

文章编号: 1674-9057(2019)02-0291-10

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2019.02.005

# 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成

时毓<sup>1</sup>, 三元合<sup>1</sup>, 郭智超<sup>1</sup>, 刘希军<sup>1</sup>, 王新宇<sup>1,2</sup>, 吴祥珂<sup>2</sup>,  
冯佐海<sup>1</sup>, 杨金磊<sup>1</sup>, 张晓晨<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 a. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室; b. 广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541006; 2. 广西壮族自治区地质勘查总院, 南宁 530023)

**摘要:** 桂东北富川位于南岭成矿带西段, 中生代成岩成矿作用广泛存在。利用 LA-ICP-MS 法对桂东北富川鲁洞辉绿玢岩进行了锆石 U-Pb 同位素定年, 获得了其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $207.8 \pm 1.5$  Ma, 代表了辉绿玢岩的形成年龄, 结合前人对华南中生代成岩成矿作用的研究, 认为鲁洞辉绿玢岩与印支期花岗岩及与之相关矿床为晚三叠世同一期岩浆作用的产物; 华南晚三叠世处于大陆裂解或造山后伸展的构造环境; 锆石 Hf 同位素特征显示鲁洞辉绿玢岩原岩可能为新生地壳/幔源物质与古老地壳物质的混合, 以新生地壳/幔源物质为主; 华南不仅存在燕山期成矿作用, 而且印支期成岩成矿作用在华南同样存在。

**关键词:** 辉绿玢岩; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 中生代; 南岭成矿带; 桂东北

**中图分类号:** P588.134; P597.3

**文献标志码:** A

南岭位于华南地区的中南部, 是由处于湘、赣、粤、桂 4 省(区)交界的越城岭、都庞岭、萌渚岭、骑田岭及大庾岭等五大山脉组成的山系。南岭地区广泛发育中生代花岗岩, 且形成了与之密切相关的钨锡铍铌钽等多种金属矿床, 南岭成矿带成为我国甚至世界上最重要的钨锡铍铌钽多金属成矿带, 因而受到国内外地学界的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。但到目前为止, 对于华南地区中生代花岗岩成因及构造背景的认识仍然存在争议<sup>[1-5]</sup>, 以往对于华南中生代成矿的研究多集中在燕山期<sup>[1,5-7]</sup>, 而近年来对华南印支期成矿的研究逐渐增多<sup>[7-12]</sup>。华南在中生代经历了印支运动和燕山运动, 这两期构造运动奠定了华南大陆的主体构造轮廓, 并完成了由特提斯构造域(印支期)向太平洋构造域(燕山期)的构造体制转换<sup>[4,12-16]</sup>, 然而关于华南中生代构造体制转换的时间尚存争议。

桂东北地区位于南岭西段, 发育了大量的中生代岩浆岩, 以往对该地区的研究主要集中在花岗岩<sup>[17]</sup>, 相比之下, 对于中-基性岩浆岩则少有报道。基性岩脉为区域性拉张伸展运动的产物, 是研究深部地幔性质、壳幔相互作用的重要“岩石探针”<sup>[18]</sup>, 可以有效指示深部地幔性质及成岩时的构造环境<sup>[19-23]</sup>。因此, 对基性岩浆岩进行深入研究对于解决华南中生代巨量花岗岩成因、成矿时代及华南中生代构造体制转换等问题意义重大。最近在桂东北富川县鲁洞地区发现一处辉绿玢岩, 本文通过详细的岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及锆石 Lu-Hf 同位素研究, 拟探讨研究区辉绿玢岩的时代、成因, 并进一步揭示其对华南中生代构造体制转换时限的约束。

## 1 地质概况及样品特征

研究区处于扬子块体和华夏块体的拼合带上

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41562005; 41862003); 广西自然科学基金杰出青年科学基金项目(2018GXNSFFA281009); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380001)

作者简介: 时毓(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 岩石学, shiyu\_61@163.com。

引文格式: 时毓, 三元合, 郭智超, 等. 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成 [J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(2): 291-300.

(图 1)。研究区出露的地层从老至新依次为：寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、三叠系、侏罗系及第四系<sup>[17]</sup>。样品位于泥盆系中，泥盆系早期为陆相—滨海相碎屑岩沉积，晚期为海相沉积碳酸盐岩，主要岩性为中厚—厚层状灰岩、泥质灰岩及白云质灰岩，与下伏寒武系呈角度不整合接触关系。石炭系以海相碳酸盐岩沉积为主，局部夹有碎屑岩、硅质岩。

样品采自广西富川瑶族自治县莲山镇鲁洞村东南 500 m 山坳南侧，采样点坐标为 N24°43′48″、E111°25′15″，样品新鲜面为黑褐色，风化面为浅

黄色(图 2a)，岩脉侵入于上泥盆统灰岩中。样品岩性为辉绿玢岩，具有典型的斑状结构，块状构造。斑晶主要由普通辉石和橄榄石(10% 左右)组成：普通辉石呈半自形柱状，大小为 0.2~2 mm，样品发生了不同程度的绿泥石化和绿帘石化(图 2b)；橄榄石呈粒状，粒径为 0.2~0.4 mm，糙面显著，裂纹发育，发生弱绿帘石化。部分斑晶已全部蚀变，被磁铁矿、赤铁矿取代，以假晶出现。基质主要由斜长石和普通辉石微晶组成，斜长石呈半自形板柱状，长 0.05~0.15 mm，宽 0.02~0.06 mm，轻微绢云母化或黝帘石化，局部可见残留的辉绿结构；辉石微晶呈半自形柱状，长 0.05~0.25 mm，基本已被绿泥石和绿帘石所取代。

## 2 测试方法

锆石的挑选工作在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。在重庆市宇劲科技有限公司完成锆石的制靶及阴极发光(CL)成像分析。锆石定年在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成，测试仪器为激光电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)，激光取样系统 New Wave Research 213 nm 与 Agilent 7500s ICP-MS 连接，分析采用的激光束斑直径为 32 μm，频率为 5 Hz。各组分析前后都进行了两次标样 GJ 分析，每组包含 12 个样品点，各组分析均包含了标样 Muk Tank 的分析，以检查仪器的稳定性及分析结果的可靠性。样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter(ver. 4.0)软件<sup>[24]</sup>，使用 ComPbCorr#3-15G 程序<sup>[25]</sup>进行普通铅校正，年龄及谐和图绘制采用 Isoplot 程序。

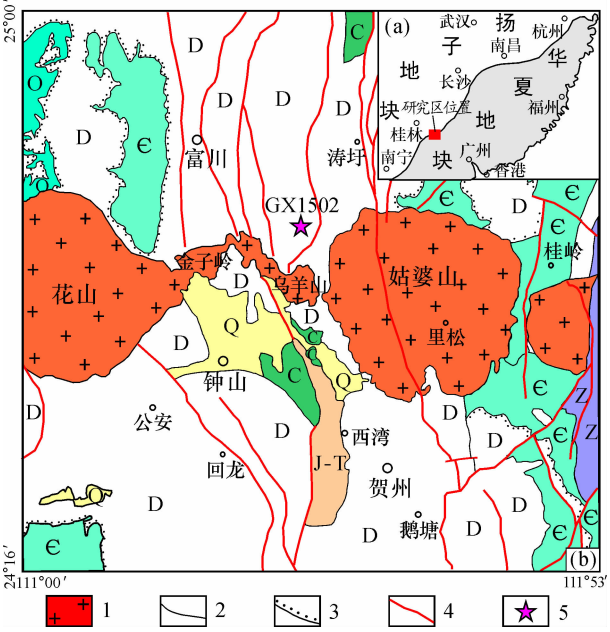


图 1 研究区地质简图<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Simplified geological map of study area

Q—第四系；J—T—侏罗系—三叠系；C—石炭系；D—泥盆系；O—奥陶系；ε—寒武系；Z—震旦系；1—中生代花岗岩；2—地质界线；3—角度不整合；4—断层；5—采样位置

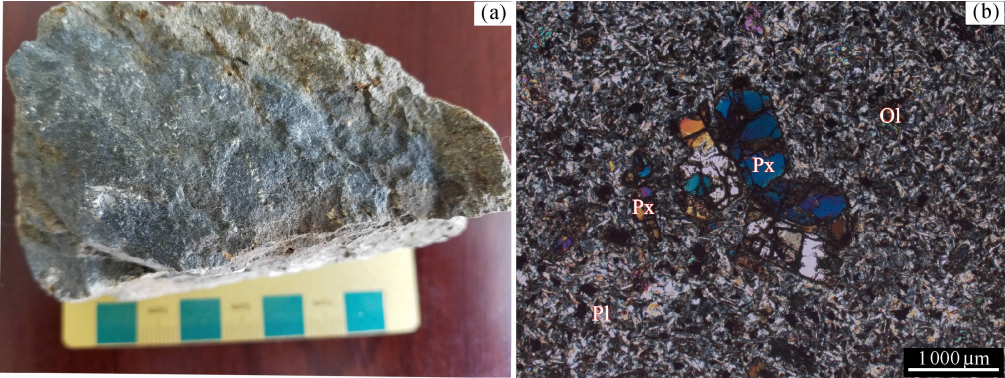


图 2 鲁洞辉绿玢岩手标本及镜下特征

Fig. 2 Hand specimen and microscope images of sillite from Ludong

Px—辉石；Pl—斜长石；Ol—橄榄石

锆石原位 Hf 同位素分析是在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行，利用装配 ESI New wave 193 ArF 准分子激光器的高分辨率多接收器 ICP - MS 系统完成。为了评估仪器的稳定性和可靠性，在此过程中采用标准锆石 GJ - 1 分析，其平均值为 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.281\,996\pm0.000\,020$  ( $2\sigma$ ,  $n=121$ )。测试仪器的参数：剥蚀时间 60 s，光束直径 44  $\mu\text{m}$ ，重复频率 10 Hz，脉冲能量密度约为 5.2 ~ 6.1 J/cm<sup>2</sup>，剥蚀深度 2  $\mu\text{m}$ 。为了得到精确的数据分析，采用同一点的  $\beta_{\text{Yb}}$  的均值 $^{176}\text{Yb}$  对 $^{176}\text{Hf}$  进行干扰校正，数据校准步骤可参考文献 [26]。初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值计算采用的 $^{176}\text{Lu}$  衰变常数为  $1.867\times10^{-11}$  [49]，球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.033\,6\pm1$  和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282\,785\pm11$  ( $2\sigma$ ) 用作进行  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  计算<sup>[50]</sup>。每个锆石的地壳模式年龄计算 ( $T_{\text{DM2}}$ ) 基于假设平均大陆地壳 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值是 0.015 的两阶段模型<sup>[51]</sup>。仪器的测试条件及详细分析流程可参见文献 [27 - 28]。

### 3 测试结果

#### 3.1 锆石 U - Pb 年龄

辉绿玢岩中的锆石 LA - ICP - MS 分析结果见表 1。阴极发光 (CL) 图像显示，鲁洞辉绿玢岩样品 Gx1502 中锆石的晶形为长柱状或呈浑圆 - 椭圆状，部分锆石破碎成不规则形状 (图 3)。样品中所测锆石长 100 ~ 250  $\mu\text{m}$ ，短轴在 60 ~ 150  $\mu\text{m}$ ，长宽比在 1:1 ~ 3:1。大多数锆石显示了明显的环带结构，具有岩浆成因锆石的特征<sup>[29]</sup>，还有几颗锆石显示了明显的核 - 幔结构 (如 No. 18)。锆石 Th、U 含量的变化范围分别为  $(22\sim1\,106)\times10^{-6}$  和  $(37\sim1\,146)\times10^{-6}$ ，Th/U 值为 0.23 ~ 2.71。本文选择了 33 颗锆石进行了 33 次测点分析，所

测锆石年龄在谐和图上投影点基本落在谐和线上或其附近，其中 1 颗锆石形成于古元古代，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为  $2\,069\pm11$  Ma；2 颗锆石形成于新元古代， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄分别为  $753\pm9$  Ma 和  $620\pm8$  Ma；4 颗锆石形成于早古生代 (加里东期)，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为 418 ~ 450 Ma；6 颗锆石形成于晚古生代 (海西期)，其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄分别为  $380\pm6$ 、 $363\pm5$ 、 $356\pm4$ 、 $332\pm7$ 、 $302\pm4$  和  $259\pm4$  Ma；其余 20 颗锆石形成于早中生代 (印支期)，年龄变化于 216 ~ 202 Ma， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $207.8\pm1.5$  Ma ( $MSWD=1.13$ ) (图 4)。

#### 3.2 锆石 Hf 同位素组成

对 31 颗定年过的谐和锆石进行了 Hf 同位素分析 (表 2)。31 个测试点的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 值为 0.281 362 ~ 0.282 898。其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化在 -9.33 ~ 8.60，其中 13 个点的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ ，18 个点的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 。二阶段 Hf 模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  变化范围较大，在 2.92 ~ 0.67 Ga。其中 20 号锆石 ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为 2 069 Ma) 具有最低的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 值，其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -3.55$ ， $T_{\text{DM2}}$  为 2.92 Ga。形成于新元古代的两颗锆石的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 值分别为 0.282 344 和 0.282 263， $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  分别为 -1.75 和 -1.63， $T_{\text{DM2}}$  分别为 1.66 Ga 和 1.76 Ga。形成于 450 ~ 259 Ma 的 9 颗古生代锆石，除 29 号锆石外，其余锆石具有相近的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 值，为 0.282 309 ~ 0.282 453， $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -8.03 ~ -3.81， $T_{\text{DM2}}$  为 1.85 ~ 1.58 Ga。其余 18 颗形成于 216 ~ 202 Ma 的锆石中，12 颗锆石的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 值为 0.282 733 ~ 0.282 905， $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  均  $> 0$  (为 2.82 ~ 8.60)， $T_{\text{DM2}}$  为 1.04 ~ 0.67 Ga；6 颗锆石的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 值为 0.282 387 ~ 0.282 650， $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  均  $< 0$  (为 -9.33 ~ -0.07)， $T_{\text{DM2}}$  为 1.82 ~ 1.23 Ga。

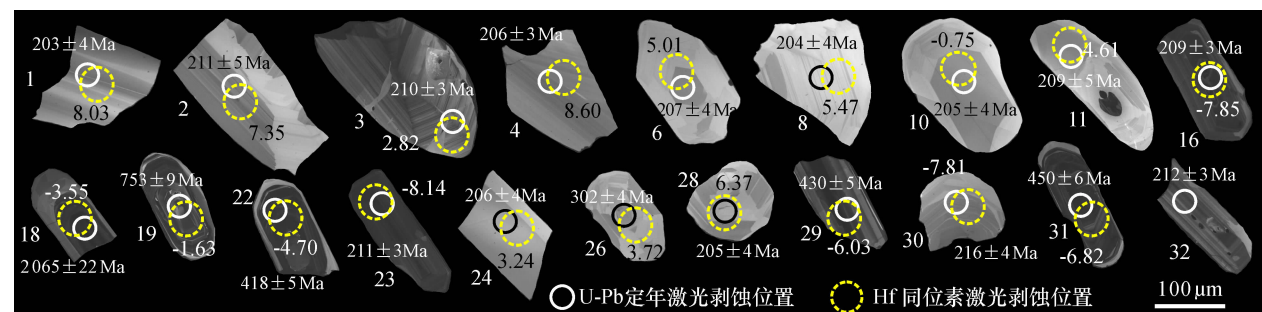


图 3 鲁洞辉绿玢岩锆石阴极发光照片  
Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images for zircons of the sillite from Ludong

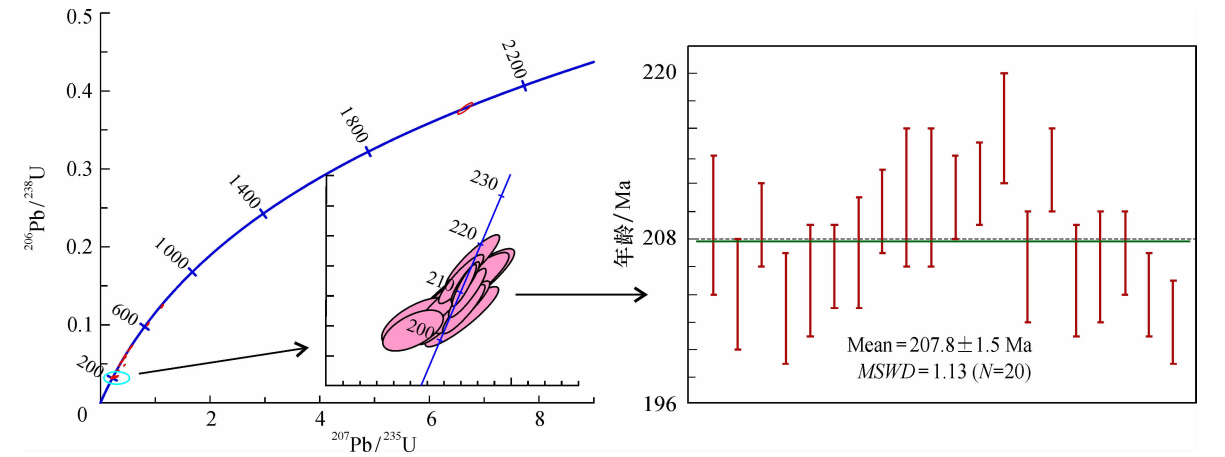


图 4 鲁洞辉绿玢岩锆石 U - Pb 谐和图

Fig. 4 U - Pb concordia diagram for zircons of the sillite from Ludong

表 1 鲁洞辉绿玢岩锆石 U - Pb 年龄分析结果

Table 1 U - Pb dating results for zircons of the sillite from Ludong

测点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma						谐和度/%
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
1	76	75	1.02	0.052 71	0.002 49	0.232 69	0.010 75	0.032 02	0.000 58	316	72	212	9	203	4	96
2	30	43	0.70	0.050 59	0.004 03	0.231 68	0.018 00	0.033 21	0.000 81	222	132	212	15	211	5	100
3	460	294	1.57	0.051 34	0.001 61	0.234 24	0.007 36	0.033 09	0.000 54	256	43	214	6	210	3	98
4	127	118	1.08	0.051 72	0.001 87	0.232 14	0.008 30	0.032 55	0.000 54	273	52	212	7	206	3	97
5	215	154	1.40	0.046 05	0.002 77	0.202 05	0.011 83	0.031 83	0.000 45	132	132	187	10	202	3	108
6	47	60	0.79	0.051 48	0.002 41	0.231 53	0.010 60	0.032 61	0.000 58	262	72	211	9	207	4	98
7	170	73	2.35	0.056 14	0.001 54	0.532 35	0.014 68	0.068 77	0.001 02	458	35	433	10	429	6	99
8	26	38	0.69	0.053 59	0.003 08	0.237 33	0.013 31	0.032 12	0.000 63	354	91	216	11	204	4	94
9	373	678	0.55	0.062 54	0.000 88	0.870 31	0.013 80	0.100 92	0.001 33	693	15	636	7	620	8	97
10	49	39	1.27	0.051 89	0.003 32	0.231 03	0.014 38	0.032 29	0.000 66	281	105	211	12	205	4	97
11	22	37	0.61	0.055 85	0.004 12	0.253 26	0.018 11	0.032 89	0.000 76	446	118	229	15	209	5	91
12	79	56	1.39	0.048 69	0.002 37	0.219 28	0.010 38	0.032 66	0.000 56	133	77	201	9	207	3	103
13	207	77	2.71	0.049 85	0.001 97	0.230 61	0.008 87	0.033 55	0.000 54	188	60	211	7	213	3	101
14	82	73	1.12	0.046 18	0.003 24	0.204 58	0.013 94	0.032 13	0.000 53	155	7	189	12	204	3	108
15	311	127	2.45	0.056 47	0.001 37	0.450 72	0.010 60	0.057 90	0.000 83	471	28	378	7	363	5	96
16	494	640	0.77	0.053 10	0.000 78	0.241 22	0.003 49	0.032 95	0.000 43	333	15	219	3	209	3	95
17	256	117	2.19	0.054 30	0.001 91	0.454 51	0.015 33	0.060 72	0.000 97	384	47	380	11	380	6	100
18	65	214	0.31	0.127 85	0.001 76	6.654 58	0.089 58	0.377 53	0.004 80	2 069	11	2 067	12	2 065	22	100
19	579	492	1.18	0.066 02	0.000 81	1.128 05	0.013 83	0.123 93	0.001 59	807	12	767	7	753	9	93
20	797	1 135	0.70	0.053 89	0.000 85	0.422 27	0.006 46	0.056 83	0.000 72	366	16	358	5	356	4	99
21	365	141	2.58	0.053 44	0.002 67	0.389 11	0.018 63	0.052 82	0.001 09	348	71	334	14	332	7	99
22	235	1 043	0.23	0.055 16	0.001 01	0.510 00	0.009 05	0.067 06	0.000 90	419	19	418	6	418	5	100
23	409	600	0.68	0.050 56	0.000 98	0.232 42	0.004 74	0.033 34	0.000 46	221	24	212	4	211	3	100
24	68	64	1.07	0.049 87	0.002 90	0.223 61	0.012 67	0.032 53	0.000 64	189	94	205	11	206	4	100
25	55	38	1.44	0.050 67	0.004 47	0.232 10	0.019 90	0.033 23	0.000 88	226	146	212	16	211	5	100
26	108	128	0.85	0.052 25	0.001 45	0.345 28	0.009 54	0.047 93	0.000 68	296	38	301	7	302	4	100
27	329	147	2.24	0.053 09	0.001 74	0.300 46	0.009 65	0.041 05	0.000 62	333	46	267	8	259	4	97
28	79	86	0.92	0.049 72	0.002 50	0.221 33	0.010 92	0.032 29	0.000 61	182	80	203	9	205	4	101
29	1 106	956	1.16	0.056 02	0.000 71	0.532 44	0.007 70	0.068 94	0.000 87	453	14	433	5	430	5	99
30	198	82	2.42	0.050 47	0.002 29	0.237 45	0.010 57	0.034 13	0.000 59	217	71	216	9	216	4	100
31	271	1 146	0.24	0.057 25	0.001 15	0.569 96	0.012 32	0.072 22	0.001 07	501	24	458	8	450	6	98
32	341	537	0.63	0.050 56	0.001 21	0.233 07	0.005 58	0.033 44	0.000 45	221	31	213	5	212	3	100
33	73	73	1.00	0.048 72	0.002 77	0.217 66	0.012 12	0.032 40	0.000 65	134	89	200	10	206	4	103

表 2 鲁洞辉绿玢岩 Hf 同位素组成  
Table 2 Hf isotopic compositions of the the sillite from Ludong

测点	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2σ	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	2σ	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	( <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf) <sub>i</sub>	Age/Ma	ε <sub>Hf</sub> (t)	2σ	T <sub>DM2</sub> /Ga
1	0.282 890	0.000 023	0.001 417	0.000 019	0.037 097	0.282 885	203	8.03	0.79	0.71
2	0.282 866	0.000 021	0.001 471	0.000 002	0.036 983	0.282 860	211	7.35	0.75	0.76
3	0.282 738	0.000 018	0.001 335	0.000 005	0.034 602	0.282 733	210	2.82	0.64	1.04
4	0.282 905	0.000 025	0.001 650	0.000 001	0.042 391	0.282 898	206	8.60	0.88	0.67
5	0.282 893	0.000 024	0.001 930	0.000 052	0.053 154	0.282 886	202	8.06	0.85	0.70
6	0.282 800	0.000 019	0.000 807	0.000 012	0.021 797	0.282 797	207	5.01	0.67	0.90
7	0.282 377	0.000 016	0.000 583	0.000 001	0.015 881	0.282 372	429	−5.05	0.57	1.72
8	0.282 814	0.000 021	0.000 626	0.000 001	0.016 516	0.282 811	204	5.47	0.73	0.87
9	0.282 360	0.000 018	0.001 330	0.000 003	0.035 064	0.282 344	620	−1.75	0.63	1.66
10	0.282 638	0.000 021	0.000 924	0.000 013	0.026 063	0.282 635	205	−0.75	0.74	1.27
11	0.282 787	0.000 135	0.000 745	0.000 025	0.019 147	0.282 784	209	4.61	4.74	0.93
12	0.282 817	0.000 021	0.000 744	0.000 001	0.019 964	0.282 814	207	5.63	0.72	0.86
13	0.282 392	0.000 018	0.001 124	0.000 009	0.030 771	0.282 387	213	−9.33	0.62	1.82
14	0.282 824	0.000 289	0.001 342	0.000 005	0.037 096	0.282 819	204	5.74	10.12	0.85
15	0.282 422	0.000 018	0.001 562	0.000 004	0.041 529	0.282 412	363	−5.12	0.65	1.67
16	0.282 442	0.000 017	0.002 610	0.000 008	0.069 294	0.282 432	209	−7.85	0.60	1.72
17	0.282 419	0.000 016	0.001 691	0.000 008	0.045 951	0.282 407	380	−4.92	0.54	1.67
18	0.281 389	0.000 103	0.000 703	0.000 032	0.017 732	0.281 362	2 069	−3.55	3.61	2.92
19	0.282 292	0.000 022	0.002 026	0.000 006	0.053 409	0.282 263	753	−1.63	0.78	1.76
20	0.282 460	0.000 016	0.000 999	0.000 005	0.025 133	0.282 453	356	−3.81	0.55	1.58
21	0.282 416	0.000 020	0.001 485	0.000 007	0.039 495	0.282 407	332	−5.99	0.72	1.70
22	0.282 396	0.000 016	0.000 912	0.000 002	0.020 768	0.282 389	418	−4.70	0.57	1.69
23	0.282 431	0.000 018	0.002 311	0.000 014	0.059 089	0.282 422	211	−8.14	0.63	1.74
24	0.282 752	0.000 023	0.001 300	0.000 016	0.034 641	0.282 747	206	3.24	0.80	1.01
25	0.282 654	0.000 020	0.000 939	0.000 004	0.025 440	0.282 650	211	−0.07	0.70	1.23
26	0.282 704	0.000 069	0.000 692	0.000 001	0.017 788	0.282 700	302	3.72	2.41	1.06
27	0.282 402	0.000 014	0.001 437	0.000 015	0.035 469	0.282 395	259	−8.03	0.50	1.77
28	0.282 840	0.000 022	0.000 932	0.000 003	0.024 420	0.282 836	205	6.37	0.78	0.81
29	0.282 360	0.000 022	0.002 027	0.000 030	0.051 072	0.282 344	430	−6.03	0.78	1.78
30	0.282 433	0.000 017	0.001 044	0.000 001	0.028 099	0.282 428	216	−7.81	0.58	1.72
31	0.282 338	0.000 022	0.003 406	0.000 014	0.093 582	0.282 309	450	−6.82	0.78	1.85

4 讨 论

4.1 富川鲁洞辉绿玢岩的形成时代及构造背景

有关桂东北富川辉绿玢岩确切的形成年龄前人未曾报道。本文对绿玢岩样品(Gx1502)中的 33 颗锆石进行了分析,其中最年轻的 20 颗锆石均形成于早中生代(印支期),而且所测年龄非常集中,其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 207.8 ± 1.5 Ma(MSWD = 1.13)(图 4),所测锆石大都显示了明显的环带结构,为典型的岩浆锆石,并且与其侵入于上泥盆统灰岩的地质事实相符。另外有一些老的锆石,其年龄分布范围为 2 069 ~ 259 Ma,分别为古元古代(2 069 ± 11 Ma)、新元古代(753 ± 9 Ma 和 620 ± 8 Ma)、早古生代(450 ~ 418 Ma)和晚古生代(380 ~ 259 Ma)。笔者认为该年龄(207.8 ± 1.5 Ma)即为富

川鲁洞辉绿玢岩的侵位年龄,而古元古代、新元古代、早古生代(加里东期)、晚古生代(海西期)的几颗锆石很可能是辉绿玢岩岩浆侵位过程中捕获的锆石或继承锆石。

华南发育巨量的印支期花岗岩,以往很多学者对华南印支期花岗岩的形成时代、成因及构造背景等方面进行过大量报道(表 3),但是至今还存在一些争议:有学者认为华南印支期花岗岩是早中生代碰撞造山的产物<sup>[2]</sup>;Li 等<sup>[30]</sup>认为华南印支期花岗岩受古太平洋西向俯冲控制,为岛弧岩浆作用的产物;但是越来越多的证据表明华南并不存在早中生代洋盆或洋陆俯冲事件<sup>[31-32]</sup>,而且华南印支期花岗岩呈面状展布及缺少同期火山岩的特征也支持其成因与俯冲、碰撞无关;Wang 等<sup>[3]</sup>通过数值模拟研究,认为陆壳叠置加厚、地壳物质部分熔融是印支



表 3  华南印支期花岗岩及矿床年龄

Table 3  Ages of granite and related ore deposits in South China

序号	岩体或矿床(采样位置)	岩性	分析方法	年龄/Ma	文献来源
1	汾山(湘中)	黑云母二长花岗岩	SHRIMP	244 ± 4	[43]
2	关帝庙(湘中)	黑云母二长花岗岩	SHRIMP	239 ± 3	[43]
3	白马山(湘中)	黑云母二长花岗岩	SHRIMP	243 ± 3	[43]
4	豆乍山(桂东北)	二云母二长花岗岩	SHRIMP	228 ± 11	[44]
5	柯树岭(赣南)	黑云母花岗岩	SHRIMP	252 ± 7	[45]
6	柯树岭(赣南)	黑云母花岗岩	SHRIMP	202 ± 15	[45]
7	靖居(浙西南)	正长花岗岩	LA – ICP – MS	215 ± 2	[46]
8	荷花坪锡多金属矿(湘南)	辉钼矿	Re – Os	224 ± 2	[7]
9	栗木锡矿(桂东北)	云英岩化花岗岩	Ar – Ar	214 ± 2	[8]
10	栗木金竹源(桂东北)	花岗岩	SHRIMP	214 ± 5	[9]
11	三个黄牛(桂东北)	花岗岩	SHRIMP	218 ± 2	[9]
12	苗儿山 – 越城岭(桂东)	斑状黑云母花岗岩	LA – ICP – MS	243 ± 6	[10]
13	苗儿山 – 越城岭(桂东)	似斑状二云母花岗岩	LA – ICP – MS	229 ± 4	[10]
14	云头界(桂东)	白云母花岗岩	LA – ICP – MS	217 ± 5	[10]
15	云头界 W – Mo 矿床(桂东)	辉钼矿	Re – Os	217 ± 8	[10]
16	栗木矿床(桂东北)	花岗岩	SHRIMP	212 ± 2	[11]
17	都庞岭中体(湘桂交界)	环斑花岗岩	SHRIMP	227 ± 7	[12]
18	都庞岭东体(湘桂交界)	环斑花岗岩	SHRIMP	210 ± 3	[12]
19	富城杂岩体富城单元(赣东南)	斑状黑云母花岗岩	LA – ICP – MS	239 ± 17	[35]
20	富城杂岩体粗石坝单元(赣东南)	斑状花岗岩	LA – ICP – MS	231 ± 16	[35]
21	富城杂岩体珠长洞单元(赣东南)	似斑状花岗岩	LA – ICP – MS	229 ± 7	[35]
22	李贵福钨锡多金属矿(桂东北)	辉钼矿	Re – Os	213 ± 3	[41]
23	锡田(湘赣交界)	花岗岩	SHRIMP	229 ± 3	[47]
24	汾山唐市超单元(湘中)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	211 ± 2	[48]
25	汾山唐市超单元(湘中)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	216 ± 2	[48]
26	阳明山(湘南)	二云母花岗岩	LA – ICP – MS	219 ± 3	[49]
27	阳明山(湘南)	电气石白云母花岗岩	LA – ICP – MS	218 ± 10	[49]
28	歇马(湘中)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	214 ± 6	[50]
29	巷子口(湘中)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	210 ± 5	[50]
30	那蓬(粤西)	黑云母花岗岩	LA – ICP – MS	205 ± 2	[50]
31	古田一小陶杂岩体(闽西南)	斑状、似斑状花岗岩	LA – ICP – MS	222 ± 3	[51]
32	花岗岩(湘)	花岗岩	LA – ICP – MS	243 ~ 235; 218 ~ 210	[52]
33	金滩(赣中)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	222 ± 2	[53]
34	白马山(湘中南)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	223 ± 1	[53]
35	白马山(湘中南)	黑云母花岗闪长岩	LA – ICP – MS	205 ± 2	[53]
36	汾山唐市(湘中)	黑云母二长花岗岩	Rb – Sr	222 ± 6	[54]
37	汾山新铺(湘中)	新铺高演化花岗岩	Rb – Sr	227 ± 13	[54]
38	汾山巷子口(湘中)	含电气石二云母花岗岩	Rb – Sr	210 ± 3	[54]
39	云头界(桂东北)	花岗岩	SHRIMP	217 ± 5	[55]
40	云头界(桂东北)	辉钼矿	Re – Os	226 ± 4; 219 ± 4	[55]
42	高岭(桂东北)	二长花岗岩	SHRIMP	222 ± 2	[55]
43	高岭(桂东北)	辉钼矿	Re – Os	215 ± 9; 219 ± 4; 225 ± 6; 227 ± 3	[55]
44	油麻岭(桂东北)	二长花岗岩	LA – ICP – MS	220 ± 1	[56]
45	界碑(桂东北)	二长花岗岩	LA – ICP – MS	215 ± 1	[56]
46	金滩(赣中)	二云母花岗岩	LA – ICP – MS	239 ± 1	[57]
47	金滩(赣中)	黑云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	226 ± 2	[57]
48	白马山(湘中南)	黑云母花岗闪长岩	SHRIMP	220 ± 3	[58]
49	白马山(湘中南)	黑云母花岗闪长岩	SHRIMP	224 ± 2	[58]
50	白马山(湘中南)	黑云母二长花岗岩	SHRIMP	214 ± 3	[58]
51	猫儿山(桂北)	二云母二长花岗岩	LA – ICP – MS	231 ± 1; 216 ± 0.5	[59]

期花岗岩的成因；周新民<sup>[4]</sup>认为早中三叠世形成同碰撞花岗岩，为挤压环境的产物，晚三叠世地壳减薄，减压熔融，形成后碰撞花岗岩；Wang 等<sup>[33]</sup>、柏道远等<sup>[34]</sup>认为，印支期构造岩浆活动的主要因素是印支期陆壳的叠置加厚及随后基性岩浆的底侵作用，导致地壳含水矿物相熔融；于津海等<sup>[35]</sup>将华南印支期花岗岩划分为 249 ~ 225 Ma 和 225 ~ 207 Ma 两个阶段：第 1 阶段为同碰撞花岗岩，第 2 阶段为碰撞后或后造山花岗岩。本文中桂东北富川鲁洞辉绿玢岩的成岩年龄为 207.8 ± 1.5 Ma，与华南中生代印支期花岗岩形成年龄基本一致。除本次获得的桂东北富川辉绿玢岩的年龄外，高精度的年龄还有湘南宁远保安圩碱性玄武岩 (206 ~ 212 Ma)<sup>[36]</sup>、湘南宜章长城岭辉绿岩 (227 Ma)<sup>[37]</sup>、湖南桃江辉绿岩 (229 Ma)<sup>[38]</sup>。上述基性岩的发现暗示，它们很可能为同一期岩浆热事件的产物，在印支期造山后的伸展背景下，深部幔源物质上涌及玄武质岩浆的底侵可能促使地壳物质发生熔融，形成大规模的花岗岩及少量的基性岩。桂东北富川鲁洞辉绿玢岩的发现与精确定年揭示了晚三叠世华南处在造山后伸展的构造环境。

### 4.2 桂东北辉绿玢岩的源区

锆石 Lu - Hf 同位素具有很高的封闭温度，即使在麻粒岩相等高级变质条件下，仍可保持原始的 Hf 同位素组成<sup>[39]</sup>，锆石 Hf 同位素分析对于探讨岩浆演化及示踪源区具有重要意义<sup>[28]</sup>。本文对定年过的锆石进行了 31 次 Lu - Hf 同位素分析。其中 20 颗形成于早中生代（印支期）的锆石，年龄在 216 ~ 202 Ma，被认为是富川鲁洞辉绿玢岩的形成年龄。本文对 18 颗印支期锆石进行了 Hf 同

位素分析 (图 5)，其中 12 颗锆石的 (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> 值为 0.282 733 ~ 0.282 905， $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均为正 (2.82 ~ 8.60)， $T_{\text{DM2}}$  为 1.04 ~ 0.67 Ga，指示它们的母岩浆有中新元古代新生地壳或幔源物质的参与。6 颗锆石的 (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> 值为 0.282 387 ~ 0.282 650， $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  均 < 0 (−9.33 ~ −0.07)， $T_{\text{DM2}}$  为 1.82 ~ 1.23 Ga，显示了壳源的特征。因此，早中生代印支期的母岩浆既有中新元古代新生地壳或幔源物质的参与，又有古老的古中元古代地壳物质的残余。剩余 13 颗锆石均很可能为辉绿玢岩岩浆侵位过程的捕获锆石或继承锆石，除 1 颗锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$ ，其余锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ ，指示它们的母岩浆起源于古老的地壳物质。结合富川鲁洞辉绿玢岩的结晶年龄及锆石 Hf 同位素特征，认为富川鲁洞辉绿玢岩的原岩为新生地壳/幔源物质与古老地壳物质的混合，以新生地壳/幔源物质为主，在岩浆侵位过程中受到古老地壳物质的混染。

### 4.3 华南印支期成矿

华南位于近东西向的印支期构造带和与太平洋俯冲有关的北东向燕山期构造带的叠加转换部位，经历了加里东期、印支期和燕山期等几次构造 - 岩浆事件<sup>[9, 40]</sup>，并形成了与之相关的大量中生代矿床。以前的研究多集中于燕山期<sup>[4, 6]</sup>，对于印支期成矿的研究较少。华南是否存在印支期成矿事件近年来已成为讨论的热点<sup>[7-12]</sup>。

但近些年越来越多的华南印支期矿床被识别出来，例如：蔡明海等<sup>[7]</sup>对荷花坪锡多金属矿中早期矽卡岩辉钼矿进行了 Re - Os 测年，得到了 224 ± 1.9 Ma 的等时线年龄；杨锋等<sup>[8]</sup>在桂北栗木锡矿的云英岩化花岗岩中得到了 214.1 ± 1.9 Ma 的

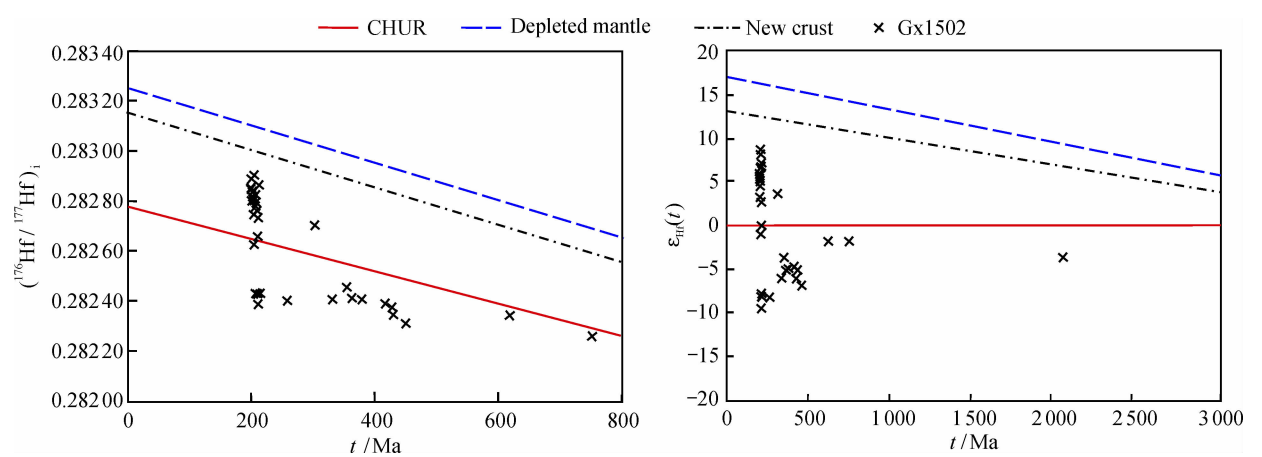


图 5 鲁洞辉绿玢岩中锆石的 (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> - t 和  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  - t 图解  
Fig. 5 (<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf)<sub>i</sub> - t and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  - t diagrams of zircons from Ludong sillite

白云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar坪年龄;邹先武等<sup>[41]</sup>在桂东北李贵福钨锡多金属矿中对辉钼矿的Re-Os测年得到了 $213.3 \pm 2.9$  Ma的年龄;黎应书等<sup>[42]</sup>在云南个旧锡矿得到矿石铅同位素模式年龄为200~280 Ma,并且成矿时代和物质来源研究结果表明,在印支期基性火山岩形成过程中已经形成矿床雏形或者为成矿提供了矿源层;在华南地区印支期成岩成矿事件广泛发育(表3)。以上研究资料表明,华南不仅存在着燕山期成矿,印支期成岩成矿作用同样存在,印支期找矿工作应该得到足够重视。辉绿玢岩为伸展构造的产物,研究发现陆内岩石圈伸展的构造背景也有利于成岩成矿作用的发生<sup>[19,71]</sup>。本文桂东北富川鲁洞辉绿玢岩得到 $207.8 \pm 1.5$  Ma的成岩年龄,与印支期成矿时代一致,它们很可能为同一期岩浆-构造事件的产物。

## 5 结 论

(1) 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩的形成年龄为 $207.8 \pm 1.5$  Ma,为中生代晚三叠世(印支期)的产物,很可能和华南印支期花岗岩及其相关矿床为同一时代的产物。

(2) 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩的发现与精确定年揭示了晚三叠世华南处在大陆裂解或造山后伸展的构造环境。

(3) 桂东北富川鲁洞辉绿玢岩来源于新生地壳/幔源物质与古老地壳物质的混合,以新生地壳/幔源物质为主,在岩浆侵位过程中受到了古老地壳物质的混染。

(4) 华南地区不仅存在燕山期成矿作用,印支期成岩成矿作用同样发育。

## 参考文献:

- [1] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景[J]. 高校地质学报, 2005, 11 (3): 291-304.
- [2] Hsü K J, Li J L, Chen H H, et al. Tectonics of South China: key to understanding West Pacific geology [J]. Tectonophysics, 1990, 183: 9-39.
- [3] Wang Y J, Zhang Y, Fan W M, et al. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan Province: basaltic underplating versus tectonic thickening [J]. Science in China (Series D), 2002, 45 (11): 1042-1056.
- [4] 周新民. 对华南花岗岩研究的若干思考 [J]. 高校地质学报, 2003, 9 (4): 556-565.
- [5] 华仁民,陈培荣,张文兰,等. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用 [J]. 矿床地质, 2005, 24 (2): 99-107.
- [6] 毛景文,谢桂青,李晓峰,等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (1): 45-55.
- [7] 蔡明海,陈开旭,屈文俊,等. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿Re-Os测年 [J]. 矿床地质, 2006, 25 (3): 263-268.
- [8] 杨锋,李晓峰,冯佐海,等. 栗木锡矿云英岩化花岗岩白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄及其地质意义 [J]. 桂林理工大学学报, 2009, 29 (1): 21-24.
- [9] 康志强,冯佐海,杨锋,等. 广西桂林地区东部栗木花岗岩体SHRIMP锆石U-Pb年龄 [J]. 地质通报, 2012, 31 (8): 1306-1312.
- [10] 伍静,梁华英,黄文婷,等. 桂东北苗儿山-越城岭南西部岩体和矿床同位素年龄及华南印支期成矿分析 [J]. 科学通报, 2012, 57 (13): 1126-1136.
- [11] 马丽艳,付建明,程顺波,等. 广西栗木锡钨钽矿田矿化花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其意义 [J]. 华南地质与矿产, 2013, 29 (4): 292-298.
- [12] 徐德明,付建明,陈希清,等. 都庞岭环斑花岗岩的形成时代、成因及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41 (3): 561-576.
- [13] Chen P R, Hua R M, Zhang B T, et al. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region: petrological constraints and geodynamic settings [J]. Science in China (Series D), 2002, 45 (8): 755-768.
- [14] Li X H, Chen Z G, Liu D Y, et al. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: age, origin, and tectonic significance [J]. International Geology Review, 2003, 45: 898-921.
- [15] Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: new insights from basin analysis [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34 (3): 376-391.
- [16] 李三忠,张国伟,周立宏,等. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲 [J]. 地学前缘, 2011, 18 (3): 79-107.
- [17] 冯佐海,梁金城,桂桂林,等. 论广西东部中生代花岗岩类岩石谱系单位——以姑婆山-花山花岗岩体为例 [J]. 桂林工学院学报, 2002, 22 (3): 333-340.
- [18] Olsson J R, Söderlund U, Hamilton M A, et al. A late Archaean radiating dyke swarm as possible clue to the origin of the Bushveld Complex [J]. Nature Geoscience, 2011, 4: 865-869.
- [19] Wang Y J, Fan W M, Guo F, et al. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: implications for the lithospheric boundary between the



- Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. International Geology Review, 2003, 45: 263-286.
- [20] Wang J, Li X H, Duan T Z, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating for the Cangshuiyu volcanic rocks and its implications for the lower boundary age of the Nanhua strata in South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (16): 1663-1669.
- [21] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, et al. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on multiple mantle domains for Mesozoic mafic rocks beneath the South China Block hinterland [J]. Lithos, 2008, 106: 297-308.
- [22] 刘燊, 胡瑞忠, 赵军红, 等. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究 [J]. 岩石学报, 2005, 21 (3): 947-958.
- [23] Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, southeast China: implications for a continental arc to rifting [J]. Lithos, 2009, 107: 185-204.
- [24] Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology [J]. Chemical Geology, 2004, 211: 47-69.
- [25] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- [26] 唐红峰, 赵志琦, 黄荣生, 等. 新疆东准噶尔 A 型花岗岩的锆石 Hf 同位素初步研究 [J]. 矿物学报, 2008, 28 (4): 335-342.
- [27] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (10): 2595-2604.
- [28] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (2): 185-220.
- [29] 吴元保, 郑永飞. 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, 2004, 49 (16): 1589-1604.
- [30] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model [J]. Geology, 2007, 35 (2): 179-182.
- [31] Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101 (B7): 16137-16154.
- [32] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution [J]. Episodes, 2006, 29 (1): 26-33.
- [33] Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies [J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1273-1305.
- [34] 柏道远, 陈必河, 钟响, 等. 湘西南印支期五团岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成背景 [J]. 中国地质, 2014, 41 (6): 2002-2018.
- [35] 于津海, 王丽娟, 王孝磊, 等. 赣东南富城杂岩体的地球化学和年代学研究 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (6): 1441-1456.
- [36] 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 湘南宁远地区碱性玄武岩形成时代的新证据: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年 [J]. 地质通报, 2010, 29 (6): 833-841.
- [37] 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗斑岩、安山岩的形成时代和成因——锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成 [J]. 地质通报, 2012, 31 (9): 1363-1378.
- [38] 金鑫鏢, 王磊, 向华, 等. 湖南桃江地区印支期辉绿岩成因——地球化学、年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素约束 [J]. 地质通报, 2017, 36 (5): 750-760.
- [39] Scherer E E, Cameron K L, Blichert-Toft J. Lu-Hf garnet geochronology: closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64 (19): 3413-3432.
- [40] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统 [J]. 中国科学 (D 辑), 2003, 33 (4): 335-343.
- [41] 邹先武, 崔森, 屈文俊, 等. 广西都庞岭李贵福钨锡多金属矿 Re-Os 同位素定年研究 [J]. 中国地质, 2009, 36 (4): 837-844.
- [42] 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等. 云南个旧锡矿床铅、硫同位素研究 [J]. 地质与勘探, 2006, 42 (2): 49-53.
- [43] 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示 [J]. 科学通报, 2005, 50 (12): 1259-1266.
- [44] 谢晓华, 陈卫锋, 赵葵东, 等. 桂东北豆乍山花岗岩年代学与地球化学特征 [J]. 岩石学报, 2008, 24 (6): 1302-1312.
- [45] 郭春丽, 陈毓川, 蔺志永, 等. 赣南印支期柯树岭花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及成因探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30 (4): 567-580.
- [46] 李万友, 马昌前, 刘园园, 等. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义 [J]. 中国科学 (地球科学), 2012, 42 (2): 164-177.
- [47] 马铁球, 柏道远, 邝军, 等. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. 地质通报, 2005, 24 (5): 415-419.
- [48] 丁兴, 陈培荣, 陈卫锋, 等. 湖南浏山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年: 成岩启示和意义 [J]. 中国科学 (地球科学), 2005, 35 (7): 606-616.

- [49] 陈卫锋, 陈培荣, 周新民, 等. 湖南阳明山岩体的 La - ICP - MS 锆石 U - Pb 定年及成因研究 [J]. 地质学报, 2006, 80 (7): 1065 - 1077.
- [50] Peng B X, Wang Y J, Fan W M, et al. LA - ICPMS zircon U - Pb dating for three Indosinian granitic plutons from central Hunan and western Guangdong Provinces and its petrogenetic implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (5): 660 - 669.
- [51] 王丽娟, 于津海, 徐夕生, 等. 闽西南古田 - 小陶花岗岩杂岩体的形成时代和成因 [J]. 岩石学报, 2007, 23 (6): 1470 - 1484.
- [52] Wang Y J, Fan W M, Sun M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: a case study in the Hunan Province [J]. Lithos, 2007, 96: 475 - 502.
- [53] 罗志高, 王岳军, 张菲菲, 等. 金滩和白马山印支期花岗岩体 LA - ICPMS 锆石 U - Pb 定年及其成岩启示 [J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34 (2): 282 - 290.
- [54] 丁兴, 孙卫东, 汪方跃, 等. 湖南沅山岩体多期云母的 Rb - Sr 同位素年龄和矿物化学组成及其成岩成矿指示意义 [J]. 岩石学报, 2012, 28 (12): 3823 - 3840.
- [55] 李晓峰, 冯佐海, 肖荣, 等. 桂东北钨锡稀有金属矿床的成矿类型、成矿时代及其地质背景 [J]. 地质学报, 2012, 86 (11): 1713 - 1725.
- [56] 程顺波, 付建明, 马丽艳, 等. 桂东北越城岭 - 苗儿山地区印支期成矿作用: 油麻岭和界牌矿区成矿花岗岩锆石 U - Pb 年龄和 Hf 同位素制约 [J]. 中国地质, 2013, 40 (4): 1189 - 1201.
- [57] 赵葵东, 李吉人, 凌洪飞, 等. 江西省峡江钨矿床两期印支期花岗岩的年代学、岩石地球化学和岩石成因——对华南印支期构造背景和产钨花岗岩成因的指示 [J]. 岩石学报, 2013, 29 (12): 4349 - 4361.
- [58] 李国亮, 王先辉, 杨俊, 等. 湖南白马山岩体锆石 SHRIMP U - Pb 年龄及其地质意义 [J]. 国土资源导刊, 2014 (5): 62 - 65.
- [59] 覃洪锋, 黄锡强, 蒋剑, 等. 桂北猫儿山印支期花岗岩成因: 来自岩石学、岩石地球化学、锆石 U - Pb 年龄和 Hf 同位素的证据 [J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38 (4): 597 - 613.

## LA-ICP-MS zircon U - Pb dating and Hf isotope compositions of the sillite from Ludong in Fuchuan, northeastern Guangxi

SHI Yu<sup>1</sup>, SAN Yuan-he<sup>1</sup>, GUO Zhi-chao<sup>1</sup>, LIU Xi-jun<sup>1</sup>, WANG Xin-yu<sup>1,2</sup>, WU Xiang-ke<sup>2</sup>,  
FENG Zuo-hai<sup>1</sup>, YANG Jin-lei<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-chen<sup>1</sup>

(1. a. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration; b. Guangxi Collaborative Innovation Centre of Hidden Non-Ferrous Metallic Ore Deposits Exploration and Development of Materials, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Fuchuan is located in the western of Nanling metallogenic belt. The Mesozoic granites are extensively exposed in this area, with the age ranging from Caledonian to Yanshannian. This study reported the LA-ICP-MS zircon U - Pb age of the sillite from Ludong in Fuchuan, northeastern Guangxi. The zircon ages are mainly defined in  $207.8 \pm 1.5$  Ma, implying the formation age of the sillite. Combined with the previous studies about Indosinian granites and the related ore deposits, it is suggested that the formation age of the Ludong sillite is almost simultaneously with the Indosinian granites and the related ore deposits. Thus they should be the same magmatic products of the late Triassic. The discovery of the sillite with the age of  $\sim 208$  Ma reveals that the eastern South of China was involved in a post-collision extension or continental rift setting during the late Triassic. The Hf isotopic characteristics of the sillite suggest that it should be sourced from both the old crust and new crust/mantle materials, with mainly new crust/mantle material. In South China, not only the Yanshanian deposits, but also the Indosinian deposits are exposed.

**Key words:** sillite; zircon U - Pb ages; Hf isotope; Mesozoic; Nanling metallogenic belt; northeastern Guangxi