

doi:10.3799/dqkx.2013.025

# 海南石碌地区早三叠世闪长玢岩脉 U-Pb 年代学及构造意义

李艳军<sup>1</sup>, 魏俊浩<sup>1</sup>, 伍刚<sup>1</sup>, 谭俊<sup>1</sup>, 石文杰<sup>1</sup>, 赵少卿<sup>1</sup>, 王永辉<sup>2</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 海南矿业股份有限公司, 海南昌江 572700

**摘要:** 石碌铁矿床位于海南岛五指山褶皱带西段。矿区内外发育以闪长玢岩脉为主的中基性脉岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年厘定闪长玢岩脉年龄为  $248 \pm 1$  Ma (MSWD=0.4), 为早三叠世岩浆活动的产物, 与同时代的富碱侵入岩体构成“双峰式”侵入岩。闪长玢岩脉为钾玄质系列, 低  $\text{SiO}_2$  (49.18%~55.25%)、高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.36%~16.75%)、 $\text{FeO}$  (5.98%~10.07%) 和  $\text{MgO}$  (3.80%~5.43%), 富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE。Nb/Ta、Zr/Hf 和 La/Nb 比值分别为 15.33~17.80、36.00~45.23 和 2.59~8.62; Pb 同位素组成 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> = 18.087~18.483, ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> = 15.473~15.587, ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> = 38.272~38.817。LREE/HFSE 和 LILE/HFSE 比值及 Pb 同位素组成显示为富集地幔来源, 但混染有少量的地壳物质。HFSE 判别图解指示闪长玢岩脉形成于大陆边缘弧伸展背景, 与晚二叠世印支板块 NE 向向华南地块俯冲造成的大陆边缘弧局部伸展有关。

**关键词:** 闪长玢岩脉; 早三叠世; 大陆边缘弧; 石碌铁矿床; 地质年代学; 海南岛。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2013)02-0241-12

收稿日期: 2012-03-18

## Early Triassic Diorite-Porphyrite Dikes from the Shilu Area, Hainan Island: Zircon U-Pb Age and Tectonic Implication

LI Yan-jun<sup>1</sup>, WEI Jun-hao<sup>1</sup>, WU Gang<sup>1</sup>, TAN Jun<sup>1</sup>, SHI Wen-jie<sup>1</sup>, ZHAO Shao-qing<sup>1</sup>, WANG Yong-hui<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hainan Mining Co. Ltd., Changjiang 572700, China

**Abstract:** The Shilu iron deposit is located in western section of the Wuzhishan Fold Belt, Hainan island. In this region, numerous intermediate-basic dikes dominated by diorite-porphyrite occurred. The dating of zircon from diorite-porphyrite dikes determined by LA-ICP-MS yields age of  $248 \pm 1$  Ma (MSWD=0.4), maybe bimodal intrusion with contemporary alkali-rich granites. Diorite-porphyrite dikes are dominated by shoshonitic rocks, which have  $\text{SiO}_2$  varying from 49.18% to 55.25%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  from 14.36% to 16.75%,  $\text{FeO}$  from 5.98% to 10.07% and  $\text{MgO}$  ranging from 3.80% to 5.43%. These dikes are enriched in large ion lithophile elements (LILE) and low rare earth elements (LREE) but depleted in high field strength element (HFSE). The Nb/Ta values of diorite-porphyrite vary from 15.33 to 17.80, Zr/Hf and La/Nb from 36.00 to 45.23 and 2.59 to 8.62, respectively. Two samples have ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> = 18.087–18.483, ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> = 15.473–15.589 and ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>t</sub> = 38.272–38.817, similar to the data of contemporary alkali-rich granites. Geochemical and Pb isotopic compositions indicate that these dikes are possibly derived from enriched mantle and slightly contaminated with crust. Hf/3-Th-Ta and Zr-Zr/Y discriminant diagrams imply these diorite-porphyrite dikes intruded in a local nextensional tectonic setting in continental arc, caused by the Indian plate northeastern subduction to the South China Block.

**Key words:** diorite-porphyrite dike; Early Triassic; continental margin arc; Shilu iron deposit; geochronology; Hainan island.

**基金项目:** 全国危机矿山“桂东粤西地区铅锌金等矿床成矿规律总结研究”项目 (No. 20089946); 中国地质大学 (武汉) 中央高校基本科研业务费专项基金 (Nos. CUG110832, CUG120702); 国家自然科学基金项目 (No. 41202054); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室基金。

**作者简介:** 李艳军 (1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿床地球化学、成矿规律与成矿预测教学和研究工作。E-mail: liyanjun21023@163.com

高钾钙碱性—钾玄质系列中基性脉岩因不仅能反演岩浆的源区性质(Scarrows *et al.*, 1998)和演化历史(Fowler and Henney, 1996; Mayborn *et al.*, 2008),还能指示其就位时的张性构造背景(Poland *et al.*, 2004),在近年来的研究中受到普遍关注.我国华南地区中生代分布有大量的中基性脉岩(李献华等, 1997; 谢桂青等, 2002; 范蔚茗等, 2003; 谢桂青, 2003; Wang *et al.*, 2003, 2008; Li *et al.*, 2004).这些脉岩形成于约 220 Ma、180~155 Ma、145~125 Ma 和 110~75 Ma 四个时限(范蔚茗等, 2003; 谢桂青, 2003),但以后 3 个时限为主,220 Ma 仅有道县辉长岩包体报道(范蔚茗等, 2003).中—早三叠世的中基性脉岩至今未见报道.

海南岛大地构造单元受太平洋构造域和特提斯构造域两大地球动力学系统控制,表现出复杂的构造格局和地质背景(许德如等, 2006).海南岛岩浆岩约占全岛面积的 58%,岩浆活动具有多期次特征,以中生代酸性和中酸性岩浆侵入为主(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986).近年来,应用锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 法在海南厘定出了一些 240~250 Ma 高精度的岩浆侵入体年代学数据(谢才富等, 2005, 2006; 张小文等, 2009; 周佐民等, 2011).这些早三叠世侵入岩如尖峰岭超单元、琼中深堀村、麻山田等单元等主要为 A 型花岗岩类,形成于后造山伸展构造环境下,由富集地幔分异或壳幔混合熔融形成(谢才富等, 2006; 周佐民等, 2011).但区内还缺乏同时代中基性岩的成岩过程及构造背景研究.

石碌铁矿床位于海南岛西部昌江县城南侧,构造位置为五指山褶皱带西段(图 1a).矿区内外发育有闪长玢岩、煌斑岩、辉绿岩等中基性脉岩,煌斑岩和辉绿岩 K-Ar 年龄为 97~100 Ma(侯威等, 1996).闪长玢岩尚未开展精确的年代学和地球化学研究.本文选取区内外主要的闪长玢岩脉进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,精确限定其形成于早三叠世,并探讨了就位时的构造背景,为研究海南岛该时期的构造岩浆事件提供制约和参考.

## 1 地质概况及岩石学特征

石碌铁矿区内出露地层有新元古代石碌群和石灰顶组,两者呈断裂不整合接触关系(许德如等, 2008).矿区东部还出露有石炭系南好组—青天峡组、二叠系峨查组—鹅顶组、南龙组.缺失寒武至泥

盆系、三叠—侏罗系.构造主要有轴向 NW 向的石碌复式向斜、NE 向叠加褶皱和 NE、NW、近 EW 和近 NS 向断裂构造(图 1b),根据野外观察和节理统计,构造体系经历了加里东中晚期 NE 向挤压、海西中期—燕山早期近 NS 向挤压、燕山早期 NW 向挤压和燕山晚期 NNE 向压扭四次构造作用.矿区南、北、西三面为侵入岩所环绕,岩石类型以花岗岩类为主.南北部为中二叠世似斑状花岗闪长岩(图 1b),普遍具片麻状构造,锆石 U-Pb 同位素年龄为  $262 \pm 1$  Ma(笔者未发表数据).西部为燕山晚期花岗斑岩、角闪黑云母二长花岗岩.矿区内煌斑岩和辉绿岩 K-Ar 年龄为 97~100 Ma(侯威等, 1996),花岗斑岩略晚(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986),但闪长玢岩还缺乏精确的年代学数据制约.

闪长玢岩脉主要沿 NNE 和 NE 向断裂侵入于新元古代石碌群和石灰顶组及北部中二叠世花岗闪长岩体中(图 1b, 1c),地表出露宽度 0.5~5 m 不等. SLN-8 采自石碌河中花岗闪长岩中,其他样品均取自石碌铁矿区内.闪长玢岩脉为灰黑色,斑状结构,基质为半自形粒状结构.斑晶为自形—半自形晶,粒径一般 0.2~0.8 mm,含量约 15%~20%,主要为斜长石(含量 10%~15%),角闪石(含量 4%~6%)以及少量黑云母(1%±);基质为半自形晶,粒径 0.05~0.20 mm,主要由斜长石(含量 35%~40%)、角闪石(含量 15%~20%)、黑云母(10%~15%)及少量辉石(2%~5%)组成.副矿物有磁铁矿、锆石、榍石和磷灰石.样品 ZM-5 手标本较新鲜,但镜下局部见轻微的绿泥石化和绢云母化. SL-26 局部可见硫化物颗粒,薄片角闪石发生碳酸盐化,斜长石绢云母化较强.

## 2 分析方法

用于锆石 U-Pb 定年的样品为 SLN-8 和 ZM-5 的组合样(ZrSL-2),先将样品清洗干净,去掉表面可能附着的锆石,然后送至河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室挑选锆石.将锆石样品置于环氧树脂中,然后磨蚀和抛光至锆石核心出露.在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)电子探针室进行阴极发光(CL)显微照像,结合反射光和透射光,观察锆石的内部结构.锆石原位微区测试在 GPMR 激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪器上完成,激光束斑直径为 24  $\mu\text{m}$ ,同时测定 U-Th-Pb 同位素及微量元素.实验中采用 He

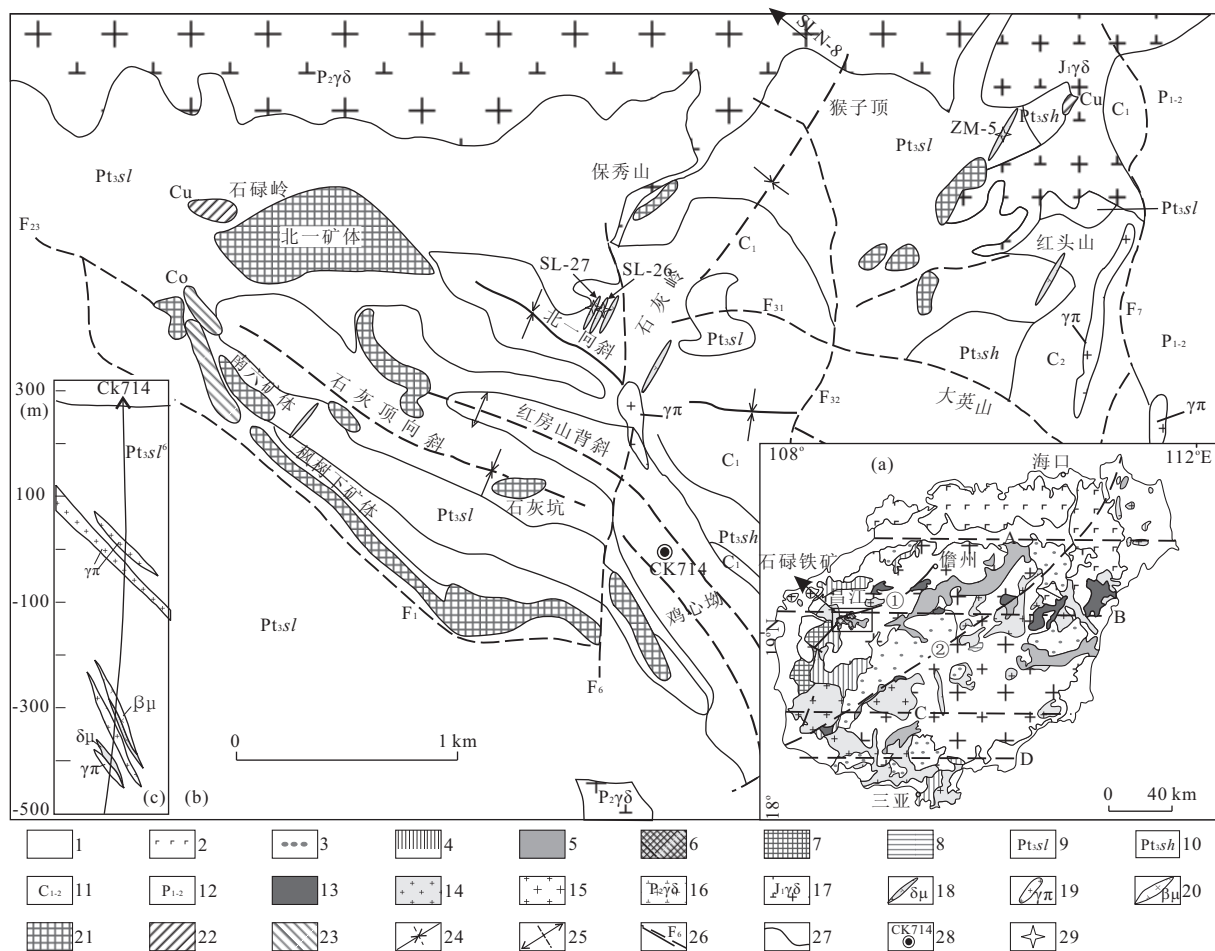


图 1 海南岛地质略图(a,据许德如等, 2009 修改)、石碌铁矿床地质简图(b,据许德如等, 2008 修改)和钻孔 Ck714 柱状图(c,据海南省地勘局, 2009. 海南省石碌铁矿床 E19 勘探线剖面图修改)

Fig. 1 Tectonic map of Hainan island (a), geological map of the Shilu iron deposit (b) and drill bore column of Ck714 (c)

1. 中生代盖层; 2. 新生代玄武岩; 3. 白垩系砾岩层; 4. 早古生代火山碎屑岩; 5. 晚古生代火山—沉积岩; 6. 新元古代石碌群; 7. 古中元古代抱板群和片麻状花岗岩; 8. 新太古代杂岩; 9. 新元古界石碌群; 10. 新元古界石灰顶组; 11. 上、下石炭统; 12. 上、下二叠统; 13. 变基性岩; 14. 130~90 Ma 花岗岩; 15. 270~180 Ma 花岗岩; 16. 二叠纪花岗闪长岩; 17. 侏罗纪花岗闪长岩; 18. 闪长玢岩脉; 19. 花岗岩斑岩脉; 20. 辉绿玢岩脉; 21. 铁矿体; 22. 铜矿体; 23. 钴矿体; 24. 向斜; 25. 背斜; 26. 实测及推测断裂; 27. 地质界线; 28. 钻孔; 29. 取样点; W-E 向断裂: ① 戈枕断裂, ② 白沙断裂; NE-SW 向断裂: A=王五一文教断裂, B=昌江—琼海断裂, C=尖峰—吊罗断裂, D=就锁—陵水断裂

作为剥蚀物质的载气. U-Th-Pb 同位素组成及微量元素分析应用标准锆石 91500 进行同位素分馏校正, 用  $^{29}\text{Si}$  做内标, NIST610 为外标, 详细分析流程和仪器参数见 Liu *et al.* (2010). 实验获得的数据采用 ICPMSDataCal 软件(Liu *et al.*, 2010)进行同位素比值校正, 以扣除普通 Pb 的影响. 分析点表观年龄采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 其加权平均值误差为  $2\sigma$ .

主量和微量元素组成在澳实矿物实验室集团澳实分析检测(广州)有限公司测试, 主量元素采用 ME-XPF06 分析完成, 相对误差低于 5%; 微量元素组成用 ME-MS81 方法测定获得, 相对误差低于 10%. Pb 同位素比值测定在武汉地质矿产研究所 MAT-261 可调多接收质谱计上完成. 监控 Pb 同位

素比值测定的 NBS981 国际标准物质的测定值  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  为  $0.9142 \pm 5$ , NBS981 证书值  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  为  $0.9146 \pm 3$ , 全流程 Pb 空白本底为  $(1\sim 2) \times 10^{-9}$  g.

### 3 锆石 U-Pb 年代学

闪长玢岩脉中锆石为无色—浅黄色, 半透明, 颗粒以短柱状和等轴状为主, 粒径大多为  $40\sim 120\ \mu\text{m}$ , 大者可达  $250\ \mu\text{m}$ , 长宽比为  $1:1\sim 2.5:1$ . CL 图像显示该岩体中的锆石有两种类型(图 2): (1)发育典型岩浆成因的生长振荡环带, 无晶核和增生边; (2)具有明显的核边结构, 具微弱环带或无环

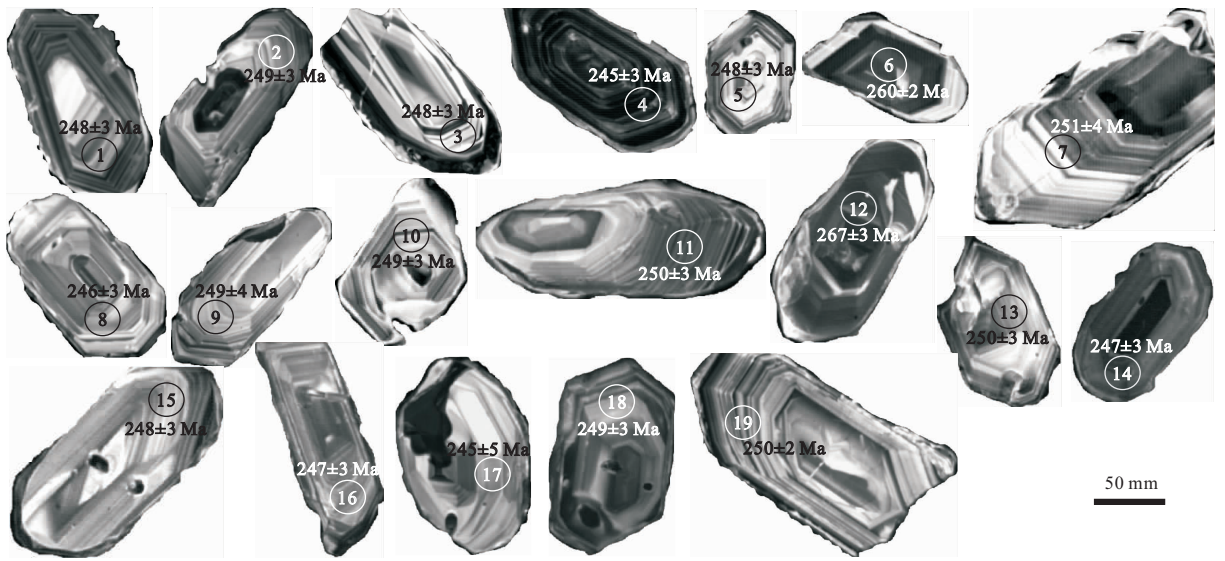


图 2 石碌地区闪长玢岩脉(ZrSL-2)中锆石形态和阴极发光(CL)图像

Fig. 2 Typical zircon morphology and CL images of diorite-porphyrite sample (ZrSL-2) from Shilu area

圆圈及其中数字分别表示分析位点和测点编号;圈外年龄示  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄

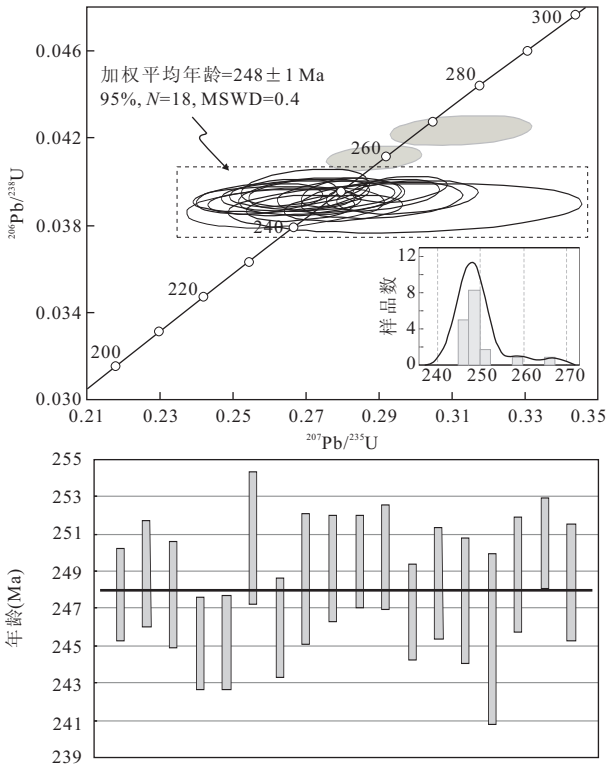


图 3 闪长玢岩脉(ZrSL-2)锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄谱和图  
Fig. 3 Concordia plots for zircons of diorite-porphyrite sample (ZrSL-2) from Shilu area

加权平均年龄为去掉 ZrSL-2-6 和 ZrSL-2-12 外 18 个岩浆锆石测点的加权结果

带的晶核被新生岩浆锆石包裹,包括晶核为自形晶 (ZrSL-2-6)或晶核边部被熔蚀成浑圆状(ZrSL-2-2、

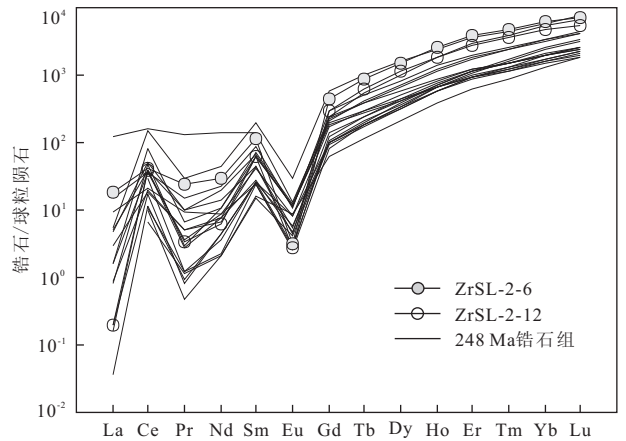


图 4 闪长玢岩脉(ZrSL-2)锆石球粒陨石标准化稀土配分图解  
Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns of diorite-porphyrite sample (ZrSL-2)

球粒陨石值据 Sun and McDonough(1989)

11、12 和 14)。

所测锆石 U 和 Th 含量分别为  $(56.95 \sim 2377.22) \times 10^{-6}$  和  $(168.93 \sim 4582.28) \times 10^{-6}$ , Th/U 比值为 0.28~1.02(表 1),明显大于变质锆石 Th/U 比值 ( $< 0.1$ , Hoskin and Black, 2000; Griffin *et al.*, 2004),为典型的岩浆成因锆石. 选择韵律环带明显的岩浆锆石,进行了 20 个点的定年分析. 所有数据点都位于谐和线上构成非常集中的锆石群(图 3). 核部 ZrSL-2-6 和 ZrSL-2-12 两点的年龄为  $260 \pm 2$  Ma 和  $267 \pm 3$  Ma,与矿区北部的花岗闪长岩谐和年龄  $262 \pm 1$  Ma(笔者未发表数据)一

表 1 石碌地区闪长玢岩脉(ZrSL-2)锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of diorite-porphyrityrite sample (ZrSL-2) from Shilu area

测试点号	Th (10 <sup>-6</sup> )	U (10 <sup>-6</sup> )	Th/U	U-Th-Pb 同位素比值										年龄(Ma)					
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1σ
ZrSL-2-1	537	1 220	0.44	0.0479	0.002 9	0.261 4	0.014 7	0.039 2	0.000 4	0.012 5	0.000 3	100	131	236	12	248	3	252	6
ZrSL-2-2	183	404	0.45	0.0498	0.003 0	0.270 7	0.015 7	0.039 4	0.000 5	0.012 2	0.000 4	187	144	243	13	249	3	246	8
ZrSL-2-3	917	1 712	0.54	0.0472	0.002 2	0.257 5	0.011 5	0.039 2	0.000 5	0.011 4	0.000 3	57.5	107.4	233	9	248	3	229	6
ZrSL-2-4	2 377	4 155	0.57	0.0516	0.001 9	0.280 5	0.010 8	0.038 8	0.000 4	0.012 3	0.000 4	333	83	251	9	245	3	247	8
ZrSL-2-5	873	932	0.94	0.0498	0.001 8	0.268 7	0.009 8	0.038 8	0.000 4	0.011 5	0.000 3	187	116	242	8	245	3	230	6
ZrSL-2-6	756	1 807	0.42	0.0505	0.001 5	0.288 8	0.008 7	0.041 1	0.000 4	0.012 4	0.000 3	220	69	258	7	260	2	249	7
ZrSL-2-7	194	505	0.38	0.0494	0.002 2	0.269 7	0.011 5	0.039 7	0.000 6	0.011 8	0.000 5	165	138	242	9	251	4	237	10
ZrSL-2-8	430	555	0.77	0.0501	0.002 0	0.267 5	0.010 2	0.038 9	0.000 4	0.011 9	0.000 3	211	97	241	8	246	3	239	6
ZrSL-2-9	159	374	0.43	0.0507	0.002 9	0.274 0	0.014 8	0.039 3	0.000 6	0.012 3	0.000 5	228	127	246	12	249	4	247	10
ZrSL-2-10	540	530	1.02	0.0499	0.002 1	0.270 9	0.010 9	0.039 4	0.000 5	0.012 8	0.000 3	191	92	243	9	249	3	256	7
ZrSL-2-11	355	1 221	0.29	0.0481	0.001 7	0.263 8	0.009 6	0.039 5	0.000 4	0.012 2	0.000 4	106	85	238	8	250	3	244	7
ZrSL-2-12	795	1 886	0.42	0.0531	0.002 1	0.312 6	0.012 8	0.042 3	0.000 5	0.014 3	0.000 4	345	89	276	10	267	3	287	9
ZrSL-2-13	1 328	4 582	0.29	0.0508	0.001 1	0.278 2	0.006 2	0.039 5	0.000 5	0.011 9	0.000 3	232	45	249	5	250	3	240	6
ZrSL-2-14	552	552	1.00	0.0490	0.002 6	0.264 3	0.014 0	0.039 0	0.000 4	0.012 3	0.000 4	146	124	238	11	247	3	246	7
ZrSL-2-15	108	380	0.28	0.0516	0.002 1	0.279 9	0.011 5	0.039 3	0.000 5	0.013 0	0.000 5	265	97	251	9	248	3	261	11
ZrSL-2-16	382	560	0.68	0.0542	0.002 9	0.291 1	0.014 6	0.039 1	0.000 5	0.012 8	0.000 4	389	120	259	11	247	3	256	8
ZrSL-2-17	56.9	169	0.34	0.0545	0.005 6	0.297 2	0.031 9	0.038 8	0.000 7	0.011 4	0.000 8	394	233	264	25	245	5	229	16
ZrSL-2-18	596	672	0.89	0.0538	0.002 0	0.291 2	0.010 3	0.039 4	0.000 5	0.012 2	0.000 3	365	81	259	8	249	3	245	6
ZrSL-2-19	368	1 266	0.29	0.0540	0.001 6	0.295 8	0.008 5	0.039 6	0.000 4	0.012 7	0.000 3	372	65	263	7	250	2	256	6
ZrSL-2-20	607	738	0.82	0.0548	0.002 4	0.297 8	0.012 8	0.039 3	0.000 5	0.013 3	0.000 4	467	96	265	10	248	3	267	7

表 2 闪长玢岩脉(ZrSL-2)锆石微量元素分析结果( $10^{-6}$ )

Table 2 Trace elements data of diorite-porphyrite sample (ZrSL-2) from Shilu area

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ti	Eu/Eu*	Ce/Ce*	$T_z(^\circ\text{C})\pm^{\dagger}$	
ZrSL-2-1	28.98	98.06	12.54	66.02	21.09	0.78	47.67	14.27	166.58	62.75	288.64	61.05	564.52	109.19	1.52	0.07	1.26	—	
ZrSL-2-2	0.01	6.97	0.09	2.11	3.93	0.34	20.07	6.87	82.56	31.91	142.76	29.15	269.71	52.76	2.42	0.09	23.58	1216	
ZrSL-2-3	0.38	49.00	0.65	5.15	9.38	0.67	42.85	15.55	177.64	68.41	295.01	61.52	547.14	104.95	5.02	0.09	19.05	835	
ZrSL-2-4	1.32	93.80	2.88	21.36	30.43	1.67	117.07	36.53	398.69	140.49	590.64	116.67	1010.10	187.97	57.42	0.08	8.55	660	
ZrSL-2-5	0.19	28.98	0.28	4.89	11.03	0.73	50.47	14.17	143.57	48.87	200.44	39.11	339.81	62.71	11.86	0.08	25.20	727	
ZrSL-2-6	4.30	25.33	2.28	13.62	16.97	0.18	94.21	32.01	388.46	146.36	623.24	119.94	1027.31	187.25	4.27	0.01	1.96	875	
ZrSL-2-7	0.05	10.51	0.07	2.03	4.05	0.17	22.74	7.66	94.60	36.76	164.14	32.83	301.82	58.01	3.55	0.04	34.62	938	
ZrSL-2-8	1.17	23.49	0.94	6.52	6.93	0.33	27.95	9.25	113.06	41.93	190.10	38.71	346.60	64.88	5.95	0.06	5.18	803	
ZrSL-2-9	0.00	6.67	0.11	1.74	4.04	0.47	21.13	6.89	85.17	32.11	150.02	30.93	299.90	57.81	3.98	0.12	897	15	
ZrSL-2-10	0.38	22.02	0.34	4.10	6.27	0.46	34.90	11.16	127.42	46.08	200.03	39.47	344.76	64.74	7.56	0.08	13.94	770	
ZrSL-2-11	2.17	13.27	0.90	4.14	3.70	0.14	16.27	6.95	88.14	37.13	179.49	41.34	406.70	81.03	1.14	0.05	2.33	—	
ZrSL-2-12	0.05	22.99	0.32	2.86	9.64	0.16	60.14	23.57	286.76	107.26	454.55	89.32	790.61	140.82	5.59	0.02	21.08	814	
ZrSL-2-13	0.20	12.23	0.49	3.07	6.72	0.26	48.06	19.69	260.35	105.65	479.84	99.65	898.06	171.74	4.79	0.03	6.64	846	
ZrSL-2-14	3.54	22.43	1.43	10.82	13.18	0.63	59.69	18.87	211.74	79.13	332.72	65.37	568.85	103.75	7.90	0.06	2.44	764	
ZrSL-2-15	—	6.09	0.04	0.99	2.33	0.24	19.77	6.54	80.38	32.48	154.61	34.07	332.21	67.67	4.21	0.07	879	15	
ZrSL-2-16	—	18.15	0.12	1.05	3.78	0.16	25.04	8.77	104.33	40.72	183.23	37.64	335.05	62.20	4.74	0.04	848	14	
ZrSL-2-17	—	3.97	0.11	1.01	2.40	0.51	13.18	4.28	52.51	21.25	101.39	22.10	229.58	45.53	7.98	0.22	763	12	
ZrSL-2-18	0.04	24.20	0.27	3.56	9.27	0.65	36.60	10.65	108.44	36.82	149.64	29.54	258.28	48.13	10.40	0.09	26.39	737	
ZrSL-2-19	0.72	10.96	0.49	3.57	4.11	0.28	20.48	7.58	98.38	39.36	192.55	44.32	436.77	84.44	1.57	0.08	4.39	—	
ZrSL-2-20	1.10	31.94	0.96	9.51	10.32	0.66	41.05	10.92	110.03	37.58	155.78	31.08	281.34	50.64	73.97	0.09	7.07	655	11

†:  $T_z(^\circ\text{C})$  为据 Watson *et al.* (2006) Ti 温度计  $\log(T_{\text{ircon}}) = (6.01 \pm 0.03) - (5.080 \pm 30)/T(\text{K})$  计算的锆石饱和温度。

致,可能为捕获锆石.其余 18 颗锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄变化于  $245 \pm 3 \sim 251 \pm 4 \text{ Ma}$  之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $248 \pm 1 \text{ Ma}$  (MSWD=0.4),该年龄代表了闪长玢岩脉侵位年龄.

捕获和岩浆锆石均具有 HREE 富集、LREE 亏损、强烈的 Ce 正异常和 Eu 的负异常特点(表 2,图 4).仅 ZrSL-2-1 等少数测点 LREE 相对富集,但 HREE 与其他测点一致,估计与后期地质事件扰动时 LREE 优先进入锆石晶格有关(Wu and Zheng, 2004),对应的 CL 图像也显示有后期的干扰.锆石 HREE 并未出现亏损的现象,不同于源区存在榴辉岩相锆石的稀土元素组成(Wu and Zheng, 2004; Chen *et al.*, 2007).

#### 4 岩石地球化学特征

闪长玢岩脉主量和微量元素分析结果见表 3.除样品 SL-26 外,岩石  $\text{SiO}_2$  含量介于  $49.18\% \sim 55.25\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量为  $5.70\% \sim 5.77\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值介于  $0.4 \sim 1.1$ .另外,岩石具有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $14.36\% \sim 16.75\%$ )、 $\text{FeO}_t$  ( $5.98\% \sim 10.07\%$ ) 和  $\text{MgO}$  ( $3.80\% \sim 5.43\%$ ) ( $\text{Mg}^\#$  为  $47.1 \sim 58.6$ ),  $\text{TiO}_2$  介于  $1.23\% \sim 1.86\%$ , 平均  $1.54\%$ . SL-26 较其他 3 个样品具有较低的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$ , 但具有极高的  $\text{MgO}$  和烧失量( $\text{LOI}=10.90\%$ ),这可能与该样品具有较强的蚀变和硫化物矿化有关.

新鲜岩石  $\Sigma\text{REE}$  较高,为  $227.95 \times 10^{-6} \sim 346.53 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $302.56 \times 10^{-6}$ .轻重稀土分馏强烈,其 LREE 总量为  $212.41 \times 10^{-6} \sim 322.02 \times 10^{-6}$ , HREE 总量为  $15.54 \times 10^{-6} \sim 27.98 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}=10.9 \sim 13.7$ ;球粒陨石标准化稀土元素模式(图 b)具 LREE 富集的陡的右倾斜配分特点,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值介于  $15.3 \sim 22.8$  之间,具有弱的负铕异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  为  $0.75 \sim 0.82$ ).除  $\Sigma\text{REE}$  较低外,闪长玢岩脉与琼中地区同时代的中性—中酸性正长岩体( $\text{SiO}_2=58.40\% \sim 66.92\%$ ,周佐民等,2011)具有相似的稀土元素配分模式(图 5b).微量元素方面,脉岩 LILE Rb、Ba 含量较高,分别为  $74.3 \times 10^{-6} \sim 135.0 \times 10^{-6}$  和  $773 \times 10^{-6} \sim 1995 \times 10^{-6}$ ,而 HFSE Nb、Ta 含量明显偏低,为  $8.9 \times 10^{-6} \sim 18.7 \times 10^{-6}$  和  $0.5 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-6}$ .原始地幔标准化微量元素蛛网图上,脉岩呈现明显的 Nb、Ta、Ti 负异常和 Pb 正异常(图 5a).除 P

表 3 闪长玢岩脉主量元素(%),微量及稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果

Table 3 Major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) compositions of diorite-porphyrite dikes from Shilu area

样号	SLN-8	SL-26	SL-27	ZM-5
$\text{SiO}_2$	52.00	46.00	49.18	55.25
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.88	12.13	16.75	14.36
$\text{FeO}_t$	10.07	8.24	8.52	5.98
CaO	6.68	7.04	9.68	6.17
MgO	4.03	12.50	5.43	3.80
$\text{Na}_2\text{O}$	2.79	1.27	3.53	3.67
$\text{K}_2\text{O}$	2.94	0.49	2.17	2.10
$\text{TiO}_2$	1.86	0.66	1.54	1.23
MnO	0.15	0.12	0.23	0.10
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.73	0.16	1.11	0.59
LOI	2.69	10.90	1.24	6.28
Total	100.15	99.98	99.62	99.80
$\text{Mg}^\#$	47.1	77.1	58.6	58.5
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	5.73	1.76	5.70	5.77
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	1.1	0.4	0.6	0.6
Cr	50	1470	40	90
Co	26.3	47.8	23.8	24.4
Ga	20.3	13.9	20.5	17.8
Rb	135.0	24.8	112.5	74.3
Sr	571	249	1120	429
Y	35	15.1	29.1	19.4
Zr	234	72	294	209
Nb	13.9	4.6	8.9	18.7
Ba	1995	1985	773	1690
Hf	5.9	2.0	6.50	5.0
Ta	0.8	0.3	0.50	1.1
Pb	14	14	11	422
Th	18.40	3.54	14.65	10.15
U	2.45	1.09	2.69	1.52
La	65.70	12.90	76.70	48.40
Ce	140.00	28.10	149.50	99.20
Pr	18.05	3.66	18.15	12.00
Nd	66.60	14.20	63.50	43.50
Sm	11.80	3.08	11.40	7.56
Eu	3.06	0.89	2.77	1.75
Gd	10.55	3.21	9.94	6.38
Tb	1.35	0.50	1.20	0.80
Dy	6.88	2.99	5.90	3.71
Ho	1.38	0.63	1.12	0.73
Er	3.75	1.82	3.11	1.92
Tm	0.52	0.23	0.40	0.24
Yb	3.08	1.69	2.47	1.52
Lu	0.47	0.24	0.37	0.24
$\Sigma\text{REE}$	333.19	74.14	346.53	227.95
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	15.3	5.5	22.3	22.8
$\text{Eu}/\text{Eu}^*$	0.82	0.86	0.78	0.75
Nb/Ta	17.38	15.33	17.80	17.00
Zr/Hf	39.66	36.00	45.23	41.80
Hf/Sm	0.50	0.65	0.57	0.66
La/Ta	82.13	43.00	153.40	44.00
Ba/Nb	143.53	431.52	86.85	90.37
Rb/Zr	0.58	0.34	0.38	0.36
La/Nb	4.73	2.80	8.62	2.59

$$\text{Mg}^\# = 100 \times \text{Mg}^{2+} / (\text{Mg}^{2+} + 0.9 \times \text{FeO}_t / 80).$$

和 Ti 略高于上述正长岩外,两者具有近似一致的微量元素配分曲线,表明两者可能具有相同的源区性



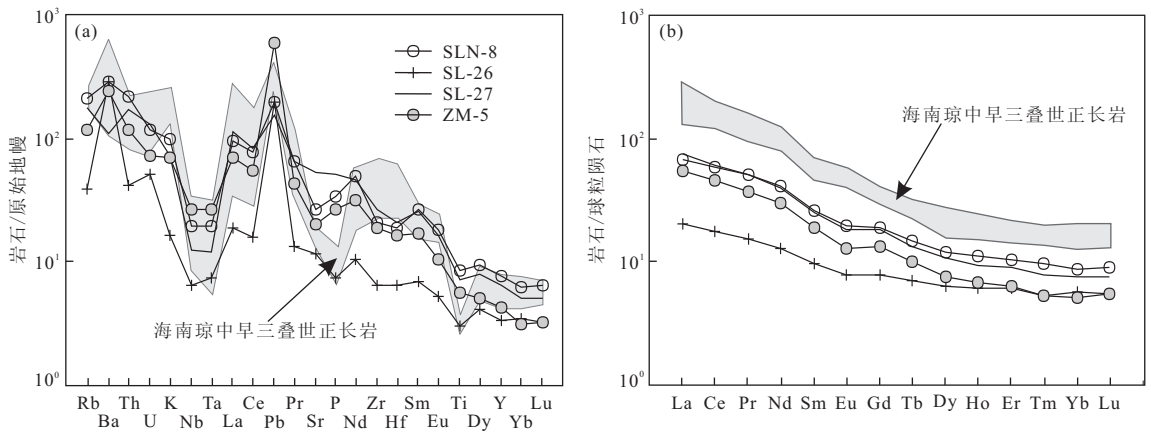


图 5 闪长玢岩脉原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土配分曲线(b)

Fig. 5 Primitive mantle normalized trace element distributions (a) and chondrite normalized REE patterns (b) of diorite-porphyrite dikes from Shilu area

琼中中一早三叠世正长岩体数据引自周佐民等(2011). 原始地幔和球粒陨石标准据 Sun and McDonough (1989)

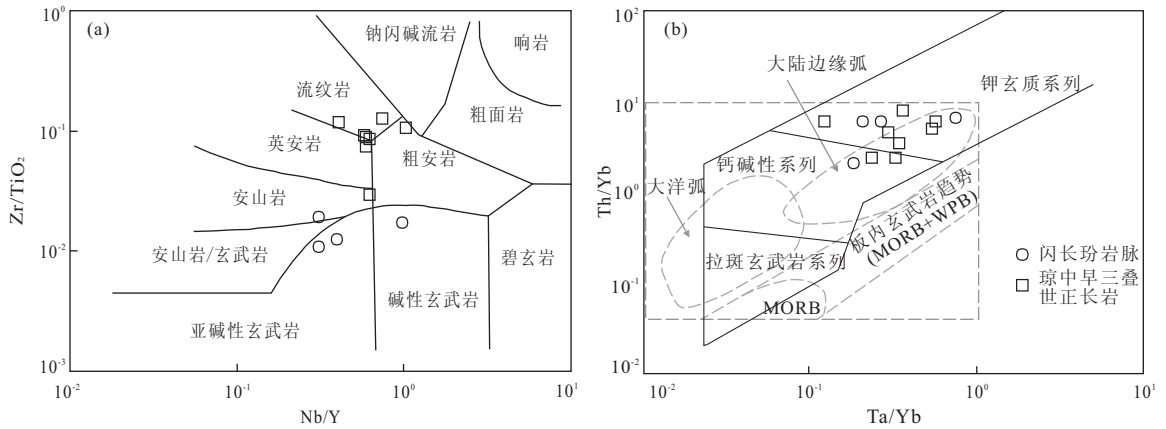


图 6 闪长玢岩脉 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> (a)(据 Winchester and Floyd, 1976)和 Ta/Yb-Th/Yb(b)(据 Pearce, 1983)判别图解

Fig. 6 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> (a) and Ta/Yb-Th/Yb (b) diagrams of diorite-porphyrite dikes

WPB. 板内玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; 琼中中一早三叠世正长岩体数据引自周佐民等(2011)

质,只是正长岩体中的磷灰石和钛铁矿等分异程度较高. SL-26 尽管 LILE 与其他样品差别较大,但 HFSE 除数量关系外仍具有一致的配分曲线,且 Zr/Hf 和 Hf/Sm 比值接近(表 3),显示 HFSE 仍然可以用来判断其岩石类型和成因. 在 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解中,样品主要位于亚碱性玄武岩—碱性玄武岩区域,明显不同于海南同时代具有英安岩—流纹岩性质的正长岩(图 6a). Ta/Yb-Th/Yb 图解中除样品 SL-26 外均位于钾玄质系列范围内,与正长岩一致,同处于大陆边缘弧成因火山岩范围及附近(图 6b).

2 件新鲜岩体的 Pb 同位素组成列于表 4 中. 全岩 Pb 同位素组成 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 和 <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 分别为 18.091~18.679、15.473~

15.596和 38.281~39.290. 利用  $t=248$  Ma 校正后的 Pb 同位素组成 (<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub> = 18.087~18.483, (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub> = 15.473~15.587, (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub> = 38.272~38.817, 与海南同时代的正长岩长石 Pb 同位素组成(谢才富等,2005,2006;周佐民等,2011)一致(表 4).

### 5 讨论

闪长玢岩脉具有较低的 SiO<sub>2</sub> 含量(49.18%~55.25%)、较高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (14.36%~16.75%) 和 FeO<sub>t</sub> (5.98%~10.07%), 且 Mg<sup>#</sup> 为 47.1~58.6, 明显高于实验岩石学所得的下地壳熔融产物的 Mg<sup>#</sup> < 45 这一结果(Rapp and Watson, 1995), 其不



表 4 闪长玢岩脉 Pb 同位素分析结果

Table 4 Pb isotopic compositions of diorite-porphyrite dikes from Shilu area

编号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$
SLN-8	18.679±0.006	15.596±0.003	39.290±0.008	18.483	15.587	38.817
SL-27	18.091±0.003	15.473±0.003	38.281±0.007	18.087	15.473	38.272
海南中一早三叠世正长岩				18.487~18.714	15.580~15.657	38.503~38.682

注:校正年龄为  $t=248\text{ Ma}$ ;海南中一早三叠世正长岩 Pb 同位素测试对象为长石,由 7 件样品组成,引自谢才富等(2005, 2006)和周佐民等(2011)。

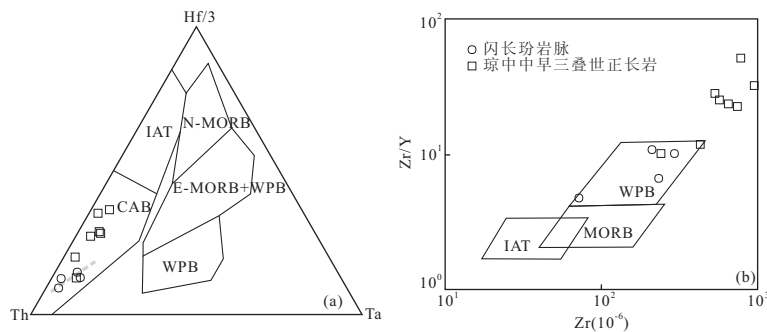
图 7 闪长玢岩脉 Hf/3-Th-Ta(a)(据 Wood *et al.*, 1979)及 Zr-Zr/Y(b)(据 Pearce and Norry, 1979)构造判别图解

Fig. 7 Hf/3-Th-Ta (a) and Zr-Zr/Y (b) diagrams to describe tectonic location of diorite-porphyrite dikes

数据来源同图 6. N-MORB, 洋中脊玄武岩; E-MORB+WPB, 洋中脊玄武岩和板内拉斑玄武岩; WPB, 板内碱性玄武岩; CAB, 岛弧钙碱性玄武岩; IAT, 岛弧拉斑玄武岩

可能由下地壳熔融形成. 岩脉 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值分别为 15.33~17.80 和 36.00~45.23(表 3), 与对应的地幔值(分别为  $17.5 \pm 2$  和 36.7, Hofmann, 1988; Green, 1995)一致, 显示可能为地幔成因来源. 前人研究表明, 亏损地幔来源的玄武岩具有较低的 LILE/HFSE(大离子亲石元素/高场强元素)和 LREE/HFSE(轻稀土元素/高场强元素)比值(Fitton *et al.*, 1988; Sun and McDonough, 1989). 石碌矿区脉岩 La/Ta ( $43.00 \sim 153.40$ )  $> 22$ , Ba/Nb ( $86.85 \sim 431.52$ )  $> 7.3$ , Rb/Zr ( $0.34 \sim 0.58$ )  $> 0.11$ , La/Nb ( $2.59 \sim 8.62$ )  $> 1.5$ (表 3), 均大于 OIB 值(分别为  $< 22, 7.3, 0.11$  和  $< 1.5$ , Fitton *et al.*, 1988; Sun and McDonough, 1989), 不可能为亏损地幔而只可能是富集地幔来源. 与海南早三叠世富集地幔来源的正长岩一致的 Pb 同位素组成(表 4)也表明为富集地幔来源. 另外, Pb 的正异常、高的 La/Nb 比值以及 2 颗中二叠世锆石的发现, 指示了脉岩成岩过程中可能有少量地壳物质的混染.

对华南三叠纪构造背景尽管前人也做过较多的研究, 但仍存在争议, 主要有碰撞造山(Hsu *et al.*, 1990; Carter *et al.*, 2001)、印支期后碰撞(孙涛, 2006)或后造山环境(谢才富等, 2005, 2006; 周佐民等, 2011)、与古太平洋板块俯冲有关的大陆岩浆弧

(Li *et al.*, 2006, 2007; Li and Li, 2007)和弧后(Wang *et al.*, 2005)环境等观点. 倘若是与二叠纪古太平洋板块 NW 向俯冲或斜向俯冲而引起东古特提斯洋的闭合有关, 那么海南岛晚二叠世一中三叠世时期的构造体系应以 NE 向的压扭性构造为特征, 这不可能形成 Zhang *et al.* (2011)所报道的昌江地区 242~250 Ma WNW 向的高应变剪切带. 可能的解释为晚二叠世印支板块 NE 向向华南地块俯冲有关(Cai and Zhang, 2009). 研究区外围 WNW 向韧性剪切带(Zhang *et al.*, 2011)、Song Ma 和哀牢山构造带~245 Ma 蛇绿岩(Lepvrier *et al.*, 1997)以及海南邦溪-晨星地区古生代变质基性岩(Li *et al.*, 2000, 2002)等研究也为这种观点提供了佐证.

海南岛发育有中一早三叠世琼西南尖峰岭超单元(谢才富等, 2006)、三亚石榴霓辉石正长岩(谢才富等, 2005)和琼中深堀村、麻山田等单元富碱侵入岩体(周佐民等, 2011), 且这些岩体均受控于 NE 向的戈枕、白沙和陵水-龙滚深大断裂(谢才富等, 2005, 2006; 周佐民等, 2011), 形成一条 NE 向的富碱侵入岩带, 甚至延伸到广东罗定-福建明溪地区(谢才富等, 2005). 富碱侵入岩带的发现表明中一早三叠世海南岛 NE 向断裂为张性环境. 研究的闪长玢岩脉呈 NE 向侵入于断裂构造中, 受控于高一

的 NE 向的戈枕断裂,与上述富碱侵入岩体具有相同的构造背景. 岩脉与琼中地区正长岩体具有相似的稀土元素配分特征, Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub> 图解显示前者为亚碱性玄武岩—碱性玄武岩,而后者具有英安岩—流纹岩性质(图 6a). 两者可能构成“双峰式”侵入岩,也表明该时期海南岛处于伸展构造背景. Hf/3-Th-Ta(图 7a)判别图解显示闪长玢岩脉位于钙碱性火山弧区向板内环境演化的趋势, Zr-Zr/Y 图解(图 7b)中显示岩脉位于板内环境. 脉岩与区内同时代的正长岩具有相似的构造环境,可能形成于大陆边缘弧的伸展背景, Ta/Yb-Th/Yb 图解(图 6b)也证实了这一观点. 正是在晚二叠世印支板块 NE 向向华南地块俯冲过程中,由于受到 NE 向的挤压作用, NE 向断裂处于张性环境,富集地幔沿张性断裂上升侵位并混染少量的地壳物质,形成了早三叠世的闪长玢岩脉.

## 6 结论

海南石碌地区闪长玢岩脉锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄为  $248 \pm 1$  Ma(MSWD=0.4),为早三叠世岩浆活动的产物,与同时代的富碱侵入岩体构成“双峰式”侵入岩. 闪长玢岩脉为钾玄质系列,低 SiO<sub>2</sub> 高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO 和 MgO, LILE 及 LREE 富集, HFSE 亏损, LREE/HFSE 和 LILE/HFSE 比值及 Pb 同位素组成显示为富集地幔来源,但混染有少量的地壳物质. 岩脉形成于晚二叠世印支板块 NE 向向华南地块俯冲造成的大陆边缘弧局部伸展背景下.

## References

Cai, J. X., Zhang, K. J., 2009. A New Model for the Indochina and South China Collision during the Late Permian to the Middle Triassic. *Tectonophysics*, 467: 35–43. doi:10.1016/j.tecto.2008.12.003

Carter, A., Roques, D., Bristow, C. S., et al., 2001. Understanding Mesozoic Accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic Thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29: 211–214. doi:10.1130/0091-7613(2001)029<0211:UMAISA>2.0.CO;2.

Chen, D. L., Sun, Y., Liu, L., et al., 2007. In Situ LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Ultrahigh-Pressure Eclogites in the Yukahe Area, Northern Qaidam Basin. *Science in China (Series D)*, 50 (Suppl.): 322–330. doi:10.1007/s11430-007-6001-6

Fan, W. M., Wang, Y. J., Guo, F., et al., 2003. Mesozoic

Mafic Magmatism in Hunan-Jiangxi Provinces and the Lithospheric Extension. *Earth Science Frontiers*, 10 (3): 159–169 (in Chinese with English abstract).

Fitton, J. G., James, D., Kempton, P. D., et al., 1988. The Role of Lithosphere Mantle in the Generation of Late Cenozoic Basic Magmas in the Western United States. In: Cox, K. G., Menzies, M. A., eds., *Oceanic and Continental Lithosphere: Similarities and Differences*. *Journal of Petrology*, Special Volume(1): 331–349. doi:10.1093/petrology/Special\_Volume.1.331

Fowler, M. B., Henney, P. J., 1996. Mixed Caledonian Appinite Magmas: Implications for Lamprophyre Fraction and High Ba-Sr Granite Genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126: 99–215. doi:10.1007/s004100050244

Green, T. H., 1995. Significance of Nb/Ta as an Indicator of Geochemical Processes in the Crust-Mantle System. *Chemical Geology*, 120(3–4), 347–359. doi:10.1016/0009-2541(94)00145-X

Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S., 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. doi:10.1016/j.precamres.2003.12.011

Hofmann, A. W., 1988. Chemical Differentiation of the Earth: the Relationship between Large Crust, and Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90 (3): 297–314. doi:10.1016/0012-821X(88)90132-X

Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 8: 423–439. doi:10.1046/j.1525-1314.2000.00266.X

Hou, W., Chen, H. F., Peng, G. L., 1996. Geotectonics and Gold Metallogeny in Hainan Island. Science Press, Beijing (in Chinese).

Hsu, K. J., Li, J. L., Chen, H. H., et al., 1990. Tectonics of South China: Key to Understanding West Pacific Geology. *Tectonophysics*, 183: 9–39. doi:10.1016/0040-1951(90)90186-C

Lepvrier, C., Maluski, H., Nguyen, V. V., et al., 1997. Indosinian NW-Trending Shear Zones within the Truong Son Belt (Vietnam) <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Triassic Ages and Cretaceous to Cenozoic Overprints. *Tectonophysics*, 283: 105–127. doi:10.1016/S0040-1951(97)00151-0

Li, X. H., Hu, R. Z., Rao, B., 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous Mafic Dikes from Northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2): 14–28 (in Chinese with English abstract).

Li, X. H., Zhou, H. W., Ding, S. J., et al., 2000. Metamor-

- phosed Mafic Rocks with N-Type MORB Geochemical Features in Hainan Island-Remnants of the Paleo-Tethys Oceanic Crust? *Chinese Science Bulletin*, 45: 956—960. doi: 10. 1007/BF02886208.
- Li, X. H. , Zhou, H. W. , Chung, S. L. , et al. , 2002. Geochemical and Sm-Nd Isotopic Characteristics of Metabasaltic from Central Hainan Island, South China and Their Tectonic Significance. *The Island Arc*, 11: 193—205.
- Li, X. H. , Chung, S. L. , Zhou, H. W. , et al. , 2004. Jurassic Intraplate Magmatism in Southern Hunan-Eastern Guangxi:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating, Geochemistry, Sr-Nd Isotopes and Implications for the Tectonic Evolution of SE China. *Geological Society, London, Special Publications*, 226: 193—215. doi: 10. 1144/GSL. SP. 2004. 226. 01. 11
- Li, X. H. , Li, Z. X. , Li, W. X. , et al. , 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China: Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114: 341—353. doi: 0022—1376/2006/11403—0005
- Li, X. H. , Li, Z. X. , Li, W. X. , 2007. U-Pb Zircon, Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Constraints on Age and Origin of Jurassic I- and A-Type Granites from Central Guangdong, SE China: A Major Igneous Event in Response to Foundering of a Subducted Flat-Slab? *Lithos*, 96: 186—204. doi: 10. 1016/j. lithos. 2006. 09. 018
- 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—182. doi: 10. 1130/G23193A. 1
- 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 of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537—571. doi: 10. 1093/petrology/egp082
- Mayborn, K. R. , Leshner, C. E. , Connelly, J. N. , 2008. Geochemical Constraints on the Late-Stage Evolution of Basaltic Magma as Revealed by Composite Dikes within the Kangamiut Dike Swarm, West Greenland. *Lithos*, 104: 428—438. doi: 10. 1016/j. lithos. 2008. 02. 001
- Pearce, J. A. , Norry, M. J. , 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69: 33—47. doi: 10. 1007/BF00375192
- Pearce, J. A. , 1983. Role of the Sub-Continental Lithosphere in Magma Genesis at Active Continental Margins. In: Hawkesworth, C. J. , Norry, M. J. , eds. , *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Shiva Publishing, Nantwich, 158—185.
- Poland, M. P. , Fink, J. H. , Tauxe, L. , 2004. Patterns of Magma Flow in Segmented Silicic Dikes at Summer Coon Volcano, Colorado: AMS and Thin Section Analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 155—169. doi: 10. 1016/S0012—821X(03)00706—4
- Rapp, R. P. , Watson, E. B. , 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8—32 kbar: Implications for Continental Growth and Crustmantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891—931. doi: 10. 1093/petrology/36. 4. 891
- Scarrow, J. H. , Leat, P. T. , Wareham, C. D. , et al. , 1998. Geochemistry of Mafic Dykes in the Antarctic Peninsula Continental-Margin Batholith: A Record of Arc Evolution. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 131: 289—305. doi: 10. 1007/s004100050394
- Scientific Researching Team of Iron-Rich Deposits in South China, Chinese Academy of Sciences, 1986. *Geology of Hainan Island and Geochemistry of Iron Ore Deposits in Shilu*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, S. S. , McDonough, W. F. , 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Process. In: Saunders, A. D. , Norry, M. J. , eds. , *Magmatism in the Ocean Basins*. *Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, 42: 313—345.
- Sun, T. , 2006. A New Map Showing the Distribution of Granites in South China and Its Explanatory Notes. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332—335 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. , Li, J. W. , Jian, P. , et al. , 2005. Alkaline Syenites in Eastern Cathaysia (South China) : Link to Permian-Triassic Transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 339—354. doi: 10. 1016/j. epsl. 2004. 11. 023
- Wang, Y. J. , Fan, W. M. , Guo, F. , et al. 2003. Geochemistry of Mesozoic Mafic Rocks around the Chenzhou-Linwu Fault in South China: Implication for the Lithospheric Boundary between the Yangtze and the Cathaysia Blocks. *International Geology Review*, 45(3) : 263—286. doi: 10. 2747/0020—6814. 45. 3. 263
- Wang, Y. J. , Fan, W. M. , Cawood, P. A. , et al. , 2008. Sr-Nd-Pb Isotopic Constraints on Multiple Mantle Domains for Mesozoic Mafic Rocks beneath the South China Block Hinterland. *Lithos*, 106(3—4) : 297—308. doi: 10. 1016/j. lithos. 2008. 07. 019
- Watson, E. B. , Wark, D. A. , Thomas, J. B. , 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4) : 413—433. doi: 10. 1007/s00410—006—0068—5
- Winchester, J. A. , Floyd, P. A. , 1976. Geochemical Magma Type Discrimination: Application to Altered and Metamorphosed Basic Igneous Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*,

- 28: 459–469. doi: 10.1016/0012-821X(76)90207-7
- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., 1979. A Re-Appraisal of the Use of Trace Elements to Classify and Discriminate between Magma Series Erupted in Different Tectonic Settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45: 326–336. doi: 10.1016/0012-821X(79)90133-X
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of Zircon and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569. Doi: 10.1360/04wd0130
- Xie, C. F., Zhu, J. C., Zhao, Z. J., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Age Dating of Garnet-Acmite Syenite: Constraints on the Hercynian-Indosinian Tectonic Evolution of Hainan Island. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 47–57 (in Chinese with English abstract).
- Xie, C. F., Zhu, J. C., Ding, S. J., et al., 2006. Age and Petrogenesis of the Jianfengling Granite and Its Relationship to Metallogenesis of the Baolun Gold Deposit, Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2493–2508 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., Hu, R. Z., Jia, D. C., 2002. Geological and Geochemical Characteristics and Its Significance of Mafic Dikes from Northwest Jiangxi Province. *Geochimica*, 31(4): 329–338 (in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., 2003. Late Mesozoic and Cenozoic Mafic Dikes (Bodies) from Southeastern China: Geological and Geochemical Characteristics and Its Geodynamics—A Case of Jiangxi Province. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. R., Xia, B., Li, P. C., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from the Precambrian Granitoids in Northwest Hainan Island and Its Geological Implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(4): 510–518 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. R., Wang, L., Xiao, Y., et al., 2008. A Preliminary Discussion on Metallogenic Model for Shilu-Type Iron Oxide-Copper-Gold-Cobalt Ore Deposit. *Mineral Deposits*, 27(6): 681–694 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. R., Xiao, Y., Xiao, B., et al., 2009. Metallogenic Model and Ore Predicting of the Shilu Iron Ore Deposit in Hainan Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, F. F., Wang, Y. J., Chen, X. Y., et al., 2011. Triassic High-Strain Shear Zones in Hainan Island (South China) and Their Implications on the Amalgamation of the Indochina and South China Blocks: Kinematic and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronological Constraints. *Gondwana Research*, 19: 910–925. doi:10.1016/j.gr.2010.11.002
- Zhang, X. W., Xiang, H., Zhong, Z. Q., et al., 2009. U-Pb Dating and Trace Elements Composition of Hydrothermal Zircons from Jianfengling Granite, Hainan: Restriction on the Age of Hydrothermal Event and Mineralization of Baolun Gold Deposit. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 921–930 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. M., Xie, C. F., Xu, Q., et al., 2011. Geological and Geochemical Characteristics of Middle Triassic Syenite-Granite Suite in Hainan Island and Its Geotectonic Implications. *Geological Review*, 57(4): 515–531 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 等, 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展. *地学前缘*, 10(3): 159–169.
- 侯威, 陈惠芳, 彭格林, 1996. 海南岛大地构造与金成矿学. 北京: 科学出版社.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰, 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. *地球化学*, 26(2): 14–28.
- 孙涛, 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. *地质通报*, 25(3): 332–335.
- 许德如, 夏斌, 李鹏春, 等, 2006. 海南岛西北部前寒武纪花岗岩质岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 30(4): 510–518.
- 许德如, 王力, 肖勇, 等, 2008. “石碌式”铁氧化物—铜(金)—钴矿床成矿模式初探. *矿床地质*, 27(6): 681–694.
- 许德如, 肖勇, 夏斌, 等, 2009. 海南石碌铁矿床成矿模式与找矿预测. 北京: 地质出版社.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 贾大成, 2002. 赣西北基性岩脉的地质地球化学特征及其意义. *地球化学*, 31(4): 329–338.
- 谢桂青, 2003. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 谢才富, 朱金初, 赵子杰, 等, 2005. 三亚石榴霓辉石正长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 对海南岛海西—印支期构造演化的制约. *高校地质学报*, 11(1): 47–57.
- 谢才富, 朱金初, 丁式江, 等, 2006. 海南尖峰岭花岗岩体的形成时代、成因及其与抱伦金矿的关系. *岩石学报*, 22(12): 2493–2508.
- 中国科学院华南富铁科学研究队, 1986. 海南岛地质与石碌铁矿地球化学. 北京: 科学出版社.
- 周佐民, 谢才富, 徐倩, 等, 2011. 海南岛中三叠世正长岩—花岗岩套的地质地球化学特征与构造意义. *地质论评*, 57(4): 515–531.
- 张小文, 向华, 钟增球, 等, 2009. 海南尖峰岭岩体热液锆石 U-Pb 定年及微量元素研究: 对热液作用及抱伦金矿成矿时代的限定. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(6): 921–930.