sm}/\text{La})_N$ -La 和 $\text{Ce}/\text{Ce}^+ - (\text{Sm}/\text{La})_N$ 图解均表明,二长花岗岩所有锆石晶体为岩浆成因;其中第一组锆石加权平均年龄为 420~419Ma,代表了岩浆结晶年龄。该花岗岩 SiO_2 含量为 71.48%~66.20%、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.24~0.99、 $\text{A}/\text{CNK} > 1.1$;结合白云母和石榴石的出现、ACF 图解、Rb-Th、Rb-Y 的负相关性,山庄二长花岗岩属高钾钙碱性强过铝质 S 型花岗岩。同时,该岩石亏损大离子亲石元素 Ba 和 Sr 以及高场强元素 Nb 和 Ta,说明系壳源物质部分熔融的产物。 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(0.14~0.07)、Rb/Sr 值(8.27~3.83)、Rb/Ba 值(1.48~0.82)、 $\text{FeO}^T + \text{MgO} + \text{TiO}_2$ 含量(2.4~1.8)和二阶段 Nd 模式年龄($t_{2DM} = 2031 \sim 1971\text{Ma}$)进一步说明二长花岗岩的源岩是古元古代的富粘土的泥质岩。锆石的饱和温度和 Ti 温度计计算结果表明二长花岗岩岩浆形成温度为 722~720°C,黑云母的全铝温度计则反映其形成压力为 3.21~2.71kbar。结合花岗岩构造环境判别图以及华南大地构造演化特征,山庄花岗岩岩体可能是在后碰撞环境下由古元古代富粘土泥质岩于低温低压条件下部分熔融的结果。

关键词 山庄花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;地球化学和 Sr-Nd 同位素;后碰撞;江西中部

中图法分类号 P588.121; P597.3

随着研究程度的不断加深,中国地质调查局近期把过去认为是华南成矿区的钦杭结合带单列为华南一个最重要的多金属成矿带来研究。目前钦杭结合带已成为华南最重要的多金属成矿带。前人对华南及钦杭成矿带的构造演化作了很多工作,包括加里东期的构造-热事件,但是对加里东造山事件的性质仍未有统一认识(Wang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2007, 2008; Li, 1998),争论的焦点是:华南加里东造山带是陆内造山,还是与大洋(古华南洋?)演化事件有关。许多学者通过沉积学研究,认为扬子和华夏两个独立板块被古华南洋分隔,在 1000Ma 左右的晋宁运动 I 幕时,华南洋向两板块俯冲,在扬子板块东南缘形成褶皱带和在华夏古陆北缘形成沟弧盆体系;在 880~850Ma 的晋宁运动 II 幕时,两板块间的古华南洋在扬子陆块东段消失,向西南散开的华南残洋的中-西段在后期的构造运动中不断碰撞关闭,直至加里东期(陈洪德等, 2006; 尹福光等, 2001; 殷鸿福等, 1999)。何卫红等(2014, 及文内参考文献)在钦杭结合带中发现 TTG 岩套及蛇绿岩套,岛弧和洋底性质的火山岩(667~254Ma),同时结合扬子与华夏两板块的岩相古地理,共同证实了华南洋的存在和华夏与扬子两板块在早古生代未发生碰撞,华南洋消失的事实。不过,Wang *et al.* (2011, 2012)、李聪等(2010)、舒良树(2006, 2012)、舒良树等(2008)、张芳荣等(2009)、Faure *et al.* (2009)、Zheng *et al.* (2008)、王森和舒良树(2007)认为随着 Rodinia 超大陆的裂解,扬子板块与华夏板块发生分离,形成陆内裂谷盆地;到加里东时期,扬子与华夏板块的结合部位发生碰撞造山运动,其时间大致在 460~415Ma 之间(Wang *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2010)。

上述看似矛盾的观点,实际并不矛盾。华南加里东造山与大洋事件有关的观点探讨了扬子板块和华夏板块在元古代碰撞的不完全性和不均匀性,导致古华南洋在加里东期的残存;而华南加里东造山属陆内性质的观点是在没有讨论扬子板块与华夏板块碰撞的不均一性的基础上认为始终不存在古华南洋而得出的结论。

花岗岩的成因与大地构造背景关系密切,其地球化学特征不仅示踪岩浆作用过程,也能广泛用于地球动力学背景(Sylvester, 1998; Finger *et al.*, 1997)。早古生代时,大量的

花岗岩在华南发育,时代为 465~430Ma,大部分是 S 型或壳源花岗岩,少部分是 I 型或壳幔混合型花岗岩,这些花岗岩均是板内或后碰撞环境下形成的(叶鸣等, 2015; 熊松泉等, 2015; 张乔, 2015; 崔圆圆, 2014; 熊昌利等, 2012)。

江西中部(简称“赣中”)山庄花岗岩岩体位于钦杭成矿带的南侧,对其成因和成岩地质背景的研究有助于判定华南加里东造山事件的性质。近年来对山庄花岗岩的岩石学、地球化学和同位素年代学方面的研究有了初步进展。江西省地质矿产局(1984)镜下鉴定山庄花岗岩为黑云斜长花岗岩;舒良树等(2000)作了山庄花岗岩体的 Nd-Sr 同位素研究;楼法生等(2002, 2005)分别作了山庄花岗岩地球化学、单颗粒锆石 U-Pb 定年(TIMS)分析;Wang *et al.* (2011)作了山庄花岗岩的锆石 U-Pb 定年分析(LA-SIMS)。前人对山庄花岗岩体的岩性与年龄分析并没有统一,且对山庄花岗岩源岩的地质特征及其成岩背景研究较薄弱。为解决这些问题、并为阐明华南加里东造山事件性质提供进一步依据,本文开展了山庄岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素的分析。

1 区域地质概况

赣中山庄花岗岩岩体位于华夏地块和扬子地块碰撞缝合带,即钦杭成矿带南侧的华南加里东褶皱带中段,武功山-北武夷复背斜西段(余志庆等, 1989)。

区内构造较为发育,山庄花岗岩岩体主要被北部的广丰-萍乡深大断裂及南部的神山大断裂围限,其东部为神山倒转背斜,西部为穹窿构造(图 1)(江西省地质矿产局, 1984)。地层由西部的震旦系和寒武系向东逐渐过渡为中元古界神山群(Pt₂ss)和青白口系潭头群(Qbt)及南华系杨家桥群(Nhy),上述各地层均遭受了中浅变质,其中杨家桥群下坊组是新余铁矿的赋矿层位;围限山庄花岗岩岩体的断裂外围的地层主要为石炭系、二叠系、三叠系,多分布在安福和萍乡盆地(江西省地质矿产局, 1984)。区内经历了多期次的构造事件,其岩浆活动也相当发育。形成的岩体主要加里东期的山庄花岗岩、张家坊和武功山花岗岩,燕山期的断泉、

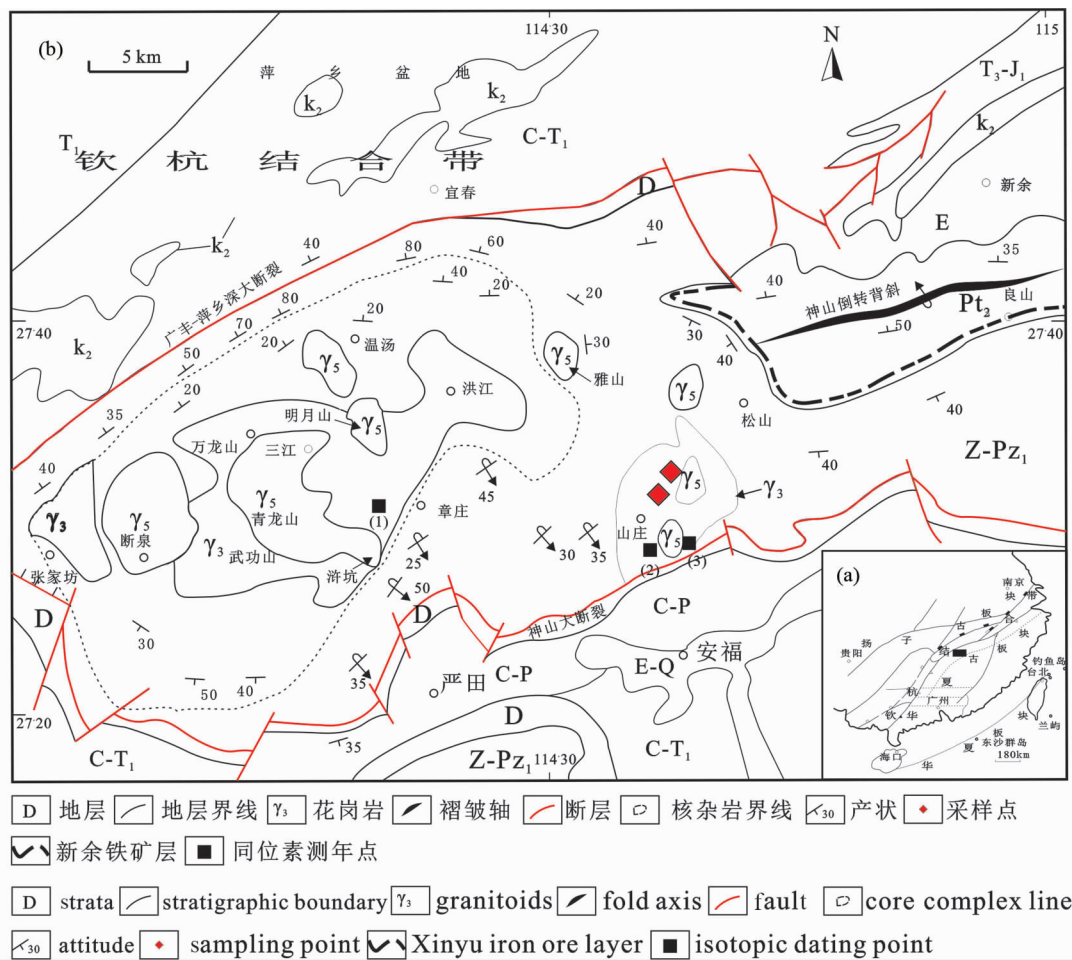


图1 山庄花岗岩区域地质图(a, 据杨明桂等, 2009; b, 据楼法生等, 2005 修改)

(1) $457 \pm 3\text{Ma}$ (锆石 U-Pb LA, 楼法生等, 2005); (2) $424 \pm 3\text{Ma}$ (锆石 U-Pb LA/SIMS, Wang *et al.*, 2011); (3) 411Ma; $461 \pm 2\text{Ma}$ (全岩 Rb-Sr, 汤加富等, 1991; 锆石 U-Pb LA, 楼法生等, 2005); Q-第四系冲积层; E-古近系红层; K₂-上白垩统红层; T₃-J₁-上叠统-下侏罗统碎屑岩; T₁-C-下三叠统沉积岩-石炭系; P-C-二叠系-石炭系碳酸盐; Z-Pz₁-变质变形的震旦系-下古生界岩石; Pt₂-中元古界神山群板岩、千枚岩、片岩; γ_5 -燕山期花岗岩; γ_3 -加里东期花岗岩

Fig. 1 Regional geological map of Shanzhuang granitic pluton (a, modified after Yang *et al.*, 2009; b, modified after Lou *et al.*, 2005)

(1) $457 \pm 3\text{Ma}$ (zircon U-Pb LA, after Lou *et al.*, 2005); (2) $424 \pm 3\text{Ma}$ (zircon U-Pb LA/SIMS, after Wang *et al.*, 2011); (3) 411Ma; $461 \pm 2\text{Ma}$ (whole rock Rb-Sr, after Tang *et al.*, 1991; zircon U-Pb LA, after Lou *et al.*, 2005); Q-Quaternary alluvial deposit; E-Paleogene red bed; K₂-Upper Cretaceous red bed; T₃-J₁-Upper Triassic to Lower Jurassic clastic rocks; T₁-C-Lower Triassic to Carboniferous sedimentary rocks; P-C-Permian to Carboniferous carbonate; Z-Pz₁-Metamorphic and deformed Sinian-Lower Paleozoic rocks; Pt₂-Slate, phyllite and schist of Shenshan Group, γ_5 -Yanshanian granitoids; γ_3 -Caledonian granitoids

青龙山、明月山、温汤、雅山、山庄和松山花岗岩岩体等 (Wang *et al.*, 2011; 楼法生等, 2002, 2005; 江西省地质矿产局, 1984) (图 1)。

2 岩体地质与岩相学特征

山庄花岗岩体总体呈南北向延伸, 呈椭圆形和反“σ”形分布于武功山岩体和新余铁矿之间 (图 1), 面积达 120km² (江西省地质矿产局, 1984), 与张家坊和武功山岩体一起构

成近东西向的加里东期岩浆岩带。山庄花岗岩体侵入到震旦系、寒武系地层中, 并被上泥盆统覆盖, 后又被燕山期花岗岩侵入。岩体有轻度蚀变, 北部岩性为二长花岗岩 (系本文厘定), 南部岩性为花岗闪长岩 (楼法生等, 2002)。岩体北南部的岩性接触关系因露头差暂未确定。在岩体南部的边缘部位, 花岗闪长岩内可见大小为 50 ~ 180cm 闪长岩包体, 主要由斜长石和角闪石等矿物组成 (楼法生等, 2002)。

岩体北部岩性呈中粒等粒结构, 块状构造, 局部见似斑状结构。成岩矿物主要为石英 (28% ~ 25%)、钾长石 (25%

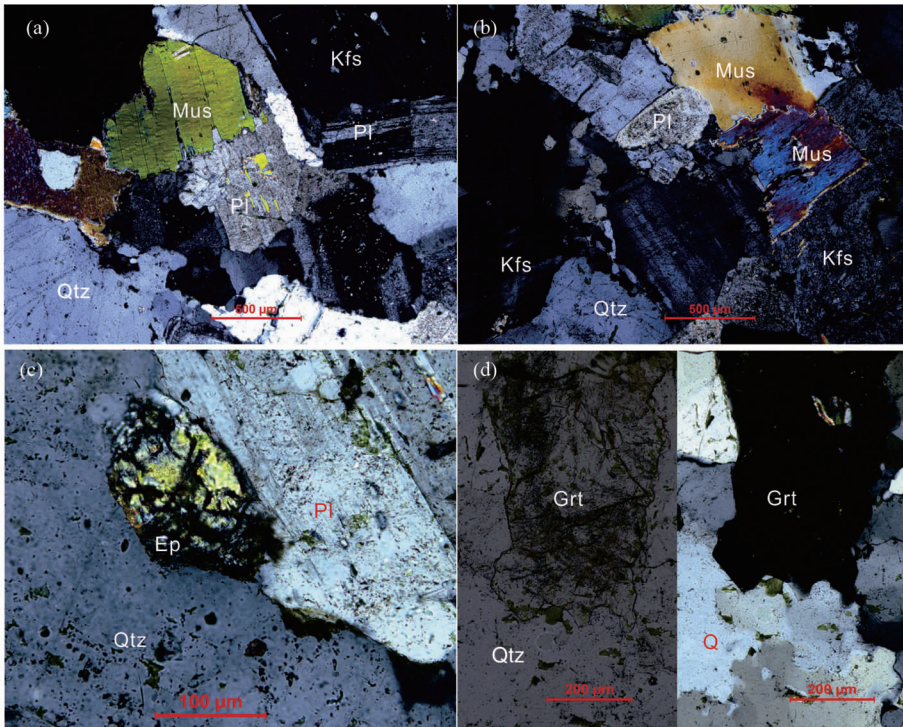


图2 山庄二长花岗岩显微照片

(a-c)为正交偏光图;(d)左为单偏光图,右为正交偏光图。Pl-斜长石;Kfs-钾长石;Qtz-石英;Mus-白云母;Ep-绿帘石;Grt-石榴石

Fig. 2 Microphotographs of the Shanzhuang monzogranite

(a-c) images under CPL; (d) left image under PPL and right image under CPL. Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Qtz-quartz; Mus-muscovite; Ep-epidote; Grt-garnet

~20%)、斜长石(35%~30%)、白云母(8%~6%)、黑云母(2%~1%);副矿物有锆石、石榴石、帘石、磁铁矿等,含量<1%,岩性定名为二长花岗岩(图2)。其中斜长石呈自形晶-半自形晶,板柱状、聚片双晶发育,局部见少量绿泥石化;钾长石半自形晶-他形,见格子双晶,局部粘土化;石英呈他形,云母呈片状;帘石和石榴石均具中等晶形,但帘石含量少于石榴石。

岩体南部岩性呈斑状、眼球状结构,造岩矿物主要为中长石、黑云母、石英和角闪石;副矿物为锆石、金红石、榍石及磁铁矿等(楼法生等,2002)。

3 样品采集及测试方法

样品采自山庄花岗岩岩体的中部向北部边界的过渡部分,岩石整体新鲜。委托澳实分析检测(广州)有限公司对5个样品进行了主量、微量元素和稀土元素的分析。其中主量元素使用XRF法测试,所用仪器为荷兰Panalytical Axios X荧光光谱仪,精度<5%;微量元素和稀土元素采用酸蚀法,所用仪器为美国Agilent Vista ICP-MS,精度<5%。

锆石U-Pb定年的样品,先经人工破碎至80~120目后,再利用电磁选和重选方法富集锆石,然后在双目镜下挑选透

明、晶形完好的锆石颗粒,每个样品的锆石都保证在100粒以上。将上述锆石颗粒制成锆石靶,然后对其进行透、反射照相和阴极发光(CL)成像,结合这些图像选择最佳锆石以进行定年分析。

锆石定年测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成,锆石的测定采用美国Resonance公司生产的Resolution M-50激光剥蚀系统和Agilent 7500a型的ICP-MS联机。激光所用斑束为31μm,频率为8Hz,以He作载气。测试中以美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST 610进行仪器最佳化。本次实验采用标准锆石TEMORA(417Ma)作为测年外标,详细实验步骤见袁洪林等(2003),数据处理采用ICPMSDataCal 8.6,锆石年龄图采用Isoplot 3.0程序,单个数据点的误差为1σ;加权平均的误差为2σ,具有95%的可信度。

本次所采样品的锆石见有少量磷灰石等包体。所测样品采自岩体的过渡部位,附近有燕山期花岗岩,可能受到岩浆期后或后期热液的影响,将U-Pb同位素体系破坏,造成铅丢失,致部分点谐和度比较低。因此,在分析过程中,将谐和度低于90%的点予以剔除(付王伟等,2014);其中年龄<1Ga的,则选用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄,年龄>1Ga的,则选用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb(Griffin *et al.*, 2004)。



图3 山庄二长花岗岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of analyzed zircons from Shanzhuang monzogranite

Sr-Nd 同位素测试是在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。样品首先要用 HF + HNO₃ 混合溶液溶解, 然后用专用离子交换技术进行分离。同位素比值的测定是在 Micromass Isoprobe 型多型接收电感耦合等离子质谱(MC-ICPMS)上完成的。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正, 详细的方法见韦刚健等(2002)和梁细荣等(2003)。实验室测定的国际 Sr 同位素标准 NBS987 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.710243 ± 14 (2σ), 日本 Nd 同位素标准 Shin Etsu 的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.512124 ± 11 (2σ)。

4 测试结果

4.1 锆石分析

4.1.1 锆石阴极发光(CL)特征

锆石 CL 图像不仅能够分辨锆石内部结构和构造, 还在一定程度上反映了内部的微量元素变化 (Fu *et al.*, 2009; Hoskin, 2005; 吴元保和郑永飞, 2004)。锆石的组构特征也是分析点和锆石 U-Pb 年龄解释的重要依据 (钱焯等, 2013; 吴元保和郑永飞, 2004)。根据核幔结构差异及有无振荡环带, 山庄花岗岩锆石 CL 图像可以分三组(图 3a, b)。第一组为振荡环带清晰, 基本没有黑边的锆石(图 3a-4, -5, -8, -24, b-9, -13); 第二组为核部振荡环带清晰, 边缘有厚度不等黑边的锆石(图 3a-14, -13, b-10); 第三组为核部振荡环带发育较差或无分带但 CL 强度较大, 边缘有或无黑边的锆石(图 3a-18, -12, b-3)。其中前二组锆石为典型的岩浆锆石, 第二组的黑边可能为锆石结晶后遭受岩浆期后热液作用的结果; 第三组锆石其 Th/U 值(见下文)均 > 0.1, 所以其类型也是岩浆锆石。

4.1.2 锆石微量元素地球化学

锆石微量元素如同锆石内部结构, 也是判定锆石性质的重要方法 (Hoskin, 2005)。样品 Szx03 和 Szx05 的 Th、U 值变化较大, 分别为 $396 \times 10^{-6} \sim 77 \times 10^{-6}$ 、 $1303 \times 10^{-6} \sim 97 \times 10^{-6}$ 和 $543 \times 10^{-6} \sim 58 \times 10^{-6}$ 、 $1008 \times 10^{-6} \sim 88 \times 10^{-6}$, Th/U

值分别为 0.96 ~ 0.16 和 1.73 ~ 0.1, 平均值为 0.43 和 0.54, 这些中高比值为岩浆锆石的特征。两样品的稀土元素(表 1)总量分别为 $2776 \times 10^{-6} \sim 740 \times 10^{-6}$ 和 $2614 \times 10^{-6} \sim 443 \times 10^{-6}$, 平均为 1397×10^{-6} 和 1519×10^{-6} , 二者近似。其球粒陨石标准化图解显示两样品基本上为岩浆锆石特征 (Zhao *et al.*, 2010) (图 4a), 图像显示两样品具有明显的正 Ce 和负 Eu 异常, 个别点异常不明显; Ce 低正异常主要受岩浆的低氧逸度的影响, 而 Eu 低负异常可能主要受斜长石结晶分异和岩浆低氧逸度共同影响 (Zhao *et al.*, 2010)。样品 Szx03 的 δCe 和 δEu 为 120 ~ 1.5、0.5 ~ 0.02, 平均值为 26.2、0.2; 样品 Szx05 的 δCe 和 δEu 为 577 ~ 1.5、0.9 ~ 0.1, 平均值为 56.8、0.2; 它们接近或等于岩浆锆石 δCe (32 ~ 49) (Hoskin, 2005) 和 δEu (< 1) (Zhao *et al.*, 2010)。

在 (Sm/La)_N-La 图解(图 4b)中, Szx03 和 Szx05 两样品点主体落在岩浆锆石范围内, 少数落在岩浆锆石和热液锆石的过渡区, 说明少数点可能受到热液氧逸度的影响; 在 Ce/Ce*-(Sm/La)_N 图解(图 4c)中, Szx03 主体落在岩浆锆石范围下方, 少数偏向热液锆石, 而 Szx05 主体落在岩浆锆石范围内或附近, 个别偏向热液锆石, Ce 正异常的偏低可能是岩浆热液氧逸度下降造成的 (Zhao *et al.*, 2010; Hoskin, 2005)。所以, 锆石微量元素特征说明 Szx03 和 Szx05 是岩浆锆石。

4.1.3 锆石 U-Pb 年龄

本次分别测试了样品 Szx03、Szx05 的 28 和 19 个点(表 2), 这些点都在谐和线上或附近(图 5), 表明这些锆石形成后的 U-Pb 同位素体系是封闭的。对比分析发现, 根据年龄集中程度, 两样品可以分三组。第一组年龄为 433 ~ 402Ma 和 435 ~ 394Ma, 比较集中且误差较小; 第二组年龄为 460 ~ 443Ma 和 454 ~ 440Ma, 年龄居中, 分散且误差较大; 第三组年龄为 1800 ~ 795Ma 和 2473 ~ 608Ma, 年龄最老, 分散且误差最大。

在计算锆石 U-Pb 年龄时, 剔除了信号谐和度 < 90% 的锆石。由于第二、三组年龄比较分散, 没有参与锆石年龄计算, 仅把第一组的锆石 U-Pb 年龄作了加权, 得出 Szx03 和 Szx05 的年龄分别为 $419 \pm 5\text{Ma}$ 和 $420 \pm 7\text{Ma}$ (图 5)。第一组年龄代表了山庄二长花岗岩的主体结晶年龄, 第二组可能代表了岩体的早期侵入年龄, 第三组则代表了在侵位过程中捕获的围岩、震旦系及中-古元古界等地层围岩的年龄。

4.2 Sr-Nd 同位素

山庄花岗岩 Sr-Nd 同位素测试结果见表 3。山庄二长花岗岩的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值 (0.703136 ~ 0.710824) 相近, 样品 Szx03 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值不仅低于 Wg13 值, 还低于球粒陨石值 (0.70402), 与其 Nd 同位素值不协调。经分析, 这种结果主要与样品较高 Rb/Sr 比值和成岩年龄的微量偏差有关, 不能较好反映样品后期的蚀变作用 (张芳荣等, 2010)。Szx05 的值较稳定, 其 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.710824, 与地壳的相应值 (> 0.71) 相似, 能够用来示踪花岗岩的物源特征。

表1 山庄二长花岗岩锆石稀土元素含量 ($\times 10^{-6}$)Table 1 The concentrations of REE of zircon from the Shanzhuang monzogranite ($\times 10^{-6}$)

测点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ti
Szx03.01	0.10	5.44	0.13	1.70	3.73	0.40	27.0	10.4	143	57.0	280	57.8	559	107	3.07
Szx03.02	0.14	6.63	0.23	4.04	7.84	1.14	46.6	16.1	199	74.0	336	67.1	636	119	6.89
Szx03.03	4.93	17.9	1.76	11.7	7.09	0.67	39.0	13.5	168	65.4	307	62.0	592	112	19.5
Szx03.04	0.04	4.00	0.07	1.46	3.04	0.28	20.0	6.83	88.3	34.3	164	33.8	333	63.6	7.93
Szx03.05	0.02	3.73	0.07	1.27	3.43	0.41	20.9	7.76	95.8	37.2	170	35.9	353	66.3	7.26
Szx03.06	0.53	5.98	0.65	10.0	21.3	8.23	99.4	30.6	301	89.0	351	66.3	612	109	57.6
Szx03.07	0.08	3.31	0.13	1.35	3.62	0.51	23.3	8.35	108	41.9	195	40.9	399	74.9	4.00
Szx03.08	0.01	4.83	0.10	1.73	4.27	0.35	27.6	9.54	121	48.7	231	48.4	474	90.9	9.44
Szx03.09	0.18	4.71	0.17	2.30	5.60	0.62	37.9	14.3	194	77.5	378	81.7	809	154	6.00
Szx03.10	0.38	6.27	0.35	3.90	7.13	1.30	46.1	18.9	258	100	486	102	1010	187	4.60
Szx03.11	0.04	5.08	0.15	2.66	6.91	0.95	38.7	14.1	176	66.7	314	63.2	607	113	12.0
Szx03.12	0.01	14.5	0.15	2.57	5.32	0.10	35.4	12.7	154	59.6	259	51.6	428	80.7	10.4
Szx03.13	0.02	3.26	0.12	2.13	4.33	0.47	25.9	8.68	103	39.3	172	35.4	316	65.4	8.47
Szx03.14	0.05	3.32	0.15	3.17	6.10	0.58	34.3	11.3	134	50.5	220	44.3	398	81.4	10.0
Szx03.15	0.69	8.96	0.56	3.35	4.59	0.66	31.6	13.1	174	70.3	326	69.0	624	126	3.84
Szx03.16	0.22	3.69	0.34	3.17	5.41	0.95	31.0	10.5	127	48.0	216	45.5	419	87.9	6.87
Szx03.17	0.00	4.37	0.11	2.14	5.29	0.46	31.6	10.7	128	50.3	225	46.8	424	88.6	7.78
Szx03.18	0.04	19.4	0.08	1.87	4.21	1.17	23.6	7.70	90.6	35.5	159	32.8	301	63.0	6.10
Szx03.19	0.98	7.87	1.26	9.44	11.7	1.64	55.0	20.0	240	88.7	398	82.7	752	153	5.84
Szx03.20	0.04	3.76	0.10	1.64	5.85	0.51	46.4	20.1	272	110	526	114	1063	217	3.81
Szx03.21	0.14	6.35	0.36	5.88	10.6	1.16	62.2	20.6	247	92.9	412	83.3	739	151	10.1
Szx03.22	0.17	4.01	0.22	3.26	6.97	0.77	38.5	12.5	150	56.1	247	51.7	458	92.2	7.32
Szx03.23	0.33	5.85	0.44	7.01	12.2	1.31	59.4	18.7	213	79.7	346	69.9	618	125	12.2
Szx03.24	0.04	14.5	0.10	2.09	4.95	1.03	33.4	12.2	155	60.2	272	56.0	507	102	5.97
Szx03.25	0.84	5.92	0.67	5.48	7.83	1.09	43.1	15.9	201	80.4	371	81.4	772	159	5.20
Szx03.26	0.62	7.37	0.81	6.82	10.2	1.08	62.1	26.4	347	137	604	129	1203	241	4.39
Szx03.27	7.59	173	5.81	37.0	48.5	3.46	146	44.2	366	104	443	100	1056	248	28.8
Szx03.28	0.13	19.1	0.22	3.11	6.53	0.98	35.1	12.1	142	52.7	231	48.0	434	90.3	17.8
Szx05.01	0.02	5.45	0.12	2.65	5.70	0.81	33.4	10.6	117	39.2	153	28.2	247	43.2	9.20
Szx05.02	0.14	4.85	0.16	2.20	5.84	0.55	37.5	15.0	211	84.7	408	90.9	887	168	5.39
Szx05.03	0.03	42.6	0.22	3.95	6.82	3.94	27.5	7.74	78.2	25.5	103	20.3	187	38.8	4.50
Szx05.04	0.01	12.1	0.13	2.42	3.36	1.35	17.4	5.69	68.1	27.3	132	29.9	297	68.6	11.8
Szx05.05	0.09	9.05	0.28	4.61	10.7	0.80	62.1	21.5	270	101	460	91.2	826	169	6.71
Szx05.06	0.10	14.0	0.42	7.39	13.8	3.38	74.5	24.4	294	107	470	94.0	849	174	8.79
Szx05.07	0.01	84.2	0.09	1.55	4.63	0.70	32.1	14.1	205	87.2	437	97.2	915	192	9.82
Szx05.08	0.01	1.38	0.07	1.49	5.46	0.45	37.2	12.0	127	41.2	185	40.7	396	83.5	8.86
Szx05.09	2.30	10.8	1.42	12.8	18.8	1.25	82.1	28.4	328	112	494	103	936	191	8.67
Szx05.10	0.09	5.72	0.11	1.67	5.21	0.75	35.2	14.1	191	78.2	380	83.0	818	156	6.60
Szx05.11	0.33	21.5	0.41	3.08	4.13	1.11	17.2	5.57	59.3	20.1	88	17.4	161	34.0	11.6
Szx05.12	0.03	5.05	0.10	2.28	6.54	0.57	43.5	18.1	247	99.6	478	103	971	204	9.78
Szx05.13	0.03	4.90	0.28	5.35	11.3	0.87	60.5	19.5	237	87.5	386	78.6	718	149	6.26
Szx05.14	0.15	5.59	0.15	1.77	4.15	0.70	29.6	11.5	154	63.7	292	62.1	567	115	4.05
Szx05.15	0.14	5.65	0.21	2.69	5.75	0.76	37.6	13.8	177	70.7	327	67.5	622	127	12.0
Szx05.16	0.02	2.40	0.10	1.83	5.88	0.46	41.2	15.9	200	78.1	356	75.0	694	141	4.19
Szx05.17	0.02	5.09	0.08	1.45	4.34	0.30	24.5	8.82	111	44.5	206	42.6	394	82.7	5.56
Szx05.18	0.03	4.48	0.14	3.14	7.82	0.69	57.4	23.6	312	123	571	123	1155	233	4.38
Szx05.19	0.28	4.88	0.11	2.11	6.03	0.56	51.2	23.6	337	141	678	146	1416	267	9.10

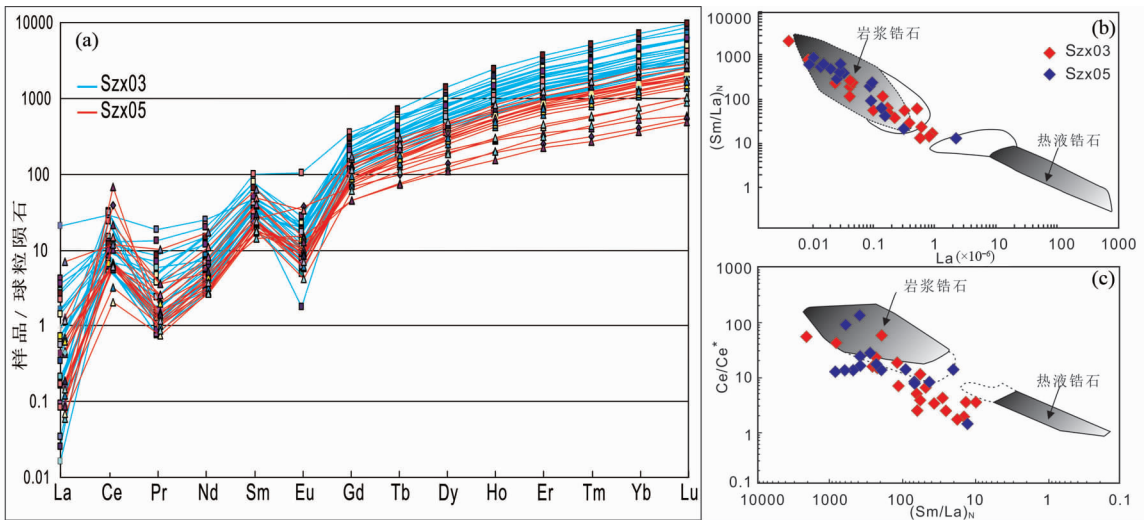


图4 山庄二长花岗岩锆石稀土元素图解(标准化值据 Sun and Mcdonough, 1989)

Fig.4 Rare earth element diagrams of the Shanzhuang monzogranitic zircons (chondrite normalized value after Sun and Mcdonough, 1989)

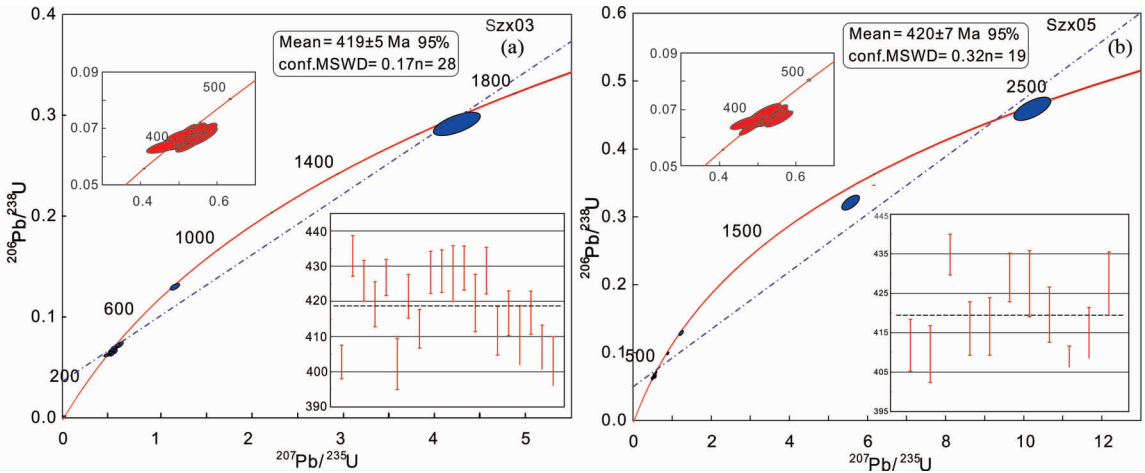


图5 山庄二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia of the Shanzhuang monzogranite

山庄二长花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低且集中, 为 $-11 \sim -10$, 二阶段模式年龄(陈江峰和江博明, 1999) 为 $1971 \sim 2031\text{Ma}$ 。在 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图(沈渭洲等, 1999) 上, 所有点落在华南元古代地壳演化区内(图6), 说明山庄二长花岗岩源岩可能来自于下伏元古代地层。

4.3 地球化学特征

花岗岩岩石化学测试结果见表4。山庄二长花岗岩 SiO_2 为 $71.48\% \sim 66.20\%$ 、 Al_2O_3 为 $18.36\% \sim 15.71\%$ 、 K_2O 为 $4.99\% \sim 4.40\%$ 、 Na_2O 为 $4.64\% \sim 3.63\%$ 和 P_2O_5 为 $0.42\% \sim 0.20\%$ 。上述各值均偏高, 在 QAP 图解中, 样品均落在二长花岗岩区内, 与薄片鉴定结果一致(图7a)。样品全碱含

量 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 $9.54\% \sim 8.14\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $1.24 \sim 0.99$, 说明该二长花岗岩表现为高钾钙碱性特征(图7b); 同时铝饱和指数 A/CNK 为 $1.31 \sim 1.23$, 为铝过饱和系列。这说明山庄二长花岗岩为高钾钙碱性-强过铝质花岗岩。

在微量元素方面, 样品微量元素的原始地幔标准化显示高场强元素 Zr、Hf 富集不明显(图8), Nb、Ta、Ti 亏损明显, 大离子亲石元素 K、Rb 富集, Ba、Sr 亏损。Nb、Ta、Ba、Sr 亏损的花岗岩是壳源物质低度部分熔融的产物(Harris and Inger, 1992)。Rb 的相对富集进一步说明岩石具有过铝质侵入体的特征(Harris *et al.*, 1986)。

山庄二长花岗岩体的 Rb/Sr 值分别为 $3.84 \sim 8.21$, Rb/Nb 值为 $17.9 \sim 22.9$, 它们分别高于中国东部的 0.31 和 6.8 (高山等, 1999) 和全球上地壳的 0.32 和 4.50 (Taylor and McLennan,

表2 山庄二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄测试数据

Table 2 Zircon U-Pb data of the Shanzhuang monzogranite

测点号	($\times 10^{-6}$)		同位素比值						年龄 (Ma)						谐和度
	Th	U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	
Szx03-1	190	682	0.05677	0.00217	0.51489	0.01894	0.06448	0.00079	483	85	422	13	403	5	95%
Szx03-2	213	476	0.05647	0.00186	0.58445	0.02008	0.07382	0.00106	472	74	467	13	459	6	98%
Szx03-3	191	419	0.05725	0.00218	0.55247	0.02057	0.06946	0.00096	502	83	447	13	433	6	96%
Szx03-4	110	267	0.05530	0.00227	0.52352	0.02151	0.06829	0.00096	433	95	427	14	426	6	99%
Szx03-5	103	298	0.05802	0.00219	0.54271	0.02146	0.06719	0.00106	532	79	440	14	419	6	95%
Szx03-6	224	457	0.05653	0.00210	0.53404	0.01942	0.06845	0.00085	472	81	434	13	427	5	98%
Szx03-7	97	324	0.05676	0.00257	0.56007	0.02501	0.07158	0.00106	483	100	452	16	446	6	98%
Szx03-8	129	333	0.05438	0.00285	0.48272	0.02611	0.06438	0.00120	387	119	400	18	402	7	99%
Szx03-9	150	879	0.05521	0.00176	0.52106	0.01731	0.06756	0.00102	420	77	426	12	421	6	98%
Szx03-10	185	1104	0.05570	0.00179	0.51479	0.01632	0.06603	0.00091	439	70	422	11	412	5	97%
Szx03-11	191	445	0.05493	0.00221	0.53012	0.02030	0.06869	0.00099	409	91	432	13	428	6	99%
Szx03-12	77	97	0.10614	0.00302	4.25817	0.16628	0.29202	0.00759	1800	53	1685	32	1652	38	97%
Szx03-13	86.6	191	0.06040	0.00199	0.61380	0.02529	0.07400	0.00181	617	70	486	16	460	11	94%
Szx03-14	130	213	0.05697	0.00170	0.55524	0.01895	0.07107	0.00131	500	60	448	12	443	8	98%
Szx03-15	396	1206	0.05665	0.00081	0.53616	0.01121	0.06874	0.00100	480	27	436	7	429	6	98%
Szx03-16	98	264	0.05729	0.00129	0.54012	0.01511	0.06863	0.00131	502	48	439	10	428	8	97%
Szx03-17	135	301	0.05855	0.00120	0.55416	0.01333	0.06889	0.00104	550	44	448	9	429	6	95%
Szx03-18	120	125	0.06717	0.00161	1.21077	0.03242	0.13132	0.00216	843	50	806	15	795	12	98%
Szx03-19	170	704	0.06076	0.00121	0.56303	0.01628	0.06725	0.00135	632	43	453	11	420	8	92%
Szx03-20	157	1010	0.05556	0.00086	0.52568	0.01040	0.06877	0.00110	435	6	429	7	429	7	99%
Szx03-21	306	471	0.05744	0.00111	0.52254	0.01266	0.06594	0.00115	509	43	427	8	412	7	96%
Szx03-22	159	278	0.05884	0.00135	0.54115	0.01382	0.06676	0.00105	561	50	439	9	417	6	94%
Szx03-23	210	283	0.05699	0.00191	0.51475	0.01883	0.06573	0.00138	500	74	422	13	410	8	97%
Szx03-24	309	493	0.05620	0.00128	0.51630	0.01231	0.06679	0.00101	461	50	423	8	417	6	98%
Szx03-25	151	780	0.05928	0.00108	0.53262	0.01181	0.06517	0.00104	576	39	434	8	407	6	93%
Szx03-26	263	1303	0.05938	0.00111	0.52856	0.01382	0.06452	0.00114	589	41	431	9	403	7	93%
Szx03-27	2610	1681	0.06429	0.00123	0.66489	0.02017	0.07498	0.00194	750	41	518	12	466	11	89%
Szx03-28	142	304	0.07095	0.00185	1.01457	0.04535	0.10332	0.00109	967	54	711	23	634	22	88%
Szx05-1	214	525	0.05187	0.00161	0.47577	0.01867	0.06597	0.00187	280	72	395	13	412	7	95%
Szx05-2	149	977	0.05220	0.00250	0.48400	0.02175	0.06560	0.00368	295	139	401	15	410	7	97%
Szx05-3	59	88	0.16160	0.00385	10.23187	0.31317	0.46001	0.01110	2473	45	2456	28	2440	49	99%
Szx05-4	85	128	0.06681	0.00165	1.21116	0.03566	0.13137	0.00223	831	47	806	16	796	13	98%
Szx05-5	331	758	0.05707	0.00090	0.54880	0.01044	0.06977	0.00086	494	35	444	7	435	5	97%
Szx05-6	312	460	0.05507	0.00097	0.47767	0.00952	0.06304	0.00087	417	39	396	7	394	5	99%
Szx05-7	473	476	0.06282	0.00117	0.87469	0.01988	0.10102	0.00144	702	41	638	11	620	8	97%
Szx05-8	58	570	0.05476	0.00122	0.50316	0.01377	0.06667	0.00112	467	50	414	9	416	7	99%
Szx05-9	243	1008	0.06072	0.00123	0.55820	0.01488	0.06676	0.00120	628	44	450	10	417	7	92%
Szx05-10	159	372	0.05335	0.00266	0.57224	0.01521	0.07298	0.00128	343	113	459	10	454	8	98%
Szx05-11	144	209	0.12528	0.00200	5.56618	0.15068	0.32233	0.00709	2033	28	1911	23	1801	35	94%
Szx05-12	160	757	0.05535	0.00087	0.53290	0.02498	0.07061	0.00112	428	35	434	17	440	8	98%
Szx05-13	268	527	0.05430	0.00110	0.51348	0.01172	0.06881	0.00102	383	42	421	8	429	6	98%
Szx05-14	69	192	0.05530	0.00170	0.52107	0.01820	0.06855	0.00139	433	73	426	12	427	8	99%
Szx05-15	200	462	0.05909	0.00143	0.54713	0.01570	0.06725	0.00116	569	52	443	10	420	7	94%
Szx05-16	131	577	0.05603	0.00124	0.50337	0.01308	0.06507	0.00087	454	18	414	9	406	5	98%
Szx05-17	150	314	0.05868	0.00152	0.53813	0.01586	0.06649	0.00106	554	56	437	10	415	6	94%
Szx05-18	222	1413	0.05800	0.00099	0.54946	0.01304	0.06859	0.00129	532	32	445	9	428	8	96%
Szx05-19	211	1592	0.04957	0.00224	0.43362	0.02280	0.06588	0.00169	176	106	366	16	411	10	88%

表 3 山庄花岗岩 Sr-Nd 同位素

Table 3 Sr-Nd isotopes of the Shanzhuang granite

样品号	Age(Ma)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	$\epsilon_{Nd}(t)$	t_{DM2} (Ma)	资料来源
Szx03	419	15.56	0.796018	0.703136	0.177484	0.512034	-11	2031	本文
Szx05	420	10.53	0.773798	0.710824	0.179665	0.512078	-10	1971	本文
Wg13	411	11.53	0.774090	0.706605	0.125300	0.511830	-12	2128	舒良树等, 2000

表 4 山庄花岗岩地球化学测试数据(主量元素:wt%;微量和稀土元素:10⁻⁶)

Table 4 Geochemical data of the Shanzhuang granite (major elements; wt%; trace elements; 10⁻⁶)

样品号	Szx01	Szx02	Szx03	Szx04	Szx05	WG13	WG14	WG15	WG19
岩性	二长花岗岩					花岗闪长岩			闪长岩包体
SiO ₂	68.23	71.48	70.14	70.88	66.20	67.10	66.45	69.56	55.88
Al ₂ O ₃	17.81	15.71	16.56	16.31	18.36	15.24	15.76	14.39	16.58
Fe ₂ O ₃	1.50	1.74	1.62	1.47	1.82	1.13	0.89	1.10	2.93
FeO						3.52	4.00	2.66	5.87
MgO	0.22	0.20	0.24	0.23	0.33	1.37	1.07	0.98	3.79
CaO	0.56	0.27	0.53	0.55	0.67	2.36	3.26	1.68	4.25
Na ₂ O	4.64	3.63	4.03	4.09	4.55	4.34	3.89	4.80	3.34
K ₂ O	4.61	4.51	4.77	4.40	4.99	3.10	2.93	3.25	2.24
MnO	0.06	0.07	0.06	0.06	0.04	0.08	0.03	0.05	0.18
TiO ₂	0.08	0.09	0.08	0.08	0.16	0.55	0.50	0.43	1.07
P ₂ O ₅	0.32	0.20	0.27	0.24	0.42	0.16	0.16	0.15	0.29
LOI	1.32	1.25	1.15	1.11	1.53	0.84	0.68	0.87	2.85
Total	99.35	99.15	99.45	99.42	99.07	99.79	99.62	99.92	99.27
A/CNK	1.24	1.31	1.23	1.24	1.24	1.03	1.02	1.00	1.06
A/NK	1.33	1.37	1.33	1.34	1.34	1.45	1.65	1.26	2.09
K ₂ O + Na ₂ O	9.25	8.14	8.80	8.49	9.54	7.44	6.82	8.05	5.58
K ₂ O/Na ₂ O	0.99	1.24	1.18	1.08	1.10	0.71	0.75	0.68	0.67
Rb	261	248	237	215	263	176	144	185	134
Sr	46.5	30.2	39.9	42.4	68.6	141	260	149	145
Y	15.8	11.5	11.2	16.1	14.1	36.6	36.4	39.4	41.7
Nb	11.4	14.5	11.4	10.3	14.5	18.6	16.0	13.0	15.0
Ba	220	190	160	170	320	467	963	658	565
Ta	1.88	2.71	1.88	1.57	2.40				
Pb	35.2	29.5	38.2	33.8	28.7				
Th	3.55	3.73	2.64	3.62	2.09	8.00	13.0	15.0	10.0
U	5.08	4.88	4.32	4.01	5.78				
Zr	58.1	56.1	51.2	63.9	61.6	211	274	230	189
Hf	1.83	1.48	1.62	1.89	1.33				
La	9.66	13.4	5.84	8.88	8.32	54.1	38.5	47.3	36.7
Ce	19.5	22.8	13.7	18.7	17.0	98.3	87.3	95.2	71.2
Pr	2.24	3.02	1.42	2.08	2.02				
Nd	7.54	10.1	4.66	7.23	7.20	41.4	32.4	34.7	38.1
Sm	2.16	2.61	1.38	2.10	2.14	6.81	6.84	6.06	8.45
Eu	0.40	0.42	0.30	0.35	0.59	1.47	1.41	1.63	1.90
Gd	2.22	2.73	1.62	2.15	2.39	8.72	6.81	8.26	9.61
Tb	0.47	0.46	0.32	0.48	0.46	1.01	0.93	1.11	1.41
Dy	3.04	2.60	2.06	2.89	2.67	4.56	4.64	5.04	7.13
Ho	0.54	0.45	0.37	0.57	0.45	0.99	1.08	0.99	1.43
Er	1.49	1.20	1.17	1.60	1.09	2.31	2.86	2.27	3.24

续表 4

Continued Table 4

样品号	Szx01	Szx02	Szx03	Szx04	Szx05	WG13	WG14	WG15	WG19
岩性	二长花岗岩					花岗闪长岩			闪长岩包体
Tm	0.21	0.15	0.15	0.23	0.14	0.36	0.44	0.38	0.56
Yb	1.34	1.09	1.12	1.64	0.84	2.12	3.12	1.78	3.56
Lu	0.18	0.15	0.16	0.23	0.10	0.34	0.48	0.66	0.63
Rb/Ba	1.18	1.31	1.48	1.26	0.82	0.38	0.15	0.28	0.24
Rb/Sr	5.61	8.21	5.94	5.07	3.84	1.25	0.55	1.24	0.92
LREE	41.5	52.4	27.3	39.3	37.3	202	166	185	156
HREE	9.49	8.83	6.97	9.79	8.14	20.4	20.4	20.5	27.6
Σ REE	51.0	61.2	34.3	49.1	45.5	223	187	205	184

注:样品 WG 引自楼法生等, 2002

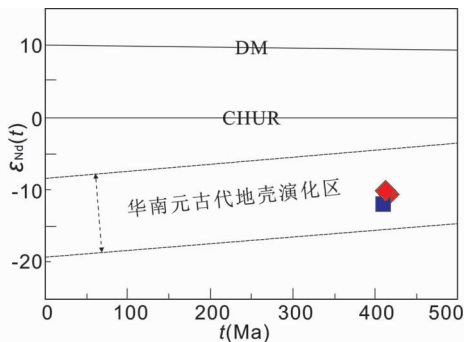
图 6 山庄花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ - t 图 (据沈渭洲等, 1999)

Fig. 6 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. t diagram of the Shan zhuang granite (after Shen *et al.*, 1999)

1985); 岩体 Nb/Ta 值为 6.2 ~ 5.2, Zr/Hf 值为 47.7 ~ 31.9, 前者明显低于正常花岗岩的 11, 后者近似于花岗岩的 40 ~ 33 (Dostal and Chatterjee, 2000; Green, 1995), 但高于指示流体作用的 25 (Irber, 1999)。四分组效应 $TE_{1,3}$ 的计算结果为 0.95 ~ 1.13, 其中三个略大于 1.1, 2 个小于 1.1; 说明花岗岩后期虽存在流体的作用, 但流体作用相对较弱; 流体作用体现在锆石发育有不等量的黑边、锆石稀土元素有低 Ce 正异常和 Eu 负异常等方面。

在稀土元素方面 (图 8), 山庄花岗岩的稀土总量偏低且变化集中 ($61.2 \times 10^{-6} \sim 34.3 \times 10^{-6}$)。它们的 LREE/HREE 值为 5.92 ~ 3.91、 $(La/Yb)_N$ 值为 8.3 ~ 3.7, 二者近似。 δEu 为 0.80 ~ 0.48, 显示显著至弱的 Eu 负异常, 反映在岩浆结晶过程中斜长石分离结晶程度较为明显。花岗岩的 La 与 (La/Sm) 呈正相关反映岩体在岩浆过程中受部分熔融作用的控制。

5 讨论

在上文测试分析的基础上, 下面主要对山庄二长花岗岩的成岩时代、形成条件、成因类型及构造环境进行讨论。

5.1 岩石成因

5.1.1 锆石类型及形成时代

山庄花岗岩体产于华南加里东褶皱带上, 被认为是扬子块体和华夏块体于加里东期碰撞造山的产物。关于华夏块体与扬子块体碰撞的时间或华南海洋消失的时间, 还没有得到很好的解决。

结合锆石的 CL 图像、稀土元素及 U-Pb 定年等方面, 发现锆石的 CL 图像的分组和 U-Pb 定年数据的分组有极好的拟合度, 与稀土元素的相关性不明显。第一组锆石振荡环带发育, 具典型的岩浆锆石特征; 第二、三组锆石有核幔结构, 反映其受到了后期构造-热事件的影响; 锆石稀土元素没有明显的分组, 其 LREE 明显富集的特征指示上述三组锆石均为岩浆锆石, 但个别可能受到了岩浆期后热液或其它热液的影响而表现为弱 Ce 正异常和 Eu 负异常。这些特征表明, 第一组代表山庄二长花岗岩的结晶年龄, 其加权年龄分别为 $420 \pm 7\text{Ma} \sim 419 \pm 5\text{Ma}$, 时代为中晚志留纪; 第二组与第一组一样, 振荡环带发育, 但多了黑边, 其可能代表了山庄二长花岗岩在华南造山运动同期的最初侵入年龄; 第三组不同于前二组, 可能代表了岩浆在形成过程中捕获的围岩或先前地层的年龄, 其实为一种继承锆石。

山庄花岗岩体的结晶年龄, 得到了其他研究成果的证实。如通过全岩 Rb-Sr 等时线得到山庄花岗岩年龄 411Ma (汤加富等, 1991) 和通过 LA-ICP-MS 法得到结晶年龄 $424 \pm 3\text{Ma}$ (Wang *et al.*, 2011)。山庄花岗岩体南部有没有遭受变质作用 (Wang *et al.*, 2011), 有待进一步研究。

5.1.2 源区分析

一般认为形成造山带强过铝花岗岩的源岩有两种, 一种是泥质的、另一种是砂质的 (Sylvester, 1998)。SiO₂ 为 77% ~ 67% 的强过铝花岗岩的源岩的判别标志主要有三个: CaO/N₂O 值、Rb/Sr 值、Rb/Ba 值和 $FeO^T + MgO + TiO_2$ 含量 (Sylvester, 1998)。山庄花岗岩体北部样品的 CaO/N₂O 值为 0.14 ~ 0.07, < 0.3, 落在富粘土、贫长石的泥质岩石源岩区 (图 9a); 岩体的 Rb/Sr 值为 8.3 ~ 3.8、Rb/Ba 为 1.48 ~

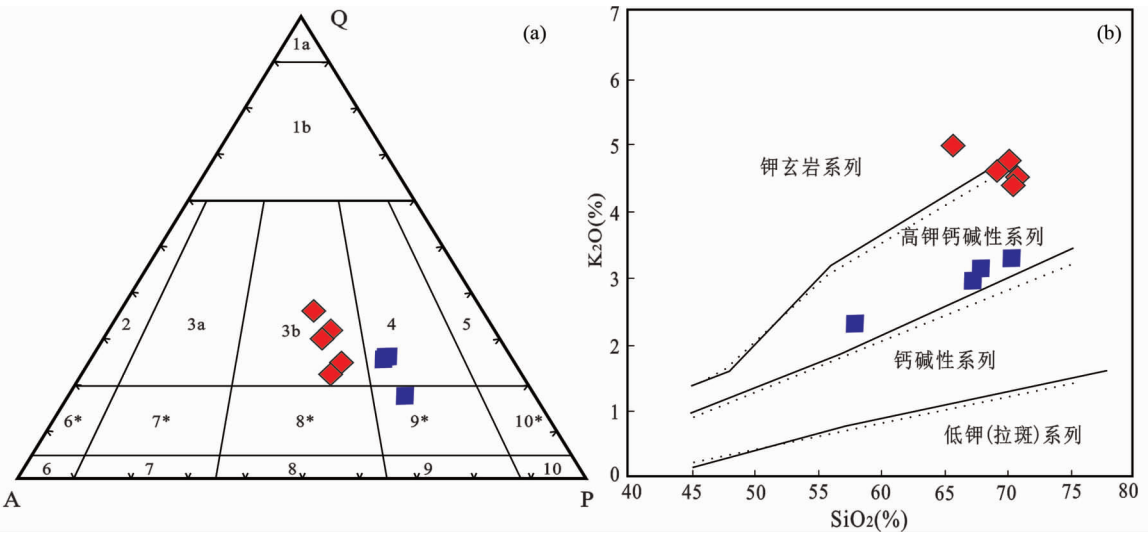


图 7 山庄花岗岩判别图解(a, 据 Streckeisen, 1976; b, 据 Rickwood, 1989)

图 a 中 3b-二长花岗岩;4-花岗闪长岩;9* -石英二长闪长岩

Fig. 7 Discrimination diagrams of the Shanzhuang granite (a, after Streckeisen, 1976; b, after Rickwood, 1989)

In Fig. 7a: 3b-monzogranite; 4-granodiorite; 9* -quartz monzodiorite

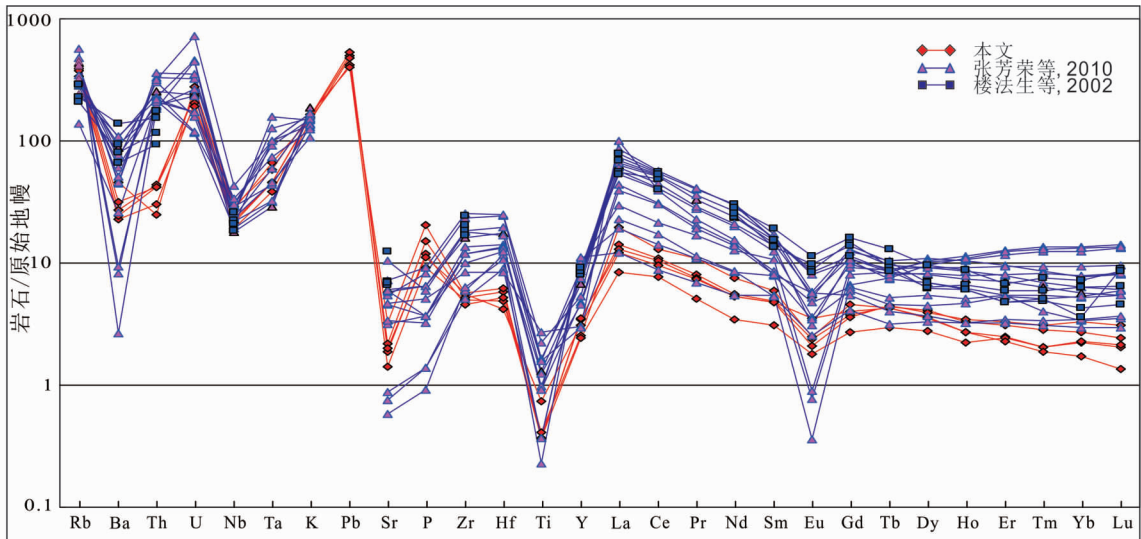


图 8 山庄花岗岩微量元素蛛网图及其与江西省 S 型花岗岩的对比(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

部分山庄花岗岩数据来源楼法生等, 2002;江西省 S 型花岗岩数据据张芳荣等, 2010

Fig. 8 Trace element spider diagram of the Shanzhuang granite and their comparison with S-type granitoids in Jiangxi Province (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

0.82,落在富粘土岩石源岩区(图 9b);岩体的 $FeO^T + MgO + TiO_2$ 值为 2.37 ~ 1.81,也表明其源岩为泥质岩石;其中一样品因 SiO_2 含量偏低(66.2%)被排除,可能是由于含闪长岩包体等偏基性的成分(楼法生等, 2002)。上述判别标志分析结果表明山庄花岗岩北部的源岩为富粘土的泥质岩石。而南部同源的花岗闪长岩及闪长岩包体落在碎屑岩区,靠近玄武岩区(图 9),可能来源于含有玄武岩浆底侵物质的陆壳成分(楼法生等, 2002)。

山庄花岗岩体的 Sr-Nd 同位素表明,其源岩是元古代变质沉积岩或其相似的岩石,岩体北南部相近的 Nd 同位素、REE 特征共同表明它们是同源的;Nd 同位素二阶段模式年龄可以判定其源岩时代大致为元古代。

5.1.3 温压条件

根据花岗岩形成条件把强过铝花岗岩分为高温型和高压型两大类,不同类型的花岗岩反映了不同的动力学背景(Sylvester, 1998)。

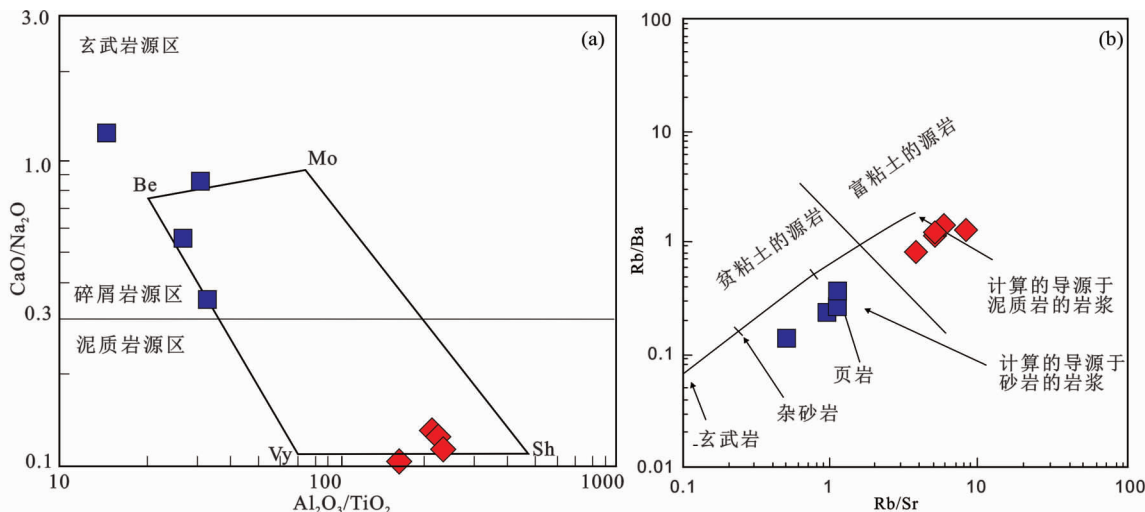


图9 山庄花岗岩源岩判别图解(据 Sylvester, 1998)

Fig. 9 Discrimination diagrams for proliiths to the Shanzhuang granite (after Sylvester, 1998)

强过铝花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 值主要依赖于温度。山庄花岗岩体北部样品的 Al_2O_3/TiO_2 值为 223 ~ 115, > 100, 反映其为低温。岩体北部样品 Szx03、Szx05 锆石的 Ti 温度计 (Ferry and Watson, 2007) 计算结果分别为 942 ~ 646°C、814 ~ 670°C, 平均值为 721°C、722°C; 锆石饱和温度计 (Watson and Harrison, 1983, 2005) 计算结果分别为 728 ~ 710°C、平均值为 720°C (北部) 和 822 ~ 776°C、平均值为 802°C (南部)。锆石的 Ti 温度计和饱和温度计计算结果表明, 该岩体北部形成温度为 722 ~ 720°C、为低温, 南部形成温度为 802°C、为高温。

根据花岗岩标准矿物 Q-Ab-Or-H₂O 图解(姜德厚等, 1987), 通过内插法获得花岗岩形成平均压力值约为 3kbar, 平均温度值为 720°C。黑云母的全铝压力计(公式为 P (kbar) = $3.03 \times Al-6.53 (\pm 0.33)$) 计算表明其压力为 3.21 ~ 2.71kbar、平均 2.91kbar; 与前者相近。其对应深度($P = \rho gh, \rho = 2700kg/m^3, g = 9.8m/s^2$) 为 12.15 ~ 10.25km、平均 11.00km。

5.1.4 成因类型

通过岩相观察, 发现有白云母、石榴石等传统意义上作为 S 型花岗岩判别标志的富铝矿物(钟长汀等, 2007; Condie, 1989)。另外, 本花岗岩的 A/CNK 为 1.31 ~ 1.23, > 1.1; K_2O/Na_2O 为 1.24 ~ 0.99, > 1; Rb-Y、Rb-Th 相关性系数分别 -0.10、-0.37, 也是 S 型花岗岩的典型特征(李献华等, 2007; 于津海等, 2004)。在判别图 ACF 中, 山庄花岗岩体北部样品全部落在 S 型花岗岩区内, 南部样品则落在 I 型与 S 型的过渡区内(图 10)。山庄花岗岩体南部样品的微量元素表现为与江西省早古生代晚期的 S 型花岗岩微量蛛网图曲线一致的特征(张芳荣等, 2010), 而北部样品在高场强元素 Ta、Zr、Hf 等相对亏损(图 8)。考虑到山庄花岗岩南部形成温度较高(802°C), 与后碰撞高温型花岗岩相似(张芳

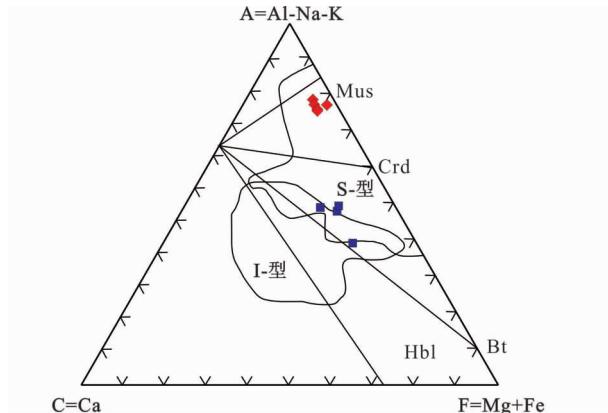


图10 山庄花岗岩成因判别图解(据徐克勤和涂光炽, 1986)

Mus-白云母; Crd-堇青石; Bt-黑云母; Hbl-角闪石

Fig. 10 Discrimination diagram of the Shanzhuang granitic genesis (after Xu and Tu, 1986)

Mus-muscovite; Crd-cordierite; Bt-biotite; Hbl-hornblende

荣等, 2010), 同时其稀土元素四分组效应不明显, 这与其靠近 I 型花岗岩的特征一致; 岩体北部高强度元素相对亏损, 与较低的形成温度(722 ~ 720°C) 一致。所以山庄花岗岩是由南部的高温 S 型(偏 I 型)花岗岩向北部的低温 S 型花岗岩转变的岩体。

5.2 成岩构造环境

山庄花岗岩所在地区及整个华南在加里东期发生了强烈的加里东造山运动, 并在加里东晚期发育了大量 S 型和 I 型花岗岩(叶鸣等, 2015; 熊松泉等, 2015; 张乔, 2015; 崔圆圆, 2014; 熊昌利等, 2012; 舒良树, 2006, 2012; Wang *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2010; 舒良树等, 2008; 江西省地质矿

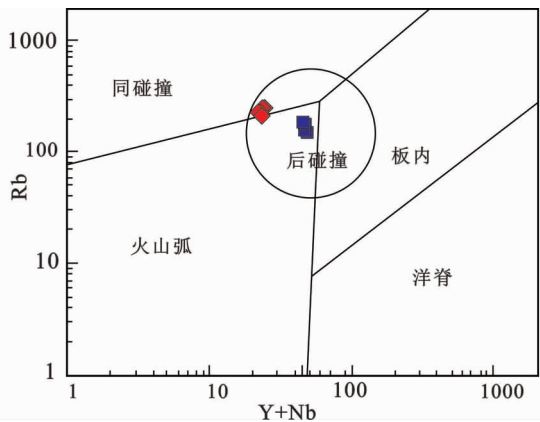


图 11 山庄花岗岩构造环境判别图解(据 Pearce, 1996)
Fig. 11 Discrimination diagram for tectonic setting of the Shanzhuang granite (after Pearce, 1996)

产局, 1984)。其中, 加里东造山运动晚期为 440 ~ 420Ma (Li *et al.*, 2010)。但是, 山庄花岗岩的成岩构造环境还没有得到统一认识 (Wang *et al.*, 2011; 楼法生等, 2002, 2005)。

为了判定山庄花岗岩体的构造环境, 本文采用了 Rb-(Y + Nb) 图解 (Pearce, 1996)。在 Rb-Y + Nb 图解中 (图 11), 岩体北部样品落在同碰撞与后碰撞的过渡区, 岩体南部样品则落在火山弧与后碰撞的过渡区。通过对比发现, 山庄花岗岩北部与南部具有相似的 Sr-Nd 同位素、稀土元素特征和相近构造运动期次, 说明它们形成于相似的构造环境-后碰撞环境。这也在与山庄花岗岩体具有相似的 Sr-Nd 同位素、微量和稀土元素特征的武功山花岗岩体得到证实 (Wang *et al.*, 2011), 同时也得到区域上处于同期构造事件和岩浆事件的证实 (Li *et al.*, 2010), 形成于后碰撞的伸展环境, 而非大陆边缘岩浆弧 (楼法生等, 2002, 2005)。

6 结论

(1) 锆石的 CL 图像和稀土元素特征表明山庄二长花岗岩锆石为岩浆锆石; 与 CL 图像匹配的 U-Pb 定年数据表明, 第一组代表了二长花岗岩体的结晶年龄 (420 ~ 419Ma), 时代为中晚志留纪; 第二组年龄代表了岩体的初始侵入年龄; 第三组则代表了岩体捕获的围岩或地层的年龄。

(2) 岩体的岩相学、岩石地球化学、Sr-Nd 同位素及锆石温度计共同表明, 山庄二长花岗岩为高钾钙碱性-过铝质花岗岩, 是由古元古代富粘土的泥质源岩在压力 3.2 ~ 2.7kbar、低温条件 722 ~ 720°C 条件下形成的 S 型花岗岩。

(3) 结合华南早古生大地构造演化特征, 山庄二长花岗岩体为后碰撞环境下形成的花岗岩。

致谢 二位审稿人及编辑提出的详细意见对本文改进及写作水平的提高都有很大的帮助; 张玉泉研究员、牛贺才研

究员阅读并指出了问题和提出了意见; 在此一起表示感谢。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. 1984. Regional Geology of Jiangxi Province. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 921 (in Chinese)
- Chen HD, Hou MC, Xu XS and Tian JC. 2006. Tectonic evolution and sequence stratigraphic framework in South China during Caledonian. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33(1): 1 - 8 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF and Jahn BM. 1999. Nd-Sr-Pb isotope tracer and continental crust evolution in SE China. In: Zheng YF (ed.). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 262 - 287 (in Chinese)
- Condie KC. 1989. *Plate Tectonics and Crustal Evolution*. 3rd Edition. New York: Pergamon Press, 476
- Cui YY. 2014. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granitoids in the Sanming-Ganzhou Area, South China. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1 - 64 (in Chinese with English summary)
- Dostal J and Chatterjee AK. 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
- Faure M, Shu LS, Wang B, Charvet J, Choulet F and Monie P. 2009. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. *Terra Nova*, 21(5): 360 - 368
- Ferry JM and Watson EB. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429 - 437
- Finger F, Roberts MP, Haunschmid B, Schermaier A and Steyrer HP. 1997. Variscan granitoids of central Europe: Their typology, potential sources and tectonothermal relations. *Mineralogy and Petrology*, 61(4): 67 - 96
- Fu B, Mernagh TP, Kita NT, Kemp AS and Valley JW. 2009. Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: A case study from the Gidginbung high - sulphidation Au-Ag-(Cu) deposit, SE Australia. *Chemical Geology*, 259(3 - 4): 131 - 142
- Fu WW, Xu DR, Wu CJ, Fu YR, Zhou YC, Zhou YQ, Wang ZL and Lin G. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of syenogranites hosting Gaotongling Mo deposit in Hainan Province: Implications for metallogenesis. *Mineral Deposits*, 33(2): 419 - 427 (in Chinese with English abstract)
- Gao S, Luo TC, Zhang BR, Zhang HF, Han YW, Zhao ZD and Hartmut K. 1999. Structure and composition of the continental crust in East China. *Science in China (Series D)*, 42(2): 129 - 140
- Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. *Chemical Geology*, 120(3 - 4): 347 - 359
- Griffin WL, Belousova EA, Shee SR, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3 - 4): 231 - 282
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M and Rise AC (eds.). *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 19(1): 67 - 81
- Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46 - 56
- He WH, Tang TT, Yue ML, Deng JF, Pan GT, Xing GF, Luo MS, Xu YD, Wei Y, Zhang ZY, Xiao YF and Zhang KX. 2014. Sedimentary and tectonic evolution of Nanhuan-Permian in South China. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 39(8): 929 - 953 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of hadean zircon from the Jack Hills, Australia.

Geochimica et Cosmochimica Acta, 69(3): 637–648

- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 489–508
- Jiang DH, Chen KL and Tu G. 1987. Petrological and physico-chemical conditions of formation of the main body of Yuechengling granite. *Journal of Guilin College of Geology*, 7(1–2): 25–34 (in Chinese with English abstract)
- Li C., Chen SY, Zhang PF, Zhang Y, Wang L and Bi MW. 2010. Research of South China Caledonian intracontinental tectonic attribute. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 34(5): 18–24 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873–1885
- Li ZX. 1998. Tectonic history of the major east Asian lithospheric blocks since the mid-Proterozoic: A synthesis. In: Flower MFJ, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. *Geodynamics 27*. Washington, DC: American Geophysical Union, 221–243
- Li ZX, Li WX, Wartho JA, Clark C, Li WX, Zhang CL and Bao CM. 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. *GSA Bulletin*, 122(5–6): 772–793
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled Plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 91–96 (in Chinese with English abstract)
- Lou FS, Shu LS, Yu JH and Wang DZ. 2002. Petrological and geochemical characteristics and origin of the Wugongshan dome granite, Jiangxi Province. *Geological Review*, 48(1): 80–88 (in Chinese with English abstract)
- Lou FS, Shen WZ, Wang DZ, Shu LS, Wu FJ, Zhang FR and Yu JH. 2005. Zircon U-Pb isotopic chronology of the Wugongshan Dome compound granite in Jiangxi Province. *Acta geologica Sinica*, 79(5): 636–644 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- Qian Y, Sun FY, Li BL, Huo L and Zhang YJ. 2013. Trace element geochemical and U-Pb geochronology of metamorphic recrystallization zircon: Taking gneiss from Hongtoushan copper-zinc deposit as an example. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(4): 1500–1509 (in Chinese with English abstract)
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247–263
- Shen WZ, Ling HF, Li WX, Huang XL and Wang DZ. 1999. Study on the Nd-Sr isotopic compositions of granitoids in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 5(1): 22–32 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Wang DZ and Shen WZ. 2000. Nd-Sr isotopic compositions of granitic rocks of the mesozoic metamorphic core complex in the Wugongshan area, Jiangxi Province. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 36(3): 306–311 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: From cathaysian block to caledonian period folded orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418–431 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Yu JH, Jia D, Wang B, Shen WZ and Zhang YQ. 2008. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581–1593 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS. 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)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1–4): 29–44
- Tang JF, Wang XM and Liu FY. 1991. Tectonic Deformation and Geologic Survey of the Wugongshan Metamorphic Terrane. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–95 (in Chinese)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 1–312
- Wang M and Shu LS. 2007. Rock geochemical characteristics of the Neoproterozoic Wuyishan ophiolite mélange. *Geology in China*, 34(4): 572–583 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Shu LS, Xing GF, Zhou JC, Tang M, Shu XJ, Qi L and Hu YH. 2012. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800 ~ 760Ma volcanic rocks. *Precambrian Research*, 222–223: 404–423
- Wang YJ, Zhang AM, Fan WM, Zhao GC, Zhang GW, Zhang YZ, Zhang FF and Li SZ. 2011. Kwangsiian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains. *Lithos*, 127(1–2): 239–260
- Wang YJ, Zhang AM, Cawood PA, Fan WM, Xu JF, Zhang GW and Zhang YZ. 2013. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an Early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia. *Precambrian Research*, 231: 343–371
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304
- Watson EB and Harrison TM. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest earth. *Science*, 308(5723): 841–844
- Wei GJ, Liang XR, Li XH and Liu Y. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295–299 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xiong CL, Jia XC, Yang XJ, Luo G, Bai XZ and Huang BX. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Ordovician Mengmao monzogranite in Longling area of western Yunnan Province and its tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 277–286 (in Chinese with English abstract)
- Xiong SQ, Kang ZQ, Feng ZH, Pang CJ, Fang GC, Zhang QW, Wu JC and Jiang XZ. 2015. Zircon U-Pb age and geochemistry of Dajin granitic pluton in Dayaoshan area, Guangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(4): 736–746 (in Chinese)
- Xu DR, Gu XX, Li PC, Chen GH, Xia B, Robert B, He ZL and Fu GG. 2007. Mesoproterozoic-Neoproterozoic transition: Geochemistry, provenance and tectonic setting of clastic sedimentary rocks on the SE margin of the Yangtze Block, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5–6): 637–650
- Xu DR, Xia B, Bakun-Czubarow N, Bachlinski R, Li P, Chen GH and Chen T. 2008. Geochemistry and Sr-Nd isotope systematics of metabasites in the Tunchang area, Hainan Island, South China: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Mineralogy and Petrology*, 92(3–4): 361–391
- Xu KQ and Tu GC. 1986. *Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1–20 (in Chinese)
- Yang MG, Huang SB, Lou FS, Tang WX and Mao SB. 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenetic process in

- Southeast China continental area. *Geology in China*, 36(3): 528 – 543 (in Chinese with English abstract)
- Ye M, Zhang QW, Hu HQ, Qin Y, Yang QJ, Bai LA, Kang ZQ, Zhang JL and Gao P. 2015. Chronology and geochemical characteristics of granodiorite porphyry of Dawangding rockmass in Dayaoshan area, Guangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(4): 756 – 765 (in Chinese with English abstract)
- Yin FG, Xu XS, Wan F and Chen M. 2001. The sedimentary response to the evolutionary process of caledonian foreland basin system in South China. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5): 425 – 428 (in Chinese with English abstract)
- Yin HF, Wu SB, Du YS and Peng YQ. 1999. South china defined as part of tethyan archipelagic ocean system. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 24(1): 1 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Zhao L and Zhou X. 2004. Mineralogical characteristics and origin of garnet-bearing I-type granitoids in southeastern Fujian Province. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 364 – 377 (in Chinese with English abstract)
- Yu ZQ, Tang JF and Fu HQ. 1989. Geological features and origin of the Xinyu type iron deposits. *Mineral Deposits*, 8(4): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2411 – 2421
- Zhang FR, Shu LS, Wang DZ, Yu JH and Shen WZ. 2009. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of South China. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 248 – 260 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FR, Shen WZ, Shu LS and Xiang L. 2010. Geochemical features of granites formed at late stage of Early Paleozoic in Jiangxi Province and their geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3456 – 3568 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q. 2015. Origin and tectonic implications of Silurian gabbros and I-type granite in central Fujian. Master Degree Thesis. Nanjing: Nanjing University, 1 – 44 (in Chinese with English summary)
- Zhao ZH, Bao ZW and Qiao YL. 2010. A peculiar composite M- and W-type REE tetrad effect: Evidence from the Shuiquangou alkaline syenite complex, Hebei Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 55(24): 2684 – 2696
- Zheng YF, Wu RX, Wu YB, Zhang SB, Yuan HL and Wu FY. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 163(3 – 4): 351 – 383
- Zhong CT, Deng JF, Wan YS, Mao DB and Li HM. 2007. Magma recording of Paleoproterozoic orogeny in central segment of northern margin of North China Craton: Geochemical characteristics and zircon SHRIMP dating of S-type granitoids. *Geochimica*, 36(6): 585 – 600 (in Chinese with English abstract)
- 国东部地壳的结构和组成. *中国科学(D辑)*, 29(3): 204 – 213
- 何卫红, 唐婷婷, 乐明亮, 邓晋福, 潘桂棠, 邢光福, 骆满生, 徐亚东, 韦一, 张宗言, 肖昇凡, 张克信. 2014. 华南南华纪-二叠纪沉积大地构造演化. *地球科学—中国地质大学学报*, 39(8): 929 – 953
- 胡恭任, 章邦桐. 1998. 赣中变质基底的 Nd 同位素组成和物质来源. *岩石矿物学杂志*, 17(1): 35 – 40
- 姜德厚, 陈克立, 屠刚. 1987. 越城岭花岗岩主体的岩石学特征及其形成物理化学条件. *桂林冶金地质学院学报*, 7(1 – 2): 25 – 34
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1 – 921
- 李聪, 陈世悦, 张鹏飞, 张跃, 王玲, 毕明威. 2010. 华南加里东期陆内构造属性探讨. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 34(5): 18 – 24
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981 – 991
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91 – 96
- 楼法生, 舒良树, 于津海, 王德滋. 2002. 江西武功山穹隆花岗岩岩石地球化学特征与成因. *地质论评*, 48(1): 80 – 88
- 楼法生, 沈渭洲, 王德滋, 舒良树, 吴富江, 张芳荣, 于津海. 2005. 江西武功山穹隆复式花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究. *地质学报*, 79(5): 636 – 644
- 钱焯, 孙丰月, 李碧乐, 霍亮, 张雅静. 2013. 变质重结晶锆石微量元素地球化学与 U-Pb 年代学: 以辽宁红透山铜锌矿床赋矿片麻岩为例. *中南大学学报(自然科学版)*, 44(4): 1500 – 1509
- 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 黄小龙, 王德滋. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究. *高校地质学报*, 5(1): 22 – 32
- 舒良树, 王德滋, 沈渭洲. 2000. 江西武功山中生代变质核杂岩的花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 36(3): 306 – 311
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. *高校地质学报*, 12(4): 418 – 431
- 舒良树, 于津海, 贾东, 王博, 沈渭洲, 张岳桥. 2008. 华南东段早古生代造山带研究. *地质通报*, 27(10): 1581 – 1593
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 31(7): 1035 – 1053
- 汤加富, 王希明, 刘芳宇. 1991. 江西武功山地区中浅变质岩 1: 50000 区域地质调查方法研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 95
- 王淼, 舒良树. 2007. 武夷山新元古代蛇绿混杂岩岩石地球化学特征. *中国地质*, 34(4): 572 – 583
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP)MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295 – 299
- 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. *科学通报*, 49(16): 1589 – 1604
- 熊昌利, 贾小川, 杨学俊, 罗改, 白宪洲, 黄柏鑫. 2012. 滇西龙陵地区勐冒奥陶纪二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造环境. *地质通报*, 31(2 – 3): 277 – 286

附中文参考文献

- 陈洪德, 侯明才, 许效松, 田景春. 2006. 加里东期华南的盆地演化与层序格架. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 33(1): 1 – 8
- 陈江峰, 江博明. 1999. Nd-Sr-Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞编. *化学地球动力学论文集*. 北京: 科学出版社, 262 – 287
- 崔圆圆. 2014. 华南三明-赣州地区花岗岩类年代学、地球化学及岩石成因. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1 – 64
- 付王伟, 许德如, 吴传军, 傅杨荣, 周迎春, 周岳强, 王智琳, 林舸. 2014. 海南省高屯岭铅矿床赋矿岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿意义. *矿床地质*, 33(2): 419 – 427
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, Kern H. 1999. 中

- 熊松泉, 康志强, 冯佐海, 庞崇进, 方贵聪, 张青伟, 吴佳昌, 蒋兴洲. 2015. 广西大瑶山地区大进岩体的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其意义. 桂林理工大学学报, 35(4): 736-746
- 徐克勤, 涂光炽. 1986. 花岗岩地质和成矿关系. 见: 国际学术会议论文集. 南京: 江苏科学技术出版社, 1-20
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 唐维新, 毛素斌. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36(3): 528-543
- 叶鸣, 张青伟, 胡华清, 秦亚, 杨启军, 白令安, 康志强, 张佳莉, 高攀. 2015. 广西大瑶山地区大王顶花岗岩闪长斑岩年代学和地球化学特征. 桂林理工大学学报, 35(4): 756-765
- 尹福光, 许效松, 万方, 陈明. 2001. 华南地区加里东期前陆盆地演化过程中的沉积响应. 地球学报, 22(5): 425-428
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. 地球科学—中国地质大学学报, 24(1): 1-12
- 于津海, 赵蕾, 周旋. 2004. 闽东南含石榴石 I 型花岗岩的矿物学特征及成因. 高校地质学报, 10(3): 364-377
- 余志庆, 汤家富, 符鹤琴. 1989. “新余式”铁矿地质特征及其成因. 矿床地质, 8(4): 1-10
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511-1520
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 于津海, 沈渭洲. 2009. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨. 地学前缘, 16(1): 248-260
- 张芳荣, 沈渭洲, 舒良树, 向磊. 2010. 江西省早古生代晚期花岗岩的地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 26(12): 3456-3468
- 张乔. 2015. 福建中部志留纪辉长岩和 I 型花岗岩成因及构造意义. 硕士学位论文. 南京: 南京大学, 1-44
- 钟长汀, 邓晋福, 万渝生, 毛德宝, 李惠民. 2007. 华北克拉通北缘中段古元古代造山作用的岩浆记录: S 型花岗岩地球化学特征及锆石 SHRIMP 年龄. 地球化学, 36(06): 585-600