

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.01.003

桂东南晚中生代陆川岩体的成因及其构造意义

吴高逊^{1,2,3}, 王磊^{1,2*}, 金鑫鏢¹, 周岱¹, 龙文国¹, 贾小辉¹

WU Gao-Xun^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2*}, JIN Xin-Biao¹, ZHOU Dai¹, LONG Wen-Guo¹, JIA Xiao-Hui¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国长江三峡集团上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., China Three Gorges Corporation, Shanghai 200434, China

摘要:桂东南晚中生代岩浆活动与古太平洋板块俯冲密切相关。本文对桂东南陆川岩体开展了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、岩石地球化学和Sr-Nd-Hf同位素研究,获得陆川岩体黑云母二长花岗岩(主体)和花岗细晶岩的形成年龄分别为 104.8 ± 0.8 Ma和 103.9 ± 1.0 Ma,属于早白垩世。地球化学特征上,二者均属于准-弱过铝质、高钾钙碱性岩石系列,富集轻稀土、大离子亲石元素(如Rb、Ba、Th)而亏损高场强元素(如Nb、Ta、P),具较明显的Eu负异常、高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ ($0.708600 \sim 0.709158$)和低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-7.46 \sim -7.05$)等特征。二者 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 $-4.8 \sim +0.7$ (平均 -2.36)和 $-3.8 \sim +1.2$ (平均 -2.45),对应的Hf同位素两阶段模式年龄($T_{\text{DM}2}$)分别为 $0.99 \sim 1.30$ Ga和 $0.96 \sim 1.24$ Ga,与Nd同位素模式年龄($T_{\text{DM}2}$) ($1.29 \sim 1.30$ Ga和 $1.27 \sim 1.28$ Ga)基本一致。元素及同位素结果表明,岩石源区主要为中元古代晚期的壳源变质杂砂岩,可能有少量地幔物质的加入。结合区域地质资料,认为陆川岩体形成于早白垩世晚期古太平洋板块向华南板块俯冲/后撤导致的弧后伸展背景,华南地区同期(110~90 Ma)岩浆活动的西北边界大致位于北东向博白-岑溪断裂带一线。

关键词: 锆石; LA-ICP-MS U-Pb定年; Sr-Nd-Hf同位素; 晚中生代; 陆川岩体; 桂东南

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)01-0037-17

Wu G X, Wang L, Jin X B, Zhou D, Long W G and Jia X H. 2023. Petrogenesis and Its Tectonic Significance of Late Mesozoic Luchuan Intrusion in Southeast Guangxi. *South China Geology*, 39(1):37–53.

Abstract: Late Mesozoic magmatic activity in southeast Guangxi was closely related to subduction of the Paleo-Pacific plate. We carried out zircon LA-ICP-MS U-Pb dating, petrogeochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic studies for the Luchuan intrusion in the southeast Guangxi province. The biotite monzogranite (main body of Luchuan pluton) and granitic aplite have yielded weighted mean ages of 104.8 ± 0.8 Ma and 103.9 ± 1.0 Ma, respectively. They belong to the series of peraluminous high-K calc-alkaline rocks and are enriched in LREE, large ion lithophile elements (such as Rb, Ba, Th) and depletion of high field strength elements (such as Nb, Ta, P), which are characterized by obvious Eu negative anomaly, high $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ value and low $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ value (mean = -7.28). Their $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values are -4.8 to $+0.7$ (mean = -2.36) and -3.8 to $+1.2$ (mean = -2.45), respectively.

收稿日期: 2022-11-7 修回日期: 2022-12-28

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011085416 和 DD20190047)

第一作者: 吴高逊(1993—), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, E-mail: 770388238@qq.com

通讯作者: 王磊(1981—), 男, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要从事岩石学和矿床学研究, E-mail: cgsleiwang@163.com

The corresponding Hf model ages(T_{DM2}) range from 0.99 to 1.30 Ga and 0.96 to 1.24 Ga, which is consistent with the Nd model ages(T_{DM2}) (1.29-1.30 Ga and 1.27-1.28 Ga, respectively). It is suggested that the source rocks are mainly crustal-derived graywacke in the late Mesoproterozoic, with a small amount of mantle material. Combined with regional geological data, we proposed that the Luchuan pluton was formed in a backarc extension setting caused by the subduction or rollback of the Paleo-Pacific plate into the South China plate in the late Early Cretaceous. During the same period (110-90 Ma), the line of NE trending Bobai-Cenxi fault was the northwestern boundary of magmatic activity in South China.

Key words: zircon; LA-ICP-MS U-Pb dating; Sr-Nd-Hf isotopes; Late Mesozoic; Luchuan intrusion; Southeast Guangxi

华南中生代岩浆作用与成矿长期以来备受关注,岩浆作用和成矿普遍被认为与古太平洋板块俯冲作用有关,但其俯冲起始时间和俯冲样式尚存在争议(Zhou X M and Li W X, 2000; 孙涛, 2006; Zhou X M et al., 2006; 周新民, 2007; Li Z X and Li X H, 2007; 毛景文等, 2008; Jiang Y H et al., 2009; Hu R Z and Zhou M F, 2012; Wang Y J et al., 2013; Mao J W et al., 2013; 姜耀辉和王国昌, 2016; Liu L et al., 2016; Li J H et al., 2020)。代表性的观点有:始于早-中侏罗世的正常俯冲模式(Jahn, 1974)、低角度俯冲及板块后撤模式(Zhou X M and Li W X, 2000; Jiang Y H et al., 2009)和非同步俯冲板片后撤模式(Liu L et al., 2016);始于晚二叠世的平板俯冲模式(Li Z X and Li X H, 2007)。晚中生代岩浆岩在我国东南沿海广泛发育,在华南内陆出露相对较少,该时期壳幔相互作用较为强烈,以往多认为其形成的构造背景是古太平洋板块俯冲/后撤导致的弧-弧后伸展或是在古太平洋板块俯冲/后撤影响下的陆内再造(徐夕生等, 1999; Li X H, 2000; 王强等, 2005; 耿红燕等, 2006; Zhou X M et al., 2006; Chen C H et al., 2008; 郑永飞等, 2013; 姜耀辉和王国昌, 2016; Chu Y et al., 2019)。

桂东南地区靠近华南内陆,晚中生代花岗岩较为发育,如陆川、米场、油麻坡、安垌、三育、官田、三叉冲、马其岗、塘蓬等岩体,部分岩体因与W-Mo成矿有关而受到关注,这些岩体的形成时代集中于110~90Ma,已有研究表明其岩浆源区具壳幔混合来源的特征,形成于古太平洋板块俯冲有关的弧后伸展背景(付强等, 2011; 王炯辉等, 2014a, 2014b; 杨振等, 2014; 王志强等, 2017; 王新宇, 2017; Wang

X Y et al., 2018)。但是,陆川岩体目前尚未有高精度年代学和地球化学的相关报道。本文在详细野外工作基础上,对桂东南陆川岩体开展了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、岩石地球化学和Sr-Nd-Hf同位素研究,旨在厘定其形成时代和岩石成因,并结合区域地质资料探讨古太平洋板块俯冲过程中对华南板块西北边界岩浆作用的影响。

1 地质背景

华南板块由扬子陆块和华夏地块于新元古代沿江绍断裂带发生碰撞-拼贴而成(Wang X L et al., 2006, 2007; Zhao J H et al., 2011)(图1a),在显生宙主要经历了加里东期、海西-印支期和燕山期构造-岩浆事件的改造(Wang Y J et al., 2013)。其中,燕山期花岗质岩浆作用最为强烈且与成矿关系密切。燕山早期花岗岩主要分布在桂、粤、闽、湘、赣等地区,集中形成于170~150Ma,以准铝质和弱过铝质钙碱性为主;晚中生代花岗岩及同期火山岩主要分布于粤、闽、浙沿海地区和长江中下游地区,集中形成于130~80Ma,普遍具有壳幔混合特征(孙涛, 2006; 毛景文等, 2008; He Z Y and Xu X S, 2012; 姜耀辉和王国昌, 2016; Liu L et al., 2016)。

桂东南地区位于华夏地块和扬子陆块拼合带的西南段(图1a)。区内出露地层主要为寒武系片岩、片麻岩,奥陶系千枚岩、片岩,泥盆系石英片岩、碎屑岩,白垩系砾岩等(王志强等, 2017; 王新宇, 2017)。区内构造以东北向博白-岑溪断裂和钦州-防城断裂为主(图1b)。南东侧的云开地块主要由中-新元古代云开群及变基性岩、早古生代沉积岩

和加里东期花岗岩组成(Wan Y S et al., 2010; Wang Y J et al., 2011; Chen C H et al., 2012; 王磊等, 2015; 周岱等, 2017)。北西侧的大容山岩体以印支期S型花岗岩为主(邓希光等, 2004; Chen C H et al., 2012; Jiao S J et al., 2015; 王磊等, 2016)。陆川岩体侵入于云开地块的地层中, 主体岩性为黑云母二长花岗岩, 少量为花岗细晶岩, 岩体内部发育镁铁质暗色微粒包体(图2b), 包体呈椭圆形和不规则状, 大小不等(1~25cm), 分布不均匀。

2 样品采集及分析测试

2.1 样品特征

本次样品采集自陆川县城东南约2 km处的采

石场(坐标: E 110°16'48.5", N 22°17'4.8"), 采集黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩样品各1件用于锆石U-Pb定年和Hf同位素分析, 各3件用于全岩主量、微量元素及Sr-Nd同位素分析。黑云母二长花岗岩(图2a)呈浅肉红色, 中细粒花岗结构, 块状构造, 主要由钾长石(约42%)、斜长石(约25%)、石英(约30%)、黑云母(约3%)组成, 副矿物为磁铁矿、榍石、磷灰石、锆石等(图2c、2d)。花岗细晶岩(图2b)呈浅灰白色, 细晶结构, 块状构造, 呈脉状侵入黑云母二长花岗岩中。主要由钾长石(约40%)、斜长石(约25%)、石英(约35%), 及少量黑云母、磁铁矿、褐帘石等组成(图2e、2f)。岩石遭受了轻微的蚀变作用, 主要蚀变矿物为高岭石、绢云母、绿帘石等。

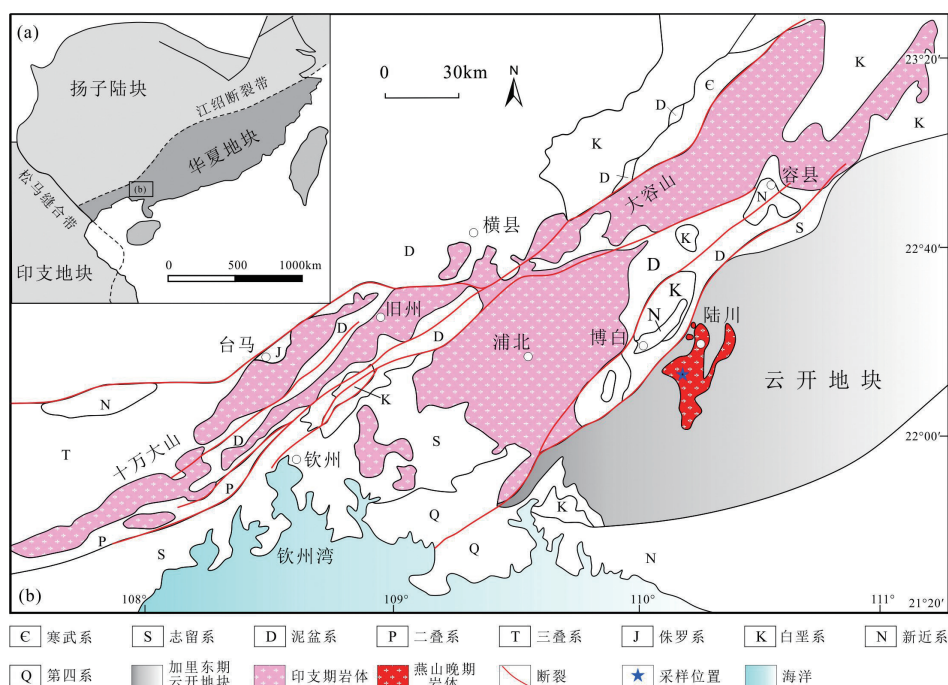


图1 桂东南地区地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of Southeast Guangxi

据 Jiao S J et al. (2015)、王志强等(2017)修改

2.2 分析方法

锆石在河北省廊坊市宇能地质服务公司采用传统的重磁分选后人工挑纯, 锆石制靶、透反射光及阴极发光照相(CL)在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石同位素测年工作在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成, 测试仪器为激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪

(LA-ICP-MS), 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光束斑直径为 32 μ m。实验测试过程及详细参数见 Liu Y S et al. (2008, 2010)。分析数据的离线处理采用软件 ICPMSData-Cal 完成(Liu Y S et al., 2008)。U-Pb 年龄计算及谱和图绘制采用软件 Isoplot/Ex_ver3.0 (Ludwig, 2003)。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年原位测试点作为分析点。采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 Compex101ArFICP-MS 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193nm)以及 MircoLas 公司的 GeoLas200M 光学系统联机进行测试,详细方法参见 Hu Z C et al.(2012)。实验过程中采用 Ar 气作为剥蚀物载气,同时向气相载体中加入少许氮气以获得更高的灵敏度,对锆石中测试点采用 44 μm 直径的激光进行原位分析。测定时使用锆石国际标样 GJ-1 作为参考物质。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中,采用 Blichert and Albarède (1997) 所推荐的球粒陨石值,半衰期 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332 \pm 2$ 。亏损地幔模式年龄 (T_{DM}) 计算采用 Griffin et al.(2002) 的推荐值。

全岩主量、微量元素和 Sr-Nd 同位素分析在中国地质调查局武汉地质调查中心完成。主量元素分析采用四硼酸锂熔片-XRF 法,分析仪器为英国帕纳科公司生产的波长色散型 X 射线荧光光谱分析

仪(XRF),测定过程中用国家标样监控,分析误差基本小于 5%。微量元素分析采用敞开酸溶 ICP-MS 法,分析仪器为 Thermo X series2 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),分析误差小于 5%。Sr-Nd 同位素分析的样品经 HF+HClO₄ 高温密闭溶解后,采用阳离子树脂 Dowex50 $\times$ 8 和 LN 特效树脂分别分离 Rb、Sr、REE 和 Nd,在热电离质谱仪(Triton Ti)上测定 Rb、Sr 比值和 Sm、Nd 比值,最后根据稀释法原理计算样品的 Rb、Sr、Sm、Nd 含量及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, Rb、Sr、Sm、Nd 的流程空白分别为 1×10^{-10} 、 2×10^{-10} 、 4.9×10^{-11} 和 1.2×10^{-10} , GBW04411、GBW04419 和 NBS607 监控化学制备流程, NBS987 和 J_{Nd}1 监控仪器状态,测定值和推荐值在误差范围内一致。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

陆川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果见表 1。黑云母二长花岗岩(样品 LC01)中锆石多为长

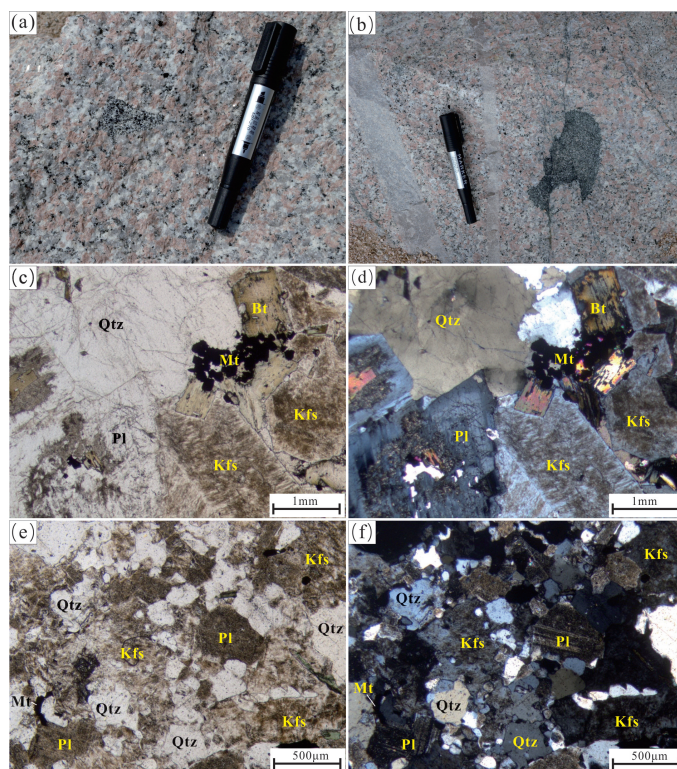


图2 陆川岩体典型野外及镜下照片

Fig. 2 Representative photograph and micro-photographs of the Luchuan intrusion

(a)黑云母二长花岗岩;(b)花岗细晶岩和镁铁质微粒包体;(c)和(d)黑云母二长花岗岩显微照片;
(e)和(f)花岗细晶岩显微照片;Qtz: 石英;Kfs: 钾长石;Pl: 斜长石;Bt: 黑云母;Mt: 磁铁矿

表 1 陆川岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons from the Luchuan intrusion

点 号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值					年龄(Ma)						
	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
黑云母二长花岗岩(LC01)																
01	48.0	513	1037	0.49	0.0166	0.0003	0.1076	0.0056	0.0166	0.0003	121	4	104	5	106	2
02	28.6	288	561	0.51	0.0166	0.0004	0.1156	0.0080	0.0166	0.0004	132	5	111	7	106	3
03	27.4	306	503	0.61	0.0159	0.0003	0.1046	0.0063	0.0159	0.0003	122	4	101	6	101	2
04	17.6	211	342	0.62	0.0157	0.0004	0.1027	0.0075	0.0157	0.0004	113	5	99	7	101	2
05	25.1	273	464	0.59	0.0165	0.0004	0.1093	0.0062	0.0165	0.0004	123	5	105	6	106	2
06	26.8	300	464	0.65	0.0162	0.0003	0.1113	0.0067	0.0162	0.0003	119	5	107	6	104	2
07	29.8	317	514	0.62	0.0168	0.0004	0.1136	0.0068	0.0168	0.0004	128	6	109	6	107	2
08	68.9	808	1259	0.64	0.0164	0.0004	0.1107	0.0049	0.0164	0.0004	116	4	107	5	105	3
09	20.2	249	215	1.16	0.0164	0.0005	0.1102	0.0107	0.0164	0.0005	124	7	106	10	105	3
10	21.8	241	342	0.70	0.0163	0.0003	0.1092	0.0061	0.0163	0.0003	127	5	105	6	104	2
11	32.4	395	614	0.64	0.0160	0.0003	0.1048	0.0055	0.0160	0.0003	111	4	101	5	102	2
12	22.1	241	383	0.63	0.0165	0.0003	0.1078	0.0067	0.0165	0.0003	123	5	104	6	106	2
13	82.7	913	1453	0.63	0.0165	0.0003	0.1104	0.0045	0.0165	0.0003	121	4	106	4	106	2
14	22.4	279	288	0.97	0.0166	0.0004	0.1122	0.0066	0.0166	0.0004	115	4	108	6	106	2
15	35.2	392	639	0.61	0.0167	0.0003	0.1091	0.0069	0.0167	0.0003	123	7	105	6	107	2
16	28.8	320	491	0.65	0.0169	0.0004	0.1128	0.0076	0.0169	0.0004	121	5	108	7	108	3
17	28.6	348	317	1.10	0.0160	0.0004	0.1047	0.0075	0.0160	0.0004	121	5	101	7	102	2
18	35.8	422	540	0.78	0.0163	0.0003	0.1067	0.0052	0.0163	0.0003	116	4	103	5	104	2
19	28.9	311	360	0.86	0.0164	0.0003	0.1155	0.0078	0.0164	0.0003	136	5	111	7	105	2
20	43.3	481	714	0.67	0.0161	0.0003	0.1044	0.0055	0.0161	0.0003	124	4	101	5	103	2
21	31.3	349	584	0.60	0.0161	0.0003	0.1070	0.0060	0.0161	0.0003	119	4	103	5	103	2
22	36.0	426	633	0.67	0.0161	0.0003	0.1085	0.0054	0.0161	0.0003	116	4	105	5	103	2
23	59.8	640	920	0.70	0.0167	0.0003	0.1130	0.0051	0.0167	0.0003	129	4	109	5	107	2
24	92.0	981	1669	0.59	0.0166	0.0003	0.1092	0.0046	0.0166	0.0003	124	4	105	4	106	2
25	47.7	529	785	0.67	0.0171	0.0003	0.1118	0.0050	0.0171	0.0003	121	4	108	5	109	2
花岗岩细晶岩(LC02)																
01	71.3	690	957	0.72	0.0169	0.0005	0.1103	0.0063	0.0169	0.0005	146	6	106	6	108	3
02	19.2	210	339	0.62	0.0159	0.0005	0.1085	0.0102	0.0159	0.0005	121	8	105	9	102	3
03*	7211	64833	26924	2.41	0.0085	0.0003	0.6610	0.0324	0.0180	0.0005	170	7	515	20	115	3
04	53.3	618	860	0.72	0.0159	0.0003	0.1075	0.0062	0.0159	0.0003	116	4	104	6	102	2
05	20.4	239	334	0.72	0.0167	0.0003	0.1143	0.0073	0.0167	0.0003	112	5	110	7	107	2
06	21.1	240	320	0.75	0.0158	0.0004	0.1027	0.0069	0.0158	0.0004	117	6	99	6	101	2
07	77.1	1007	1010	1.00	0.0162	0.0002	0.1085	0.0050	0.0162	0.0002	104	3	105	5	104	2
08	31.8	365	571	0.64	0.0166	0.0004	0.1183	0.0074	0.0166	0.0004	109	5	114	7	106	2
09	112.9	1355	1682	0.81	0.0163	0.0003	0.1061	0.0044	0.0163	0.0003	110	4	102	4	104	2
10	42.3	477	731	0.65	0.0160	0.0003	0.1070	0.0055	0.0160	0.0003	114	4	103	5	103	2
11	54.4	592	924	0.64	0.0162	0.0005	0.1055	0.0067	0.0162	0.0005	120	6	102	6	104	3
12	120.9	1098	2925	0.38	0.0163	0.0005	0.1127	0.0052	0.0163	0.0005	129	5	108	5	104	3
13	51.8	591	856	0.69	0.0168	0.0003	0.1133	0.0056	0.0168	0.0003	116	3	109	5	108	2
14	67.5	700	1263	0.55	0.0164	0.0004	0.1102	0.0059	0.0164	0.0004	125	5	106	5	105	3
15	26.4	304	450	0.68	0.0162	0.0003	0.1086	0.0056	0.0162	0.0003	113	4	105	5	103	2
16	24.2	262	407	0.64	0.0159	0.0003	0.1044	0.0066	0.0159	0.0003	125	5	101	6	102	2
17	34.4	444	478	0.93	0.0164	0.0004	0.1044	0.0083	0.0164	0.0004	107	4	101	8	105	2
18	32.6	379	596	0.64	0.0160	0.0003	0.1076	0.0052	0.0160	0.0003	113	4	104	5	102	2
19*	45.0	265	372	0.71	0.0111	0.0006	0.3698	0.0231	0.0187	0.0003	224	11	319	17	120	2
20	21.7	248	373	0.67	0.0164	0.0003	0.1083	0.0065	0.0164	0.0003	112	5	104	6	105	2
21	22.0	250	342	0.73	0.0162	0.0004	0.1092	0.0082	0.0162	0.0004	119	5	105	8	104	3
22*	21.3	256	355	0.72	0.0054	0.0002	0.1005	0.0055	0.0169	0.0003	108	4	97	5	108	2
23	19.1	245	327	0.75	0.0160	0.0005	0.1054	0.0085	0.0160	0.0005	103	6	102	8	102	3

*未参与年龄计算

柱状-短柱状,呈半透明至不透明,长约50~300 μm ,长宽比约1:1~4:1。锆石阴极发光(CL)照片具有明显的振荡环带(图3a),Th、U含量分别为 211×10^{-6} ~ 981×10^{-6} 和 215×10^{-6} ~ 1669×10^{-6} ,Th/U比值为0.49~1.16,为典型的岩浆锆石(Corfu et al., 2003; 吴元保和郑永飞, 2004)。对其中25颗锆石进行了年龄测试,所有点均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $104.8\pm 0.8\text{Ma}$ (MSWD=0.99)(图4a),代表黑云母二长花岗岩的结晶年龄。

花岗细晶岩(样品LC02)中锆石以长柱状-短柱状为主,呈半透明至不透明,长约100~300 μm ,长宽比约为1:1~3:1。锆石CL照片具有明显的振荡环带(图3b),Th、U含量分别为 210×10^{-6} ~ 1355×10^{-6}

和 320×10^{-6} ~ 2925×10^{-6} ,Th/U比值为0.38~1.00,为典型的岩浆锆石(Corfu et al., 2003; 吴元保和郑永飞, 2004)。对其中23颗锆石进行了年龄测试,其中20个点均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $103.9\pm 1.0\text{Ma}$ (MSWD= 0.77)(图4b),代表花岗细晶岩的结晶年龄。03、19和22号分析点谐和度较低,未参与加权平均值计算。

3.2 全岩主量和微量元素

陆川岩体主量和微量元素分析结果列于表2。

黑云母二长花岗岩 SiO_2 含量为71.95~73.02 wt. %, Al_2O_3 含量为13.55~13.98 wt. %, K_2O 含量为4.68~4.92 wt. %, Na_2O 含量为3.09~3.26 wt. %, TFeO含量为1.72~1.95 wt. %, MgO 含量为0.73~0.81

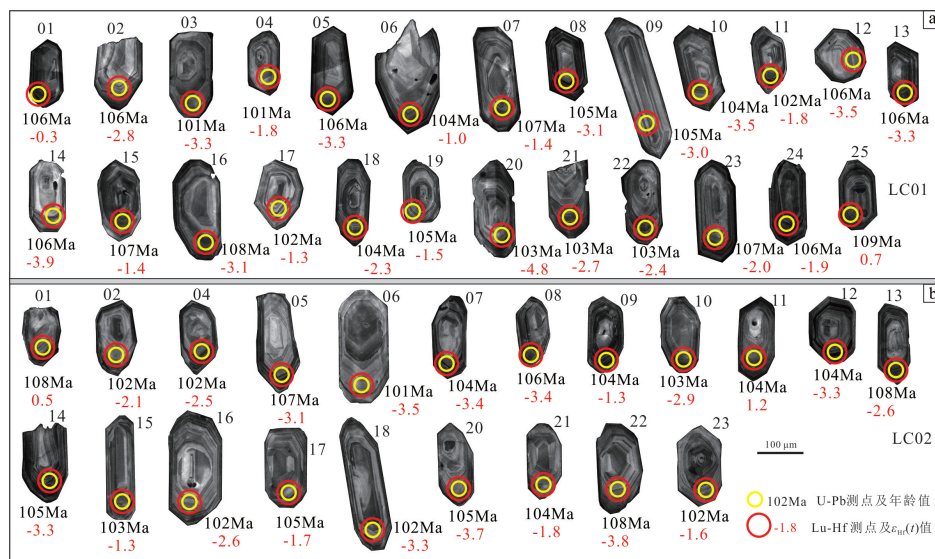


图3 陆川岩体典型锆石阴极发光图(CL)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the Luchuan intrusion

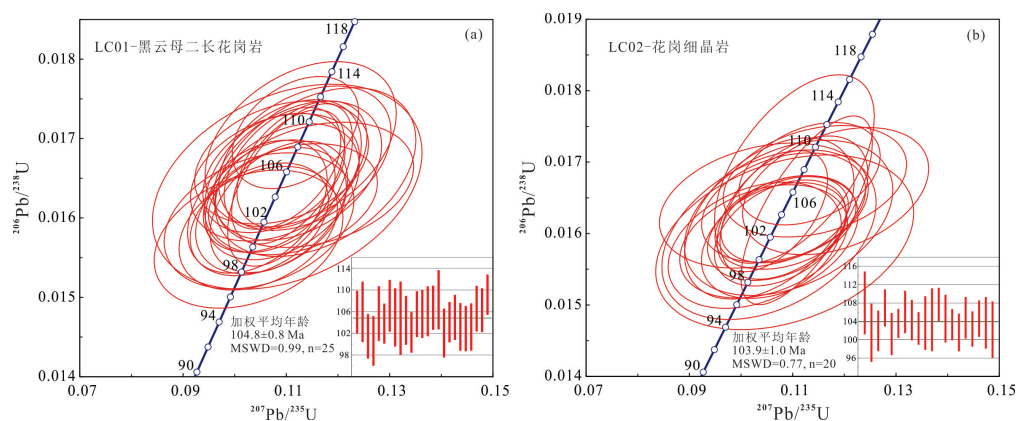


图4 陆川岩体锆石U-Pb年龄谐和图和加权平均年龄

Fig. 4 Concordia and weighted mean diagrams of zircon U-Pb data for the Luchuan intrusion

表 2 陆川岩体主量元素(wt.%)和微量元素($\times 10^{-6}$)含量Table 2 Major element(wt. %) and trace element ($\times 10^{-6}$) composition of the Luchuan intrusion

样号	黑云母二长花岗岩			花岗细晶岩		
	LC01-1	LC01-2	LC01-3	LC02-1	LC02-2	LC02-3
SiO ₂	72.20	71.95	73.02	76.87	76.56	76.65
TiO ₂	0.33	0.34	0.31	0.12	0.14	0.12
Al ₂ O ₃	13.69	13.98	13.55	12.50	12.56	12.67
Fe ₂ O ₃	0.91	0.89	0.80	0.24	0.31	0.20
FeO	1.12	1.15	1.00	0.25	0.32	0.22
MnO	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
MgO	0.78	0.81	0.73	0.15	0.17	0.15
CaO	1.86	2.02	1.82	0.34	0.47	0.50
Na ₂ O	3.09	3.26	3.12	3.34	3.21	3.46
K ₂ O	4.92	4.68	4.79	5.36	5.47	5.28
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.10	0.01	0.02	0.01
Lost	0.49	0.43	0.38	0.33	0.29	0.36
Total	99.54	99.65	99.66	99.53	99.52	99.63
TFeO	1.93	1.95	1.72	0.46	0.60	0.40
A/CNK	0.99	0.99	0.99	1.05	1.04	1.03
K ₂ O/Na ₂ O	1.59	1.44	1.54	1.61	1.70	1.53
Sc	2.26	4.48	4.69	2.25	2.35	0.44
V	31.9	29.2	28.3	4.59	7.75	5.82
Cr	7.39	8.00	5.79	1.10	0.82	0.96
Co	23.0	3.75	3.49	0.59	0.91	0.58
Ni	9.20	6.22	9.28	4.46	3.88	4.59
Cu	1.22	2.33	3.25	11.0	12.2	7.15
Zn	26.8	28.2	33.4	7.32	13.4	16.6
Sr	432	485	453	142	151	153
Rb	196	205	238	281	278	256
Ba	1000	918	1000	309	272	304
U	5.87	6.24	7.05	10.30	9.39	6.42
Th	13.2	27.6	21.4	31.4	31.3	22.6
Pb	29.6	28.9	35.3	41.0	48.8	41.6
Nb	13.8	14.0	15.6	11.4	9.89	8.94
Ta	1.21	1.21	1.37	1.32	1.09	0.94
Zr	134	126	152	103	77	102
Hf	3.59	3.42	4.09	3.83	3.35	3.83
La	60.9	46.0	62.6	27.7	57.3	40.8
Ce	106	82.1	109	41.0	102	63.2
Pr	12.7	10.1	12.1	5.21	10.6	8.05
Nd	43.5	34.9	40.6	16.0	31.6	25.0
Sm	7.14	5.66	6.10	2.22	3.97	3.46
Eu	1.48	1.26	1.30	0.47	0.52	0.57
Gd	5.95	4.74	5.19	2.12	3.74	3.03
Tb	0.72	0.56	0.59	0.22	0.32	0.29
Dy	3.63	2.87	2.88	1.18	1.33	1.27
Ho	0.70	0.56	0.55	0.26	0.27	0.27
Er	1.93	1.56	1.57	0.85	0.88	0.85
Tm	0.30	0.24	0.25	0.16	0.15	0.15
Yb	2.03	1.70	1.74	1.27	1.17	1.18
Lu	0.27	0.24	0.24	0.20	0.19	0.20
Y	18.5	13.6	13.6	6.76	7.23	7.14
δEu	0.67	0.72	0.69	0.65	0.41	0.53
(La/Yb) _N	21.50	19.40	25.80	15.70	35.10	24.80
ΣLREE	231.72	180.02	231.70	92.60	205.99	141.08
ΣHREE	15.23	12.23	12.76	6.10	7.90	7.09
ΣREE	246.95	192.25	244.46	98.70	213.89	148.17
分异指数(DI)	86.04	85.21	86.71	96.71	96.01	96.18

wt. %, CaO 含量为 1.82~2.02 wt. %。 K_2O/Na_2O 比值为 1.44~1.59, A/CNK 为 0.99。花岗细晶岩较前者具有更高的 SiO_2 (76.56~76.87 wt. %)、 K_2O (5.28~5.47 wt. %) 和 Na_2O (3.21~3.46 wt. %) 含量, 具有较低的 Al_2O_3 (12.50~12.67 wt. %)、TFeO (0.40~0.60 wt. %)、CaO (0.34~0.50 wt. %) 和 MgO (0.15~

0.17 wt. %) 含量。 K_2O/Na_2O 比值为 1.53~1.70, A/CNK 为 1.03~1.05。黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩均属于高钾钙碱性系列、准-弱过铝质花岗岩 (图 5a 和 b)。在哈克图解上 (图 6), 它们的 SiO_2 含量与 TiO_2 (图 6a)、 Al_2O_3 (图 6b)、TFeO (图 6c)、MgO (图 6d) 和 CaO (图 6e) 含量呈明显负相关性。

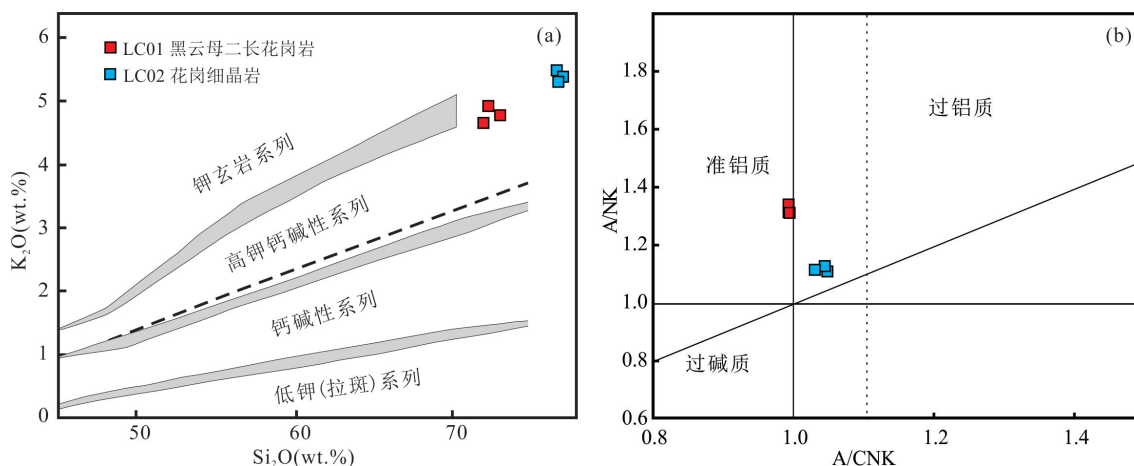


图5 陆川岩体 SiO_2 - K_2O 图(a)和 A/NK-A/CNK 图(b)

Fig. 5 SiO_2 - K_2O classification diagram (a) and A/NK-A/CNK diagram (b) for the Luchuan intrusion

a: 底图据 Ricwood, 1989; b: 底图据 Maniar and Piccoli, 1989

黑云母二长花岗岩稀土元素总量 ($\sum REE = 192.25 \times 10^{-6} \sim 246.95 \times 10^{-6}$) 高于花岗细晶岩 ($\sum REE = 98.70 \times 10^{-6} \sim 213.89 \times 10^{-6}$)。在球粒陨石标准化图解 (图 7a) 上, 二者表现出一致配分模式, 轻、重稀土元素分异明显, 呈轻稀土富集的右倾型。二者均存在一定程度的铕负异常, 花岗细晶岩铕负异常 ($\delta Eu = 0.41 \sim 0.65$) 较黑云母二长花岗岩 ($\delta Eu = 0.67 \sim 0.72$) 更明显。在原始地幔标准化元素蛛网图 (图 7b) 中, 二者均表现出大离子亲石元素 (如 Rb、Ba、Th) 富集, 高场强元素 (如 Nb、Ta、P、Ti) 亏损的特征。

3.3 Sr、Nd 同位素

陆川岩体全岩 Sr、Nd 同位素分析结果列于表 3。根据锆石 U-Pb 年龄 $t = 104 Ma$ 进行计算, 黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 分别介于 0.708600 ~ 0.708782 和 0.708889 ~ 0.709158 之间, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 分别介于 0.512121 ~ 0.512130 和 0.512133 ~ 0.512143 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值分别为 -7.46 ~ -7.28 和 -7.24 ~ -7.05, 对应的 Nd 同位素两阶段模式年龄 (T_{DM2}) 分别为 1.29~1.30Ga 和 1.27~1.28Ga。

3.4 锆石 Hf 同位素

陆川岩体锆石原位 Hf 同位素分析结果列于表 4。黑云母二长花岗岩 (样品 LC01) 25 个分析点和花岗细晶岩 (样品 LC02) 21 个分析点的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值较为一致, 分别为 0.282572 ~ 0.282730 和 0.282602 ~ 0.282745, 以各自分析点的锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄计算 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值, 分别为 -4.8 ~ -0.3 (平均值 = -2.4) 和 -3.8 ~ +1.2 (平均值 = -2.4) (图 8), 对应的两阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM2}) 分别为 0.99~1.30Ga 和 0.96~1.24Ga。

4 讨论

4.1 岩石成因

陆川岩体黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩均表现出高钾钙碱性、准-弱过铝质 (A/CNK = 0.99~1.05)、高 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ (0.708600~0.7091508) 和低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-7.46~-7.05) 的特征, 与 S 型花岗岩特征类似 (Chappell and White, 1992; Clarke, 1992)。但它们

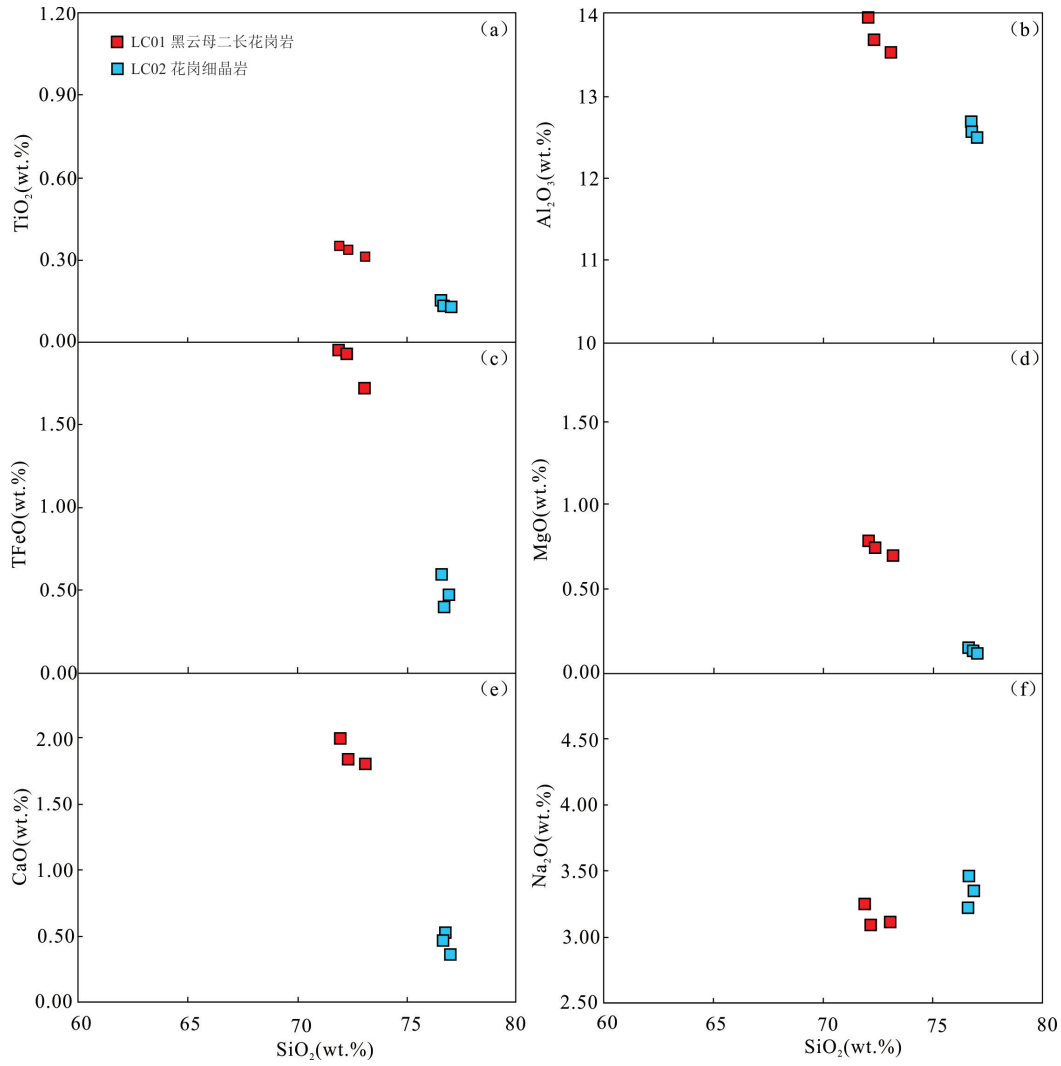


图 6 陆川岩体哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams for the Luchuan intrusion

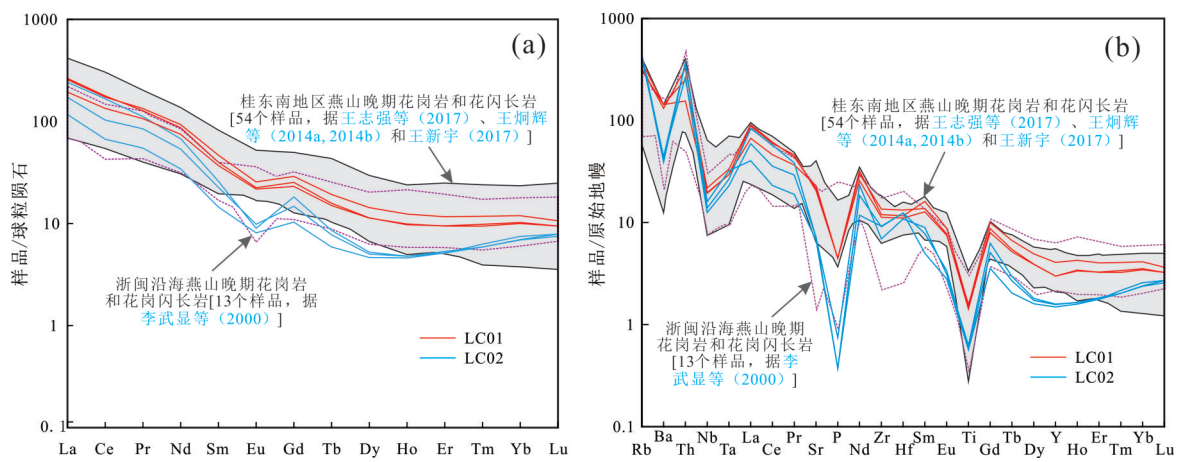


图 7 陆川岩体球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE diagram (a) and Primitive mantle-normalized trace element spider diagram

(b) for the Luchuan intrusion

球粒陨石和原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989

表 3 陆川岩体 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr、Nd isotopic compositions of the Luchuan intrusion

样号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	1σ	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	1σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	ε _{Nd} (t)	T _{DM2} (Ga)
黑云母二长花岗岩(LC01)										
LC01-1	1.414	0.710710	0.000003	0.0951	0.512186	0.000006	0.708600	0.512121	-7.46	1.30
LC01-2	1.315	0.710630	0.000002	0.0901	0.512191	0.000003	0.708668	0.512129	-7.29	1.29
LC01-3	1.560	0.711110	0.000001	0.0905	0.512192	0.000004	0.708782	0.512130	-7.28	1.29
花岗细晶岩(LC02)										
LC02-1	5.055	0.716360	0.000004	0.0814	0.512189	0.000003	0.708889	0.512134	-7.23	1.28
LC02-2	5.131	0.716610	0.000003	0.0666	0.512188	0.000004	0.709027	0.512143	-7.05	1.27
LC02-3	4.826	0.716290	0.000002	0.0818	0.512189	0.000005	0.709158	0.512133	-7.24	1.28

表 4 陆川岩体中锆石 LA-MC-ICP-MS 原位 Lu-Hf 同位素组成

Table 4 LA-MC-ICP-MS in situ analysis of zircon Lu-Hf isotopic composition of the Luchuan intrusion

点号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	ε _{Hf} (t)	1σ	T _{DM1} (Ma)	T _{DM2} (Ga)
黑云母二长花岗岩(LC01)										
01	0.282701	0.000013	0.001375	0.000005	0.043349	0.000255	-0.3	0.7	789	1.05
02	0.282629	0.000019	0.000808	0.000007	0.029109	0.000324	-2.8	0.8	878	1.19
03	0.282614	0.000015	0.000810	0.000001	0.027597	0.000055	-3.3	0.7	899	1.22
04	0.282658	0.000018	0.001036	0.000030	0.036732	0.001045	-1.8	0.8	842	1.13
05	0.282614	0.000012	0.000672	0.000007	0.022880	0.000246	-3.3	0.7	895	1.22
06	0.282680	0.000010	0.000914	0.000011	0.032333	0.000296	-1.0	0.6	808	1.09
07	0.282669	0.000016	0.001174	0.000031	0.037622	0.000665	-1.4	0.8	830	1.11
08	0.282621	0.000013	0.001051	0.000007	0.035035	0.000161	-3.1	0.7	894	1.21
09	0.282622	0.000015	0.000839	0.000023	0.029842	0.000886	-3.0	0.7	887	1.20
10	0.282609	0.000014	0.000786	0.000005	0.027861	0.000136	-3.5	0.7	905	1.23
11	0.282659	0.000015	0.001112	0.000014	0.036878	0.000280	-1.8	0.7	842	1.13
12	0.282610	0.000014	0.000750	0.000001	0.026207	0.000104	-3.5	0.7	903	1.23
13	0.282616	0.000014	0.000871	0.000003	0.029567	0.000086	-3.3	0.7	897	1.21
14	0.282598	0.000014	0.000713	0.000011	0.024980	0.000443	-3.9	0.7	919	1.25
15	0.282670	0.000016	0.000975	0.000002	0.032361	0.000139	-1.4	0.8	823	1.11
16	0.282622	0.000015	0.000928	0.000011	0.029335	0.000137	-3.1	0.7	890	1.20
17	0.282672	0.000019	0.001359	0.000018	0.048393	0.000545	-1.3	0.8	830	1.11
18	0.282645	0.000015	0.000871	0.000004	0.029999	0.000133	-2.3	0.8	857	1.16
19	0.282668	0.000015	0.001201	0.000017	0.042451	0.000451	-1.5	0.8	831	1.11
20	0.282572	0.000013	0.000695	0.000002	0.023420	0.000040	-4.8	0.7	955	1.30
21	0.282633	0.000015	0.000798	0.000012	0.026095	0.000192	-2.7	0.8	872	1.18
22	0.282642	0.000014	0.001041	0.000012	0.033765	0.000219	-2.4	0.7	864	1.16
23	0.282653	0.000012	0.000840	0.000004	0.030240	0.000126	-2.0	0.7	845	1.14
24	0.282656	0.000013	0.001203	0.000007	0.037214	0.000205	-1.9	0.7	848	1.14
25	0.282730	0.000019	0.001390	0.000040	0.042542	0.000838	0.7	0.8	747	0.99
花岗细晶岩(LC02)										
01	0.282724	0.000019	0.001589	0.000041	0.053678	0.000910	0.5	0.9	760	1.00
02	0.282650	0.000014	0.000843	0.000018	0.029565	0.000425	-2.1	0.7	849	1.15
04	0.282638	0.000011	0.000969	0.000006	0.033121	0.000128	-2.5	0.7	869	1.17
05	0.282620	0.000013	0.000722	0.000014	0.026786	0.000548	-3.1	0.7	888	1.21
06	0.282609	0.000013	0.000698	0.000004	0.025761	0.000170	-3.5	0.7	903	1.23
07	0.282613	0.000013	0.000993	0.000016	0.034771	0.000489	-3.4	0.7	904	1.22
08	0.282613	0.000016	0.000836	0.000002	0.027654	0.000125	-3.4	0.8	901	1.22

续表4

点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	$T_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
09	0.282673	0.000015	0.001451	0.000045	0.051062	0.001251	-1.3	0.8	831	1.11
10	0.282628	0.000012	0.000865	0.000003	0.028851	0.000156	-2.9	0.7	880	1.19
11	0.282745	0.000015	0.001562	0.000018	0.053014	0.000340	1.2	0.7	729	0.96
12	0.282616	0.000014	0.000965	0.000006	0.035139	0.000274	-3.3	0.7	899	1.21
13	0.282636	0.000014	0.000768	0.000005	0.028626	0.000215	-2.6	0.7	867	1.18
14	0.282615	0.000013	0.000883	0.000002	0.029262	0.000079	-3.3	0.7	899	1.22
15	0.282672	0.000014	0.001321	0.000030	0.046303	0.000927	-1.3	0.7	828	1.11
16	0.282636	0.000010	0.000768	0.000010	0.028095	0.000317	-2.6	0.6	867	1.18
17	0.282661	0.000015	0.001060	0.000008	0.038438	0.000356	-1.7	0.7	838	1.13
18	0.282616	0.000014	0.001066	0.000008	0.035032	0.000262	-3.3	0.7	902	1.22
20	0.282603	0.000013	0.000866	0.000007	0.031447	0.000168	-3.7	0.7	915	1.24
21	0.282657	0.000015	0.000767	0.000017	0.028110	0.000672	-1.8	0.8	838	1.13
22	0.282602	0.000017	0.000619	0.000004	0.021644	0.000266	-3.8	0.8	910	1.24
23	0.282666	0.000026	0.001283	0.000023	0.039820	0.000641	-1.6	1.1	837	1.12

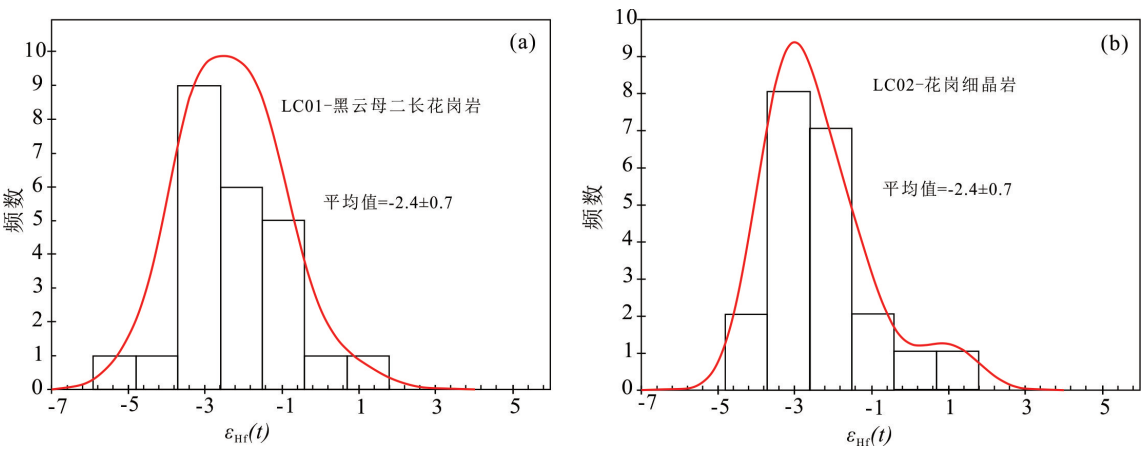


图 8 陆川岩体锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值频谱图
Fig. 8 Histogram of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values for the Luchuan intrusion

的 SiO_2 与 P_2O_5 呈负相关性,且均含有磁铁矿而没有钛铁矿,发育镁铁质微粒包体,显示出I型花岗岩特征(Chappell and White, 1992; 李献华等, 2007)。样品在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解(图9)上投影在I型花岗岩区。李献华等(2007)提出“南岭系列”花岗岩地球化学上显示出与典型S型或I型花岗岩有一些不同或“过渡”特征。因此,陆川岩体很可能是介于典型S型和I型花岗岩之间的一种“过渡型”花岗岩。

在哈克图解上(图6),黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩 SiO_2 与 TiO_2 、 Al_2O_3 、 TFeO 、 MgO 和 CaO 呈明显负相关性,暗示二者之间存在成因联系。花岗细晶岩相对黑云母二长花岗岩更高的 SiO_2 含量(76.56%~

76.87%)和分异指数($\text{DI}=96.01\sim96.71$),说明其演化程度更高。二者均存在一定程度的铕负异常,说明岩浆源区可能经历了斜长石的分异结晶,花岗细晶岩更明显的铕负异常表明其岩浆源区分异结晶程度更高。它们具明显的Nb、Ta、P、Ti元素负异常,暗示岩浆源区经历了磷灰石、金红石和铌钽矿物的分异结晶,花岗细晶岩更强烈的负异常反映岩浆演化作用更强。此外,花岗细晶岩Zr/Hf比值(23.1~26.9)要明显低于黑云二长花岗岩Zr/Hf比值(36.8~37.3),与结晶分异后期形成的花岗岩Zr/Hf比值更低一致(Bau, 1996; Breiter et al., 2014; 吴福元等, 2017)。

黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩富集轻稀土和大离子亲石元素,具有高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和低 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 的特征,均表明岩石源区主要为地壳。吴福元等(2017)提出经历结晶分异作用的岩石,其反映岩浆源区特征的能力更弱,因此,黑云母二长花岗岩相对花岗细晶岩更能反映源区性质。黑云母二长花

岗岩具有高K、Ba、Pb含量, Rb/Sr (0.42~0.53)和 Rb/Ba (0.20~0.24)比值低的特征,暗示其源区富含钾长石而不是云母类矿物。在 Rb/Ba - Rb/Sr 图解(图10)中,样品投影在靠近杂砂岩区域。黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩中锆石Hf同位素两阶段模式年龄为0.96~1.30 Ga,与全岩Nd同位素两阶段模式年

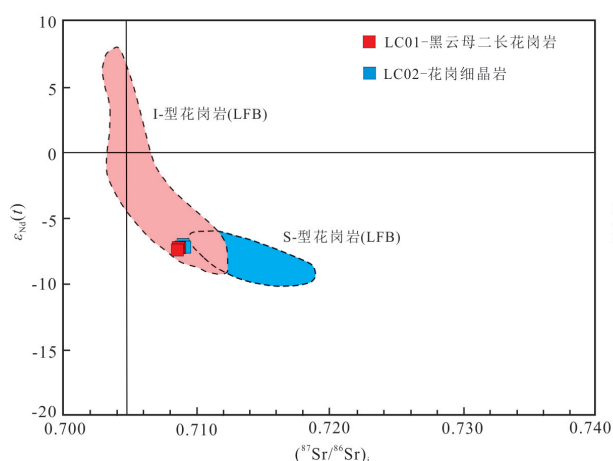


图9 陆川岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图

Fig. 9 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for the Luchuan intrusion

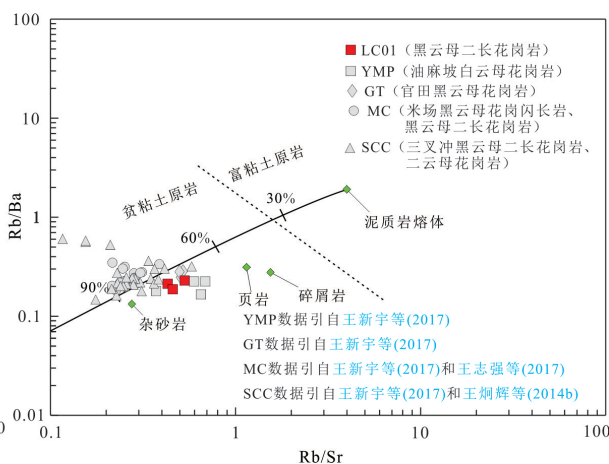


图10 陆川岩体 Rb/Ba - Rb/Sr 图解(底图据Sylvester P J, 1998)

Fig. 10 Rb/Ba - Rb/Sr diagram for the Luchuan intrusion

龄(1.27~1.30 Ga)较为一致,暗示其源区为中元古代地壳物质。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 图解(图11)中,二者均落在华南元古代地壳演化区域内,区域上同期的米场花岗闪长岩、三叉冲黑云母二长花岗岩、安垌岩体黑

云母二长花岗岩等样品,也投影在华南元古代地壳演化区域之上,但未超过球粒陨石地幔演化线。在本次所测试的锆石中,少数 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值,且黑云母二长花岗岩中发育镁铁质微粒包体,暗示其源区可能有少量幔源物质的加入。已有研究表明,米场花岗闪长岩、三叉冲黑云母二长花岗岩、安垌岩体黑云母二长花岗岩等以地壳为主的源区中同样有不同程度的幔源物质加入(付强等,2011;杨振等,2014;王新宇,2017;王志强等,2017)。因此,陆川岩体黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩是一种介于S型和I型的“过渡型”花岗岩,二者属于同一岩浆演化序列,花岗细晶岩为岩浆结晶分异后期的产物。它们的源区是以杂砂岩为主的中元古代地壳,并有少量地幔物质的加入。

4.2 构造意义

华南地区晚中生代(白垩纪)处于岩石圈伸展的构造环境,与伸展相关的盆地、穹窿、变质核杂岩和岩浆活动发育(Faure et al., 1996;李献华和胡瑞

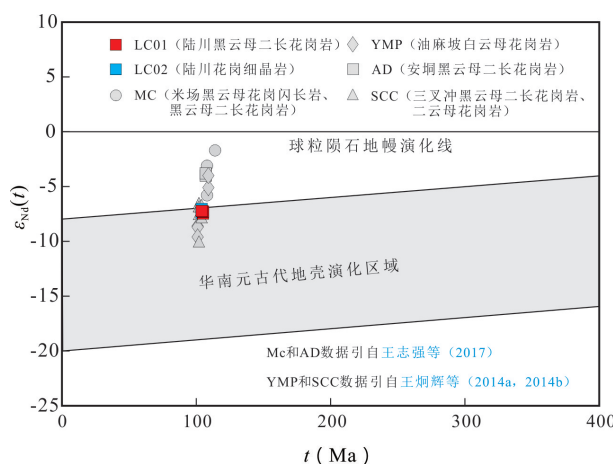


图11 陆川岩体 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t 图

Fig. 11 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - t diagram for the Luchuan intrusion

忠, 1997; Li X H, 2000; 李武显等, 2001; 孙卫东等, 2008; Wong J et al., 2009; Chu Y et al., 2019)。华南地区晚中生代伸展构造和大量的晚中生代岩浆活动普遍被认为与古太平洋板块的俯冲相关(Zhou X M and Li W X, 2000; Li X H, 2000; 耿红燕等, 2006; Zhou X M et al., 2006; Chu Y et al., 2019; Li J H et al., 2020), 以往代表性的俯冲模型有正常俯冲模式(Jahn, 1974)、低角度俯冲及板块后撤模式(Zhou X M and Li W X, 2000)和平板俯冲模式(Li Z X and Li X H, 2007)。但在注意到华南地区与典型“岛弧型”和“活动大陆边缘型”俯冲带的差异后(郑永飞等, 2013; 潘振杰等, 2017), 部分学者进而提出了古太平洋板块非同步(反复)俯冲/后撤模式, 用于解释晚中生代花岗岩成因及其动力学背景; 其中, 110~90Ma 时期为古太平洋板块反复俯冲/后撤中的一次, 随着俯冲角度由缓变陡, 引起岩石圈伸展并导致形成东南沿海的火山-侵入岩和华

南内部岩浆活动(Liu L et al., 2014, 2016; Jiang Y H et al., 2015; 姜耀辉和王国昌, 2016; Li J H et al., 2020)。

桂东南地区晚中生代(110~90Ma)岩浆活动较为发育(图12), 除本次报道的陆川岩体(104.8 ± 0.8 Ma 和 103.9 ± 1.0 Ma)外, 其他如米场黑云母二长花岗岩、油麻坡白云母花岗岩(100.7 ± 0.5 Ma, 王炯辉等, 2014a)、三叉冲黑云母二长花岗岩(103 ± 1 Ma, 王炯辉等, 2014b)等。此外, 在桂东-粤西地区还发育同期的火山-侵入岩, 如龙头山流纹斑岩和花岗斑岩, 马鞍山、周公顶流纹英安岩, 德庆二长花岗岩, 杏花花岗闪长岩及调村花岗闪长岩等(耿红燕等, 2006; 陈富文等, 2008; 马星华等, 2014)。它们具有相似的地球化学特征, 且与浙闽沿海同期花岗岩的地球化学特征基本一致(图7a、7b), 源区判别图解显示同期花岗岩源区也主要来自杂砂岩区域(图10)。在Rb-Hf-Ta三角图解(图13a)上, 桂东南地区

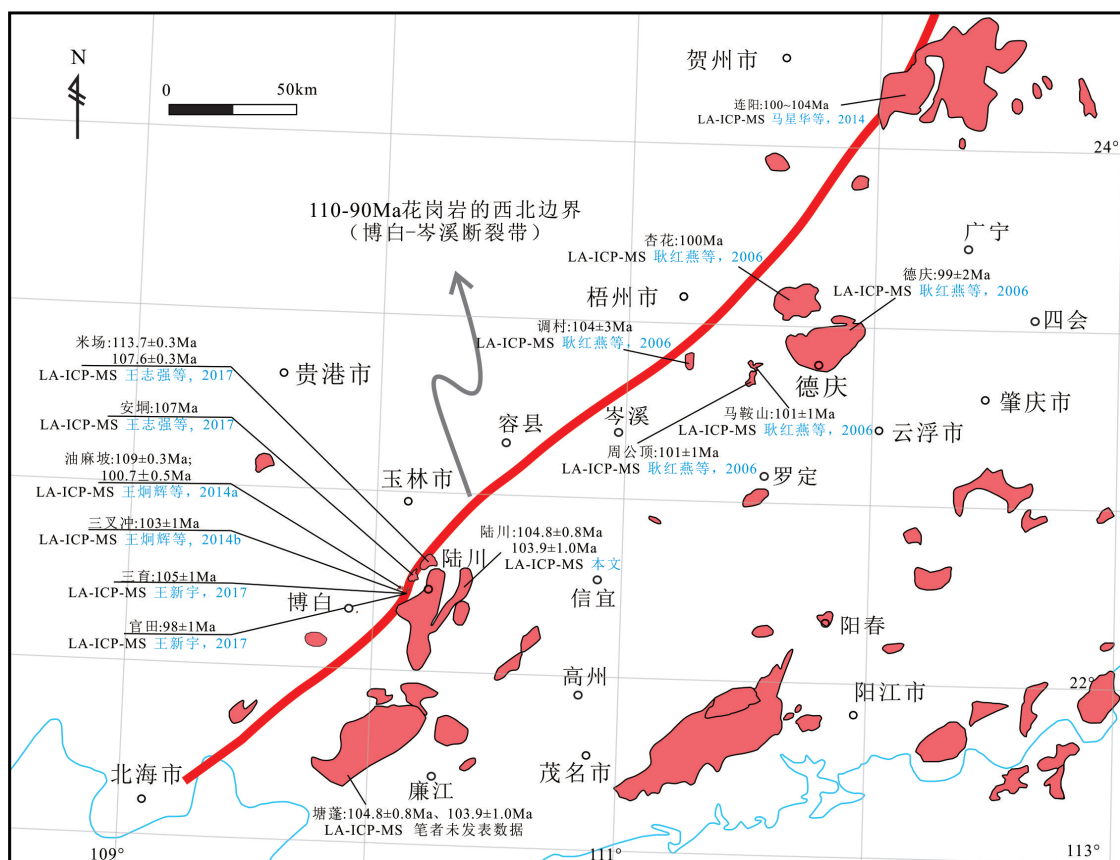


图12 桂东南地区晚中生代花岗岩分布图

Fig. 12 Distribution of Late Yanshanian granites in the southeast Guangxi

花岗岩主要投影在碰撞晚期-碰撞后花岗岩区;在Y-Nb图解(图13b)上,它们主要投影在火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩区,接近与板内花岗岩区的交界处,这一区域同样是碰撞后花岗岩区(Pearce, 1996)。因此,这些花岗岩形成的构造环境应该是伸展构造背景。可能的解释是,在晚中生代(110~90Ma)古太平洋西向俯冲/后撤引起的伸展构造背

景下,软流圈上涌提供的热能促使华南元古代地壳物质(原岩以杂砂岩为主)发生部分熔融,并有不同程度幔源物质加入,花岗质岩浆沿着陆川-岑溪断裂带上升侵位,形成桂东-粤西地区(包括陆川岩体在内)该时期的火山-侵入岩。统计已报道的年龄数据发现,华南地区这期岩浆岩大致沿陆川-岑溪断裂带一线分布,而该线北西侧则少有出露(图12)。

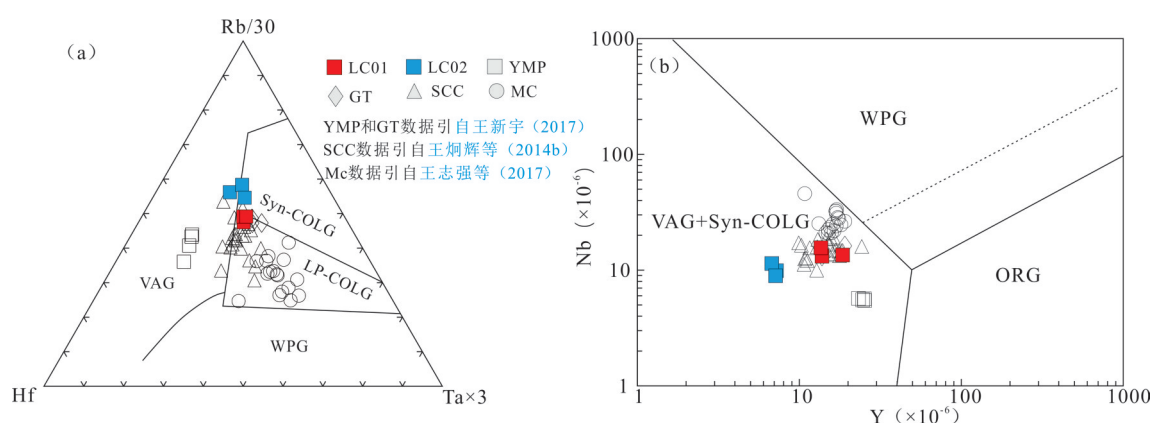


图13 陆川岩体Hf- Rb/30-Ta/30和Y-Nb构造环境判别图

Fig. 13 Hf- Rb/30-Ta/30 and Y-Nb tectonic discrimination diagrams of the Luchuan intrusion

a:底图据Harris et al.(1986);b:底图据Pearce et al.(1984)

VAG. 火山弧花岗岩;WPG. 板内花岗岩;OGR. 洋脊花岗岩;Syn-COLG. 同碰撞花岗岩;LP-COLG. 碰撞晚期-碰撞后花岗岩

5 结论

(1)陆川岩体黑云母二长花岗岩和花岗细晶岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分别为 104.8 ± 0.8 Ma和 103.9 ± 1.0 Ma,属晚中生代岩浆作用的产物。二者为同源岩浆结晶分异的产物,源区为以杂砂岩为主的中元古代地壳,并有少量地幔物质的加入。

(2)结合区域地质资料表明,陆川岩体形成于晚中生代古太平洋板块俯冲/后撤导致的伸展背景。同期岩浆活动的西北边界大致位于博白-岑溪断裂带一线。

锆石U-Pb同位素分析得到中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室胡兆初研究员,Sr、Nd同位素测试得到武汉地质调查中心张春红、梅玉萍老师的帮助;两位审稿专家及编辑提出了宝贵的修改意见,在此一并致谢!

参考文献:

- 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[J].地质学报,82(7):921-926.
- 邓希光,陈志刚,李献华,刘敦一.2004.桂东南地区大容山-十万大山花岗岩带 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J].地质论评,50(4):426-432.
- 付强,葛文胜,温长顺,蔡克勤,李世富,孙志伟,李小飞.2011.广西米场花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学特征和成因分析[J].地球学报,32(3):293-303.
- 耿红燕,徐夕生,O'Reilly S Y,赵明,孙涛.2006.粤西白垩纪火山-侵入岩浆活动及其地质意义[J].中国科学(D辑:地球科学),36(7):601-617.
- 姜耀辉,王国昌.2016.中国东南部晚中生代花岗岩成因与深部动力学机制——古太平洋板块反复俯冲-后退模式[J].矿物岩石地球化学通报,35(6):1073-1081.
- 李武显,周新民,李献华,谢国刚,李均辉.2001.庐山“星子变质核杂岩”中伟晶岩锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].地球

- 科学——中国地质大学学报,26(5):491-495.
- 李献华,胡瑞忠.1997.粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J].地球化学,(2):14-31.
- 李献华,李武显,李正祥.2007.再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J].科学通报,52(9):981-991.
- 马星华,陈斌,王志强,高林,孙克克.2014.南岭连阳复式岩体成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素约束[J].地学前缘,21(6):264-280.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,袁顺达,程彦博,陈毓川.2008.华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J].高校地质学报,14(4):510-526.
- 潘振杰,张旗,陈刚,焦守涛,杜雪亮,苗秀全,王金荣,安屹.2017.中国东部中生代岩浆活动与板块俯冲的关系——浙闽与日本弧和安第斯弧的对比及其意义[J].岩石学报,33(5):1507-1523.
- 孙涛.2006.新编华南花岗岩分布图及其说明[J].地质通报,25(3):332-335.
- 孙卫东,凌明星,汪方跃,丁兴,胡艳华,周继彬,杨晓勇.2008.太平洋板块俯冲与中国东部中生代地质事件[J].矿物岩石地球化学通报,27(3):218-225.
- 王炯辉,马星华,李毅,陆灿友,陈凌云,陈斌,王志强.2014a.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[J].地质学报,88(7):1219-1235.
- 王炯辉,王志强,陈斌.2014b.广西三叉冲钨矿有关岩体岩石成因:锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Nd 同位素制约[J].地球化学,43(6):549-573.
- 王磊,龙文国,徐德明,徐旺春,周岱,金鑫鏢,黄皓,张鲲.2015.云开地区变质基底锆石 U-Pb 年代学及对华夏地块 Grenvillian 事件的指示[J].地学前缘,22(2):25-40.
- 王磊,龙文国,周岱,徐旺春,金鑫鏢.2016.桂东南大容山晚二叠世花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义[J].地质通报,35(8):1291-1303.
- 王强,赵振华,简平,熊小林,包志伟,戴樟漠,许继峰,马金龙.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[J].岩石学报,21(3):795-808.
- 王新宇.2017.广西云开地区燕山晚期岩浆活动与钨成矿作用[D].中国地质大学博士学位论文.
- 王志强,陈斌,马星华.2017.广西陆川-博白成矿带多期次岩浆活动与钨钼成矿作用[J].地质学报,91(2):421-439.
- 吴福元,刘小驰,纪伟强,王佳敏,杨雷.2017.高分异花岗岩的识别与研究[J].中国科学:地球科学,47(7):745-765.
- 吴元保,郑永飞.2004.锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J].科学通报,49(16):1589-1604.
- 徐夕生,周新民, O'Reilly S Y,唐红峰.1999.中国东南部下地壳物质与花岗岩成因探索[J].岩石学报,15(2):217-223.
- 杨振,刘锐,王新宇,周国发.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[J].地球科学——中国地质大学学报,39(9):1258-1276.
- 郑永飞,赵子福,陈伊翔.2013.大陆俯冲隧道过程:大陆碰撞过程中的板块界面相互作用[J].科学通报,58(23):2233-2239.
- 周新民.2007.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,1-691.
- 周岱,龙文国,王磊,贾小辉.2017.云开地区早古生代竹雅-石板辉长岩锆石 U-Pb 定年与 Lu-Hf 同位素特征[J].地质通报,36(5):726-737.
- Bau M. 1996. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 123: 323-333.
- Blichert-Toft J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 148: 243-258.
- Breiter K, Lamas C N, Borges R M K, Dall'Agnol R. 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites [J]. Lithos, 192-195: 208-225.
- Chen C H, Lee C Y, Lu H Y, Hsieh P S. 2008. Generation of Late Cretaceous silicic rocks in SE China: Age, major element and numerical simulation constraints [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 31(4-6): 479-498.
- Chen C H, Liu Y H, Lee C Y, Xiang H, Zhou H W. 2012. Geochronology of granulite, charnockite and gneiss in the poly-metamorphosed Gaozhou Complex (Yunkai Massif), South China: Emphasis on the in-situ EMP monazite dating [J]. Lithos, 144-145: 109-129.
- Chappell B W, White A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83: 1-26.
- Chu Y, Lin W, Faure M, Xue Z H, Ji W B, Feng Z T. 2019. Cretaceous Episodic Extension in the South China Block, East Asia: Evidence From the Yuechengling Massif of Central South China [J]. Tectonics, 38(10): 3675-3702.
- Clarke D B. 1992. Granitoid Rocks [M]. Chapman and Hall, London, 1-283.

- Corfu F. 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469-500.
- Faure M, Sun Y, Shu L, Monie' P, Charvet J. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogeny: the case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, south-eastern China) [J]. *Tectonophysics*, 263: 77-106.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X S, and Zhou X M. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 61, 237-269.
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. *Geochemical characteristics of collision zone magmatism* [J]. Geological Society, London, Special Publications, 19: 67-81.
- He Z Y, Xu X S. 2012. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction [J]. *Chemical Geology*, 328: 208-221.
- Hu R Z, Zhou M F. 2012. Multiple Mesozoic mineralization events in South China -an introduction to the thematic issue[J]. *Mineralium Deposita*, 47: 579-588.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, Liu W, Yang L, Zhang W, Tong X, Lin L, Zong K Q, Li M, Chen H and Zhou L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27: 1391-1399.
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in Southeast China [J]. *Nature*, 248(5448): 480-483.
- Jiao S J, Li X H, Huang H Q, Deng X G. 2015. Metasedimentary melting in the formation of charnockite: Petrological and zircon U-Pb-Hf-O isotope evidence from the Darongshan S-type granitic complex in southern China [J]. *Lithos*, 239: 217-233.
- Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, Liao S Y, Zhao K D, Ling H F. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China: implications for a continental arc to rifting [J]. *Lithos*, 107, 185-200.
- Jiang Y H, Wang G C, Liu Z, Ni C Y, Qing L, Zhang Q. 2015. Repeated slab advance-retreat of the Palaeo-Pacific plate underneath SE China [J]. *International Geology Review*, 57(4): 472-491.
- Li J H, Cawood P A, Ratschbacher L, Zhang Y Q, Dong S W, Xin Y J, Yang H, Zhang P X. 2020. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone [J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103056.
- Li X H. 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293-305.
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogeny and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- Liu L, Xu X S, Xia Y. 2014. Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: Evidence from episodic volcanism and related intrusions [J]. *Tectonophysics*, 614: 170-184.
- Liu L, Xu X S, Xia Y. 2016. A synchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism [J]. *Gondwana Research*, 37: 397-40.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S. 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: 34-43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel* [M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635-643.
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, and Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in south China and their geodynamic settings [J]. *Mineralium Deposita*, 48: 267-294.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 19: 120-125.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J].

- Lithos, 22: 247-263.
- Sylvester P J. 1998. Post- collisional strongly peraluminous granites [J]. lithos, 45: 29- 44.
- Sun S S, McDonough W. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [J]. Geological Society Special Bulletin, 1989, 42: 313-345.
- 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 [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 37: 140-153.
- Wang X Y, Yang Z, Chen N S, Liu R. 2018. Petrogenesis and Ore Genesis of the Late Yanshanian Granites and Associated Porphyry-Skarn W-Mo Deposits from the Yunkai Area of South China: Evidence from the Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Sulfide S-Fe Isotopes [J]. Journal of Earth Science, 29(4):939-959.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, Zhang W L, Liu X M, Zhang G L. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from northern Guangxi, south China: Implications for tectonic evolution [J]. Precambrian Research, 145: 111-130.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Wang R C, Qiu J S, O'Reilly S Y, Xu X S, Liu X M, Zhang G L. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. Precambrian Research, 159: 117-131.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Zhao G C, Zhang G W, Zhang Y Z, Zhang F F, Li S Z. 2011. Kwanghsian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi-Yunkai Domains [J]. Lithos, 127: 239-260.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, Zhang Y H. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies [J]. Gondwana Research, 23: 1273-1305.
- Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Yuan C, Xia X P, Li L M, Wu F Y. 2009. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijuehuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125-100Ma and its tectonic significance for South China [J]. Lithos, 112 (3-4): 289-305.
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P, Li J W. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny [J]. Geology, 39: 299-302.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 326(3-4): 269-287.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. Episodes, 29(1): 26-33.