

文章编号:1672-6561(2012)03-0044-13

江西赣州隆木花岗岩体年龄、成分特征 及其构造意义

胡 刚¹, 钟达洪², 邓 新¹, 杨坤光¹

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 江西省地质调查研究院, 江西 南昌 330030)

摘要:为了查明江西赣州隆木花岗岩形成时代及演化过程,对隆木岩体中的黑云母花岗岩与似斑状黑云母二长花岗岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和同位素地球化学研究。结果表明:黑云母花岗岩与似斑状黑云母二长花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果分别为 (457 ± 6) 、 (450 ± 9) Ma,表明岩体形成于晚奥陶世;岩体铝饱和指数为 1.11~1.29, K_2O 与 Na_2O 含量(质量分数)之比为 0.97~1.51,属强过铝质及高钾钙碱性岩石;根据 ACF 图解,岩体投影于 S 型花岗岩区域内;岩体 Rb、Th+U、La+Ce、P、Nd、Zr+Hf+Sm 相对富集,而 Ba、Nb、Sr、Ti 相对亏损,总体上属于低 Ba、低 Sr 的花岗岩;岩体 Rb 与 Sr 含量之比为 0.60~2.82,平均值为 1.68,明显高于大陆地壳与上地壳的平均值,具壳源花岗岩特征;根据 A/MF-C/MF 图解,岩体物源区为砂质岩;岩体稀土元素含量总量偏低,为 $(113 \sim 176) \times 10^{-6}$,轻稀土元素富集明显,配分模式明显呈右倾型, Eu 异常为 0.38~0.67, Eu 亏损程度中等偏高;化学成分显示,岩体属于强过铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩,是一种壳源花岗岩,岩浆源区为成熟上地壳的砂质岩源区;构造判别图解、年龄信息及野外特征表明,岩体形成于后碰撞伸展构造环境。总之,隆木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裂解、在中奥陶世再次发生陆内碰撞使得地壳加厚部分重融、造山后期地壳伸展减薄、熔融物质上升侵位形成的岩体。

关键词:地球化学;锆石 U-Pb 定年;S 型花岗岩;隆木岩体;加里东运动;华南陆内造山;赣州;江西
中图分类号:P588.12⁺1;P597⁺.3 **文献标志码:**A

Formation Age and Geochemical Characteristics of Longmu Granite Body in Ganzhou, Jiangxi Province and Its Tectonic Significance

HU Gang¹, ZHONG Da-hong², DENG Xin¹, YANG Kun-guang¹

(1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Jiangxi Provincial Institute of Geological Survey, Nanchang 330030, Jiangxi, China)

Abstract: In order to find out the formation age and evolution process of Longmu Granite in Ganzhou of Jiangxi Province, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and isotope geochemistry of biotite granite and like-porphyritic biotite monzogranite in Longmu Pluton were studied. The results showed that the ages of zircon U-Pb dating of biotite granite and like-porphyritic biotite monzogranite were (457 ± 6) Ma and (450 ± 9) Ma respectively, which indicated that the pluton emplaced in Late Ordovician; aluminum saturation index was 1.11-1.29, the ratio of contents (mass fractions) of K_2O and Na_2O was 0.97-1.51, so the plutons were categorized as strong peraluminous and high potassium calc-alkaline; according to the ACF diagram, the pluton was

收稿日期:2011-12-23

基金项目:中国地质调查局项目(基(2010)矿评 01-14-06);国家自然科学基金项目(40972137)

作者简介:胡 刚(1989-),男,江西南昌人,理学硕士研究生, E-mail: hugang1018@yahoo.com.cn.

plotted in the field of S-type granite; Longmu Pluton was enriched in Rb, Th+U, La+Ce, P, Nd, Zr+Hf+Sm and depleted in Ba, Nb, Sr, Ti, so the pluton belonged to the granite with low Ba and Sr on the whole; the ratio of contents of Rb and Sr was 0.60-2.82 with an average of 1.68, which was higher than the average of continental crust and supracrust, so the pluton was categorized as crustal derived granite; according to the A/MF-C/MF diagram, the provenance of pluton was psammite; the content of rare earth element of pluton was lower $((113-176) \times 10^{-6})$, the enrichment of light rare earth element was significant, the distribution pattern was significantly right-wing type, and Eu anomaly was 0.38-0.67 and the depletion was more than middle; chemical composition showed that the pluton was S-type strong peraluminous high potassium calc-alkaline granite which was a kind of crustal derived granite, and magma protolith was the psammite source of mature supracrust; the tectonic discrimination diagram, zircon U-Pb dating and field characteristics indicated the pluton emplaced in a post-orogenic extension environment. In general, the emplacement time of Longmu Pluton was the late of Early Paleozoic under the control of Caledonian Movement; Cathaysia Plate and Yangtze Plate collided in Neoproterozoic and then cracked, and in the middle of Ordovician, the two plates happened intracontinental collision again which thickened the crust, and in post-orogenic stage, the crust began to strongly extension and partial melting and formed the mantle crust granite.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb dating; S-type granite; Longmu Pluton; Caledonian Movement; intracontinental orogeny of South China; Ganzhou; Jiangxi

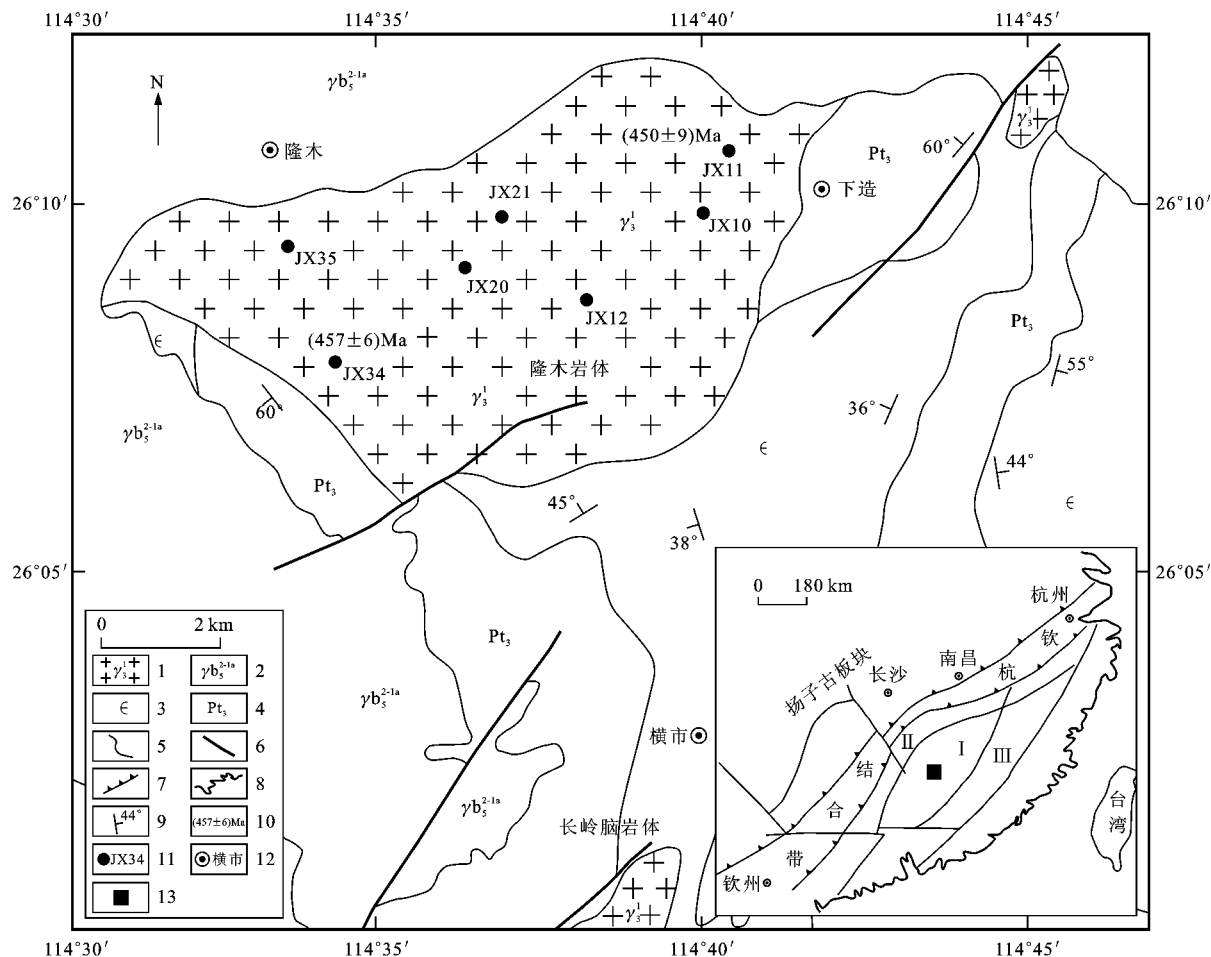
0 引言

花岗岩研究在大陆动力学研究中具有重要的指示意义。华南地区加里东期花岗岩成因及形成构造背景的研究,对理解华南加里东期造山特点及区域构造环境有重要意义。华南陆内加里东期花岗岩最早是徐克勤等在江西上犹县陡水和南康县龙回等地发现的^[1]。前人对华南地区岩浆活动及成因的研究做了很多工作,特别是对新元古代及中生代岩浆活动及成因的研究较为深入。近年来,华南早古生代岩浆活动及成因也引起了地质学者的广泛关注。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^[2]。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 470~382 Ma^[3-5]。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,且两者具有相似的形成年龄^[6-7]。与华南燕山期花岗岩相比,对华南加里东期花岗岩构造背景的研究存在明显分歧^[8-11]。关于华南地区加里东运动构造属性,长期存在争论,弧—陆碰撞模式^[9]一直占据主导地位,但对华南早古生代火山岩和蛇绿岩的最新年龄测试表明,华南加里东期弧—陆碰撞模式并不能圆满解释加里东运动构造属性。一些学者对华南东

段加里东期花岗岩进行化学特征、构造环境示踪及 U-Pb 定年研究,认为华南加里东期花岗岩形成于板内造山环境^[11],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^[12-13]。但是,华南加里东期花岗岩形成的构造背景与构造属性仍需更详细的研究。笔者选取的赣南隆木岩体位于华夏板块罗霄褶皱带中部和万安—遂川断裂带东侧,区内加里东构造活动明显。该岩体主要由中—细粒黑云母花岗岩和中—细粒似斑状黑云母二长花岗岩组成。笔者对研究区出露的加里东期花岗岩进行了详细的元素地球化学、锆石 U-Pb 定年及野外特征观察研究,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详实资料。

1 地质背景与岩体特征

赣南隆木岩体位于江西省赣州市横市镇北部,大地构造位于华南板块万洋山复式向斜东翼、罗霄褶皱带中部以及钦杭结合带东南区域(图1)。岩体呈北东向产出,面积约 38 km²。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;由于加里东运动的影响,奥陶系、志留系缺失,泥盆系以高角度不整合于寒武系地层之上,伴随加里东运动,形成了大规模的花岗岩体。



1—早古生代晚期花岗岩;2—燕山期早期第一阶段侵入岩;3—寒武系;4—新元古代地层;5—地质界线;6—断层;7—大型逆冲断层;
8—海岸线;9—地质产状;10—岩体锆石 U-Pb 年龄;11—采样点及样品编号;12—地名;13—研究区位置;
I—罗霄褶皱带;II—罗霄—仙霞前缘褶皱带;III—武夷褶皱带

图 1 赣州横市地区早古生代晚期花岗岩分布

Fig. 1 Distribution of Granite During the Late Early Paleozoic in Hengshi Area of Ganzhou

隆木岩体侵入于震旦系—寒武系浅变质变余砂岩、板岩、千枚岩之中,与燕山期花岗岩呈侵入接触关系。该接触带围岩发生较强的角岩化,接触带内发生混合岩化。隆木岩体由 2 个岩石单元组成,岩性分别为中—细粒黑云母花岗岩和中—细粒似斑状黑云母二长花岗岩。黑云母花岗岩具中—细粒花岗结构,块状构造,主要由斜长石、微斜长石、石英、黑云母等组成,斜长石多发生绢云母化,微斜长石具格子双晶;黑云母二长花岗岩具中—细粒花岗结构,似斑状构造,块状构造,斑晶主要有微斜长石与斜长石,基质主要由石英、黑云母、微斜长石、斜长石组成。斑晶大小一般为 30 mm×15 mm,斜长石呈自形板状,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(图 2)。2 类岩石中的矿物不具有明显定向性,仅局部可见岩浆流动留下的弱定向构造[图 2(a)]。

进行锆石 U-Pb 定年的样品 JX11(采集处坐标:26°10.944'N,114°40.188'E)产自隆木岩体中一细粒似斑状黑云母二长花岗岩,样品 JX34(采集处坐标 26°08.471'N,114°33.251'E)产自隆木岩体中一细粒黑云母花岗岩。进行主量元素与微量元素分析的有样品 JX11(中—细粒似斑状黑云母二长花岗岩)以及样品 JX10、JX12、JX20、JX21、JX34、JX35(中—细粒黑云母花岗岩)。

2 岩体年龄测定与成分分析

2.1 样品制备与分析方法

新鲜的全岩样品通过人工重砂方法分选出锆石,由河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。挑选晶形好、无裂隙、透明干净的自形锆石颗粒在玻璃板上用环氧树脂固定,并抛光至锆石中心,用阴极发光(CL)电子显微镜进行照相,观察锆石颗粒内部结

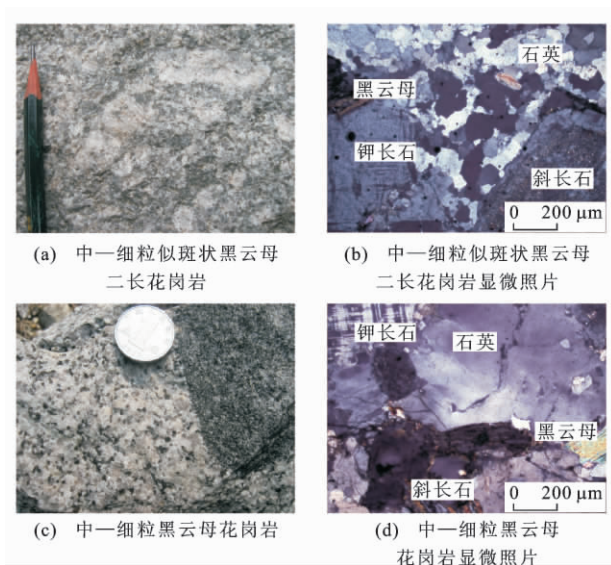


图2 隆木岩体野外特征及显微照片
Fig. 2 Field Characteristics and Micrographs
for Longmu Pluton

构,选取最佳分析点。锆石 U-Pb 定年于中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)分析完成。激光剥蚀系统型号为 GeoLas 2005, ICP-MS 型号为 Agilent 7500a, 分析方法见文献[14-16]。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均的计算均采用软件 Isoplot^[17] 完成。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量(质量分数)及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄的计算)采用软件 ICPMS DataCal^[15,18] 完成。

全岩主量元素和微量元素、稀土元素的测试由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(型号为 ICA6300)分析,除 SiO₂ 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(型号为 Thermo Elemental X7)、X 荧光光谱仪(型号为 1800)分析,分析精度优于 3%。

2.2 锆石 U-Pb 定年

隆木岩体锆石以浅棕色为主,半透明至透明,多呈柱状,长宽比为 1:2~1:4。锆石 CL 图像显示锆石核部较小,具有明显的核幔结构,核部和边缘具有强烈振荡韵律环带结构,环带较窄,颗粒大小为 100 μm 左右(图 3),表明锆石为岩浆成因锆石。各岩体锆石样品 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 绝大部分都大于 0.1, 总体为 0.3~0.5, 也显示样品锆石为典型岩浆成因锆石^[19]。选取锆石边部对岩浆形成年龄进行测试,

并用于代表花岗岩的形成年龄。U-Pb 定年分析数据见表 1。

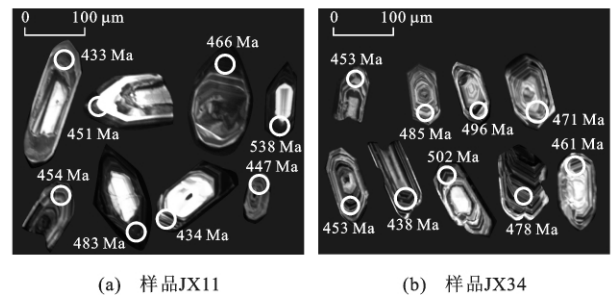


图3 隆木岩体样品 JX11、JX34 花岗岩锆石 CL 图像
Fig. 3 CL Images for Zircons of Granites from
Samples JX11 and JX34 in Longmu Pluton

样品 JX11 的 15 个测点中, $w(\text{Th})$ 为 $(14.6 \sim 517) \times 10^{-6}$, $w(\text{U})$ 为 $(162 \sim 2\,256) \times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 0.03~0.81; 测点 JX11-13 的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄为 1 034 Ma, 明显偏离正态分布特征, 可能为残留锆石或继承锆石的年龄, 在数据中没有考虑; 其余 14 个测点都落在谐和线上[图 4(a)], $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄为 476~433 Ma。样品 JX11 的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值为 $(450 \pm 9)\text{Ma}$ (加权均方偏差值为 1.8)[图 4(b)], 用其代表该岩体的形成年龄。

样品 JX34 的 17 个测点中, $w(\text{Th})$ 为 $(144 \sim 688) \times 10^{-6}$, $w(\text{U})$ 为 $(435 \sim 1\,939) \times 10^{-6}$, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 为 0.25~0.65。17 个测点中, 无明显偏大的数据, 测点 JX34-15 的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄偏小, 为 206 Ma, 推测为锆石受晚期热液活动发生重结晶年龄, 其余 16 个测点 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄为 476~434 Ma[图 5(a)]。样品 JX34 的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄加权平均值为 $(457 \pm 6)\text{Ma}$ (加权均方偏差值为 4.7)[图 5(b)], 用其代表该岩体的形成年龄。

上述定年结果表明, 隆木岩体由早期中—细粒黑云母花岗岩 $((457 \pm 6)\text{Ma})$ 与晚期中—细粒似斑状黑云母二长花岗岩 $((450 \pm 9)\text{Ma})$ 的 2 次侵入而构成, 两者是在相隔约 7 Ma 内先后侵位的。

2.3 主量元素特征

从表 2 可以看出, 岩体总体呈富硅、富碱、富铝、贫镁钙的特征, $w(\text{SiO}_2)$ 较高, 为 67.19%~73.01%, 平均值为 70.92%; $w(\text{CaO})$ 平均值为 1.84%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均值为 3.23%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 较高, 平均为 4.12%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.97~1.51, 平均为 1.28, 总体上显示贫钠、富钾的特征; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 14.27%~16.11%, 平均为 14.85%, 铝饱和指数

表 1 隆木岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Tab. 1 Results of LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for Longmu Pluton

样品测点	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
JX11-01	57.4	189	0.30	$0.059\,0\pm0.001\,7$	$0.584\,5\pm0.016\,5$	$0.072\,4\pm0.000\,6$	565 ± 63	467 ± 11	451 ± 3
JX11-02	63.9	1365	0.05	$0.057\,1\pm0.000\,6$	$0.590\,5\pm0.007\,3$	$0.074\,9\pm0.000\,6$	494 ± 22	471 ± 5	466 ± 4
JX11-03	14.6	274	0.05	$0.058\,0\pm0.001\,3$	$0.554\,3\pm0.012\,6$	$0.069\,5\pm0.000\,5$	528 ± 56	448 ± 8	433 ± 3
JX11-04	124.0	215	0.58	$0.053\,6\pm0.001\,4$	$0.538\,4\pm0.014\,1$	$0.072\,9\pm0.000\,7$	354 ± 56	437 ± 9	454 ± 4
JX11-05	274.0	2041	0.13	$0.056\,4\pm0.000\,8$	$0.559\,0\pm0.008\,8$	$0.071\,8\pm0.000\,6$	465 ± 31	451 ± 6	447 ± 4
JX11-06	94.6	162	0.58	$0.057\,1\pm0.001\,9$	$0.549\,1\pm0.018\,2$	$0.069\,7\pm0.000\,8$	494 ± 72	444 ± 12	434 ± 5
JX11-07	249.0	829	0.30	$0.053\,9\pm0.000\,8$	$0.572\,5\pm0.010\,0$	$0.076\,7\pm0.000\,8$	369 ± 68	460 ± 6	476 ± 4
JX11-08	65.8	833	0.08	$0.054\,9\pm0.000\,9$	$0.564\,5\pm0.010\,2$	$0.074\,2\pm0.000\,7$	409 ± 42	454 ± 7	461 ± 4
JX11-09	75.3	2256	0.03	$0.056\,1\pm0.000\,9$	$0.564\,8\pm0.012\,1$	$0.072\,4\pm0.001\,1$	457 ± 40	455 ± 8	451 ± 6
JX11-10	78.6	222	0.35	$0.058\,9\pm0.001\,7$	$0.575\,9\pm0.016\,2$	$0.070\,8\pm0.000\,6$	561 ± 68	462 ± 10	441 ± 4
JX11-11	44.7	530	0.08	$0.055\,9\pm0.001\,1$	$0.581\,1\pm0.011\,4$	$0.075\,4\pm0.000\,7$	450 ± 14	465 ± 7	469 ± 4
JX11-12	517.0	638	0.81	$0.057\,0\pm0.001\,1$	$0.579\,8\pm0.011\,0$	$0.073\,5\pm0.000\,6$	494 ± 41	464 ± 7	457 ± 3
JX11-13	58.5	526	0.11	$0.076\,4\pm0.001\,2$	$1.878\,9\pm0.062\,0$	$0.173\,9\pm0.004\,3$	$1\,106\pm33$	$1\,074\pm22$	$1\,034\pm24$
JX11-14	206.0	345	0.60	$0.061\,0\pm0.001\,3$	$0.578\,2\pm0.011\,6$	$0.068\,8\pm0.000\,6$	639 ± 44	463 ± 7	429 ± 4
JX11-15	172.0	2138	0.08	$0.058\,6\pm0.000\,7$	$0.580\,5\pm0.008\,3$	$0.071\,5\pm0.000\,6$	554 ± 31	465 ± 5	445 ± 3
JX34-01	347.0	901	0.39	$0.055\,6\pm0.000\,9$	$0.559\,6\pm0.008\,8$	$0.072\,8\pm0.000\,6$	435 ± 3	451 ± 6	453 ± 3
JX34-02	382.0	612	0.62	$0.053\,6\pm0.001\,0$	$0.594\,0\pm0.011\,9$	$0.080\,0\pm0.000\,7$	354 ± 38	473 ± 8	496 ± 4
JX34-03	324.0	769	0.42	$0.054\,8\pm0.000\,8$	$0.592\,3\pm0.009\,1$	$0.078\,1\pm0.000\,7$	467 ± 31	472 ± 6	485 ± 4
JX34-04	242.0	526	0.46	$0.052\,9\pm0.001\,1$	$0.532\,4\pm0.010\,5$	$0.072\,8\pm0.000\,6$	324 ± 46	433 ± 7	453 ± 3
JX34-05	261.0	527	0.50	$0.056\,1\pm0.001\,2$	$0.588\,3\pm0.012\,4$	$0.075\,7\pm0.000\,7$	457 ± 46	470 ± 8	471 ± 4
JX34-06	237.0	438	0.54	$0.059\,3\pm0.001\,2$	$0.607\,1\pm0.012\,4$	$0.074\,1\pm0.000\,6$	576 ± 44	482 ± 8	461 ± 4
JX34-07	144.0	435	0.33	$0.055\,2\pm0.001\,2$	$0.584\,4\pm0.013\,0$	$0.076\,8\pm0.000\,8$	420 ± 53	467 ± 8	477 ± 5
JX34-08	330.0	1269	0.26	$0.057\,7\pm0.000\,9$	$0.614\,6\pm0.010\,5$	$0.077\,0\pm0.000\,6$	520 ± 35	486 ± 7	478 ± 3
JX34-09	417.0	643	0.65	$0.056\,3\pm0.001\,1$	$0.563\,3\pm0.011\,3$	$0.072\,4\pm0.000\,5$	465 ± 44	454 ± 7	451 ± 3
JX34-10	348.0	837	0.42	$0.056\,3\pm0.001\,0$	$0.570\,0\pm0.011\,6$	$0.073\,1\pm0.000\,7$	465 ± 36	458 ± 8	455 ± 4
JX34-11	256.0	726	0.35	$0.057\,0\pm0.001\,0$	$0.638\,8\pm0.012\,1$	$0.081\,1\pm0.000\,8$	500 ± 37	502 ± 7	502 ± 5
JX34-12	411.0	984	0.42	$0.056\,3\pm0.000\,9$	$0.567\,7\pm0.010\,0$	$0.072\,8\pm0.000\,6$	465 ± 35	456 ± 6	453 ± 4
JX34-13	578.0	1648	0.35	$0.059\,0\pm0.000\,9$	$0.606\,0\pm0.012\,2$	$0.074\,5\pm0.001\,2$	569 ± 1	481 ± 8	463 ± 7
JX34-14	351.0	473	0.74	$0.059\,4\pm0.001\,3$	$0.607\,6\pm0.014\,6$	$0.073\,8\pm0.000\,6$	589 ± 48	482 ± 9	459 ± 3
JX34-15	688.0	2746	0.25	$0.059\,3\pm0.001\,9$	$0.257\,9\pm0.005\,9$	$0.032\,5\pm0.000\,6$	589 ± 73	233 ± 5	206 ± 3
JX34-16	326.0	1051	0.31	$0.060\,8\pm0.000\,9$	$0.591\,1\pm0.009\,8$	$0.070\,2\pm0.000\,6$	632 ± 33	472 ± 6	438 ± 4
JX34-17	637.0	1939	0.33	$0.059\,1\pm0.000\,8$	$0.575\,4\pm0.008\,1$	$0.070\,4\pm0.000\,5$	569 ± 30	462 ± 5	438 ± 3

注:样品测点中,JX11表示中—细粒似斑状黑云母二长花岗岩,JX34表示中—细粒黑云母花岗岩; $w(\cdot)$ 为元素或化合物的含量; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为元素的原子数; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量。

(I_{ASI})均大于1.1,为1.11~1.29; $w(\text{Fe})/(w(\text{Fe})+w(\text{Mg}))$ 稳定且较低,为0.53~0.60;钙碱指数 I_{CA} 为4.19~6.71。这些表明隆木岩体花岗岩属强铝过饱和岩石。

从图6(a)可以看出,样品大部分投在花岗岩区域,仅1个样品位于花岗闪长岩区域,与矿物组合相吻合^[20];从图6(b)可以看出,所有样品都投在过铝质花岗岩的区域内^[21];从图6(c)可以看出,样品都投在高钾钙碱性系列^[22];从图6(d)可以看出,样品都落于S型花岗岩区域内^[23]。上述岩体主量元素特征与华南S型花岗岩特征相似^[24]。隆木加里东期花岗岩是一种强过铝质高钾钙碱性S型花岗岩。

2.4 微量元素与稀土元素特征

从表2可以看出,隆木岩体稀土元素含量总量偏低, w_{REE} 为 $(113\sim176)\times10^{-6}$ 。岩体具有较高的 $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ (7.38~9.92)和 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ (7.60~13.08),轻稀土元素富集,配分模式显示稀土元素和明显右倾型[图7(a)]^[25]。轻稀土元素和

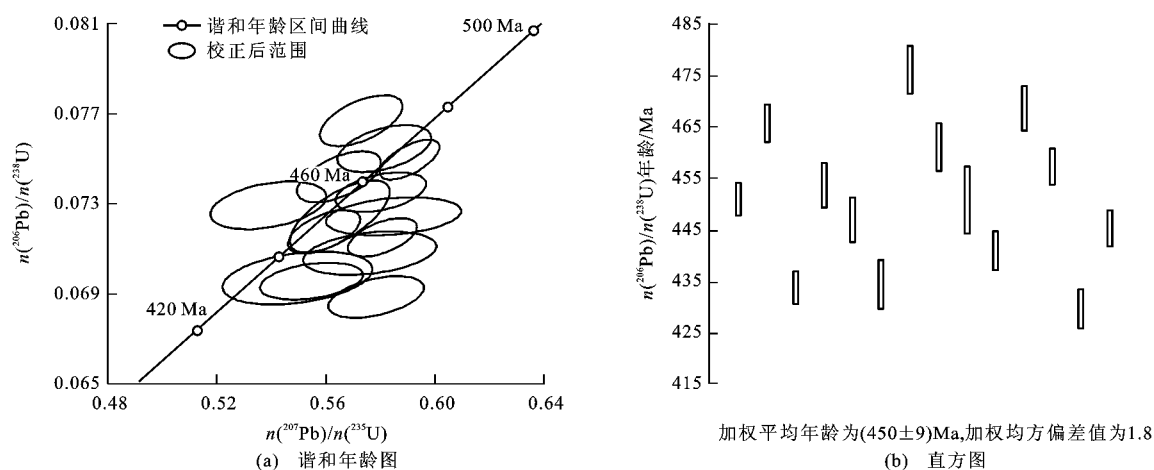


Fig. 4 LA-ICP-MS Zircon U-Pb Concordia Diagram and Histogram for Granite from Sample JX11 in Longmu Pluton

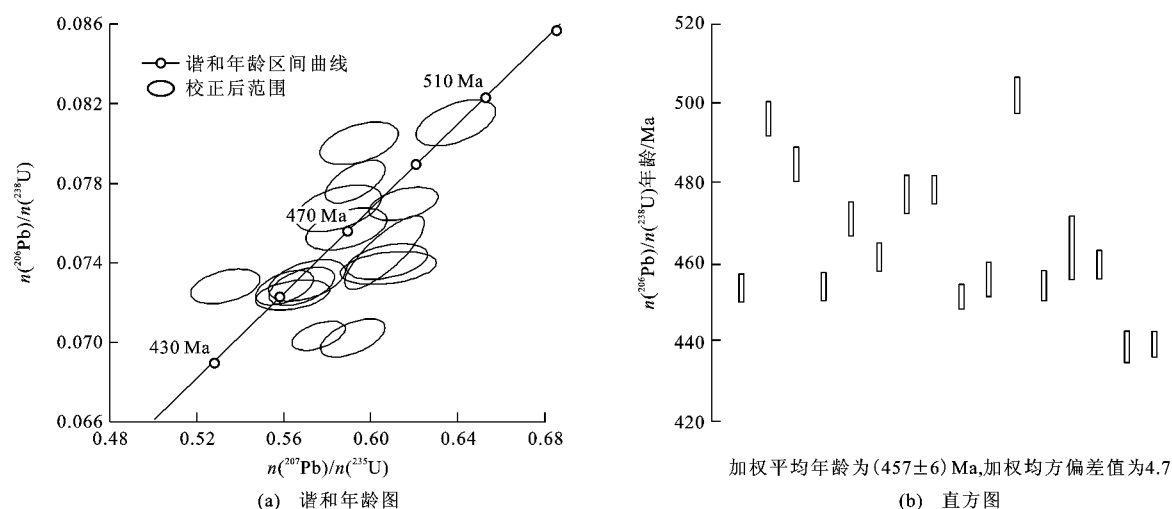


Fig. 5 LA-ICP-MS Zircon U-Pb Concordia Diagram and Histogram for Granite from Sample JX34 in Longmu Pluton

重稀土元素比值较大,为 1.98~2.74,与地壳的比值(2.65~2.93)相当,显著超过地幔和地核,说明该花岗岩岩浆形成的物质主要来自于地壳熔融。Eu 异常($\delta(\text{Eu})$)小于 1.0,为 0.38~0.67, 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。

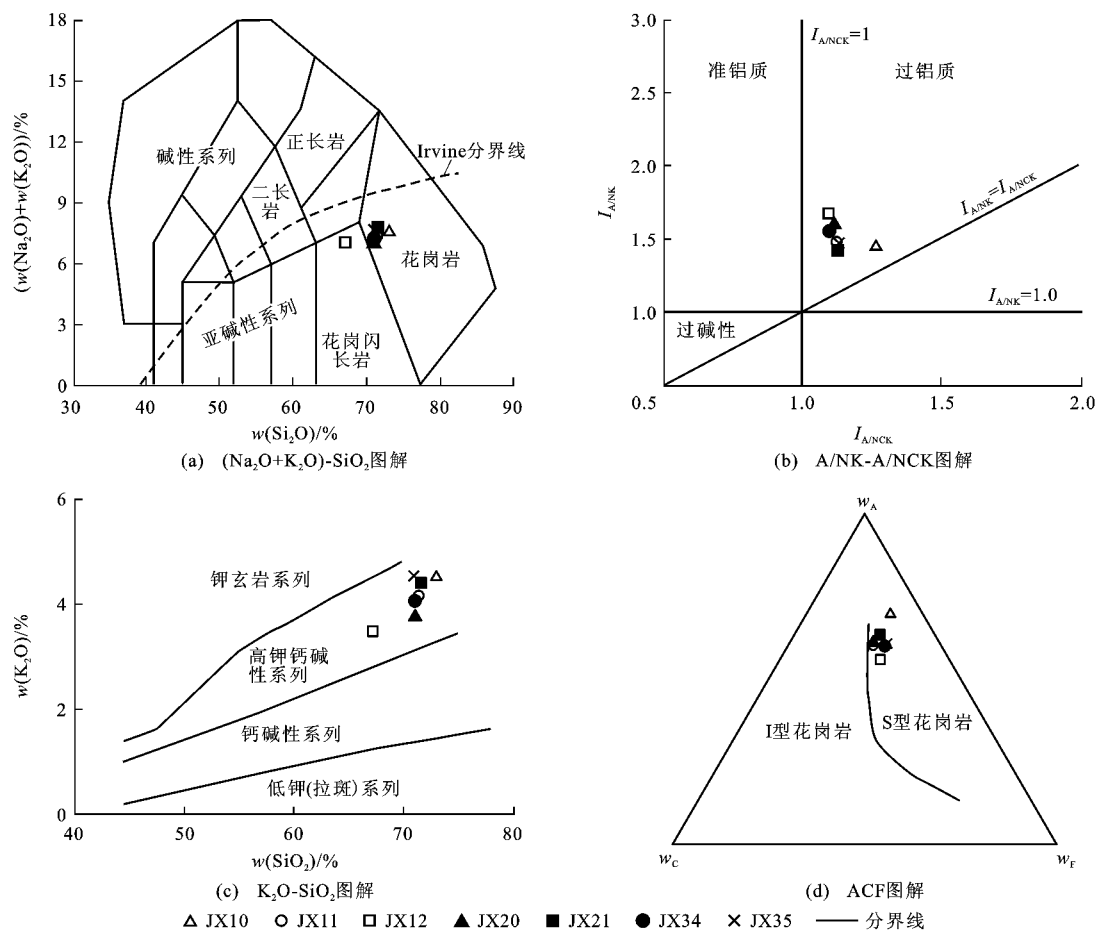
该岩体微量元素化学特征表明,隆木花岗岩是一种典型的低 Sr($w(\text{Sr}) < 150 \times 10^{-6}$)、低 Yb ($w(\text{Yb}) < 2.5 \times 10^{-6}$)的花岗岩,是一种地壳中等厚度(30~50 km)下熔融形成的低 Sr、低 Yb 花岗岩^[26]。微量元素标准化分布曲线显示,岩体中 Rb、Th+U、La+Ce、P、Nd、Zr+Hf+Sm 相对富集, Ba、Nb、Sr、Ti 相对亏损[图 7(b)]^[27],与南岭地区 S 型或壳源型花岗岩相似^[24,28]。由此可知,隆木花岗岩是一种

低 Ba、低 Sr 花岗岩,这类花岗岩是壳源物质低程度部分熔融的产物^[29]。

3 讨论

3.1 岩体物源区分析

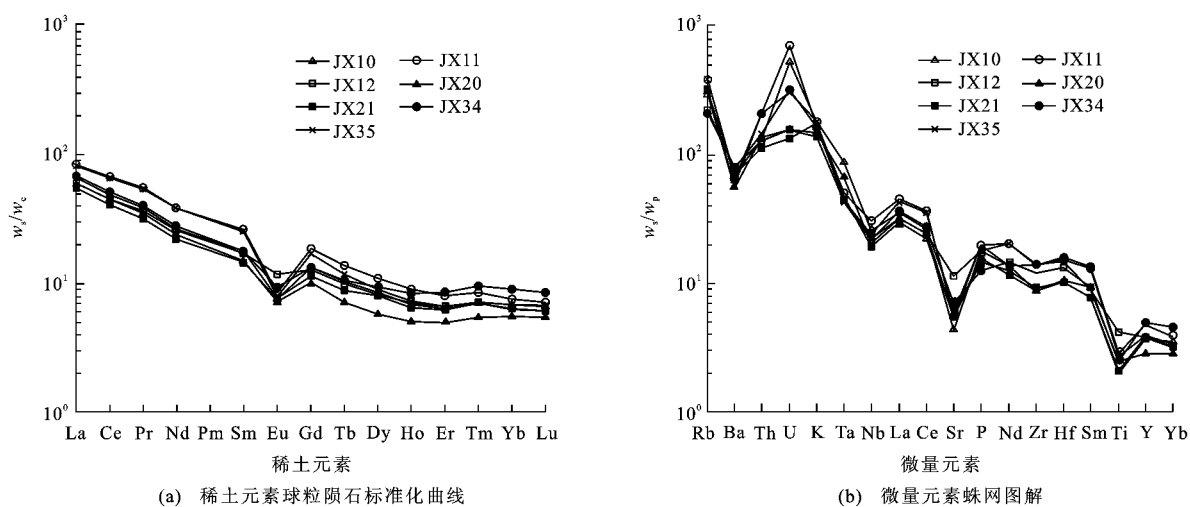
岩石地球化学特征表明,赣南隆木花岗岩是强过铝质 S 型花岗岩。Sylvester 认为强过铝质 S 型花岗岩是地壳物质部分熔融的产物^[30]。刘昌实等对华南地区不同物源成因的花岗岩地球化学特征进行总结对比,提出了华南不同物源成因花岗岩化学成分的平均值^[31],研究区隆木花岗岩体地球化学特征与壳源改造(重熔)系列十分吻合,也说明了研究区加里东期岩体来源于地壳的重熔。陈国能对花岗岩成因形成机制提出新的解释,认为花岗岩起因于上地壳岩石的原地熔融或重熔^[32]。王德滋等指出:



$I_{A/NK} = r(\text{Al}_2\text{O}_3) / (r(\text{Na}_2\text{O}) + r(\text{K}_2\text{O}))$, $\gamma(\cdot)$ 为化合物分子数; $I_{A/NCK} = r(\text{Al}_2\text{O}_3) / (r(\text{Na}_2\text{O}) + r(\text{CaO}) + r(\text{K}_2\text{O}))$; $w_A = (w(\text{Al}_2\text{O}_3) + w(\text{Fe}_2\text{O}_3)) - (w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O}))$; $w_C = w(\text{CaO}) - 3.3w(\text{P}_2\text{O}_5)$; $w_F = w(\text{MgO}) + w(\text{MnO}) + w(\text{FeO})$

图6 隆木岩体 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ 、A/NK-A/NCK、 $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ 及 ACF 图解

Fig. 6 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})\text{-SiO}_2$, A/NK-A/NCK, $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ and ACF Diagrams for Longmu Pluton



w_s 为样品含量; w_p 为原始地幔含量; w_c 为球粒陨石含量

图7 隆木岩体微量元素蛛网图解和稀土元素球粒陨石标准化曲线

Fig. 7 Trace Element Spider Diagram and Chondrite-normalized REE Patterns for Longmu Pluton

Rb 和 K 有相似的地球化学性质, 随着壳幔分异与陆壳演化, Rb 富集于成熟度高的地壳中; Sr 和 Ca

有相似的地球化学行为, 在成熟度低、演化不充分的地壳中富集, $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 能灵敏记录源区物质性

表 2 隆木岩体主量元素、稀土元素和微量元素分析结果

Tab. 2 Major, Rare Earth Element and Trace Compositions for Longmu Pluton

参数	JX10	JX11	JX12	JX20	JX21	JX34	JX35	参数	JX10	JX11	JX12	JX20	JX21	JX34	JX35
$w(\text{Na}_2\text{O})$	2.99	3.16	3.56	3.25	3.38	3.14	3.11	$w(\text{Tm})$	0.252	0.306	0.258	0.194	0.249	0.341	0.255
$w(\text{MgO})$	0.67	0.87	1.58	0.95	0.78	0.88	0.94	$w(\text{Yb})$	1.67	1.90	1.58	1.40	1.72	2.25	1.56
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	14.27	14.35	16.11	14.98	14.72	14.82	14.72	$w(\text{Lu})$	0.253	0.275	0.233	0.211	0.257	0.326	0.234
$w(\text{SiO}_2)$	73.01	71.42	67.19	71.11	71.61	71.10	71.02	$w(\text{Y})$	17.8	21.5	17.2	13.0	17.0	22.5	17.9
$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	0.19	0.19	0.17	0.14	0.15	0.12	0.17	w_{REE}	130	176	123	114	113	141	166
$w(\text{K}_2\text{O})$	4.52	4.15	3.47	3.74	4.40	4.06	4.53	$\delta(\text{Eu})$	0.49	0.38	0.79	0.57	0.60	0.60	0.38
$w(\text{CaO})$	0.80	1.69	2.84	2.21	1.50	2.17	1.67	$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	9.90	11.09	9.53	10.81	8.10	7.61	13.08
$w(\text{TiO}_2)$	0.27	0.37	0.54	0.32	0.26	0.31	0.35	$w(\text{Zr})$	98.3	155.0	159.0	103.0	96.5	135.0	152.0
$w(\text{MnO})$	0.04	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	$w(\text{Nb})$	18.2	21.8	15.9	14.5	13.9	15.3	17.0
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	0.30	0.36	0.58	0.37	0.28	0.37	0.28	$w(\text{Ba})$	486	407	564	386	489	546	446
$w(\text{FeO})$	1.43	2.05	2.60	1.85	1.63	1.90	2.00	$w(\text{Hf})$	3.28	4.95	4.64	3.17	3.16	4.09	4.77
$w(\text{H}_2\text{O}^+)$	1.28	1.07	1.01	0.77	1.00	0.78	0.90	$w(\text{Ta})$	3.63	2.05	1.76	2.72	1.93	1.80	1.80
$w(\text{CO}_2)$	0.06	0.08	0.10	0.08	0.06	0.08	0.08	$w(\text{Li})$	73.1	88.1	74.8	89.4	104.0	106.0	120.0
w_{major}	99.83	99.82	99.82	99.84	99.82	99.79	99.82	$w(\text{Be})$	6.16	5.75	4.24	5.73	4.28	6.35	5.14
I_{ASI}	1.29	1.14	1.11	1.13	1.14	1.11	1.15	$w(\text{Sc})$	7.07	7.45	10.70	8.42	7.06	8.37	7.17
$I_{\text{A/NK}}$	1.45	1.48	1.68	1.59	1.43	1.55	1.47	$w(\text{Cr})$	28.7	30.7	39.1	41.4	31.6	32.5	34.0
$w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$	1.51	1.31	0.97	1.15	1.30	1.29	1.46	$w(\text{Co})$	3.94	5.49	9.52	6.59	4.60	5.70	5.54
$I_{\text{A/MF}}$	3.47	2.58	1.91	2.72	3.17	2.75	2.64	$w(\text{Ni})$	6.03	7.16	17.6	11.2	6.72	8.28	7.92
I_{CA}	6.71	5.62	4.19	4.78	6.28	5.03	5.97	$w(\text{Cu})$	6.46	11.6	7.60	7.38	3.78	8.61	13.1
$w(\text{Fe})/(w(\text{Fe})+w(\text{Mg}))$	0.59	0.60	0.53	0.56	0.58	0.59	0.57	$w(\text{Zn})$	50.6	73.6	71.8	58.8	46.7	56.7	70.6
$w(\text{La})$	24.5	31.1	22.2	22.3	20.6	25.3	30.1	$w(\text{Ga})$	21.8	23.3	22.9	21.4	19.9	20.7	24.1
$w(\text{Ce})$	46.8	64.9	43.0	43.6	39.6	49.2	63.2	$w(\text{Rb})$	256	195	145	212	211	138	252
$w(\text{Pr})$	5.27	7.61	4.98	4.82	4.41	5.53	7.51	$w(\text{Cs})$	30.2	10.7	13.6	29.1	22.4	17.0	19.3
$w(\text{Nd})$	18.8	27.7	18.4	17.1	15.8	20.0	27.6	$w(\text{Pb})$	32.8	26.8	26.6	35.4	33.5	35.1	35.1
$w(\text{Sm})$	4.12	6.03	3.94	3.49	3.42	4.12	5.84	$w(\text{Th})$	11.4	18.1	10.9	11.7	9.72	12.4	18.2
$w(\text{Eu})$	0.663	0.746	1.03	0.634	0.679	0.820	0.694	$w(\text{U})$	11.1	15.1	3.34	3.31	2.85	6.82	6.48
$w(\text{Gd})$	4.06	5.70	3.91	3.15	3.50	4.11	5.12	$w(\text{Sr})$	90.7	124	242	115	117	148	14
$w(\text{Tb})$	0.603	0.807	0.579	0.419	0.521	0.612	0.689	$w(\text{V})$	22.9	32.4	48.7	32.2	25.0	31.8	29.5
$w(\text{Dy})$	3.29	4.19	3.15	2.24	3.07	3.58	3.47	$w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$	2.82	1.57	0.60	1.85	1.80	0.93	2.21
$w(\text{Ho})$	0.59	0.77	0.60	0.43	0.55	0.72	0.62	$w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$	0.19	0.30	0.43	0.30	0.24	0.27	0.26
$w(\text{Er})$	1.61	2.03	1.65	1.25	1.57	2.13	1.65								

注:主量元素含量单位为%;稀土元素和微量元素含量单位都为 10^{-6} ; w_{major} 为主量元素含量总和(%); w_{REE} 为稀土元素含量总和(10^{-6}); w_{LREE} 为轻稀土元素(LREE)含量总和(10^{-6}); w_{HREE} 为重稀土元素(HREE)含量总和(10^{-6}); $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 为La与Yb含量对球粒陨石标准化后的比值; $I_{\text{A/MF}}=r(\text{Al}_2\text{O}_3)/(r(\text{MgO})+r(\text{FeO}))$ 。

质^[33]。隆木岩体 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ 为 0.60~2.82, 平均值为 1.68, 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。

可以利用 Rb-Sr-Ba 系统比值确定花岗岩物源区的成分^[30]。从图 8(a)可以看出, 隆木岩体具有较低的 $w(\text{Rb})/w(\text{Sr})$ (0.60~2.82) 和 $w(\text{Rb})/w(\text{Ba})$ (0.26~0.56), 除 2 个样品投在富黏土区域以外, 其余样品都投在贫黏土区域, 没有样品点靠近玄武岩区域内^[32]。

Sylvester 提出根据 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 来判别花岗岩物源区物质成分, 当 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O}) <$

0.3 时, 表示花岗岩物源区物质为泥质岩; 而当 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O}) > 0.3$ 时, 表明花岗岩源区物质为砂质岩成分^[30]。通过对隆木岩体 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 进行计算, 10 个样品中只有 1 个样品的 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 小于 0.3, 为 0.27, 其余的 $w(\text{CaO})/w(\text{Na}_2\text{O})$ (0.44~0.80) 都大于 0.3, 说明研究区早古生代花岗岩体物源区物质为砂质岩成分。从图 8(b)可以看出, 隆木花岗岩 7 个样品都投影在变质砂岩部分熔融区域内, 说明隆木花岗岩体的物质来源为来自地壳部位变质砂岩的部分熔融^[34]。通过上述方法对隆木花岗岩源区的判别可

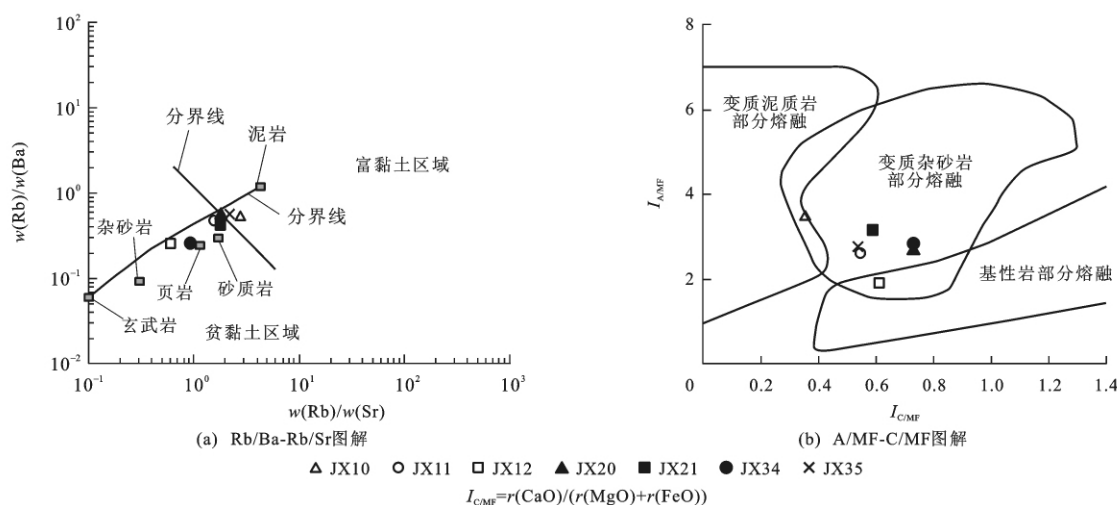


图8 隆木岩体 Rb/Sr-Rb/Ba 图解和 C/MF-A/MF 图解

Fig. 8 Rb/Sr-Rb/Ba and C/MF-A/MF Diagrams for Longmu Pluton

知,隆木花岗岩物质来源为变质砂岩的部分熔融,属于成熟上地壳的砂质岩物源区。

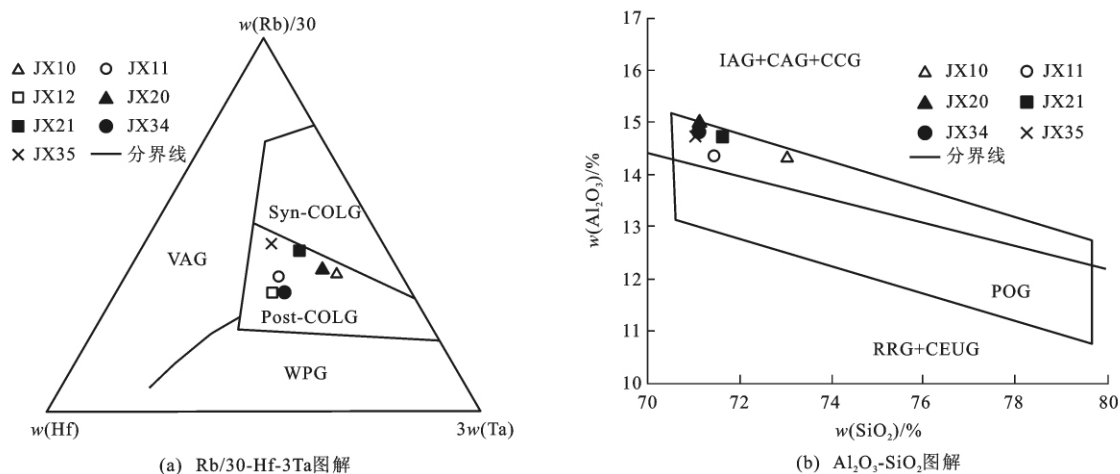
3.2 岩体形成构造环境判别

研究表明,强过铝质花岗岩形成于陆-陆碰撞或板块俯冲的早期挤压环境及后碰撞伸展减薄构造背景下^[35-36]。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中,样品都投影于高钾钙碱性系列,高钾钙碱性系列岩浆岩是后碰撞岩浆活动的重要特征之一^[37]。从图 9(a)可以看出,横市地区隆木岩体样品都投影于后碰撞花岗岩区域内^[38]。从图 9(b)可以看出,隆木岩体 6 个样品都位于后造山花岗岩区域内^[39]。从地质特征来看,岩体花岗岩以块状构造为主,不具有岩石矿物定向特征,岩体与围岩缺乏主动就位的构造形迹,说明岩体可

能形成于相对张性的构造环境之中。陈旭等对赣南崇义至永新地区奥陶纪笔石进行研究,认为发生于赣南奥陶纪和志留纪期间广西运动的时间正是由陇溪组的深水笔石相转为韩江组浅水碎屑岩相的时间,赣南地区广西运动发生的时间为 470~460 Ma,说明隆木花岗岩体形成于碰撞造山向非造山转化过渡的后碰撞环境^[40]。这些特征表明,赣南横市地区隆木花岗岩体形成于后造山环境,是在碰撞之后的拉张减压条件下形成的。

3.3 区域构造意义及成岩模式

通过对前人在华南内陆加里东期花岗岩的研究^[3-7],结合本文早古生代晚期花岗岩体锆石定年数据表明,华南陆内早古生代晚期花岗岩呈面状分布,



Syn-COLG—同碰撞花岗岩;WPG—板内花岗岩;Post-COLG—后碰撞花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;IAG—岛弧花岗岩类;CAG—大陆弧花岗岩类;CCG—大陆碰撞花岗岩类;POG—后造山花岗岩类;RRG—与裂谷有关的花岗岩类;CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

图9 隆木岩体 Rb/30-Hf-3Ta 图解和 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 图解Fig. 9 Rb/30-Hf-3Ta and $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Diagrams for Longmu Pluton

不具线性构造格局。华南陆内加里东期岩体地球化学研究表明,在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^[41]。在华南内陆没有发现与加里东期花岗岩同期的火山岩;以往在闽北地区发现的早古生代蛇绿岩和火山岩(全岩 Rb-Sr 年龄为 $(560.8 \pm 14) \text{ Ma}$)^[8],通过现今精确锆石 U-Pb 定年,获取了年龄分别为 $(795 \pm 7) \text{ Ma}$ 和 $(818 \pm 9) \text{ Ma}$ 的新元古代年龄信息^[42-43];沿政和—大浦断裂带、绍兴—江山—萍乡断裂带等原认为属蛇绿岩套内的中基性与超基性岩都给出了新元古代年龄信息,而没有给出早古生代的年龄信息,如桂北鹰扬关群基性火山岩锆石 TIMS U-Pb 年龄为 $(819 \pm 11) \text{ Ma}$ ^[44]。因此,基于早古生代蛇绿岩与火山岩所提出的华南加里东期的弧—陆碰撞模式^[9]并不能解释华南加里东运动构造属性。

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,导致华南洋消失,形成统一华南地块^[42];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^[45]。这一裂解事件使原先的华夏地块被肢解成许多次级块体,如武夷、赣中南、云开等块体。通过对华南地区早古生代地层古生物学、地球化学与沉积古地理的研究,裂解的块体之间是浅海—半深海的环境。沈渭洲等对赣南井冈山地区早古生代地层沉积岩进行地球化学研究,认为井冈山地区寒武纪—奥陶纪时期的沉积盆地为新元古代短暂统一的华南地块形成后因 Rondonia 超大陆裂解而形成的,属于浅海—半深海环境,残余块体之间没有洋盆分隔^[46],可能具有统一的陆壳基底^[11]。华南加里东运动的主要根源是不同地块碰撞拼贴增生造成的,是一种陆内造山过程。华南地区加里东花岗岩是由华夏陆块与扬子地块以及华夏古陆内部次级块体之间的碰撞拼贴作用形成的。

成岩物质来自成熟上地壳变质砂岩的部分熔融,没有幔源物质的参与,形成于伸展减压的后碰撞环境。华南加里东运动是在 Rondonia 超大陆裂解与冈瓦纳超级大陆形成的构造背景下形成的。随着 Rondonia 超大陆裂解(900 Ma),中国华夏陆块与扬子陆块发生不同程度的裂解,华夏陆块裂解成云开、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,逐步形成统一的华南大陆。在中奥陶世,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^[42]。块体的碰撞拼贴使早古生代地层褶皱隆升,地壳加厚。湘东板杉铺地区发育的埃达克质花岗闪长岩揭示了华南早古生代时期经历了地壳增生事件^[10]。加厚地壳减薄,进入伸展应力体制。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,上地壳砂质岩物源区逐渐软化并部分熔融,形成铝过饱和花岗岩岩浆,华夏古陆残块的汇聚为岩浆层的形成与向上移动至地壳浅部提供了能量^[32,47]。铝过饱和花岗岩岩浆在后造山伸展—减压背景下上升就位,形成隆木花岗岩体(图 10)。

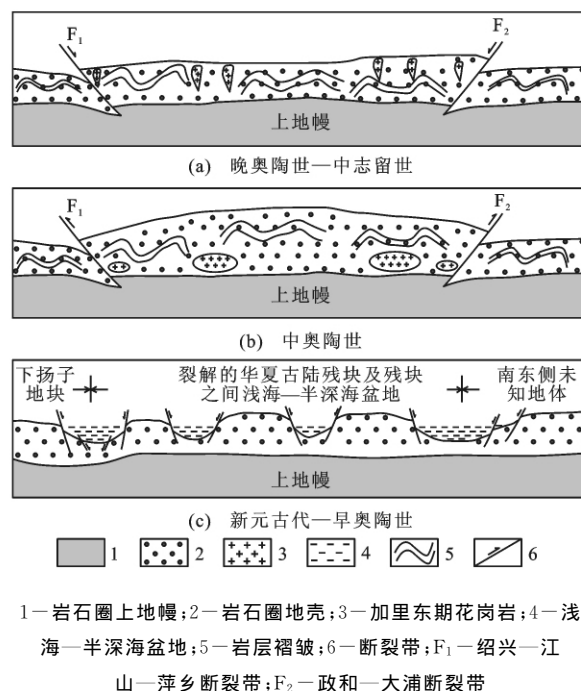


图 10 隆木花岗岩演化过程

Fig. 10 Evolution Process of Longmu Pluton

4 结 语

(1)江西赣州横市地区加里东期隆木花岗岩体以黑云母花岗岩为主,似斑状黑云母二长花岗岩次之。岩体 SiO_2 含量较高,铝饱和指数均大于 1,为 1.11~1.29, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.97~1.51,平均为 1.28,属强铝过饱和岩石。 $\delta(\text{Eu})$ 小于 1.0,为 0.38~0.67,显示 Eu 的负异常,岩体 Rb、Th+U、K、La+Ce、P、Nd、Zr+Hf+Sm 相对富集, Ba、Nb、Sr、Ti 相对亏损。岩石地球化学表明,横市地区加里东期花岗岩体属铝质高钾钙碱性 S 型花岗岩,其物质来源为成熟上地壳变质砂岩的部分熔融。

(2)隆木岩体黑云母花岗岩与似斑状黑云母二

长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (457 ± 6) Ma 和 (450 ± 9) Ma, 反映隆木岩体是在晚奥陶世脉动式侵位形成的, 成岩年龄为 $(457 \pm 6) \sim (450 \pm 9)$ Ma, 这个时间与赣南崇义至永新地区奥陶纪笔石研究的结果相对应: 陇溪组的深水笔石相转为韩江组浅水碎屑岩相的时间 $(470 \sim 460 \text{ Ma})$ 。这个时间也是华南加里东(广西运动)发生的时期。

(3) 隆木岩体以块状构造为特征, 矿物不具有明显定向性, 岩体与围岩缺乏主动就位的构造形迹, 地质特征与地球化学特征表明, 隆木花岗岩体形成于后造山环境, 是在碰撞之后的拉张减压条件下形成的。岩体形成于中奥陶世加里东构造运动(广西运动)后期的伸展环境, 是华夏古陆与扬子古陆在新元古代碰撞后发生裂解, 在中奥陶世再次发生陆内碰撞使得地壳加厚部分重融, 造山后期(晚奥陶世)地壳伸展减薄, 由上地壳砂质源区物质部分熔融形成 S 型花岗质岩浆, 在伸展构造体制下上升至地壳浅部形成隆木花岗岩体。

中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室胡召初老师在锆石 U-Pb 同位素测试中提供了帮助, 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室给予了大力支持, 程万强博士研究生以及王军、李学刚、杨振宁硕士研究生在野外调查与论文修改过程中给予了帮助, 在此一并谢忱。

参考文献:

References:

- [1] 徐克勤, 刘英俊, 俞受璠, 等. 江西南部加里东期花岗岩的发现[J]. 地质论评, 1960(3): 112-114.
XU Ke-qin, LIU Ying-jun, YU Shou-jun, et al. Discovery of Caledonian Granitoids in Southern Jiangxi Province[J]. Geological Review, 1960(3): 112-114.
- [2] 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.
SUN Tao. A New Map Showing the Distribution of Granites in South China and Its Explanatory Notes[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 332-335.
- [3] 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.
ZHANG Fei-fei, WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology of Late Early Paleozoic Granites in Eastern Hunan and Western Jiangxi Provinces, South China[J]. Geochimica, 2010, 39(5): 414-426.
- [4] 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.
- [5] FU Jian-ming, MA Chang-qian, XIE Cai-fu, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of the Jiuyishan Composite Granite in Hunan and Its Geological Significance[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(4): 370-378.
- [6] 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.
ZHANG Fang-rong, SHU Liang-shu, WANG De-zi, et al. Discussions on the Tectonic Setting of Caledonian Granitoids in the Eastern Segment of South China[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 248-260.
- [7] WANG Y J, FAN W M, ZHAO G C, 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.
- [8] WAN Y S, LIU D Y, WILDE S 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.
- [9] 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.
YANG Shu-feng, CHEN Han-lin, WU Guang-hai, et al. Discovery of Early Paleozoic Island-arc Volcanic Rock in Northern Part of Fujian Province and the Significance for Tectonic Study[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(2): 105-116.
- [10] 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.
SUN Ming-zhi, XU Ke-qin. Study on the Caledonian Granitoids and Their Geotectonic Environments of South China[J]. Journal of Nanjing University: Earth Sciences Edition, 1990, 2(4): 10-22.
- [11] 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.
XU De-ru, CHEN Guang-hao, XIA Bin, et al. The Caledonian Adakite-like Granodiorites in Banshanpu Area, Eastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and Geological Significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4): 507-521.
- [12] 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.
- SHEN Wei-zhou, ZHANG Fang-rong, SHU Liang-shu, et al. Formation Age, Geochemical Characteristics of the Ninggang Granite Body in Jiangxi Province and Its Tectonic Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(10): 2244-2254.
- [12] 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.
- ZHOU Xin-min. My Thinking about Granite Geneses of South China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(4): 556-565.
- [13] 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.
- WANG De-zi. The Study of Granitic Rocks in South China: Looking Back and Forward[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 305-314.
- [14] HU Z C, GAO S, LIU Y S, et al. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23(8): 1093-1101.
- [15] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [16] WIEDENBECK M, ALLE P, CORFU F, et al. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 1995, 19(1): 1-23.
- [17] LUDWIG K R. User's Manual for ISOPLOT 3.00: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [18] LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [19] BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, et al. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602-622.
- [20] MIDDLEMOST E A K. Naming Materials in the Magmas/Igneous Rock System[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [21] 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.
- CHEN Xiao-ming, WANG Ru-cheng, LIU Chang-shi, et al. Isotopic Dating and Genesis for Fogang Biotite Granites of Conghua Area, Guangdong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2002, 8(3): 293-307.
- [22] PECCERILLO A, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene Calc-alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58(1): 63-81.
- [23] 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 花岗岩类区 1:50 000 区域地质填图方法指南[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- GAO Bing-zhang, HONG Da-wei, ZHENG Ji-jian, et al. A Guide to the Method of the 1:50 000 Regional Geological Survey in Igneous Granide Areas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991.
- [24] 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, 2003, 33(12): 1209-1218.
- SUN Tao, ZHOU Xin-min, CHEN Pei-rong, et al. Strongly Peraluminous Granites of Mesozoic in Eastern Nanling Region, Southern China and its Implications for Tectonics[J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(12): 1209-1218.
- [25] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [26] 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.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LI Cheng-dong, et al. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [27] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[C]// SAUNDER A D, NORRY M J. Magmatism in the Ocean Basins. Oxford: Blackwell, 1989: 313-345.
- [28] 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.
- ZHOU Xin-min. Genesis of Late Mesozoic Granites in Nanling Area and Lithosphere Dynamic Evolution[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [29] HARRIS N B W, INGER S. Trace Element Modelling of Pelite-derived Granites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110(1): 46-56.
- [30] SYLVESTER P J. Post-collisional Strongly Peraluminous Granites[J]. *Lithos*, 1998, 45(1/2): 29-44.

- [31] 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.
LIU Chang-shi, ZHU Jin-chu, SHEN Wei-zhou, et al. Evolution of Continental Crust and Material Source (Genesis) of Granitoids in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1990, 14(2):125-138.
- [32] 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.
CHEN Guo-neng. Pondering over the Genesis of Rocks and the Evolution of Lithosphere[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(1):1-8.
- [33] 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.
WANG De-zi, LIU Chang-shi, SHEN Wei-zhou, et al. The Contrast Between Tonglu I-type and Xiangshan S-type Clastoporphyratic Lava[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(1):44-54.
- [34] ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, et al. High-potassium, Calc-alkaline I-type Plutonism in the European Variscides; Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50(1/2):51-73.
- [35] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4):956-983.
- [36] PEARCE J A. Sources and Settings of Granitic Rocks[J]. Episodes, 1996, 19(4):120-125.
- [37] LOEGEPOS J P. Preface; Some Words on the Post-collisional Magmatism[J]. Lithos, 1998, 45(1):15-17.
- [38] HARRIS N B W, PEARCE J A, TINDLE A G. Geochemical Characteristics of Collision-zone Magmatism[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19(1):67-81.
- [39] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic Discrimination of Granitoids[J]. GSA Bulletin, 1989, 101(5):635-643.
- [40] 陈旭,张元东,樊隽轩,等. 赣南奥陶纪笔石地层序列与广西运动[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 40(12):1621-1631.
CHEN Xu, ZHANG Yuan-dong, FAN Jun-xuan, et al. Ordovician Graptolite-bearing Strata in Southern Jiangxi with a Special Reference to the Kwangsi Orogeny[J]. Science in China: Earth Science, 2010, 40(12):1621-1631.
- [41] 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.
LI Cong, CHEN Shi-yue, ZHANG Peng-fei, et al. Research of South China Caledonian Intracontinental Tectonic Attribute[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010, 34(5):18-24.
- [42] 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.
SHU Liang-shu, YU Jin-hai, JIA Dong, et al. Early Paleozoic Orogenic Belt in the Eastern Segment of South China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10):1581-1593.
- [43] LI W X, LI X H, LI Z X. Neoproterozoic Bimodal Magmatism in the Cathaysia Block of South China and Its Tectonic Significance[J]. Precambrian Research, 2005, 136(1):51-66.
- [44] 周汉文,李献华,王汉荣,等. 广西鹰扬关群基性火山的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2002, 48(增):22-25.
ZHOU Han-wen, LI Xian-hua, WANG Han-rong, et al. U-Pb Zircon Geochronology of Basic Volcanic Rocks of the Yingyangguan Group in Hezhou, Guangxi, and Its Tectonic Implications[J]. Geological Review, 2002, 48(S):22-25.
- [45] LI Z X, LI X H, ZHOU H W, et al. 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.
- [46] 沈渭洲,凌洪飞,舒良树,等. 江西井冈山地区寒武—奥陶纪地层的 Sm-Nd 同位素组成及其构造意义[J]. 科学通报, 2009, 54(11):1562-1569.
SHEN Wei-zhou, LING Hong-fei, SHU Liang-shu, et al. Sm-Nd Isotope Compositions of Cambrian-Ordovician Strata at the Jianggangshan Area in Jiangxi Province: Tectonic Implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(11):1562-1569.
- [47] 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.
CHEN Guo-neng, ZHANG Ke, SHAO Rong-song, et al. The In-situ-melting Model of Granite Origin and Its Geological Evidence[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2001, 40(3):95-99.