

赣南坪市花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及构造意义*

罗春林, 刘高峰, 左祖发

(江西省地质调查研究院, 南昌 330030)

摘要:本文对赣南横市地区坪市花岗岩体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石学和地球化学研究。结果表明:锆石 U-Pb 年龄分别为 456.1 ± 3.8 Ma 和 441.3 ± 5.2 Ma, 表明坪市花岗岩体形成于晚奥陶世—早志留世。地球化学特征显示, 坪市花岗岩体的铝饱和指数为 1.1~1.29, K_2O/Na_2O 为 0.97~1.51, 属强过铝质及高钾钙碱性岩石; 稀土元素总量为 $(113 \sim 250) \times 10^{-6}$, 轻稀土元素富集, 稀土配分模式呈明显的右倾型; δEu 为 0.38~0.67, Eu 亏损中等偏高; 岩体 Rb、Th+U、La+Ce、Nd、Zr+Hf+Sm 相对富集, Ba、Nb、Sr、Ti 相对亏损。岩体 Rb/Sr 为 0.60~2.82, 平均 1.66, 明显高于大陆地壳平均值和上地壳平均值, 具壳源花岗岩特征。坪市花岗岩体形成于早古生代晚期的加里东构造运动, 是华夏古陆块与扬子古陆块在新元古代碰撞拼贴之后发生裂解, 在中奥陶世至志留纪上地壳部分熔融形成的 S 型花岗质岩浆, 在碰撞至后碰撞过渡期上升至地壳浅部形成的花岗岩体。

关键词:地球化学; 锆石 U-Pb 定年; S 型花岗岩; 坪市花岗岩体; 加里东运动; 华南陆内造山; 赣南

中图分类号: P588.12

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2016)02-079-10

赣南地区位于南岭东西向构造—岩浆带东段, 加里东期岩浆活动强烈, 以花岗岩为主, 属华南陆内加里东期花岗岩。华南加里东期花岗岩主要集中分布于湘粤赣交界的万洋山—诸广山地区、武夷山两侧及赣中武功山地区^[1]。以往采用矿物 K-Ar、独居石 U-Th-Pb、全岩 Rb-Sr 和锆石 U-Pb 定年, 获得华南加里东期花岗岩主要形成于 $470 \sim 382$ Ma^[1-4]。华南早古生代晚期花岗岩主要有片麻状花岗岩与块状花岗岩, 两者具有相似的形成年龄^[5-6]。前人对华南地区新元古代及中生代岩浆活动及成因的研究较为深入, 而对华南地区加里东期花岗岩成因及形成构造背景存在明显分歧^[7-11]。关于华南地区加里东运动构造属性主要有两种认识: (1) 陆内造山模式: 沈渭洲等^[10]认为华南加里东期花岗岩形成于板内造山环境; 舒良树等^[15]认为华南加里东期造山带是震旦—早古生代巨厚沉积物褶皱造山形成; Li 等^[16]认为造山前的南华纪盆地及部分前陆盆地沉积经板

内逆冲作用, 将这些盆地沉积单元埋深至中地壳, 引发一系列岩浆和变质作用; 周新民^[11]及王德滋^[17]认为花岗岩的形成与岩浆发生在较深且闭合的非伸展环境有关。 (2) 陆—陆碰撞造山模式: 尽管冈瓦纳的汇聚主要发生在新元古代晚期到寒武纪^[22-24], 陈相艳等^[21]认为一些位于冈瓦纳大陆边缘的微大陆块向冈瓦纳汇聚可能持续至志留纪; Zhao 和 Cawood^[25]提出华夏属于加里东期陆—陆碰撞造山带, 认为在 $440 \sim 430$ Ma 期间, 由扬子和华夏构成的华南陆块与位于冈瓦纳北缘的一个未知陆块碰撞, 导致整个华夏俯冲到另一个未知大陆之下; Zhang 等^[26]认为华夏古陆为典型的碰撞型造山带, 并非板内带, 包括华南在内的冈瓦纳大陆边缘一些微大陆或地体的合并可能沿大陆边缘持续进行直至 $450 \sim 430$ Ma。

笔者在进行“江西 1 : 50000 遂川县 (G50E011003)、良口 (G50E011004)、横市井

* 收稿日期: 2015-09-09 改回日期: 2015-12-03 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“江西 1 : 50000 遂川县 (G50E011003)、良口 (G50E011004)、横市井 (G50E012003)、夏府 (G50E012004) 幅区调”(项目编号: 1212011120812)。

第一作者简介: 罗春林, 1967 年生, 男, 高级工程师, 主要从事岩石学、区域地质矿产调查及研究工作。

(G50E012003)、夏府(G50E012004)幅区调项目时,对横市地区出露的加里东期坪市花岗岩体进行了详细的野外调查、地球化学及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究,旨在查明岩体形成年龄及形成演化过程,为深入研究华南加里东期花岗岩形成及华南地区加里东构造属性提供参考。

1 地质背景与岩体特征

坪市花岗岩体位于赣南之北部横市地区,大地构造属华夏板块罗霄褶皱带中部^[27]。岩体略呈北东东至近东西向延展,出露面积约百余平方千米。研究区出露南华纪—寒武纪地层,为一套以砂岩和板岩为主的巨厚类复理石碎屑岩建造,受加里东运动影响,奥陶纪—志留地层缺失,泥盆纪地层高角度不整合于寒武纪地层之上,伴随加里东运动,南华纪—寒武纪地层褶皱以原始层理面为主要变形面,表现为一系列规模不等褶皱轴迹轴向多呈近南北向弧形延伸的复背斜、复向斜、背斜、向斜交替出现,属

紧密线形倒转褶皱且大多数背斜是东翼倒转,卷入褶皱的地层主要为南华系沙坝黄组、震旦系坝里组及老虎塘组、寒武系牛角河组,同时形成大规模花岗岩体。坪市花岗岩体侵入于震旦纪—寒武纪浅变质砂岩、板岩、千枚岩之中,与燕山期花岗岩呈侵入接触关系(图1)。岩体与围岩侵入界线清楚,切割侵入现象清晰可见,侵入接触面不平整,呈港湾状、不规则状、波状,有时呈锯齿状,接触面外倾,倾角为 $30^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 不等,在接触面内侧,见围岩的残留体或捕虏体,残留体大小不一。外接触带岩石普遍遭受较强的角岩化,内接触带发生混合岩化。

坪市花岗岩体由3个岩石单元组成,分别为镜口细粒黑云母二长花岗岩体、洋岭脑中细粒黑云母二长花岗岩体及老屋里中粒黑云母二长花岗岩体。镜口细粒黑云母二长花岗岩具细粒等粒状花岗结构,块状构造,主要由斜长石(15%~45%)、微斜条纹长石(25%~55%)、石英(20%±)、黑云母(6%~9%)组成,斜长石多发生绢云母化;洋岭脑中细粒黑

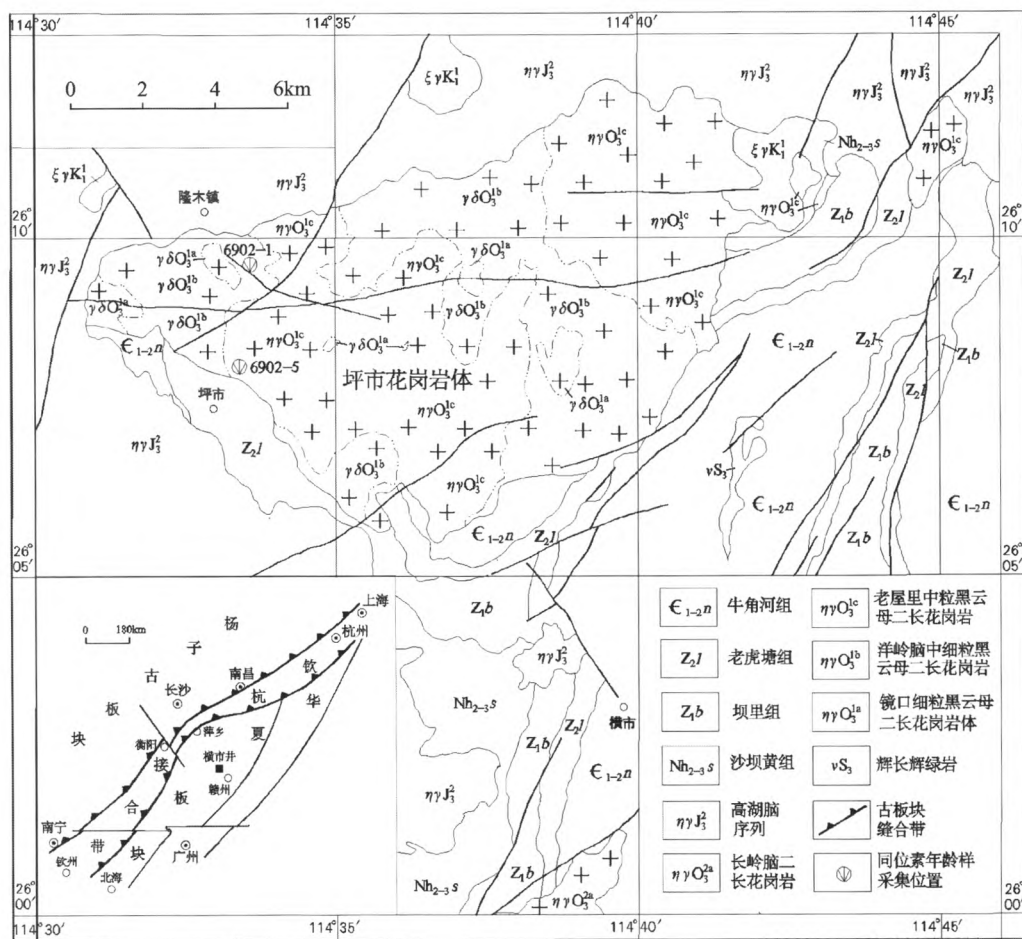
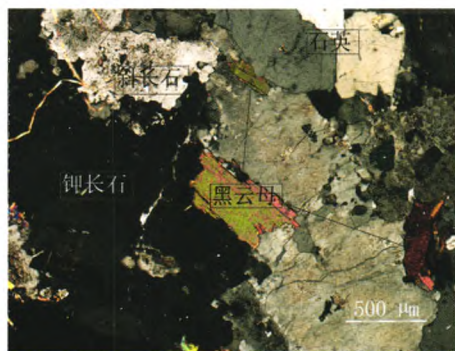


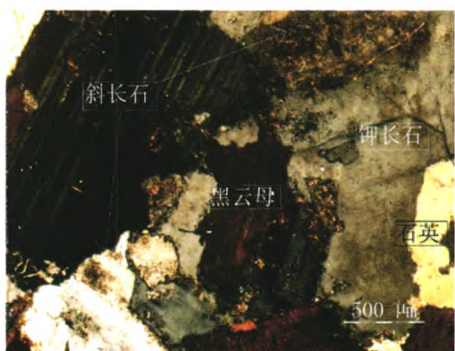
图1 赣南横市地区地质简图^[28]

Fig. 1 Generalized geologic map of the Hengshi area, southern Jiangxi Province

云母二长花岗岩体(图 2a)具中细粒等粒状花岗结构,块状构造,主要由斜长石(35%~55%)、微斜长石(25%~35%)、石英(20%~22%)、黑云母(14%~17%)组成,斜长石多发生绢云母化;老屋里中粒黑云母二长花岗岩体(图 2b)具有似斑状结构,基质为中粒花岗结构,块状构造。斑晶主要有斜长石(15%~20%)、微斜长石(10%~15%)、石英(3%±),基质主要由斜长石(20%~25%)、微斜长石(15%~20%)、石英(20%±)、黑云母(9%±)组成。斑晶粒径 5~8 mm,基质粒径 1~4.8 mm,斜长石呈自形一半自形板状,多发生绢云母化,微斜长石多呈现格子双晶,蚀变较斜长石弱,石英呈他形粒状,岩石中的矿物不具有明显定向性。



(a) 中细粒黑云母二长花岗岩(b6902-1)显微照片



(b) 中细粒黑云母二长花岗岩(b6902-5)显微照片

图 2 坪市花岗岩体显微照片

Fig. 2 Photomicrographs showing medium-grained biotite monzogranites from samples b6902-1 (a) and b6902-5 (b) in the Pingshi granitic pluton

2 分析方法

样品主量元素、微量元素和稀土元素测试分别在南昌矿产资源监督检测中心和武汉市综合岩矿测试中心完成。主量元素采用等离子体发射光谱仪(型号 ICAP6300)分析,除 SiO_2 采用碱熔法测定外,其他氧化物采用酸溶法测定,分析精度优于 2%;微量元素与稀土元素采用质谱仪(型号 Ther-

mo Elemental X7)、X 荧光光谱仪(型号 1800)分析,分析精度优于 3%。分析测试结果均达到 DZ/T0130-2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》要求。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年的样品经颚式粉碎机粗碎后,经细磨过筛,淘洗,在双目镜下挑选晶形和透明度较好的锆石颗粒。将锆石颗粒用环氧树脂固定于样品靶上,样品表面经研磨抛光至锆石晶体近中心截面,对靶上锆石进行镜下透射光、反射光拍照。对锆石进行阴极发光(CL)分析及拍照,选择典型的岩浆锆石进行锆石 U-Pb 测年分析。锆石 U-Pb 定年在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用 LA-ICP-MS 完成,ICP-MS 型号为 Agilent 7500a 型,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产 UP213 固体激光剥蚀系统。分析过程中,激光束斑直径采用 20~30 μm 频率为 5 Hz。样品经剥蚀后,由 He 作为载气,与 Ar 混合后进入 ICP-MS 进行分析。U-Pb 分馏根据澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 608.5 \pm 1.5 \text{ Ma}$)^[29] 校正,锆石标样 Mud Tank($732 \pm 5 \text{ Ma}$)^[30] 作内标。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 计数由 GLITTER 软件(ver. 4.4)(www.mq.edu.au/GEMOC)在线获得,实验原理、分析方法和流程见 Griffin *et al.*^[31] 及 Jackson *et al.*^[29]。普通铅校正用 Andersen^[32] 法校正,用 Isoplot 程序(V. 3. 23)完成年龄计算及谐和图的绘制^[33]。

3 分析结果

3.1 主量和微量元素地球化学特征

样品主量、微量和稀土元素分析结果见表 1。岩体 SiO_2 含量为 67.19%~73.01%,平均含量为 71.03%,CaO 平均含量为 1.90%,MgO 平均含量为 0.98%, Na_2O 平均含量为 3.18%, K_2O 平均含量为 4.09%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.97~1.51,平均值为 1.29,总体上显示贫钠、富钾的特征; Al_2O_3 含量为 13.76%~16.11%,平均值为 14.71%,A/NKC 除 6902-5 为 1.07 外,其它均 >1.1 ;Fe/Fe+Mg 稳定且较低,为 0.52~0.60;MALI 值为 3.87~6.71。这些特征表明坪市花岗岩属强铝过饱和岩石。

在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图解(图 3a)上,8 个样品落在花岗岩区,1 个样品位于花岗闪长岩区,与矿物组合吻合;在 A/NK-A/NKC 图解(图 3b)上,所有样品均落在过铝质花岗岩区;从 ACF 图解(图 4)中可知,样品落于 S 型花岗岩区。这些特征与华南 S 型花岗岩特征相似^[38],说明坪市加里东期花岗岩

表 1 坪市花岗岩体主量元素含量(%）、微量元素含量($\times 10^{-6}$)及稀土元素含量($\times 10^{-6}$)分析结果

Table 1 Analyzed results of major elements (%), trace elements($\times 10^{-6}$)and rare earth elements($\times 10^{-6}$) of the Pingshi granitic pluton

样号	6902-1	6902-5	JX10	JX11	JX12	JX20	JX21	JX34	JX35
SiO ₂	72.74	70.04	73.01	71.42	67.19	71.11	71.61	71.10	71.02
Al ₂ O ₃	13.76	14.68	14.27	14.35	16.11	14.98	14.72	14.82	14.72
TiO ₂	0.33	0.47	0.27	0.37	0.54	0.32	0.26	0.31	0.35
Fe ₂ O ₃	0.21	0.53	0.30	0.36	0.58	0.37	0.28	0.37	0.28
FeO	2.06	2.43	1.43	2.05	2.60	1.85	1.63	1.90	2.00
K ₂ O	4.31	3.61	4.52	4.15	3.47	3.74	4.40	4.06	4.53
Na ₂ O	3.08	2.96	2.99	3.16	3.56	3.25	3.38	3.14	3.11
MgO	0.86	1.25	0.67	0.87	1.58	0.95	0.78	0.88	0.94
CaO	1.50	2.70	0.80	1.69	2.84	2.21	1.50	2.17	1.67
P ₂ O ₅	0.18	0.15	0.19	0.19	0.17	0.14	0.15	0.12	0.17
MnO	0.05	0.08	0.04	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05
LOI	1.00	1.63	1.34	1.15	1.11	0.85	1.06	0.86	0.98
Σ	100.08	100.53	99.83	99.82	99.82	99.84	99.82	99.79	99.82
A/CNK	1.10	1.07	1.29	1.14	1.11	1.13	1.14	1.11	1.15
A/NK	1.41	1.67	1.45	1.48	1.68	1.59	1.43	1.55	1.47
K ₂ O/Na ₂ O	1.40	1.22	1.51	1.31	0.97	1.15	1.30	1.29	1.46
A/MF	2.60	2.11	3.47	2.58	1.91	2.72	3.17	2.75	2.64
MALI	5.89	3.87	6.71	5.62	4.19	4.78	6.28	5.03	5.97
Fe/Fe+Mg	0.57	0.52	0.59	0.60	0.53	0.56	0.58	0.59	0.57
Zr	106	119	98.3	155	159	103	96.5	135	152
Nb	15.7	15.1	18.2	21.8	15.9	14.5	13.9	15.3	17.0
Ba	505	598	486	407	564	386	489	546	446
Hf	4.18	4.28	3.28	4.95	4.64	3.17	3.16	4.09	4.77
Ta	2.63	1.81	3.63	2.05	1.76	2.72	1.93	1.80	1.80
Sc	6.08	8.76	7.07	7.45	10.7	8.42	7.06	8.37	7.17
Cr	19.9	21.0	28.7	30.7	39.1	41.4	31.6	32.5	34.0
Co	5.42	7.92	3.94	5.49	9.52	6.59	4.60	5.70	5.54
Ni	7.62	12.5	6.03	7.16	17.6	11.2	6.72	8.28	7.92
Cu	35.3	12.0	6.46	11.6	7.60	7.38	3.78	8.61	13.1
Pb	91.31	26.4	32.8	26.8	26.6	35.4	33.5	35.1	35.1
Zn	98.0	56.2	50.6	73.6	71.8	58.8	46.7	56.7	70.6
Rb	239	150	256	195	145	212	211	138	252
Th	17.8	14.9	11.4	18.1	10.9	11.7	9.72	12.4	18.2
U	6.26	2.23	11.1	15.1	3.34	3.31	2.85	6.82	6.48
Sr	112.8	143	90.7	124	242	115	117	148	114
V	56.0	0.85	22.9	32.4	48.7	32.2	25.0	31.8	29.5
Rb/Sr	2.12	1.05	2.82	1.57	0.60	1.85	1.80	0.93	2.21
Sr/Ba	0.22	0.24	0.19	0.30	0.43	0.30	0.24	0.27	0.26
La	32.30	50.80	24.5	31.1	22.2	22.3	20.6	25.3	30.1
Ce	63.00	102.00	46.8	64.9	43.0	43.6	39.6	49.2	63.2
Pr	7.71	11.40	5.27	7.61	4.98	4.82	4.41	5.53	7.51
Nd	28.20	39.80	18.8	27.7	18.4	17.1	15.8	20.0	27.6
Sm	5.77	7.01	4.12	6.03	3.94	3.49	3.42	4.12	5.84
Eu	0.72	1.22	0.663	0.746	1.03	0.634	0.679	0.820	0.694
Gd	4.61	5.19	4.06	5.70	3.91	3.15	3.50	4.11	5.12
Tb	0.71	0.77	0.603	0.807	0.579	0.419	0.521	0.612	0.689
Dy	3.72	4.30	3.29	4.19	3.15	2.24	3.07	3.58	3.47
Ho	0.63	0.78	0.59	0.77	0.60	0.43	0.55	0.72	0.62
Er	1.69	2.20	1.61	2.03	1.65	1.25	1.57	2.13	1.65
Tm	0.25	0.34	0.252	0.306	0.258	0.194	0.249	0.341	0.255
Yb	1.58	2.25	1.67	1.90	1.58	1.40	1.72	2.25	1.56
Lu	0.24	0.37	0.253	0.275	0.233	0.211	0.257	0.326	0.234
Y	18.90	22.10	17.8	21.5	17.2	13.0	17.0	22.5	17.9
ΣREE	170	250	130	176	123	114	113	141	166
ΣLREE	138	212	100	138	94	92	85	105	135
ΣHREE	32	38	30	38	29	22	28	36	31
L/H	4.31	5.58	3.33	3.63	3.24	4.18	3.04	2.92	4.35
δEu	0.41	0.59	0.49	0.38	0.79	0.57	0.60	0.60	0.38

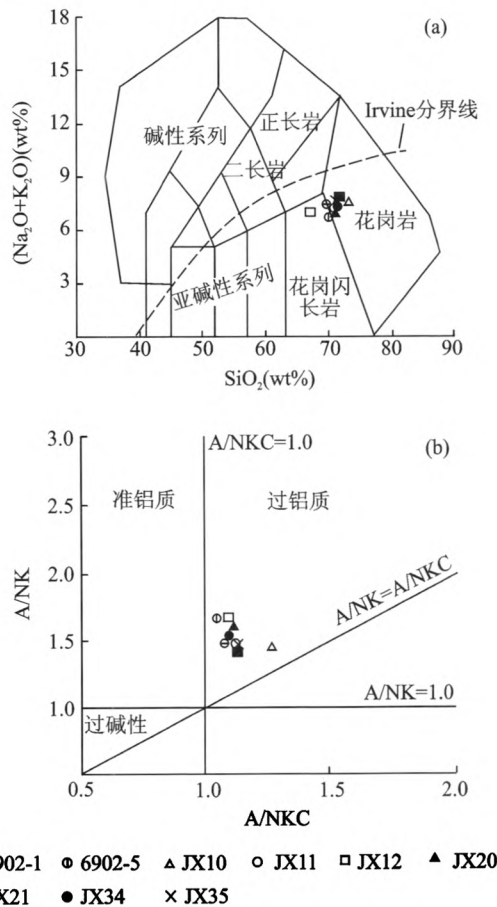


图 3 坪市花岗岩体 (K₂O + Na₂O)-SiO₂ 图解^[34] 及 A/NK-A/NKC 图解^[35]

Fig. 3 (K₂O + Na₂O) vs. SiO₂ and A/NK vs. A/NKC diagrams of the Pingshi granitic pluton

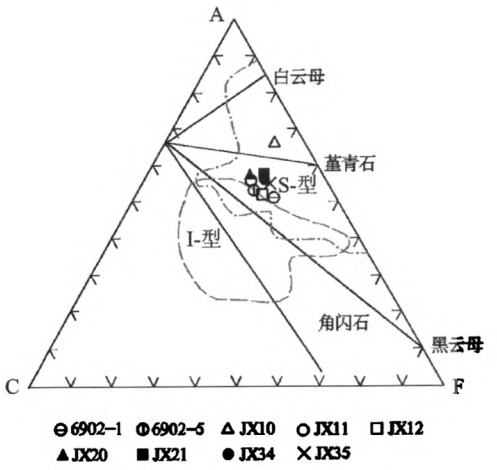


图 4 坪市花岗岩体的 ACF 图解^[36]

Fig. 4 ACF diagram of the Pingshi granitic pluton

是一种强过铝质 S 型花岗岩。

从表 1 可知,坪市花岗岩稀土元素总量偏低, ΣREE 含量为 $(113\sim250)\times10^{-6}$; ΣLREE 含量为 $(92\sim212)\times10^{-6}$, ΣHREE 含量为 $(22\sim38)\times10^{-6}$, 属轻稀土富集型,在稀土元素球粒陨石标准化

配分曲线图(图 5a)上,稀土元素呈明显的右倾型, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 2.92~5.58,平均 3.84,接近地壳比值(2.65~2.93),说明该花岗岩岩浆主要来自于地壳熔融。 $\delta\text{Eu}<1.0$,Eu 亏损程度中等偏高,反映岩浆作用过程中发生了斜长石分离结晶作用。轻稀土元素一侧曲线较重稀土元素一侧陡,轻稀土元素的分馏较重稀土元素明显。

由表 1 可以看出,坪市花岗岩是一种典型的低 Sr(含量 $<150\times10^{-6}$)、低 Yb(含量 $<2.5\times10^{-6}$)花岗岩。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5)显示,岩体中 Rb、Th+U、La+Ce、Nd、Zr+Hf+Sm 相对富集, Ba、Nb、Sr、Ti 相对亏损,与南岭地区 S 型或壳源型花岗岩相似^[40-42]。可知,坪市花岗岩是一种低 Ba、Sr 花岗岩,这类花岗岩是壳源物质低程度部分熔融的产物^[43]。

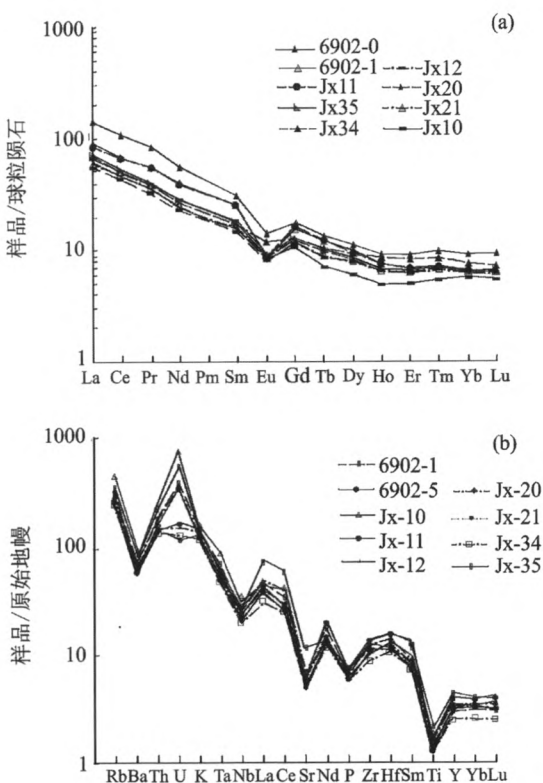


图 5 坪市花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)^[38-39]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (b) for the Pingshi granitic pluton

3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

在坪市花岗岩体采集样品 2 件(样品编号 6902-1,6902-5),采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法进行同位素测年,锆石 U-Pb 分析数据见表 2。6902-1 样品锆石形态自形,CL 图像显示结构单一,岩浆环带清晰(图 6);6902-5 样品锆石形态自形,CL 图像显

示结构单一,岩浆环带清晰,锆石具有明显振荡韵律环带结构,属岩浆成因锆石(图 6)。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄谐和图上(图 7),6902-1 样品中 14 个定年点得出的年龄近一致,加权平均年龄为 456.1 $\pm$ 3.8Ma,为岩石的结晶年龄;6902-5 样品 14 个定

年点得出的年龄近一致,加权平均年龄为 441.3 $\pm$ 5.2Ma,为岩石的结晶年龄。总之,6902-1 样品中 14 个分析点及 6902-5 样品中 14 个分析点均靠近谐和线,其谐和年龄值分别为 456.1 $\pm$ 3.8 Ma 和 441.3 $\pm$ 5.2 Ma,属晚奥陶世—早志留世。

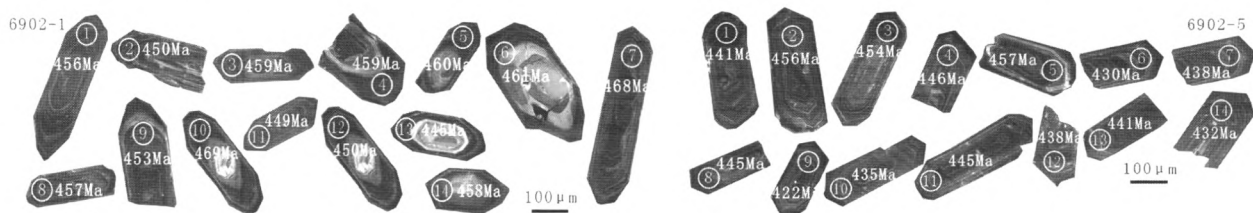


图 6 坪市花岗岩(样品 6902-1、6902-5)锆石阴极发光图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值(圆圈为测点位置)

Fig. 6 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ surface ages of zircons from samples 6902-1 and 6902-5 in the Pingshi granitic pluton

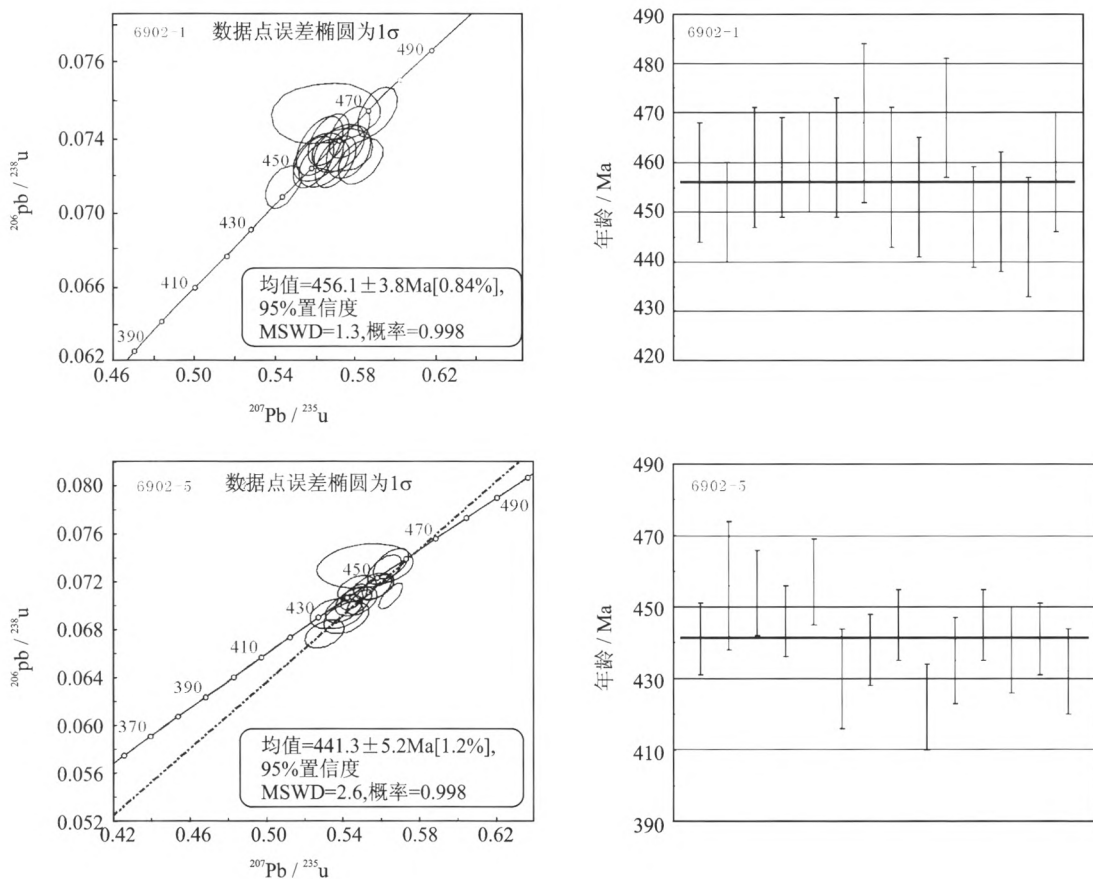


图 7 坪市花岗岩(样品 6902-1、6902-5)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of sample 6902-1 and 6902-5 from the Pingshi granitic pluton

4 讨论

4.1 坪市花岗岩物源分析

岩石地球化学特征表明,赣南横市地区坪市花岗岩是强过铝质 S 型花岗岩。Sylvestre 等^[44] 认为强过铝质 S 型花岗岩是地壳物质部分熔融的产物。

刘昌实等^[43] 对比华南地区不同物源成因的花岗岩地球化学特征,得出华南不同物源成因花岗岩化学成分的平均值。坪市花岗岩体地球化学特征与壳源改造(重熔)系列十分吻合,说明研究区加里东期岩体来源于地壳重熔。王德滋等^[45] 指出 Rb 和 K 具有相似的地球化学性质,随着壳幔分异与陆壳演化,

表 2 坪市花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Table 2 Analysed results of LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Pingshi granitic pluton

样品 测点	Th ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th /U	^{207}Pb / ^{206}Pb	$\pm$ (1 σ)	^{207}Pb / ^{235}U	$\pm$ (1 σ)	^{206}Pb / ^{238}U	$\pm$ (1 σ)	^{207}Pb / ^{206}Pb (Ma)	$\pm$ (1 σ)	^{207}Pb / ^{235}U (Ma)	$\pm$ (1 σ)	^{206}Pb / ^{238}U (Ma)	$\pm$ (1 σ)
6902/1/1	172	1316	0.13	0.0578	0.0013	0.584	0.012	0.0734	0.0010	522	50	467	8	456	6
6902/1/2	419	1714	0.24	0.0568	0.0006	0.566	0.006	0.0722	0.0009	484	25	455	4	450	5
6902/1/3	182	792	0.23	0.0556	0.0007	0.565	0.007	0.0737	0.0010	434	29	455	5	459	6
6902/1/4	182	647	0.28	0.0565	0.0006	0.574	0.006	0.0737	0.0009	472	24	461	4	459	5
6902/1/5	255	874	0.29	0.0559	0.0006	0.570	0.006	0.0739	0.0009	450	26	458	4	460	5
6902/1/6	258	1032	0.25	0.0556	0.0005	0.569	0.005	0.0742	0.0009	437	20	457	3	461	6
6902/1/7	348	892	0.39	0.0545	0.0023	0.566	0.022	0.0753	0.0013	392	95	455	14	468	8
6902/1/8	154	737	0.21	0.0566	0.0010	0.573	0.010	0.0735	0.0011	474	40	460	7	457	7
6902/1/9	168	672	0.25	0.0570	0.0009	0.572	0.009	0.0728	0.0010	493	35	459	6	453	6
6902/1/10	151	650	0.23	0.0569	0.0007	0.591	0.008	0.0754	0.0011	487	28	472	5	469	6
6902/1/11	229	457	0.50	0.0556	0.0005	0.553	0.005	0.0722	0.0009	435	20	447	3	449	5
6902/1/12	50	602	0.08	0.0561	0.0006	0.560	0.006	0.0724	0.0009	456	23	451	4	450	6
6902/1/13	121	1241	0.10	0.0553	0.0007	0.544	0.007	0.0714	0.0009	424	30	441	5	445	6
6902/1/14	13	1284	0.01	0.0556	0.0005	0.564	0.005	0.0736	0.0009	438	21	454	4	458	6
6902/5/1	366	1112	0.33	0.0579	0.0005	0.565	0.005	0.0708	0.0009	524	19	455	3	441	5
6902/5/2	474	1256	0.38	0.0545	0.0021	0.552	0.021	0.0733	0.0015	390	89	446	13	456	9
6902/5/3	230	713	0.32	0.0558	0.0007	0.562	0.007	0.0730	0.0010	444	29	453	5	454	6
6902/5/4	663	1417	0.47	0.0563	0.0009	0.556	0.009	0.0716	0.0009	465	35	449	6	446	5
6902/5/5	399	1155	0.35	0.0558	0.0007	0.565	0.007	0.0735	0.0011	442	30	455	5	457	6
6902/5/6	406	1061	0.38	0.0569	0.0010	0.542	0.010	0.0690	0.0011	486	41	440	6	430	7
6902/5/7	274	707	0.39	0.0566	0.0005	0.549	0.005	0.0703	0.0009	476	21	444	3	438	5
6902/5/8	68	332	0.20	0.0565	0.0006	0.558	0.006	0.0716	0.0009	474	26	450	4	445	5
6902/5/9	879	1546	0.57	0.0569	0.0009	0.530	0.008	0.0676	0.0010	488	36	432	6	422	6
6902/5/10	629	1547	0.41	0.0562	0.0008	0.540	0.008	0.0698	0.0010	461	33	439	5	435	6
6902/5/11	276	609	0.45	0.0556	0.0009	0.547	0.008	0.0714	0.0009	436	35	443	5	445	5
6902/5/12	208	408	0.51	0.0564	0.0009	0.547	0.009	0.0704	0.0010	468	38	443	6	438	6
6902/5/13	197	687	0.29	0.0560	0.0006	0.546	0.006	0.0707	0.0009	452	24	442	4	441	5
6902/5/14	751	1572	0.48	0.0562	0.0012	0.537	0.011	0.0693	0.0011	458	50	436	7	432	6

Rb 富集于成熟度高的地壳中;Sr 和 Ca 具有相似的地球化学性质,在成熟度低、演化不充分的地壳中富集,w(Rb)/ w(Sr)能灵敏记录源区物质性质。坪市花岗岩体 w(Rb)/ w(Sr)为 0.60~2.82,平均值为 1.66,明显高于大陆地壳与上地壳的平均值,说明岩体来源于成熟上地壳物质熔融。

4.2 区域构造意义

总结前人对华南陆内加里东期花岗岩的研究成果^[2-26],结合本文早古生代晚期花岗岩体锆石定年数据及加里东期岩体地球化学特征,我们认为“一直被认为是华夏板块与扬子板块俯冲缝合线的玉山—萍乡—茶陵—郴州—灌阳—柳州”一线两侧的加里东期岩体具有相似的地球化学特征^[46]。

在新元古代初期,华夏地块与扬子地块四堡运动或晋宁运动过程中发生碰撞,导致华南海消失,形

成统一的华南地块^[13]。新元古代蛇绿岩套与火山岩的发现,表明在成冰纪时期华南地区由于深部地幔岩浆活动的影响而发生裂解^[47],就 Rondonia 超大陆裂解(820Ma)来说,引起部分熔融的构造机制可能与弧陆碰撞后拉张垮塌有关^[48],这一裂解事件使原先的华夏地块被肢解成许多次级块体,如云开、赣南、浙闽等次级块体。

随着冈瓦纳超级大陆的形成,各裂解次级块体以及扬子陆块之间发生多期次碰撞过程,华南加里东运动主要是不同地块碰撞拼贴增生造成的,舒良树^[13]认为是一种陆内造山过程,Zhang 等^[26]认为华夏古陆为典型的碰撞型造山带,而并非板内带,包括华南在内的冈瓦纳大陆边缘一些微大陆或地体的合并可能沿大陆边缘持续进行直至 450~430 Ma。在中奥陶世并持续到志留纪,可能受华夏陆块北侧

扬子型地体群拼贴及南东侧未知地体群碰撞—拼贴影响,华夏陆块之间海盆被挤压关闭,形成华南早古生代造山带^[13]。块体的碰撞拼贴使早古生代地层褶皱隆升,地壳加厚。强烈挤压使地壳缩短变厚、地温增高,上地壳某一深部达到岩石初熔温度,上地壳物质逐渐软化并部分熔融,形成铝过饱和和花岗岩岩浆,华夏古陆残块的汇聚为岩浆层的形成与向上移动到地壳浅部提供了能量^[49-50]。铝过饱和和花岗岩岩浆在碰撞至后碰撞过渡期上升侵位,形成坪市花岗岩体。

5 结论

(1)赣南横市地区加里东期坪市花岗岩以似斑状黑云母二长花岗岩为主,花岗闪长岩次之。 SiO_2 含量较高,铝饱和指数均 >1 , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 $0.97\sim 1.51$,平均值为 1.29 ,属强铝过饱和岩石。 $\delta\text{Eu}<1.0$,Eu亏损程度中等偏高,岩体中Rb、Th+U、La+Ce、Nd、Zr+Hf+Sm相对富集,Ba、Nb、Sr、Ti相对亏损。坪市加里东期花岗岩是一种强过铝质高钾钙碱性S型花岗岩,属壳源物质低程度部分熔融的产物。

(2)坪市花岗岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分别为 $456.1\pm 3.8\text{ Ma}$ 和 $441.3\pm 5.2\text{ Ma}$,反映坪市花岗岩体是在晚奥陶世—早志留世形成的,这个时间也是华南加里东(广西运动)发生的时期。

(3)坪市花岗岩体形成于中奥陶世加里东构造运动(广西运动)后期的碰撞至后碰撞过渡期,是华夏古陆与扬子古陆在新元古代碰撞后发生裂解,在中奥陶世并持续至志留纪,华夏陆块北侧扬子型地体群拼贴及南东侧未知地体群碰撞—拼贴,块体碰撞拼贴使早古生代地层褶皱隆升,地壳加厚。强烈挤压使地壳缩短变厚、地温增高,上地壳某一深部达到岩石初熔温度,上地壳物质逐渐软化并部分熔融,形成铝过饱和和花岗岩岩浆,由上地壳源区物质部分熔融形成S型花岗质岩浆,在碰撞至后碰撞过渡期上升至地壳浅部形成坪市花岗岩体。

致谢:感谢楼法生教授级高工、刘邦秀高工、张芳荣博士、胡刚硕士、廖六根高工等在地质调查工作给予的大力支持与帮助!感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见!

参考文献

- [1] 孙涛.新编华南花岗岩分布图及其说明[J].地质通报,2006,25(3):332-335,426-427.
- [2] 张菲菲,王岳军,范蔚茗,等.湘东—赣西地区早古生代

晚期花岗岩体的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年研究[J].地球化学,2010,39(5):414-426.

- [3] 付建明,马昌前,谢才富,等.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,2004,28(4):370-378.
- [4] 张芳荣,舒良树,王德滋,等.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,2009,16(1):248-260.
- [5] WANG Yuejun, FAN Weiming, ZHAO Guochun, et al. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block[J]. Gondwana Research, 2007, 12(4): 404-416.
- [6] WAN Yusheng, LIU Dunyi, Wilde Simon A, et al. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb Dating, geochemistry and Nd isotope[J]. Journal of Asian earth Sciences, 2010, 37(2): 140-153.
- [7] 杨树锋,陈汉林,武光海,等.闽北早古生代岛弧火山岩的发现及其大地构造意义[J].地质科学,1995,30(2):105-116.
- [8] 孙明志,徐克勤.华南加里东花岗岩及其形成地质环境浅析[J].南京大学学报:地球科学版,1990,2(4):10-22.
- [9] 许德如,陈广浩,夏斌,等.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,2006,12(4):507-521.
- [10] 沈渭洲,张芳荣,舒良树,等.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,2008,24(10):2244-2254.
- [11] 周新民.对华南花岗岩研究的若干思考[J].高校地质学报,2003,9(4):556-565.
- [12] LI Zhengxiang, LI Xianhua, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, southeastern south China: New age constraints and P-T conditions[J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(5/6): 772-793.
- [13] 舒良树,于津海,贾东,等.华南东段早古生代造山带研究[J].地质通报,2008,27(10):1581-1593.
- [14] Faure M, SHU Liangshu, WANG Bo, et al. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China[J]. Terra Nova, 2010, 21(5): 360-368.
- [15] 舒良树.华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带[J].高校地质学报,2006,12(4):418-431.
- [16] LI Xianhua, LI Zhengxiang, LI Wuxian. Detrital zircon U-Pb age and Hf isotope constrains on the genera-

- tion and reworking of Precambrian continental crust in the Cathaysia Block, South China: A synthesis[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(3): 1202-1215.
- [17] 王德滋. 华南花岗岩研究的回顾与展望[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 305-314.
- [18] GUO Lingzhi, SHI Yangshen, LU Huaifu, et al. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 1989, 3(1): 87-93.
- [19] Hsü K J, LI Jiliang, CHEN Haihong, et al. Tectonics of South China: Key to understanding west Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 1990, 183(1/4): 9-39.
- [20] 马瑞士. 华南构造演化新思考——兼论“华夏古陆”说中的几个问题[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 448-456.
- [21] 陈相艳, 全来喜, 张传林, 等. 浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩): 华夏加里东期碰撞造山事件的新证据[J]. *科学通报*, 2015, 60(13): 1207-1217.
- [22] Meert J G, Lieberman B S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation [J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(1/2): 5-21.
- [23] Nance R D, Murphy J B, Santosh M. The supercontinent cycle: A retrospective essay[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 4-29.
- [24] Santosh M, Maruyama S, Sawaki Y, et al. The Cambrian explosion: Plume-driven birth of the second ecosystem on Earth[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(3): 945-965.
- [25] ZHAO Guochun, Cawood P A. Precambrian geology of China[J]. *Precambrian Research*, 2012, (222-223): 13-54.
- [26] ZHANG Chuanlin, Santosh M, ZHU Qingbo, et al. The Gondwana connection of South China: Evidence from monazite and zircon geochronology in the Cathaysia Block [J]. *Gondwana Research*, 2014, 28(3): 1137-1151.
- [27] 杨明桂, 梅勇文. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. *华南地质与矿产*, 1997, 10(3): 52-58.
- [28] 江西省地质调查研究院. 江西 1: 10 万遂川县 (G50E011003)、良口 (G50E011004)、横市井 (G50E012003)、夏府幅 (G50E012004) 含矿地质建造构造图[R]. 南昌: 江西省地质调查研究院, 2013.
- [29] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47-69.
- [30] Black L P, Gulson B L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory[J]. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 1978, 3(3): 227-232.
- [31] Griffin W L, Belousova E, Shee S, et al. Crustal evolution in the northern Yilam Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2004, 131(3/4): 231-282.
- [32] Andersen, T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [33] Ludwi K R. User's manual for Isoplot 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 4, 2004: 70-74.
- [34] Middlemost A K. Naming materials in the magmas/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [35] 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 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*, 2002, 8(3): 293-307.
- [36] 邱检生, 胡建, 王孝磊, 等. 广东河源白石岗岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩[J]. *地质学报*, 2005, 79(4): 503-514.
- [37] 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2003, 33(12): 1209-1218.
- [38] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Science Publication, 1985: 1-312.
- [39] Sun S-S, McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. London: Special Publication, 1989: 313-345.
- [40] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [41] 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [42] Harris H B W, Inger S. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110(1): 46-56.
- [43] 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 等. 华南花岗岩物源成因特征与陆壳演化[J]. *大地构造与成矿学*, 1990, 14(2): 125-138.
- [44] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1): 29-44.
- [45] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. *岩石学报*, 1993, 9(1): 44-54.
- [46] 李聪, 陈世悦, 张鹏飞, 等. 华南加里东期陆内构造属性探讨[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2010,

- 34(5): 18-24.
- [47] LI Z X, Kinny P D. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163-166.
- [48] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [49] 陈国能. 岩石成因与岩石圈演化思考[J]. *地学前缘*, 2011, 18(1): 1-8.
- [50] 陈国能, 张珂, 邵荣松, 等. 原地重熔及其地质效应[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2001, 40(3): 95-99.

LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Pingshi granitic pluton in southern Jiangxi and their tectonic significance

LUO Chun-lin, LIU Gao-feng, ZUO Zu-fa

(*Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang 330030, China*)

Abstract: This study conducted analysis on the Pingshi granitic pluton in the Hengshi area, southern Jiangxi Province using LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, petrological and geochemical methods. The results show that the zircon U-Pb ages of the biotite monzogranite in the studied areas are 456.1 ± 3.8 Ma and 441.3 ± 5.2 Ma, indicating the Pingshi granitic pluton formed in Late Ordovician to Early Silurian. Geochemical result shows that the Pingshi granitic pluton has ACNK of 1.1~1.29 and K_2O/Na_2O of 0.97~1.51, suggesting that they belong to peraluminous and high-K calc-alkaline rock. The pluton has a total REE content of $(113 \sim 250) \times 10^{-6}$, and is enriched in LREE, with distinct right oblique REE patterns, Eu values of 0.38 to 0.67 and obvious negative Eu anomaly. The REE analysis shows the pluton is enriched in Rb, Th+U, La+Ce, Nd and Zr+Hf+Sm, and depleted in Ba, Nb, Sr and Ti, with Rb/Sr ratio of 0.60~2.82 (averaging 1.66) obviously higher than the average values of continental crust and the upper crust, suggesting that the pluton is of the characteristics of crust derived granite. The Pingshi granite pluton might result from the Caledonian movement of late Early Paleozoic, and broke up after collision matching between Cathaysian block and Yangtze block. S-type granitic magmas, formed by partial melting of the upper crust in the period of Middle Ordovician to Silurian, ascended to the shallow part of the crust and yielded the Pingshi granite pluton in the period of collision to post-collision.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb dating; S-type granite; Pingshi granitic pluton; Caledonian movement; intracontinental orogeny in South China; Southern Jiangxi