

· 专题研究 ·

桂东南永安岩体锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素特征及其地质意义

袁永盛, 刘 胜, 南争路, 詹华思

(中国人民武装警察部队 黄金第九支队, 海南 海口 571127)

摘 要: 永安岩体位于钦杭结合带南部, 属桂东南十万大山-大容山复式岩体的一部分, 其岩石类型为斑状堇青黑云花岗闪长岩。对永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩进行了 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年, 获得其年龄为 252.8 ± 3.3 Ma, 为晚二叠世花岗岩。对永安岩体花岗岩进行的全岩地球化学分析结果表明, 岩石富Al、高K, 铝饱和指数 A/CNK 均大于 1.1, 标准矿物分子刚玉均大于 1%; 岩石富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 轻重稀土元素分馏明显, 稀土元素的球粒陨石标准化配分曲线为轻稀土元素富集的右倾型, 具弱负铕异常; 岩石富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、K、Sr), 亏损高场强元素 (Nb、P、Ti、Ta) 和 Ba、Sr。花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -14 \sim -8$, $t_{\text{DM2}} = 2.3 \sim 1.8$ Ga。通过本文工作, 结合前人关于永安岩体矿物学、全岩地球化学、Hf 同位素和锆石微量元素的分析资料, 认为永安岩体岩石为强过铝质 S 型壳源花岗岩, 地幔组分没有提供成岩物质, 但地幔底侵作用为成岩提供了热能, 花岗岩形成于后碰撞阶段的拉张环境中。

关键词: 永安岩体; 锆石 U-Pb 测年; 地球化学; Hf 同位素; 广西

中图分类号: P588.12⁺2; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)06-0869-15

U-Pb age and Hf isotopic characteristics of zircons from the Yongan granitoid pluton in southeastern Guangxi and their geological implications

YUAN Yong-sheng, LIU Sheng, NAN Zheng-lu and ZHAN Hua-si
(No. 9 Gold Geological Party of CAPF, Haikou, 571127, China)

Abstract: The Yongan granitoid pluton, which is located in the southern Qinhang suture zone, is a part of the Darongshan-Shiwadashan composite pluton in southeastern Guangxi. The pluton is composed of porphyritic cordierite-biotite granodiorite. The results of zircon U-Pb dating indicate that the age of the Yongan pluton is 252.8 ± 3.3 Ma, suggesting Late Permian granites. The geochemical characteristics of the granites of Yongan pluton show that the rocks are rich in Al, K. A/CNK ratios are higher than 1.1. The standard mineral corundum molecules are more than 1%. In addition, the rocks are enriched in LREE, and depleted in HREE, and exhibit obvious fractionation between LREE and HREE. The chondrite-normalized REE patterns show right declining, exhibiting enrichment of LREE and slightly negative Eu anomalies. The granites are enriched in large ion lithophile elements (Rb, Ba, K, Sr) and depleted in high-field strength elements (Nb, P, Ti, Ta) and Ba, Sr. Zircon Hf isotopic compositions of the porphyritic cordierite-biotite granodiorite are mainly characterized by $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of $-14 \sim -8$, and the two-stage model ages of 2.3 to 1.8 Ga. In combination with previous data and an analysis of mineralogy and geochemistry as well as the zircon Hf isotopes and trace elements, it could be concluded that the Yongan pluton

收稿日期: 2017-07-14; 接受日期: 2018-09-10

基金项目: 中国地质调查局区域地质矿产调查项目(12120113072000)

作者简介: 袁永盛(1989-), 男, 工程师, 长期从事地质和矿床工作, E-mail: 879933153@qq.com。

is strongly peraluminous S-type granite derived from the crustal source. Though the mantle failed to provide the rock material, the heat for the formation of magma was probably provided by the mantle underplating. The granite was formed in an extensional environment of the post-collision stage.

Key words: Yongan pluton; zircon U-Pb age; geochemistry; zircon Hf isotope; Guangxi

Fund support: Project of China Geological Survey(12120113072000)

永安岩体位于广西壮族自治区东南部,是我国著名的十万大山-大容山复式岩体的重要组成部分,处于我国19个成矿区带之一的钦杭成矿带南段,在大地构造上位于扬子板块与华夏板块的拼贴结合部位。从中元古代到印支期,扬子陆块和华夏板块经历了多期次的碰撞拼合(曾长育等,2015)。在印支期随着钦防残余海盆的关闭,华南洋最终消失,扬子板块与华夏板块完成了最终的拼贴结合(张克信等,2015)。在此期间,本区构造-岩浆活动频繁,形成了一系列的花岗岩体和多金属矿床(毛景文等,2011)。目前,对于大容山-十万大山岩体,前人做了系统性研究(方清浩等,1987;黄琳等,1988;王庆权等,1990;汪绍年等,1995;邓希光等,2004;覃小峰,2013;焦淑娟等,2013),但对花岗岩岩浆的形成时代和构造背景依然存在争议,同时相对于十万大山-大容山复式岩体,永安花岗闪长岩岩体出露

面积较小,加之研究技术的局限性,没有系统对其进行研究。本文通过对永安岩体的年代学、岩石学、地球化学特征的系统研究,探讨岩体的形成时代、成因及大地构造意义,以丰富对桂东南印支期构造-岩浆活动的认识。

1 区域地质概况及岩石学特征

永安岩体属于十万大山-大容山花岗岩带的重要组成部分。十万大山-大容山花岗岩带长约400 km,宽约20~75 km,沿NE-SW向展布,其出露总面积大于10 000 km²,由自东向西分布的六万大山、大容山、旧州和台马4个大型岩基和40多个小岩体或岩基组成,岩体之间一般被NE向的深大断裂所分割,岩体形态也受到断裂的控制而呈NE向展布(图1)。区域出露地层以寒武系、志留系、泥盆系、白垩

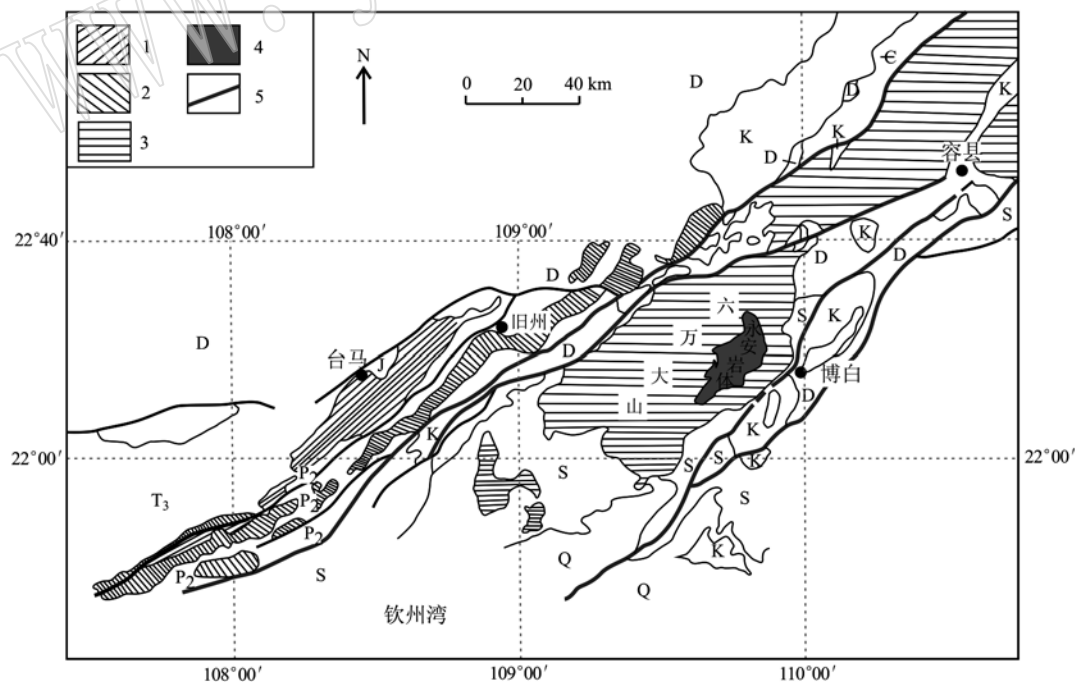


图1 桂东南博白-钦州地区区域地质简图[据祁昌实等(2007)修改]

Fig. 1 Sketch geological map of the Bobai-Qinzhou area in southeastern Guangxi (after Qi Changshi *et al.*, 2007)
Q—第四系; K—白垩系; J—侏罗系; T₃—上三叠统; P₂—上二叠统; D—泥盆系; S—志留系; ε—寒武系; 1—大容山岩体;
2—旧州岩体; 3—台马岩体; 4—永安岩体; 5—断层
Q—Quaternary; K—Cretaceous; J—Jurassic; T₃—Upper Triassic; P₂—Upper Permian; D—Devonian; S—Silurian; ε—Cambrian;
1—Darongshan intrusive; 2—Jiuzhou intrusive; 3—Taima intrusive; 4—Yongan intrusive; 5—fault

系、古近系和第四系为主,尤其以志留系、二叠系和白垩系最为发育,岩性主要为泥质岩、砂质岩,少量出露碳酸盐岩。十万大山-大容山花岗岩侵入到早古生代沉积盆地中,其中古生代地层靠近岩体附近受到岩浆侵入作用的影响,发生较轻程度的接触热变质。

永安岩体位于十万大山-大容山花岗岩带的西南端,六万大山复式岩体中部,整体呈北东向展布,出露面积约 307 km²,约占十万大山-大容山花岗岩带侵入岩面积的 4%,被三叠纪堇青黑云二长花岗岩包围侵入。

永安岩体的岩性为斑状堇青黑云花岗闪长岩,风化面一般为黄褐色、红褐色或砖红色,新鲜面一般为灰白色、青灰色、黑灰色(图 2a),似斑状结构,块状构造,基质具细中-中细粒花岗结构。岩石中矿物颗粒大小不等,可分为斑晶和基质两种,斑晶大小为 4 mm × 8 mm ~ 20 mm × 30 mm,含量为 3% ~ 7%,成分以斜长石为主(图 2b),少量为堇青石;基质粒径 0.2 ~ 3 mm,矿物成分主要为斜长石、钾长石、石英、

黑云母、堇青石(图 2c、2d)。岩石中偶夹砂岩捕虏体、脉石英包体等。岩石抗风化能力不同,发生差异风化,坚硬地段节理较发育,沿节理析出铁质。其与早三叠世中粗粒巨斑状黑云堇青二长花岗岩为侵入接触关系,野外可见直接侵入界线。

2 样品分析方法

本次研究在永安岩体中共采集了 12 件岩石样品,其中 1 件样品进行同位素测年,采样位置为 109°46'12"N、22°19'34"E(PM04-RZ1), 11 件花岗闪长岩样品用于岩石化学测试,分析项目包括主量元素、微量元素和稀土元素。样品岩性为斑状堇青黑云花岗闪长岩,青灰色,似斑状结构,块状构造,主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母、堇青石等矿物组成。

样品 PM04-RZ1 锆石的 U-Pb 同位素定年是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用仪器 Agilent7500a LA-ICP-MS 完成的,

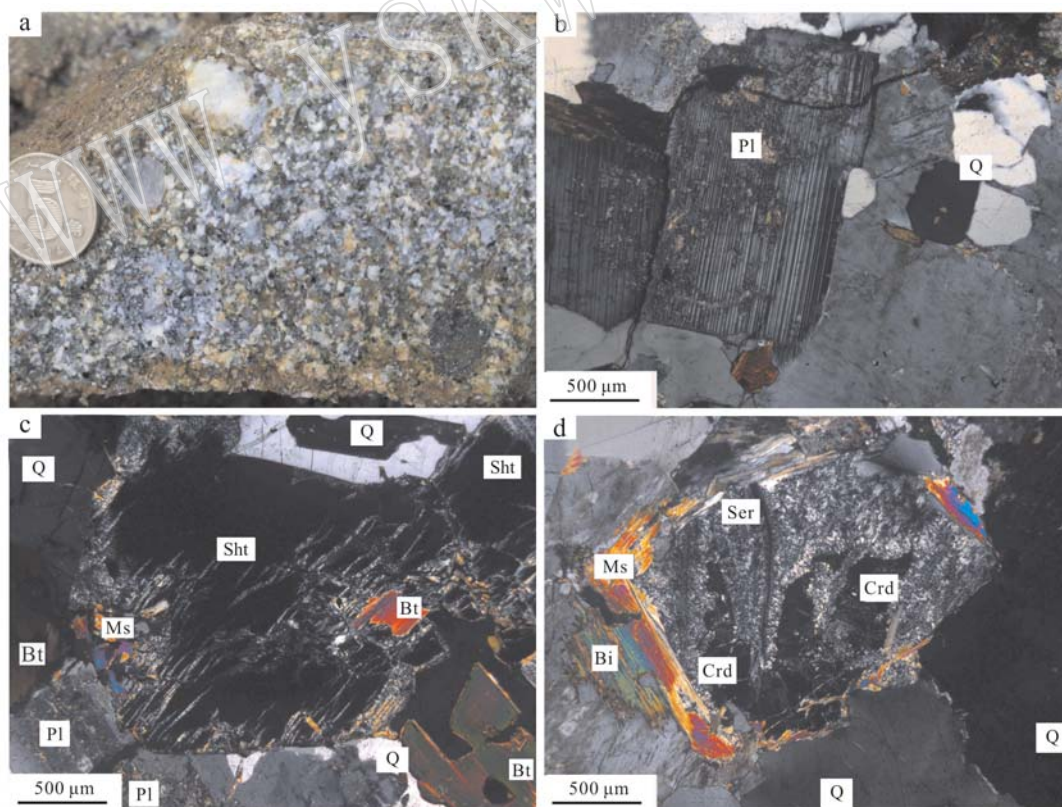


图 2 永安岩体的岩相学特征

Fig. 2 Petrography of the Yong'an Pluton

Q—石英; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Crd—堇青石; Sht—胶蛇纹石; Ms—白云母; Ser—绢云母

Q—Quartz; Pl—plagioclase; Bt—Biotite; Crd—Cordierite; Sht—Serpophite; Ms—Muscovite; Ser—Sericite

采用 GeoLas 2005 激光剥蚀系统,激光剥蚀过程中,进行测试灵敏度调节时采用氦气作为载气、补偿气为氩气的方法进行,氦气和氩气先在一个 T 型接头中进行混合,才进入 ICP-MS。为了达到提高仪器灵敏度、降低检出限、提高分析度的目的,在等离子体中心气流中掺入少量氮气。仪器在分析数据时为得到一个完整的时间分辨数据,需分析 20 s 左右的空白信号和 50 s 左右的样品信号。采用数据处理软件 ICPMSDataCal8.3 完成对空白信号及样品信号的选择、仪器灵敏度校正及年龄等的处理(Liu *et al.*, 2008, 2009, 2010)。采用标样 91500 做校正,每间隔 6 个点测试两次外标,每个样品共分析 18 个点,采用软件 ICPMSDataCal8.9 完成年龄谐和图的制作和年龄加权平均计算。

花岗闪长岩样品的碎样和全岩主量、微量元素分析测试均在河北省区域地质矿产调查研究所完成。氧化物测试所采用的仪器为 X 荧光光谱仪 3080E,测试结果的相对标准偏差通常小于 2% ~ 8%。岩石微量元素 V、Cu、Pb、Co、Ni、Hf、Th、U、Ta、Sc、Cs 和稀土元素 La、Ce、Eu、Pr、Nd、Ho、Sm、Tm、Gd、Tb、Yb、Lu、Dy、Y、Er 的测试仪器为等离子质谱(ICP-MS) Excell,微量元素 Rb、Sr、Ga、Ba、Nb、Zn、Zr 的测试仪器为 X 荧光光谱仪 2100,分析精度大多数元素可达到 10^{-8} ,少量含量较高元素为 10^{-6} (Zr、Ba) 和 10^{-7} (Hf、Nb)。测试结果的相对标准偏差小于 10%。

锆石原位 Hf 同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,测试分析仪器为 Geolas2005 准分子激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)和 NeptunePLUS 多接收等离子质谱,剥蚀过程中采用氦气作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 44 μm ,测定时参考物质采用国际锆石标样 91500,分析点位于锆石 U-Pb 测年分析点附近。测试过程中每 8 h 做一次电子噪声测量和法拉第杯增益校正。分析过程中锆石标准 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\,308 \pm 30(2\sigma, n=4)$,在文献报道的误差范围内。数据处理采用 ICPMSDataCal8.9。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄分析结果

斑状堇青黑云花岗闪长岩样品 PM04-RZ1 中的锆石呈浅黄褐色,具玻璃光泽,从锆石阴极发光图(图3)中可以看出,锆石晶体呈短至长柱状,晶型自形程度较好,部分锆石含不规则状、次圆状的内核,内核大部分无韵律环带,少数仍保留了清晰的韵律环带,可能为残留锆石。锆石粒径长 60 ~ 180 μm ,宽约 30 ~ 70 μm ,长宽比 1:1 ~ 4:1,具有较好的晶型,结构较为简单,少数矿物晶面具蚀痕、麻点、凹凸不平的特征。总体上,锆石晶型较好,结构简单,普遍可见清晰的震荡生长环带环带,韵律带清晰,具有岩浆锆石的特征。

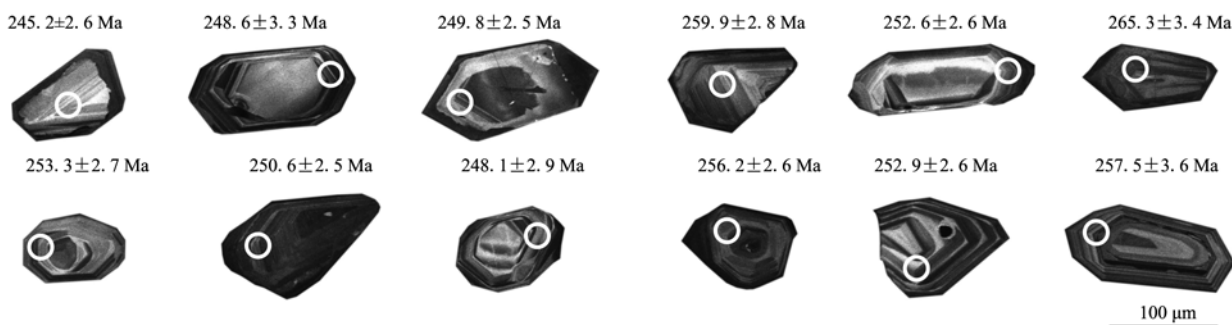


图3 永安岩体锆石阴极发光图像

Fig.3 Zircon CL images of Yong'an pluton

样品的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测试分析结果(表1)显示,在 18 个分析点中,有 1 个点(测点 3)谐和度较低,可能是由于锆石 Pb 丢失引起;有 5 个点(测点 4、6、10、14、18)可能测得的是继承锆石的形成时代,其年龄集中于早古生代(502 ~ 427 Ma),反映了

源岩物源区可能有早期岩浆-构造运动或原岩经历了早期构造运动。其余 12 个锆石分析结果具有一致的谐和年龄(图4),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄的平均值为 $252.8 \pm 3.3\text{ Ma}$ (MSWD = 3.5, $n=12$),为永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩的形成年龄。

表 1 永安岩体花岗岩长岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年结果
Table 1 LA-ICPMS zircon U-Pb data of Yongan granitoid pluton

样品点	$w_B/10^{-6}$				Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
PM04													
RZ1-01	54.5	157.2	1 051.4	0.145 5	0.050 8 ± 0.002 3	0.270 5 ± 0.012 2	0.038 8 ± 0.000 4	0.012 9 ± 0.000 6	231.6 ± 105.5	243.1 ± 9.8	245.2 ± 2.6	258.7 ± 12.8	
RZ1-02	41.5	149.2	710.0	0.191 2	0.050 1 ± 0.002 6	0.268 1 ± 0.013 8	0.039 3 ± 0.000 5	0.012 6 ± 0.000 7	198.2 ± 122.2	241.2 ± 11	248.6 ± 3.3	252.1 ± 13.6	
RZ1-03	60.0	131	1 434	0.091 5	0.058 1 ± 0.002 1	0.301 3 ± 0.010 7	0.037 6 ± 0.000 4	0.012 0 ± 0.000 7	600.0 ± 79.6	267.4 ± 8.4	237.9 ± 2.2	240.6 ± 14.5	
RZ1-04	424.7	1 044.3	2 272.9	0.450 5	0.058 3 ± 0.001 4	0.652 3 ± 0.015 6	0.080 9 ± 0.000 9	0.023 6 ± 0.000 5	539.0 ± 51.8	510.0 ± 9.6	502.0 ± 5.1	471.0 ± 10.0	
RZ1-05	65.3	169.6	1 426.6	0.113 2	0.048 3 ± 0.001 9	0.263 3 ± 0.010 4	0.039 5 ± 0.000 4	0.012 4 ± 0.000 7	122.3 ± 97.2	237.3 ± 8.4	249.8 ± 2.5	249.3 ± 13.0	
RZ1-06	107.3	312.2	609.1	0.505 0	0.056 3 ± 0.002 5	0.531 5 ± 0.023 2	0.069 0 ± 0.000 9	0.021 5 ± 0.000 7	465.0 ± 98.0	433.0 ± 15.4	430.0 ± 5.2	429.0 ± 13.7	
RZ1-07	69.0	251.1	1 233.0	0.199 2	0.051 4 ± 0.002 2	0.291 9 ± 0.012 5	0.041 1 ± 0.000 4	0.011 1 ± 0.000 4	261.2 ± 93.5	260.1 ± 9.8	259.9 ± 2.8	223.7 ± 8.8	
RZ1-08	51.2	120.1	1 146.0	0.102 4	0.050 7 ± 0.002 3	0.278 1 ± 0.012 2	0.040 0 ± 0.000 4	0.013 6 ± 0.000 7	233.4 ± 103.7	249.1 ± 9.7	252.6 ± 2.6	273.6 ± 14.1	
RZ1-09	57.5	133.0	1 180.4	0.113 0	0.054 7 ± 0.002 0	0.317 6 ± 0.012 1	0.042 0 ± 0.000 5	0.013 1 ± 0.000 8	466.7 ± 81.5	280.0 ± 9.4	265.3 ± 3.4	263.0 ± 15.3	
RZ1-10	199.6	588.1	1 221.9	0.469 2	0.051 0 ± 0.001 7	0.482 6 ± 0.017 7	0.068 5 ± 0.001 0	0.021 0 ± 0.000 6	239.0 ± 75.0	400.0 ± 12.1	427.0 ± 5.9	419.0 ± 11.0	
RZ1-11	61.2	201.7	1 195.4	0.166 9	0.051 6 ± 0.002 1	0.284 9 ± 0.011 4	0.040 1 ± 0.000 4	0.011 1 ± 0.000 6	333.4 ± 95.4	254.6 ± 9	253.4 ± 2.7	223.2 ± 11.1	
RZ1-12	59.7	134.9	1 358.7	0.095 4	0.049 3 ± 0.002 2	0.268 3 ± 0.011 8	0.039 6 ± 0.000 4	0.013 2 ± 0.000 8	164.9 ± 103.7	241.3 ± 9.5	250.6 ± 2.5	264.4 ± 16.6	
RZ1-13	88.9	464.9	745.3	0.545 8	0.049 9 ± 0.002 4	0.268 6 ± 0.012 8	0.039 2 ± 0.000 5	0.011 6 ± 0.000 4	187.1 ± 112.9	241.6 ± 10.3	248.1 ± 2.9	232.6 ± 7.6	
RZ1-14	96.1	286.1	519.2	0.536 7	0.056 1 ± 0.002 5	0.560 8 ± 0.024 8	0.073 4 ± 0.000 9	0.020 5 ± 0.000 6	457.0 ± 100.0	452.0 ± 16.2	456.0 ± 5.5	410.0 ± 12.8	
RZ1-15	81.2	272.0	1 554.8	0.146 7	0.049 5 ± 0.002 2	0.275 6 ± 0.012 4	0.040 5 ± 0.000 4	0.011 5 ± 0.000 5	172.3 ± 105.5	247.2 ± 9.9	256.2 ± 2.6	230.6 ± 9.6	
RZ1-16	73.6	313.5	798.7	0.337 5	0.055 6 ± 0.002 8	0.308 5 ± 0.015 3	0.040 0 ± 0.000 4	0.012 9 ± 0.000 5	435.2 ± 111.1	273.0 ± 11.9	252.9 ± 2.6	258.3 ± 9.2	
RZ1-17	130.2	194.7	3 545.0	0.052 9	0.052 0 ± 0.001 4	0.296 5 ± 0.009 9	0.040 8 ± 0.000 6	0.012 8 ± 0.000 6	283.4 ± 61.1	263.7 ± 7.8	257.5 ± 3.5	257.7 ± 12.4	
RZ1-18	296.3	934.0	1 184.9	0.746 7	0.054 0 ± 0.001 7	0.515 6 ± 0.017 9	0.069 0 ± 0.001 3	0.022 0 ± 0.000 5	372.0 ± 70.4	422.0 ± 12.0	430.0 ± 7.6	440.0 ± 10.5	

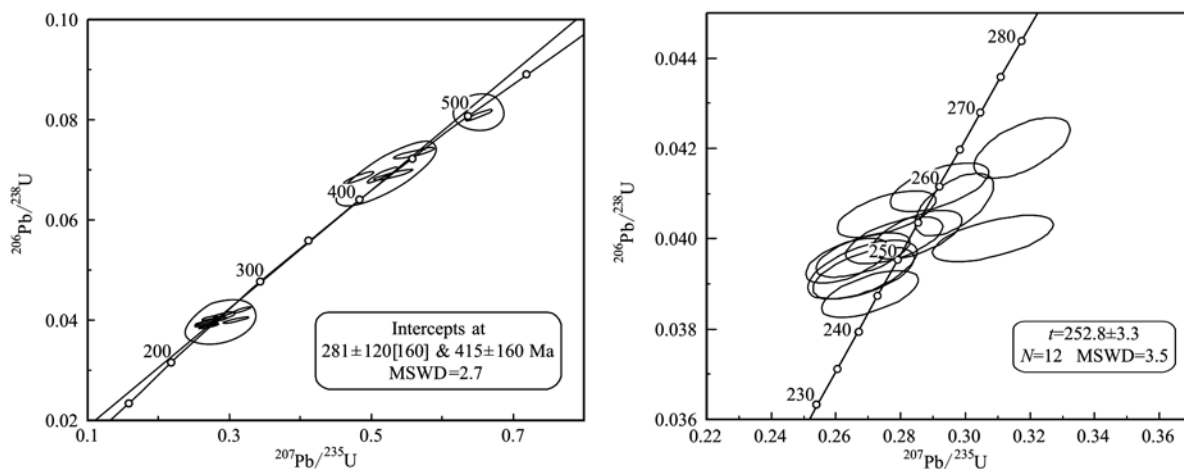


图4 永安岩体花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb Concordia diagram for the granodiorite from Yongan granitoid pluton

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素特征

永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩的主量元素分析结果见表2。岩石 SiO_2 含量介于 68.35% ~ 71.57% 之间, 平均值为 70.55%, 属酸性岩体, 与华南花岗闪长岩平均值 66.11% (迟清华, 2007) 相比明显偏高。岩石 K_2O 含量 (2.78% ~ 4.44%, 均值 3.85%) 及全碱含量 (5.07% ~ 6.31%, 均值 5.89%) 较低, 碱度率 AR (1.78 ~ 2.41) 较低。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值较高 (1.21 ~ 2.40, 均值 1.91), 均大于 1, 属于钾质系列, 岩石里特曼指数 ($\sigma = 1.01 \sim 1.47$, 均值 1.26) 小于 3.3, 显示其为钙碱性系列岩石; 在 $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解上岩石样品点全部落在高钾钙碱性系列范围内 (图 5a)。岩石 Al_2O_3 含量为 14.01% ~ 15.49%, 平均值 14.42%, 铝饱和指数 ($\text{A}/\text{CNK} = 1.16 \sim 1.60$, 均值 1.43) 均大于 1.1, 刚玉标准分子 (2.28% ~ 6.10%, 均值 4.75%) 均大于 1%, 在 $\text{A}/\text{NK} - \text{A}/\text{CNK}$ 图解中所有样品均投在过铝质范围内 (图 5b), 同时岩石还具有低镁 ($\text{MgO} = 1.08\% \sim 1.60\%$, 均值 1.35%) 的特点。综合以上特征判断其为典型的强过铝质花岗岩。

3.2.2 稀土元素特征

斑状堇青黑云花岗闪长岩的稀土元素分析结果及相关参数见表2。从表2可以看出, $\sum \text{REE} = 174.93 \times 10^{-6} \sim 240.67 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量偏低, 明显低于维氏花岗岩的值 (258×10^{-6}); $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.82 \sim 11.39$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 9.81 \sim 17.20$, 表

明轻重稀土元素分馏程度较高。 $\text{LREE} = 159.88 \times 10^{-6} \sim 221.26 \times 10^{-6}$, 轻稀土元素相对富集, $\text{La} \sim \text{Sm}$ 基本呈陡右倾式分布, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.51 \sim 3.97$, 远大于 1, 表明分馏程度较高。 $\text{HREE} = 15.05 \times 10^{-6} \sim 22.41 \times 10^{-6}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.65 \sim 2.73$, $\text{Gd} \sim \text{Yb}$ 曲线基本呈较平缓右倾折线, 说明重稀土元素分馏程度明显偏低。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (图 6a) 中, 所有样品分布曲线总体上均呈右倾平滑式弱 V 型曲线, 均具有弱负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.43 \sim 0.73$), Ce 基本不具备异常 ($\delta\text{Ce} = 0.95 \sim 1.03$)。各稀土元素分布组分的量级变化很小, 变化趋向性较为一致, 显示出晚二叠世侵入岩成因的一致性。岩石稀土元素配分模式与地壳重熔型花岗岩分配模式相似。

3.2.3 微量元素特征

斑状堇青黑云花岗闪长岩微量元素分析结果见表2。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图 (图 6b) 上, 所有样品表现出一致的走势特征: 从左至右呈锯齿状总体向右倾斜, 呈跳跃式递减。这反映了元素的相容性与元素在岩石中的含量总体上呈负相关 (元素相容性由弱至强, 元素在岩石中含量由高至低), 其中强相容元素跳跃式表现不明显。岩石明显相对富集大离子亲石元素 (Rb 、 K 、 Th 、 U), 相对亏损高场强元素 (Ta 、 Nb 、 Ti 、 P) 和 Ba 、 Sr , 属于典型的壳源花岗岩。其中 Ba 、 Sr 的亏损暗示岩浆形成过程中存在钾长石、斜长石分离结晶, 而 P 的亏损则可能是岩浆形成过程中由磷灰石分离结晶造成的。

表 2 永安岩体斑状黑云花岗岩闪长岩主量($w_B/\%$)、稀土和微量元素($w_B/10^{-6}$)及相關参数
Table 2 Major elements($w_B/\%$) and trace elements($w_B/10^{-6}$) of Yongan granitoid pluton and its surrounding intrusions

样品编号	PM04-GS1	PM04-XT6	PM04-XT7	PM04-XT8	PM04-XT11	D2706-RZ1	D5170-RZ1	D5174-RZ1	D5210-RZ1	D5295-RZ1	D6280-RZ1
SiO ₂	71.57	71.44	70.12	70.83	71.10	70.18	68.35	70.87	70.97	69.85	70.81
TiO ₂	0.42	0.45	0.55	0.44	0.47	0.54	0.63	0.58	0.54	0.59	0.49
Al ₂ O ₃	14.01	14.60	14.53	14.87	14.16	14.30	15.49	14.05	14.10	14.16	14.36
Fe ₂ O ₃	0.39	0.43	0.61	0.75	0.33	0.43	1.17	1.06	1.32	0.94	0.90
FeO	2.28	2.56	2.99	2.47	2.66	3.19	2.84	2.64	2.74	2.89	2.74
TFeO	2.62	2.95	3.54	3.14	2.96	3.57	3.89	3.59	3.92	3.73	3.55
MnO	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05
MgO	1.08	1.11	1.40	1.19	1.15	1.40	1.60	1.40	1.48	1.54	1.49
CaO	1.23	0.99	1.07	1.27	1.08	1.83	2.50	1.32	1.18	2.26	1.38
Na ₂ O	1.85	1.98	1.84	2.13	1.87	2.14	2.29	2.10	1.87	2.30	2.01
K ₂ O	4.44	3.88	3.78	3.83	4.26	3.90	2.78	3.92	3.48	4.01	4.08
P ₂ O ₅	0.16	0.18	0.20	0.18	0.15	0.16	0.18	0.20	0.17	0.14	0.16
H ₂ O ⁺	1.83	1.89	2.30	1.66	1.99	1.28	1.64	1.25	1.67	0.99	1.18
H ₂ O ⁻	0.30	0.42	1.11	0.31	0.25	0.18	0.48	0.21	0.21	0.20	0.14
LOI	2.40	2.19	2.69	1.85	2.60	1.71	1.94	1.65	1.93	1.08	1.35
总量	99.88	99.87	99.87	99.88	99.87	99.86	99.84	99.83	99.83	99.81	99.83
Na ₂ O + K ₂ O	6.29	5.86	5.63	5.96	6.13	6.05	5.07	6.02	5.35	6.31	6.10
K ₂ O/Na ₂ O	2.40	1.96	2.05	1.80	2.28	1.82	1.21	1.87	1.86	1.75	2.03
A/CNK	1.39	1.58	1.60	1.49	1.47	1.29	1.37	1.39	1.57	1.16	1.40
A/NK	2.23	2.49	2.58	2.49	2.31	2.37	3.05	2.33	2.64	2.24	2.36
AR	2.41	2.21	2.13	2.17	2.34	2.2	1.78	2.29	2.08	2.25	2.26
A/MF	2.17	2.09	1.69	1.99	1.99	1.66	1.62	1.63	1.51	1.54	1.63
C/MF	0.35	0.26	0.23	0.31	0.28	0.39	0.43	0.28	0.23	0.45	0.29
σ	1.37	1.20	1.15	1.26	1.32	1.33	1.00	1.29	1.01	1.47	1.33
La	38.41	37.71	37.05	38.16	38.36	40.44	52.05	47.08	41.40	44.32	40.44
Ce	78.60	76.33	73.73	77.68	78.90	81.13	100.22	95.32	86.81	87.60	76.92
Pr	9.25	9.18	8.93	9.35	9.35	9.63	11.88	11.12	9.61	9.93	8.88
Nd	33.64	33.55	32.77	34.40	34.15	35.20	46.84	45.56	39.32	39.91	35.96
Sm	6.72	6.77	6.40	7.02	7.02	7.14	8.46	8.37	7.34	7.45	6.79
Eu	0.92	1.04	1.01	1.06	0.94	1.14	1.81	1.47	1.30	1.45	1.50
Gd	5.71	5.78	5.32	5.85	5.87	6.13	7.39	6.71	6.05	6.03	5.49
Tb	0.88	0.86	0.75	0.83	0.85	0.87	1.12	1.19	1.07	1.01	1.00
Dy	5.00	4.69	3.90	4.36	4.52	4.73	4.99	6.28	5.95	5.25	5.28
Ho	0.90	0.83	0.71	0.76	0.85	0.87	0.89	1.20	1.15	0.99	1.05
Er	2.47	2.23	1.91	1.95	2.21	2.27	2.17	2.93	2.81	2.42	2.55
Tm	0.41	0.35	0.30	0.30	0.33	0.37	0.38	0.55	0.57	0.47	0.51
Yb	2.44	2.11	1.86	1.78	2.02	2.19	2.17	3.11	3.03	2.50	2.75
Lu	0.41	0.33	0.30	0.30	0.35	0.37	0.31	0.45	0.45	0.35	0.41

续表 2
Continued Table 2

样品编号	PM04-GSV1	PM04-XT6	PM04-XT7	PM04-XT8	PM04-XT11	D2706-RZ1	D5170-RZ1	D5174-RZ1	D5210-RZ1	D5295-RZ1	D6280-RZ1
Y	25.22	22.71	18.85	20.52	22.85	23.77	21.42	30.18	29.51	25.63	27.22
LREE	167.53	164.57	159.88	167.66	168.72	174.68	221.26	208.91	185.71	190.63	170.41
HREE	18.23	17.17	15.05	16.12	16.99	17.81	19.42	22.41	21.07	19.02	19.04
ΣREE	185.76	181.74	174.93	183.79	185.71	192.49	240.67	231.33	206.77	209.65	189.45
LREE/HREE	9.19	9.59	10.62	10.40	9.93	9.81	11.39	9.32	8.82	10.02	8.95
δEu	0.44	0.49	0.51	0.49	0.43	0.51	0.68	0.58	0.58	0.64	0.73
δCe	0.99	0.98	0.96	0.98	0.99	0.97	0.95	0.99	1.03	0.98	0.95
(La/Yb) _N	11.29	12.79	14.27	15.42	13.59	13.22	17.20	10.86	9.81	12.73	10.54
(La/Sm) _N	3.69	3.60	3.74	3.51	3.53	3.66	3.97	3.63	3.64	3.84	3.84
(Gd/Yb) _N	1.94	2.26	2.36	2.73	2.40	2.31	2.82	1.78	1.65	2.00	1.65
Li	58.74	84.17	55.98	74.37	63.23	79.64	39.21	46.62	38.30	37.12	48.01
Be	2.17	3.01	2.42	3.04	2.80	2.74	1.86	1.63	1.80	1.56	1.60
Sc	9.75	10.55	11.92	9.24	10.56	10.25	7.86	8.93	8.90	9.38	7.80
V	51.8	74.3	85.3	65.7	68.8	60.6	59.4	58.4	53.9	59.3	49.3
Cr	29.1	36.5	36.8	29.9	27.8	37.5	34.5	28.6	32.9	24.3	30.0
Co	8.10	8.80	10.60	8.90	8.30	10.20	11.20	9.65	10.10	9.27	9.51
Ni	15.9	18.3	20.5	17.7	16.6	20.1	17.5	19.0	21.4	13.9	19.5
Cu	20.0	20.1	24.5	20.2	18.9	11.9	20.0	21.0	21.4	17.4	19.9
Zn	59.9	68.7	74.7	62.5	67.0	81.0	66.6	66.2	65.2	53.6	55.4
Ga	17.79	19.48	19.74	18.12	18.82	20.26	18.40	19.10	17.70	17.00	16.70
Rb	214.0	194.1	191.4	169.4	212.8	223.5	72.2	175.0	150.0	161.0	159.0
Sr	57.3	69.1	79.0	83.0	57.4	104.5	115.0	95.3	79.6	102.0	94.7
Zr	182.2	187.7	218.4	193.2	210.2	201.4	292.0	268.0	273.0	245.0	234.0
Nb	13.71	14.59	17.02	12.76	15.09	17.77	9.17	13.20	11.30	10.40	10.60
Mo	1.21	0.39	0.27	0.29	0.43	0.16	0.40	0.66	0.33	0.54	0.47
In	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.12	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06
Cs	14.02	16.00	12.87	17.55	14.50	31.14	8.63	16.30	13.20	11.70	13.20
Ba	362.4	449.8	471.2	427.1	399.3	494.0	421.0	531.0	446.0	597.0	496.0
Hf	6.28	6.53	7.35	6.31	6.33	7.16	10.50	8.83	7.95	7.67	7.62
Ta	0.99	1.19	1.44	1.06	1.04	1.40	0.82	1.33	1.07	1.06	1.02
W	0.80	1.20	1.28	0.64	1.32	2.86	0.92	1.28	0.96	0.80	0.77
Tl	1.30	0.65	0.61	0.68	1.05	1.23	0.51	0.78	0.77	0.80	0.76
Pb	31.3	29.1	29.5	28.3	29.9	30.9	24.2	32.1	26.0	29.9	31.1
Bi	0.44	0.24	0.27	0.73	0.44	0.15	0.52	0.56	0.67	0.72	0.50
Th	14.92	14.57	15.66	13.65	18.30	16.35	12.91	16.87	15.22	16.00	14.08
U	4.34	3.19	3.62	4.09	3.66	4.59	2.82	3.36	4.13	3.24	3.16
Ag	0.08	0.06	0.05	0.05	0.08	0.07	0.06	0.10	0.10	0.08	0.09
Sn	3.40	5.80	3.40	4.20	4.30	5.70	2.51	3.66	3.78	3.49	3.14
As	8.1	3.6	4.2	1.9	2.5	3.9	3.0	4.5	3.4	1.1	1.9
Sb	1.74	0.64	0.18	0.09	0.76	0.05	0.20	0.45	0.16	0.13	0.10
Yb	2.44	2.11	1.86	1.78	2.02	2.19	2.17	3.11	3.03	2.50	2.75
Y	25.22	22.71	18.85	20.52	22.85	23.77	21.42	30.18	29.51	25.62	27.23
$t_R/^\circ\text{C}$	800.30	817.67	830.82	813.46	819.46	798.31	837.20	836.13	851.22	800.01	822.44

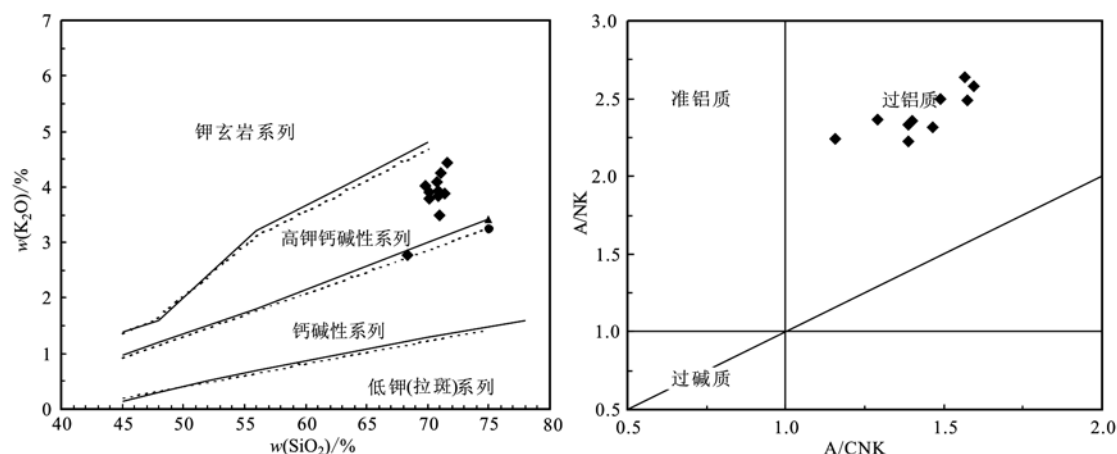


图5 永安岩体 K_2O-SiO_2 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976)和 $A/NK-A/CNK$ 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 K_2O-SiO_2 (after Peccerillo and Taylor, 1976) and $A/NK-A/CNK$ (after Maniar and Piccoli, 1989) diagrams for Yong'an granitoid pluton

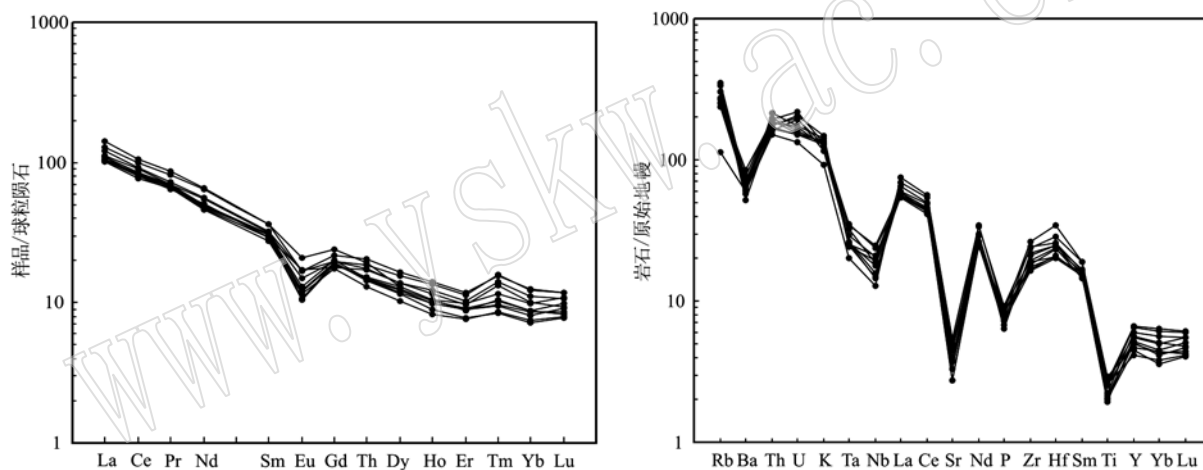


图6 永安岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化图解(球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle normalized trace element spider diagrams and chondrite-normalized REE patterns of Yong'an granitoid pluton (chondrite and primitive mantle values are from Sun and McDonough, 1989)

3.2.4 锆石 Hf 同位素特征

在对样品 PM04-RZ1 进行锆石 U-Pb 同位素测年的同时,还进行了锆石原位 Hf 同位素测试分析,测点的位置一般都是在锆石 U-Pb 年龄分析点原位附近,或者选在与年龄分析点相同的环带上,具体的数据分析结果见表3。

从表3中可以看出,锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围在 0.000 257 ~ 0.001 317 之间,均小于 0.002,反映锆石形成后具有很低的放射性成因 Hf 积累,所测的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值可以代表锆石结晶时岩浆体系的 Hf 同位素组成。样品的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值介于 -0.99 ~ -0.96 之间,明显小于镁铁质及硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值(分别为

-0.34和 -0.72),因此二阶段模式年龄更能反映源区物质从亏损地幔中抽取出来的时间(第五春荣等, 2007)。本次工作获得样品的锆石二阶段 Hf 模式年龄为 $t_{\text{DM2}} = 2.3 \sim 1.8 \text{ Ga}$ 。

4 讨论

4.1 形成时代

本文获得的永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 $252.8 \pm 3.3 \text{ Ma}$,为印支期晚二叠世花岗岩。尽管前人对永安岩体的形成年代做了很多研究,但由于测试方法、技术模式和精度的局限

性,未得到一个较准确的结论。如罗修泉等(1992)获得 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法同位素年龄 277 Ma 和 K-Ar 法同位素年龄 256 Ma,两者差距较大;覃小峰等(2004)获得其 U-Pb 同位素年龄 286 Ma。本次通过 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素测试,获得了较好的加权平均年龄值。永安岩体为十万大山复式岩体的组成部分,根

据野外对岩体期次的厘定和前人对十万大山-大容山复式岩体各期次的岩体详细的年代学研究,发现永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩为复式岩体岩浆早期侵入的产物,岩体的侵入也拉开了桂东南印支期岩浆侵入演化的序幕,从而较准确地确定了桂东南十万大山-大容山复式岩体侵入的时间下限。

表 3 永安岩体闪长花岗岩锆石 Hf 同位素数据

Table 3 Hf isotopic data of zircon from Yongan granitoid pluton

分析点	t/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	245.2	0.282 287	0.000 395	0.010 269	0.282 285	-17.2	-11.849	1 341	2 025	-0.99
2	248.6	0.282 362	0.001 317	0.032 932	0.282 356	-14.5	-9.262	12 68	1 863	-0.96
3	237.9	0.282 256	0.000 731	0.017 623	0.282 253	-18.2	-13.138	1 395	2 100	-0.98
4	249.8	0.282 154	0.000 410	0.010 169	0.282 152	-21.9	-16.459	1 524	2 318	-0.99
5	252.8	0.282 254	0.000 388	0.009 529	0.282 252	-18.3	-12.842	1 386	2 093	-0.99
6	259.9	0.282 359	0.000 932	0.019 202	0.282 355	-14.6	-9.046	1 258	1 858	-0.97
7	252.6	0.282 306	0.000 543	0.014 302	0.282 304	-16.5	-11.024	1 319	1 978	-0.98
8	265.3	0.282 254	0.000 257	0.006 772	0.282 252	-18.3	-12.552	1 381	2 084	-0.99
9	252.8	0.282 287	0.000 550	0.013 994	0.282 284	-17.1	-11.693	1 346	2 020	-0.98
10	253.4	0.282 237	0.001 082	0.025 839	0.282 232	-18.9	-13.536	1 434	2 137	-0.97
11	250.6	0.282 266	0.000 612	0.016 187	0.282 263	-17.9	-12.484	1 376	2 069	-0.98
12	248.1	0.282 278	0.000 430	0.010 670	0.282 276	-17.5	-12.092	1 354	2 042	-0.99
13	256.2	0.282 374	0.001 145	0.028 988	0.282 369	-14.1	-8.637	1 245	1 830	-0.97
14	252.9	0.282 253	0.000 805	0.019 597	0.282 249	-18.4	-12.955	1 403	2 100	-0.98
15	257.5	0.282 316	0.001 278	0.030 641	0.282 310	-16.1	-10.693	1 331	1 961	-0.96

4.2 岩石成因类型及物质来源

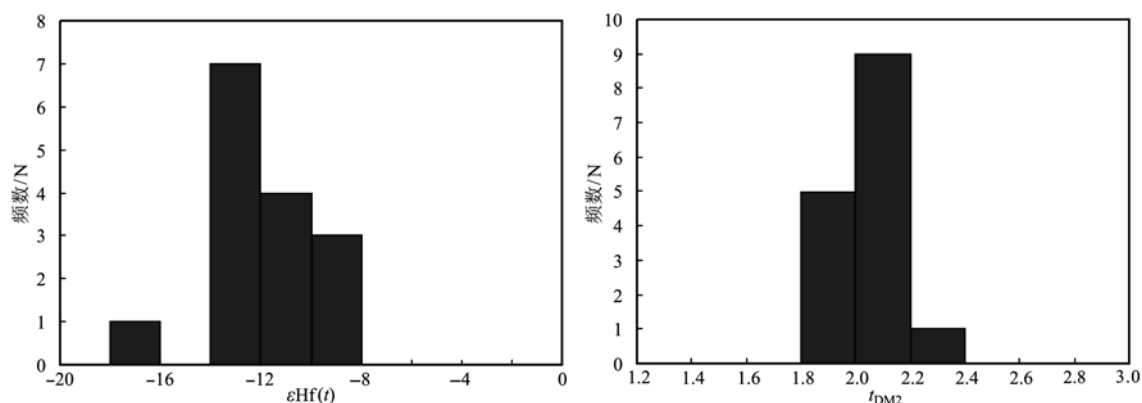
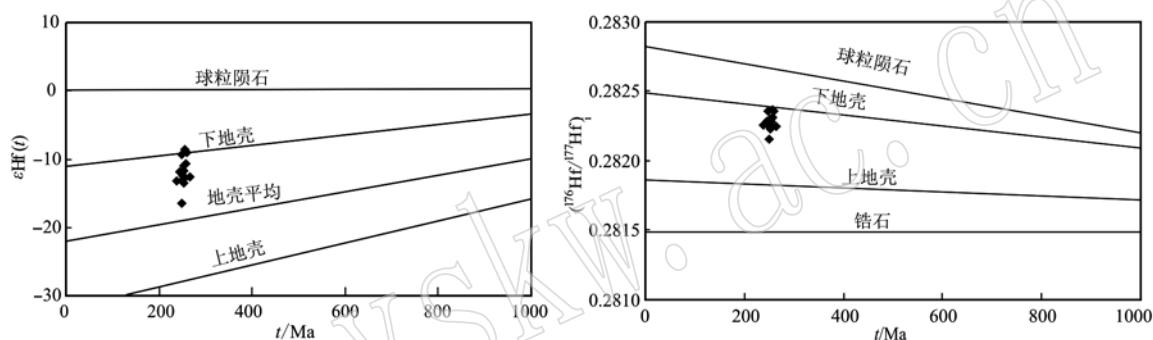
永安岩体的岩石类型为斑状堇青黑云花岗闪长岩,岩石中暗色矿物以黑云母为主,岩石副矿物组合为钛铁矿+独居石+磷灰石+电气石+锆石,含过铝质特征矿物堇青石。铝饱和指数 A/CNK 均大于 1.1,标准刚玉分子均大于 1%,属强过铝质岩石。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图中曲线总体上呈右倾平滑式弱 V 型曲线,均具有弱负 Eu 异常,轻稀土元素富集,轻重稀土元素分馏明显。以上特征均表明,永安岩体属 S 型花岗岩。

永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图显示,岩石富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K,亏损高场强元素和 Ba、Sr,属于典型的低 Ba-Sr 壳源花岗岩,样品的 Rb/Sr 值为 0.63~3.74(平均值 2.22),Rb/Nb 为 7.87~15.60(平均 13.18),明显高于中国东部上地壳 Rb/Sr 和 Rb/Nb 值(分别为 0.31 和 8.7,高山等,1999)和全球上地壳的平均值(分别为 0.32 和 4.5, Taylor and McLennan, 1985)。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图

中表现为富集轻稀土元素的右倾型。这些特征表明永安岩体的物源以壳源为主。

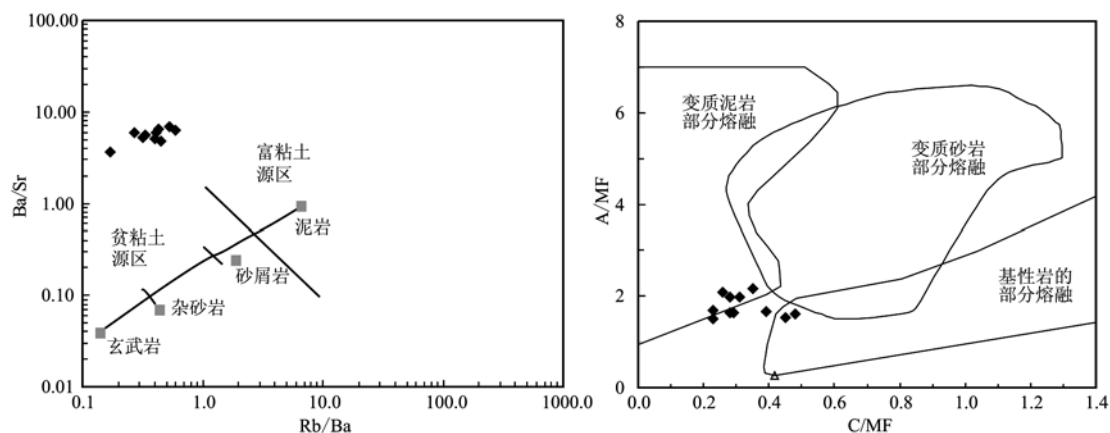
锆石 Hf 同位素分析表明,花岗岩的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值主要集中于 -14~-8(图 7),个别点的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值较低,为 -16.5。在 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图解和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i-t$ 图解(图 8)中,永安岩体样品投点大部分落在了地壳平均和下地壳演化曲线之间,岩体中大部分锆石二阶段 Hf 模式年龄 t_{DM2} 为 2.2~1.8 Ga(图 7),为永安岩体 S 型花岗岩的主要物质来源,少量平均地壳存留年龄为 2.4~2.2 Ga 的古老地壳再循环物质也参与了永安岩体的形成,显示永安岩体的源区物质是以古老的壳源物质为主,没有地幔物质参与岩浆形成的岩浆锆石 Hf 同位素记录。但计算出的永安岩体的锆石饱和温度的均值为 820.64℃,明显高出了一般 S 型花岗岩的成岩温度(小于 750℃, Watson *et al.*, 1983),因此推测可能是岩浆形成过程中,幔源组分提供了热量。

花岗岩中的 Rb、Rr、Ba 等微量元素,常常以类质同像的方式赋存于长石矿物中,这些元素在花岗岩

图7 永安岩体地壳模式年龄 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 和 t_{DM2} 柱状图Fig. 7 Zircon t_{DM2} and Hf isotopic compositions of granodiorite from Yongan granitoid pluton图8 永安岩体花岗闪长岩的 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i-t$ 图解Fig. 8 Diagrams of $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i-t$ for Yongan granitoid pluton

中含量的变化,常常与它们在源岩(砂屑岩或泥质岩)中含量变化呈正相关,因此可以根据 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 的关系,判断花岗岩源区的成分(Sylvester, 1998)。富粘土的泥质岩中的 Rb/Sr 及 Rb/Ba 的值比贫粘土的砂质岩的值高。在 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解

(图9a)中,大多数样品落在富粘土源区,少数落在贫粘土源区,反映其原岩可能以泥质成分为主。在 $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ 图解(图9b)上,大多数样品落在了变质泥岩部分熔融区域内,说明源区岩石可能是以泥岩为主。

图9 永安岩体花岗闪长岩物质来源 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ 图解(据 Sylvester, 1998)和 $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ 判别图解(据 Alther *et al.*, 2000)Fig. 9 $\text{Rb}/\text{Sr}-\text{Rb}/\text{Ba}$ (after Sylvester, 1998) and $\text{A}/\text{MF}-\text{C}/\text{MF}$ diagrams (After Alther *et al.*, 2000) for Yongan granitoid pluton

4.3 成岩构造环境

对华南印支期花岗岩的形成背景,目前存在着诸多争议。Hsü 等(1990)和陈海泓等(1998)认为,印支期花岗岩产生于碰撞造山的早期阶段,是俯冲碰撞岛弧环境下的产物;梁新权等(2005)认为是形成于碰撞造山的陆陆碰撞阶段,由于地壳增厚引起地壳岩石重熔形成;金文山等(1997)认为十万大山-大容山岩体呈带状分布,发育于古生代钦防残余海盆中,其中逆冲断裂与褶皱发育,花岗岩可能是形成

于推覆构造引起的地壳的叠置加厚过程中,与碰撞造山无关;而汪洋等(2003)和郭春丽等(2012)认为花岗岩形成于碰撞造山的后碰撞阶段,在地壳伸展阶段减压熔融形成。利用岩石地球化学特征判断花岗岩构造环境是一种常用的研究方法,某些岩石的微量元素含量及组合能指示不同构造环境。在Pearce 等(1984)、Pearce (1996)的构造环境判别图上投影,永安岩体投影点落于后碰撞区域(图10),因此认为其属后碰撞花岗岩类。

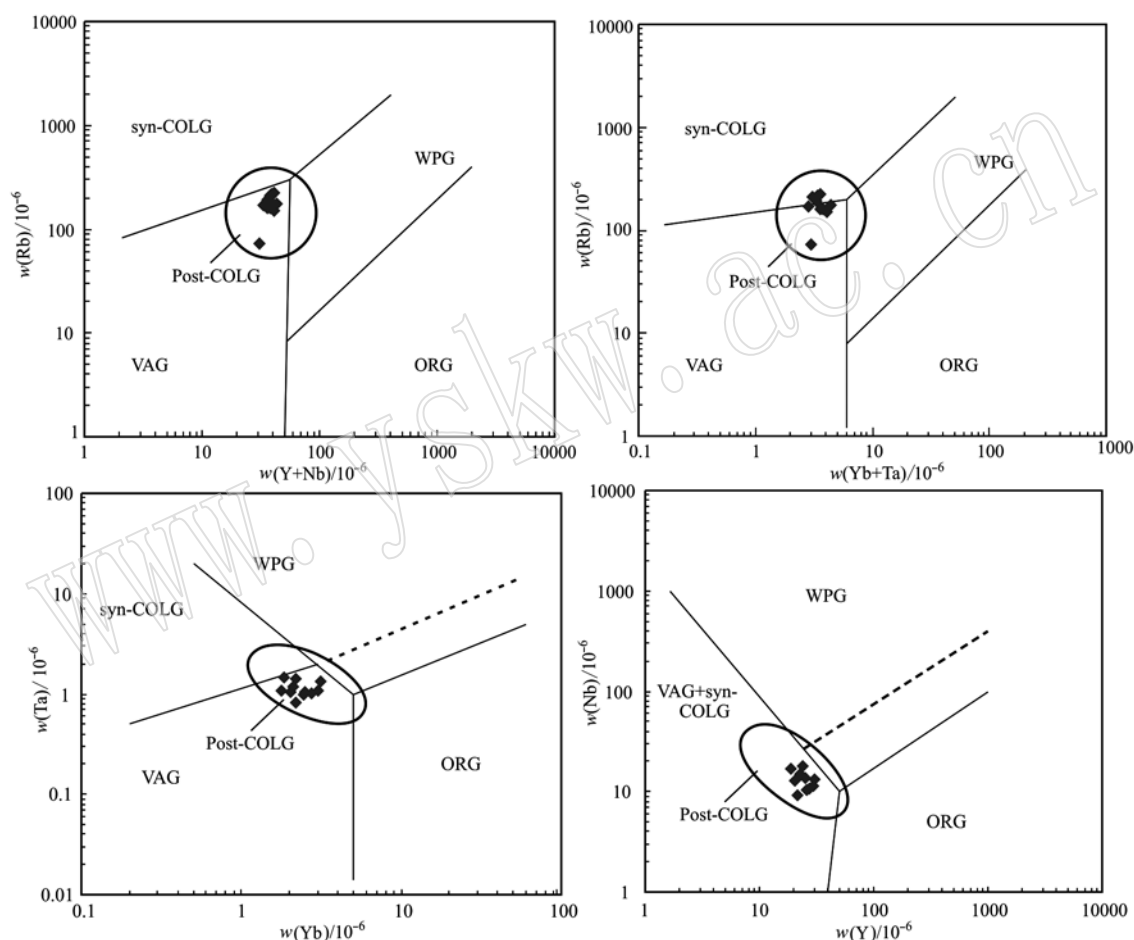


图10 永安岩体花岗闪长岩构造环境判别图解(据 Pearce, 1996)

Fig. 10 Tectonic environment discrimination diagram for Yong'an granitoid pluton (after Pearce, 1996)

从区域构造演化来看,永安岩体位于扬子陆块和华夏造山带结合带南段,早古生代时随着华南洋向南俯冲,扬子陆块和华夏造山带焊合为同一的华南陆块,基本上形成了同一的沉积环境,但桂东南钦防地区除外,在晚古生代时,该地区仍为深海-半深海沉积,二叠纪—三叠纪,受印支运动的影响,碰撞使得钦防残余海盆关闭,扬子陆块和华夏造山带完全对接,在钦防地区发生了强烈的碰撞造山事件。

这使得该时期钦防地区的岩浆活动有别于同时期华南其它地区。

前人对十万大山-大容山花岗岩中的麻粒岩包体进行了详细全面的研究,认为该花岗岩是由麻粒岩包体的原岩发生部分熔融形成的,岩体中的麻粒岩包体是部分熔融残留体(杜杨松等, 1999; 庞保成, 2001)。根据麻粒岩包体中的变质微矿物组合和反应结构,对麻粒岩包体经历的变质作用过程进

行了研究,发现其变质过程构成了一个完整变质阶段典型的顺时针温压轨迹,指示区域当时经历了地壳增厚发生变质而后快速折返、抬升的动力学过程,同时指出花岗岩可能形成于碰撞造山峰期之后的减压降温退变质阶段(赵亮等,2010)。

晚奥陶世—志留纪,华南洋向南俯冲使扬子与华夏沿钦杭对接带焊合为统一的华南陆块,但在钦防(志留纪)地区扬子陆块和华夏造山带并没有对接,该区域仍为残余海盆。二叠纪—三叠纪,印支陆块向北与华南陆块沿马江缝合带拼合,受印支运动的影响,碰撞使得钦防残余海盆关闭,在钦防地区发生了强烈的碰撞造山事件。十万大山地区地壳加厚变形,使得该地区基底发生高温高压变质作用,随着碰撞作用进入晚期,增厚的地壳为了与周围的岩石圈重新达到重力均衡状态,开始发生不同程度的松弛扩张,使得原来处于下地壳的变质基底迅速向上抬升,受到地幔热传导和拉伸环境的影响,在减压降温的条件下岩石发生了部分熔融,形成的岩浆沿灵山—藤县断裂带和博白—岑溪断裂带等构造薄弱带侵位,形成了大容山—十万大山花岗岩。

5 结论

(1) 采用 LA-ICP-MS 测年方法对永安岩体的样品测定了锆石 U-Pb 年龄,获得永安岩体斑状堇青黑云花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 252.8 ± 3.3 Ma,属于晚二叠世晚期。

(2) 岩石含有特征矿物堇青石,富集轻稀土和大离子亲石元素(LREE 和 Rb、K、Th、U),亏损重稀土和高场强元素(HREE 和 Ta、Nb、Ti、P),A/CNK 均大于 1.1,标准矿物分子刚玉均大于 1%,为强过铝质 S 型岩石。

(3) 花岗岩的锆石 Hf 同位素分析表明, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要集中于 $-14 \sim -8$,锆石二阶段 Hf 模式年龄 t_{DM2} 主体为 $2.3 \sim 1.8$ Ga,具有较负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和较老的地壳模式年龄,显示永安岩体的源区物质是以古老的壳源物质为主,地幔组分没有提供成岩物质,但地幔底侵作用可能为成岩提供了热能,源岩可能以富粘土泥质成分为主。

(4) 十万大山—大容山岩体的形成构造环境与同期华南花岗岩不同,受印支运动影响,扬子板块与华夏造山带在钦防地区碰撞造山,花岗岩形成于后碰撞阶段拉张环境中。

References

- Alther R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 50: 51 ~ 73.
- Chen Haihong and Xiao Wenjiao. 1998. Archipelago orogenesis: Examples from Indosinian orogenic belts in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 5 (Suppl.): 95 ~ 102 (in Chinese with English abstract).
- Chi Qinghua and Yan Mingcai. 2007. Handbook of Element Abundance for Applied Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 9 ~ 11 (in Chinese with English abstract).
- Deng Xiguang, Chen Zhigang, Lei Xianhua, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Darongshan-Shiwandashan granitoid belt in South-eastern Guangxi, China[J]. *Geological Review*, 50(4): 426 ~ 432 (in Chinese with English abstract).
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Lin Ciluan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2): 253 ~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Du Yangsong, Collerson K D, Zhao Jianxin, *et al.* 1999. Characteristics and petrogenesis of granulite enclaves in S-type granites in the junction of Guangdong and Guangxi provinces[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 309 ~ 314 (in Chinese with English abstract).
- Fang Qinghao, Feng Junchu, He Lingyi, *et al.* 1987. The S-type granite-suite in Darongshan Guangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 23 ~ 33 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, *et al.* 1999. Structure and composition of the continental crust in East China[J]. *Science in China (Ser. D)*, 29(3): 204 ~ 213 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chunli, Zheng Jiahao, Lou Fasheng, *et al.* 2012. Petrography, genetic types and geological dynamical settings of the indosinian granitoids in south China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(3): 457 ~ 472 (in Chinese with English abstract).
- Huang Lin. 1988. Isotope geochemical studies of the Darongshan peraluminous composite batholith of granitoids in Guangxi Autonomous Region, China[J]. *Geochimica*, (1): 26 ~ 40 (in Chinese with English abstract).
- Hsü K J, Li J, Chen H, *et al.* 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 183(1): 9

~39.

- Jiao Shujian, Guo Jinhui and Peng Songbai. 2013. Petrogenesis of garnet in the Darongshan-Shiwandashan granitic suite of the South China Block and the metamorphism of the granulite enclave[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1 740 ~ 1 758 (in Chinese with English abstract).
- Jin Wenshan and Sun Dazhong. 1997. Deep Crustal Structure and It Evolution in South China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Liang Xinquan, Li Xianhua, Qiu Yuanxi, *et al.* 2005. Indosinian collisional orogeny: Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan basin, south China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(1): 99 ~ 112 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1 ~ 2): 537 ~ 571.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34 ~ 43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535 ~ 1 546.
- Luo Xiuquan, Liao Qingkang and Liang Tingbao. 1992. Geological age table of the Darongshan-Shiwandashan granitic batholith in Guangxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 11(1): 31 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635 ~ 643.
- Mao Jingwen, Chen Maohong, Yuan Shunda, *et al.* 2011. Geological characteristics of the Qinhang(or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636 ~ 658 (in Chinese with English abstract).
- Pang Baocheng. 2001. The types, features and genesis of enclaves in granitoids in the junction of Guangdong and Guangxi[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(1): 8 ~ 13 (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]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 ~ 983.
- Pearce J. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19: 120 ~ 125.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63 ~ 81.
- Qi Changshi, Deng Xiguang, Li Wuxian, *et al.* 2007. Origin of the Darongshan-Shanwandashan S-type granitoid belt from southeastern Guangxi: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 402 ~ 412 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Li Jiang, Zhou Fusheng, *et al.* 2004. Geological Evolution of Bobai-Cenxi Orogenic Belt in the North Margin of Yunkai Block, Southeastern Guangxi[M]. Beijing: China Land Press (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Cao Jie, *et al.* 2013. Petrogenesis of early Indosinian granites from the southwestern segment of qinfang tectonic belt, southern Guangxi: Constraints from zircon U-Pb chronology and geochemistry[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 43(5): 1 471 ~ 1 488 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313 ~ 345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29 ~ 44.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Blackwell Scientific Publication, 312.
- Wang Qingquan and Wang Liankui. 1990. Emplacement conditions of the granitobodies in the Darongshan peraluminous granite belt, Guangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 72 ~ 79 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shaonian. 1995. Study on mineralogy of Hypersthene Cordierite granite suite along Darongshan-Shiwandashan rock zone in Guangxi[J]. *Guangxi Geology*, 8(1): 1 ~ 13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang and Deng Jinfu. 2003. The geodynamic significance of petrochemical features of Triassic strongly peraluminous igneous rocks in the southern part of Guangxi Province[J]. *Geology-Geochemistry*, 31(4): 35 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 ~ 304.
- Zeng Changyu, Zhou Yongzhang, Zheng Yi, *et al.* 2015. Plate tectonism of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt (South China) before Mesozoic transition event[J]. *Earth Science Frontiers*, 22

(2): 54~63(in Chinese with English abstract).

Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, *et al.* 2015. New division of tectonic-strata superregion in China[J]. *Earth Science*, 40(2): 206~233(in Chinese with English abstract).

Zhao Liang, Guo Feng, Fan Weiming, *et al.* 2010. Crustal evolution of the Shiwandashan area in South China: Zircon U-Pb-Hf isotopic records from granulite enclaves in Indosinian granites[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 2 028~2 038(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈海泓, 肖文交. 1998. 多岛洋型造山作用: 以华南印支期造山带为例[J]. *地学前缘*, 5(增刊): 95~102.

迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 9~11.

邓希光, 陈志刚, 李献华, 等. 2004. 桂东南地区十万大山-大容山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. *地质论评*, 50(4): 426~432.

杜杨松, Collerson K D, 赵建新, 等. 1999. 两广交界地区 S 型花岗岩中麻粒岩包体的特征与成因[J]. *岩石学报*, 15(2): 309~314.

方清浩, 冯君储, 何令仪. 1987. 广西大容山 S 型花岗岩套[J]. *岩石学报*, (3): 23~33.

高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. *中国科学(D 辑)*, 29(3): 204~213.

第五春荣, 孙勇, 林慈鑫, 等. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学[J]. *岩石学报*, 23(2): 253~262.

郭春丽, 郑佳浩, 楼法生, 等. 2012. 华南印支期花岗岩类的岩石特征、成因类型及其构造动力学背景探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 36(3): 457~472.

黄琳. 1988. 广西大容山过铝花岗岩复式岩基的同位素地球化学研究[J]. *地球化学*, (1): 26~40.

焦淑娟, 郭敬辉, 彭松柏. 2013. 华南大容山-十万大山花岗岩体中石榴石成因以及麻粒岩包体变质作用研究[J]. *岩石学报*, 29(5): 1 740~1 758.

金文山, 孙大中. 1997. 华南大陆深部地壳结构及其演化[M]. 北京: 地质出版社.

梁新权, 李献华, 丘元禧, 等. 2005. 华南印支期碰撞造山-十万大山盆地构造和沉积学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 29(1): 99~112.

罗修泉, 廖庆康, 梁廷苞. 1992. 广西大容山-十万大山花岗岩岩基地质年代表[J]. *岩石矿物学杂志*, 11(1): 31~42.

毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 85(5): 636~658.

庞保成. 2001. 两广交界地区花岗岩中包体的类型、特征与成因[J]. *矿物岩石*, 21(1): 8~13.

祁昌实, 邓希光, 李武显, 等. 2007. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. *岩石学报*, 23(2): 403~412.

覃小峰, 李江, 周府生, 等. 2004. 云开地块北缘博白-岑溪造山带的形成和演化[M]. 北京: 北京大地出版社.

覃小峰, 王宗起, 曹洁, 等. 2013. 桂南钦防构造带西南段印支早期花岗岩的成因: 年代学和地球化学约束[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(5): 1 471~1 488.

王庆权, 王联魁. 1990. 广西大容山花岗岩带中过铝质花岗岩体的定位条件[J]. *岩石学报*, 5(2): 72~79.

汪洋, 邓晋福. 2003. 广西南部三叠纪强过铝质火成岩岩石化学特征的动力学意义[J]. *地质地球化学*, 31(4): 35~42.

汪绍年. 1995. 广西大容山-十万大山岩带紫辉石堇青石花岗岩套矿物学研究[J]. *广西地质*, 8(1): 1~13.

赵亮, 郭锋, 范蔚茗, 等. 2010. 广西十万大山地壳演化: 来自印支期花岗岩中麻粒岩包体锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素记录[J]. *科学通报*, 55(15): 2 028~2 038.

曾长育, 周永章, 郑义, 等. 2015. 钦-杭结合带在中生代构造转折事件以前的板块构造机制[J]. *地学前缘*, 22(2): 54~63.

张克信, 潘桂棠, 何卫红, 等. 2015. 中国构造-地层大区划分新方案[J]. *地球科学*, 40(2): 206~233.