

# 闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年 及其地球化学特征

赵希林<sup>1,2</sup>, 毛建仁<sup>1</sup>, 陈 荣<sup>1</sup>, 许乃政<sup>1</sup>, 曾庆涛<sup>1,3</sup>, 叶海敏<sup>1</sup>

(1. 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016; 2. 中国地质科学院 研究生院, 北京 100037;

3. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

**摘 要** 锆石 SHRIMP 年龄测试结果表明, 闽西南地区才溪岩体的形成年龄为  $150 \pm 3$  Ma。才溪二长花岗岩富硅、富碱, 弱过铝。岩石富集 LREE, 具 Eu 负异常, \*Eu 值为  $0.54 \sim 0.66$ , 亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Eu、Ti。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值较高, 为  $0.710462 \sim 0.712265$ ,  $\epsilon\text{Nd}(t)$  为  $-8.68 \sim -9.81$ ,  $t_{2\text{DM}}$  为  $1.51 \sim 1.61$  Ga。岩石中黑云母富铝、镁, 在  $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+} - \text{Mg}^{2+}$  三角图上落入壳幔混源区。根据岩体地质学、地球化学特征, 结合岩石学和矿物学特征认为, 才溪二长花岗岩是由中元古代地壳物质熔融形成的壳源型花岗岩, 在岩浆形成过程中有少量幔源物质的加入, 形成于由挤压向伸展过渡的构造环境。

**关键词** 才溪岩体; 锆石 SHRIMP 年龄; 地球化学特征; 构造环境; 闽西南

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1; P597.3; P591<sup>+</sup>.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6524(2007)03-0223-09

## Zircon SHRIMP age and geochemical characteristics of the Caixi pluton in southwestern Fujian Province

ZHAO Xi-lin<sup>1,2</sup>, MAO Jian-ren<sup>1</sup>, CHEN Rong<sup>1</sup>, XU Nai-zheng<sup>1</sup>, ZENG Qing-tao<sup>1,3</sup> and YE Hai-min<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Earth Science College, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** Zircon SHRIMP results indicate that the Caixi pluton in southwest Fujian was formed at  $150 \pm 3$  Ma. Caixi monzonitic granite is characterized by rich Si and alkali, weakly peraluminous nature, negative Eu (\*Eu  $\approx 0.54 \sim 0.66$ ) anomalies, enrichment of LREE, and depletion of Ba, Nb, Ta, Sr, P, Eu, Ti. They are characterized by Sr-Nd isotopic composition with  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  being  $0.710462 \sim 0.712265$ ,  $\epsilon\text{Nd}(t) -8.68 \sim -9.81$  and  $t_{2\text{DM}} 1.51 \sim 1.61$  Ga. The biotite of rocks is characterized by rich Al, Mg, and belongs to the type of crust-mantle mixed sources based on the triangle diagram of  $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+} - \text{Mg}^{2+}$ . According to geochemical characteristics and petrological, mineralogical as well as geological data, it can be concluded that Caixi pluton belongs to the crust-source type granite formed by partial melting of the crust-derived rocks correlative to Proterozoic crust in the transformation from convergent to divergent tectonics. There were some materials mixed with the mantle materials in the process of rock formation.

**Key words:** Caixi pluton; zircon SHRIMP age; geochemical characteristics; tectonic environment; southwestern Fujian Province

收稿日期: 2006-08-25; 修订日期: 2007-01-16

基金项目: 中国地质调查局基础地质调查项目(1212010611805, 300313000070)

作者简介: 赵希林(1980-), 男, 汉, 在读硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: zxl24@126.com 或 zxljgm@sina.com.cn.

中国东南部是东亚大陆边缘的重要组成部分,是太平洋板块、欧亚大陆板块相互作用的地段,长期以来,该区以其特有的岩石圈结构、沉积基底和火山基底、复杂的地壳构造而受到中外地质学家的关注。中国东南部中生代发生了大规模多期次的岩浆活动,近年来,研究的焦点逐渐集中到产生岩浆活动的动力学机制、中国东南部中生代构造转换的时限及对中生代岩浆作用的影响上(Gilder *et al.*, 1991; 谢谔克等, 1996, 1997; 李子颖等, 1998; 毛建仁等, 1999a, 1999b; 谢桂青等, 2001; Zhou and Li, 2000; Li, 2000; 张旗等, 2001; 舒良树等, 2002; 谢昕等, 2005)。闽西南地区位于南岭成矿带东段与东南沿海岩浆岩带的衔接处,是东西向构造与北东向构造的交接部位,区内中生代岩浆活动强烈,成矿地质条件优越,著名的紫金山铜金矿床就位于研究区内,是研究中生代构造转换及岩浆作用的理想基地。区内的才溪岩体与紫金山铜金矿床在地理位置上十分接近,但是目前还没有对才溪岩体进行过系统研究。因此,本文选择才溪岩体为主要研究对象,在野外观察的基础上,综合利用地质年代学、岩石学、矿物学和地球化学等方法,精确测定其形成时代,研究其成因类型及形成的构造环境。

## 1 岩体地质特征与岩石学特征

才溪岩体位于福建省上杭县才溪乡附近,面积约 90 km<sup>2</sup> (图 1)。才溪岩体呈 NE 向延伸的岩株侵入于震旦系变沉积岩中。岩体内接触带有数十厘米宽的冷凝边,外接触带有数十米宽的黑云母角岩,显示为深成侵入相。已有研究结果表明,区内紫金山岩体有两期,其中早期岩体侵入于燕山早期,主要为黑云母花岗岩,晚期侵入于晚白垩世,主要为花岗闪长岩及闪长斑岩。才溪岩体南部侵入于紫金山黑云母花岗岩中(黑云母花岗岩的年龄为 168 Ma 左右,数据另文发表),同时,岩体在西南部被四方岩体侵入。

才溪岩体主体为似斑状中粗粒二长花岗岩,边部局部地段粒度变细。岩石呈灰白色,似斑状结构,似斑晶为钾长石(粒径 4~6.5 mm,含量约 15%)。基质为中粗粒花岗结构,粒径 2~4.5 mm,由斜长石(28%±)、钾长石(25%±)、石英(25%±)、黑云母

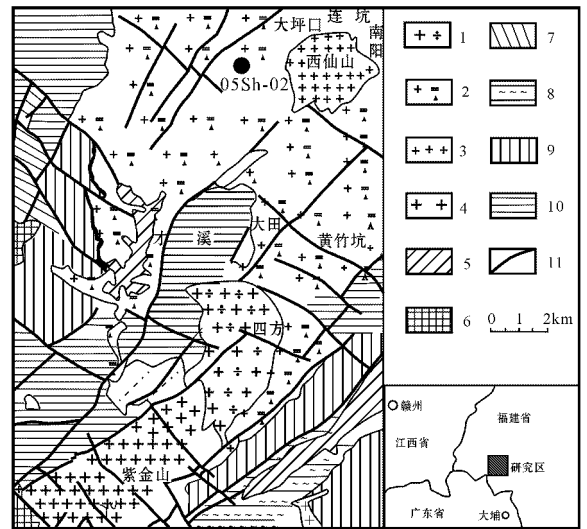


图 1 才溪岩体地质图(据福建省地质矿产局, 1990)<sup>①</sup>

Fig. 1 Geological map of Caixi pluton (from BGMR of Fujian Province, 1990)<sup>①</sup>

1—花岗闪长岩; 2—二长花岗岩; 3—细粒花岗岩; 4—黑云母花岗岩; 5—第四系冲积层; 6—下白垩统石帽山群杂砂岩; 7—下二叠统文宾山组杂砂岩; 8—下石炭统林地组石英砂岩; 9—上泥盆统粉砂岩; 10—震旦系变质岩系; 11—断裂

1—granodiorite; 2—monzogranite; 3—fine-grained granite; 4—biotite granite; 5—Quaternary alluvium; 6—graywacke of Lower Cretaceous Shimaoshan Group; 7—graywacke of Lower Permian Wenbinshan Formation; 8—quartz sandstone of Lower Carboniferous Lindi Formation; 9—Upper Devonian siltstone; 10—Sinian metamorphic rocks; 11—fault

(5%±)及少量角闪石组成,其中钾长石可见卡氏双晶,斜长石的钠长石双晶及正韵律环带发育。副矿物组合为磁铁矿-磷灰石-榍石-锆石型。

## 2 测试方法

### 2.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年方法

张德全等(2001)利用单颗粒锆石获得才溪岩体 133±8 Ma 的年龄。对年轻花岗岩而言,8 Ma 的年龄偏差比较大,因此,本次研究利用更精确的方法对才溪岩体的形成时代进行测定。选择新鲜、均匀无蚀变、无污染的 05Sh-02 号样品为测试对象。锆石的选样工作是在河北省区调所实验室完成的,样品破碎后手工淘洗分离出重砂,经磁选和电磁选后,在双目镜下挑出锆石(多于 1000 粒),然后与 RESE

① 福建省地质矿产局, 1990. 中华人民共和国地质图(才溪幅).

(澳大利亚国立大学地质地球科学研究所)标准锆石 TEM 一起用环氧树脂制靶。锆石 SHRIMP 测试工作在北京离子探针中心完成,测定原理及方法见 Williams(1998),分析时离子束斑直径为 20~30 $\mu\text{m}$ ,数据处理采用 Ludwig 的 SQUID 1.0d 及 Isoplot 2.49h 程序,采用 TEMORA 标样(417 Ma,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.06683$ )进行校正。

### 2.2 地球化学

本次研究工作中地球化学的测试工作是在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用 ELEMENT2 型高分辨电感耦合等离子质谱仪(ICPMS)完成的,共 4 件样品,另外引用前人的 2 件地球化学数据作为补充。

### 2.3 同位素

Sr-Nd 同位素的测试工作是在国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成的,共 5 件。准确称取 50~100 mg 样品于聚四氟乙烯封闭溶样器中,加入适量的( $^{85}\text{Rb} + ^{84}\text{Sr}$ )混合稀释剂和氢氟酸及高氯酸混合酸分解样品,Rb、Sr 和其他杂质的分离采用 AG50 $\times$ 8 阳离子交换技术,Rb、Sr 含量采用同位素稀释质谱法测定, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素比值由质谱直接测定,同位素分析在 MAT-261 可调多接收质谱计上完成。在整个同位素分析过程中,用 NBS987 和 NBS607 标准物质对分析流程和仪器进行了监控。NBS987 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素组成测定值为  $0.710233 \pm 54(2\sigma)$ ,相对于证书值  $0.71034 \pm 26(2\sigma)$  的相对偏差小于 0.015%;NBS 长石标准物质与样品平行测定多次的平均值 Rb 为  $524.30 \times 10^{-6}$ ,Sr 为 65.46

$\times 10^{-6}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  为  $1.20048 \pm 52(2\sigma)$ ,Rb、Sr 含量及同位素比值与证书值在测定误差范围内完全一致。同位素分析样品制备的全过程均在净化实验室内完成,与样品同时测定的全流程 Rb、Sr 空白本底分别为  $5 \times 10^{-10}$  g 和  $2 \times 10^{-10}$  g。

### 2.4 电子探针

电子探针的测试工作是在南京大学成矿作用国家重点实验室完成的,测定使用仪器为 JE-OLJX8800M 型电子探针分析仪,电子束斑直径为  $1\mu\text{m}$ ,加速电压为 15 kV,束电流值为  $10^{-8}$  A。测试对象为片状、半自形、中细粒且新鲜的黑云母。

## 3 测试结果

### 3.1 地质年代学

样品 05Sh-02 中锆石为无色透明,CL 图像显示岩石中大部分锆石晶形发育良好,具有韵律环带,显示岩浆锆石的特征,同时,锆石的 Th/U 比值能反映锆石的岩浆成因或者变质成因。一般认为 Th/U 大于 0.1 的锆石为岩浆期锆石,样品中 14 个测点的 Th/U 均大于 0.1 显示了岩浆期锆石的特征。本次研究选取韵律环带较发育的岩浆期锆石进行测试,测试数据见表 1,单个数据点的误差为  $1\sigma$ 。测试结果表明,14 个测点有谐和的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  表面年龄,数据点全部落入谐和线上或者附近区域(图 2),获得  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $150 \pm 3$  Ma ( $n=14$ ,MSWD=0.76),这一年龄应代表岩体的形成年龄,属于中生代晚侏罗世。

表 1 才溪二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄数据表(05Sh-02)  
Table 1 SHRIMP U-Pb dating of zircons from Caixi pluton(05Sh-02)

点号	U Th		Th/U	$^{206}\text{Pb}/\%$	同位素比值								年龄/Ma		
	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$				$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	
1.1	385	148	0.40	1.34	0.025	4.3	0.155	11	0.046	9.7	157.2	$\pm 7.2$	-7	$\pm 230$	
2.1	566	231	0.42	0.93	0.025	4.2	0.149	10	0.044	9.6	158.0	$\pm 7.0$	-110	$\pm 240$	
3.1	496	225	0.47	0.60	0.023	4.3	0.140	9.7	0.044	8.8	148.0	$\pm 6.8$	-125	$\pm 220$	
4.1	494	244	0.51	0.72	0.023	4.2	0.138	8.1	0.044	6.9	145.6	$\pm 6.6$	-100	$\pm 170$	
5.1	414	180	0.45	0.72	0.025	4.2	0.173	7.2	0.05	5.8	160.3	$\pm 7.2$	204	$\pm 140$	
6.1	435	171	0.41	0	0.024	4.3	0.176	6.2	0.055	4.5	149.5	$\pm 6.8$	391	$\pm 100$	
7.1	426	143	0.35	0.52	0.022	4.3	0.124	11	0.041	9.7	142.4	$\pm 6.4$	-312	$\pm 250$	
8.1	684	309	0.47	0	0.023	4.2	0.162	5.5	0.052	3.6	144.3	$\pm 6.5$	273	$\pm 82$	
9.1	455	162	0.37	0.41	0.024	4.2	0.155	8	0.048	6.8	150.1	$\pm 6.6$	88	$\pm 160$	
10.1	487	215	0.46	0	0.024	4.2	0.173	6.1	0.053	4.5	152.2	$\pm 6.8$	309	$\pm 100$	
11.1	536	269	0.52	0.51	0.023	4.2	0.158	9.2	0.049	8.1	148.1	$\pm 6.8$	138	$\pm 190$	
12.1	501	274	0.57	0	0.024	4.2	0.177	5.5	0.053	3.5	153.3	$\pm 7.0$	339	$\pm 78$	
13.1	364	173	0.49	0.73	0.023	4.4	0.158	8.5	0.050	7.2	145.2	$\pm 7.0$	206	$\pm 170$	
14.1	888	498	0.58	0.94	0.025	4.2	0.153	9.4	0.045	8.5	159.3	$\pm 7.3$	-78	$\pm 210$	

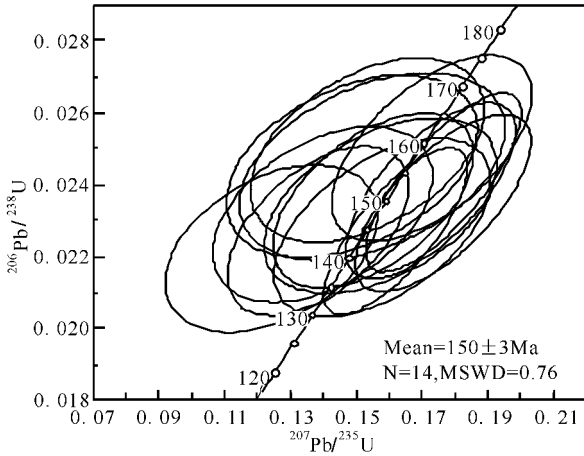


图2 才溪二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄图解

Fig. 2 Concordia diagram of SHRIMP U-Pb dating of zircons from Caixi pluton

3.2 地球化学及同位素

才溪二长花岗岩的主量元素分析结果列于表2。6个才溪二长花岗岩样品总的特点是硅含量高,总碱含量高,Al、K、Ca含量高,Fe、Mg、Ti、P含量低。SiO<sub>2</sub>含量变化范围较小,介于68.18%~71.45%之间,平均为69.43%;DI介于77.7~85.5之间,反映了岩体经历了高程度分异演化作用,富碱,K<sub>2</sub>O含量高,介于4.16%~4.68%之间,平均值为4.40%,里特曼指数为1.970~2.116,平均为2.064,显示了钙碱性系列岩石的特征;在K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>图解中,才溪二长花岗岩投影于高钾钙碱性系列岩石区域(图3);其A/CNK变化范围0.961~1.138,其平均值为1.018,为弱过铝质(图略)。在Harker图解上,SiO<sub>2</sub>与TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、CaO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>呈负

表2 才溪似斑状二长花岗岩的岩石化学分析数据表  
Table 2 Major element compositions of Caixi pluton

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	SUM	A/CNK	σ			
04Sh-01	70.11	0.44	14.77	3.11	0.07	0.79	2.36	2.91	4.54	0.13	0.9	100.10	1.0565	2.047			
05Sh-02	68.56	0.53	14.42	3.81	0.09	1.07	2.86	3.13	4.16	0.17	0.67	99.49	0.9718	2.079			
05Sh-05	68.97	0.50	14.31	3.63	0.10	1.01	2.68	2.95	4.40	0.17	0.84	99.58	0.9886	2.080			
05Sh-06	68.18	0.55	14.15	3.92	0.09	1.16	2.63	2.88	4.42	0.18	1.20	99.36	0.9901	2.116			
Zj801	69.31	0.49	14.03	3.60	0.10	1.01	2.78	3.03	4.17	0.15	1.60	100.02	0.9610	1.970			
YQ039	71.45	0.36	14.02	3.03	0.05	0.74	1.26	3.03	4.68	0.08	1.63	100.14	1.1380	2.089			
	Q	C	Or	Ab	An	Di	DiWo	DiEn	DiFs	Hy	HyEn	HyFs	Mt	Il	Ap	Cl	DI
04sh-01	28.8	1.1	27.1	24.9	11.0	0	0	0	0	5.1	2.0	3.2	0.8	0.8	0.3	6.8	80.8
05Sh-02	25.9	0	25.0	26.9	13.2	0.1	0	0	0	6.6	2.7	3.9	1.0	1.0	0.4	8.6	77.7
05Sh-05	26.9	0.2	26.4	25.4	12.4	0	0	0	0	6.3	2.5	3.8	0.9	1.0	0.4	8.2	78.8
05Sh-06	26.4	0.3	26.7	24.9	12.1	0	0	0	0	7.0	2.9	4.0	1.0	1.1	0.4	9.1	78.1
Zj801	31.4	1.9	28.1	26.0	5.8	0	0	0	0	5.1	1.9	3.3	0.8	0.7	0.2	6.6	85.5
YQ039	27.5	0	25.0	26.1	12.6	0.4	0.2	0.1	0.1	6.2	2.5	3.7	0.9	0.9	0.3	8.4	78.6

Zj801和YQ039引自张德全等(2001)其他为本文测试。

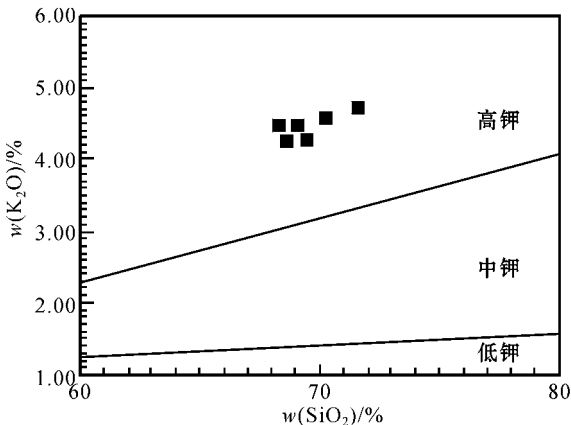


图3 才溪二长花岗岩 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图  
(据 Peccerillo & Taylor, 1976)

Fig. 3 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram for Caixi pluton (from Peccerillo & Taylor, 1976)

相关,而与Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O和Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O无明显的相关关系,表明岩浆结晶过程中有富铝矿物、铁镁矿物、磷灰石、含钛矿物等矿物的结晶。

才溪二长花岗岩稀土元素及微量元素分析结果列于表3。才溪二长花岗岩的∑REE含量中等(161.383 × 10<sup>-6</sup> ~ 222.462 × 10<sup>-6</sup>),平均为192.157 × 10<sup>-6</sup>,其∑LREE/∑HREE为7.225~10.083,轻稀土元素略有富集,LREE内部分异明显(La/Sm)<sub>N</sub>比值平均为4.20。稀土元素配分(图4)显示呈向右倾V字型,Eu中等负异常,\*Eu值为0.54~0.66,表明岩浆在部分熔融或者分离结晶过程中,长石类矿物在固液平衡中起了关键性作用。

才溪二长花岗岩富集大离子亲石元素,特别是Rb(106.735 × 10<sup>-6</sup> ~ 251.761 × 10<sup>-6</sup>)及放射性生热

表 3 才溪二长花岗岩的稀土元素及微量元素数据表

$\omega_B/10^{-6}$

Table 3 REE and trace element compositions of Caixi pluton

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
04Sh-01	30.724	68.098	7.472	28.772	5.636	1.060	5.271	0.863	5.414	1.047	3.128	0.475	2.973
05Sh-02	46.010	83.919	9.538	33.436	6.778	1.128	5.981	0.911	5.349	1.133	3.221	0.554	3.704
05Sh-05	52.182	95.591	10.319	36.140	6.939	1.219	5.93	0.873	5.09	1.043	2.959	0.515	3.190
05Sh-06	41.294	72.678	8.576	30.627	6.254	1.172	5.46	0.837	5.051	1.032	3.082	0.511	3.079
Zj801	47.02	79.15	7.96	32.06	5.80	1.20	5.25	0.55	3.60	0.77	2.06	0.31	2.15
YQ039	41.44	79.97	8.76	38.24	7.37	1.24	5.64	1.48	5.19	1.21	3.02	0.71	3.25
样品号	Lu	$\Sigma$ REE	$\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	*Eu	Ti	K	V	Cr	Co	Ni	Sm	Nd	
04Sh-01	0.450	161.38	7.225	0.59	2 637	37 689	37.023	3.172	8.281	7.800	5.636	28.722	
05Sh-02	0.550	202.21	8.447	0.54	3 177	34 534	57.885	4.977	9.71	3.274	6.778	33.436	
05Sh-05	0.472	222.46	10.083	0.58	2 997	36 527	55.176	4.077	7.884	2.504	6.939	36.140	
05Sh-06	0.469	180.12	8.227	0.61	3 297	36 693	67.636	5.208	9.46	3.504	6.254	30.627	
Zj801	0.30	188.18	11.554	0.66	2 937	34 617	55.400	7.500	6.000	4.200	5.800	32.06	
YQ039	1.06	198.58	8.211	0.59	2 158	38 851	58.000	7.500	6.000	4.000	7.370	38.240	
样品号	Nd	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Pb	Th	Ba	P			
04Sh-01	28.722	106.735	202.195	27.209	205.434	18.500	17.904	15.278	498.317	567			
05Sh-02	33.436	201.115	270.056	30.288	224.651	21.538	27.337	21.343	439.319	742			
05Sh-05	36.140	231.211	271.762	27.152	216.299	19.566	33.310	20.068	582.692	742			
05Sh-06	30.627	181.855	296.049	265.511	211.176	18.306	25.508	18.123	539.535	785			
Zj801	32.06	194	280	20.080	143	20	9.500	13.600	580	655			
YQ039	38.240	189	273	29.29	137	20	50	13	584	349			

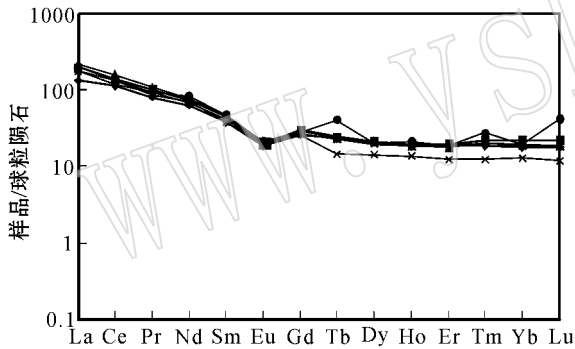


图 4 才溪二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (据 Sun & McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of Caixi pluton (from Sun & McDonough, 1989)

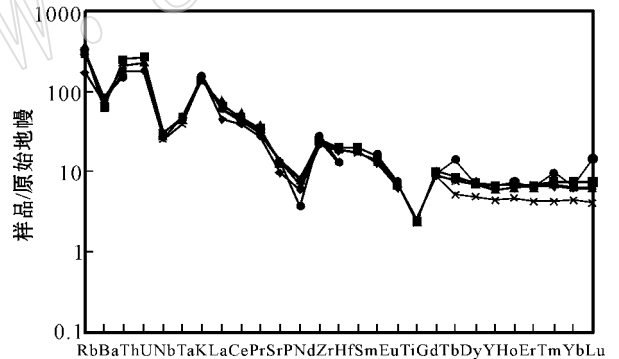


图 5 才溪二长花岗岩微量元素蛛网图 (据 Sun & McDonough, 1989)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spidergrams of Caixi pluton (from Sun & McDonough, 1989)

元素 Th ( $13 \times 10^{-6} \sim 28.617 \times 10^{-6}$ ) 含量较高, 在原始地幔标准化图解中(图 5), 具有明显的 Rb-Th、U、K、La、Sm 正异常, Nb-Ta、Ti-Y 和 Ba 负异常, 曲线总体呈平坦型, 显示类似于活动大陆边缘/岛弧钙碱性系列的特征和演化趋势。

才溪二长花岗岩同位素分析结果列于表 4。结果显示才溪二长花岗岩的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值变化范围较小, 分别介于 1.733 ~ 2.417、0.714 52 ~ 0.715 96、0.111 3 ~ 0.114 8 和 0.512 135 ~ 0.512 193 之间, 以 150 Ma 作为成岩年龄计算的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 为 0.710 462 ~

0.712 265,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-8.68 \sim -9.81$ , 计算的二阶段 Nd 模式年龄  $t_{2\text{DM}}$  为 1.51 ~ 1.61 Ga。

### 3.3 矿物学特征

黑云母的电子探针分析结果如表 5。才溪二长花岗岩中黑云母富铝、镁, 在黑云母分类图上, 才溪二长花岗岩中的黑云母落入高镁黑云母区与高铁黑云母交界区域(图 6)。

## 4 讨论

### 4.1 源区

才溪二长花岗岩的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 为 0.710 462 ~

表4 才溪二长花岗岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素数据表  
Table 4 Rb-Sr, Sm-Nd isotopic compositions of Caixi pluton

样品号	年龄/Ma	$\alpha(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	$\alpha(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	
04Sh-01	150	187.4	295.4	1.831	0.715 81 ± 0.000 04	0.711 906	
05Sh-02	150	191.3	252.1	2.189	0.715 13 ± 0.000 03	0.710 462	
05Sh-05	150	225.3	268.9	2.417	0.715 62 ± 0.000 04	0.710 466	
05Sh-06	150	182.8	277.5	1.900	0.714 52 ± 0.000 03	0.710 469	
05Sh2-01	150	264.0	439.6	1.733	0.715 96 ± 0.000 01	0.712 265	
样品号	年龄/Ma	$\alpha(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	$\alpha(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	$t_{2\text{DM}}$
04Sh-01	150	6.882	36.25	0.114 8	0.512 135 ± 0.000 014	-9.81	1.61
05Sh-02	150	6.128	32.81	0.113	0.512 193 ± 0.000 008	-8.68	1.51
05Sh-05	150	5.897	31.28	0.114 1	0.512 179 ± 0.000 008	-8.95	1.54
05Sh-06	150	6.206	33.73	0.111 3	0.512 177 ± 0.000 007	-8.99	1.53
05Sh2-01	150	9.941	50.89	0.118 2	0.512 201 ± 0.000 008	-8.52	1.51

表5 才溪岩体黑云母化学成分及参数数据表

$w_B/\%$

Table 5 Chemical composition and parameters of biotite from Caixi pluton

样品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO <sub>2</sub>	37.36	37.03	36.97	37.63	37.22	37.21	37.35	37.04	36.61	38.03	38.02	37.18
TiO <sub>2</sub>	4.45	1.70	4.51	4.27	4.53	4.33	3.89	4.23	4.65	2.88	2.73	3.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.68	13.38	13.76	13.72	13.63	13.65	13.30	13.99	14.59	14.30	13.61	14.32
FeO	19.20	19.00	18.80	18.80	18.70	18.70	17.40	19.40	20.70	18.50	17.40	18.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.39	3.35	3.31	3.31	3.30	3.30	3.07	3.42	3.65	3.26	3.07	3.28
MnO	0.59	0.52	0.49	0.54	0.49	0.49	0.56	0.46	0.55	0.48	0.51	0.47
MgO	8.37	8.65	8.40	8.71	8.89	8.89	9.43	9.19	9.77	9.41	9.88	9.15
CaO	0	0.04	0	0.01	0.06	0.06	0	0.03	0	0	0	0
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.08	0.12	0.22	0.10	0.12	0.10
K <sub>2</sub> O	9.21	8.54	9.53	9.13	9.07	9.07	9.59	8.37	9.76	9.45	9.46	9.25
Total	96.37	92.33	95.89	96.23	96.02	95.83	94.66	96.26	100.50	96.40	94.80	95.63
Si	5.43	5.60	5.41	5.46	5.41	5.42	5.49	5.37	5.16	5.49	5.56	5.43
Al <sup>IV</sup>	2.34	2.38	2.37	2.34	2.34	2.34	2.30	2.39	2.42	2.43	2.35	2.46
Ti	0.47	0.19	0.50	0.47	0.50	0.48	0.43	0.46	0.49	0.31	0.30	0.36
Fe <sup>3+</sup>	0.37	0.38	0.36	0.36	0.36	0.36	0.34	0.37	0.39	0.35	0.34	0.36
Fe <sup>2+</sup>	2.33	2.40	2.30	2.28	2.28	2.28	2.14	2.35	2.44	2.24	2.13	2.27
Mn	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06
Mg	1.81	1.95	1.83	1.88	1.93	1.93	2.00	1.99	2.05	2.03	2.15	1.99
Ca	0	0.01	0	0.00	0.01	0.01	0	0.01	0	0	0	0
Na	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.06	0.03	0.03	0.03
Mg <sup>#</sup>	0.44	0.45	0.44	0.45	0.46	0.46	0.49	0.46	0.46	0.48	0.50	0.47

阳离子数以 22 个氧原子为基准计算, Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 采用电价平衡法进行校正。

0.712 265,  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值为 -8.68 ~ -9.81,  $t_{2\text{DM}}$  为 1.51 ~ 1.61 Ga, 显示了壳源型花岗岩的特征。在凌洪飞等(1999)所做的福建省花岗岩类  $\epsilon\text{Nd}(t)$  - ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 图(图 7)上, 才溪岩体 5 个样品投影于地幔延长线上, 与凌洪飞等(2006)<sup>①</sup> 统计的象头山等 6 个强过铝壳源型花岗岩 ( $\epsilon\text{Nd}(t)$  为 -13.4 ~ -10.0,

平均 -12.1;  $t_{2\text{DM}}$  为 1.76 ~ 2.08 Ga, 平均为 1.96 Ga) 相比, 其  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值较高,  $t_{2\text{DM}}$  相对较低; 与区内典型的紫金山壳源型强过铝黑云母花岗岩 (A/CNK 为 1.23 ~ 1.72) 相比(紫金山黑云母花岗岩数据详见毛建仁等, 2004), 才溪二长花岗岩的 A/CNK (变化范围 0.961 ~ 1.138, 平均值为 1.018) 较低, 几乎不

① 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 等. 2006. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素证据. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 146.

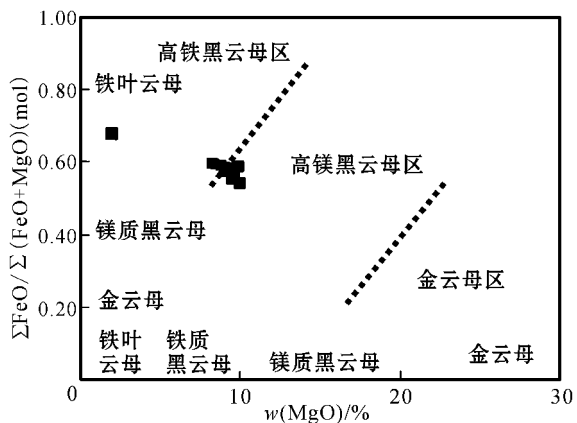


图 6 才溪岩体黑云母分类图(据周作侠,1988)

Fig. 6 Diagram of biotites from Caixi pluton (from Zhou Zuoxia,1988)

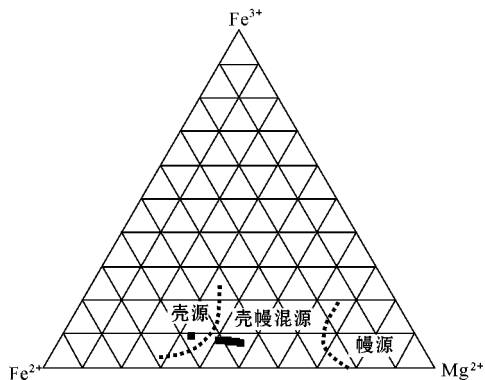


图 8 黑云母 \$\text{Fe}^{2+}-\text{Fe}^{3+}-\text{Mg}^{2+}\$ 分类图

(据周作侠,1988)

Fig.8 \$\text{Fe}^{2+}-\text{Fe}^{3+}-\text{Mg}^{2+}\$ diagram of biotite (from Zhou Zuoxia,1988)

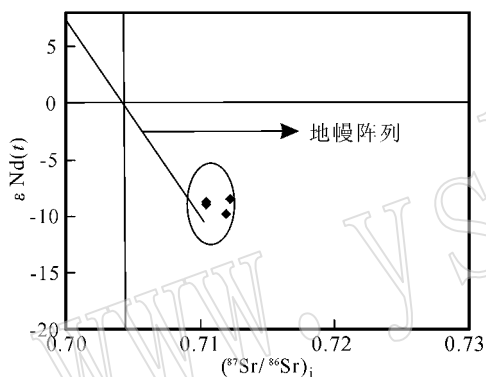


图 7 花岗岩 \$\epsilon\text{Nd}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\_i\$ 图解 (据凌洪飞等,1999)

Fig. 7 \$\epsilon\text{Nd}(t)-(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\_i\$ diagram of granite (from Ling Hongfei *et al.*,1999)

出现标准矿物分子刚玉,具有较高的 Na/K、Mg、Ca、Cr、Co、Sr、LIF/HFS 值,且 Nb、Ta、Ti、P、Ba 等的亏损程度比紫金山壳源型黑云母花岗岩低(毛建仁等,2004);在黑云母成分 \$\text{Fe}^{2+}-\text{Fe}^{3+}-\text{Mg}^{2+}\$ 三角图(图 8)上,才溪岩体中的黑云母成分几乎全部落入壳幔混源区靠近壳源区部分,显示了岩浆形成过程中有少量幔源组分的加入。

#### 4.2 构造环境

在 Pearce 等(1984)提出的花岗岩构造环境判别图上,样品投影于火山弧花岗岩区域(图 9),结合本区的区域位置及其本区地质演化历史,推测其可能形成于活动大陆边缘环境。已有研究表明,印支运动将印支、华南和华北板块碰撞形成统一的东南大陆,华北与华南陆块间的碰撞-变质峰期大约在 258~230 Ma(Carter *et al.*, 2001),在 230~200 Ma

左右华南陆块内的碰撞-挤压形成了壳源型花岗岩。中晚侏罗世(170~150 Ma),华南发育了大规模的壳源型过铝-弱过铝的花岗岩和二长花岗岩,过铝花岗岩形成的主要年龄集中在 159~156 Ma(孙涛等,2003)。同时该时期已经有在伸展构造背景下形成的岩浆活动记录,如赣南全南正长岩锆石 SHRIMP 年龄为 \$161 \pm 4\$ Ma(陈志刚等,2003),湘东南骑田岭 A 型花岗岩锆石 SHRIMP 年龄为 \$156.7 \pm 1.7\$ Ma(柏道远等,2005),赣南寻邬白面石菖蒲组流纹岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 \$165.1 \pm 7.07\$ Ma(孔兴功等,2000),寻邬留车鸡笼埠组流纹岩年龄为 \$163 \pm 6\$ Ma(巫建华等,1999),与大规模分布的壳源型花岗岩相比,才溪岩体规模较小,作者认为该时期研究区的构造环境已处于由挤压向伸展过渡的构造环境,才溪二长花岗岩就是在此环境下主要由地壳物质的部分熔融而形成的。

#### 5 结论

(1)才溪岩体锆石 SHRIMP 年龄为 \$150 \pm 3\$ Ma,属于中生代晚侏罗世。

(2)才溪二长花岗岩为高钾钙碱性系列岩石,富硅、碱,其 A/CNK 平均为 1.018,为弱过铝质。轻稀土元素略有富集,\*Eu 值为 0.54~0.66,样品具有 Rb-Th、U、K、La、Sm 正异常,Nb-Ta、Ti-Y 和 Ba 负异常,显示壳源型花岗岩的特征。

(3)才溪二长花岗岩的 \$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})\_i\$ 为 0.710 462~0.712 265, \$\epsilon\text{Nd}(t)\$ 值为 \$-8.68 \sim -9.81\$, \$t\_{2DM}\$ 为 1.51~1.61 Ga,与典型的强过铝花岗岩相比,其

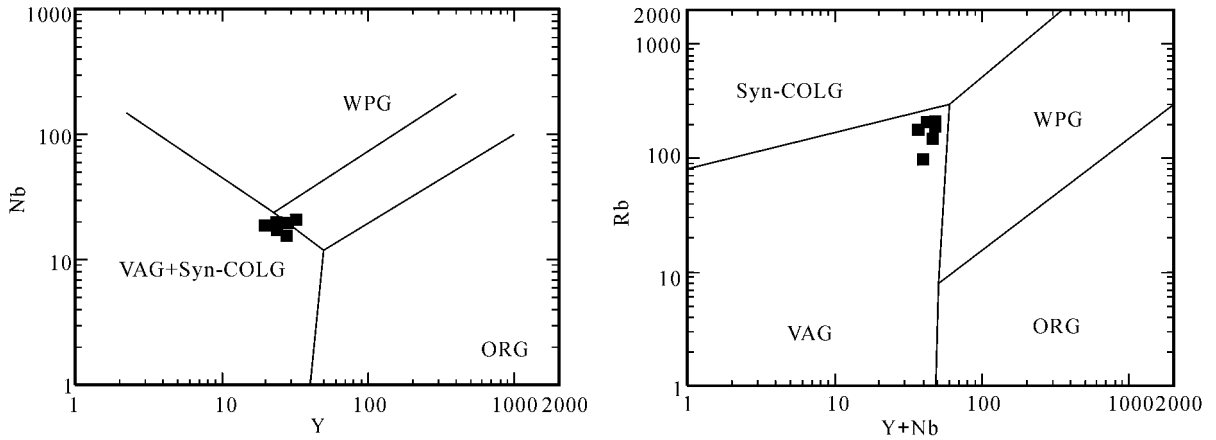


图9 才溪岩体 Nb - Y、Rb - Y + Nb 构造环境判别图(据 Pearce 等, 1984)

Fig. 9 Nb - Y and Rb - Y + Nb diagrams of Caixi pluton (from Pearce *et al.*, 1984)

VAG—火山弧花岗岩类, ORG—洋脊花岗岩类, WPG—板内花岗岩, Syn-COLG—同碰撞花岗岩类

VAG—volcanic arc granites, ORG—ocean ridge granites, WPG—intraplate granites, Syn-COLG—syntectonic collision granites

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值较高,  $t_{2\text{DM}}$  较低, 主要由中元古代地壳物质的部分熔融而形成, 显示成岩过程中有少量幔源物质的加入。

(4) 在 150 Ma 的时候研究区已处于一个由挤压向伸展过渡的构造环境。

**致谢** 野外工作中得到了福建地调院马金清总工和福建第八地质大队谢承涛高工的帮助, 在实验测试过程中南京大学地质系张文兰老师、北京离子探针中心万渝生老师、张巧大老师、陶华老师给予了指导, 张传林博士审阅全文并提出了修改意见, 在此表示感谢。

## References

- Bai Daoyuan, Chen Jianchao, Ma Tieqiu, *et al.* 2005. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in southeast Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 255 ~ 272 (in Chinese with English abstract).
- Carter A, Roques D and Bristow C. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam [J]. *Geology* 29: 21 ~ 214.
- Chen Zhigang, Li Xianhua, Li Wuxian, *et al.* 2003. SHRIMP U-Pb zircon age of the Quannan syenite, southern Jiangxi: Constraints on the early Yanshanian tectonic setting of SE China [J]. *Geochimica*, 32(3): 223 ~ 229 (in Chinese with English abstract).
- Gilder S A, Keller G R and Luo M. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China [J]. *Tectonophysics*, 197: 225 ~ 243.
- Kong Xingqong, Chen Peirong and Zhang Bangtong. 2000. Isotopic Characteristics of Rb-Sr and Sm-Nd in bimodal volcanics from the Baimianshi basin, southern Jiangxi Province [J]. *Geological Review* 46(2): 386 ~ 389 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 2000. Cretaceous magmatism and Lithospheric extension in southeast China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 18: 293 ~ 305.
- Li Ziyang, Huang Zhizhang and Li Xiuzhen. 1998. Discussion of Mesozoic-Cenozoic mantle plume tectonic and Uranium mineralization in south China [J]. *Mineral Deposits*, 17(sup.): 99 ~ 102 (in Chinese with English abstract).
- Ling Hongfei, Shen Weizhou and Huang Xiaolong. 1999. Nd and Sr isotopic compositions of granitoids of Fujian and their significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 255 ~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Tao Kuiyuan, Xing Guangfu, *et al.* 1999a. Petrological records of the Mesozoic-Cenozoic mantle plume tectonic in continental area of Southeast China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, 20(3): 253 ~ 258 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Tao Kuiyuan, Xing Guangfu *et al.* 1999b. Geochemical evidence for Cenozoic mantle plume in the South China [J]. *Geological Review* 45(sup.): 698 ~ 702 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Xu Naizheng, Hu Qing, *et al.* 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution from Shanghang-Datian region, Fujian, SE China [J]. *Acta Petrologica Sinica* 20(2): 285 ~ 296 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology* 25: 956 ~ 983.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 58: 63 ~ 81.
- Shu Liangshu and Zhou Xinmin. 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China [J]. *Geological Review* 48(3): 249 ~ 260 (in Chinese with English abstract).



- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [ A ]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [ C ]. London: Geological Society Publ. A2: 313~345.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, *et al.* 2003. The origin and tectonics significances of Mesozoic strong peraluminous granite in east Nanling Mountain [ J ]. *Science in China (series D)*, 33(2): 1209~1218 (in Chinese).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [ A ]. McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Applications of Micro-analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [ C ]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Wu Jianhua, Zuo Yueming and Zhou Weixun. 1999. Subdivision of the late Mesozoic volcanic stratigraphy in south Jiangxi and north Guangdong [ J ]. *Regional Geology of China*, 18(4): 398~405 (in Chinese with English abstract).
- Xie Douke, Ma Rongsheng and Zhang Yushen. 1996. Continental Crust Growth in South China and Mantle Tectonic [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1~257 (in Chinese).
- Xie Douke, Mao Jianren and Peng Weiya. 1997. The petrological strata in South China and continental dynamics [ J ]. *Chinese Journal of Geophysics* 40: 153~163 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing, Hu Ruizhong and Zhao Junhong. 2001. Discussion of relationship with mantle plume and large scale mineralization in southeastern China [ J ]. *Tectonic and Mineralization*, 25(2): 179~186 (in Chinese with English abstract).
- Xie Xin, Xu Xisheng, Zou Haibo, *et al.* 2005. The prelude of Mesozoic large magmatic processes in southeast China: early J<sub>2</sub> basal [ J ]. *Science in China (series D)*, 35(7): 587~605 (in Chinese).
- Zhang Dequan, She Hongquan, Yan Shenghao, *et al.* 2001. Geochemistry of Mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion [ J ]. *Geological Review* 47(6): 608~616 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinmin and Li Wuxian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in SE China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma [ J ]. *Tectonophysics*, 326: 269~287 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1988. Compositional characteristics and their implications of Mg-Fe micas in intrusive rocks [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 3: 63~73 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 柏道远, 陈建超, 马铁球, 等. 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 24(4): 255~272.
- 陈志刚, 李献华, 李武显, 等. 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的制约 [ J ]. *地球化学*, 32(3): 223~229.
- 孔兴功, 陈培荣, 章邦桐. 2000. 赣南白面石盆地双峰式火山岩的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素特征 [ J ]. *地质评论*, 46(2): 186~189.
- 李子颖, 黄志章, 李秀珍. 1998. 试论华南中生代地幔柱构造与铀成矿作用 [ J ]. *矿床地质*, 17(增刊): 99~102.
- 凌洪飞, 沈渭渊, 黄小龙. 1999. 福建省花岗岩类 Nd-Sr 同位素特征及其意义 [ J ]. *岩石学报*, 15(20): 255~262.
- 毛建仁, 陶奎元, 邢光福, 等. 1999a. 中国东南大陆边缘中生代地幔柱活动的岩石记录 [ J ]. *地球学报*, 20(3): 253~258.
- 毛建仁, 陶奎元, 邢光福. 1999b. 中国南方新生代地幔柱活动的地球化学证据 [ J ]. *地质论评*, 45(增刊): 698~702.
- 毛建仁, 许乃政, 胡青, 等. 2004. 福建省上杭-大田地区中生代成矿作用与构造环境演化 [ J ]. *岩石学报*, 20(2): 285~296.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用 [ J ]. *地质论评*, 48(3): 249~260.
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其在地构造意义 [ J ]. *中国科学(D辑)*, 33(2): 1209~1218.
- 巫建华, 左跃明, 周维勋. 1999. 赣南-粤北中生代晚期火山岩系岩石地层划分 [ J ]. *中国区域地质*, 18(4): 398~405.
- 谢寡克, 马荣生, 张禹慎. 1996. 华南大陆化壳生长过程与地幔柱构造 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1~257.
- 谢寡克, 毛建仁, 彭维霞. 1997. 华南岩石层与大陆动力学 [ J ]. *地球物理学报*, 40: 153~163.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 赵军红. 2001. 中国东南部地幔柱及其中生代大规模成矿关系初探 [ J ]. *大地构造与成矿学*, 25(2): 179~186.
- 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 等. 2005. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J<sub>2</sub> 早期玄武岩 [ J ]. *中国科学(D辑)*, 35(7): 587~605.
- 张德全, 余宏全, 阎升好. 2001. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据 [ J ]. *地质论评*, 47(6): 608~616.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义 [ J ]. *岩石学报*, 17(2): 236~244.
- 周作侠. 1988. 侵入岩的镁铁云母化学成分特征及其地质意义 [ J ]. *岩石学报*, 3: 63~73.