

桂东南南渡正长岩年代学、地球化学特征 及其构造意义

陈新跃^{1,3}, 王岳军², 张玉芝², 张爱梅², 曹有金¹

(1. 湖南科技大学 地质系, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 页岩气资源利用湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 桂东南南渡正长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试表明, 该正长岩形成年龄为 162 ± 1 Ma, 和赣南全南及桂东南地区其他燕山早期正长岩形成年龄一致。该正长岩 $\text{SiO}_2 = 61.78\% \sim 63.39\%$, 具有高碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 11.18\% \sim 12.30\%$)、高 K_2O 含量(6.47% ~ 9.06%) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(1.37 ~ 2.80) 特征, 系钾玄质系列岩石。该正长岩富集轻稀土元素(LREE) 和大离子亲石元素(LILE)、Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.48 \sim 0.74$)、Sr 和 P-Ti 负异常明显、无明显 Nb-Ta 异常、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.32 \sim +0.84$, 被归为大陆板内钾玄质岩石, 代表了燕山早期 160 Ma 左右华南内部一次重要的伸展-裂谷事件。

关键词: 南渡正长岩; 元素地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学; 桂东南

中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2013)02-0284-010

华南中生代岩浆活动强烈, 形成大面积分布的火成岩。然而, 关于这些火成岩形成的构造背景却一直是研究者们长期争论的焦点。有学者认为华南中生代为活动大陆边缘环境, 其岩浆活动与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲有关(Jahn et al., 1976, 1990; Holloway, 1982; 黄萱等, 1986; Charvet et al., 1994; Martin et al., 1994; Lan et al., 1996; Lapiere et al., 1996; Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007; 张旗等, 2011), 也有一些学者则认为华南在中侏罗世-白垩纪为非造山期的板内伸展-裂谷环境, 岩浆活动与岩石圈伸展、幔源岩浆底侵和地温梯度增高有关(Gilder et al., 1991, 1996; 李献华等, 1999; Li, 2000; 陈志刚等, 2003; 李社宏等, 2010; 陈希清等, 2010)。近年来, 在桂东南地区陆续发现一些中-基性和酸性富碱的碱性侵入岩(图 1a), 李献华等(1999) 根据岩石的地球化学特征将其命名

为钾玄岩。由于钾玄质系列岩石主要形成于岛弧环境, 包括大洋弧、大陆弧以及碰撞后弧, 只有极少数钾玄岩产于板内环境, 在构造演化研究中具有重要的意义。前人对桂东南花山岩体、同安岩体、牛庙岩体、里松岩体、清湖岩体和马山岩体等开展了大量的年代学和元素地球化学研究工作, 取得了丰硕的成果(广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 徐磊明和袁宗信, 1992; 朱金初和李向东, 1988; 朱金初等, 1989, 2005, 2006a, b; 袁宗信和张宗清, 1992; 李献华等, 1997, 1999, 2000, 2001, 2009; Chen and Jahn, 1998; 陈培荣等, 2002; 赵葵东等, 2009; Wang et al., 2012)。这些岩体的研究成果为理解桂东南、乃至华南晚中生代构造背景具有重要意义。但还有一些正长岩体没有资料报道, 如南渡岩体。本文拟报道桂东南地区南渡正长岩的锆石 U-Pb 年龄和元素-同位素地球化学特征, 以期为华南晚中

收稿日期: 2012-9-25; 改回日期: 2012-11-14

项目资助: 国家自然科学基金(批准号: 40902062, 408256009)、中国科学院重大项目(编号: KZCX1-YW-15-1) 和湖南省教育厅青年项目(编号: 12B039) 联合资助。

第一作者简介: 陈新跃(1977-), 男, 博士, 主要从事大地构造和地球化学方面的研究。Email: xinychen@163.com

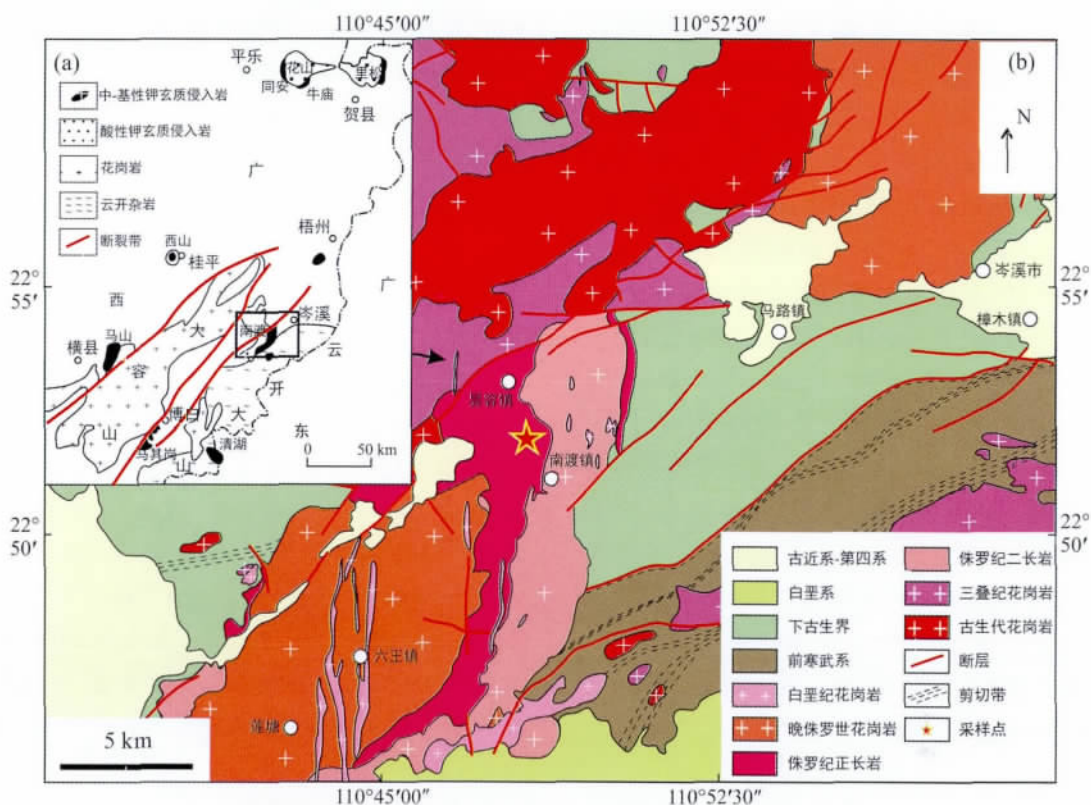


图 1 桂东南碱性侵入岩分布图 (a) (据李献华等, 1999 修改) 及南渡地区地质略图 (b)

Fig. 1 Simplified map showing the distribution of the alkali rocks in Southeastern Guangxi (a) (modified from Li et al., 1999), and sketched geological map of the Nandu region (b)

生代岩浆活动机制提供新的信息。

1 地质背景和样品特征

桂东南碱性侵入岩体分布在平乐、贺县、博白、桂平、横县、岑溪、梧州的广西东南部地区,沿博白-岑溪断裂带及十万大山东西两侧陆续出露有燕山期石英正长岩、正长岩和二长岩体(包括西山岩体、马山岩体、马其岗岩体、清湖岩体、罗荣岩体和南渡岩体等)以及印支-燕山期的闪长岩-花岗岩体(同安-牛庙岩体、里松岩体和杨梅岩体等)等(图 1a)。这些钾玄质侵入岩体均未变形,主要侵入于下古生界,马山岩体还侵入到晚海西-早印支期的大容山岩体(广西壮族自治区地质矿产局, 1985)。

南渡正长岩体位于岑溪市南渡镇,呈南北向带状分布,现出露面积约 8 km²(图 1b)。岩体侵入地层为下古生界,向北与三叠纪花岗岩以博白-岑溪断层相隔。正长岩体的边缘为中侏罗世二长岩,形成正长岩-二长岩组合;岩体中部大部分地区被晚侏罗世花岗岩体侵入(图 1b)。南渡正长岩呈肉红色,局部被蚀变为褐色,一般具有等粒中-粗粒(几

毫米至数十毫米)结构,局部地方暗色矿物分布相对集中,但未发现有基性包体,块状构造。正长岩岩性为辉石正长岩或角闪石辉石正长岩,岩石中辉石为单斜辉石(0~10%),未见斜方辉石颗粒;一般仅含少量(<1%)或不含黑云母;角闪石大多为普通角闪石(0~7%);钾长石以微斜条纹长石为主(85%~90%);石英含量少,一般在 5% 以下;副矿物主要为锆石、磷灰石和磁铁矿等。本文所有样品均取自南渡的辉石正长岩体。

2 分析方法

通过人工重砂法从新鲜的样品中分选出锆石,然后在双目显微镜下挑选出无裂隙、无包体、透明干净的自形锆石颗粒,将其与一片 RSES 参考样 SL13 及数粒标准锆石 Temora(年龄为 417 Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光,然后进行反射光和透射光照相,并进行 CL 图像分析以检查锆石内部的结构。所有用于定年的锆石均为透明-半透明柱状矿物,内部具明显的岩浆振荡环带,与岩浆成因锆石相似。锆石 U-Pb 同位素分析在香港大学的 Nu Plasma

ICP-MS 激光离子探针完成,激光剥蚀系统为 Resolution M-50,分析采用激光束斑直径为 30 μm ,激光脉冲为 5 Hz。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 计算采用 GLITTER 4.0 程序 (Jackson et al., 2004)。详细的分析步骤和数据处理方法见 Xia et al. (2011)。

全岩的主量和微量元素在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。主量元素分析是用 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪 (XRF) 分析,分析精度为 1% ~ 5%,具体的实验流程见 Li et al. (2005)。微量元素的分析则采用 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS),分析精度为 2% ~ 5%,详细的实验方法见刘颖等 (1996)。Sr-Nd 同位素在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。用阳离子树脂分离 Rb、Sr 和 REE,用 HDEHP 进一步分离 Sm 和 Nd。Sr-Nd 同位素组成用 Micromass Isoprobe 型多接收器等离子质谱仪

(MC-ICPMS) 测定。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。详细的 Sr-Nd 同位素分析方法分别见韦刚健等 (2002) 和梁细荣等 (2003)。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学

样品 10YK53A 取自南渡正长岩体 (22°52.097' N, 110°47.965' E),所分析的锆石形态完整,有明显的振荡环带构造,属岩浆成因锆石。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果分析见表 1 和图 2。样品 10YK53A 中锆石所测 25 个点的 $\text{Th}/\text{U} = 0.31 \sim 1.37$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $152 \pm 2 \text{ Ma} \sim 171 \pm 1 \text{ Ma}$,其中 23 个点具有比较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 (162 ~ 163 Ma),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $162 \pm 1 \text{ Ma}$ ($n = 23$, MSWD = 0.1)。所获 $162 \pm 1 \text{ Ma}$ 的年龄可解释为桂西南南渡正长岩体的结晶年龄。

表 1 10YK53A 样品中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb results for zircons from the Nandu syenite (10YK53A)

测点	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
		比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ
1	1.01	0.04921	0.00061	0.17338	0.00311	0.02555	0.00025	167	30	162	3	163	2
2	0.76	0.05320	0.00057	0.18712	0.00320	0.02551	0.00026	345	19	174	3	162	2
3	1.37	0.05327	0.00023	0.18760	0.00224	0.02555	0.00023	339	9	175	2	163	1
4	0.82	0.05155	0.00023	0.18094	0.00229	0.02547	0.00024	265	11	169	2	162	2
5	1.07	0.10257	0.00150	0.38184	0.00763	0.02683	0.00019	1672	27	328	6	171	1
6	1.25	0.04950	0.00030	0.17402	0.00222	0.02550	0.00019	172	10	163	2	162	1
7	0.42	0.05258	0.00025	0.18470	0.00319	0.02548	0.00036	309	11	172	3	162	2
8	0.76	0.05031	0.00028	0.17648	0.00200	0.02545	0.00018	209	19	165	2	162	1
9	0.74	0.05219	0.00028	0.18326	0.00294	0.02548	0.00037	295	11	171	3	162	2
10	0.63	0.05332	0.00032	0.18701	0.00270	0.02544	0.00027	343	19	174	2	162	2
11	0.90	0.05393	0.00028	0.18967	0.00207	0.02552	0.00022	369	11	176	2	162	1
12	0.64	0.04992	0.00049	0.17535	0.00250	0.02547	0.00018	191	22	164	2	162	1
13	0.59	0.04943	0.00097	0.17389	0.00464	0.02548	0.00029	169	46	163	4	162	2
14	0.85	0.05073	0.00030	0.17787	0.00208	0.02543	0.00018	228	13	166	2	162	1
15	0.31	0.05110	0.00032	0.17939	0.00223	0.02547	0.00020	256	15	168	2	162	1
16	0.93	0.05060	0.00024	0.17788	0.00203	0.02550	0.00021	233	11	166	2	162	1
17	0.42	0.04992	0.00037	0.17511	0.00234	0.02548	0.00025	191	19	164	2	162	2
18	0.90	0.05030	0.00024	0.17666	0.00188	0.02549	0.00019	209	11	165	2	162	1
19	1.02	0.05195	0.00030	0.18295	0.00219	0.02556	0.00024	283	-18	171	2	163	1
20	0.86	0.05142	0.00024	0.18074	0.00326	0.02550	0.00042	261	42	169	3	162	3
21	0.88	0.05106	0.00025	0.17949	0.00197	0.02551	0.00020	243	11	168	2	162	1
22	0.81	0.05300	0.00050	0.18653	0.00256	0.02554	0.00019	328	22	174	2	163	1
23	0.47	0.04967	0.00023	0.17451	0.00204	0.02549	0.00021	189	11	163	2	162	1
24	0.84	0.05328	0.00032	0.17492	0.00203	0.02383	0.00025	343	13	164	2	152	2
25	0.54	0.04948	0.00038	0.17395	0.00249	0.02548	0.00021	172	17	163	2	162	1

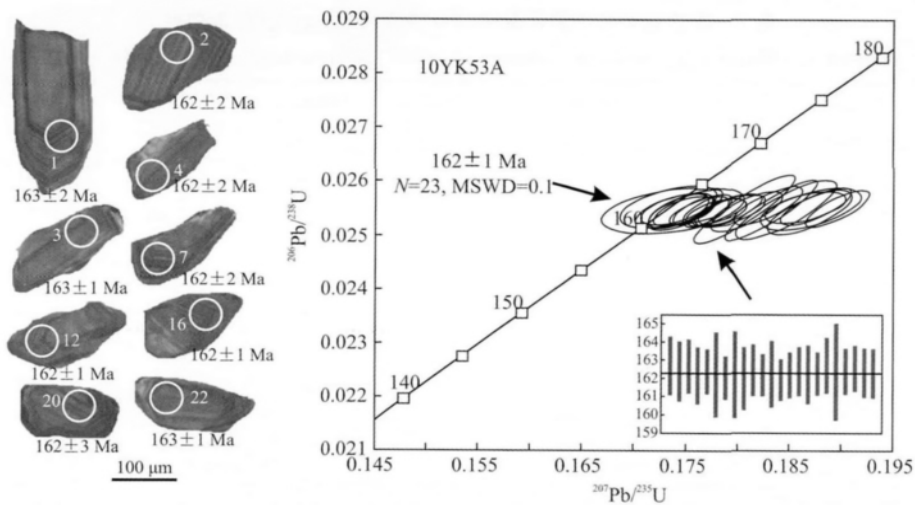


图 2 南渡正长岩(10YK53A) 锆石 U-Pb 谐和图和部分锆石的阴极发光 (CL) 图像

Fig. 2 Concordia diagram and CL images of zircons from the Nandu syenite (10YK53A)

3.2 地球化学特征

桂西南南渡正长岩的主量元素和微量元素分析数据列于表 2。8 个样品 SiO_2 含量为 61.78% ~ 63.39%, MgO 含量极低 (0.45% ~ 0.72%), 全碱含量高 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 11.18\% \sim 12.30\%$)。在 Midlemost (1994) 提出的侵入岩 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) - SiO_2 图中落入正长岩区 (图 3a), 且样品具有高的 K_2O 含量 (6.47% ~ 9.06%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 (1.37 ~ 2.80), TiO_2 含量低 (0.58% ~ 0.71%), 高的 Al_2O_3 含量 (17.2% ~ 18.2%), 在 Rickwood (1989) 的 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图上属于高钾的钾玄质系列 (图 3b)。

南渡正长岩样品具有非常高的稀土元素丰度 ($\Sigma\text{REE} = 323.67 \sim 750.17 \mu\text{g/g}$)。在球粒陨石标准化图解上, 所有样品都显示出 LREE 富集, HREE 亏损的右倾型分布模式 (图 4a), LREE 和 HREE 分异明显 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 13.8 \sim 38.7$, 其中 LREE 分异明显 ($(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.63 \sim 7.50$), HREE 分异相对较弱 ($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 2.20 \sim 3.12$), $\delta\text{Eu} = 0.48 \sim 0.74$ 。在原始地幔标准化多元素蛛网图中 (图 4b), 样品大离子亲石元素 (LILE) 富集, 但 Sr、P 和 Ti 显示明显的负异常, Zr-Hf 异常不明显。Sr、P 和 Ti 负异常表明在岩浆演化过程中经历了斜长石、磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用。正长岩存在低的 MgO 含量, 其大离子亲石元素 Rb-Sr-Ba 双变量图解 (Azman, 2000, 图 5) 显示有黑云母的分离结晶作用, 与岩石少见黑云母一致。与具有岛弧特征的钾玄质岩石不同的是, 南渡正长岩无明显的 Nb-Ta 异常, $\text{Nb}/\text{La} = 0.64 \sim 1.72$ (平均 1.30), 与其他桂东南

钾玄质侵入岩 (李献华等, 1999) 和赣南正长岩 (陈志刚等, 2003) 类似, 有着与板内玄武岩相似微量元素分布形式。

南渡正长岩样品 Sr-Nd 同位素分析结果见表 3。3 个代表性正长岩样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70479 \sim 0.70563$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化范围较小 (+0.32 ~ +0.84), 与广西花山、同安、牛庙和赣南全南钾玄质岩石有着相似的 Sr-Nd 同位素组成 (朱金初等, 1989; 李献华等, 1999; 陈志刚等, 2003)。3 个样品的 $\text{Nd}/\text{Th} = 0.62 \sim 2.29$, 虽然 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 Nd/Th 值有一定的正相关性, 但与桂东南和全南较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 Nd/Th 相比均明显偏低。

4 讨 论

4.1 形成年龄

桂东南钾玄质侵入岩主要侵入下古生界, 其中马山岩体侵入到晚海西 - 早印支期的大容山花岗岩体中, 李献华等 (1999) 认为这些钾玄质侵入岩很可能形成于中生代燕山期。徐磊明和袁宗信 (1992) 获得桂东南钾玄质侵入岩带南部清湖岩体的锆石 U-Pb 下交点年龄为 $158 \pm 2 \text{ Ma}$, 而李献华等 (2009) 获得清湖岩体的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 $160 \pm 1 \text{ Ma}$ 。朱金初等 (1989) 在桂东南钾玄质侵入岩带北部获得一批 Rb-Sr 等时线年龄, 认为同安和牛庙岩体为 210.5 Ma , 形成于印支期; 花山岩体为 164.7 Ma , 形成于燕山早期。而朱金初等 (2006a, b) 获得桂东北牛庙岩体和同安岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 $163 \pm 4 \text{ Ma}$ 和 $160 \pm 4 \text{ Ma}$ 。赵葵东

表 2 南渡正长岩主量元素(%) 和微量元素($\mu\text{g/g}$) 分析数据表
 Table 2 Major (%) and trace element ($\mu\text{g/g}$) compositions of the Nandu syenite

样品	10YK53A	10YK53B	10YK53C	10YK53D	10YK53G	10YK53H	10YK53I	10YK53J
SiO ₂	61.79	62.72	61.87	62.78	62.42	62.26	63.39	61.78
TiO ₂	0.68	0.57	0.71	0.58	0.62	0.61	0.71	0.65
Al ₂ O ₃	17.91	17.14	17.55	17.98	18.14	17.85	17.94	17.97
Fe ₂ O ₃	3.50	4.86	4.25	4.07	3.69	3.64	3.22	4.07
MnO	0.10	0.26	0.11	0.14	0.08	0.08	0.08	0.09
MgO	0.65	0.68	0.72	0.45	0.67	0.58	0.55	0.63
CaO	1.73	0.93	1.55	1.11	0.96	1.52	0.47	1.38
Na ₂ O	4.45	4.71	4.35	5.05	4.00	4.42	3.24	4.78
K ₂ O	7.22	6.47	7.00	7.02	7.80	7.17	9.06	7.02
P ₂ O ₅	0.12	0.08	0.12	0.09	0.10	0.10	0.12	0.10
LOI	1.83	1.60	1.78	0.78	1.50	1.76	1.16	1.55
总量	100.00	100.02	100.01	100.05	99.99	100.00	99.93	100.03
K ₂ O + Na ₂ O	11.68	11.18	11.34	12.06	11.80	11.59	12.30	11.80
K ₂ O/Na ₂ O	1.62	1.37	1.61	1.39	1.95	1.62	2.80	1.47
Sc	7.82	6.29	5.50	5.20	6.57	5.92	6.18	7.57
Cr	64.5	78.0	65.7	80.2	46.7	62.3	44.3	65.8
Co	1.43	1.26	1.58	1.17	2.52	1.83	2.69	1.17
Ni	2.80	2.98	3.01	2.27	2.38	2.54	2.90	2.36
V	9.47	7.08	8.79	8.24	4.07	4.87	5.70	5.83
Cs	0.98	0.85	1.01	5.51	2.78	2.40	3.43	1.17
Pb	23.72	21.91	20.66	20.77	23.27	22.02	19.75	21.23
Rb	166	174	159	196	206	178	234	154
Sr	165	95.7	157	146	132	130	124	94.1
Ba	538	266	539	340	516	465	585	226
La	82.6	65.2	203.0	87.9	70.0	65.8	85.2	186.0
Ce	153	130	342	163	142	138	163	316
Pr	18.1	15.8	35.4	19.0	17.5	17.0	19.2	33.8
Nd	65.7	56.6	113.0	65.1	63.6	61.8	68.0	104.0
Sm	11.9	10.6	17.2	11.2	11.3	11.4	11.8	15.6
Eu	2.49	2.08	2.86	1.88	2.43	2.56	2.40	2.22
Gd	10.20	9.24	13.72	8.94	9.29	9.23	9.50	12.19
Tb	1.57	1.44	1.98	1.39	1.37	1.38	1.40	1.85
Dy	8.31	7.57	9.95	7.25	7.35	7.30	7.05	9.53
Ho	1.56	1.45	1.84	1.37	1.48	1.38	1.34	1.79
Er	3.96	3.88	4.61	3.59	3.91	3.67	3.46	4.78
Tm	0.52	0.49	0.58	0.48	0.52	0.52	0.44	0.62
Yb	3.42	3.07	3.54	3.04	3.42	3.18	2.91	3.91
Lu	0.47	0.48	0.50	0.46	0.50	0.45	0.40	0.59
Y	38.62	36.40	45.29	34.50	35.03	34.92	31.96	44.02
Nb	132.2	101.5	136.8	106.1	123.8	117.3	130.3	131.3
Ta	6.60	4.21	7.58	4.60	6.34	5.95	5.98	6.61
Zr	384	323	375	447	469	367	498	664
Hf	9.32	6.92	9.30	10.08	12.23	8.93	12.23	17.76
Th	6.87	6.39	34.00	11.00	11.90	7.66	6.92	25.20
U	2.32	1.89	3.24	2.17	3.92	3.41	3.82	6.37

注: 主量和微量元素由中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室分别采用 XRF 法和 ICP-MS 法分析获得。

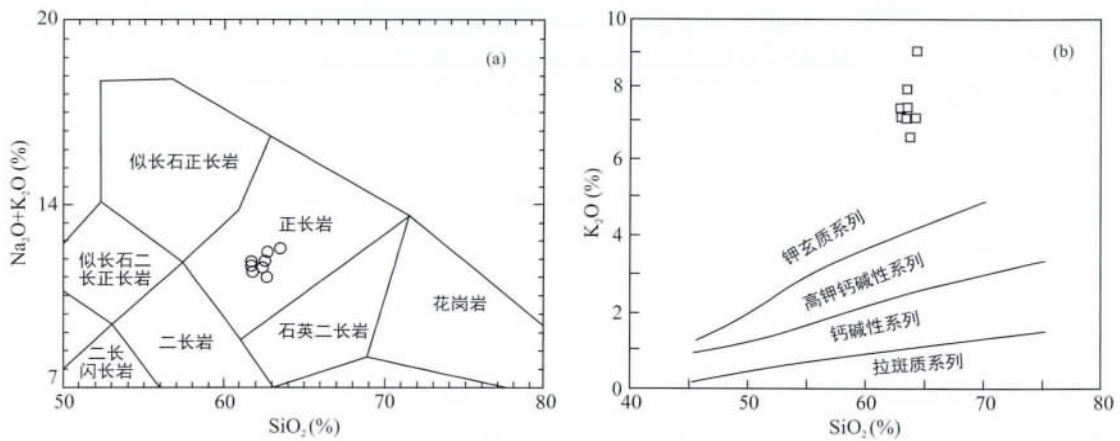


图 3 (K₂O + Na₂O) -SiO₂ 岩石化学分类图 (a) 和 K₂O -SiO₂ 图解 (b)

Fig. 3 (K₂O + Na₂O) vs SiO₂ diagram (a) (Middlemost, 1994) and K₂O vs SiO₂ diagram (b) for the Nandu syenite

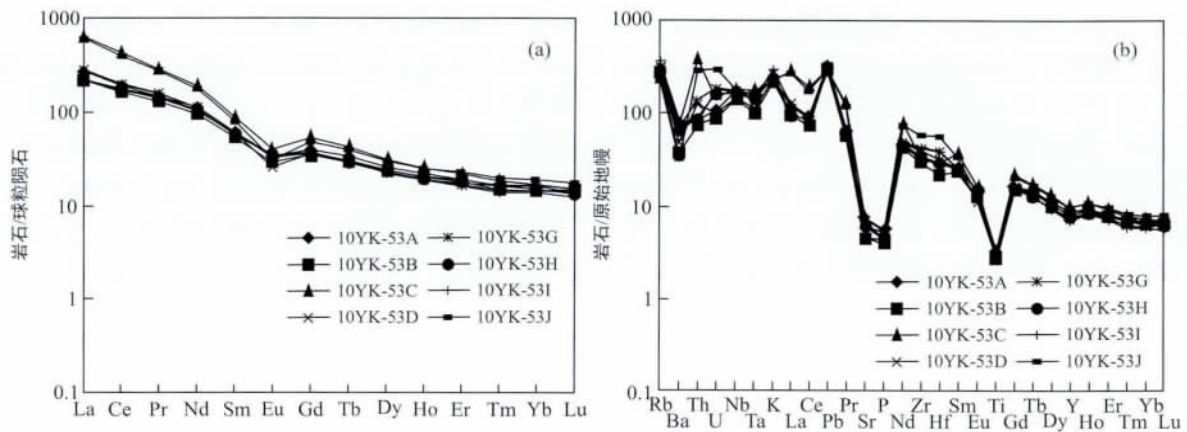


图 4 南渡正长岩稀土元素配分模式图 (a) (球粒陨石数据值据 Boynton, 1984) 和微量元素蛛网图 (b) (原始地幔数据值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE-patterns (a) and spider diagram for the Nandu syenite (b) (the normalized values for chondrite and primitive mantle are from Boynton (1984) and Sun and McDonough (1989), respectively)

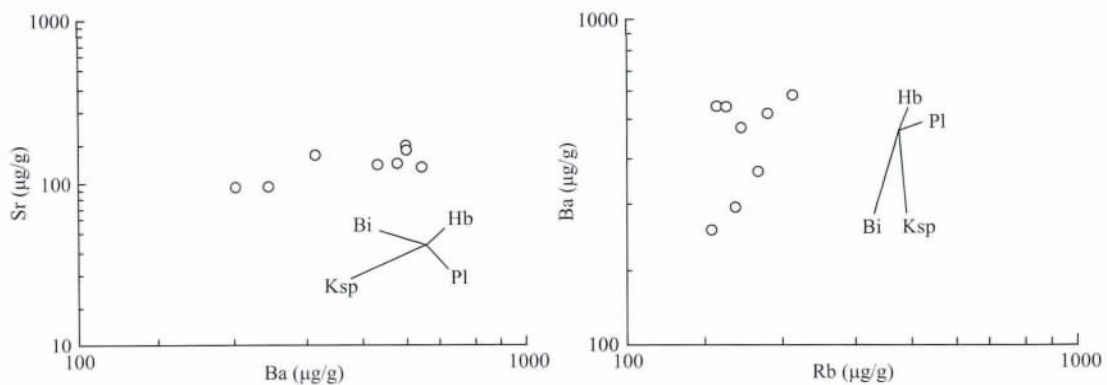


图 5 南渡正长岩 Rb-Sr-Ba 元素双变量图解 (据 Azman, 2000) (Hb. 角闪石, Pl. 斜长石, Ksp. 钾长石, Bi. 黑云母)

Fig. 5 Ba-Sr and Rb-Ba diagrams for the Nandu syenite (modified from Azman, 2000)

(Hb. Hornblende, Pl. Plagioclase, Ksp. K-feldspar, Bi. Biotite)

表 3 南渡正长岩 Sr-Nd 同位素分析数据表

Table 3 Sr-Nd isotopic composition of the Nandu syenite

样品	Sm ($\mu\text{g/g}$)	Nd ($\mu\text{g/g}$)	Rb ($\mu\text{g/g}$)	Sr ($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$
10YK-53A	11.9	65.7	166	165	0.109	0.512588 ± 2	2.92	0.711759 ± 4	0.70504	+0.83
10YK-53D	11.2	65.1	196	146	0.104	0.512583 ± 1	3.89	0.713755 ± 6	0.70479	+0.84
10YK-53J	15.6	104	154	94.1	0.091	0.512542 ± 3	4.74	0.716558 ± 6	0.70563	+0.32

等(2009)对桂东北的花山、同安、牛庙和里松等岩体进行了元素地球化学和年代学研究,认为这些岩体形成于燕山早期(160~163 Ma),与李献华等(2009)获得里松岩体 SIMS 锆石 U-Pb 年龄一致。李献华等(2000,2001)获得马山岩体角闪石单矿物 ^{39}Ar - ^{40}Ar 坪年龄为 164 ± 2 Ma。南渡岩体位于桂东南钾玄质侵入岩带的中部,侵入地层为下古生界,其形成时代也应与清湖、花山和里松等岩体相近。本次取自于南渡正长岩的样品(10YK53A)中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年所测 25 个分析点中有 23 个点取得了基本一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄(162~163 Ma),经过计算后,获得 162 ± 1 Ma(MSWD=0.1)的加权平均年龄。这个年龄与桂东南钾玄质侵入岩带南部的清湖岩体和北部的花山岩体的形成年龄在误差范围内基本一致,可代表南渡正长岩的形成年龄。因此, 162 ± 1 Ma 的加权平均年龄可解释为南渡正长岩的结晶年龄。此外,在南岭花岗岩区和赣杭带南段发现有少量侏罗纪正长岩,峰期年龄为 160 Ma(Zhou and Li,2000;李献华等,1997,1999,2000,2001,2009;陈志刚等,2003;Zhou et al.,2006;Huang et al.,2008;He et al.,2010;Wang et al.,2012),暗示在燕山早期华南有一次较大规模的碱性岩浆活动。

4.2 构造环境探讨

钾玄质岩石主要形成于岛弧环境,包括大洋岛弧、大陆岛弧以及碰撞后弧,只有极少数钾玄岩产于板内环境。岛弧钾玄岩具有高度富集 LILE 和 LREE 以及显著的 Ta-Nb-Ti 负异常(Muller and Goves,1995;Rock,1991)。大洋板内钾玄岩具有典型洋岛玄武岩(OIB)微量元素特征(Weaver et al.,1987);而大陆板内钾玄岩既有岛弧型微量元素特征(如北美 Colorado(Leat et al.,1988)、印度尼西亚加里曼丹的 Borneo(Bergman et al.,1988)和澳大利亚东南部的 Lachlan Fold Belt(Wyborn,1992)),也有 OIB 型微量元素特征(如东非裂谷,Rogers et al.,1988)。板内钾玄质岩浆的形成通常与软流圈地幔上涌和岩石圈伸展-减薄相关(Nel-

son et al.,1986;李献华等,1999;陈志刚等,2002)。南渡正长岩有正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、无 Nb-Ta 异常、微量元素显示 Eu 轻微负异常($\delta\text{Eu} = 0.48 \sim 0.74$)、富集大离子亲石元素(LILE)、Sr-P-Ti 明显负异常,其分布形式与板内玄武岩相似,表明南渡正长岩的形成与岛弧无关,而与板内交代富集的岩石圈地幔有关。这种交代富集的岩石圈地幔可能和 LILE 富集的地幔柱底垫相关,或岩石圈本身存在不均一性(李献华等,1999)。南渡正长岩 HREE 没有明显亏损也无明显 Eu 异常,表明他可能不是由岩石圈地幔下部石榴石二辉橄榄岩部分熔融而成,而是来源于岩石圈地幔上部含金云母的尖晶石二辉橄榄岩地幔的小比例部分熔融(Nelson et al.,1986;李献华等,1999)。

现阶段对华南广泛出露的岩浆岩主要有两种观点。一是与古太平洋俯冲有关(Jahn,1974;Jahn et al.,1976,1990;Holloway,1982;黄萱等,1986;Charvet et al.,1994;Martin et al.,1994;Lan et al.,1996;Lapierre et al.,1997;Zhou and Li,2000;周新民和李武显,2000;Li and Li,2007);二是与岩石圈伸展有关(Gilder et al.,1991,1996;李献华等,1999;Li,2000;陈志刚等,2003;Li et al.,2004)。陈培荣等(2002)认为华南燕山早期岩浆岩是印支期碰撞造山运动后的后造山岩石组合。而形成于燕山早期(162 ± 0.6 Ma)的南渡正长岩富集大离子亲石元素(LILE)、高 Nb/La 比值(>1)、没有 Nb-Ta 亏损和正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,表明南渡正长岩为典型的“裂谷型”钾玄岩,形成于非造山环境,与燕山早期华南内部软流圈地幔上涌和岩石圈伸展-减薄相关。南岭花岗岩区和赣杭带南段出露侏罗纪正长岩,这表明在中侏罗世华南内部区域构造背景可能为板内伸展-裂谷环境(Zhou and Li,2000;李献华等,1997,1999,2000,2001,2009;陈志刚等,2003;Zhou et al.,2006;Huang et al.,2008;He et al.,2010;Wang et al.,2012)。但华南内部燕山早期的“伸展-裂谷”模式及与区域燕山早期大规模花岗岩岩浆活动的关系还有待于进一步的深入研究。

华南后造山阶段大陆地壳拉张减薄的构造环境, 软流圈地幔沿超岩石圈深断裂的上涌和底侵是造成富集岩石圈地幔和中下地壳熔融的主要机制。李献华等(2009)获得清湖岩体和里松岩体的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄均为 160 Ma, 从 Hf-O、Sr-Nd 同位素和微量元素地球化学表明其母岩浆来源于受含金云母岩的地幔交代作用和少量地壳混染。

5 结 论

南渡正长岩形成于 162 ± 1 Ma, 代表华南中生代燕山早期的岩石圈伸展事件。正长岩 SiO_2 含量 61.78% ~ 63.39%, 具有低镁 ($\text{MgO} = 0.45\% \sim 0.72\%$)、高碱 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 11.18\% \sim 12.30\%$)、高的 K_2O 含量 (6.47 ~ 9.06) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 (1.37 ~ 2.80) 等特征, 为高钾的钾玄质系列的岩石。同时富集 LREE, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 13.80 \sim 38.66$, 显示 Eu 轻微负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.48 \sim 0.74$); 富集大离子亲石元素 (LILE), Sr、P 和 Ti 显示明显的负异常, 无明显的 Nb-Ta 异常, $\text{Nb}/\text{La} = 0.68 \sim 1.72$ (平均 1.30), 微量元素分布形式板内玄武岩相似。正长岩岩石地球化学特征和 Sr、Nd 同位素组成表明其形成于非造山的大陆裂谷环境, 与华南中生代燕山早期软流圈地幔上涌和岩石圈伸展 - 减薄相关。

致谢: 中国科学院广州地球化学研究所李武显研究员和另一位匿名审稿专家对本文提出了建设性的意见和建议, 笔者在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 2002. 南岭燕山早期造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. 中国科学(D辑): 地球科学, 32(4): 279-289.
- 陈希清, 付建明, 程顺波, 徐德明, 马丽艳. 2010. 利源复式花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究. 大地构造与成矿学, 34(3): 429-434.
- 陈志刚, 李献华, 李武显, 刘敦一. 2003. 赣南全南正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对华南燕山早期构造背景制约. 地球化学, 32(3): 223-229.
- 陈志刚, 李献华, 李武显. 2002. 全南正长岩的地球化学特征及成因. 地质论评, 48(增刊): 77-83.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社: 1-853.
- 黄萱, 孙世华, Depaolo D J, 吴克隆. 1986. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd、Sr 同位素研究. 岩石学报, 2(2): 50-63.
- 李社宏, 李文铅, 丁玉进, 刘建平, 梁前勇, 曹志明. 2010. 瑶岭钨矿白基寨花岗岩地质特征及成矿意义. 大地构造与成矿学, 34(1): 139-146.
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学与地球化学. 地球化学, 26(2): 14-31.
- 李献华, 李武显, 王选策, 李秋立, 刘宇, 唐国强. 2009. 幔源岩浆在南岭燕山早期花岗岩形成中的作用: 锆石原位 Hf-O 同位素制约. 中国科学(D辑), 39(7): 872-887.
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄嶠, 陈正宏, 于津生, 桂训唐. 2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: I. 岩石学 and 同位素地质年代学. 地球化学, 29(6): 513-520.
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄嶠, 陈正宏, 于津生, 桂训唐. 2001. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义: II. 微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学. 地球化学, 30(1): 57-65.
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄嶠, 孙敏, 陈正宏. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报, 44(18): 1992-1998.
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91-96.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测量岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552-558.
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. 地球化学, 31(3): 295-299.
- 徐磊明, 袁宗信. 1992. 清湖二长岩锆石的铀-铅同位素年龄及其地质意义. 广西地质, 5(3): 33-36.
- 袁宗信, 张宗清. 1992. 南岭花岗岩类的 Sm-Nd 同位素特征及岩石成因探讨. 地质论评, 38(1): 1-15.
- 张旗, 金性俊, 李承东, 王焰, 王元龙. 2011. 花岗岩与地壳厚度关系探讨. 大地构造与成矿学, 35(2): 259-269.
- 赵葵东, 蒋少涌, 朱金初, 李亮, 戴宝章, 姜耀辉, 凌洪飞. 2009. 桂东北花山-姑婆山侵入杂岩体和暗色包体的锆石微区 Hf 同位素组成及其成岩指示意义. 科学通报, 54(23): 3716-3725.
- 周新民, 李武显. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展, 10(3): 240-247.
- 朱金初, 李向东, 沈渭洲, 王银喜, 杨杰东. 1989. 广西花山复式花岗岩体成因的铷、钕和氧同位素研究. 地质学报, 63(3): 225-235.
- 朱金初, 李向东. 1988. 广西花山岩岗岩的岩石学和地球化学特征及成岩物质来源的探讨. 矿物岩石学杂志, 7(1): 28-38.
- 朱金初, 谢才富, 张佩华, 杨策, 顾晟彦. 2005. 桂东北牛庙闪长岩和同安石英二长岩: 岩石学、锆石 SHRIMP U-

- Pb 年代学和地球化学. 岩石学报, 21(3): 665-676.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006a. 南岭西段花山-姑婆山 A 型花岗岩质杂岩带: 岩石学、地球化学和岩石成因. 地质学报, 80(4): 529-542.
- 朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006b. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石 U-Pb 年龄格架及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2270-2278.
- Azman A G. 2000. The western belt granite of Peninsular Malaysia: Some emergent problems on granite classification and its implication. *Geosciences Journal*, 4(4): 283-293.
- Berbman S C, Dunn D P and Krol L G. 1988. Rock and mineral chemistry of Linhaisai minette and the origin of Borneo diamonds, Central Kalimantan, Indonesia. *Canadian Mineralogist*, 26(1): 23-44.
- Boynton W W. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies // Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry: Developments in Geochemistry 2. Amsterdam: Elsevier: 63-114.
- Charvet J, Lapierre H and Yu Y. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 9(4): 387-396.
- Chen J F and Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1-2): 101-133.
- Gilder S A, Gill J B, Coe R S, Zhao X X, Liu Z W, Wang G X, Yuan K R, Liu W L, Kuang G D and Wu H R. 1996. Isotopic and paleomagnetic constrains on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16137-161154.
- Gilder S A, Keller G R, Lou M and Goodell P. 1991. Eastern Asia and the Western Pacific timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197(2-4): 225-243.
- He Z Y, Xu X S and Niu Y L. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China. *Lithos*, 119: 621-641.
- Holloway N H. 1982. North Palawan Block, Philippines - Its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *AAPG Bull*, 66(9): 1355-1383.
- Huang H Q, Li X H, Li W X and Liu Y. 2008. Age and origin of the Dadongshan granite from the Nanling Range: SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Geological Journal of China Universities* 14(3): 1-17.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L and Belousova W A. 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.
- Jahn B M, Chen P Y and Yen T P. 1976. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance. *Geo Soc Am Bull*, 86: 763-776.
- Jahn B M, Zhou X H and Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183(1-4): 145-160.
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in Southeast China. *Nature*, 248: 480-483.
- Lan C Y, Jahn B M, Mertzman S A and Wu T W. 1996. Subduction-related granitic rocks of Taiwan. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 14(1-2): 11-28.
- Lapierre H, Jahn B M, Charvet J and Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China. *Tectonophysics*, 274(4): 321-338.
- Leat P T, Thompson R N, Morrison M A, Hendry G L and Dickin A P. 1988. Silicic magma derived by fractional-crystallization from Miocene, Elkhead Mountain, Colorado. *Mineralogy Magazine*, 52: 577-586.
- Li X H, Chung S L, Zhou H W, Lo C H, Liu Y and Chen C H. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for tectonic evolution of SE China // Malpas J, Fletcher C J, Aitchison J C and Ali J. Aspects of the Tectonic Evolution of China. *Geological Society, London, Special Publications*, 226: 193-216.
- Li X H, Qi C S, Liu Y, Liang X R, Tu X L, Xie L W and Yang Y H. 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios. *Chinese Science Bulletin*, 50: 2481-2486.
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Science*, 18(3): 293-305.
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and post-orogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179-182.
- Martin H, Bonin B, Capdevila R, Jahn B M, Lameryre J and Wang Y. 1994. The Kuiu peralkaline granitic complex (SE China): Petrology and geochemistry. *Journal of Petrology*, 35(4): 983-1015.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.

- Muller D and Goves D I. 1995. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. Berlin: Springer-Verlag: 1 - 144.
- Nelson D R, McCulloch M T and Sun S S. 1986. The origins of ultrapotassic rocks as inferred from Sr, Nd and Pb isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(2): 231 - 245.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247 - 263.
- Rock N M S. 1991. Lamprophyres. Glasgow: Blackie: 1 - 285.
- Rogers N W, James D, Kelley S P and De Mulder M. 1998. The generation of potassic lavas from the eastern Virunga Province, Rwanda. *Journal of Petrology*, 39(6): 1223 - 1247.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of ocean basalt: Implications for mantle composition and processes // Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. *Geological Society, London, Special Publication*, 42: 313 - 345.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W and Zhang Y H. 2012. Phanerozoic tectonics of the South China block: Key observations and controversies. *Gondwana research*, in press.
- Weaver B L, Wood D A, Tarney J and Joron J L. 1987. Geochemistry of ocean island basalts from the South Atlantic: Ascension, Bouvet, St. Helena, Gough and Tristan Da Cunha // Fitton J G and Upton B G J. Alkaline Igneous Rocks. *Geological Society, London. Special Publication*, 30: 253 - 267.
- Wyborn D. 1992. The tectonic significance of Ordovician magmatism in the eastern Lachlan fold belt. *Tectonophysics*, 214(1-4): 177 - 192.
- Xia X P, Sun M, Geng H Y, Sun Y L, Wang Y J and Zhao G C. 2011. Quasi-simultaneous determination of U-Pb and Hf isotope compositions of zircon by excimer laser-ablation multiple-collector ICPMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26: 1868 - 1871.
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3-4): 269 - 287.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26 - 33.

Geochronology and Geochemical Characteristics of the Nandu Syenite in SE Guangxi and its Implications

CHEN Xinyue^{1,3}, WANG Yuejun², ZHANG Yuzhi², ZHANG Aimei² and CAO Youjin¹

(1. Department of Geology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: The Nandu syenite shows $\text{SiO}_2 = 62.7\% \sim 64.2\%$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 11.2\% \sim 12.3\%$, $\text{K}_2\text{O} = 6.47\% \sim 9.06\%$ with high $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ of 1.37 ~ 2.80. It can be defined as shoshonitic series rocks. These rocks are characterized by enrichment of LREE and LILE, with slight Eu negative anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.48 \sim 0.74$), and significant Sr and P-Ti negative anomalies but insignificant Nb-Ta negative anomalies. Their $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values range from +0.32 to +0.84. Such signatures show an affinity to intraplate shoshonitic rocks. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Nandu syenite yields an age of 162 ± 1 Ma with $\text{MSWD} = 0.1$ ($n = 23$), which is interpreted as the crystallization age. Such an age is consistent with those in southeast Guangxi and south Jiangxi provinces. Our new data, together with the available data, indicate a middle Jurassic intraplate extensional tectonic regime in South China.

Keywords: Nandu syenite; element geochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; SE Guangxi