

·专题研究·

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

柏道远, 钟响, 贾朋远, 熊雄, 黄文义

(湖南省地质调查院, 湖南长沙 410016)

摘要: 苗儿山岩体位于南岭西段, 主体为加里东期花岗岩, 少量印支期和早燕山期花岗岩。加里东期花岗岩具块状构造, 由早期黑云母花岗岩闪长岩、中期斑状黑云母二长花岗岩和晚期细粒黑(二)云母二长花岗岩组成, 以斑状黑云母二长花岗岩为主。对中期斑状黑云母二长花岗岩和晚期细粒二云母二长花岗岩各进行了 1 个样品的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测试, 分别得到 428.5 ± 3.8 Ma、 409 ± 4 Ma 的年龄值, 反映出早志留世末、志留纪末-泥盆纪初 2 期岩浆事件。中期主体花岗岩具有富硅 ($\text{SiO}_2 = 70.09\% \sim 76.59\%$)、中铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.71\% \sim 14.72\%$)、高钾 ($\text{K}_2\text{O} = 4.48\% \sim 5.73\%$)、中碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.24\% \sim 7.91\%$)、高 ASK (平均 1.15) 的特点, 总体属高钾钙碱性系列过铝质花岗岩类。主体花岗岩微量元素中 Ba、Nb、Sr、P、Ti 表现为明显亏损, Rb、(Th + U + K)、(La + Ce)、Nd、(Zr + Hf + Sm)、(Y + Yb + Lu) 等则相对富集, 稀土总量中等 ($179.8 \times 10^{-6} \sim 270.6 \times 10^{-6}$), 轻稀土富集 [(La/Yb)_N = 5.07 ~ 14.33], 具明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.15 \sim 0.46$)。岩体具有较高的 I_{Sr} 值 (0.706 60 ~ 0.720 82) 和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-8.29 ~ -7.94), 两阶段 Nd 模式年龄 ($t_{2\text{DM}}$) 为 1.81 ~ 1.84 Ga。C/MF - A/MF 图解显示源岩为变质泥质岩和碎屑岩。上述地球化学特征表明花岗岩为 S 型花岗岩, 源岩主要为中、上地壳岩石。花岗岩氧化物和微量元素构造环境判别图解指示岩体形成于后碰撞构造环境。基于岩石成因、构造环境判别以及区域构造演化过程, 推断加里东期苗儿山花岗岩的具体形成机制为: 在陆内强挤压之后挤压应力相对松弛、压力降低的后碰撞构造环境下, 因地壳增厚而升温的中、上地壳岩石减压熔融并向上侵位。结合区域资料分析, 苗儿山地区在奥陶纪末-志留纪初北流运动和志留纪后期的广西运动中均产生过强烈的陆内挤压和地壳增厚。

关键词: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 地球化学特征, S 型花岗岩, 后碰撞构造环境, 北流运动, 广西运动, 苗儿山, 湘西南
中图分类号: P597⁺.3; P595 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2014)03-0407-17

Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemistry of Caledonian Miao'ershan pluton in the western part of the Nanling Mountains and their tectonic significance

BAI Dao-yuan, ZHONG Xiang, JIA Peng-yuan, XIONG Xiong and HUANG Wen-yi
(Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410016, China)

Abstract: The Miao'ershan pluton in the western segment of the Nanling Mountains is mainly composed of Caledonian granites with minor Indosinian and Yanshanian granites. The Caledonian plutons are composed of early stage biotite granodiorite, middle stage porphyritic biotite monzogranite (principal part) and late stage fine-grained biotite/two-mica monzogranite, with all the rocks having massive structure. The authors carried out U-Pb zircon dating of a porphyritic biotite monzogranite sample and a fine-grained two-mica monzogranite sample and obtained weighted average ages of 428.5 ± 3.8 Ma and 409 ± 4 Ma respectively, suggesting two magmatic

收稿日期: 2013-12-15; 修订日期: 2014-04-15

基金项目: 中国地质调查局资助项目(1212011120793; 1212010811032)

作者简介: 柏道远(1967-), 男, 教授级高级工程师, 长期从事区域地质调查与基础地质研究, E-mail: daoyuanbai@sina.com

events that occurred in the late episode of Early Silurian and in the late episode of Silurian to the early stage of Devonian respectively. Geochemically, the middle stage rock body is a high-K calc-alkaline peraluminous granitic pluton and is characterized by higher SiO_2 (70.09% ~ 76.59%), moderate Al_2O_3 (12.71% ~ 14.72%), higher K_2O (4.48% ~ 5.73%) and moderate alkali ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 7.24\% \sim 7.91\%$) content as well as higher ASI (1.15 on average). The granite is depleted in Ba, Nb, Sr, P and Ti but enriched in Rb, (Th + U + K), (La + Ce), Nd, (Zr + Hf + Sm) and (Y + Yb + Lu). It displays moderate total REE content ($\Sigma\text{REE} = 179.8 \times 10^{-6} \sim 270.6 \times 10^{-6}$), enrichment of LREE [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.07 \sim 14.33$] and negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.15 \sim 0.46$). It also has slightly higher I_{Sr} (0.706 60 ~ 0.720 82) but lower $\epsilon\text{Nd}(t)$ ($-8.29 \sim -7.94$) with Nd model ages ($t_{2\text{DM}}$) being 1.81 ~ 1.84 Ga. The C/MF - A/MF diagram indicates that the Caledonian Miao'ershan granites came from mudstones and clastic rocks. All these geochemical characteristics point to S-type granitoid and suggest that the granites might have come from rocks of middle-upper crust. Multiple oxide and trace element diagrams for discrimination of structural environment show that the granites were formed in a post-collisional tectonic setting. Based on petrogenesis and discrimination of structural environment in combination with regional tectonic evolutionary setting, the authors infer that the formation mechanism of Caledonian Miao'ershan granites should be as follows: the thickening of the crust in Caledonian movement caused the rise of the crust temperature, and later weakening of stress in a post-collisional tectonic setting resulted in the melting of middle-upper crust, with the magma emplaced in a relative open environment. These results and regional geological data indicate that there occurred strong intracontinental compression and crust thickening in Miao'ershan area in Beiliu movement as well as in Guangxi movement.

Key words: zircon SHRIMP U-Pb dating; geochemical characteristics; S-type granitoid; post-collisional tectonic setting; Beiliu movement; Guangxi movement; Miao'ershan; southwestern Hunan Province

早古生代晚期的加里东运动是华南极为重要的一次构造事件,形成了强烈的褶皱和断裂变形(柏道远等, 2006b, 2012; 舒良树等, 2008; 郝义等, 2010; 舒良树, 2012),并引发了广泛而强烈的花岗岩岩浆活动(莫柱孙等, 1980; 周新民, 2003; 舒良树等, 2008; 张芳荣等, 2009; 舒良树, 2012)。前人对加里东构造-岩浆事件进行过大量研究并取得了丰硕成果,认识到加里东运动时代跨寒武纪末-志留纪末,且自早至晚可分为寒武纪末-奥陶纪初的郁南运动、中奥陶世末的都匀运动、奥陶纪末-志留纪初的北流运动(崇余运动)、志留纪后期的广西运动等多期次(卢华复, 1962; 莫柱孙等, 1980; 余开富等, 1995; 吴浩若, 2000a, 2000b; 郝义等, 2010; 杜远生等, 2012)。加里东运动中古陆逐渐向北西扩展(陈旭等, 1999, 2012; Rong and Zhan, 2006)造山带由南向北挤压(杜远生等, 2012);相关的花岗岩岩浆活动时代主要为 440 ~ 390 Ma(舒良树, 2012)或 460 ~ 410 Ma(张芳荣等, 2009)。尽管如此,华南加里东运动尚有一些问题需要进一步研究,如不同期次构造运动的影响范围及其背景差异;再如对加里东期花岗岩构造成因,或认为与板内造山作用下沿断裂发生中上地壳部分熔融有关(周新民,

2003)或认为与板内碰撞造山之后的后碰撞或后造山伸展-减薄有关(柏道远等, 2006a; 张芳荣等, 2009; 张苑等, 2011; 舒良树, 2012)或认为陆-弧-陆碰撞所致(许德如等, 2006)。

湖南省加里东期花岗岩发育,近些年来已获得九嶷山雪花顶岩体(付建明等, 2004)、彭公庙岩体(张文兰等, 2011)等部分岩体的锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,但高精度年龄数据总体偏少。位于湘西南的苗儿山岩体为一多阶段复式岩体,前人对中生代花岗岩成岩成矿时代、地球化学特征、成矿作用等进行了较多研究(徐伟昌等, 1993; 康如华, 2000; 倪艳军等, 2009; 李妩巍等, 2011; 方适宜, 2012; 伍静等, 2012; 程顺波等, 2013),但对组成岩体主体的加里东期花岗岩尚缺乏精确同位素定年和详细的地球化学特征、岩石成因、形成环境等研究。此外,苗儿山岩体西侧为 NNE 向城步-新化大断裂,该断裂西侧发育志留系而东侧无出露(湖南省地质矿产局, 1988)这一差异反映了什么样的构造背景和沉积/剥蚀过程有待研究。本文对加里东期苗儿山岩体进行了年代学和地球化学研究,进而探讨岩石成因及形成构造背景,并为早古生代后期城步-新化大断裂两侧的构造、沉积演化过程提供了约束。

1 地质与岩石概况

苗儿山岩体位于扬子陆块与钦杭结合带的交接带(柏道远等, 2012)。其地处南岭西段, 跨湘西南

和桂北地区, 为一长轴呈南北向至 NNE 向的大型复式岩体(图 1a)。岩体主体为加里东期花岗岩, 少量印支期和早燕山期花岗岩(图 1b)。

加里东期花岗岩与青白口系、南华系-奥陶系呈侵入接触, 与泥盆系呈沉积接触(图 1b)。与前泥盆

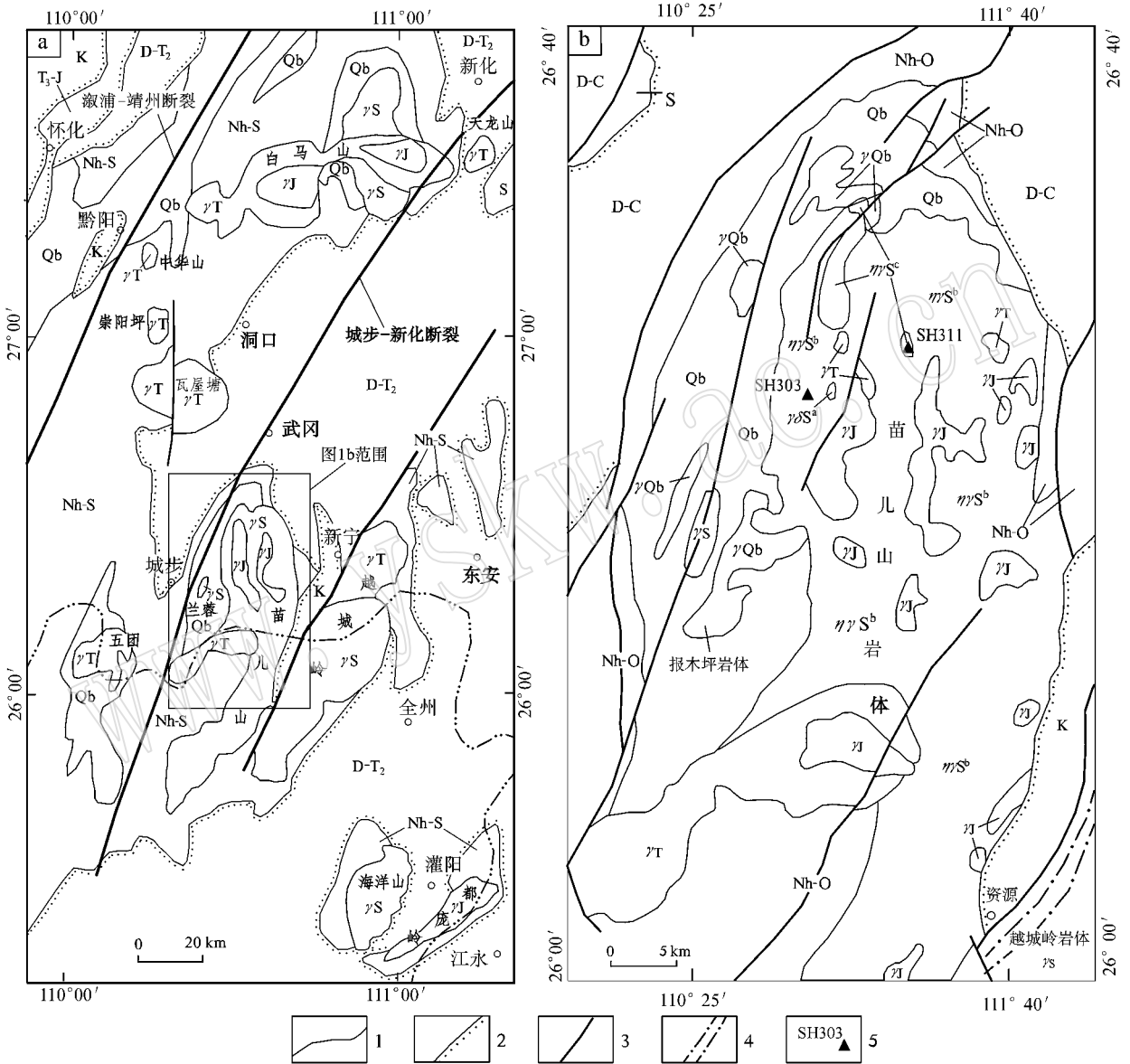


图 1 区域地质 (a) 及苗儿山岩体地质略图 (b)

Fig. 1 Regional geological map (a) and geological sketch map of Miao'ershan pluton (b)

1—地质界线; 2—角度不整合界线; 3—断裂; 4—韧性剪切带; 5—锆石 SHRIMP U-Pb 年龄样品位置及编号; 图 a: J—白垩系; T₃-J—上三叠统-侏罗系; D-T₂—泥盆系-中三叠统; Nh-S—南华系-志留系; Qb—青白口系板溪群; YJ—早燕山期花岗岩; YT—印支期花岗岩; YS—加里东期花岗岩; 图 b: K—白垩系; D-C—泥盆系-石炭系; Nh-O—南华系-奥陶系; Qb—青白口系; YJ—早燕山期花岗岩; YT—印支期花岗岩; YS—加里东期花岗岩; YQb—青白口纪花岗岩; YS^a—加里东期苗儿山岩体早期中粒斑状黑云母二长花岗岩; YS^b—加里东期苗儿山岩体中期中粒-粗中粒斑状或少斑状黑云母二长花岗岩; YS^c—加里东期苗儿山岩体晚期细粒黑(二)云母二长花岗岩

1—geological boundary; 2—unconformity; 3—fault; 4—ductile shear zone; 5—location and serial number of zircon SHRIMP U-Pb dating sample; Fig. a: K—Cretaceous; T₃-J—Upper Triassic-Middle Jurassic; D-T₂—Devonian-Middle Triassic; Nh-S—Nanhuan-Silurian; Qb—Neoproterozoic Banxi Group; YJ—Early Yanshanian granitoid; YT—Indosinian granitoid; YS—Caledonian granitoid; Fig. b: K—Cretaceous; D-C—Devonian-Carboniferous; Nh-O—Nanhuan-Ordovician; Qb—Qingbaikouan System; YJ—Early Yanshanian granite; YT—Indosinian granite; YS—Caledonian granite; YQb—Qingbaikouan granite; YS^a—medium-grained porphyritic biotite granodiorite of Caledonian Miao'ershan pluton; YS^b—fine-medium-grained to coarse-medium-grained porphyritic biotite monzogranite of Caledonian Miao'ershan pluton

系之间的侵入接触面一般倾向围岩,东侧倾角 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$,北西侧 $15^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。岩体内蚀变不发育,局部见绿泥石化、硅化和云英岩化;外蚀变带一般宽 $200 \sim 600$ m,局部地段达到 1000 m,蚀变类型主要为角岩化和硅化,局部地段见有绢云母化和大理岩化。

加里东期岩体自早至晚发育中粒斑状黑云母花岗闪长岩($\gamma\delta S^a$)、细中粒-粗中粒斑状(或少斑状)黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^b$)和细粒黑(二)云母二长花岗岩($\eta\gamma S^c$)以下分别称早期、中期和晚期花岗岩),以中期的斑状黑云母二长花岗岩为主。早期花岗闪长岩仅于岩体西北部局部见及,被中期花岗岩包裹,二者呈侵入接触关系。晚期花岗岩在岩体北部和西部少量分布,与中期花岗岩之间呈侵入接触关系。各次花岗岩均具块状结构,不发育挤压面理。

早期中粒斑状黑云母花岗闪长岩中斑晶为钾长石和斜长石,岩石主要矿物有斜长石(50%)、钾长石(15%)、石英(25%)、黑云母(10%)、角闪石(微),副矿物有磷灰石、锐钛矿、锆石等。中期斑状黑云母二长花岗岩的斑晶主要为钾长石,岩石主要矿物有钾长石(22%~55%)、斜长石(20%~40%)、石英(22%~40%)、黑云母(3%~10%),副矿物有磷灰石、锐钛矿、锆石、萤石等。晚期细粒黑(二)云母二长花岗岩的主要矿物有钾长石(33%~38%)、斜长石(22%~40%)、石英(30%~40%)、黑云母(2%~10%)及白云母(偶见或微量),副矿物为锡石、锆石、磷灰石、金属矿物等。

2 分析方法

年龄测定方法:将花岗岩样品粗碎后进行人工分选淘洗,再于双目镜下挑选出晶形较好且透明度较高的锆石。将样品锆石与标准锆石 TEM(年龄为 417 Ma)在玻璃板上用树脂固定、抛光,然后进行反射光照相以及阴极发光扫描电镜图像分析。锆石的阴极发光照相在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针研究室完成。锆石 SHRIMP U-Pb 分析在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,分析原理和流程见 Compston 等(1992)、Williams 等(1987)和简平等(2003)资料。应用标准锆石 TEM(417 Ma)进行元素间的分馏校正。一次离子流 O_2^- 强度为 $5 \sim 8$ nA,一次离子流束斑直径为 $25 \sim 30$ μm 。样品点清洗时间为 $120 \sim 180$ s。数据处理采用 Ludwig 博士编写的 SPUDI.0 及 ISOPLOT 程序(Ludwig,

1999,2001)。普通铅根据实测 ^{204}Pb 进行校正。

主量元素、微量元素和稀土元素由湖北武汉综合岩矿测试中心测定。主量元素除 CO_2 采用非水滴定法、 H_2O^+ 采用高温加热-浓硫酸吸收-重量法外,其它氧化物均采用 X 射线荧光光谱法(XRF)分析;样品采用无水四硼酸锂作为溶剂。微量元素分别采用 X 射线荧光光谱法(XRF)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、原子荧光光谱法(AFS)、发射光谱法(ES)等方法测定;除 W、Mo 采用碱溶法测定外,其它微量元素均采用酸溶法测定。稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析,样品处理采用酸溶法。

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定由武汉地质矿产研究所同位素室完成。

Rb-Sr 同位素测定:采用阳离子树脂(Dowex50 $\times 8$)交换法分离和纯化铷、锶,用热电离质谱仪 MAT261 分析 Rb、Sr 同位素组成,用同位素稀释法计算试样中的铷、锶含量及锶同位素比值,用 GBW04411、NBS607 和 NBS987 标准物质分别对分析流程和仪器进行监控;全流程 Rb、Sr 空白分别为 0.4×10^{-9} g 和 0.8×10^{-9} g。

Sm-Nd 同位素分析:取加入 $^{145}\text{Nd} + ^{149}\text{Sm}$ 混合稀释剂和不加稀释剂的样品各 1 份,以氢氟酸和高氯酸溶解后用 Dowex50 $\times 8$ 阳离子交换树脂进行分离和纯化。加了稀释剂的样品用于 Sm、Nd 含量质谱分析;未加稀释剂的解吸液上 P507 有机萃取树脂柱分离和纯化 Nd 以用于 Nd 同位素比值分析。Sm、Nd 含量和 Nd 同位素比值质谱分析采用热电离质谱仪 Triton 完成,Sm、Nd 含量采用同位素稀释法公式计算得到。用 GBW04419 和 ZkbzNd(JMC)标准物质对分析流程和仪器进行监控。全流程 Nd、Sm 空白分别为 1×10^{-10} g 和 0.7×10^{-10} g。

3 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

对加里东期苗儿山岩体中期细粒少斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma S^b$)和晚期细粒二云母二长花岗岩($\eta\gamma S^c$)分别采集样品 SH303、SH311 进行锆石 SHRIMP U-Pb 测年,采样位置见图 1b。

样品 SH303 和 SH311 分别分析了 9 颗、12 颗锆石 U-Pb 同位素组成。所分析锆石均为透明的自形晶体,阴极发光图像均显示出岩浆结晶成分环带(图 2),且 Th/U 含量比值高,为 $0.16 \sim 0.74$ (大于 0.1),

表明锆石为岩浆成因。

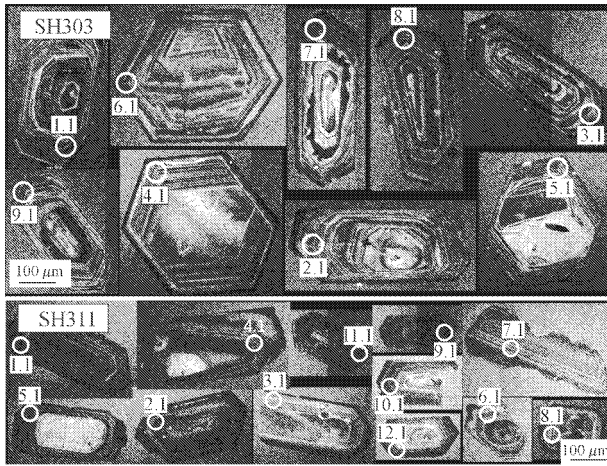


图 2 苗儿山加里东期花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 2 Cathodoluminescence images of zircons from Caledonian Miao'ershan granites

SH303 样品 U-Pb 年龄分析结果见表 1 和图 3。测点多偏离谐和线而于其左侧分布,其与²⁰⁷Pb 难以测准有关,不影响²⁰⁶Pb/²³⁸U 比值(陈卫锋等,2007)。9 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值相近,变化于 417.9 ~ 438.1 Ma 之间,加权平均年龄为 428.5 ± 3.8 Ma (2σ),MSWD=1.5,可视为细粒少斑状黑云母二长花岗岩的成岩年龄。

SH311 样品 U-Pb 年龄分析结果见表 1 和图 4。其中 2.1、4.1、6.1 和 10.1 等 4 个测点远离谐和线或显著偏离集群值(图 4),其余 8 个测点位于或紧邻曲线且分布集中,给出的加权平均年龄为 409 ± 4 Ma (2σ),MSWD=1.01,可视为细粒二云母二长花岗岩的成岩年龄。

上述 428.5 ± 3.8 Ma 和 409 ± 4 Ma 的 U-Pb 年龄表明花岗岩为加里东期岩浆活动产物,但 2 个年龄值相差约 20 Ma,明显反映出 2 期岩浆事件,分别为早志留世末和志留纪末-泥盆纪初。

表 1 加里东期苗儿山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析结果

Table 1 SHRIMP U-Pb data of zircons from Caledonian Miao'ershan pluton

测点	²⁰⁶ Pb _c /%	$\omega_{\text{Pb}}/10^{-6}$		²³² Th/ ²³⁸ U	年龄/Ma		²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	± %	
		U	Th		²⁰⁶ Pb*	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U							²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
样品 303													
SH303-1.1	0.29	980	390	58.4	0.41	430.9 ± 5.8	324 ± 47	0.052 90	2.1	0.504 0	2.5	0.069 12	1.4
SH303-2.1	0.24	1 169	346	69.9	0.31	432.8 ± 5.8	366 ± 36	0.053 88	1.6	0.516 0	2.1	0.069 44	1.4
SH303-3.1	0.22	1 402	425	82.2	0.31	424.9 ± 5.7	426 ± 35	0.055 34	1.6	0.520 0	2.1	0.068 13	1.4
SH303-4.1	0.25	1 425	732	82.9	0.53	421.3 ± 5.9	399 ± 30	0.054 67	1.4	0.509 0	2.0	0.067 54	1.4
SH303-5.1	0.08	1 245	614	72.7	0.51	423.6 ± 5.6	382 ± 30	0.054 27	1.3	0.508 2	1.9	0.067 92	1.4
SH303-6.1	0.08	1 744	630	105	0.37	438.1 ± 5.8	391 ± 20	0.054 49	0.91	0.528 4	1.6	0.070 32	1.4
SH303-7.1	0.29	2 661	540	159	0.21	432.9 ± 5.7	394 ± 25	0.054 56	1.1	0.522 5	1.8	0.069 46	1.4
SH303-8.1	0.65	1 852	836	112	0.47	435.5 ± 5.7	342 ± 42	0.053 31	1.9	0.514 0	2.3	0.069 89	1.4
SH303-9.1	0.05	1 207	617	69.5	0.53	417.9 ± 5.6	392 ± 26	0.054 49	1.1	0.503 2	1.8	0.066 98	1.4
样品 311													
SH311-1.1	0.23	2 876	888	163	0.32	411.8 ± 5.4	407 ± 24	0.054 87	1.1	0.499 1	1.7	0.065 96	1.4
SH311-2.1	1.12	6 571	1 041	406	0.16	443.3 ± 5.8	506 ± 28	0.057 38	1.3	0.563 0	1.9	0.071 19	1.3
SH311-3.1	0.77	972	719	55.0	0.76	407.9 ± 5.6	434 ± 65	0.055 50	2.9	0.500 0	3.2	0.065 32	1.4
SH311-4.1	0.47	4 967	1 364	318	0.28	460.6 ± 6.0	610 ± 22	0.060 19	1.0	0.615 0	1.7	0.074 07	1.3
SH311-5.1	0.36	391	292	22.1	0.77	408.3 ± 5.9	288 ± 78	0.052 10	3.4	0.469 0	3.7	0.065 39	1.5
SH311-6.1	3.19	1 819	483	107	0.27	412.0 ± 5.7	750 ± 120	0.064 20	5.7	0.585 0	5.9	0.066 00	1.4
SH311-7.1	0.05	1 502	287	84.3	0.20	407.7 ± 5.8	450 ± 25	0.055 94	1.1	0.503 6	1.9	0.065 29	1.5
SH311-8.1	0.55	748	514	41.6	0.71	402.0 ± 5.5	488 ± 56	0.056 90	2.5	0.505 0	2.9	0.064 34	1.4
SH311-9.1	0.36	4 500	1 014	253	40.23	08.0 ± 5.3	387 ± 28	0.054 38	1.2	0.489 8	1.8	0.065 33	1.4
SH311-10.1	0.09	2 337	1 253	125	0.55	389.2 ± 5.1	350 ± 24	0.053 50	1.0	0.459 0	1.7	0.062 23	1.4
SH311-11.1	0.20	5 106	1 593	296	0.32	420.3 ± 5.5	388 ± 15	0.054 41	0.68	0.505 5	1.5	0.067 38	1.3
SH311-12.1	0.24	1 670	899	92.8	0.56	403.3 ± 6.4	373 ± 39	0.054 05	1.7	0.481 0	2.4	0.064 60	1.6

注：²⁰⁶Pb_c/% 为全部²⁰⁶Pb 中属于普通铅²⁰⁶Pb 所占的百分比，Pb* 为放射性成因铅的含量，普通铅根据实测²⁰⁴Pb 进行校正。

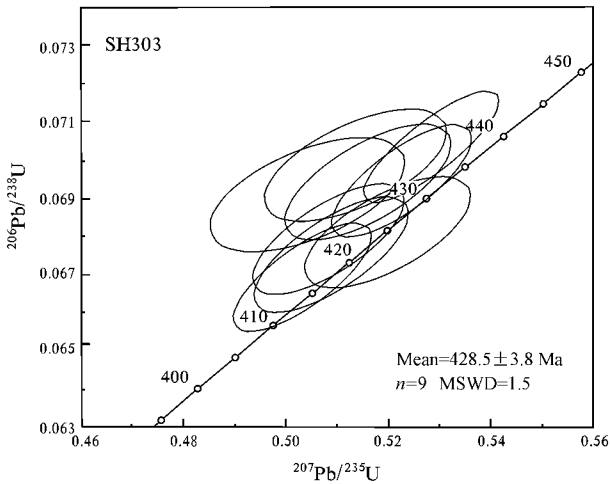


图 3 样品 SH303 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircons from sample SH303

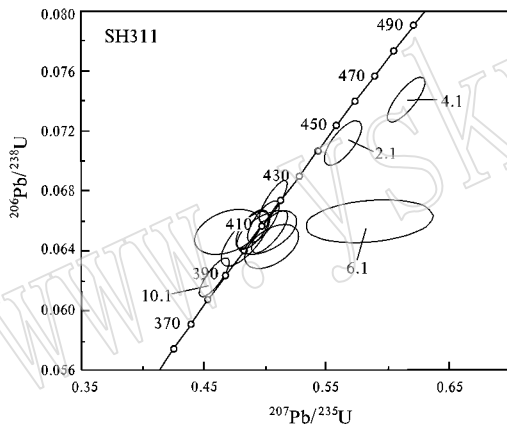


图 4 样品 SH311 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircons from sample SH311

4 岩石地球化学特征

4.1 主元素地球化学特征

加里东期苗儿山花岗岩的主元素分析结果如表 2 所示。鉴于早期花岗闪长岩仅有 1 个样品而代表性不够,以下主要讨论中期和晚期花岗岩。

组成岩体主体的中期花岗岩 SiO₂ 含量变化较大,为 70.09%~76.59%(SiO₂ 及以下主元素含量值均系无水化处理结果,故与表 2 略有差别),平均为 73.17%。随着 SiO₂ 含量的增加,Al₂O₃、FeO^T、TiO₂、MgO、CaO 等均呈规律减少,而 Na₂O、K₂O、P₂O₅ 则未显规律变化(图 5)。Al₂O₃ 含量中等,为 12.71%~14.72%,平均为 13.79%。K₂O 含量较高,为 4.48%~5.73%,平均为 4.95%;全碱(ALK)含量中等,Na₂O+K₂O 为 7.24%~7.91%,

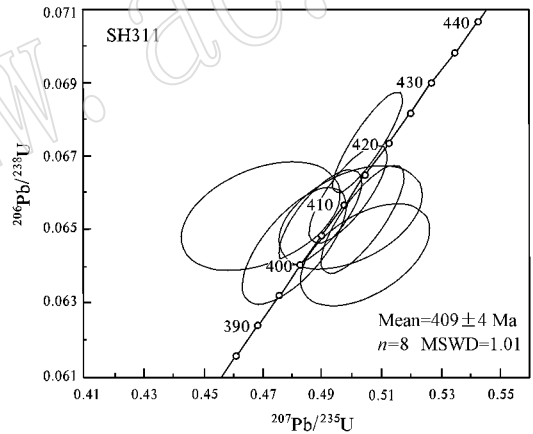


表 2 加里东期苗儿山岩体的主元素组成

ω_B/%

Table 2 Petrochemical components of granites in Caledonian Miao'ershan pluton

样号	代号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	CO ₂	H ₂ O ⁺	总和	ASI	ANK	ALK	K ₂ O/Na ₂ O	A/MF
ML6	ηγS ^c	70.64	0.35	14.27	1.07	1.90	0.05	1.19	2.48	2.23	3.82	1.09		0.12	99.21	1.29	1.83	6.11	1.71	2.05
ML5	ηγS ^c	72.64	0.27	13.25	0.36	1.84	0.04	0.52	1.18	2.30	4.70	1.03		0.82	98.95	1.35	1.49	7.13	2.04	3.05
HX311-1	ηγS ^c	72.69	0.13	14.99	0.22	1.05	0.02	0.38	0.01	5.95	3.85	0.02	0.02	0.57	99.9	1.07	1.07	9.87	0.65	5.53
ML4	ηγS ^b	70.45	0.32	13.76	0.50	2.48	0.05	0.66	1.67	2.37	4.83	0.11		0.42	97.62	1.14	1.51	7.41	2.04	2.38
ML3	ηγS ^b	69.70	0.31	14.01	0.39	2.60	0.05	0.81	2.12	2.88	4.86	0.11		0.44	98.28	1.02	1.40	7.91	1.69	2.26
ML2	ηγS ^b	72.43	0.24	13.23	0.59	2.56	0.06	0.62	1.35	1.53	5.63	0.07		0.47	98.78	1.26	1.53	7.28	3.68	2.25
HX308-1	ηγS ^b	74.34	0.24	12.90	0.62	1.95	0.05	0.72	0.60	2.73	4.75	0.06	0.03	0.85	99.84	1.21	1.34	7.56	1.74	2.43
HX313-1	ηγS ^b	75.79	0.14	12.58	0.59	1.25	0.02	0.67	0.08	2.92	4.83	0.04	0.05	0.93	99.89	1.24	1.25	7.83	1.65	3.03
HX325-1	ηγS ^b	74.64	0.19	13.01	0.21	2.05	0.08	0.41	0.76	3.19	4.44	0.07	0.08	0.74	99.87	1.14	1.29	7.70	1.39	3.10
HX302-1	ηγS ^b	72.24	0.29	13.48	0.29	2.32	0.04	0.85	1.85	2.68	4.91	0.09	0.05	0.74	99.83	1.04	1.38	7.66	1.83	2.33
HX307-1	ηγS ^b	71.43	0.33	14.10	0.57	2.08	0.05	1.01	2.04	2.89	4.54	0.11	0.05	0.64	99.84	1.06	1.46	7.49	1.57	2.28
HX324-1	ηγS ^b	71.14	0.37	14.32	0.63	2.35	0.06	0.96	0.89	2.14	5.35	0.11	0.08	1.43	99.83	1.32	1.54	7.61	2.50	2.20
ML1	ηγS ^b	68.77	0.4	14.44	0.9	2.33	0.06	1.11	2.54	2.46	4.64	0.46		0.37	98.48	1.05	1.59	7.24	1.89	2.02
HX304-2	γδS ^a	66.60	0.50	15.50	0.74	3.08	0.07	1.96	2.85	2.81	4.16	0.18	0.05	1.32	99.82	1.10	1.70	7.08	1.48	1.52

注:样品 ML1~6 来源于①,其它来源于本文,分析方法见前文。ASI=Al/(Ca+1.67P+Na+K)(分子比);ANK=Al/(Na+K)(分子比);A/MF=Al₂O₃/(MgO+FeO)(分子比)。

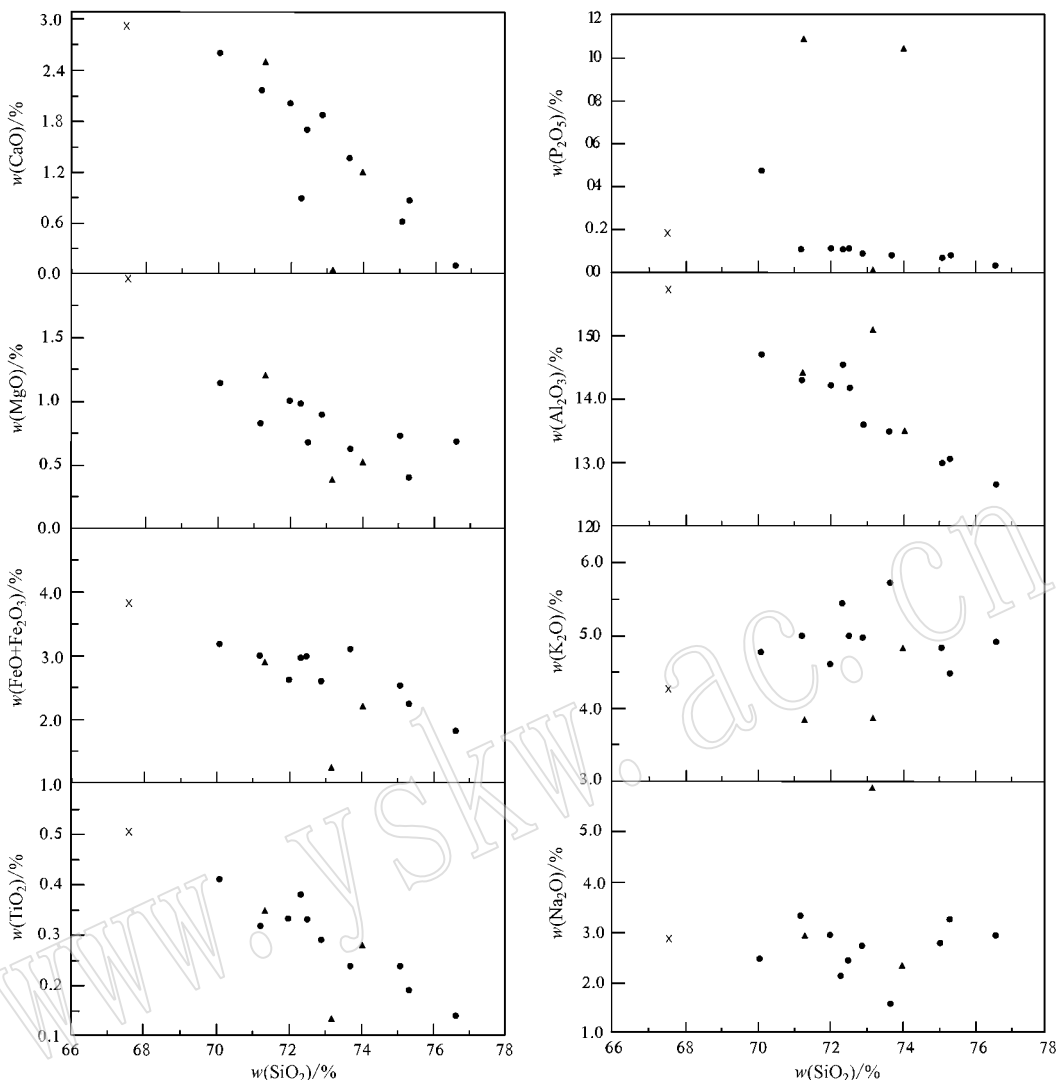


图 5 加里东期苗儿山岩体主要氧化物 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of selected major oxides of Caledonian Miao'ershan pluton

×—早期中粒斑状黑云母花岗岩闪长岩；●—中期细中粒-粗中粒斑状(或斑状)黑云母二长花岗岩；▲—晚期细粒黑(二)云母二长花岗岩
 ×—medium-grained porphyritic biotite granodiorite；●—fine-medium-grained to coarse-medium-grained porphyritic biotite monzogranite；
 ▲—fine-grained biotite/two-mica monzogranite of Caledonian Miao'ershan pluton

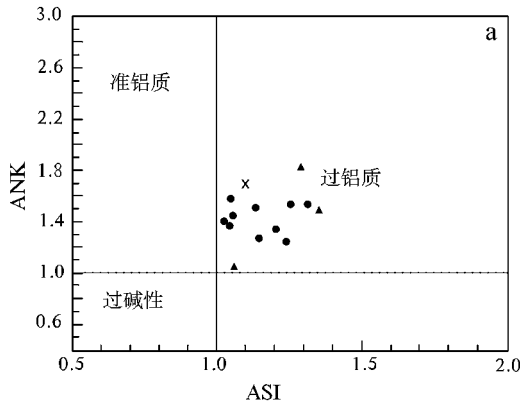
平均为 7.57%。K₂O 大于 Na₂O ,K₂O/Na₂O 比值在 1.39~3.68 之间,平均为 2.00 ;其中 ML2 号样品 3.68 的比值明显高于其它样品(表 2),可能与岩浆演化后期钾质碱性溶液交代产生的钾长石化有关。FeO^T 含量中等,为 1.80%~3.20%,平均 2.72%。TiO₂、MgO、CaO、P₂O₅ 平均含量分别为 0.29%、0.79%、1.41%、0.13%。

晚期花岗岩 SiO₂ 含量与中期花岗岩相近,为 71.29%~74.02%,平均为 72.83%。Al₂O₃ 含量略高于中期花岗岩,为 13.50%~15.09%,平均为 14.33%。K₂O 含量中等,为 3.86%~4.79%,平均

为 4.17% ;全碱(ALK)含量中等,Na₂O + K₂O 为 6.11%~9.87%,平均为 7.70%。K₂O/Na₂O 比值多数大于 1(1.47 和 2.04),样品 HX311-1 的比例则仅为 0.65,显示富钠特征,可能与岩浆演化后期钠质碱性溶液交代产生的钠长石化有关。FeO^T 含量较低,为 1.26%~2.89%,平均 2.12%。TiO₂、MgO、CaO、P₂O₅ 平均含量分别为 0.25%、0.70%、1.24%、0.72%。

根据 Frost 等(2001)提出的铝饱和指数 ASI [Al/(Ca - 1.67P + Na + K)(分子比)]以及 ANK [(Al/(Na + K)(分子比))]值,加里东期苗儿山岩体 3

期花岗岩属过铝质花岗岩(图 6a)。ASI 均大于 1.0 (1.02~1.35), 平均 1.16(中期主体花岗岩平均



1.15) 属弱过铝-强过铝花岗岩。在硅-钾图中, 总体属高钾钙碱性系列(图 6b)。

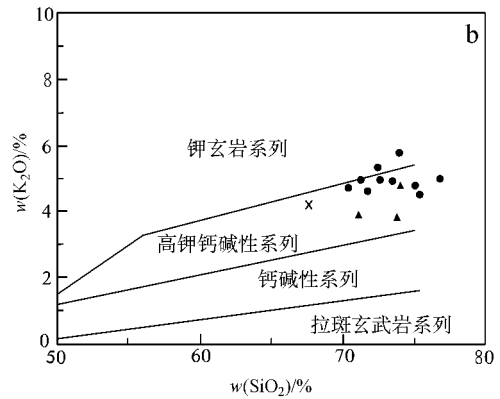


图 6 加里东期苗儿山岩体地球化学分类图解(a 据 Frost *et al.*, 2001; b 据 Peccerillo and Taylor, 1976; 图例同图 5)
Fig. 6 Diagrams of geochemical classification of granitoids in Caledonian Miao'ershan pluton (a after Frost *et al.*, 2001; b after Peccerillo and Taylor, 1976; legends as for Fig. 5)

4.2 微量和稀土元素地球化学特征

加里东期苗儿山岩体花岗岩微量元素和稀土元素分析结果分别见表 3 和表 4, 不相容元素对原始地幔标准化分布曲线和稀土元素球粒陨石标准化曲线分别见图 7 和图 8。鉴于早期和晚期花岗岩均只有 1 个分析样品, 以下主要讨论中期主体花岗岩的微量与稀土元素地球化学特征。中期花岗岩在不相容元素对原始地幔标准化蛛网图上(图 7)与相邻元素相比 Ba、Nb、Sr、P、Ti 表现为较强烈的相对亏损, 而 Rb、(Th + U + K)、(La + Ce)、Nd、(Zr + Hf + Sm)、(Y + Yb + Lu) 等则相对富集, 显示出一般壳源花岗岩特征。曲线显示 Nb 和 Ta 曾发生分馏, 导致 Nb 相对亏损而 Ta 相对富集, 也暗示花岗岩具有壳源花岗岩特征(陈小明等, 2002)。Rb、Ba、Sr、Ti 含量的变化主要与造岩矿物有关, Rb 升高和 Sr、Ba 降低一般由钾长石、斜长石和黑云母分离结晶所造成, Ti 负异常反映出钛铁矿的分离结晶作用。P 亏损暗示磷灰石的分离结晶。

中期花岗岩稀土元素含量中等(表 4), ΣREE 为 $179.8 \times 10^{-6} \sim 270.6 \times 10^{-6}$, 平均为 228.4×10^{-6} 。 $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ 为 2.27~5.46, 平均为 4.07, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 5.07~14.33, 平均 10.77, 显示轻稀土富集明显。Eu 较强亏损, δEu 值 0.15~0.46, 平均为 0.33, 暗示经历了斜长石的分离结晶作用。稀土配分曲线上, 样品 HX308-1 和 HX325-1 的轻稀土部分明显右倾, 重稀土部分近水平显示相对其它样品富集(图 8), 可能与流体分异和氯化物的形成有关(Webb *et al.*,

1985; Dostal and Chatterjee, 1995); 其它样品轻、重稀土的曲线一致右倾, 除 Eu 谷外, 曲线平滑无明显起伏, 反映出轻、重稀土元素均具有明显的分馏。

值得指出的是, 图 7 和图 8 的曲线特征显示早期花岗岩(样品 HX304-2)与中期主体花岗岩的微量元素和稀土元素特征基本一致, 而晚期花岗岩(样品 HX311-1)明显区别于早期和中期花岗岩。鉴此, 初步推断早期和中期花岗岩形成时代相近, 属同一岩浆事件中不同演化程度的产物, 而晚期花岗岩与中期花岗岩形成时代差别较大。此与前述中期和晚期花岗岩锆石年龄相差约 20 Ma 相吻合。此外, 晚期花岗岩样品 HX311-1 轻稀土的减少可能为早期岩浆中褐帘石的分离结晶作用所造成(Mittlefehldt and Miller, 1983; Chesner and Ettliger, 1989)。

4.3 Sr、Nd 同位素地球化学特征

对加里东期苗儿山斑状(或少斑状)黑云母二长花岗岩(中期主体花岗岩)进行了 3 个样品的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素测定, 测试数据及有关参数值列于表 5。由表可知, 加里东期苗儿山岩体花岗岩 I_{Sr} 值为 0.706 60~0.720 82(平均 0.714 97), $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 值为 29.9~231.6, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -8.29~-7.94, $t_{2\text{DM}}$ (两阶段 Nd 模式年龄)为 1.81~1.84 Ga。

5 讨论

5.1 岩石成因

从岩石发育规模及样品情况考虑, 以下仅讨论

表 3 加里东期苗儿山岩体微量元素分析结果及有关参数

 $\tau_{wB}/10^{-6}$

Table 3 Trace element analyses of Caledonian Miao'ershan granites

样号	HX311-1	HX308-1	HX313-1	HX325-1	HX302-1	HX307-1	HX324-1	HX304-2
代号	$\eta\gamma^{Sc}$	$\eta\gamma^{Sb}$	$\eta\gamma^{Sb}$	$\eta\gamma^{Sb}$	$\eta\gamma^{Sb}$	$\eta\gamma^{Sb}$	$\eta\gamma^{Sb}$	$\eta\gamma^{Sb}$
Sr	36.6	56.6	31.0	30.5	99.2	97.1	65.5	133.3
Ba	227.4	278.8	130.8	92	349.2	381.1	472.9	526.3
Th	18.99	54.43	52.21	45.44	48.87	54.29	51.61	39.04
U	4.53	13.31	8.71	23.24	10.38	13.61	8.41	4.7
Ta	3.48	4.13	2.46	6.22	1.91	1.98	3.32	2.17
Nb	20.13	21.87	17.61	33.21	17.26	17.84	20.24	18.63
Zr	82.4	122.6	116.9	106.3	133.1	164	153.8	201.3
Hf	2.7	4.1	3.9	3.5	4.4	5.5	5.1	6.7
Rb	132.4	353.5	349.7	638	331	297.6	351.4	223.1
Cs	5.33	22.23	11.2	67.94	27.74	26.25	31.64	23.52
Ga	12.93	16.9	16.31	20.58	17.43	18.33	17.49	18.46
Li	13.06	37.84	27	159.8	39.92	58.77	62.77	55.8
B	1.76	7.23	5.66	10.87	10.1	7.48	6.61	10.98
F	93	695	272	1219	754	737	596	865
Cl	141.2	96.3	148.6	85.3	62.7	81.1	74.6	82.3
Sc	3.28	6.76	4.07	6.82	5.24	6.7	7.75	11.22
Be	1.99	6.88	3.99	14.77	4.82	6.74	5.65	5.08
Cr	27.7	21.3	29.3	22.1	23	27.9	24.1	41.7
Co	2.09	4.46	3.33	3.30	6.72	6.75	7.28	11.47
Ni	6	11.59	6.7	7.93	14.69	16.57	13.8	28.86
V	12.58	23.3	12.87	14.69	30.82	33.58	40.23	58
W	8.5	4.81	4.81	1.03	21.88	47.23	3.08	3.66
Sn	10.35	19.07	10.87	28.35	6.96	12.07	12.42	8.99
Mo	3.2	3.54	2.82	3.07	4.88	2.13	3.33	4.17
Bi	0.3	3.46	0.43	0.37	8.45	5.39	3.25	0.68
Cu	6.88	14.74	6.03	8.17	13.86	45.27	24.94	27.09
Pb	9.67	62.43	35.56	64.29	64.33	56.78	67.84	47.43
Zn	10.52	40.77	13.28	38.13	38.36	43.76	45.57	53.03
As	3.36	2.38	2.04	6.55	4.7	2.22	2.3	2.62
Sb	1.25	5.77	0.41	8.28	9.65	2.65	0.53	4.51
Hg	0.029	0.03	0.029	0.036	0.046	0.042	0.033	0.028
Ag	0.021	0.053	0.034	0.07	0.068	0.116	0.043	0.049
Cd	0.096	0.348	0.109	0.195	0.097	0.177	0.178	0.068
Au	0.3	1.5	1.0	1.0	0.6	2.7	0.4	0.5
Rb/Sr	3.62	6.25	11.28	20.92	3.34	3.06	5.36	1.67
La/Sm	2.79	6.07	6.05	5.18	7.24	7.29	7.17	7.66

注：Ag 的单位为 10^{-9} 。样品 ML1~6 来源于文献①，其它来源于本文。本文样品由湖北武汉综合岩矿测试中心测定分析，分别采用 X 射线荧光光谱法 (XRF)、电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS)、原子荧光光谱法 (AFS)、发射光谱法 (ES) 等方法测定。除 W、Mo 采用碱溶法测定外，其它微量元素均采用酸溶法测定。

表 4 加里东期苗儿山岩体稀土元素分析结果

 $\tau_{wB}/10^{-6}$

Table 4 Content of REE of Caledonian Miao'ershan granites

样号	代号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	$\Sigma Ce/\Sigma Y (La/Yb)_N$	δEu	
HX311-1	$\eta\gamma^{Sc}$	8.20	19.74	2.51	9.47	2.94	0.36	2.28	0.73	4.78	1.01	3.01	0.53	3.36	0.47	29.22	88.6	0.95	1.61	0.41
HX308-1	$\eta\gamma^{Sb}$	38.11	93.54	8.82	31.13	6.28	0.56	5.63	0.93	5.79	1.14	3.22	0.51	3.45	0.49	34.35	233.9	3.21	7.29	0.29
HX313-1	$\eta\gamma^{Sb}$	37.46	54.22	9.48	32.56	6.20	0.54	5.57	0.72	3.79	0.74	1.99	0.33	2.10	0.31	23.77	179.8	3.57	11.80	0.28
HX325-1	$\eta\gamma^{Sb}$	39.18	81.83	10.12	34.38	7.56	0.35	6.51	1.24	8.10	1.61	4.71	0.74	5.10	0.73	47.60	249.7	2.27	5.07	0.15
HX302-1	$\eta\gamma^{Sb}$	37.10	78.25	8.56	29.55	5.12	0.75	4.96	0.62	3.26	0.62	1.70	0.28	1.71	0.23	17.53	190.3	5.15	14.33	0.46
HX307-1	$\eta\gamma^{Sb}$	46.68	102.2	10.63	36.60	6.41	0.88	6.26	0.81	4.56	0.87	2.35	0.39	2.42	0.36	24.78	246.2	4.75	12.74	0.42
HX324-1	$\eta\gamma^{Sb}$	52.63	111.8	12.19	43.85	7.34	0.93	7.33	0.80	4.43	0.84	2.25	0.39	2.59	0.38	22.87	270.6	5.46	13.40	0.39
HX304-2	$\eta\gamma^{Sb}$	52.08	101.4	11.75	40.24	6.79	1.00	6.49	0.81	4.44	0.84	2.28	0.37	2.28	0.33	23.34	254.4	5.18	15.12	0.46

注：样品由湖北武汉综合岩矿测试中心测定分析，采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 分析。样品处理采用酸溶法。

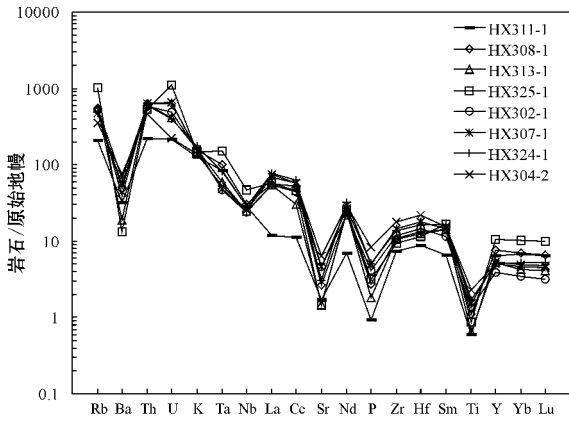


图 7 加里东期苗儿山岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram for Caledonian Miao'ershan granites (primitive mantle data after Sun and McDonough, 1989)

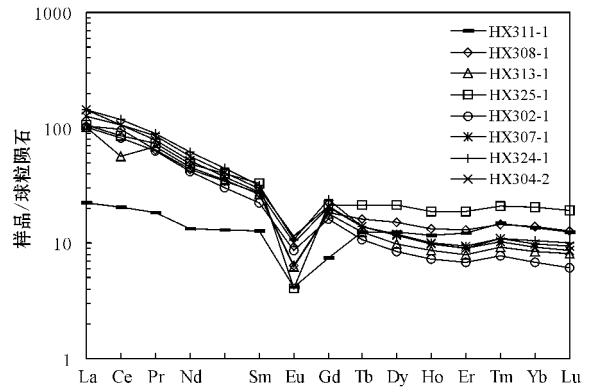


图 8 加里东期苗儿山岩体稀土元素球粒陨石标准化分布模式(球粒陨石值据 Taylor and McLennan, 1985)
Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of Caledonian Miao'ershan granites (chondrite data after Taylor and McLennan, 1985)

表 5 加里东期苗儿山岩体 Sr、Nd 同位素组成及有关参数计算

Table 5 Sr and Nd isotope compositions of granites in Caledonian Miao'ershan pluton

样品号	HX302-1	HX307-1	HX324-1
Rb/10 ⁻⁶	305.2	304.4	369.1
Sr/10 ⁻⁶	107.1	104	68.09
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	8.271	8.488	15.77
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.771 24 ± 0.000 05	0.769 23 ± 0.000 07	0.802 74 ± 0.000 06
εS(t)	232	184	30
I _{Sr}	0.720 82	0.717 49	0.706 6
Sm/10 ⁻⁶	4.766	6.342	6.526
Nd/10 ⁻⁶	28.72	36.85	37.7
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.100 4	0.104 1	0.104 5
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.511 955 ± 0.000 004	0.511 972 ± 0.000 005	0.511 955 ± 0.000 007
εNd(t)	-8.07	-7.94	-8.29
t _{2DM} /Ga	1.82	1.81	1.84

注: εNd(t), εS(t), I_{Sr}和 t_{2DM}的计算据陈江峰等(1999); 计算参数为: t = 428 Ma; (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512 638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.196 7, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_{UR} = 0.704 5, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CC} = 0.118, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.213 7, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.513 151, λ_{Sm} = 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹, λ_{Rb} = 1.42 × 10⁻¹¹ a⁻¹. 参数中下角字母代表的含义: UR—铷同位素均一储库; CHUR—球粒陨石均一储库; DM—亏损地幔; CC—大陆地壳。

中期花岗岩成因。

中期花岗岩大部分属 ASI 值大于 1.1 的强过铝 (SP) 花岗岩, 据前人有关强过铝花岗岩成因研究 (Sylvester, 1998; Zen, 1986), 应为地壳物质熔融形成的 S 型花岗岩类。岩石在微量元素蛛网图 (图 7) 上也显示出一般壳源花岗岩特征 (见前述)。

前人研究表明湘桂内陆带花岗岩的 Nd 模式年龄 (t_{DM}) 为 1.8~2.4 Ga (Pei and Hong, 1995; Hong et al., 1998), 基底的时代主要在 1.7~2.7 Ga 间 (柏道远等, 2005); 东邻湘东南地区有地幔物质加入

的早燕山期花岗岩的 t_{2DM} 多在 1.22~1.76 Ga 之间 (柏道远等, 2005)。由此可见, 加里东期苗儿山岩体的两阶段 Nd 模式年龄值 (1.81~1.84 Ga) 与基底地壳相当, 并高于具地幔物质加入的湘东南早燕山期壳源花岗岩, 据此也可大致推断苗儿山加里东期花岗岩源于基底地壳的重熔。此外, 花岗岩 I_{Sr} 值 (0.706 60~0.720 82, 平均 0.714 97) 与大陆地壳 0.719 的 I_{Sr} 平均值 (Faure, 1986) 相近, Nd 同位素组成 εNd(t) = -8.29 ~ -7.94 与澳大利亚东南部 Lachlan 褶皱带 S 型花岗岩 εNd(t) = -6.1 和 -9.8 (McCulloch and Chappell, 1982) 类似, 在 εNd(t) - εS(t) 图解中主要落入华南 S 型花岗岩区 (图 9), 也说明岩体源于地壳重熔。C/MF - A/MF 图 (图 10) 中 C = CaO, MF = MgO + FeO + 1.8 × Fe₂O₃, A = Al₂O₃ 均为分子数, 中样品均落入变质泥质岩和变质杂砂岩部分熔融区, 对此提供了进一步佐证。

综上, 花岗岩地球化学及 Sr、Nd 同位素地球化学特征表明加里东期苗儿山主体花岗岩为陆壳重熔型花岗岩 (S 型花岗岩), 且源岩为中、上地壳变质砂、泥质岩石。

5.2 岩体形成构造环境及机制

前述 U-Pb 年龄表明加里东期苗儿山中期花岗岩形成于早志留世末, 时间上略晚于奥陶纪末-志留纪初的北流运动 (崇余运动) (卢华复, 1962; 莫柱孙等, 1980), 由此推断花岗岩形成于北流运动挤压造山峰期之后的后碰撞构造环境。

在 Maniar 和 Piccoli (1989) 提出的多组主元素构

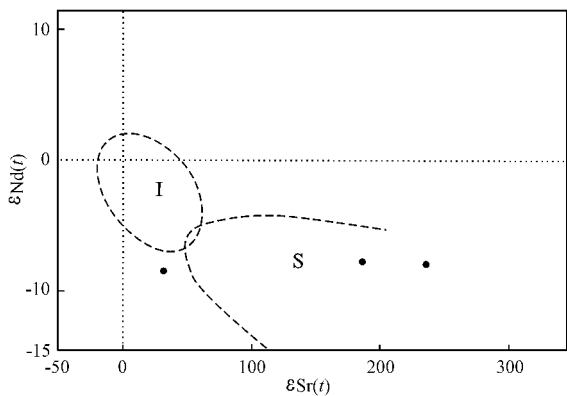


图 9 加里东期苗儿山岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 图解
 Fig. 9 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - \epsilon_{\text{Sr}}(t)$ diagram for Caledonian Miao'er shan granites
 I—华南 I 型花岗岩; S—华南 S 型花岗岩(据刘昌实等, 1990)
 I—I-type granite of South China; S—S-type granite of South China (after Liu Changshi *et al.*, 1990)

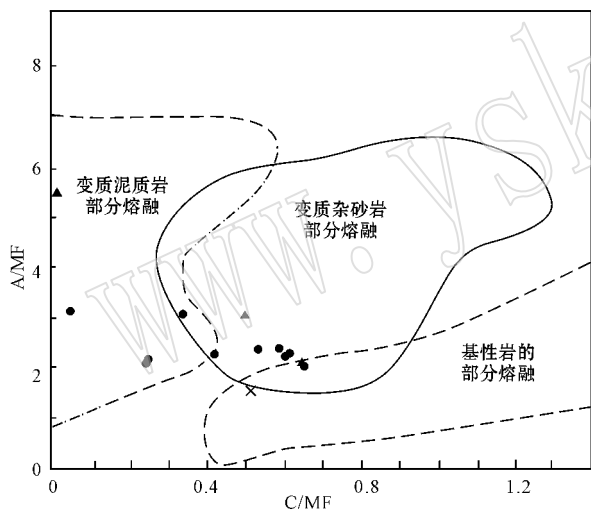


图 10 加里东期苗儿山岩体 A/MF - C/MF 图解
 (据 Alther 等, 2000; 图例同图 5)

Fig. 10 A/MF - C/MF diagram of Caledonian Miao'er shan granites (after Alther *et al.*, 2000; legends as for Fig. 5)

造环境判别图解中, 加里东期苗儿山岩体中期花岗岩的分析样品主要落入 IAG + CAG + CCG 区, 且有较多样品位于与 POG 重叠区之外(图 11), 应属于 IAG + CAG + CCG 组类型。大部分样品属 ASI 值大于 1.1 的强过铝(SP)花岗岩(表 2), 可进一步判断为大陆碰撞花岗岩类(CCG)(肖庆辉等, 2002)。在 Pearce 等(1984)多组微量元素构造环境判别图解中, 总体显示为“同碰撞花岗岩(S-COLG)”或“火山

弧花岗岩 + 同碰撞花岗岩(VAG + S-COLG)”, 少量样品落入“板内花岗岩(WPC)”区(图 12c), 暗示花岗岩形成于碰撞的后期。事实上, 大量在 Pearce 等(1984)图解中的同碰撞花岗岩实际是属后碰撞产物(肖庆辉等, 2002)。总之, 构造环境判别图解同样显示苗儿山加里东期中期花岗岩形成于后碰撞构造环境。

根据前文岩浆成因并结合岩浆形成的后碰撞构造环境以及区域构造演化过程, 推断苗儿山加里东期中期花岗岩形成机制为: 北流运动(加里东中期陆内造山运动)导致地壳叠置、增厚和升温, 挤压峰期之后在挤压减弱、应力松弛的后碰撞构造环境下, 中、上地壳岩石减压熔融并向上侵位, 从而形成加里东期中期(主体)花岗岩体。

根据仅有 1 个样品的微量和稀土元素特征, 初步推测苗儿山加里东期早期花岗闪长岩与中期花岗岩形成于同一岩浆事件(见前文), 可能形成于北流运动之后的后碰撞构造环境。

晚期花岗岩总体显示强过铝特征(表 2), 初步推断与中期花岗岩一样源于中、上地壳的重熔。前述 U-Pb 年龄表明晚期花岗岩形成于志留纪末-泥盆纪初, 时间上略晚于志留纪后期的广西运动(Ting, 1929; 杜远生等, 2012), 因此推断其形成于广西运动挤压造山峰期之后的后碰撞构造环境。

5.3 加里东期苗儿山花岗岩对区域构造背景的约束

如前所述, 加里东期苗儿山花岗岩形成于北流运动(崇余运动)和广西运动之后的后碰撞构造环境, 岩浆的形成与稍早的陆内挤压变形导致的地壳大幅增厚、升温有关。因此, 加里东期 2 期花岗质岩浆活动表明苗儿山地区在北流运动和广西运动中均产生了强烈的构造变形。上述 2 期构造-岩浆事件可得到区域资料的佐证。邻区彭公庙岩体 $435.3 \pm 2.7 \text{ Ma}$ 和 $436.2 \pm 3.1 \text{ Ma}$ (张文兰等, 2011), 大宁岩体 $419 \pm 6.4 \text{ Ma}$ (程顺波等, 2009), 宁冈岩体 $433.8 \pm 2.2 \text{ Ma}$ (沈渭洲等, 2008), 海洋山岩体 $431 \pm 7 \text{ Ma}$ (程顺波等, 2010), 越城岭岩体 $430.5 \pm 4.3 \text{ Ma}$ 和 $436.6 \pm 4.8 \text{ Ma}$ 及兰蓉岩体 $443.5 \pm 8.1 \text{ Ma}$ (笔者待发表资料)(图 1) 等锆石 LA-ICP-MS 或 SHRIMP U-Pb 年龄, 在误差范围内与苗儿山加里东期早期花岗岩年龄一致, 推测均因北流运动(崇余运动)强烈挤压和陆壳增厚所致。北邻白马山岩体 411.0 ± 4.5

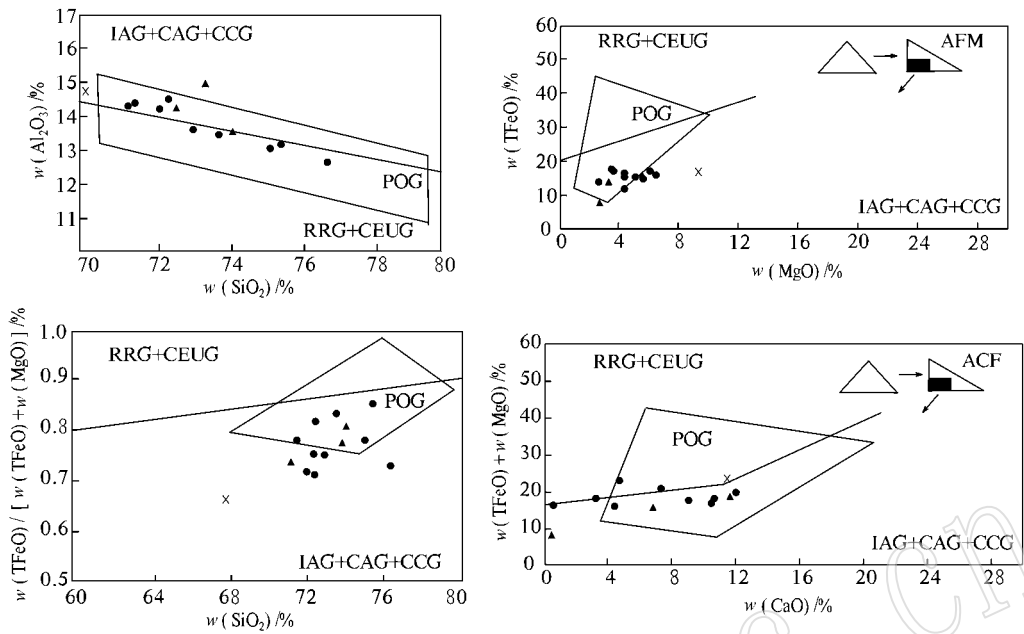


图 11 加里东期苗儿山岩体构造环境氧化物判别图(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 11 Diagrams for discrimination of structural environment of Caledonian Miao'ershan granites (after Maniar and Piccoli, 1989)
IAG—岛弧花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩类; CEUG—大陆的造陆抬升花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩类;
POG—后造山花岗岩类; 图例同图 5

IAG— island-arc granite; RRG—granite related to rift; CAG—continent-arc granite; CEUG—continent emerging-uplift granite;
CCG—continent-collision granite; POG—post-orogenic granite; legends as for Fig. 5

Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄^①与苗儿山加里东期晚期花岗岩年龄一致, 应与广西运动强变形有关。

值得指出的是, 湘南地区南华纪—早古生代沉积中缺少火山岩发育, 沉积物组成自西向东呈渐变特征, 说明引发加里东期苗儿山花岗质岩浆活动的构造运动属板内造山运动。因此, 苗儿山“后碰撞”花岗岩相关的“碰撞”作用并非一般所理解的大陆板块之间的碰撞, 而是陆块内部的强挤压作用。近年来已有研究也表明华南早古生代构造运动属板内造山运动(舒良树, 2012; Faure *et al.*, 2009; Charvet *et al.*, 2010; Shu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。

区域上城步—新化大断裂以西发育早志留世两江河组和珠溪江组前陆盆地砂、泥质沉积, 而断裂以东至湘东南缺失志留系(湖南省地质矿产局, 1988)。城步—新化断裂东侧加里东期苗儿山岩体中期(或早—中期)花岗岩的发育及其反映的北流运动变形和增厚事件, 表明断裂以东在奥陶纪末已褶皱造山, 因此志留

系的缺失属沉积缺失, 而非后期剥蚀造成。

综上所述, 奥陶纪末—早志留世北流运动发动, 城步—新化断裂以东在强挤压作用下褶皱、逆冲(向北西)而抬升成陆, 遭受剥蚀, 而断裂以西(现雪峰造山带)因东侧逆冲块体的重力荷载而大幅沉降, 形成前渊凹陷(前陆盆地)并充填砂泥质沉积。早志留世末断裂以东因北流运动诱发后碰撞花岗质岩浆活动, 形成苗儿山加里东期中期(或早—中期)花岗岩。志留纪后期广西运动发动, 城步—新化大断裂两侧均因强烈挤压而增厚, 尔后在应力松弛的后碰撞环境下形成苗儿山加里东期晚期花岗岩(断裂东侧)和白马山加里东期花岗岩(断裂西侧)(图 1)。上述过程表明, 城步—新化断裂北西的雪峰造山带在加里东运动中仅经历志留纪后期的广西运动变形事件, 此与胡召齐等(胡召齐等, 2010)所获雪峰造山带 419~389 Ma 的伊利石 K-Ar 年龄相吻合。

已有研究认为苗儿山及周边地区下古生界中褶

① 湖南省地质调查院, 2013. 1:25 万邵阳幅区域地质调查报告。

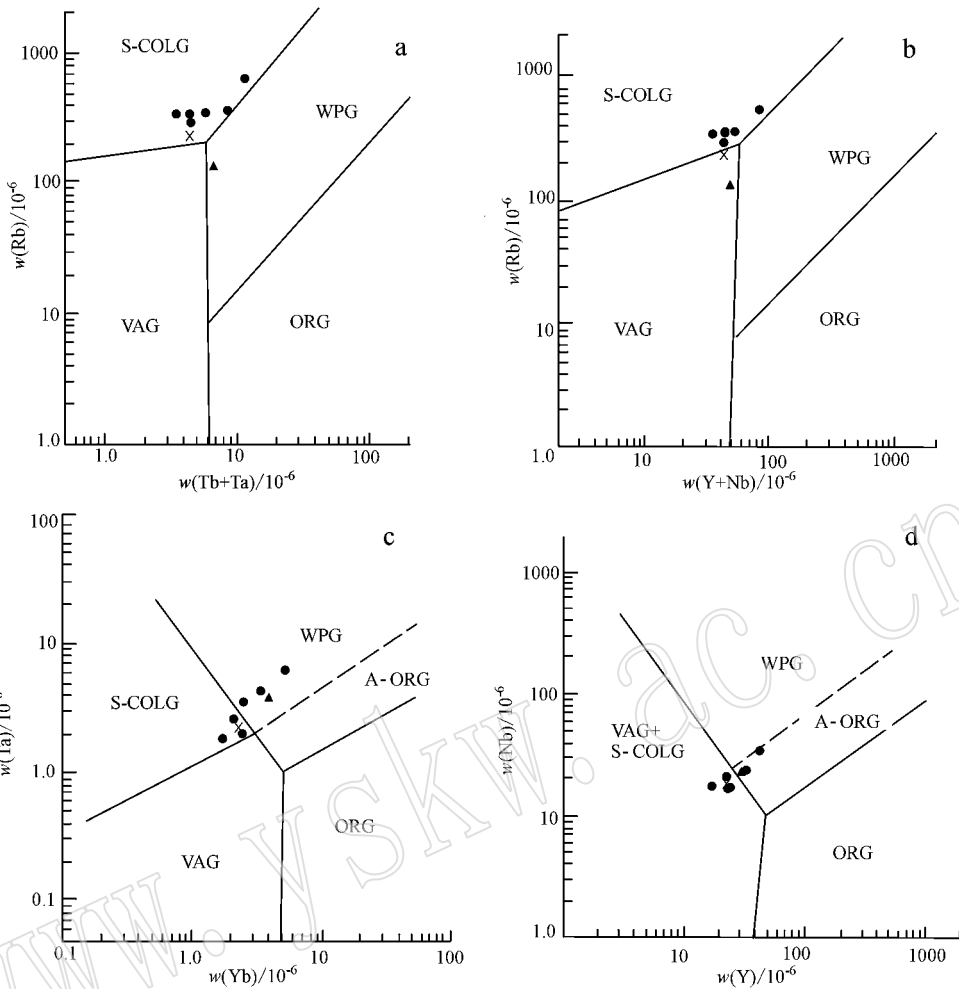


图 12 加里东期苗儿山岩体微量元素构造环境判别图解(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 12 Trace element diagrams for discrimination of structural environment of Caledonian Miao'ershan granites (after Pearce *et al.*, 1984)

VAG—火山弧花岗岩；WPG—板内花岗岩；S-COLG—同碰撞花岗岩；ORG—洋中脊花岗岩；A-ORG—异常洋中脊花岗岩；图例同图 5

VAG—volcanic-arc granite；WPG—intraplate granite；S-COLG—syncollision granite；ORG—ocean-ridge granite；A-ORG—abnormal ocean-ridge granite；legends as for Fig. 5

皱形成于晚奥陶世—早志留世的北流运动(郝义等, 2010)志留纪无造山证据(吴浩若, 2000a, 2000b；丁道桂等, 2007)。苗儿山岩体志留纪末—泥盆纪初的后碰撞花岗质岩浆活动表明实际情况并非如此, 志留纪后期实际存在强烈的陆内挤压造山。

值得指出的是, 城步—新化断裂为武陵期扬子陆块与古华南洋(钦杭结合带)的构造边界(柏道远等, 2012), 由此可推断东侧地壳强度低而西侧高。不难想象, 两侧块体力学性质的差异, 很可能即为北流运动中城步—新化断裂成为造山带与前陆盆地分界的关键原因。

6 结论

(1) 加里东期苗儿山岩体总体为高钾钙碱性系列弱过铝—强过铝花岗岩类, 属 S 型花岗岩, 源岩主要为中、上地壳岩石。

(2) 花岗岩在陆内强挤压之后应力相对松弛、压力降低的后碰撞构造环境下, 因地壳增厚而升温的中、上地壳岩石减压熔融并向上侵位而形成。

(3) 加里东期苗儿山岩体 428.5 ± 3.8 Ma、 409 ± 4 Ma 的年龄值, 反映出早志留世末、志留纪末—泥盆

纪初 2 期岩浆事件,并指示苗儿山地区在奥陶纪末—志留纪初北流运动和志留纪后期的广西运动中均产生过强烈的陆内挤压和地壳增厚。

References

- Alther R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern voses (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50: 51~73.
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Liu Yaorong, *et al.* 2005. Framework of Mesozoic tectonic evolution in southeastern Hunan and the Hunan-Guangdong-Jiangxi border area [J]. *Geology in China*, 32(4): 557~570 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Huang Jianzhong, Ma Tieqiu, *et al.* 2006a. Geology and geochemistry of the Silurian Penggongmiao granitic pluton in the Southeastern Hunan Province and its implication for tectonic setting [J]. *Geoscience*, 20(1): 130~140 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Jia Baohua, Zhong Xiang, *et al.* 2012. Potential genesis of the trending changes of Jinning Period and Caledonian structural lineaments in middle-southern Hunan [J]. *Journal of Geomechanics*, 18(2): 165~177 (in Chinese with English abstract).
- Bai Daoyuan, Wang Xianhui, Ma Tieqiu, *et al.* 2006b. Characteristics and forming mechanism of Indosinian folds in the southeast Hunan [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (4): 50~57 (in Chinese with English abstract).
- Charvet J, Shu L S, Faure M, *et al.* 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 309~330.
- Chen Jiangfeng and Jiang Boming. 1999. Nd, Sr, Pb isotope traces and evolution of continental crust of SE China [A]. Zheng Yongfei. *Chemical Geodynamics* [C]. Beijing: Science Press, 262~287 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weifeng, Chen Peirong, Huang Hongye, *et al.* 2007. Geochronology and geochemistry of granites and their enclaves from Baimashan pluton in Hunan [J]. *Science in China (Series D)*, 37(7): 873~893 (in Chinese).
- Chen X, Zhang Y D, Fan J X, *et al.* 2012. Onset of the Kwangsi Orogeny as evidenced by biofacies and lithofacies [J]. *Science China: Earth Sciences*, 55: 1 592~1 600, doi: 10. 1007/s11430-012-4490-4.
- Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, *et al.* 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 293~307 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xu and Rong Jiayu. 1999. From biostratigraphy to tectonics—with Ordovician and Silurian of south China as an example [J]. *Geoscience*, 13(4): 385~389 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Ma Liyan, *et al.* 2013. Indosinian metallogenic activity in Yuechengling-Miaoshan area, northeastern Guangxi: implications from zircon U-Pb ages and Hf isotopic constraint on ore-forming granites in Youmaling and Jiepai deposits [J]. *Geology in China*, 49(4): 1 189~1 201 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Pang Yingchun, *et al.* 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of Haiyangshan pluton in northeast Guangxi [J]. *Mineral Deposits*, 29(supple): 1 079~1 080 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Xu Deming, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of Daning batholith in northeast Guangxi [J]. *Geology in China*, 36(6): 1 278~1 288 (in Chinese with English abstract).
- Chesner C A and Ettlinger A D. 1989. Composition of volcanic allanite from the Toba Tuffs, Sumatra, Indonesia [J]. *Am. Mineral.*, 74: 750~758.
- Compston W, Williams I S and Kirschvink J L. 1992. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time-scale [J]. *J. Geol. Soc.*, 149: 171~184.
- Ding Daogui, Guo Tonglou, Liu Yunli, *et al.* 2007. Structural attribute of the Jiangnan-Xuefengshan belt, China: A discussion [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 801~809 (in Chinese with English abstract).
- Dostal and Chatterjee. 1995. Origin of topaz-bearing and related peraluminous granites of the Late Devonian Davis Lake pluton, Nova Scotia, Canada: crystal versus fluid fractionation [J]. *Chemical Geology*, 123: 67~88.
- Du Yuansheng and Xu Yajun. 2012. A preliminary study on Caledonian Event in south China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 43~49 (in Chinese with English abstract).
- Fang Shiyi. 2012. Control of hydraulic pressure cracking on multiphase metallogenesis of vein shape granite-type uranium deposit in Miaoshan orefield [J]. *World Nuclear Geoscience*, 29(1): 9~15 (in Chinese with English abstract).
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology* [M]. New York: John Wiley and Sons, 567.
- Faure M, Shu L S, Wang B, *et al.* 2009. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China [J]. *Terre Nova*, 21: 360~368.
- Frost B R, Barnes C G and Collins W J. 2001. A geochemical classification for granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2 033~2 048.

- Fu Jianming, Ma Changqian, Xie Caifu, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Jiuyishan composite granite in Hunan and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(4): 370 ~ 378 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yi, Li Sanzhong, Jin Chong, *et al.* 2010. Galedonian structural characteristics and mechanism in Hunan-Jiangxi-Guangxi provinces [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 166 ~ 180 (in Chinese with English abstract).
- Hong D W, Xie X L and Zhang J S. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny [J]. *Res. Geol.*, 48 : 251 ~ 263.
- Hu Zhaoqi, Zhu Guang, Zhang Bilong, *et al.* 2010. K-Ar Geochronology of the Caledonian Event in the Xuefeng uplift [J]. *Geological Review*, 56(4): 490 ~ 500 (in Chinese with English abstract).
- Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. Regional Geology of Hunan Province [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Jian Ping, Liu Dunyi and Sun Xianmeng. 2003. SHRIMP dating of carboniferous Jinshajiang ophiolite in western Yunnan and Sichuan : geochronological constraints on the evolution of the Palaeo-Tethys oceanic crust [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 217 ~ 228 (in Chinese with English abstract).
- Kang Ruhua. 2000. Ductile shear zone and gold mineralization in Miaoershan, Hunan [J]. *Gold Geology*, 6(4): 23 ~ 27 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuwei, Chen Weifeng and Zhu Kangren. 2011. Geochemical characteristics and genesis of Mesozoic acid dikes in Miaoershan area [J]. *Uranium Geology*, 27(6): 337 ~ 344 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Zhu Jinchu, Shen Weizhou, *et al.* 1990. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in south China [J]. *Acta Geol Sinica*, 64(1): 43 ~ 52 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huafu. 1962. The discovery of angular unconformity in Predevonian stratum in Chongyu area, south Jiangxi and its significance [J]. *Journal of Nanjing University (Geology)*, (1): 75 ~ 87 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 1999. Using Isoplot/EX, version 2, a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkeley Geochronological Center Special Publication 1a*, 47.
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02 : A User Manual [J]. *Berkeley Geochronological Center Special Publication*, 2 ~ 19.
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101 : 635 ~ 643.
- McCulloch M T and Chappell B W. 1982. Nd isotopic characteristics of S-type and I-type granites [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 58(1): 51 ~ 64.
- Mittlefehldt D W and Miller C F. 1983. Geochemistry of the sweetwater wash pluton California : Implications for "anomalous" trace element behavior during differentiation of felsic magma [J]. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 47 : 109 ~ 124.
- Mo Zhusun, Ye Bodan and Pan Weizu. 1980. Geology of Granite in Nanling Range [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Ni Yanjun, Chen Bihe, Chen Wenbin, *et al.* 2009. The finding and prospecting signification of the new style scheelite deposit in Miaoershan, Hunan Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 37 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J. Petrol.*, 25(4): 956 ~ 983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 58(1): 63 ~ 81.
- Pei R F and Hong D W. 1995. The granites of south China and their metallogeny [J]. *Episodes*, 18 : 77 ~ 82.
- Rong J Y and Zhan R B. 2006. Surviving the end-Ordovician extinctions : evidence from the earliest Silurian brachiopods of northeastern Jiangxi and western Zhejiang provinces, East China [J]. *Lethaia*, 39(1): 39 ~ 48.
- Shen Weizhou, Zhang Fangrong, Shu Liangshu, *et al.* 2008. Formation age, geochemical characteristics of the Ninggang granite body in Jiangxi Province and its tectonic significance [J]. *Petrologica Sinica*, 24(10): 2244 ~ 2254 (in Chinese with English abstract).
- Shu L S, Jahn B M, Charvet J, *et al.* 2013. Intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia block (South China): evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations [J]. *American Journal of Science*, Doi : 10.2475/01.2014.00.
- Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, *et al.* 2008. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1581 ~ 1593 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035 ~ 1053 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implication for mantle composition and process [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, London, 42 : 313 ~ 345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithos*, 45 : 29 ~ 44.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust : Its Com-

- position and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1~312.
- Ting V K. 1929. The orogenic movements in China[J]. Bulletin of Geological Society of China, 8(2): 151~170.
- Webb P C, Tindle A G and Barritt S D. 1985. Radiothermal granites of the United Kingdom: comparison of fractionation patterns and variation of heat production for selected granites[A]. Inst. Min. Metall. High Heat Production (HHP) Granites, Hydrothermal Circulation and Ore Genesis[C]. 409~424.
- Williams I S and Claesson S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Svea Nappes, Scandinavian Caledonides, II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 97: 205~217.
- Wu Haoru. 2000a. Re-interpretation of Guangxi Movement[J]. Chinese Sci. Bull., 45(5): 555~558 (in Chinese).
- Wu Haoru. 2000b. A discussion on the tectonic palaeogeography related to the Caledonian movement in Guangxi[J]. Journal of Palaeogeography, 2(1): 82~88 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. Chin. Sci. Bull., 57: 1 024~1 035, doi: 10.1007/s11434-011-4968-z.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu and Ma Daquan. 2002. The Ways of Investigation on Granitoid[M]. Beijing: Geological Publishing House, 21~36 (in Chinese).
- Xu Deru, Chen Guanghao, Xia Bin, et al. 2006. The Caledonian adakite-like granodiorites in Banshanpu area, eastern Hunan province, South China: petrogenesis and geological significance[J]. Journal of China Universities, 12(4): 507~521 (in Chinese with English abstract).
- Xu Weihang and Zhang Yunhong. 1993. Study on strontium, oxygen, neodymium and lead isotopes of Mt. Miaoershan granite batholith in south China[J]. Guangxi Geology, 6(1): 15~22 (in Chinese with English abstract).
- Yu Kaifu and Wang Shoude. 1995. Duyun movement in south Guizhou Province and its paleostructure, and their significance in petroleum geology[J]. Guizhou Geology, 12(3): 225~232 (in Chinese with English abstract).
- Zen E. 1986. Aluminum enrichment in silicate melts by fractional crystallization: some mineralogic and petrologic constraints[J]. Journal of Petrology, 27: 1 095~1 117.
- Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, et al. 2009. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment of south China[J]. Earth Science Frontiers, 16(1): 248~260 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al. 2013. Tectonics of South China Continent and its implications[J]. Science in China (Earth Sciences), 56(11): 1 804~1 828.
- Zhang Wenlan, Wang Rucheng, Lei Zeheng, et al. 2011. Zircon U-Pb dating confirms existence of a Caledonian scheelite-bearing aplitic vein in the Penggongmiao granite batholith, South Hunan[J]. Chinese Sci. Bull., 56, doi: 10.1007/s11434-011-4526-8.
- Zhang Y, Shu L S and Chen X Y. 2011. Geochemistry, geochronology, and petro-genesis of the early Paleozoic granitic plutons in the central-southern Jiangxi Province, China[J]. Sci. China Earth Sci., doi: 10.1007/s11430-011-4249-3.
- Zhou Xinmin. 2003. My thinking about granite geneses of south China [J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 556~565 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远, 黄建中, 刘耀荣, 等. 2005. 湘东南及湘粤赣边区中生代地质构造发展框架的厘定[J]. 中国地质, 33(4): 557~570.
- 柏道远, 黄建中, 马铁球, 等. 2006a. 湘东南志留纪彭公庙花岗岩体的地质地球化学特征及其构造环境[J]. 现代地质, 20(1): 130~140.
- 柏道远, 贾宝华, 钟响, 等. 2012. 湘中南晋宁期和加里东期构造线走向变化成因[J]. 地质力学学报, 18(2): 165~177.
- 柏道远, 王先辉, 马铁球, 等. 2006b. 湘东南印支期褶皱特征及形成机制[J]. 华南地质与矿产, (4): 50~57.
- 陈旭, 戎嘉余. 1999. 从生物地层学到大体构造学——以华南奥陶系和志留系为例[J]. 现代地质, 13(4): 385~389.
- 陈旭, 张元动, 樊隽轩, 等. 2012. 广西运动的进程: 来自生物相和岩相带的证据[J]. 中国科学: 地球科学, 42(11): 1 617~1 626.
- 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[A]. 郑永飞. 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社, 262~287.
- 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 37(7): 873~893.
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J]. 高校地质学报, 8(3): 293~307.
- 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[J]. 中国地质, 49(4): 1 189~1 201.
- 程顺波, 付建明, 庞迎春, 等. 2010. 桂东北海洋山岩体的地球化学特征及锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 矿床地质, 29(增刊): 1 079~1 080.
- 程顺波, 付建明, 徐德明, 等. 2009. 桂东北大宁岩体锆石 SHRIMP 年代学和地球化学研究[J]. 中国地质, 36(6): 1 278~1 288.

- 丁道桂,郭彤楼,刘运黎,等. 2007. 对江南-雪峰带构造属性的讨论[J]. 地质通报, 26(7): 801~809.
- 杜远生,徐亚军. 2012. 华南加里东运动初探[J]. 地质科技情报, 31(5): 43~49.
- 方适宜. 2012. 矿液致裂作用对苗儿山矿田花岗岩型脉状铀矿床多期成矿的制约[J]. 世界核地质科学, 29(1): 9~15.
- 付建明,马昌前,谢才富,等. 2004. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 28(4): 370~378.
- 郝义,李三忠,金宠,等. 2010. 湘赣桂地区加里东期构造变形特征及成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 34(2): 166~180.
- 胡召齐,朱光,张必龙,等. 2010. 雪峰隆起北部加里东事件的 K-Ar 年代学研究[J]. 地质论评, 56(4): 490~500.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 简平,刘敦一,孙晓猛. 2003. 滇川西部金沙江石炭纪蛇绿岩 SHRIMP 测年:古特提斯洋盆演化的同位素年代学制约[J]. 地质学报, 77(2): 217~228.
- 康如华. 2000. 湖南苗儿山韧性剪切带与金矿化[J]. 黄金地质, 6(4): 23~27.
- 李妮巍,陈卫锋,朱康任. 2011. 苗儿山地区中生代酸性脉岩地球化学特征及其成因[J]. 铀矿地质, 27(6): 337~344.
- 刘昌实,朱金初,沈渭渊,等. 1990. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源[J]. 地质学报, 64(1): 43~52.
- 卢华夏. 1962. 赣南崇余山区前泥盆纪地层中角度不整合的发现及其意义[J]. 南京大学学报(地质学版), (1): 75~87.
- 莫柱孙,叶伯丹,潘维祖. 1980. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京:地质出版社.
- 倪艳军,陈必河,陈文斌,等. 2009. 湖南苗儿山白钨矿床的发现及其找矿意义[J]. 华南地质与矿产, (3): 37~42.
- 沈渭渊,张芳荣,舒良树,等. 2008. 江西宁冈岩体的形成时代、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 24(10): 2244~2254.
- 舒良树,于津海,贾东,等. 2008. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报, 27(10): 1581~1593.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035~1053.
- 吴浩若. 2000a. 重新解释广西运动[J]. 科学通报, 45(5): 555~558.
- 吴浩若. 2000b. 广西加里东期构造古地理[J]. 古地理学报, 2(1): 82~88.
- 伍静,梁华英,黄文婷,等. 2012. 桂东北苗儿山-越城岭南西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析[J]. 科学通报, 57(13): 1126~1136.
- 肖庆辉,邓晋福,马大铨. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京:地质出版社, 21~36.
- 徐伟昌,张运洪. 1993. 苗儿山花岗岩复式岩基锶、氧、钽、铅同位素研究[J]. 广西地质, 6(1): 15~22.
- 许德如,陈广浩,夏斌,等. 2006. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗闪长岩的成因及地质意义[J]. 高校地质学报, 12(4): 507~521.
- 余开富,王守德. 1995. 贵州南部的都匀运动及其古构造特征和石油地质意义[J]. 贵州地质, 12(3): 225~232.
- 张苑,舒良树,陈祥云. 2011. 华南早古生代花岗岩的地球化学、年代学及其成因研究——以赣中南为例[J]. 中国科学:地球科学, 41(8): 1061~1079.
- 张芳荣,舒良树,王德兹,等. 2009. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. 地学前缘, 16(1): 248~260.
- 张文兰,王汝成,雷泽恒,等. 2011. 湘南彭公庙加里东期含白钨矿细晶岩脉的发现[J]. 科学通报, 56(18): 1448~1454.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556~565.