

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.180>



桂中昆仑关 A型花岗岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学特征

刘 飞^{1,2}, 李 塑^{1,2*}, 黄圭成^{1,2}, 邱啸飞^{1,2}, 严乐佳³, 陆世才³

1.中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205

2.中国地质调查局花岗岩成矿地质研究中心,湖北武汉 430205

3.中国冶金地质总局广西地质勘查院,广西南宁 530022

摘要: 华南腹地燕山期岩浆活动、成因及其构造意义存在争议。本文选取桂中地区昆仑关花岗岩为研究对象,进行了系统的年代学、地球化学和 Sm-Nd 同位素研究。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 97.7 ± 1.3 Ma (MSWD=1.6), 表明昆仑关花岗岩是燕山晚期岩浆活动产物。地球化学分析显示, 岩体富硅 ($\text{SiO}_2 = 69.42\% \sim 72.52\%$), 富碱 (全碱 = $7.43\% \sim 8.43\%$), 富钾 ($\text{K}_2\text{O} = 4.00\% \sim 5.02\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 = $1.17 \sim 1.62$), 富铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.65\% \sim 14.25\%$), 低钙 ($\text{CaO} = 1.20\% \sim 2.78\%$); 富集 Rb、Th、U、K、Pb, 亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti; 轻稀土富集, 重稀土亏损, 具明显 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.45 \sim 0.61$), 稀土元素分配图呈典型的“右倾”型; 里德曼指数 (δ) 为 $2.06 \sim 2.41$, 属高钾钙碱性系列, 铝饱和指数 (A/CNK) 为 $0.93 \sim 1.16$, 属准铝质—过铝质岩石。岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 $-7.68 \sim -10.31$, 二阶段 Nd 模式年龄 (T_{DM2}) 为 $1.52 \sim 1.73$ Ga, 均值 1.58 Ga。岩石学、地球化学和 Sm-Nd 同位素特征表明昆仑关花岗岩为 A型花岗岩, 是在伸展构造环境中及低压、高温条件下由古元古代华夏基底部分熔融形成, 并伴有幔源岩浆的混合。结合邻区同期次的岩浆活动和成矿作用, 表明 $100 \sim 90$ Ma 华南腹地经历了一次重要的岩石圈拉张事件。

关键词: 昆仑关岩体; A型花岗岩; 华南; 燕山晚期; 岩石圈拉张; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2018)07-2313-17

收稿日期: 2018-03-14

Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of the Kunlunquan A-Type Granite in Central Guangxi

Liu Fei^{1,2}, Li Kun^{1,2*}, Huang Guicheng^{1,2}, Qiu Xiaofei^{1,2}, Yan Lejia³, Lu Shicai³

1.Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2.Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3.Guangxi Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Nanning 530022, China

Abstract: For studying the Late Yanshan magmatism in South China hinterland, and analyzing its petrogenesis and tectonic significance, this paper carries out systematical geochronological, geochemical and Sm-Nd isotopic investigations on the Kunlunquan granitic pluton in central Guangxi. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 97.7 ± 1.3 Ma (MSWD=1.6), implying its Late Yanshan intrusion time. Geochemical compositions show that it is enriched in Si ($\text{SiO}_2 = 69.42\% \sim 72.52\%$), alkali (total alkali = $7.43\% \sim 8.43\%$), K ($\text{K}_2\text{O} = 4.00\% \sim 5.02\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.17 \sim 1.62$), Al ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.65\% \sim 14.25\%$), but depleted in Ca ($\text{CaO} = 1.20\% \sim 2.78\%$). Rb, Th, U, K, Pb elements are enriched in the intrusion while Ba, Nb, Sr, P, Ti elements are depleted. REE is characterized by obvious negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.45 \sim 0.61$), and exhibits right-dipping patterns with LREE enrichment. Its aluminum saturation index value (A/CNK) ranges from 0.93 to

基金项目:中国地质调查局地质矿产调查项目(No.121201009000150012)。

作者简介:刘飞(1988—),男,工程师,主要从事区域地质调查工作。ORCID: 0000-0001-9080-0850. E-mail: liufeigeo@foxmail.com

* 通讯作者:李塑, E-mail: likungeo@foxmail.com

引用格式:刘飞,李塑,黄圭成,等,2018.桂中昆仑关 A型花岗岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学特征.地球科学,43(7): 2313—2329.

1.16, while redman index value (δ) ranges from 2.06 to 2.41, indicating the intrusion belongs to high-K calc-alkaline series and metaluminous to peraluminous rocks. Its $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value varies between -7.68 to -10.31 , and the correspondent two-stage Nd isotopic modal ages range from 1.52 to 1.73 Ga (average value is 1.58 Ga). Mineralogy and geochemical characteristics indicate that Kunlunshan pluton is A-type granite. It has formed by partial melting of the Cathaysia paleoproterozoic felsic crustal material, being mixed with some mantle driven mafic melts, under a low-pressure, high-temperature condition at an extensional tectonic setting. Taking the igneous and metallogenetic events in central Guangxi and adjacent areas into consideration, this study suggests that the lithosphere of South China hinterland thinned in 100–90 Ma.

Key words: Kunlunshan pluton; A-type granite; South China; Late Yanshan; lithosphere extension; geochemistry.

0 引言

桂中地处华南腹地,为扬子板块和华夏地块的交界部位,同时也是太平洋构造域和特提斯构造域的复合部位.区内沿昆仑关深大断裂产出一条花岗岩带,自南丹至昆仑关长约 300 km.该花岗岩带与著名的丹池和大明山锡钨多金属成矿带空间展布一致,成因关系密切,引起了越来越多学者们的关注(陈毓川等,1993;王登红等,2004;蔡明海等,2004,2006;谭俊等,2008).前人对该带花岗岩的研究集中在查明岩浆活动时代、分析岩石成因类型及探讨构造背景等方面,并且北西段南丹地区研究程度较高,南东段昆仑关地区研究程度稍低.目前多数学者认同该花岗岩带形成于燕山晚期,但是对岩石成因类型及构造背景方面还存在着争议.蔡明海等(2004)、Cheng(2015)认为大厂、盲场岩体属于后碰撞花岗岩,形成过程与太平洋板块的碰撞应力传递至华南腹地有关;广西第四地质队(广西第四地质队区调分队,1992,广西 1:50 000 古零幅、两江东半幅、上林西半幅、巷贤幅区域地质调查报告)认为昆仑关花岗岩为 S 型花岗岩,岩浆来自于深部地壳的部分熔融;谭俊等(2008)认为该带为一条 Nd 质 A 型花岗岩带,形成于后碰撞阶段的张性构造环境,是印度板块北移和太平洋板块高角度俯冲共同作用的结果.可见,岩石成因、岩浆过程认识的差异也导致了构造环境认识的分歧.

昆仑关花岗岩位于南丹—昆仑关花岗岩带的南东段,前人对该岩体进行的高精度锆石 U-Pb 年代学表明其形成于燕山晚期(谭俊等,2008;乔龙,2016),岩石学和地球化学特征指示其可能为 S 型或铝质 A 型花岗岩,但对其成因模式未做深入探讨,同时尚缺乏详细的物源示踪研究(Gilder *et al.*, 1996),在一定程度上制约了对岩浆深部过程和构造背景的认识.本文选取昆仑关花岗岩进行了系统的年代学、地球化学和 Sm-Nd 同位素研究,探讨岩浆

成因、物质来源和地球动力学背景,为进一步认识桂中地区燕山晚期岩浆物质来源及动力学背景提供参考.

1 区域地质概况

研究区(大明山隆起)地处华南腹地桂中地区,大地构造位置上处于华南板块西南端,同时也是扬子板块和华夏地块交界位置的西南段(图 1).地层以寒武系复理石沉积为主,构成隆起的核部,周边为泥盆系至第四系,缺失奥陶系、志留系、侏罗系和新近系.区内构造线以 E-W 向和 NW-SE 向为主.E-W 向构造线表现为大明山复式背斜的轴向及劈理走向,为加里东期构造形迹.NW-SE 向构造表现为南丹—昆仑关深大断裂及一系列次级断裂.断裂多期活动,以脆一韧性变形为主,断裂面多倾向 SW,多为逆断层,次为正断层,兼有平移或走滑性质.

沿昆仑关断裂两侧分布有一系列酸性侵入体,包括大型花岗岩岩基和较小的花岗斑岩岩脉.岩体与钨锡多金属矿关系密切,与著名的丹池和大明山锡钨多金属成矿带展布一致.昆仑关花岗岩位于大明山隆起的东段,南丹—昆仑关花岗岩带的南东端,距南宁市北东约 40 km,面积约 340 km².岩体呈不规则等轴状展布,侵入到寒武系与泥盆系之中.NW-SE 向的南丹—昆仑关断裂切穿岩体,在与岩体的接触部位,岩体发生了明显的糜棱岩化(广西地质调查院,2011;广西 1:50 000 宾阳县幅、九塘幅、武陵幅区域地质调查报告),可能表明岩体在侵位过程中断裂发生了深层次活动.前人根据岩相学和野外地质接触关系,将昆仑关岩体划分为主体和补体(广西地质局区域地质测量队,1973;广西 1:200 000 南宁幅地质图及报告).主体为大型岩基,出露面积宽广.补体为小型侵入体,呈长轴状分布在昆仑关断裂两侧,面积约 21 km.

主体岩性为中粗粒斑状黑云母花岗岩(图 2),

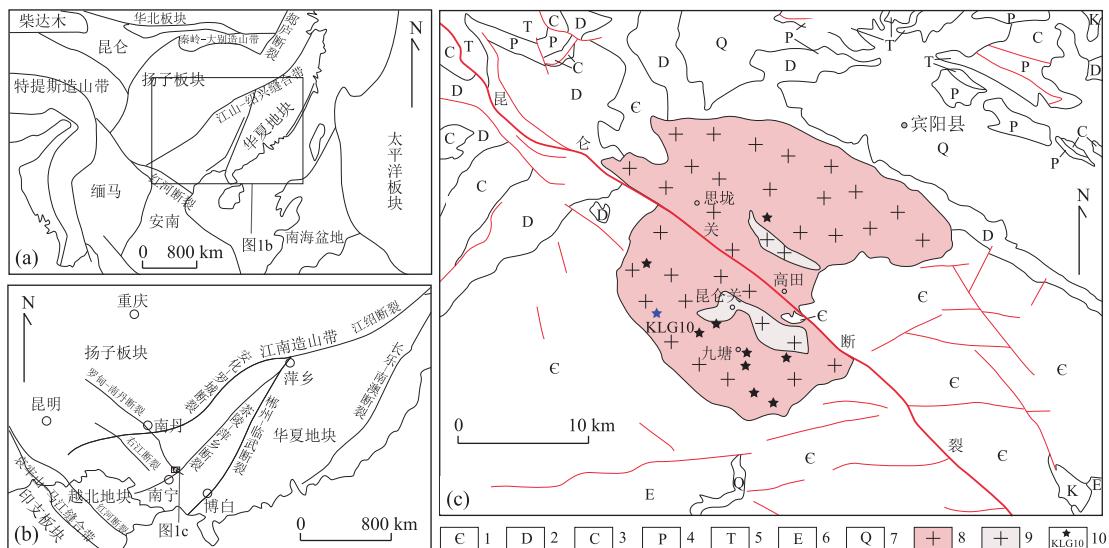


图 1 华南板块现今大地构造位置图(a);研究区大地构造位置(b);昆仑关岩体地质简图(c)

Fig.1 Simplified tectonic position of South China map (a) and Simplified tectonic position of research region (b) and Simplified geological map of Kunlunshan pluton (c)

1.寒武系;2.泥盆系;3.石炭系;4.二叠系;5.三叠系;6.古近系;7.第四系;8.主体;9.补体;10.采样位置及编号.a 据 Li et al.(2014);b 据乔龙(2016);c 据广西地质局区域地质测量队(广西地质局区域地质测量队,1973;广西 1:200 000 南宁幅地质图及报告)

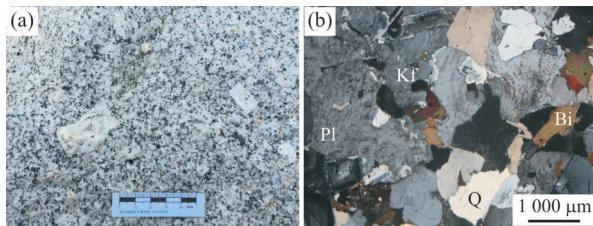


图 2 昆仑关花岗岩野外露头图(a)和镜下特征图(b)

Fig.2 Filed photograph (a) and photomicrograph (b) of the Kunlunshan granite

Kf.钾长石;Pl.斜长石;Q.石英;Bi.黑云母

局部渐变为中粗粒含角闪石黑云母花岗岩,具似斑状结构或中粗粒花岗结构,主要矿物成分为石英、钾长石、斜长石,暗色矿物为黑云母和少量角闪石。副矿物为磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石、褐帘石、白钛石、金红石,自岩体边部至中心副矿物种类和含量增多。补体在岩石类型、结构构造和矿物组成及副矿物特征方面与主体类似,仅在矿物粒度及暗色矿物的含量上有所差别,补体以中细粒斑状黑云母花岗岩为主,次为中细粒斑状含黑云母花岗岩,粒度由边部向中心变粗,暗色矿物含量减少。

对于昆仑关花岗岩的形成年龄,前人进行了高精度年代学工作,如谭俊等(2008)报道了主体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 93 ± 1 Ma, 乔龙(2016)报道了补体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 97.6 ± 0.5 Ma. 上述测年结果与大厂花岗岩的形

成年龄($91 \sim 93$ Ma;蔡明海等,2006)、大明山钨多金属矿成矿时代(95.4 ± 0.97 Ma;李水如等,2008)及大厂锡多金属矿成矿时代($93 \sim 95$ Ma;王登红等,2004;蔡明海等,2006)一致,表明南丹—昆仑关花岗岩带形成于燕山晚期,与丹池—大明山钨多金属矿成矿具有同时性.下文中所有分析样品均采自主体,文中表述统称昆仑关花岗岩.

2 样品与分析方法

2.1 样品描述

本次用于锆石定年及主、微量元素和 Sm-Nd 同位素测试的样品均采自岩体内部,样品新鲜未经蚀变.

样品为中粒斑状黑云母花岗岩及中(粗)粒斑状黑云母二长花岗岩,斑晶含量 $5\% \sim 15\%$,多者达 20% ,斑晶成分主要为正长条纹长石,呈半自形板状,粒度 $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 至 $12 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,常包裹少量自形一半自形的石英、斜长石和黑云母颗粒.基质主要由斜长石、钾长石、石英和黑云母及少量角闪石组成,斜长石为中长石($An = 37 \sim 39$),呈自形一半自形板状,含量为 $25\% \sim 45\%$,常见聚片双晶,环带构造发育,少见交代蠕虫结构;钾长石主要为正长条纹长石,次为微斜长石,含量为 $25\% \sim 40\%$,条纹呈网脉状,轻微高岭土化,粒内见少量斜长石和石英嵌晶;石英呈他形粒状,填隙状分布,含量为 20% ;

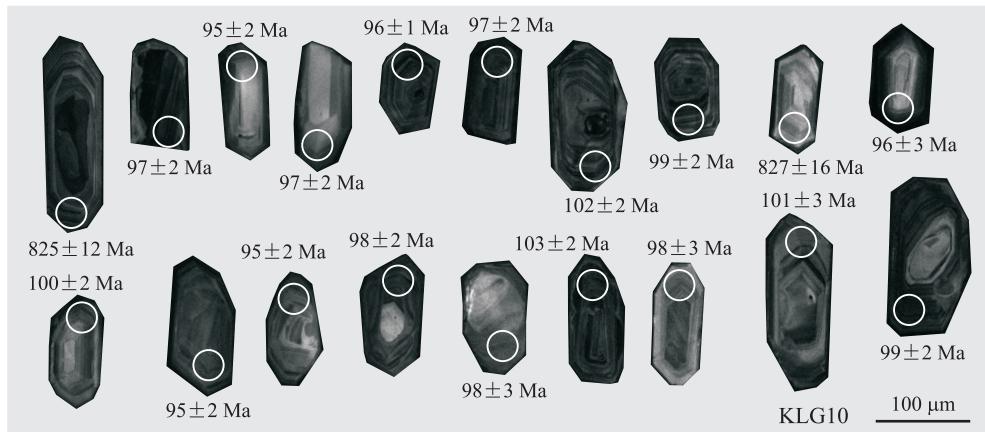


图 3 昆仑关花岗岩锆石阴极发光照片及表面年龄

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images and corresponding U-Pb apparent ages of the Kunlunuan granite

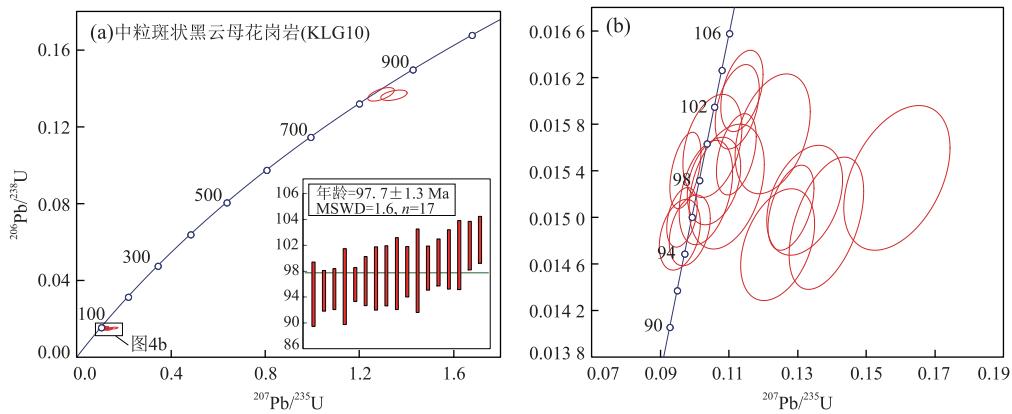


图 4 昆仑关花岗岩锆石年龄谐和图

Fig.4 U-Pb concordia diagrams for zircons from the Kunlunuan granite

黑云母呈片状或鳞片状,杂乱分布,偶见绿泥石化和绿帘石化,含量 5%~10%.部分岩石含少量的角闪石,呈半自形柱状,常被绿泥石、黑云母、碳酸盐矿物颗粒交代,含量低于 5%(图 2).

2.2 锆石 U-Pb 定年

本次用于锆石 U-Pb 定年的样品(KLG10)采于岩体南部天堂坡采场(GPS: E108°36'43"、N23°5'20"),岩性为中粒斑状黑云母二长花岗岩.锆石单矿物挑选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成.将岩石破碎,经重磁法淘洗和分选后在双目镜下挑选出代表性锆石.锆石的制靶和照相工作在武汉上谱分析科技服务有限责任公司完成.将挑选好的代表性锆石置于环氧树脂中,然后磨蚀抛光至锆石核心出露,再在锆石表面喷碳,进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相,CL 照相在高真空扫描电子显微镜(JSM-IT100)上完成.

锆石的 U-Pb 定年工作在中国冶金地质总局山东局测试中心完成,详细测试方法及流程见李凤春

等(2016).LA-ICP-MS 激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司生产的 GeoLasPro 193 nm ArF 准分子系统,ICP-MS 为 Thermo Fisher ICAPQ.激光器波长为 193 nm,束斑直径为 30 μm.采用 Plesovice(年龄为 337.00 ± 0.37 Ma; Sláma *et al.*, 2008)和 GJ-1 标准锆石(600 ± 5 Ma; Jackson *et al.*, 2004)作为外标进行基体校正;成分标样采用 NIST SRM 610,其中²⁹Si/⁹¹Zr 作为内标元素.样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICPMSDataCal(ver. 9.5)(Liu *et al.*, 2010)数据处理软件,普通铅校正采用 Andersen(2002)提出的 ComPbCorr # 3.17 校正程序,U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用 Isoplot 3.0 程序(Ludwig, 2003)完成.

2.3 全岩地球化学及同位素分析

样品全岩的主、微量元素和 Sm-Nd 同位素分析均在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成,主量元素测试仪器为 PANalytical 公司生产的 Axios 型号 X 荧光光谱仪,分析精度优于 5%;微量

表 1 昆仑关岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1 U-Pb isotopic ratios and apparent ages of zircons from the Kunlunshan granite

点号	Th (10^{-6})	U (10^{-6})	Th/ U	同位素比值				表面年龄(Ma)				谐和度 (%)						
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ						
KLG10-1	68	372	0.18	0.07013	0.00258	1.34572	0.04571	0.13650	0.00211	931.5	75.9	865.7	19.8	824.8	11.9	908.8	42.5	95
KLG10-2	438	425	1.03	0.04992	0.00336	0.10323	0.00635	0.01521	0.00037	190.8	152.8	99.8	5.8	97.3	2.3	87.4	3.3	97
KLG10-3	106	191	0.55	0.06176	0.00448	0.12413	0.00879	0.01477	0.00039	664.8	155.5	118.8	7.9	94.5	2.5	92.6	4.9	77
KLG10-4	82	183	0.45	0.06613	0.00539	0.13195	0.00899	0.01515	0.00039	810.8	170.4	125.8	8.1	96.9	2.4	97.3	5.4	74
KLG10-5	415	892	0.47	0.04634	0.00189	0.09621	0.00360	0.01500	0.00021	16.8	92.6	93.3	3.3	96.0	1.3	85.3	2.8	97
KLG10-6	585	1100	0.53	0.06190	0.00293	0.12795	0.00548	0.01509	0.00030	672.2	101.8	122.3	4.9	96.5	1.9	107.0	3.5	76
KLG10-7	604	848	0.71	0.05063	0.00229	0.11227	0.00525	0.01595	0.00030	233.4	103.7	108.0	4.8	102.0	1.9	79.3	3.1	94
KLG10-8	624	1084	0.58	0.04506	0.00164	0.09724	0.00365	0.01540	0.00027	94.2	3.4	98.5	1.7	95.5	3.3	95		
KLG10-9	118	179	0.66	0.07071	0.00524	0.13832	0.00890	0.01495	0.00046	950.0	151.9	131.5	7.9	95.7	2.9	103.7	6.0	68
KLG10-10	144	284	0.51	0.06769	0.00224	1.29135	0.04561	0.13689	0.00289	858.9	68.5	841.9	20.2	827.0	16.4	883.0	52.2	98
KLG10-11	75	421	0.18	0.05156	0.00389	0.10509	0.00698	0.01561	0.00036	264.9	174.1	101.5	6.4	99.9	2.3	111.2	8.1	98
KLG10-12	347	766	0.45	0.04616	0.00227	0.09557	0.00489	0.01485	0.00025	5.7	114.8	92.7	4.5	95.0	1.6	88.4	3.7	97
KLG10-13	395	882	0.45	0.04821	0.00247	0.09853	0.00485	0.01489	0.00025	109.4	124.1	95.4	4.5	95.3	1.6	87.5	3.6	99
KLG10-14	221	351	0.63	0.05059	0.00338	0.10558	0.00641	0.01531	0.00031	220.4	153.7	101.9	5.9	98.0	1.9	92.3	4.4	96
KLG10-15	223	161	1.39	0.08050	0.00654	0.15888	0.01267	0.01534	0.00051	1209.3	160.3	149.7	11.1	98.1	3.2	94.3	5.4	58
KLG10-16	542	1112	0.49	0.05198	0.00253	0.11371	0.00497	0.01609	0.00029	283.4	111.1	109.4	4.5	102.9	1.8	106.7	4.2	93
KLG10-17	125	261	0.48	0.05385	0.00461	0.10923	0.00893	0.01527	0.00044	364.9	189.8	105.3	8.2	97.7	2.8	108.1	7.1	92
KLG10-18	280	370	0.76	0.06025	0.00523	0.12267	0.00895	0.01572	0.00042	613.0	188.9	117.5	8.1	100.5	2.7	108.4	6.2	84
KLG10-19	644	1191	0.54	0.05242	0.00244	0.11208	0.00479	0.01554	0.00028	305.6	105.5	107.9	4.4	99.4	1.8	96.8	4.2	91

表 2 昆仑关花岗岩全岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})组成Table 2 Major (%) and trace element (10^{-6}) compositions of the Kunlunshan granite

样品	KLG02	KLG03	KLG04	KLG05	KLG06	KLG07	KLG09	KLG10	KLG11	KLG12
SiO ₂	70.12	71.36	72.52	69.78	70.75	73.36	70.24	71.33	69.42	70.34
Al ₂ O ₃	14.25	13.83	14.20	13.65	14.04	13.60	14.06	13.66	14.06	14.20
Fe ₂ O ₃	1.30	0.57	0.02	0.97	0.41	0.40	0.72	0.92	1.01	0.54
FeO	1.76	1.97	1.47	2.08	2.18	1.37	2.12	1.76	1.99	2.20
FeOT ^T	2.93	2.48	1.49	2.95	2.55	1.73	2.76	2.59	2.90	2.69
CaO	1.22	2.00	1.28	2.64	2.30	1.49	2.34	1.96	2.78	1.65
MgO	1.28	1.09	0.72	1.76	1.26	0.63	1.35	1.11	1.78	1.26
K ₂ O	4.75	4.51	5.02	4.20	4.31	4.78	4.40	4.77	4.00	4.72
Na ₂ O	3.00	3.23	3.41	3.23	3.30	3.40	3.24	2.94	3.43	3.18
TiO ₂	0.51	0.44	0.27	0.53	0.45	0.31	0.49	0.48	0.50	0.48
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.19	0.21	0.16	0.11	0.18	0.19	0.21	0.18
MnO	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.07	0.05
LOI	1.18	0.37	0.56	0.48	0.35	0.18	0.36	0.42	0.38	0.73
Total	102.52	102.07	101.17	102.53	102.12	101.39	102.31	102.18	102.51	102.22
全碱	7.75	7.74	8.43	7.43	7.61	8.18	7.64	7.71	7.43	7.90
δ	2.21	2.11	2.41	2.06	2.09	2.20	2.14	2.10	2.09	2.28
A/NK	1.41	1.35	1.28	1.38	1.39	1.26	1.39	1.36	1.41	1.37
A/CNK	1.16	1.00	1.06	0.93	0.98	1.01	0.98	1.01	0.93	1.06
R ₁	2 399	2 470	2 397	2 422	2 449	2 504	2 409	2 507	2 376	2 364
Pb	25.10	23.70	40.30	22.50	29.10	41.40	27.40	36.50	28.00	22.30
Cr	21.80	16.10	8.18	34.30	21.60	2.27	22.90	14.80	39.00	22.10
Ni	15.60	12.00	10.10	22.30	12.70	4.75	15.30	11.90	21.50	17.60
Rb	259	251	278	217	240	245	218	233	220	266
Sr	298	293	187	418	305	197	357	309	424	322
Ba	1020	821	633	817	892	771	935	1260	727	963
V	53.20	51.40	24.70	63.00	52.40	26.70	56.30	49.40	64.70	51.60
Nb	19.80	18.90	16.00	23.60	17.80	16.80	18.70	22.50	20.50	18.30
Ta	2.50	1.96	2.06	2.31	1.46	1.65	1.55	2.12	1.88	1.65
Zr	227	117	99.20	148	144	131	171	190	119	122
Hf	5.30	3.03	2.82	3.54	3.50	3.37	3.39	4.39	3.12	3.26
Ga	30.50	28.30	28.60	27.90	30.70	27.50	31.40	34.80	28.20	30.10
U	6.25	24.30	9.17	6.15	6.82	6.24	4.81	4.60	11.10	5.68
Th	22.40	26.80	19.90	30.50	30.00	27.30	26.10	36.00	29.80	26.00
La	56.80	56.00	36.30	47.70	66.60	48.40	61.40	70.60	59.70	45.40
Ce	114.00	110.00	71.70	96.90	138.00	96.50	119.00	154.00	122.00	90.00
Pr	12.30	12.10	7.91	11.00	13.60	10.60	12.70	14.50	12.70	10.10
Nd	39.26	34.93	28.71	39.06	38.39	37.45	31.11	49.06	39.54	31.62
Sm	7.27	6.54	5.94	7.08	6.75	7.20	6.00	8.25	7.40	6.03
Eu	1.30	1.28	0.85	1.38	1.23	1.00	1.30	1.43	1.42	1.27
Gd	6.44	6.42	4.39	5.81	6.30	5.73	5.91	6.81	6.62	5.52
Tb	0.94	0.93	0.62	0.84	0.86	0.86	0.83	0.89	0.94	0.81
Dy	5.23	5.19	3.07	4.62	4.44	4.82	4.41	4.52	5.10	4.47
Ho	0.99	0.96	0.52	0.89	0.82	0.90	0.82	0.82	0.98	0.86
Er	2.70	2.65	1.32	2.49	2.24	2.40	2.27	2.28	2.66	2.32
Tm	0.43	0.41	0.20	0.40	0.34	0.37	0.34	0.36	0.42	0.36
Yb	2.96	2.67	1.32	2.71	2.26	2.51	2.24	2.55	2.82	2.45
Lu	0.41	0.36	0.17	0.38	0.31	0.35	0.31	0.36	0.40	0.34
Y	24.20	25.00	13.30	23.40	21.20	23.80	21.00	21.50	25.00	21.80
Σ REE	275.23	265.44	176.32	244.66	303.34	242.89	269.64	337.93	287.70	223.35
(La/Yb) _N	12.61	13.83	18.11	11.56	19.38	12.67	18.00	18.33	13.98	12.20
δ Eu	0.53	0.53	0.51	0.62	0.51	0.45	0.58	0.55	0.57	0.61

注: FeOT^T=FeO+0.8998×Fe₂O₃; 全碱=K₂O+Na₂O; $\delta=(K_2O+Na_2O)_2/(SiO_2-43)$; A/NK=Al₂O₃/(K₂O+Na₂O); A/CNK=Al₂O₃/(CaO+K₂O+Na₂O); R₁=4×Si+11×(Na+K)+2×(Fe+Ti).

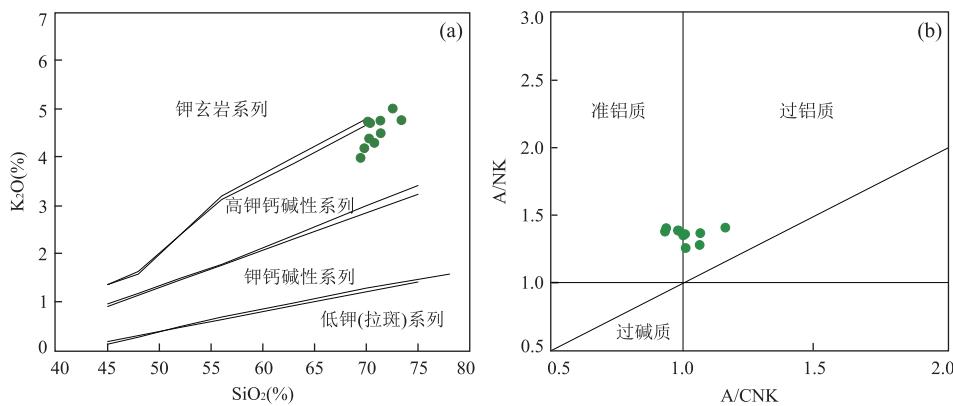
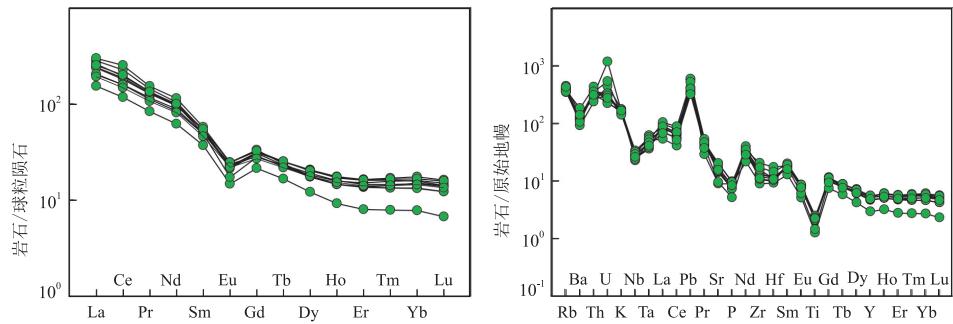
图 5 昆仑关花岗岩 SiO_2 - K_2O 图解(a)和 A/NK - A/CNK 图解(b)Fig.5 SiO_2 - K_2O diagram (a) and A/NK - A/CNK diagram of the Kunlunshan granite (b)图 a 据 Collins *et al.*(1982);图 b 据 Middlemost(1994)

图 6 昆仑关花岗岩稀土元素分配模式图及微量元素蛛网图

Fig.6 Chondrite normalized REE and primitive mantle normalized multi-element diagrams for the Kunlunshan granite

球粒陨石数据参考 Sun and McDonough(1989)

元素测试仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 X-Series II 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。数据质量通过国家标准物质 GSR-2、GSR-3、GSR-4、GSR-5、GSR-6 和 GSR-14 来进行监测, 大多数元素的分析精度优于 5%, 部分过渡族元素的分析精度优于 10%, 方法流程见 Qiu *et al.*(2011)。样品 Sm-Nd 同位素测试采用稀释剂—热电离质谱(ID-TIMS)方法完成。测试仪器为 Thermo Finnigan 公司生产的 Triton Ti 型号热电离同位素质谱仪(TIMS)。测试过程中 Sm、Nd 含量及 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值测量误差 $< 5\%$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值单次测量分析精度优于 10^{-5} , 实验全流程 Sm、Nd 本底分别为 7×10^{-11} 和 9×10^{-11} 。

3 锆石 U-Pb 年代学

锆石 CL 图像和 U-Pb 年龄谐和图分别见图 3 和图 4, 锆石 U-Pb 同位素分析数据见表 1。从图 3 上可以看出, 样品中的锆石颗粒多数呈长柱状, 少数呈短

柱状及不规则多边形状, 长 $100 \sim 220 \mu\text{m}$, 宽 $50 \sim 100 \mu\text{m}$, 均显示出较好的自形, 并具有明显的生长韵律或振荡环带结构, Th/U 比值 $0.18 \sim 1.39$, 均大于 0.1, 是典型的岩浆成因锆石(Griffin *et al.*, 2004)。

本次年代学测试共分析 21 个点, 其中两个点因置信度过低(16%、53%)被剔除, 2 颗为捕获锆石, 年龄为 $824.8 \pm 11.9 \text{ Ma}$ 、 $827 \pm 16.4 \text{ Ma}$ 。其余 17 个点均为谐和锆石, Th/U 值 $0.18 \sim 1.39$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $97.7 \pm 1.3 \text{ Ma}$ (MSWD=1.6), 代表昆仑关岩体的侵位结晶年龄, 即岩体的形成年龄。

4 昆仑关花岗岩地球化学特征

4.1 主量元素和微量元素地球化学组成

主量元素分析结果(表 2)显示岩体富硅($\text{SiO}_2 = 69.42\% \sim 72.52\%$, 均值 70.92%), 富碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.43\% \sim 8.43\%$, 均值 7.78%), 富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 $= 1.17\% \sim 1.62\%$, 均值 1.41%), 富铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.65\% \sim 14.25\%$, 均值 13.96%), 低

表 3 昆仑关花岗岩全岩 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Whole-rock Sm-Nd isotopic composition of Kunlunshan granite

样号	$\text{Sm}(10^{-6})$	$\text{Nd}(10^{-6})$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	δ	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
KLG02	7.27	39.26	0.112 1	0.512 156	0.000 002	1.57	-8.35
KLG03	6.54	34.93	0.113 2	0.512 170	0.000 003	1.55	-8.09
KLG04	5.94	28.71	0.125 2	0.512 064	0.000 003	1.73	-10.31
KLG05	7.08	39.06	0.109 6	0.512 184	0.000 002	1.53	-7.77
KLG06	6.75	38.39	0.106 3	0.512 130	0.000 004	1.61	-8.78
KLG07	7.20	37.45	0.116 4	0.512 193	0.000 005	1.52	-7.68
KLG09	6.00	31.11	0.116 7	0.512 158	0.000 002	1.57	-8.37
KLG10	8.25	49.06	0.101 7	0.512 114	0.000 002	1.63	-9.04
KLG11	7.40	39.54	0.113 2	0.512 162	0.000 001	1.56	-8.25
KLG12	6.03	31.62	0.115 4	0.512 165	0.000 003	1.56	-8.22

注: 测试数据在热电离质谱仪 Triton 上分析, 经校正后根据同位素稀释法公式计算获得; 计算 $T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 时, t 采用谐和锆石加权平均年龄 97.7 Ma; 参数: $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.213 7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513 15$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} = 0.118$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.196 7$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512 638$ (DM、CC、CHUR 分别代表亏损地幔、大陆地壳和球粒陨石均一库)。

钙($\text{CaO} = 1.20\% \sim 2.78\%$, 均值 1.97%), 低磷($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.10\% \sim 0.21\%$, 均值 0.18%), 低钛($\text{TiO}_2 = 0.27\% \sim 0.53\%$, 均值 0.47%), 里德曼指数(δ)为 $2.06 \sim 2.41$, 属钙碱性系列, 铝饱和指数 A/CNK 值为 $0.93 \sim 1.16$, 属准铝质—过铝质岩石。在图 5 中, 样品落入高钾钙碱性系列, 为准铝质—过铝质岩石。

岩体微量元素(表 2)组成上富集 Rb、Th、U、Pb, 亏损 Sr、Ba、Nb、P、Ti; 稀土元素显示轻稀土富集, 重稀土亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值 $= 11.56 \sim 19.38$, 均值 15.06 , 具明显 Eu 负异常($\delta_{\text{Eu}} = 0.45 \sim 0.61$), 分配图呈典型的“右倾”型(图 6)。稀土元素总量 $176.32 \times 10^{-6} \sim 337.93 \times 10^{-6}$, 均值 262.65×10^{-6} 。

4.2 Sm-Nd 同位素地球化学组成

昆仑关花岗岩 Sm-Nd 同位素分析结果见表 3。文中 t 采用样品 KLG10 谐和锆石加权平均年龄 97.7 Ma 来计算 Nd 同位素模式年龄值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 。为了更准确的反映岩浆形成过程及 Nd 模式年龄的有效性, 本文采用二阶段 Nd 模式年龄(T_{DM2})。计算结果为: $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.68 \sim -10.31$, $T_{\text{DM2}} = 1.52 \sim 1.73 \text{ Ga}$, 均值 1.58 Ga 。

5 讨论

5.1 A 型花岗岩的判定

地球化学分析结果显示昆仑关花岗岩高硅高钾富碱富铁低钙, 贫锶钡钛磷, 轻稀土富集, 重稀土亏损, 具明显 Eu 负异常, 分配图呈典型的“右倾”型, 显示出 A 型花岗岩的特征。在相关判别图解中均落入 A 型花岗岩区域(图 7), 10000 Ga/Al 值 $3.79 \sim$

4.81 , 大于 A 型花岗岩的最小判定值 2.6 和平均值 3.75 (Whalen *et al.*, 1987)。A 型花岗岩的判定不同于前人 S 型花岗岩的认识(广西第四地质队区调分队, 1992; 广西 1:50 000 古零幅、两江东半幅、上林西半幅、巷贤幅区域地质调查报告), 而与谭俊等(2008)的认识一致。

高分异 I 型花岗岩与 A 型花岗岩在矿物学和地球化学方面具有很大的相似性, 在对岩体进行 I-S-M-A 分类时容易造成混淆。高分异 I 花岗岩 FeO^T 值一般小于 1% , A 型花岗岩则大于 1% , 昆仑关花岗岩 FeO^T 值 $1.49\% \sim 2.95\%$, 均大于 1% 。高分异 I 型花岗岩具有更高的 Rb 含量, 一般大于 270×10^{-6} , 而昆仑关花岗岩 Rb 含量介于 $217 \times 10^{-6} \sim 278 \times 10^{-6}$, 均值 243×10^{-6} (王强等, 2000)。A 型花岗岩形成于高温条件下, 且大于高分异 I 型花岗岩(均值 764°C)(贾小辉等, 2009)。昆仑关花岗岩锆饱和温度(Watson and Harrison, 1983)计算结果为 $754 \sim 826^\circ\text{C}$, 均值 785°C , 表明昆仑关花岗岩属于高温花岗岩。值得指出的是, 对于高温花岗岩, 随着结晶作用的进行, Zr 含量随温度增高有增加的趋势, 该温度计算的是岩浆形成时的最低温度, 所以昆仑关花岗岩形成温度应大于 785°C , 类似于 A 型花岗岩。I 型花岗岩在分异的过程中, 10000 Ga/Al 比值逐渐升高, 而 A 型花岗岩与其相反(Wu *et al.*, 2017), 昆仑关花岗岩 10000 Ga/Al-Zr 表现出较明显的正相关关系(图 7), 表明岩浆在分异过程中, 10000 Ga/Al 比值逐渐降低, 符合 A 型花岗岩的特点。

5.2 岩石成因与物质来源

目前关于 A 型花岗岩的成因存在多种模式, 包括(1)幔源玄武岩浆高度结晶分异(Eby, 1990; Turner *et al.*, 1992); (2)幔源基性岩浆与壳源长英

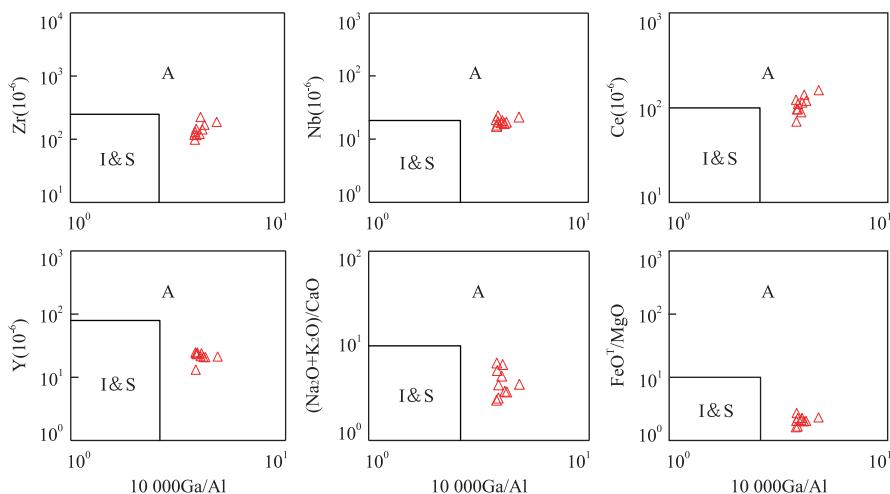


图 7 A型花岗岩判别图

Fig.7 A-type granite discrimination diagrams

据 Whalen *et al.*(1987)

质岩浆混合(Kerr and Fryer, 1993; Yang *et al.*, 2006);(3)钙碱性花岗质岩石在地壳浅部的脱水熔融(Douce and Alberto, 1997);(4)下地壳富F、Cl的麻粒岩残余体部分熔融(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987).

昆仑关花岗岩属于较大岩基,岩体周边及桂中地区都没有同时代的基性岩出露,不支持幔源玄武岩浆直接分异成因。下地壳麻粒岩残留体部分熔融形成的岩浆一般具有低Si、K、K/Na、FeOT/MgO比值(Creaser *et al.*, 1991; Wu *et al.*, 2002),而昆仑关花岗岩高Si、K、K/Na比值和较高的FeOT/MgO比值(1.63~2.72),与该模式不符。昆仑关花岗岩富硅富碱,具有明显Pb正异常,Sr、Eu、Ba的负异常、亏损高场强元素;¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd比值0.1017~0.1252,大多数≤0.1167,接近陆壳的平均值0.118, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.68 \sim -10.31$ 。上述特征说明昆仑关花岗岩岩浆更可能来源于古老长英质地壳。

昆仑关花岗岩中较多出现镁铁质暗色包体,包体呈椭圆形或不规则状产出,表现出塑性变形,说明包体不是围岩捕虏体;包体具有结晶结构,不发育变晶结构和片理构造,说明不是基底熔融残留体;包体的形成年龄(97.3 ± 3.0 Ma)和昆仑关花岗岩一致(广西地质调查院,2011;广西1:50 000宾阳县幅、九塘幅、武陵幅区域地质调查报告);暗示包体代表了地幔来源的镁铁质岩浆,昆仑关花岗岩在形成过程中有幔源岩浆的混合。此外,在Harker图解中,多种氧化物与SiO₂具有良好的线性相关关系(图8),也支持岩浆混合模式(吴福元等,2007)。

昆仑关花岗岩的 $\text{Sr} < 400 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} > 2 \times 10^{-6}$,按照张旗等(2006)的划分方案,属于低Sr高Yb花岗岩,形成于低压环境。

昆仑关花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.68 \sim -10.31$, $T_{\text{DM2}} = 1.52 \sim 1.73$ Ga,多数在1.52~1.63 Ga,均值为1.58 Ga,说明昆仑关花岗岩可能起源于古一中元古代地壳。桂东南大容山—十万大山S型花岗岩带Nd模式年龄为1.84~2.09 Ga(祁昌实等,2007),桂中及邻区同时代花岗岩的Nd同位素特征统计结果(表4)显示 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.68 \sim -10.31$,二阶段Nd模式年龄 $T_{\text{DM2}} = 1.52 \sim 1.73$ Ga,也说明该地区可能存在古一中元古代地壳。

古生代地层中碎屑锆石的研究结果表明,研究区表现出亲华夏地块属性(李青等,2009;邹和平等,2014)。华夏地块基底主要由古元古代和中元古代变质岩组成(沈渭洲,2006),古老基底岩石主要见于浙西南—闽西南一带的八都群、麻源群、龙泉群和马面山群,年龄1.6~2.9 Ga,峰值1.7~2.0 Ga;其次是桂东—粤西的高州杂岩和云开群,1.7~2.7 Ga,无明显的峰值(丁兴等,2005)。近年来,随着精细的锆石U-Pb定年技术的发展,学者们对上述古老岩石的时代归属问题有了更进一步的认识。高州杂岩和云开群中花岗岩和变质岩锆石U-Pb定年结果显示,二者同时形成于新元古代—早古生代(Wan *et al.*, 2010)。锆石U-Pb定年结果显示,龙泉群和马面山群都形成于新元古代或新元古代—早古生代时期(向华,2008; Zhang *et al.*, 2013),而八都群中花岗岩锆石U-Pb定年结果证实八都群的形成时代为古

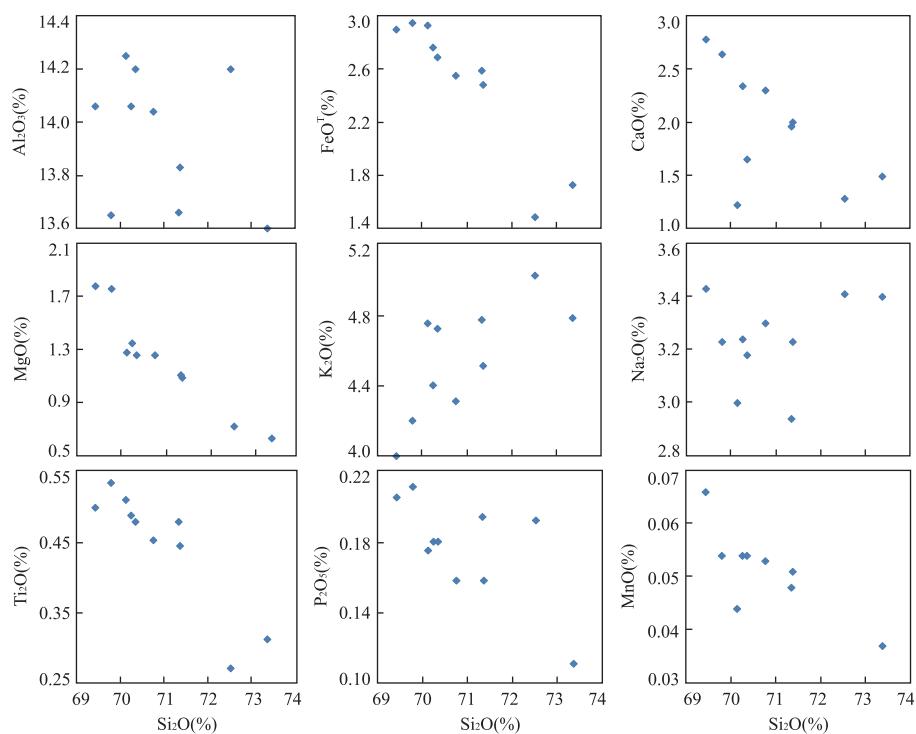


图 8 昆仑关花岗岩 Harker 图解

Fig.8 Harker diagrams of Kunlunshan granite

表 4 桂中及邻区花岗岩类及变沉积岩的 Nd 同位素特征统计结果

Table 4 Nd isotopic characteristics of granitoid rocks and meta-sedimentary rocks in Central Guangxi and adjacent area

位置	岩性	年龄(Ma)	T _{DM2} (Ga)	ε _{Nd(t)}	参考文献
昆仑关岩体古单元	斑状黑云母花岗岩	97.7±1.3	1.52~1.63	-7.68~-10.31	本文
龙头山	潜火山岩	96.1±3.0	1.45~1.49	-6.86~-7.39	段瑞春等, 2011
平天山岩体	中酸性侵入岩	96.2±0.4	1.43~1.50	-6.64~-7.38	段瑞春等, 2011
三叉冲岩体	黑云母花岗岩、二云母花岗岩	101~105	1.43~1.55	-6.50~-7.80	王炯辉等, 2014
德庆、新华、调村、马鞍山岩体	二长花岗岩、花岗闪长岩、流纹英安岩	99~104	1.78~1.82	-9.18~-11.39	耿红燕等, 2006
大容山岩体	S型花岗岩	233±5	2.06~2.09	-12.6~-13.0	祁昌实等, 2007
高州杂岩和云开群	变沉积岩	440	1.91~2.17	-10.0~-13.4	Wan et al., 2010
云开地区	片麻状花岗岩	440	2.13~1.42	-1.2~-8.4	Wan et al., 2010

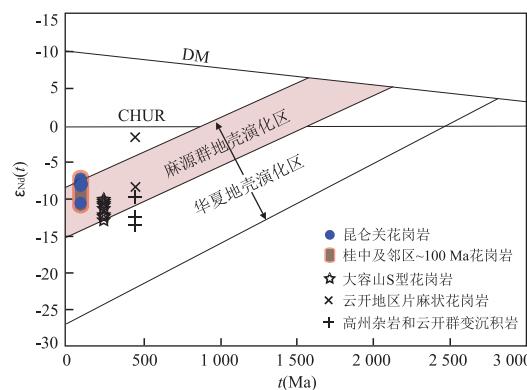
元古代(>1.8 Ga; Yu et al., 2012; Zhao et al., 2014). 麻源群与八都群具有相似的变沉积记录, 说明麻源群和八都群均形成于古元古代, 二者代表了华夏地块最古老基底岩系(Zhao et al., 2014).

麻源群为一套中浅变质岩系, 岩性组合包括变粒岩、斜长角闪岩、云母(石英)片岩、片麻岩, 呈互层产出, Sm-Nd 等时线年龄为 2116±22 Ma, ε_{Nd(t)} 为 7.29±0.17(袁忠信等, 1991). 在图 9 中, 昆仑关花岗岩基本都落入了麻源群地壳演化范围内, 2 个点落在麻源群地壳演化线和原始地幔演化线之间, 并且 ε_{Nd(t)} 整体较高州杂岩、云开群和大容山岩体偏高, 表明昆仑关花岗岩可能来源于以麻源群为代表的华夏古元古代地壳, 形成过程中有一定的幔源组分的加入.

综上所述, 笔者认为昆仑关 A 型花岗岩是在高温、低压条件下, 由古元古代华夏基底长英质地壳部分熔融形成, 并伴有幔源岩浆不均一的混合作用.

5.3 构造环境与构造机制

一般认为, A 型花岗岩形成于伸展构造环境(Loiselle and Wones, 1979; Eby, 1992; 洪大卫等, 1995). Eby(1992)将 A 型花岗岩划分为 A₁ 型和 A₂ 型, A₁ 型形成于裂谷、地幔柱或热点环境, 代表板内的伸展环境; A₂ 型形成于后造山、后碰撞环境, 是造山末期的伸展环境, 代表造山作用的结束. 洪大卫等(1995)将碱性花岗岩(以 A 型花岗岩为代表)划分为 PA 型和 AA 型, 二者与 Eby(1992)的划分方案具有良好的对应性: AA 型是大陆裂谷环境下地幔物质长期演化的产物, 而 PA 型形成于板块俯冲或

图 9 桂中及邻区花岗岩类及变沉积岩的 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ Fig.9 $t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of granitoid rocks and meta-sedimentary rocks in Central Guangxi and adjacent areas

底图据 Chen and Jahn(1998)

碰撞作用之后,昆仑关花岗岩在 Nb-Y-Ce 图解中基本落入 A_2 区域(图 10a),在 R_1 -10 000 Ga/Al 图解中落入 PA 区域(图 10b),在 Rb-(Y+Nb)图解中落入后碰撞区域(图 10c),说明昆仑关 A 型花岗岩形成于后碰撞阶段的伸展构造背景下,桂中地区在燕山晚期处于后碰撞伸展构造环境。

桂中及邻区燕山期岩浆活动主要分布在桂东北、桂中和桂东南—粤西地区。其中燕山早期岩浆活动以(中)酸性为主,包括桂东南—粤西钾玄岩和花岗岩,桂北大瑶山花岗闪长岩,活动时代为 170~150 Ma(Li, 2000; 陈懋弘等, 2015)。桂东南钾玄质侵入岩带地球化学特征与板内或裂谷钾玄岩相似,形成于板内软流圈上涌和岩石圈伸展背景之下(Li, 2000)。燕山晚期以酸性岩浆活动为主,区域上表现出 I、A 型花岗岩共存,侵入岩与火山岩共生、与成矿作用同时、与深大断裂展布一致的特点,如桂中南

丹—昆仑关花岗岩带、桂东南花岗岩和桂北大瑶山 I 型花岗岩和潜火山岩,活动时代为 100~90 Ma(表 5)。昆仑关 A_2 型(或 PA 型)花岗岩说明桂中地区在燕山晚期处于后碰撞伸展构造环境,粤西火山—侵入杂岩也被认为形成于后碰撞伸展构造环境(耿红燕等, 2006)。由此认为,桂中及邻区在燕山早期(170~150 Ma)处于板内伸展构造环境,而在燕山晚期(100~90 Ma)处于后碰撞伸展构造环境。

桂中及邻区燕山期岩浆活动是华南中生代岩浆活动的一部分。前人为解释华南中生代岩浆活动提出了多种动力学模型,其中多数学者认同与古太平洋板块俯冲有关,但是对俯冲时间、俯冲方式以及影响范围等方面还存在争议(Zhou et al., 2006; Li and Li, 2007; Sun et al., 2007; Wang et al., 2011; Li et al., 2014; 孙洋等, 2017; 李鹏等, 2017)。综合考虑本地区燕山期岩浆活动特点,认为它们的形成过程可能如下。

早侏罗世以来(200~175 Ma),古太平洋板块以平板或低角度向 NW 欧亚大陆南缘俯冲,俯冲形成的挤压应力通过华南刚性块体传递到腹地,使得华南腹地先存构造重新活动(Zhou et al., 2018)。中侏罗世(170~150 Ma),古太平洋板块持续向华南板块之下俯冲,在深部表现为挤压应力,而在浅部,先存构造大量活化,表现为伸展应力,该应力状态类似于花状构造(Zhou et al., 2006)。深部的挤压、浅部的伸展与构造活化导致玄武岩浆底侵和地壳重熔,形成板内裂谷型岩浆活动(Zhou et al., 2006; 周佐民, 2015)。140~120 Ma,俯冲板块发生回撤(周佐民, 2015)。117~108 Ma, 西菲律宾板块与亚洲大陆发生碰撞(Charvet et al., 1994; Li et al., 2014),

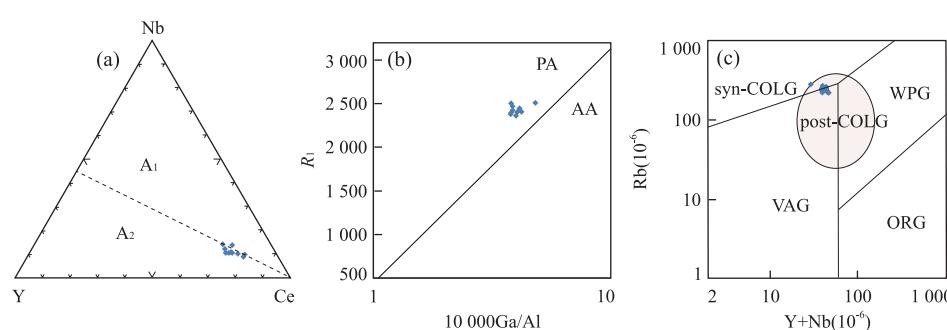
图 10 昆仑关花岗岩 Nb-Y-Ce 图解(a); R_1 vs 10 000 Ga/Al 图解(b); Rb vs (Y+Nb)图解(c)

Fig.10 Nb-Y-Ce diagram (a) and R_1 vs 10 000 Ga/Al diagram (b) and Rb vs (Y+Nb) diagram (c) of Kunlunshan granite
 A_1 . 大陆裂谷、地幔柱或热点环境; A_2 . 后碰撞、后造山环境; AA. 非造山; PA. 后造山; syn-COLG. 同碰撞花岗岩; WPG. 板内花岗岩; ORG. 洋脊花岗岩; post-COLG. 后碰撞花岗岩; VAG. 火山弧花岗岩; 图 a 据 Eby(1992); 图 b 据洪大卫等(1995); 图 c 据 Pearce et al.(1984)

表 5 研究区及邻区 100~90 Ma 岩浆事件统计

Table 5 100~90 Ma igneous events in research and adjacent area

年龄(Ma)	矿物	方法	岩性	断裂	产地	地区	地点	来源
97.7±1.3	锆石	LA-ICP-MS	斑状黑云母花岗岩	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	大明山	昆仑主体	本文
93±1	锆石	LA-ICP-MS	黑云母花岗岩	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	大明山	昆仑主体	谭俊等,2008
97.6±0.5	锆石	LA-ICP-MS	黑云母花岗岩	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	大明山	昆仑主体	乔龙,2016
93±1	锆石	SHRIMP	含砾黑云母花岗岩	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	大明山	昆仑主体	蔡明海等,2006
91±1	锆石	SHRIMP	斑状花岗岩	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	丹池成矿带	丹池成矿带	蔡明海等,2006
91±1	锆石	SHRIMP	石英闪长玢岩脉	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	丹池成矿带	丹池成矿带	蔡明海等,2006
91±1	锆石	SHRIMP	花岗斑岩脉	南丹—昆仑关断裂	NW-SE	丹池成矿带	丹池成矿带	蔡明海等,2006
103.3±2.4	锆石	SHRIMP	流纹斑岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	金矿	大瑞山	陈富文等,2008
100.3±1.4	锆石	SHRIMP	花岗斑岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	金矿	大瑞山	陈富文等,2008
96.1±3.0	锆石	LA-ICP-MS	潜火山岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	金矿	大瑞山	段瑞春等,2011
96.2±0.4	锆石	LA-ICP-MS	中酸性侵入岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	金矿	大瑞山	段瑞春等,2011
98.3±0.6	锆石	LA-ICP-MS	中酸性侵入岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	金矿	大瑞山	平天山
102.8±0.9	锆石	LA-ICP-MS	石英二长岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	铜钼矿	大瑞山	胡升奇等,2012
101.7±1.2	锆石	LA-ICP-MS	石英二长斑岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	铜钼矿	大瑞山	胡升奇等,2012
95.3±1.5	锆石	LA-ICP-MS	花岗斑岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	秦亚等,2015
90~91	锆石	LA-ICP-MS	花岗斑岩	凭祥—大黎断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	毕诗健等,2015
99±2	锆石	LA-ICP-MS	二长花岗岩	连县—郁南断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	耿红燕等,2006
101±7	锆石	LA-ICP-MS	花岗闪长岩	连县—郁南断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	耿红燕等,2006
104±3	锆石	LA-ICP-MS	花岗闪长岩	连县—郁南断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	耿红燕等,2006
103.3±2.4	锆石	LA-ICP-MS	流纹英安岩	连县—郁南断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	耿红燕等,2006
100.7±0.5	锆石	LA-ICP-MS	白云母花岗岩	博白—梧州断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	王烟辉等,2014
103±1	锆石	LA-ICP-MS	黑云母花岗岩	博白—梧州断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	杨振等,2014
95.1±0.4	锆石	LA-ICP-MS	花岗岩	博白—梧州断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	乔龙,2016
90.2±1.5	锆石	LA-ICP-MS	石英二长斑岩	博白—梧州断裂	NE-SW	铜钨矿	大瑞山	王晓地等,2017

这与华南古构造应力场表现为 NW-SE 向挤压, 出现岩浆宁静期特点相符 (Li *et al.*, 2014). 100~90 Ma, 桂中及邻区的岩浆活动说明华南腹地造山作用结束, 可能伴随造山带的垮塌, 岩石圈发生拉张, 进而进入后碰撞伸展构造环境。

6 结论

(1) 昆仑关花岗岩侵位年龄为 97.7 ± 1.3 Ma, 形成于白垩纪, 属燕山晚期岩浆活动的产物。

(2) 昆仑关花岗岩是形成于低压、高温条件下的 A 型花岗岩, 岩浆起源于古元古代华夏基底的部分熔融, 并伴有幔源岩浆的混合作用。

(3) 桂中及邻区在 100~90 Ma 期间经历了一次重要的岩石圈拉张事件。

致谢: 非常感谢三位匿名审稿专家对本文提出的建设性修改意见!

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192 (1~2): 59~79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Bi, S.J., Yang, Z., Li, W., et al., 2015. Discovery of Late Cretaceous Baoshan Porphyry Copper Deposit in Dayao-shan, Qinhang Metallogenic Belt: Constraints from Zircon U-Pb Age and Hf Isotope. *Earth Science*, 40(9): 1458~1479 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.132>
- Cai, M.H., He, L.Q., Liu, G.Q., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Intrusive Rocks in the Dachang Tin-Polymetallic Ore Field, Guangxi and Their Geological Significance. *Geological Review*, 52(3): 409~414 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2006.03.019>
- Cai, M.H., Liang, T., Wu, D.C., et al., 2004. Geochemical Characteristics of Granites and Their Tectonic Setting of Dachang Ore Field in Guangxi. *Geotectonica et Metallogenesis*, 28(3): 306~313 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2004.03.011>
- Charvet, J., Lapierre, H., Yu, Y.W., 1994. Geodynamic Significance of the Mesozoic Volcanism of Southeastern China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 387~396. [https://doi.org/10.1016/0743-9547\(94\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0743-9547(94)90050-7)
- Chen, F.W., Li, H.Q., Mei, Y.P., 2008. Zircon SHRIMP U-Pb Chronology of Diagenetic Mineralization of the Longtoushan Porphyry Gold Orefield, Gui County, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 921~926 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2008.07.009>
- Chen, J.F., Jahn, B.M., 1998. Crustal Evolution of Southeastern China: Nd and Sr Isotopic Evidence. *Tectonophysics*, 284(1~2): 101~133. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(97\)00186-8](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(97)00186-8)
- Chen, M.H., Li, Z.Y., Li, Q., et al., 2015. A Preliminary Study of multi-stage Granitoids and Related Metallogenic Series in Dataoshan Area of Guangxi, China. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 41~53 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13745/j.esf.2015.02.004>
- Chen, Y.C., Huang, M.Z., Xu, Y., et al., 1993. *Tin Ore Geology in Dachang*. Geology Publishing House, Beijing, 1~361 (in Chinese).
- Cheng, Y.S., 2015. Geochemistry of Intrusive Rock in Dachang Tin-Polymetallic Ore Field, Guangxi, China: Implications for Petrogenesis and Geodynamics. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(1): 284~292. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(15\)63603-2](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(15)63603-2)
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., et al., 1982. Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189~200. <https://doi.org/10.1007/bf00374895>
- Creaser, R.A., Price, R.C., Wormald, R.J., 1991. A-Type Granites Revisited: Assessment of a Residual-Source Model. *Geology*, 19(2): 163. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<163>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<163>2.3.co;2)
- Ding, X., Zhou, X.M., Sun, T., 2005. The Episodic Growth of the Continental Crustal Basement in South China: Single Zircon LA-ICPMS Dating of Guzhi Granodiorite in Guangdong. *Geological Reviews*, 51(4): 382~392 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2005.04.004>
- Douce, P., Alberto, E., 1997. Generation of Metaluminous A-Type Granites by Low-Pressure Melting of Calc-Alkaline Granitoids. *Geology*, 25(8): 743. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<743>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<743>2.3.co;2)
- Duan, R.C., Ling, W.L., Li, Q., et al., 2011. Correlations of the Late Yanshanian Tectonomagmatic Events with Metallogenesis in South China: Geochemical Constraints from the Longtoushan Gold Orefield of the Dayao-shan Area, Guangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(10): 1644~1658 (in Chinese with English abstract).

- <https://doi.org/10.1951/P.20110923.1427.005>
- Eby, G.N., 1990. The A-Type Granitoids: A Review of their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on Their Petrogenesis. *Lithos*, 26(1/2): 115–134. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90043-z](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90043-z)
- Eby, G.N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020)
- Geng, H.Y., Xu, X.S., O'Reilly, S.Y., et al., 2006. Cretaceous Volcanic-Intrusive Magmatism in Western Guangdong and Its Geological Significance. *Science in China (Series D)*, 36(7): 601–617 (in Chinese).
- Gilder, S.A., Gill, J., Coe, R.S., et al., 1996. Isotopic and Paleomagnetic Constraints on the Mesozoic Tectonic Evolution of South China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B7): 16137–16154. <https://doi.org/10.1029/96jb00662>
- Griffin, W.L., Belousova, E.A., Shee, S.R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3–4): 231–282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Hong, D.W., Wang, S.G., Han, B.F., et al., 1995. Tectonic Setting Classification and Discrimination Criteria for Alkaline Granites. *Science in China (Series B)*, 25(4): 418–426 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S.Q., Zhou, G.F., Peng, S.B., et al., 2012. Chronology and Geochemical Characteristics of Quartz Monzonite (Porphyry) in the Dali Copper-Molybdenum Deposit and Its Geological Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(1): 23–37 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3975/cagsb.2012.01.04>
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211(1–2): 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Jia, X.H., Wang, Q., Tang, G.J., 2009. A-Type Granites: Research Progress and Implications. *Geotectonica et Metallogenesis*, 33(3): 465–480 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1552.2009.03.017>
- Kerr, A., Fryer, B.J., 1993. Nd Isotope Evidence for Crust–Mantle Interaction in the Generation of A-Type Granitoid Suites in Labrador, Canada. *Chemical Geology*, 104(1–4): 39–60. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90141-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90141-5)
- Li, F.C., Hou, M.L., Luan, R.J., et al., 2016. Optimization of Analytical Conditions for LA-ICP-MS and Its Application to Zircon U-Pb Dating. *Rock and Mineral Analysis*, 35(1): 17–23 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.2016.01.004>
- Li, J.H., Zhang, Y.Q., Dong, S.W., et al., 2014. Cretaceous Tectonic Evolution of South China: A Preliminary Synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98–136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.008>
- Li, P., Li, J.K., Pei, R.F., et al., 2017. Multistage Magmatic Evolution and Cretaceous Peak Metallogenic Epochs of Mufushan Composite Granite Mass: Constrains from Geochronological Evidence. *Earth Science*, 42(10): 1684–1696 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.114>
- Li, Q., Duan, R.C., Ling, W.L., et al., 2009. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of the Early Paleozoic Strata in Eastern Guangxi and Its Constraint on the Caledonian Tectonic Nature of the Cathaysian Continental Block. *Earth Science*, 34(1): 189–202 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2009.01.017>
- Li, S.R., Wang, D.H., Li, T., et al., 2008. Metallogenic Epochs of the Damingshan Tungsten Deposit in Guangxi and Its Prospecting Potential. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 873–879 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293–305. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(99\)00060-7](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(99)00060-7)
- Li, Z.X., Li, X.H., 2007. Formation of the 1 300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179. <https://doi.org/10.1130/g23193a.1>
- Liu, Y., 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. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Loiselle, M.C., Wones, D.R., 1979. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America*, 11(7): 468.
- Ludwig, K.R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Middlemost, E.A.K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)

- Pearce, J.A., Harris, N.B., Tindle, A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Qi, C.S., Deng, X.G., Li, W.X., et al., 2007. Origin of the Dabongshan-Shiwandashan S-Type Granitoid Belt from Southeastern Guangxi: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 403—412 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2007.02.019>
- Qiao, L., 2016. Tectonic Evolution and Bauxite Metallogenesis in the Youjiang Basin and Adjacent Area (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Zhang, Q.W., Kang, Z.Q., et al., 2015. Geochronological Framework of Granitoids in Dayaoshan Metallogenic Belt, Eastern Guangxi Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(6): 1735—1756 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.201506115>
- Qiu, X.F., Ling, W.L., Liu, X.M., et al., 2011. Recognition of Grenvillian Volcanic Suite in the Shennongjia Region and Its Tectonic Significance for the South China Craton. *Precambrian Research*, 191(3—4): 101—119. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.011>
- Shen, W.Z., 2006. Sm-Nd Isotopic Study of Basement Metamorphic Rocks in South China and Its Constraint on Material Sources of Granitoids. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 475—482 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7493.2006.04.008>
- Sláma, J., Kosler, J., Condon, D.J., et al., 2008. Plesovice Zircon-A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1—2): 1—35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun, W. D., Ding, X., Hu, Y. H., et al., 2007. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3—4): 533—542. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.08.021>
- Sun, Y., Ma, C.Q., Liu, B., 2017. Record of Late Yanshanian Mafic Magmatic Activity in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt. *Earth Science*, 42(6): 891—908 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2017.06.008>
- Tan, J., Wei, J.H., Li, S.R., et al., 2008. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Kunlunguan A-Type Granite, Guangxi. *Earth Science*, 33(6): 743—754 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2008.06.002>
- Turner, S., Foden, J., Morrison, R., 1992. Derivation of Some A-Type Magmas by Fractionation of Basaltic Magma: An Example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2): 151—179. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90029-X](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90029-X)
- Wan, Y.S., Liu, D.Y., Wilde, S.A., et al., 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP Zircon U-Pb Dating, Geochemistry and Nd Isotope. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37: 140—153. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2009.08.002>
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Chen, W., et al., 2004. Dating the Dachang Giant Tin-Polymetallic Deposit in Nandan, Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 78: 132—138 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:0001-5717.2004.01.015>
- Wang, F., Y., Ling, M., X., Ding, X., et al., 2011. Mesozoic Large Magmatic Events and Mineralization in SE China: Oblique Subduction of the Pacific Plate. *International Geology Review*, 52(5—6): 704—726. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(97\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00037-X)
- Wang, J. H., Ma, X. H., Li, Y., et al., 2014. Petrogenesis of Granitic Complexes and Implications for the W-Mo Mineralization: A Case Study from the Youmapo Pluton, Guangxi Province. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1219—1235 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2005. Geochronology of Cretaceous A-type Granitoids or Alkaline Intrusive Rocks in the Hinterland, South China; Constraint for Late-Mesozoic Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795—808 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2005.03.019>
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Xiong, X. L., 2000. The Ascertainment of Late-Yanshanian A-Type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 297—306 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.D., Zhang, L.G., Jia, X. H., 2017. A Study of Geochronology, Geochemistry and Genesis of Maqigang Beschtauite Pluton, South Eastern Guangxi. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 761—771 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2552.2017.05.008>

- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64 (2): 295 – 304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X)
- Whalen, J. B., Currie K. L., Chappell B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407 – 419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2007.06.001>
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science China Earth Sciences*, 60: 1201 – 1219. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1>
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on Their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187 (1 – 2): 143 – 173. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00018-9)
- Xiang, H., 2008. Phanerozoic Metamorphism of Precambrian Metamorphic Basement in Southwestern Zhejiang (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Wu, F. Y., Chung, S. L., et al., 2006. A Hybrid Origin for the Qianshan A-type Granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, 89(1–2): 89 – 106. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.10.002>
- Yang, Z., Liu, R., Wang, X. N., et al., 2014. Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshanian Granites in Yunkai Area, Southeast China: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes. *Earth Science*, 39(9): 1258 – 1276 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.108>
- Yu, J. H., O'Reilly, S. Y., Zhou, M. F., 2012. U-Pb Geochronology and Hf-Nd Isotopic Geochemistry of the Badu Complex, Southeastern China: Implications for the Precambrian Crustal Evolution and Paleogeography of the Cathaysia Block. *Precambrian Research*, 222 – 223: 424 – 449. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.014>
- Yuan, Z. X., Wu, L. S., Zhang, Z. Q., 1991. The Sm-Nd, Rb-Sr Isotopic Age-Dating of Mayuan Group in Northern Fujian. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 10(2): 127 – 132 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D., Wu, G. G., Di, Y. J., 2013. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology and Nd-Sr Isotopic Study of the Mami-anshan Group: Implications for the Neoproterozoic Tectonic Development of Southeast China. *International Geology Review*, 55(6): 730 – 748. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.734454>
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis for Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249 – 2269 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0569.2006.09.001>
- Zhao, L., Zhou, X. W., Zhai, M. G., et al., 2014. Paleoproterozoic Tectonic Transition from Collision to Extension in the Eastern Cathaysia Block, South China: Evidence from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Nd-Hf Isotopes of A Granite-Charnockite Suite in Southwestern Zhejiang. *Lithos*, 184 – 187: 259 – 280. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.11.005>
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1): 26 – 33.
- Zhou, Z. M., 2015. Late Mesozoic Polycyclic Tectono-Magmatic Evolution and Forming Mechanism of the Geothermal Systems in South China-New Constraints from Typical Plutons in Guangdong Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. M., Ma, C. Q., Wang, L. X., 2018. A Source-Depleted Early Jurassic Granitic Pluton from South China: Implication to the Mesozoic Juvenile Accretion of the South China Crust. *Lithos*, 300 – 301: 278 – 290. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.11.017>
- Zou, H. P., Du, X. D., Lao, M. J., et al., 2014. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Cambrian Sandstones in Damingshan, Central Guangxi and Its Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1800 – 1819 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕诗健, 杨振, 李巍, 等, 2015. 钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床: 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素制约. 地球科学, 40(9): 1458 – 1479.
- 蔡明海, 何龙清, 刘国庆, 等, 2006. 广西大厂锡矿田侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 52(3): 409 – 414.
- 蔡明海, 梁婷, 吴德成, 等, 2004. 桂西北丹池成矿带花岗岩地球化学特征及其构造意义. 大地构造与成矿学, 28(3):

306—313.

陈富文,李华芹,梅玉萍,2008.广西龙头山斑岩型金矿成岩成矿锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究.地质学报,82(7): 921—926.

陈懋弘,李忠阳,李青,等,2015.初论广西大瑶山地区多期次花岗质岩浆活动与成矿系列.地学前缘,22(2): 41—53.

陈毓川,黄民智,徐钰,等,1993.大厂锡矿地质.北京:地质出版社.

丁兴,周新民,孙涛,2005.华南陆壳基底的幕式生长——来自广东古寨花岗闪长岩中锆石 LA-ICPMS 定年信息.地质论评,51(4): 382—392.

段瑞春,凌文黎,李青,等,2011.华南燕山晚期构造—岩浆事件与成矿作用:来自广西大瑶山龙头山金矿床的地球化学约束.地质学报,85(10): 1644—1658.

耿红燕,徐夕生,O'Reilly, S.Y.,等,2006.粤西白垩纪火山—侵入岩浆活动及其地质意义.中国科学(D辑),36(7): 601—617.

洪大卫,王式洸,韩宝福,等,1995.碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志.中国科学(B辑),25(4): 418—426.

胡升奇,周国发,彭松柏,等,2012.广西大黎铜钼矿石英二长(斑)岩年代学、地球化学特征及其地质意义.地球学报,33(1): 23—37.

贾小辉,王强,唐功建,2009.A型花岗岩的研究进展及意义.大地构造与成矿学,33(3): 465—480.

李凤春,侯明兰,栾日坚,等,2016.电感耦合等离子体质谱仪与激光器联用测量条件优化及其在锆石 U-Pb 定年中的应用.岩矿测试,35(1): 17—23.

李鹏,李建康,裴荣富,等,2017.幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰:年代学依据.地球科学,42(10): 1684—1696.

李青,段瑞春,凌文黎,等,2009.桂东早古生代地层碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学及其对华夏陆块加里东期构造事件性质的约束.地球科学,34(1): 189—202.

李水如,王登红,梁婷,等,2008.广西大明山钨矿区成矿时代及其找矿前景分析.地质学报,82(7): 873—879.

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.岩石学报,23(2): 403—412.

乔龙,2016.右江盆地及其周缘地区构造演化及铝土矿成矿

作用(学位论文).北京:中国地质大学.

秦亚,张青伟,康志强,等,2015.桂东大瑶山成矿带花岗岩类岩石年代学格架的厘定.吉林大学学报:地球科学版,45(6): 1735—1756.

沈渭洲,2006.华夏地块基底变质岩同位素年龄数据评述.高校地质学报,12(4): 475—482.

孙洋,马昌前,刘彬,2017.长江中下游地区燕山晚期基性岩浆活动的记录.地球科学,42(6): 891—908.

谭俊,魏俊浩,李水如,等,2008.广西昆仑关 A型花岗岩地球化学特征及构造意义.地球科学,33(6): 743—754.

王登红,陈毓川,陈文,等,2004.广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代.地质学报,78: 132—138.

王炯辉,马星华,李毅,等,2014.花岗质复式岩体成因及其与 W-Mo 成矿的关系——以广西油麻坡岩体为例.地质学报,88(7): 1219—1235.

王强,赵振华,简平,等,2005.华南腹地白垩纪 A型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约.岩石学报,21(3): 795—808.

王强,赵振华,熊小林,2000.桐柏一大别造山带燕山晚期 A型花岗岩的厘定.岩石矿物学杂志,19(4): 297—306.

王晓地,张利国,贾小辉,2017.桂东南马其岗石英二长斑岩年代学、地球化学特征及成因.地质通报,36(5): 761—771.

吴福元,李献华,杨进辉,等,2007.花岗岩成因研究的若干问题.岩石学报,23(6): 1217—1238.

向华,2008.浙西南前寒武纪变质基底岩系显生宙变质作用研究(硕士学位论文).武汉:中国地质大学.

杨振,刘锐,王新宇,等,2014.云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义:锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素证据.地球科学,39(9): 1258—1276.

袁忠信,吴良士,张宗清,等,1991.闽北麻源群 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年龄研究.岩石矿物学杂志,10(2): 127—132.

张旗,王焰,李承东,等,2006.花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义.岩石学报,22(9): 2249—2269.

周佐民,2015.华南晚中生代多旋回构造—岩浆演化及地热成因机制——来自广东典型岩体的制约(博士学位论文).武汉:中国地质大学.

邹和平,杜晓东,劳妙姬,等,2014.广西大明山地块寒武系碎屑锆石 U-Pb 年龄及其构造意义.地质学报,88(10): 1800—1819.