

# 广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及全岩 Sr-Nd 同位素研究

顾晟彦<sup>1)</sup>, 华仁民<sup>1)</sup>, 戚华文<sup>1,2)</sup>

1) 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学花岗岩火山岩及成矿理论研究所, 210093

2) 中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550002

**内容提要:** LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄测定表明, 组成广西姑婆山花岗岩的东、西岩体和里松岩体的年龄分别为  $160.8 \pm 1.6$  Ma、 $165.0 \pm 1.9$  Ma、 $163.0 \pm 1.3$  Ma, 在误差范围内基本一致, 说明整个姑婆山岩体是同一时代的产物, 是燕山中期第一阶段华南大规模陆壳重熔型花岗岩浆活动的产物。姑婆山花岗岩中的各个岩体虽然形成于同一时代, 但它们之间在岩石学、地球化学特征方面有一定的差异。除了主微量元素、稀土元素特征有所不同外, Rb-Sr、Sm-Nd 同位素特征研究表明: 姑婆山西岩体的粗粒花岗岩、东岩体、里松岩体及其包体的平均  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7064$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  平均为  $-3.03$ , 反映它们的源区有较多地幔物质组分参与; 而姑婆山西岩体的细粒花岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7173$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  平均为  $-5.00$ , 具强烈的 Eu 亏损、高 Rb/Sr 值等特征, 它的源区可能是由一个相对古老地壳组分和年轻地幔组分组成的混合源区。此外, 姑婆山东岩体(GP-1)中发现的继承锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 806.4 Ma, 与杭州—诸广山—花山花岗岩带(HZH)上的赣北九岭堇青石花岗岩、广西英桥混合花岗岩的年龄相似, 为 HZH 带新元古代的岩浆活动提供了锆石年代学方面的依据。

**关键词:** 姑婆山花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; Rb-Sr、Sm-Nd 同位素

南岭地区自早古生代以来, 经历了加里东期造山运动、印支期造山运动和燕山期构造—岩浆作用, 形成了不同时代的花岗岩和丰富的矿产资源(地质矿产部南岭项目花岗岩专题组, 1989; 陈培荣等, 2002), 成为我国著名的多金属成矿带。包括姑婆山花岗岩体在内的桂东北地区, 也是南岭多金属成矿带的组成部分, 是重要的 W、Sn、Nb、Ta、Li 等有色、稀有金属产地之一(邓庆平, 1985; 陈春等, 1992; 陈毓川等, 1995; 华仁民等, 2003)。

前人已经对姑婆山花岗岩的地质地球化学特征、时代及成因进行了不少研究工作。多种方法的同位素定年(钾长石 K-Ar 法、黑云母 K-Ar 法、全岩 Rb-Sr 法、锆石 U-Pb 法)和岩石学工作认为姑婆山岩体是由中心相(里松岩体)、过渡相(姑婆山东体)和边缘相(姑婆山西体粗粒花岗岩)所构成, 且三者为单一岩浆源脉动而成(张德全等, 1985; 杨学明等, 1990; 张佩华, 2003)。但由于选样技术和测试方法的限制, 对该岩体的形成年龄还有不同的认识(张德全等, 1985; 杨学明等, 1990; 张佩华, 2003)。而且, 前人

工作主要涉及的是里松岩体及其包体、姑婆山东岩体, 以及西岩体中的粗粒花岗岩, 而对姑婆山西岩体中的细粒花岗岩研究很少。近年来, 笔者等对姑婆山主体花岗岩进行了较为全面的研究, 补充了对姑婆山西岩体中的细粒花岗岩的大量测试, 并利用单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年技术(Machado et al., 1996; Norman et al., 1996; 刘海臣等, 1998; Belousova et al., 2001)、Rb-Sr、Sm-Nd 同位素测定, 系统地对比姑婆山岩体中各个不同单元进行了精确的定年和物质来源示踪, 获得了一些新的数据, 在此基础上提出对姑婆山花岗岩中各不同单元相互关系的新认识, 也为讨论该岩体的成因、演化及与构造、成矿作用的关系提供了新的依据。

## 1 岩体概况

姑婆山花岗岩体位于北纬  $24^{\circ}32' \sim 24^{\circ}45'$ 、东经  $111^{\circ}30' \sim 111^{\circ}40'$ , 主要分布在广西壮族自治区贺州市西北部, 部分在钟山县东北角和湖南省江华县境内, 出露面积约  $678 \text{ km}^2$ 。在大地构造位置上处于华

注: 本文为国家自然科学基金重点项目(编号 40132010)和国家重点基础研究发展规划项目(编号 1999CB403209)资助成果。

收稿日期: 2005-09-19; 改回日期: 2005-12-31; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 顾晟彦, 女, 1979 年生。现为南京大学地球科学系矿物岩石矿床学博士研究生。Email: xirudagu@sohu.com。

南加里东褶皱带南岭东西向构造带西端(黄汲清等, 1981), 受花山—姑婆山—英阳关东西向隆起带和道县—姑婆山南北向拗褶带复合部位的控制(杨学明等, 1990)。姑婆山花岗岩体呈浑圆形, 西南到西北缘侵入中—上泥盆统, 东南部和东北部侵入寒武系与下泥盆统, 东部与大宁岩体接触。整个岩体分成东西两个部分, 分别称为姑婆山东岩体和姑婆山西岩体, 大致以晚期呈南北向展布的红花源—新路断裂为分界。在东岩体的中心, 分布着含大量暗色闪长质包体的近等轴状的里松岩体, 面积超过 70 km<sup>2</sup>(图 1)。

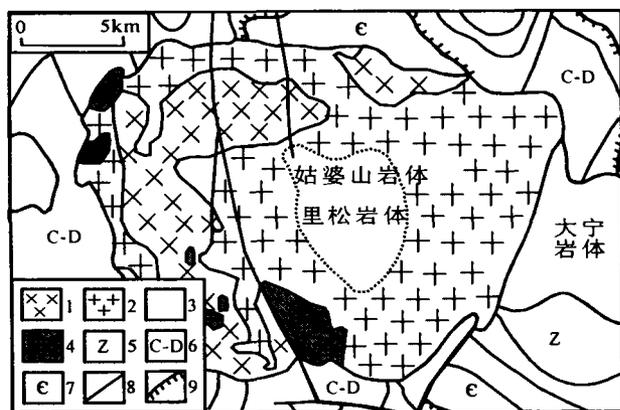


图 1 姑婆山—里松岩体地质略图

(据张德全等, 1985; 冯佐海等, 2002; 张佩华, 2003, 改编)

Fig. 1 Simplified regional geological map of the Guposhan—Lisong granite (modified from

Zhang Dequan et al., 1985; Feng Zuohai et al., 2002; Zhang Peihua, 2003)

1—中细粒斑状黑云母花岗岩(姑婆山西岩体); 2—中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩(姑婆山东岩体); 3—中粒似斑状角闪黑云二长花岗岩(里松岩体); 4—细粒花岗岩(姑婆山西岩体); 5—震旦纪岩体; 6—石炭—泥盆纪岩体; 7—寒武纪岩体; 8—断裂; 9—不整合接触线

1—Fine and median-grain porphyritic biotite granite (West Guposhan unit); 2—coarse and median-grain porphyroid biotite K-feldspar granite (East Guposhan unit); 3—coarse-grain porphyroid hornblende-biotite monzo-granite (Lisong unit); 4—fine-grain granite (West Guposhan unit); 5—Sinian rock; 6—Carboniferous—Devonian rock; 7—Cambrian rock; 8—fault; 9—unconformable contact line

姑婆山各岩体的岩性有明显差异: 里松岩体为中粒似斑状角闪石黑云母二长花岗岩, 姑婆山东岩体以中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩为主, 西岩体主要为中细粒斑状黑云母花岗岩、细粒花岗岩和中粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩。

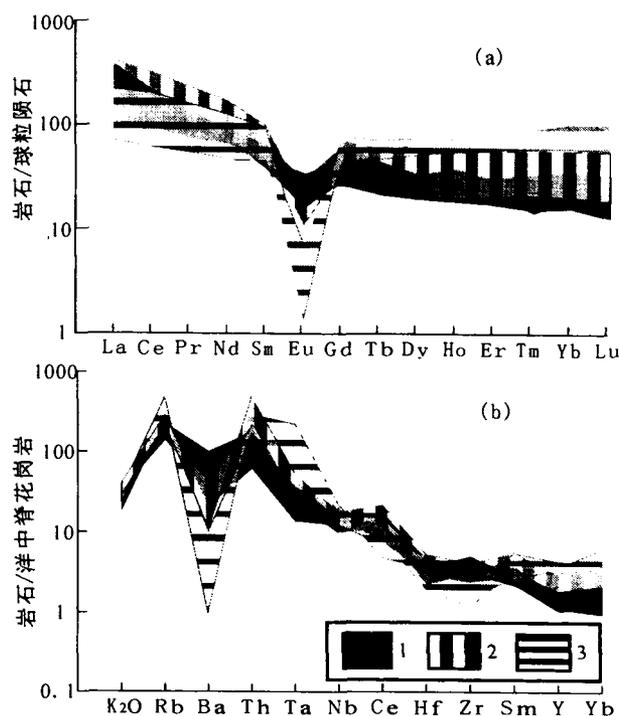


图 2 姑婆山花岗岩的 REE 配分图(a)和不相容元素的洋脊花岗岩标准化蛛网图(b)

(球粒陨石标准化值据 Taylor 等, 1985; ORG 值据 Pearce, 1982, 1983)

Fig. 2 Chondrite-normalized REE pattern (a) and ocean ridge granite-normalized spider diagram (b) of the Guposhan granites

(chondrite REE value is after Taylor et al., 1985; ORG standard value is after Pearce, 1982, 1983)

1—里松岩体; 2—姑婆山东岩体和里松岩体; 3—姑婆山西岩体  
1—Lisong enclave (LSbt); 2—Guposhan and Lisong rock bodies (GPD+LS); 3—rock body in the west of Guposhan (GPX)

## 2 岩石地球化学特征

本次研究对姑婆山花岗岩的岩石地球化学特征, 包括主量、微量及稀土元素进行了研究。姑婆山各岩体单元的主微量、稀土元素平均含量见表 1、2, 其中: GPX 表示姑婆山西岩体中的细粒斑状黑云母花岗岩, GPD 表示姑婆山西岩体中的粗粒似斑状黑云母钾长花岗岩和姑婆山东岩体花岗岩, LS 表示里松不含包体花岗岩, LSbt 为里松含包体花岗岩(张佩华, 2003)。

由表 1 数据可见: GPX、GPD 和 LS 的 SiO<sub>2</sub> 含量较高(变化范围在 69.04%~76.26%), 而 LSbt 的 SiO<sub>2</sub> 含量明显较低(59.62%~65.30%)。它们均

表 1 姑婆山花岗岩主量元素含量(%)及地球化学参数

Table 1 Major element compositions (%) and chemical parameters of the Guposhan granites

	样品	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K/N	ACNK	∑
GPX	GP-5	76.05	0.10	12.18	0.31	0.55	0.03	0.14	1.18	3.38	5.17	0.00	1.53	0.91	99.74
	GP-8	76.01	0.07	12.64	0.41	0.88	0.03	0.21	0.79	4.61	3.48	0.00	0.75	0.99	99.94
	GP-11	75.91	0.08	12.16	0.50	0.85	0.04	0.11	0.67	3.52	4.76	0.00	1.35	1.00	99.39
	GP-16	76.17	0.11	12.23	0.54	1.15	0.05	0.10	0.81	3.22	5.41	0.00	1.68	0.97	100.4
	LS-15	75.26	0.10	12.83	0.35	1.17	0.03	0.21	0.88	3.32	5.08	0.00	1.53	1.02	99.87
	LH-1	74.80	0.08	12.63	0.41	1.04	0.03	0.11	0.99	3.56	5.01	0.00	1.41	0.96	99.23
GPD	GP-6	73.05	0.31	12.68	2.67	0.17	0.05	0.39	1.39	3.13	5.03	0.03	1.61	0.97	99.58
	GP-13	74.12	0.28	12.22	1.02	1.73	0.06	0.31	1.48	3.38	4.15	0.02	1.23	0.96	99.37
	GP-1	75.07	0.27	11.73	0.95	1.52	0.04	0.33	1.30	3.16	4.52	0.01	1.43	0.94	99.37
	63-1a <sup>A</sup>	76.26	0.11	12.04	0.16	1.47	0.03	0.12	1.00	3.46	4.68	0.15	1.35	0.96	99.78
	65-1a <sup>A</sup>	74.14	0.13	12.31	0.82	1.85	0.03	0.24	1.35	3.26	4.73	0.07	1.45	0.95	99.47
	54-1a <sup>A</sup>	73.98	0.14	13.33	0.38	1.44	0.03	0.17	0.94	3.74	5.20	0.14	1.39	0.99	99.91
LS	LS-4	74.49	0.20	12.54	0.64	1.17	0.03	0.22	1.20	3.33	4.95	0.00	1.49	0.96	99.29
	LS-6	69.04	0.42	14.50	1.07	2.00	0.07	0.62	1.74	3.88	5.17	0.15	1.33	0.96	99.41
	LS-7	70.05	0.42	13.84	1.16	1.85	0.07	0.72	1.67	4.21	4.54	0.14	1.08	0.93	100.3
	LS-9	74.44	0.18	12.87	0.67	1.15	0.03	0.26	1.01	3.29	5.41	0.00	1.64	0.98	100.0
	LS-10	72.57	0.18	13.88	0.72	1.17	0.03	0.20	0.94	3.75	5.91	0.00	1.58	0.97	99.93
	LS-11	71.20	0.34	14.16	1.04	1.67	0.05	0.43	1.65	3.70	5.30	0.05	1.43	0.95	100.2
	66-1a <sup>A</sup>	71.23	0.43	13.14	1.21	2.29	0.06	0.65	2.26	3.68	3.94	0.25	1.07	0.91	99.53
	58-1a <sup>A</sup>	70.60	0.40	13.82	0.85	2.30	0.06	0.53	1.83	3.88	4.74	0.28	1.22	0.93	99.85
	61-1a <sup>A</sup>	70.12	0.42	13.98	0.96	2.35	0.05	0.68	1.85	3.48	4.58	0.16	1.32	0.99	99.45
LSbt	GP23 <sup>B</sup>	61.95	0.69	16.63	2.37	3.25	0.14	0.91	2.53	4.23	6.04	0.25	1.43	0.92	99.49
	GP27 <sup>B</sup>	59.62	1.33	15.50	2.73	4.43	0.16	1.82	3.67	3.80	4.88	0.46	1.28	0.85	99.72
	GP30 <sup>B</sup>	63.08	0.72	15.38	1.51	3.06	0.10	1.07	2.54	4.11	4.90	0.26	1.19	0.92	98.28
	GP31 <sup>B</sup>	62.58	0.97	15.23	1.52	3.73	0.10	1.53	3.21	4.03	4.71	0.39	1.17	0.87	99.04
	GP33 <sup>B</sup>	62.60	0.65	16.43	2.45	2.90	0.12	0.85	2.61	4.66	5.36	0.22	1.15	0.90	99.68
	GP47-2 <sup>B</sup>	59.74	1.17	15.69	2.21	5.02	0.15	1.66	3.39	4.29	4.74	0.48	1.10	0.85	99.75
	56-1 <sup>A</sup>	63.82	0.88	15.40	1.40	4.12	0.09	1.47	3.04	4.18	4.24	0.37	1.01	0.91	99.60
	58-3 <sup>A</sup>	65.30	0.66	15.06	1.46	3.11	0.10	1.15	2.19	3.68	5.20	0.31	1.41	0.96	99.82

注:表中 K/N=K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O。数据来源:A 据张德全等(1985);B 据张佩华(2003)。主量元素在南京现代分析中心实验室的 ARL9800XP+型 X 射线荧光光谱仪上测得。

以富碱 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O = 7.53%~10.27%)、高钾 (K<sub>2</sub>O = 3.48%~6.04%)、低磷 (多数样品 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量低于 XRF 检测限)、准铝 (ACNK = 0.85~1.0) 为特征,且 K<sub>2</sub>O > Na<sub>2</sub>O,铁高而镁低 (TF<sub>FeO</sub>/MgO = 3.34~16.38)。

各花岗岩体的稀土元素总量较高 (177.29 × 10<sup>-6</sup>~590.54 × 10<sup>-6</sup>),铕负异常明显 (δEu = 0.02~0.86),其中 GPD、LS 和 LSbt 富集轻稀土 [(La/Yb)<sub>N</sub> = 4.32~11.71],稀土元素分配模式向右倾斜,而 GPX 的 LREE 分馏程度降低,HREE 略有富集,稀土元素分配模式近于“V”形(图 2a)。

在不相容元素的洋脊花岗岩标准化蛛网图上(图 2b),本区各花岗岩体样品的微量元素特征表现为大离子亲石元素(Rb、Th、Ce、K)的强富集和高场强元素(Y、Ta、Nb、Zr、Hf)的弱富集,其中 GPD、LS 和 LSbt 分布型式极为相似,暗示其来源的一致性。

### 3 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素特征

#### 3.1 样品分析及计算方法

笔者对野外采集的新鲜样品进行室内初步研究后,选择具代表性的样品在中国科学院地质和地球物理研究所同位素地球化学实验室作 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成分析,详细分析流程见黄首等(1990),侯增谦等(2005)。测量仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电质谱计。实验测定 NBS987 Sr 标样中 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.710226 ± 12(2σ),标准化值采用 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.1194;BCR-1 岩石标样中 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512638 ± 3(2σ),标准化值采用 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219。Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底分别为 100 pg 和 50 pg 左右。

Nd、Sr 同位素组成 ε<sub>Nd</sub>(t), ε<sub>Sr</sub>(t) (Mculloch et al., 1982) 和 T<sub>2DM</sub> (Liew et al., 1988; 李献华等, 1991)值采用下式计算:

表2 姑婆山花岗岩微量和稀土元素含量(×10<sup>-6</sup>)及地球化学参数

Table 2 Trace and rare earth element compositions (×10<sup>-6</sup>) and chemical parameters of the Guposhan granites

	样品	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	La	Ce	Pr	Nd
GPX	GP-5	526.0	29.65	105.6	139.0	67.73	37.91	8.80	19.94	50.56	21.81	48.30	6.54	27.93
	GP-8	596.7	12.39	114.3	156.2	76.10	19.54	12.51	39.84	58.25	31.32	67.92	8.79	35.14
	GP-11	955.9	18.19	108.2	164.7	70.54	41.00	8.94	27.52	53.53	26.90	58.44	7.20	27.42
	GP-16	636.2	23.59	132.3	220.8	57.86	44.79	9.63	9.78	75.08	67.07	160.80	19.20	74.73
	LS-15	568.6	52.65	96.11	108.6	49.52	204.6	4.72	7.63	33.24	37.91	85.73	10.23	40.91
	LH-1	635.7	33.76	109.8	128.2	43.28	106.8	7.17	10.30	36.17	33.01	69.76	9.25	36.41
GPD+ LS	LS-4	412.2	89.67	38.03	289.9	38.30	364.2	9.02	4.54	64.30	72.33	147.88	15.92	56.13
	LS-6	410.3	307.8	35.91	302.7	56.04	823.7	8.24	7.29	45.60	68.21	125.47	13.13	45.46
	LS-7	411.5	223.0	39.17	342.4	59.11	549.4	9.33	8.82	43.36	64.27	119.92	12.39	43.97
	LS-9	473.0	77.17	60.90	271.5	37.73	333.9	8.70	4.91	61.68	78.02	165.29	18.09	64.64
	LS-10	563.5	76.39	58.13	264.5	55.18	411.9	8.93	6.78	60.77	98.31	201.91	21.92	77.90
	LS-11	442.7	149.1	56.83	330.9	49.34	604.7	9.99	6.53	54.25	74.07	150.05	16.12	58.47
	GP-1	411.6	72.02	46.34	362.5	33.87	303.4	10.94	4.37	67.31	74.55	155.99	17.38	60.43
	GP-6	445.7	133.9	84.41	289.1	38.00	557.9	9.46	4.56	45.82	75.86	159.72	18.28	69.51
	GP-13	454.8	81.77	89.57	372.7	61.41	217.9	12.92	9.24	96.26	102.8	217.84	24.52	92.62
	GP-17	441.8	128.1	80.48	314.1	39.82	572.8	10.00	4.84	59.67	124.7	254.45	28.17	101.4
LSbt	GP23 <sup>A</sup>	352.9		32.14	449.1	65.51	1016	8.78	4.54	19.99	60.33	120.12	12.36	45.10
	GP27 <sup>A</sup>	284.2		34.04	458.5	42.79	979.2	8.89	2.52	18.23	58.70	115.00	12.55	49.07
	GP30 <sup>A</sup>	464.7		49.23	355.9	43.61	1302	10.54	3.66	40.91	89.63	149.09	15.86	55.50
	GP31 <sup>A</sup>	448.1		43.71	223.2	42.32	1416	6.93	4.92	38.07	73.03	129.78	13.25	44.87
	GP33 <sup>A</sup>	449.3		34.95	393.8	60.07	2011	10.96	5.01	35.12	115.8	171.67	16.00	50.44
	GP47-3 <sup>A</sup>	381.8		56.38	416.2	69.64	519.8	8.84	6.59	27.54	48.41	109.94	13.66	55.37
	样品	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑REE	(La/Yb) <sub>N</sub>	δEu
GPX	GP-5	9.21	0.27	11.85	2.21	16.47	3.90	11.74	1.99	12.98	2.09	177.29	1.11	0.08
	GP-8	11.37	0.10	13.78	2.72	21.12	5.01	16.68	2.92	21.16	3.34	241.37	0.98	0.02
	GP-11	8.74	0.21	11.18	2.27	17.82	4.23	13.86	2.41	16.86	2.60	200.14	1.05	0.06
	GP-16	18.44	0.34	20.15	3.35	23.84	5.23	15.57	2.30	14.07	2.12	427.21	3.15	0.05
	LS-15	11.31	0.53	13.92	2.50	18.08	4.16	12.16	1.86	12.22	1.77	253.29	2.05	0.13
	LH-1	11.70	0.34	14.40	2.59	18.44	4.16	12.34	1.90	12.71	1.92	228.93	1.72	0.08
GPD+ LS	LS-4	9.65	0.89	8.63	1.15	7.26	1.55	4.45	0.67	4.24	0.61	331.36	11.26	0.30
	LS-6	7.84	1.53	7.34	1.01	6.69	1.43	4.39	0.67	4.44	0.68	288.29	10.14	0.62
	LS-7	7.91	1.28	7.44	1.06	6.87	1.52	4.61	0.74	5.06	0.80	277.84	8.39	0.51
	LS-9	13.27	0.83	13.57	1.97	12.97	2.87	8.04	1.16	7.10	1.07	388.89	7.26	0.19
	LS-10	14.43	0.99	13.16	1.83	11.99	2.54	7.16	1.08	7.06	1.05	461.33	9.20	0.22
	LS-11	11.22	1.37	11.14	1.56	10.54	2.21	6.74	1.03	6.67	0.99	352.18	7.33	0.37
	GP-1	11.31	0.79	9.80	1.31	8.46	1.79	5.12	0.80	4.95	0.78	353.46	9.95	0.23
	GP-6	15.59	1.20	16.24	2.53	17.08	3.56	10.36	1.52	9.24	1.34	402.03	5.42	0.23
	GP-13	18.85	0.85	18.22	2.74	18.52	4.07	11.65	1.83	11.74	1.81	528.04	5.78	0.14
	GP-17	19.14	1.24	17.77	2.59	16.04	3.50	10.02	1.47	8.83	1.31	590.54	9.52	0.21
LSbt	GP23 <sup>A</sup>	7.61	1.87	6.77	1.03	6.28	1.32	3.63	0.56	3.74	0.54	271.26	10.66	0.80
	GP27 <sup>A</sup>	9.21	2.49	8.59	1.15	6.97	1.38	3.60	0.50	3.31	0.43	272.95	11.71	0.86
	GP30 <sup>A</sup>	12.30	2.18	16.25	2.08	10.70	2.70	6.16	0.61	4.81	0.72	368.56	12.32	0.47
	GP31 <sup>A</sup>	9.17	2.38	12.84	1.68	9.22	2.19	5.28	0.54	4.48	0.64	309.34	10.77	0.67
	GP33 <sup>A</sup>	9.10	2.41	11.40	1.49	7.23	1.79	4.50	0.47	4.04	0.64	396.95	18.93	0.72
	GP47-3 <sup>A</sup>	10.50	1.37	10.44	1.46	10.03	2.36	6.55	1.09	7.40	1.09	279.66	4.32	0.40

注:A 数据来源张佩华(2003)。微量和稀土元素在南京大学成矿作用研究国家重点实验室 Finnigan Element2 高分辨率等离子质谱仪上测得。

$$\epsilon_{Nd}(t) = \left[ \frac{({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s^T}{({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^T} - 1 \right] \times 10^4$$

$$\epsilon_{Sr}(t) = \left[ \frac{({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_s^T}{({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}^T} - 1 \right] \times 10^4$$

$$({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s^T = ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s - ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_s (e^{\lambda_{\text{Sm}} T} - 1)$$

$$({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_s^T = ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_s - ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_s (e^{\lambda_{\text{Rb}} T} - 1)$$

$$({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}^T = ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} (e^{\lambda_{\text{Sm}} T} - 1)$$

$$({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{UR}}^T = ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} - ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_{\text{UR}} (e^{\lambda_{\text{Rb}} T} - 1)$$

表 3 姑婆山花岗岩 Rb-Sr 同位素测定结果

Table 3 Rb-Sr isotopic compositions of the Guposhan granites

岩体	样号	出处	Rb( $\times 10^{-6}$ )	Sr( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{87Rb}{86Sr}$	$\frac{87Sr}{86Sr}$	等时线参数
姑婆山西岩体	LH-1		475.725	28.08	49.10	0.822076	$t=141 \pm 12$ Ma
	LS-15		433.124	38.85	32.37	0.779788	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$
	GP-8	本文	444.603	9.216	142.5	1.008011	$=0.7173 \pm$
	GPX		715.371	13.03	163.6	1.025912	0.0095,
	GP-16		487.299	17.77	80.20	0.877865	MSWD=1.2
姑婆山东岩体	88-03		378.095	73.06	14.99	0.739524	
	88-04	杨学明等,	460.429	9.28	147.74	1.021780	$t=150.9 \pm$
	88-05	1990	449.951	10.78	123.70	0.978700	0.8Ma,
	88-06		363.458	17.43	60.96	0.833554	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$
	88-07		358.817	17.62	59.53	0.832829	$=0.7066 \pm$
	GPD	本文	308.00	51.17	17.37	0.740883	0.0027,
	54-1a	张德全等,	313.52	74.11	12.23530	0.733000	MSWD=
	65-1a	1985	373.24	56.22	19.20120	0.750980	0.85
	63-1a		336.95	41.10	23.70750	0.756670	
里松岩体 (不含包体)	LS-4		310.65	68.52	13.11	0.735707	$t=160 \pm$
	LS-6	本文	313.99	223.8	4.033	0.715055	20 Ma,
	LS-10		423.44	59.72	20.40	0.750048	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$
	LS-11		331.17	117.2	8.178	0.726379	$=0.7066 \pm$
	LS	张德全等,	243.27	168.34	4.1793	0.715730	0.0022;
里松岩体 (含包体)	61-1a	1985	256.89	147.05	5.0523	0.718880	MSWD=1.7
	62-1a		305.37	70.61	12.50780	0.736400	
	56-3		299.09	277.97	3.1118	0.712660	$t=165 \pm$
	56-1	张德全等,	312.90	239.84	3.7733	0.714890	16Ma,
LSbt	62-1	1985	382.10	170.80	6.4067	0.720390	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$
	58-2		449.12	172.33	7.5373	0.723150	$=0.7056 \pm$
	59-1		457.20	158.16	8.3607	0.725270	0.0011,
	57-1		506.10	140.09	10.44830	0.730120	MSWD=0.4

$$T_{2DM} = \frac{1}{\lambda_{Sm}} \ln \left\{ 1 + \frac{\left( \frac{^{143}Nd}{^{144}Nd} \right)_s - \left( \frac{^{143}Nd}{^{144}Nd} \right)_{DM} - \left[ \left( \frac{^{147}Sm}{^{144}Nd} \right)_s - \left( \frac{^{147}Sm}{^{144}Nd} \right)_{CC} \right] (e^{\lambda_{Sm} T} - 1)}{\left( \frac{^{147}Sm}{^{144}Nd} \right)_{CC} - \left( \frac{^{147}Sm}{^{144}Nd} \right)_{DM}} \right\}$$

式中:  $T$  为岩石结晶年龄;  $S$  为样品同位素组成现今测定值;  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.512638$ ;  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.1967$ ;  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_{UR} = 0.7045$ ;  $(^{87}Rb/^{86}Sr)_{UR} = 0.0816$ ;  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM} = 0.2168$ ;  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM} = 0.51325$ ,  $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CC} = 0.118$ ;  $\lambda_{Sm} = 6.54 \times 10^{-12} a^{-1}$ ;  $\lambda_{Rb} = 1.42 \times 10^{-11} a^{-1}$ .

3.2 分析及计算结果

笔者对姑婆山东、西岩体和里松岩体的 10 个样品进行了全岩 Rb-Sr 同位素测定(表 3), 并结合张德全等(1985)、杨学明等(1990)的全岩 Rb-Sr 数据进行回归处理得到结果如下:

(1) 姑婆山西岩体中的细粒花岗岩(GPX)等时线年龄  $t = 141 \pm 12$  Ma,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7173 \pm 0.0095$ , MSWD=1.2(图 3a)。

(2) 姑婆山西岩体中粗粒花岗岩和东岩体花岗岩(GPD)等时线年龄  $t = 150.9 \pm 0.8$  Ma,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7066 \pm 0.0027$ , MSWD=0.85。

(3) 里松花岗岩(LS)等时线年龄  $t = 160 \pm 20$  Ma,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7066 \pm 0.0022$ , MSWD=1.7。

(4) 含包体的里松岩体(LSbt)等时线年龄  $t = 165 \pm 16$  Ma,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7056 \pm 0.0011$ , MSWD=0.4。

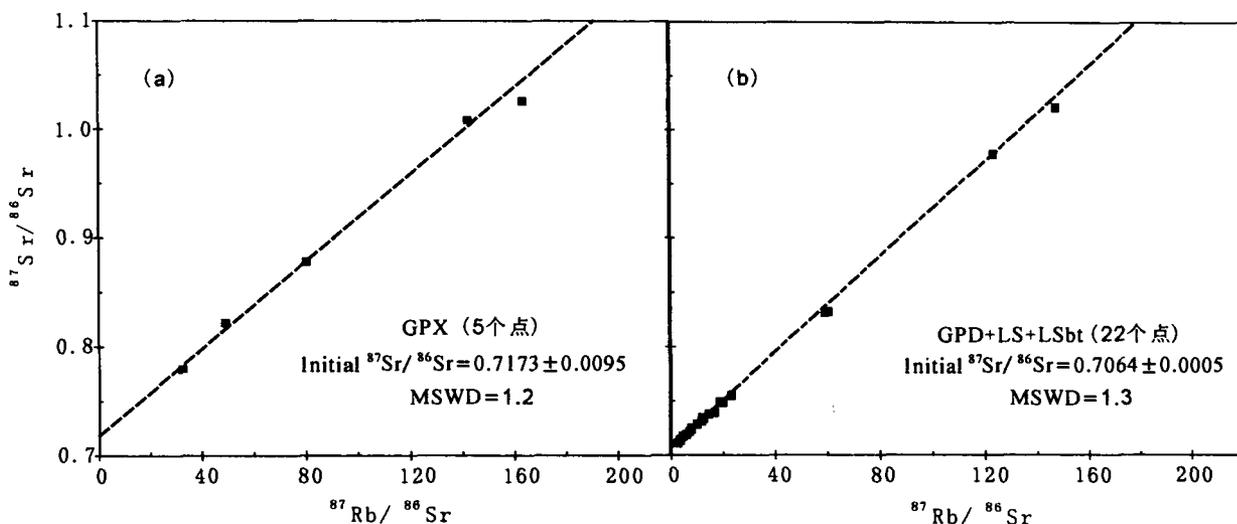


图 3 姑婆山花岗岩全岩 Rb-Sr 等时线

Fig. 3 Diagram of Rb-Sr isochron of whole-rock of the Guposhan granites

表 4 姑婆山花岗岩 Sm-Nd 同位素测定结果及 Nd, Sr 同位素参数

Table 4 Sm-Nd isotopic compositions and parameters of the Guposhan granites

岩体	样号	Sm( $\times 10^{-6}$ )	Nd( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	( $2\sigma$ )	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ma})$
GPX	LH-1	10.58	34.91	0.1835	0.512354	12	-5.30	274.49	1473
	LS-15	8.767	29.90	0.1775	0.512338	13	-5.51	150.15	1490
	GP-8	9.986	29.43	0.2054	0.512434	11	-4.13	256.63	1381
	GP-16	16.09	57.90	0.1682	0.512345	11	-5.20	181.61	1465
GPD+	GP-1	10.74	57.57	0.1129	0.512373	12	-3.57	-10.32	1344
	LS-4	7.191	37.71	0.1154	0.512374	12	-3.50	22.33	1346
LS	LS-6	6.431	34.30	0.1135	0.512432	10	-2.33	22.25	1254
	LS-11	9.474	46.96	0.1221	0.512411	12	-2.91	49.17	1300

由此可见,后三者即 GPD、LS 和 LSbt 的锶初值相近,将这三者的共 22 个 Rb-Sr 同位素数据进行回归处理,得到一条相关性很好的直线, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> = 0.7064 ± 0.0005, MSWD = 1.3 (图 3b)。这可能说明,姑婆山西岩体中的粗粒花岗岩、姑婆山东岩体、里松岩体及其包体都是同源的,其源区以幔源物质为主。而姑婆山西岩体中的细粒花岗岩 (GPX) 具有较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值,源区可能混染了更多的壳源物质。

前人尚未对姑婆山花岗岩进行过 Sm-Nd 同位素研究。本文对姑婆山东、西岩体和里松岩体 8 个样品进行 Sm-Nd 同位素分析,其结果及计算的参数和两阶段模式年龄  $T_{2\text{DM}}$  列于表 4。从这些数据中可以看出:GPD 和 LS 的  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  (0.1129~0.1221) 很相似,而与 GPX (0.1775~0.2054) 差别明显;计算的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值, GPD 和 LS 也十分相似 (-2.33~-3.57), 而与 GPX (-4.13~-5.51) 区别明显。这些差异和上述锶同位素组成的差别是一致的,从而佐证了 GPD、LS 和 LSbt 的岩浆是同源的,幔源物质成分较多;而 GPX 具有与它们不同的物质来源。

### 3.3 讨论

花岗岩类的 Nd-Sr 相关特性是当前研究其物质来源最有效的手段之一。由图 4 可以看出 GPD 和 LS 具有较低的  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  值 (-10.32~49.17) 和较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-2.33~-3.57), 它们的源区物质应该有较多的幔源组分;而 GPX 虽然具有很高的  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  值 (150.15~274.49) 和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (-4.13~-5.51), 但考虑到其岩石类型表现为高演化特点,具强烈的 Eu 亏损, Rb/Sr 值高,笔者认为该岩体在形成之前发生了壳-幔混合作用,使放射成因锶有一个相对积累的过程,它的源区可能是由一个相对古老地壳组分和年轻地幔组分组成的混合源区。姑婆山各岩体的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化不大,而  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  变化相对明显,因而在图 4 中,投影点几乎呈水平方向排列,这

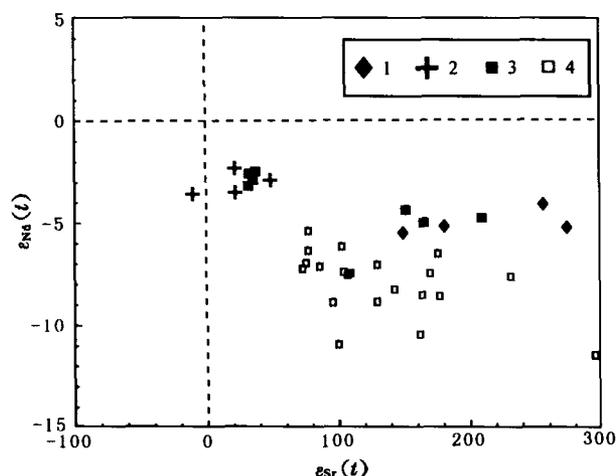


图 4 姑婆山花岗岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  图解

(花山花岗岩数据引自朱金初等, 1989; 南岭花岗岩数据引自毛景文等, 1995; 范春方等, 2000; 范洪海等, 2001; 陈小明等, 2002; 包志伟等, 2003; 张敏等, 2003)

Fig. 4 Diagram of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  of the Guposhan granites (data of the Huashan granite after Zhu Jinchu et al., 1989; data of Nanling granite from Mao Jingwen et al., 1995; Fan Chunfang et al., 2000; Fan Honghai et al., 2001; Chen Xiaoming et al., 2002; Bao Zhiwei et al., 2003; Zhang Min et al., 2003)

1—姑婆山西岩体; 2—姑婆山东岩体和里松岩体;  
3—花山花岗岩; 4—南岭花岗岩

1—Rock body in the west of Guposhan; 2—Guposhan and Lisong rock boies; 3—Huashan granite; 4—Nanling granite

和地幔与上部年轻地壳组分之间的混合关系 (Allegre et al., 1980) 十分相似。

钆同位素研究表明,中国东南基底岩石的钆同位素模式年龄较大,其中华夏地块的大部分地区基底岩石的模式年龄在 1.8~2.2 Ga 之间(陈江峰等, 1999), 姑婆山花岗岩两阶段模式年龄  $T_{2\text{DM}}$  (1254~1490Ma) 明显低于中国东南中生代花岗岩基底岩

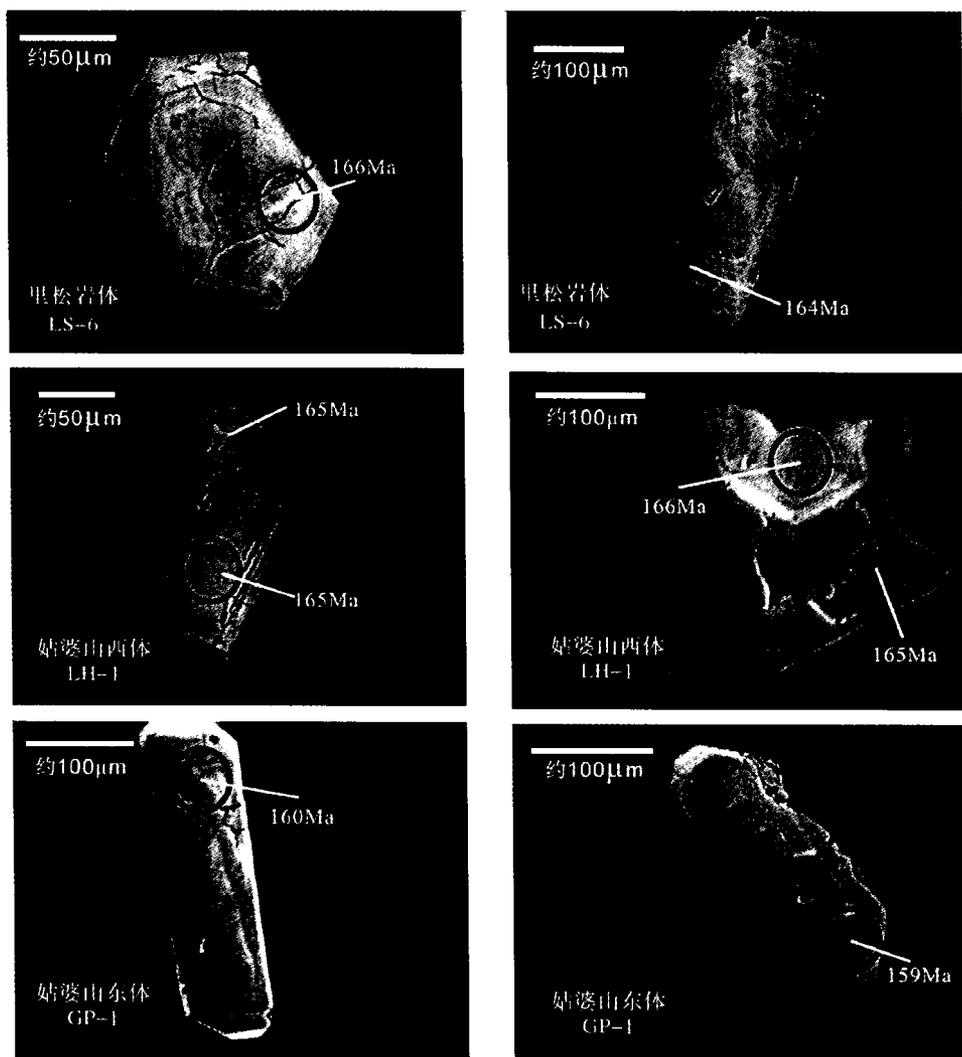


图 5 姑婆山花岗岩锆石背散射电子(BSE)图像

Fig. 5 BSE images of zircons from the Guposhan granites

石的模式年龄。因此,姑婆山花岗岩在形成过程中可能有源自深部的具有高 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值的幔源物质的加入,才导致计算的模式年龄降低(Mc Culloch et al., 1978)。

姑婆山花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-2.3~-5.5)普遍高于南岭地区花岗岩(毛景文等, 1995; 范春方等, 2000; 范洪海等, 2001; 陈小明等, 2002; 包志伟等, 2003; 张敏等, 2003; 邱检生等, 2005), 而与花山花岗岩类似(朱金初等, 1989)。事实上花山—姑婆山岩体位于一条由Gilder等(1996)识别出的高 $\epsilon_{\text{Nd}}$ 、低 $T_{\text{DM}}$ 的近北东向的杭州—诸广山—花山花岗岩带上(HZH), 该带被认为是华夏陆块与扬子陆块之间的碰撞对接带(洪大卫等, 2002), 构造相对薄弱, 是岩石圈地幔上涌和岩石圈伸展—减薄的有利地区。

## 4 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

### 4.1 锆石特征

本次工作分别测试了姑婆山西岩体细粒花岗岩、姑婆山东岩体及里松岩体(不含包体)的锆石样品。其中姑婆山西岩体细粒花岗岩(样品 LH-1)的锆石呈无色透明, 少数略带浅黄色, 金刚光泽, 个别锆石晶体表面有熔蚀; 姑婆山东岩体(样品 GP-1)的锆石呈无色透明, 少数略带浅黄色, 金刚光泽, 个别锆石晶体表面有小凹坑, 晶体内含有矿物包体, 并在其中发现一磨圆锆石, 其色泽与本样品的其他锆石相似; 里松岩体(样品 LS-6)的锆石呈浅黄色、褐色、灰白色, 透明—半透明, 金刚光泽, 晶体表面有小凹坑, 晶体内含有矿物包体。三组锆石均呈短柱状(少数为

表 5 姑婆山花岗岩锆石 U-Pb 分析结果  
Table 5 Zircon U-Pb analytical results of the Guposhan granites

序 号	<sup>204</sup> Pb	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	
	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)			比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	(Ma)	1σ	(Ma)	1σ	(Ma)	1σ
姑婆山西岩体(LH-1)																			
1	3.5	1676	5796	0.29	169	0.04940	0.0120	0.02630	0.00030	0.17930	0.00430	0.00910	0.0002	168	2.0	168	3.7	183	3.3
2	1.4	184	432	0.43	31	0.04940	0.00270	0.02580	0.00040	0.17540	0.00950	0.00710	0.0003	164	2.7	164	8.2	143	5.4
3	1.7	123	287	0.43	16	0.05090	0.00430	0.02590	0.00060	0.18160	0.01510	0.00800	0.0004	165	3.6	170	13	162	8.7
4	4.4	293	651	0.45	15	0.04920	0.00410	0.02620	0.00060	0.17730	0.01430	0.00950	0.0004	166	3.5	166	12	191	8.7
5	2.2	86	194	0.44	9.4	0.04930	0.00510	0.02570	0.00060	0.17470	0.01750	0.00720	0.0005	164	4.0	164	15	145	9.4
6	5.9	1014	1808	0.56	33	0.04940	0.00210	0.02590	0.00040	0.17580	0.00730	0.00900	0.0003	165	2.4	165	6.3	181	5.0
7	3.1	148	674	0.22	23	0.06380	0.00410	0.02600	0.00050	0.22820	0.01420	0.01410	0.0007	165	3.2	209	12	283	13
8	1.4	416	1004	0.41	71	0.07820	0.00510	0.02590	0.00060	0.27920	0.01780	0.01360	0.0005	165	3.5	250	14	273	10
9	2.2	245	1085	0.23	50	0.04930	0.00340	0.02540	0.00050	0.17290	0.01160	0.00850	0.0006	162	3.0	162	10	170	13
10	2.5	103	193	0.54	8.4	0.04920	0.00510	0.02630	0.00070	0.17810	0.01820	0.00830	0.0005	167	4.2	166	16	167	9.4
11	1.7	139	361	0.39	21	0.04930	0.00350	0.02550	0.00050	0.17330	0.01210	0.00770	0.0004	162	3.1	162	11	154	7.0
姑婆山东岩体(GP-1), (12为残留锆石)																			
1	2.3	818	1595	0.51	76	0.04940	0.00190	0.02580	0.00040	0.17570	0.00670	0.00740	0.0002	164	2.3	164	5.8	150	3.3
2	4.8	1479	7196	0.21	167	0.04980	0.00170	0.02480	0.00030	0.17010	0.00570	0.00820	0.0002	158	2.1	160	4.9	165	4.2
3	1.7	257	604	0.43	36	0.04940	0.00340	0.02520	0.00050	0.17150	0.01160	0.00790	0.0003	160	3.0	161	10	160	6.3
4	2.3	339	645	0.53	27	0.04920	0.00370	0.02490	0.00050	0.16880	0.01260	0.00770	0.0003	159	3.2	158	11	156	6.1
5	1.7	268	548	0.49	31	0.04930	0.00340	0.02540	0.00050	0.17230	0.01180	0.00760	0.0003	162	3.0	161	10	153	6.6
6	2.7	431	2233	0.19	85	0.05730	0.00160	0.02530	0.00030	0.19950	0.00560	0.01050	0.0002	161	2.1	185	4.7	210	4.8
7	2.0	562	1638	0.34	84	0.05300	0.00170	0.02510	0.00030	0.18310	0.00580	0.00830	0.0002	160	2.1	171	5.0	168	3.6
8	1.6	271	471	0.58	29	0.04930	0.00290	0.02570	0.00040	0.17430	0.00990	0.00770	0.0003	163	2.7	163	8.6	155	5.1
9	2.5	1805	9308	0.19	302	0.05080	0.00180	0.02530	0.00040	0.17740	0.00630	0.00780	0.0002	161	2.2	166	5.4	158	4.6
10	2.8	234	468	0.50	17	0.06810	0.00330	0.02600	0.00040	0.24450	0.01160	0.00950	0.0003	166	2.7	222	9.5	191	5.3
11	2.9	256	513	0.50	17	0.05210	0.00510	0.02530	0.00060	0.18180	0.01730	0.00840	0.0004	161	3.9	170	15	169	8.2
12	3.0	48	447	0.11	83	0.07350	0.00180	0.02530	0.00171	0.35080	0.03370	0.03890	0.0013	806	9.9	868	15	770	25
里松岩体(LS-6)																			
1	2.0	334	2152	0.16	108	0.04930	0.00250	0.02570	0.00040	0.17500	0.00850	0.00780	0.0004	164	2.6	164	7.3	158	7.5
2	2.0	574	2938	0.20	154	0.04830	0.00170	0.02600	0.00040	0.17310	0.00610	0.00830	0.0002	166	2.3	162	5.3	167	4.8
3	2.7	740	3448	0.22	129	0.04930	0.00140	0.02550	0.00030	0.17350	0.00490	0.00810	0.0002	163	2.1	163	4.2	162	3.8
4	7.7	564	2775	0.20	37	0.06230	0.00130	0.02590	0.00030	0.22220	0.00460	0.01270	0.0002	165	2.0	204	3.9	255	4.1
5	11.1	237	1523	0.16	15	0.07120	0.00240	0.02580	0.00040	0.25260	0.00820	0.02130	0.0006	164	2.3	229	6.6	425	11
6	2.9	664	2475	0.27	84	0.04980	0.00180	0.02530	0.00040	0.17370	0.00610	0.00810	0.0002	161	2.2	163	5.2	163	4.2
7	2.6	542	2034	0.27	78	0.04950	0.00180	0.02570	0.00040	0.17510	0.00620	0.00780	0.0002	163	2.2	164	5.4	157	4.3
8	2.2	623	2897	0.22	132	0.04930	0.00190	0.02540	0.00040	0.17220	0.00640	0.00870	0.0003	162	2.2	161	5.5	175	5.6
9	2.8	571	2935	0.20	106	0.04940	0.00140	0.02570	0.00030	0.17500	0.00480	0.00820	0.0002	164	2.1	164	4.1	166	3.8
10	2.5	630	2279	0.28	93	0.04930	0.00140	0.02580	0.00030	0.17490	0.00480	0.00800	0.0002	164	2.1	164	4.1	162	3.3
11	26.7	395	2442	0.16	10	0.06080	0.00190	0.02550	0.00030	0.21320	0.00650	0.01430	0.0003	162	2.1	196	5.5	288	6.5
12	2.9	639	3877	0.17	136	0.04990	0.00120	0.02580	0.00030	0.17740	0.00420	0.00800	0.0002	164	2.0	166	3.6	161	3.4
13	2.6	280	1651	0.17	64	0.04930	0.00170	0.02520	0.00030	0.17100	0.00570	0.00790	0.0002	160	2.1	160	4.9	159	4.8

长柱状),自形晶,具典型的岩浆韵律环带,属岩浆结晶产物(图5)。

4.2 分析方法

锆石样品靶的制备与 SHRIMP 定年锆石样品制备方法基本相同(宋彪等,2002),锆石背散射电子(BSE)图像在南京大学成矿作用研究国家重点实验室的电子探针上完成。锆石 U-Pb 年龄测定在西北大学地质学系大陆动力学教育部重点实验室进行,所用的质谱仪为 Perkin Elmer/SCIEX 公司带有动

反应池(Dynamic reaction cell,缩写为 DRC)的四级杆 ICP-MS Elan6100DRC,该仪器可在标准模式和 DRC 模式下运行,本研究在标准模式下进行。激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。该系统由德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102ArF 准分子激光器(波长 193 nm)与 Detlef Gunther 教授为 MicroLas 公司设计的光学系统组成。

实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气。用美国

国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行一起最佳化,使仪器达到最高的灵敏度,最小的氧化物产率、最低的背景值和稳定的信号,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式(peak jumping)。

锆石 U-Pb 年龄测定采用国际标准锆石 91500 作为外标校正方法(Wiedenbeck et al., 1995),每隔 4、5 个样品分析点测一次标准,保证标准和样品的仪器条件完全一致。在 20 次锆石分析前后各测 2 次 NIST SRM610,以  $^{29}\text{Si}$  (锆石中  $\text{SiO}_2$  的含量为 32.8%) 作为内标,测定锆石中 U、Th 和 Pb 的含量。样品的同位素比值采用 GLITTER (ver4.0, Macquarie University) 程序,年龄计算及协和图的绘制采用 Isoplot (ver2.49) (Ludwig, 1991) 完成。

#### 4.3 锆石 U-Pb 同位素年龄

由于锆石较小,本次实验利用  $30\ \mu\text{m}$  的激光剥蚀斑径对样品锆石进行 LA-ICPMS 定年,其分析数据见表 5。由于所研究岩体形成于显生宙,故采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  计算岩体的侵位年龄。锆石样品除 LH-1 的 7、8 号点、GP-1 的 6、10 号点及 LS-6 的 4、5、11 号点因  $^{207}\text{Pb}$  难以测准及微量普通铅的存在而稍偏离谐和线,分布在其右侧外,其余均落在谐和一致线上。三组样品锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为:姑婆山西岩体(LH-1)  $165.0 \pm 1.9\ \text{Ma}$ ,  $\text{MSWD}=0.45$ ; 姑婆山东岩体(GP-1)  $160.8 \pm 1.6\ \text{Ma}$ ,  $\text{MSWD}=0.92$ ; 里松岩体(LS-6)  $163.0 \pm 1.3\ \text{Ma}$ ,  $\text{MSWD}=0.53$  (图 6),说明这些年龄正确可靠。

#### 4.4 锆石 U-Pb 同位素年龄与 Rb-Sr 等时线年龄差别的解释

姑婆山各单元锆石 U-Pb 同位素年龄与本文获得的 Rb-Sr 等时线年龄有一定差别。

其中 GPD 的 Rb-Sr 等时线年龄比单颗粒锆石 U-Pb 年龄年轻约 11 Ma,这可能与体系的封闭温度不同有关(陈培荣等,2004)。近年来的研究表明,锆石 U-Pb 系统的封闭温度超过  $850\ ^\circ\text{C}$  (Nam et al., 2001),而全岩—矿物 Rb-Sr 系统的封闭温度一般为  $600\ ^\circ\text{C}$  (沈渭洲等,2000),该年龄差反映 GPD 经历了相当长的成岩过程。

而 GPX 的 Rb-Sr 等时线年龄比单颗粒锆石 U-Pb 年龄年轻约 24 Ma。考虑到 GPX 具有低的  $T_{2\text{DM}}$  和高的  $I_{\text{sr}}$  值,且 Rb/Sr 值高,沈渭洲等(2000)提出这类花岗岩的壳-幔混合作用应发生在花岗岩形成之前,使放射成因铀有一个相对积累的过程,从而使得 GPX 的 Rb-Sr 等时线年龄偏低。

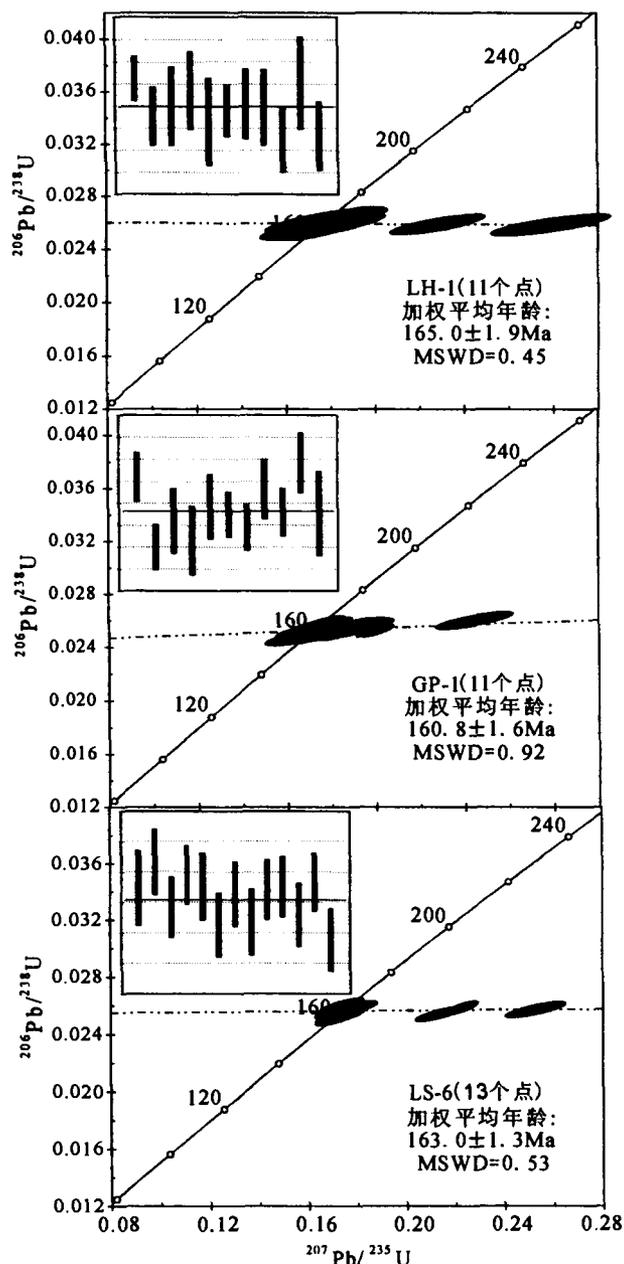


图 6 姑婆山花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Guposhan granites

## 5 结论

通过本文研究可以得到以下主要结论:

(1) 前人的测年结果显示姑婆山花岗岩体中的里松岩体形成较早( $164\sim 160\ \text{Ma}$ ),而姑婆山东、西体形成稍晚( $150\sim 146\ \text{Ma}$ ) (张德全等,1985;杨学明等,1990;张佩华,2003)。然而,本次锆石 U-Pb 定年结果证实:组成姑婆山花岗岩的东、西岩体和里松

岩体的年龄在误差范围内基本一致(165.0~160.8 Ma),结合张德全等(1985)的里松包体 Rb-Sr 年龄(164 Ma),不难看出整个姑婆山—里松岩体是同一时代的产物。华仁民等(2005a,2005b)最近将华南地区的燕山期划分为早、中、晚三期,指出燕山中期第一阶段的 170~150 Ma、尤其 160 Ma 左右是华南陆壳重熔型花岗岩最广泛发育和侵位的时期。姑婆山花岗岩正是该阶段大规模花岗岩浆活动的产物。

(2) 姑婆山花岗岩中的各个岩体虽然形成于同一时代,但它们在岩石学、地球化学特征方面有一定的差异。姑婆山岩体的主微量元素、稀土元素特征以及包体的岩浆混合特征(张佩华,2003)表明,姑婆山西岩体的粗粒花岗岩、东岩体、里松岩体及其包体应具有相同的源区,其  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7064$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  平均值为  $-3.03$ ,反映源区物质有较多地幔物质组分;而姑婆山西岩体的细粒花岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7173$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  平均值为  $-5.00$ ,表明它与姑婆山其他岩体不同,具有高度演化的岩石类型特征。但是本次研究的年龄显示姑婆山各岩体之间并不存在明显的演化过程,因此笔者认为这可能表明它的源区是由一个相对古老地壳组分和年轻地幔组分组成的混合源区。

(3) 此外,姑婆山东岩体(GP-1)发现的继承锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 806.4 Ma,与杭州—诸广山—花山花岗岩带(HZH)上的赣北九岭堇青石花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 818 Ma)(地质部南岭项目花岗岩专题组,1989)、广东信宜罗罐组片理化英安斑岩(锆石 U-Pb 年龄 910 Ma)(张仁杰等,1991)、信宜旺沙垌尾变英安斑岩(锆石 U-Pb 年龄 922~940 Ma)(南颐,1994)、广西英桥混合花岗岩(锆石 U-Pb 年龄 834 Ma)(简平,1989)等的年龄相似,为 HZH 带在新元古代有过强烈的岩浆活动提供了锆石年代学方面的依据。

**致谢:** 本项研究得到国家自然科学基金和国家重点基础研究发展规划项目的资助。在野外调查期间得到平桂矿务局和核工业 290 所许多同志的支持和帮助;在成文过程中得到朱金初教授和周金城教授的指导,在此深表感谢。

### 参 考 文 献

包志伟,赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. 地质地球化学, 31(1): 52~61.  
陈春,宋林康,刘力文. 1992. 姑婆山花岗岩主岩体的稀土元素赋存状态研究. 矿物岩石, 12(1): 38~45.  
陈江峰,郭新生,汤加富,等. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素

模式年龄. 南京大学学报(自然科学), 35(6): 649~658.  
陈毓川,毛景文,等. 1995. 桂北地区矿床成矿系列和成矿历史演化轨迹. 南宁: 广西科学技术出版社, 1~433.  
陈培荣,华仁民,章邦桐,等. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. 中国科学(D 辑), 32(4): 279~289.  
陈培荣,周新民,张文兰,等. 2004. 南岭东段燕山早期正长岩—花岗岩杂岩的成因和意义. 中国科学(D 辑), 36(6): 493~503.  
陈小明,王汝成,刘昌实,等. 2002. 广东从化佛冈主体黑云母花岗岩定年和成因. 高校地质学报, 8(3): 293~307.  
邓庆平. 1985. 白面山锡石硫化物矿床成因机理初探. 桂林冶金地质学院学报, 3: 239~250.  
地质矿产部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 北京: 地质出版社, 1~471.  
范春方,陈培荣. 2000. 赣南陂头花岗岩体 Nd-Sr 同位素特征及其意义. 地质找矿论丛, 15(3): 282~287.  
范洪海,凌洪飞,王德滋,等. 2001. 江西相山铀矿田成矿物质来源的 Nd、Sr、Pb 同位素证据. 高校地质学报, 7(2): 139~145.  
冯佐海,梁金城,等. 2002. 论广西东部中生代花岗岩类岩石谱系单位. 桂林工学院学报, 2(3): 333~340.  
侯增谦,卢记仁,林盛中,等. 2005. 峨眉地幔柱轴部的榴辉岩—地幔岩源区主元素、微量元素及 Sr、Nd、Pb 同位素证据. 地质学报, 79(2): 200~219.  
洪大卫,谢锡林,张季生. 2002. 试析杭州—诸广山—花山高  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值花岗岩带的地质意义. 地质通报, 21(6): 348~354.  
华仁民,陈培荣,张文兰,等. 2003. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统. 中国科学(D 辑), 33(4): 335~343.  
华仁民,陈培荣,张文兰,等. 2005a. 论华南地区中生代次大规模成矿作用. 矿床地质, 24(2): 99~107.  
华仁民,陈培荣,张文兰,等. 2005b. 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. 高校地质学报, 11(3): 292~303.  
黄汲清,等. 1981. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社, 29~53.  
黄首,吴利仁. 1990. 陕西地区岩浆岩 Nd, Sr 同位素特征及其与大地构造发展的联系. 岩石学报, 6(2): 1~11.  
简平. 1989. 华南云开隆起西南端混合岩、花岗岩同位素地质年代学. 见: 第四届全国同位素地质年代学、同位素地球化学学术讨论会论文摘要汇编. 56~60.  
李献华,赵振华,桂训唐,等. 1991. 华南前寒武纪地壳形成时代的 Sm-Nd 和锆石 U-Pb 同位素制约. 地球化学, (3): 255~264.  
刘海臣,朱炳泉,张展霞. 1998. LA-ICPMS 法用于单颗粒锆石定年研究. 科学通报, 43(10): 1103~1106.  
毛景文,李红艳. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究. 矿床地质, 14(3): 235~242.  
南颐. 1994. 粤西云开群的划分及其地质年代. 广东地质, 9(4): 1~11.  
邱检生,胡建,王孝磊,等. 2005. 广东河源白石冈岩体一个高分异的 I 型花岗岩. 地质学报, 79(4): 504~514.  
沈渭洲,凌洪飞,李武显,等. 2000. 中国东南部花岗岩类的 Nd 模式年龄与地壳演化. 中国科学(D 辑), 30(5): 471~478.  
宋彪,张玉海,万渝生,等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增刊): 26~30.  
杨学明,张培善. 1990. Rb-Sr 和 Pb 同位素在限定花岗岩质岩石源岩中的地质意义. 科学通报, 15: 1174~1176.  
张德全,王雪英,孙桂英. 1985. 关于广西姑婆山—里松岩体的定(侵)位年龄和冷凝历史的探讨. 地质论评, 31(3): 232~239.  
张敏,陈培荣,张文兰,等. 2003. 南岭中段大东山花岗岩体的地球

- 化学特征和成因. 地球化学, 32(6): 529~539.
- 张仁杰, 马国干, 蒋大海, 等. 1991. 海南岛前寒武纪地质. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 张佩华. 2003. 南岭中段中生代花岗岩壳幔相互作用的初步研究. 南京大学博士后出站报告. 1~63.
- 朱金初, 李向东, 沈渭洲. 1989. 广西花山复式花岗岩体成因的铷、铷和氧同位素研究. 地质学报, 63(3): 225~235.
- Allegre G J, Othman D B. 1980. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development; a chemical approach to orogenesis. *Nature*, 286: 335~341.
- Belousova E A, Griffin W L, Shee S R, et al. 2001. Two age populations of zircons from the Timber Creek kimberlites, Northern Territory, as determined by laser-ablation ICP-MS analysis. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 757~765.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *Journal Geophys. Res.*, 101(B7): 16137~16154.
- Liew T C, Hofmann A W. 1988. Precambrian crustal components, plutonic assimilations, plate environment of the Hercynian Fold belt of central Europe; Indications from a Nd and Sr isotopic study. *Mineral Petrol.*, 98: 129~138.
- Ludwig K R. 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. US Geological Survey Open-File Report, 39.
- Machado N, Gauthier G. 1996. Determination of  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages on zircon and monazite by laser-ablation ICPMS and application to a study of sedimentary provenance and metamorphism in southeastern Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 5063~5073.
- Mc Culloch M T, Wasserburg G J. 1978. Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 200: 1003~1011.
- Mculloch M T, Chappell B W. 1982. Nd isotopic characteristics of S- and I-type granites. *Earth Planet. Sci. Letters*, 58: 51~64.
- Nam T N, Sano Y, Terada K, et al. 2001. First SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites from the Kontum massif (Vietnam) and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19: 77~84.
- Norman M D, Pearson N J, Sharma A, et al. 1996. Quantitative analysis of trace elements in geological materials by laser ablation ICPMS; Instrumental operating conditions and calibration values of NIST glasses. *Geostandards Newsletter*, 20: 247~261.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S, ed. *Andesites*. Chichester: Wiley, 525~548.
- 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*. Nantwich: Shiva, 230~249.
- Taylor S R, McLemann S M. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Blackwell, Oxford Press, 312.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand News*, 19: 1~23.

## Study on Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Sr-Nd Isotope of the Guposhan Granite in Guangxi

GU Shengyan<sup>1)</sup>, HUA Renmin<sup>1)</sup>, QI Huawen<sup>1,2)</sup>

1) State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093; 2) Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002

### Abstract

Zircon U-Pb dating with the LA-ICP-MS method was applied to determining the ages of different units of the Guposhan granite, among which the east Guposhan unit is  $160.8 \pm 1.6$  Ma, the west Guposhan unit is  $165.0 \pm 1.9$  Ma, and the Lisong unit is  $163.0 \pm 1.3$  Ma in age. It is worth noticing that the ages of the three units are very similar to each other within the analytical error. It thus proves that the whole Guposhan granite was formed in the same age. They are products of large-scale magmatism of crust-remelting granitoids in the first stage of the middle Yanshanian Period in South China. Though forming in the same age, the three units have differences in petrological and geochemical characteristics. Besides the differences in major, trace and rare earth elements, they are distinct in their Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions. The east unit, Lisong unit and its enclaves have a similar  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  value of 0.70643 and average  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  ( $-3.03$ ), indicating that more mantle materials participated in the magma derivation; whereas the west unit has higher  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  (0.7173), lower  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  ( $-5.00$ ), and is characterized by strong negative Eu anomalies and a higher Rb/Sr ratio, which may suggest that its source was composed of relatively old crust components and new mantle-derived components. In addition, an inherited zircon grain in the east Guposhan unit (GP-1) yielded a  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of 806.4 Ma, which is similar to those of the Jiulin cordierite granite in northern Jiangxi and the Yinqiao migmatitic granite in Guangxi in the HZH granite zone. The discovery thus provides new evidence for late-Proterozoic magmatism in the HZH granite zone.

**Key words:** Guposhan granite; zircon U-Pb dating; Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions