

# 福建省上杭-大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化\*

毛建仁 许乃政 胡青 邢光福 杨祝良

MAO JianRen, XU NaiZheng, HU Qing, XING GuangFu and YANG ZhuLiang

南京地质矿产研究所, 南京 210016

Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Nanjing 210016, China

2003-09-09 收稿, 2003-12-15 改回。

Mao JR, Xu NZ, Hu Q, Xing GF and Yang ZL. 2004. The Mesozoic rock-forming and ore-forming processes and tectonic environment evolution in Shanghang-Datian region, Fujian. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):285–296

**Abstract** There are various isotopic ages for four granitic plutons in the studied area, which respectively are as follows: Tangquan pluton 185 ~ 158Ma; Zijinshan pluton 157 ~ 145Ma; Caixi pluton 133Ma; Sifang pluton 108 ~ 105. Tangquan and Zijinshan plutons are belonged to respectively Early-Middle-Jurassic and Late-Jurassic in Early-Mesozoic, and Caixi and Sifang plutons belong to Early-Cretaceous in Late-Mesozoic. Both Tangquan and Sifang plutons, which are the metaluminous granites with  $A/CNK < 1.0$ , are regarded to possess the geochemical characteristics of adakite rich in Sr, Ba and poor in HREE, Y, Yb, as the most potential host rocks of ore-bearing for the copper deposit. Zijinshan pluton is regarded as peraluminous granites with  $A/CNK > 1.1$ , and possesses the geochemical feature of crust-derived mud materials by partial melting with enrichment in K, Rb, Th, Y, HREE and depletion in Sr, Ba, Ti. Caixi pluton is weak-peraluminous granites with  $A/CNK = 1.0 \sim 1.1$ , and its geochemical feature lies between the Zijinshan pluton and Sifang pluton. Tangquan pluton with higher  $Na_2O$  content, which was formed by partial melts of the thickened lower-crust derived basic rock during Proterozoic, resulting from the underplating of mantle-derived basic magma, is the major host rocks of the metallogenic series of copper, iron and multiple metals deposits. Sifang pluton with higher  $K_2O$  content, which was mixed between middle-lower crust-derived by granite magmas partial melting and mantle derived basic magma with high K, resulted in increase of  $K_2O$  content in the melt and obtaining of a large amount of copper, other metals and sulphur from mantle, is the major host rocks of the metallogenic series of the porphyry copper, gold and multiple metal deposits. There have been the petrological records of lithosphere extension since Early-Middle-Jurassic (180Ma) in the region, and formation of Zijinshan peraluminous granites is resulted from the extension mechanism. With the time past, the lithosphere extension-thinning and underplating is increased gradually, meanwhile the contribution of mantle to granite formation is increased gradually.

**Key words** Granites, Mesozoic, Ore-forming processes, Tectonic environment, Southwestern Fujian

**摘要** 本文所研究的四个中生代花岗岩体具不同的同位素年代:汤泉岩体为 183 ~ 158Ma, 紫金山岩体为 157 ~ 145Ma, 才溪岩体为 133Ma, 四方岩体为 108 ~ 105Ma, 汤泉和紫金山岩体分别属于早中生代中、晚侏罗世, 才溪和四方岩体时代为晚中生代早白垩世。汤泉和四方岩体为  $A/CNK < 1.0$  的准铝质花岗岩类, 因富 Ba、Sr, 贫 HREE、Y、Yb 而具埃达克岩地球化学特征, 是最具铜矿成矿潜力的含矿母岩; 紫金山花岗岩体为  $A/CNK > 1.1$  的强过铝花岗岩, 并富 K、Rb、Th、Y、HREE, 贫 Sr、Ba、Ti, 具地壳泥质岩石熔融的特征。才溪岩体为  $A/CNK 1.0 \sim 1.1$  的弱过铝花岗岩, 其元素地球化学特征介于四方岩体和紫金山岩体之间。富  $Na_2O$  的汤泉岩体是地幔起源的基性岩浆底侵作用, 促使加厚的元古代下地壳基性岩石部分熔融所形成, 是铜、铁多金属矿床成矿系列的主要含矿母岩; 富  $K_2O$  的四方岩体是地幔起源的富钾基性岩浆与中下地壳物质部分熔融形成的花岗质混合岩浆, 使岩浆中的  $K_2O$  含量增高, 并从地幔中获取大量铜及其它金属和硫, 而成为斑岩型铜金多金属矿床成矿系列的主要含矿母岩。研究区自早-中侏罗世(180Ma)以来已有岩石圈伸展的岩石学记录, 紫金山强过铝花岗岩是这种伸展机制延续的结果。随时间推移, 岩石圈伸展减薄作用和底侵作用增强, 地幔组分在花岗质岩浆的形成过程中贡献增大。

**关键词** 花岗岩类; 中生代; 成矿作用; 构造环境; 闽西南地区

**中图法分类号** P588.121; P618.41

\* 原地矿部项目(编号:地科专96-02)和中国地质调查局基础地质调查项目(编号:19991020110003)资助。

第一作者简介:毛建仁,男,1951年生,研究员,主要从事岩石学和构造岩石地球化学研究, E-mail:mjrmh@sina.com

中国东南部中生代存在大规模岩浆作用与成矿,并成为东亚的重要组成部分。中国东南大陆是个非常复杂的地区,具有多阶段的中生代构造-岩浆活动。因此,近20年来已提出了各种模式,大致可归纳为以下几类:(1)地幔柱观点(谢谏克等,1996;谢谏克,毛建仁,1997;毛景文等,1988;李子颖等,1998;毛建仁等,1999a,1996b;谢桂青等,2001);认为中国东南部中生代岩浆活动是由地幔柱活动而引发的;(2)阿尔卑斯型的大陆碰撞模式(Hsu *et al.*, 1988, 1990);(3)与古太平洋板块俯冲有关的活动大陆边缘(e.g., Jahn *et al.*, 1976; Holloway, 1982; Huang *et al.*, 1986; Zhou and Li, 2000);(4)大陆伸展和裂谷模式(Gilder *et al.*, 1991, 1996; Li, 2000; 陈志刚等, 2003),类似于盆岭构造。这些观点都对深入研究华南中生代岩浆作用起到积极推进作用,取得了突破性进展,并形成一个共识,即中生代(尤其是晚中生代)岩浆作用是拉张应力为主的伸展构造背景下在发生了玄武岩浆底侵条件下而形成的。目前,待解决的问题是,中生代是否存在地壳加厚的挤压过程?以拉张力为主的伸展机制是在什么时代开始的?它们对中生代不同类型的岩浆作用与成矿的控制作用如何?本文选择福建省大田地区汤泉岩体,上杭地区紫金山,才溪和四方等四个代表性的中生代岩体为研究对象,通过对岩体地质学、地球化学及其成矿关系的研究,讨论其岩浆源区、成岩成矿过程和形成的构造环境,试图回答上述问题。

## 1 代表性岩体地质特征和同位素年代

针对上述问题,本文主要选取了在上杭紫金山大型铜金矿田产出的紫金山,才溪和四方岩体,为更有利于探讨岩浆源区、成矿作用和构造环境的演化,还选择了大田地区的汤泉岩体作对比研究,以下简称四个岩体的地质特征和地质年代。

### 1.1 汤泉岩体

位于大田县境内,岩体呈长轴走向东北的马蹄形,出露面积约130 km<sup>2</sup>,围岩为前震旦系麻源群变质岩,上泥盆-下石炭统砂砾岩,上石炭统-下二叠统灰岩,二叠系含煤细碎屑岩,三叠系钙硅质泥岩以及下侏罗统砂砾岩。岩体中心相为细-中粒花岗闪长岩、二长花岗岩,边缘相为中-细粒花岗闪长岩,局部相变为石英闪长岩。花岗闪长斑岩体分布于岩体周边,呈岩脉、岩瘤状沿断裂、层间破碎带侵入,副矿物组合为磷灰石-锆石-磁铁矿-榍石型。

岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 186.8Ma 和 179.0Ma, Rb-Sr 等时年龄为 162.02 ± 4.5Ma, 花岗岩闪长石中黑云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 坪年龄为 158.1 ± 0.7Ma( Mao *et al.*, 2003)。

### 1.2 紫金山岩体

位于上杭县紫金山铜矿田内,呈北东走向的透镜状,出露面积约为20km<sup>2</sup>(图1),其围岩主要为寒武系变质细碎屑岩和泥盆系-石炭系的粗碎屑岩,为紫金山铜矿的主要容矿围岩。岩体主体为中粗粒黑云母花岗岩,晚期中细粒-细粒黑云母花岗岩呈岩株、岩枝状侵入,副矿物组合为石榴石-绿帘石-黝帘石,出现少量刚玉,岩体锆石 U-Pb 年龄为 157 ± 9Ma,全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 145 ± 12Ma(张德全等, 2001)。

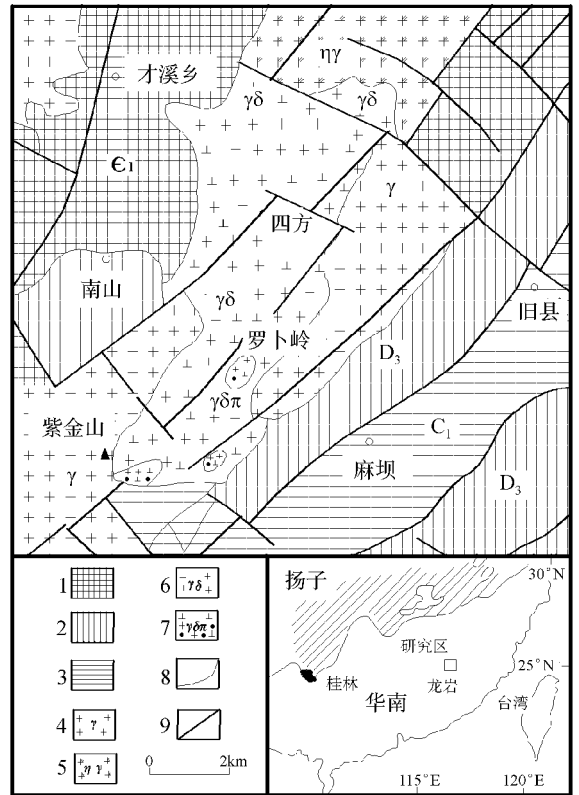


图1 上杭地区岩体地质简图

1. 下寒武统变质细碎屑岩; 2. 上泥盆统粗碎屑岩; 3. 下石炭统碎屑岩; 4. 黑云母花岗岩; 5. 二长花岗岩; 6. 花岗闪长岩; 7. 花岗闪长斑岩; 8. 地质界线; 9. 断层。

Fig. 1 Geological sketch map of plutons in Shanghang region

### 1.3 才溪岩体

位于上杭紫金山矿田东北部,呈岩枝状侵入于紫金山岩体之中,与上泥盆-石炭系粗碎屑岩呈侵入接触关系,出露面积约为2.5km<sup>2</sup>,岩石呈似斑状结构的二长花岗岩,局部遭受后期热液蚀变而结构变细,副矿物组合为磁铁矿-磷灰石-

榭石-锆石型。岩体的锆石 U-Pb 年龄为  $133 \pm 8\text{Ma}$  (张德全等, 2001)。

### 1.4 四方岩体

位于上杭县紫金山矿田东北部, 受北东和北北东向张性断裂控制呈长轴为北东向的岩株状产出, 面积约为  $10\text{km}^2$ , 岩体内及其边缘分布有稍晚侵入的浅成斑岩体, 如罗卜岭斑岩, 为紫金山矿田高硫浅成低温热液型-中低温热液型-斑岩型“三位一体”大型铜矿的主要成矿母岩。围岩为紫金山黑云母花岗岩, 二长花岗岩及寒武系变质细碎屑岩和泥盆系-石炭系粗碎屑岩。岩体主要为中细粒花岗结构的花岗闪长岩, 副矿物组合为富含 Fe、Ti、Ca 成分的磁铁矿-磷灰石-榭石-锆石型。岩体单颗粒 U-Pb 年龄为  $107.8 \pm 1.2\text{Ma}$ , 角闪石 Ar-Ar 坪年龄为  $104.8 \pm 8.0\text{Ma}$ , 岩体是在伸展拉张构造环境下以快速冷却 ( $50^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ) 侵位的 (毛建仁等, 2002)。

由此可见, 按照国际地层学年代学委员会 (2000) 的方案, 大田汤泉岩体和上杭紫金山岩体分别为早中生代的早中、晚侏罗世; 才溪和四方岩体则为晚中生代的早白垩世。

## 2 岩体的地球化学特征

### 2.1 主元素

四个岩体的主元素、稀土元素和微量元素分析结果及相应的参数见表 1 和表 2。在  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  岩石分类命名图中 (Middlemost, 1994, 图略), 汤泉岩体 24 个样品大都落入花岗闪长岩区, 一部分位于花岗岩区 ( $\text{SiO}_2$  为  $63.70\% \sim 70.50\%$ ), 四方岩体 9 个样品全部投影于花岗闪长岩区 ( $\text{SiO}_2 = 62.39\% \sim 67.88\%$ ) (毛建仁等, 2003), 才溪岩体的样品全部投影于花岗岩区 ( $\text{SiO}_2 = 69.31\% \sim 73.24\%$ ), 而紫金山岩体样品则全部投影于富英岩区 ( $\text{SiO}_2 = 74.26\% \sim 76.17\%$ ), 在  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  图中, 除汤泉岩体因相对富  $\text{Na}_2\text{O}$  而表现为中钾钙碱系列岩石外, 其余三个岩体都为高钾钙碱性系列 (图 2)。

汤泉岩体 24 个样品的 A/CNK 为  $0.94 \sim 1.12$ , 平均值为  $0.98$ , 分异指数为  $67.0 \sim 76.5$ , 平均值为  $73.6$ ; 紫金山岩体 4 个样品的上述数值分别为  $1.72 \sim 1.23$ ,  $1.21$ ,  $90.1 \sim 94.8$  和  $92.2$ ; 才溪岩体 4 个样品的上述数值分别为  $0.96 \sim 1.14$ ,  $1.05$  (张德全等, 2001),  $78.6 \sim 85.5$  和  $80.3$ ; 四方岩体 9 个样品分别为  $0.91 \sim 1.04$ ,  $0.97$ ,  $63.71 \sim 73.33$  和  $68.8$  (毛建仁等, 2002)。如果按岩体的 A/CNK 值分别以  $1.00$  和  $1.10$  为界, 可将四个岩体细分为准铝、弱过铝和强过铝花岗岩 (图 3), 汤泉和四方岩体为准铝质花岗岩类, 才溪岩体为弱过铝质花岗岩类, 而紫金山岩体则为强过铝质花岗岩类。与汤泉和四方岩体相比, 紫金山岩体普遍出现标准矿物分子刚玉 ( $C = 2.1 \sim 2.7$ ), 相对贫  $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{TiO}_2$  和  $\text{CaO}$ , 而表现为标准矿物分 Ap、Mt、Di 含量低, 才溪岩体则介于两者之间。

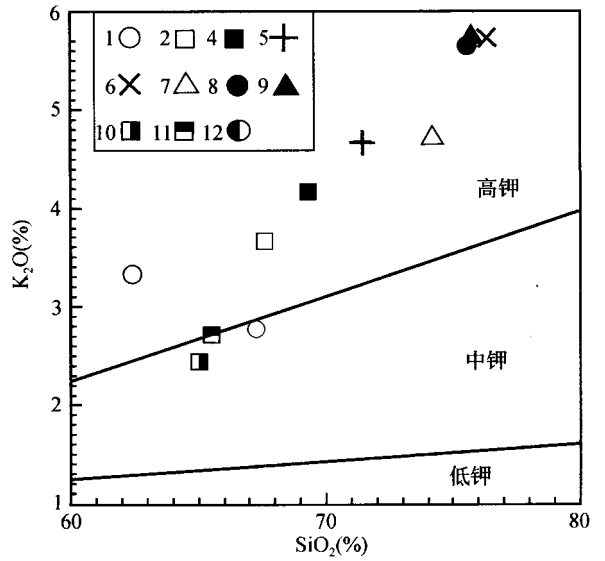


图 2 四个代表性岩体的  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  图

样品序号同表 1

Fig. 2 Diagram of  $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  for four representative plutons

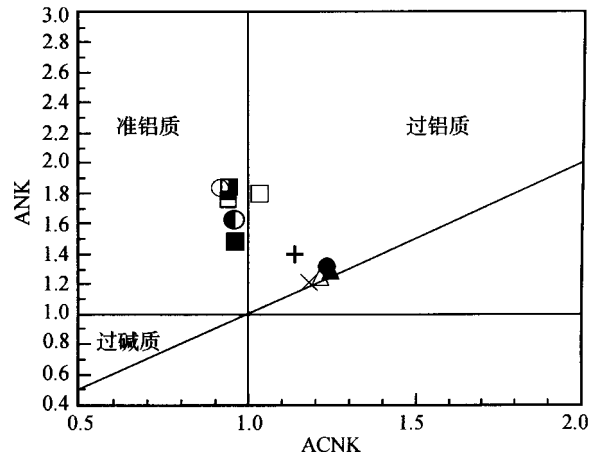


图 3 四个代表性岩体的 A/CNK-A/NK 图

样品序号同表 1

Fig. 3 Diagram of A/CNK-A/NK for four representative plutons

### 2.2 稀土元素和微量元素

汤泉和四方岩体稀土元素配分模式呈略向右倾的平滑型, 汤泉岩体的 Y 和 HREE 含量较低, 2 个岩体的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  和  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  值分别为  $24.22 \sim 33.00$ ,  $5.23 \sim 6.81$  和  $9.82 \sim 12.49$ ,  $3.82 \sim 4.24$ 。弱负 Eu 异常,  $\delta\text{Eu}$  值为  $0.80 \sim 0.91$  (图 4a)。

表1 各岩体代表性样品主要元素( % )

Table 1 Major elements ( % ) compositions of selected samples of plutons

岩石名称 样品号 顺序号	花岗闪长斑岩		花岗闪长岩		二长花岗岩		黑云母花岗岩			花岗闪长斑岩		花岗闪长岩
	ZK22-8 1	SZ6-1 2	ZJ684 3	ZJ801 4	YQ039 5	ZJ72 6	ZJ292 7	ZJ731 8	ZJ794 9	2401-10-4 10	2401-10-7 11	DJ1-3-1 12
SiO <sub>2</sub>	62.39	67.58	65.25	69.31	71.45	76.17	74.26	75.58	75.77	65.01	65.41	67.26
TiO <sub>2</sub>	0.51	0.37	0.51	0.49	0.36	0.06	0.05	0.08	0.07	0.36	0.38	0.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.27	16.06	15.77	14.03	14.02	13.1	12.84	12.95	12.9	16.23	16.06	15.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.49	1.37	2.28	1.09	1.16	0.79	0.35	1.66	0.93	0.88	1.23	2.02
FeO	2.64	1.73	2.19	2.26	1.68	0.41	2.47	0.99	1.08	2.81	2.58	1.64
MnO	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.31	0.04	0.03	0.03	0.08	0.07	0.07
MgO	2.29	1.33	1.88	1.01	0.74	0.06	0.64	0.35	0.29	2.02	1.93	1.31
CaO	4.82	3.58	3.39	2.78	1.26	0.12	0.23	0.33	0.13	4.61	4.39	3.63
Na <sub>2</sub> O	3.21	3.02	3.02	3.03	3.03	2.81	2.94	2.35	2.5	3.76	3.72	4.02
K <sub>2</sub> O	3.33	3.66	3.60	4.17	4.68	5.71	4.74	5.66	5.74	2.43	2.7	2.77
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.3	0.21	0.22	0.15	0.08	0.02	0.07	0.02	0.03	0.14	0.13	0.16
LOI	1.5	1.01	1.69	1.06	1.63	0.90	0.8	0.79	0.69	0.96	0.9	0.87
Total	99.85	100.02	99.90	100.02	100.14	100.46	99.43	100.79	100.16	99.29	99.50	99.77
A/NK	1.832	1.799	1.791	1.472	1.394	1.204	1.282	1.295	1.243	1.842	1.777	1.629
A/CNK	0.914	1.033	1.047	0.961	1.138	1.177	1.228	1.224	1.212	0.936	0.936	0.959
Q	16	25.6	22.6	27.5	31.4	37	36.5	37.6	37.7	20	20.1	22.4
C	0	1.1	1.0	0	1.9	2.1	2.7	2.4	2.4	0	0	0
Or	20.0	21.9	21.7	25.0	28.1	33.9	28.4	33.5	34.1	14.6	16.2	16.6
Ab	27.7	25.8	26.1	26.1	26.0	23.9	25.2	19.9	21.3	32.4	31.9	34.4
An	20.5	16.6	15.7	12.6	5.8	0.5	0.7	1.5	0.5	20.6	19.4	16.7
Ne	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ns	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Di	1.5	0	0	0.4	0	0	0	0	0	1.5	1.5	0.4
DiWo	0.8	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0.7	0.8	0.2
DiEn	0.4	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0.4	0.4	0.1
DiFs	0.4	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0.3	0.4	0.1
Hy	11.2	7	10.0	6.2	5.1	2.1	5.6	4.3	3.4	9	8.8	7.4
HyEn	5.4	3.3	4.8	2.5	1.9	0.1	1.6	0.9	0.7	4.7	4.5	3.2
HyFs	5.8	3.6	5.2	3.7	3.3	1.9	4	3.4	2.6	4.2	4.3	4.2
Ol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OlFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OlFa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mt	1.3	0.8	1.2	0.9	0.8	0.4	0.7	0.6	0.5	1	1	0.9
Hm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Il	1.0	0.7	1.0	0.9	0.7	0.1	0.1	0.2	0.1	0.7	0.7	0.7
Ap	0.7	0.5	0.5	0.3	0.2	0	0.2	0	0.1	0.3	0.3	0.4
C_I	15.0	8.5	12.2	8.4	6.6	2.5	6.4	5.1	4	12.1	12	9.5
D_I	63.7	73.3	70.3	78.6	85.5	94.8	90.1	91	93.1	67.0	68.2	73.5

注: 1. 萝卜岭斑岩体; 2, 3. 四方岩体; 4, 5. 才溪岩体; 6, 7, 8, 9. 紫金山岩体; 10, 11, 12. 汤泉岩体。1, 2, 10, 11, 12 据本文。南京地质矿产研究所实验室化学法分析; 3~9 引自张德全等(2001), 河北省地勘局实验室化学法分析。标准矿物(norm)含量采用Minpet 2.0 程序计算。

表2 各岩体代表性样品的稀土、微量元素( $\mu\text{g/g}$ )和主要参数Table 2 Rare earth and trace ( $\mu\text{g/g}$ ) elements compositions of selected samples of plutons

顺序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
La	25.8	33.9	36.10	47.0	41.4	14.8	25.3	16.5		33.0	28.1	28.1
Ce	48.9	54.9	59.89	79.2	78.9	29.3	43.5	35.8		60.2	49.3	45.2
Pr	6.68	6.41	6.16	7.96	8.76	3.05	5.93	3.23		6.04	5.16	5.63
Nd	24.9	23.5	25.46	32.1	38.2	15.4	20.3	14.1		23.9	20.6	20.4
Sm	4.70	4.35	4.53	5.80	7.37	4.66	4.10	3.10		3.93	3.57	3.65
Eu	1.15	1.16	1.16	1.20	1.24	0.41	0.71	0.25		0.91	0.91	0.94
Gd	3.95	3.88	3.60	5.25	5.64	3.99	4.28	1.54		2.71	2.87	2.87
Tb	0.73	0.71	0.43	0.55	1.48	0.94	0.96	0.28		0.38	0.41	0.55
Dy	2.98	2.94	2.57	3.60	5.19	5.75	4.82	1.29		2.14	2.28	1.90
Ho	0.67	0.68	0.54	0.77	1.21	1.22	0.97	0.29		0.43	0.46	0.46
Er	1.77	1.79	1.42	2.06	3.02	4.37	2.79	0.94		1.02	1.13	1.12
Tm	0.34	0.34	0.23	0.31	0.71	0.70	0.55	0.18		0.16	0.18	0.22
Yb	1.77	1.83	1.65	2.15	3.25	5.20	3.18	1.19		1.00	1.16	0.99
Lu	0.31	0.32	0.20	0.30	1.06	0.81	0.6	0.21		0.15	0.17	0.18
$(\text{La}/\text{Sm})_N$	3.45	4.90	5.01	5.09	3.54	1.99	3.89	3.36		5.28	4.95	4.84
$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	1.82	1.71	1.76	1.97	1.40	0.62	1.09	1.04		2.71	2.47	2.89
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	9.82	12.49	14.75	14.74	8.59	1.91	5.37	9.37		33.00	24.22	28.38
$\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$	3.82	4.24	5.26	4.93	3.46	1.04	2.11	5.41		6.81	5.23	5.59
$\delta\text{Eu}$	0.80	0.85	0.85	0.65	0.57	0.28	0.51	0.31		0.86	0.90	0.91
$\Sigma\text{REE}$	124.65	136.71	143.94	188.18	197.58	90.60	118.09	78.91		135.97	116.30	112.21
$\Sigma\text{LREE}$	112.13	124.22	133.30	173.19	176.02	67.62	99.94	72.99		127.98	107.64	103.92
$\Sigma\text{HREE}$	12.52	12.49	1.064	14.99	21.56	22.98	18.15	5.92		7.99	8.66	8.29
LRE/HRE	8.96	9.95	12.53	11.55	8.16	2.94	5.51	12.33		16.02	12.43	12.54
Sr	510	331	530	280	273	53	52	59	53	517	689	426
K	27639	30378	30370	34611	38844	47393	39342	46978	47642	20169	22410	22991
Rb	97	101	139	194	189	311	167	180	172	62	71	52
Ba	742	709	930	580	584	344	294	450	410	613	652	625
Th	21.0	14.8	9.9	13.6	13.0	24.2	20.0	19.0	19.0	9.8	8.5	11.0
Ta	1.86	0.81								0.38	0.35	1.34
Nb	17.5	12.2	19	20.0	20.0	13.0	36.0	32.0	19.0	11.8	11.8	11.3
Ce	48.60	54.90	59.89	79.15	78.97	29.31	43.52	35.82	76.48	60.20	49.30	45.20
P	1309	916	919	654	349	87	305	87	130	610	567	698
Zr	123	124	105	143	137	50	96	71	75	121	100	113
Hf	3.86	3.75								2.59	2.08	3.49
Sm	4.70	4.35	4.53	5.80	7.37	4.66	4.10	3.10	4.82	3.93	3.57	3.65
Ti	3057	2218	3057	2937	2157	359	300	480	420	2157	2278	2218
Y	16.8	16.8	14.68	20.8	29.3	41.6	29.0	7.6	16.5	10.8	11.9	10.3
Yb	1.77	1.83	1.65	2.15	3.25	5.20	3.18	1.19	1.81	1.00	1.16	0.99

注: 样品序号同表1。1、2、10、11、12 据本文,南京地质矿产研究所实验室等离子光谱分析;3~9 引自张德全等(2001),中国地质科学院岩矿测试技术研究所离子光谱分析。

紫金山强过铝花岗岩体的  $\Sigma\text{REE}$  低(78.91 ~ 118.09  $\mu\text{g/g}$ ),而 HREE 含量高(5.92 ~ 22.98  $\mu\text{g/g}$ ),属于重稀土富集型,反映稀土分馏程度的  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值低(1.91 ~ 9.37),稀土元素配分模式呈基本趋于水平的 V 字型,强 Eu 负异常,  $\delta\text{Eu}$  值为 0.28 ~ 0.51(图 4b)。

才溪岩体的  $\Sigma\text{REE}$  最高(188.18 ~ 197.58  $\mu\text{g/g}$ ),属于轻稀土富集型,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值较高,为 8.59 ~ 14.74,稀土元素配分模式呈略向右倾的平滑型,中等负 Eu 异常,  $\delta\text{Eu}$  值为 0.57 ~ 0.65(图 4b)。

汤泉、四方和才溪三个岩体都显示活动大陆边缘/岛弧

钙碱岩系列的特征和演化趋势,富集 Rb-Th、Zr-Hf,贫 Ti、Nb-Ta、Ba、Sr、P、Y,在洋中脊玄武岩标准化和微量元素比值蛛网图上(图 5a),三个岩体显示 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,与四方体相比,汤泉岩体以贫 Y、Yb、Sr 含量高为特征。

与汤泉、四方岩体相比,紫金山强过铝花岗岩体富集 K、Rb、Th、Yb,贫 Sr、Ba、Ti、P、Zr,在微量元素蛛网图(图 5b)和稀土元素配分模式(图 4b)中,具典型的低 Ba-Sr 高 Y 花岗岩的特征。才溪弱过铝花岗岩的地球化学特征则介于汤泉、四方准铝质花岗岩和紫金山强过铝质花岗岩岩体之间。

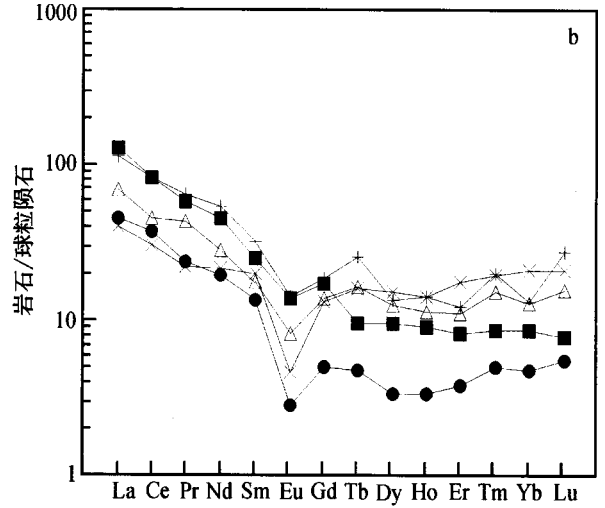
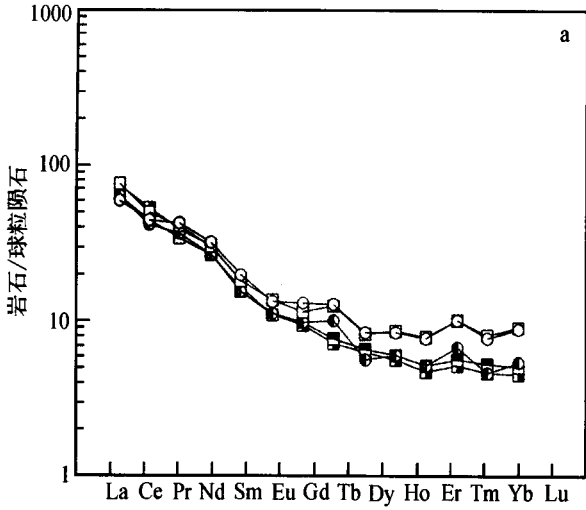


图 4 四个代表性岩体的稀土配分模式图

(a)汤泉和四方岩体;(b)紫金山和才溪岩体

Fig. 4 REE patterns for four representative plutons

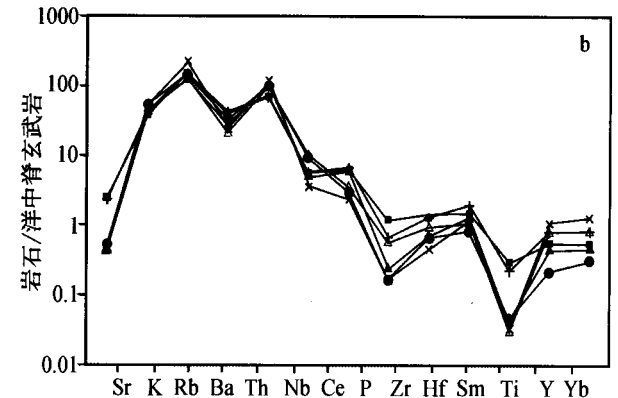
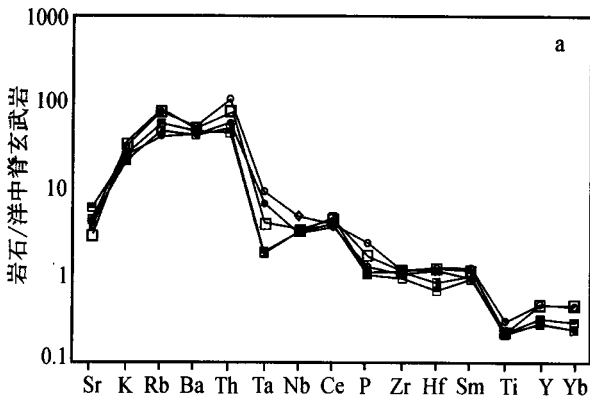


图 5 四个代表性岩体的不相容元素大洋中脊玄武岩标准化蛛网图

(a)汤泉和四方岩体;(b)紫金山和才溪岩体

Fig. 5 Ocean ridge basalt-normalized incompatible elements spider diagram for four representative plutons

汤泉花岗闪长岩的  $\text{SiO}_2$  为 63.70 ~ 70.50%, Sr 为 426 ~ 689  $\mu\text{g/g}$ , Ba 为 613 ~ 652  $\mu\text{g/g}$ , Y 为 10.3 ~ 10.8  $\mu\text{g/g}$ , Yb 为 1.00 ~ 0.99  $\mu\text{g/g}$ , Sr/Y 为 41.36 ~ 57.94, Y/Yb 为 10.26 ~ 10.80, 四方花岗闪长岩的上述数值分别为 62.39 ~ 67.88%, 331 ~ 530  $\mu\text{g/g}$ , 709 ~ 930  $\mu\text{g/g}$ , 14.68 ~ 16.80  $\mu\text{g/g}$ , 1.65 ~ 1.83  $\mu\text{g/g}$ , 19.70 ~ 36.10, 9.49 ~ 9.89。据以上地球化学分析,汤泉和四方花岗闪长岩具有埃达克质岩的高 Sr-Ba 低 Y 的地球化学特征。Defant and Drummond (1990) 提出的埃达克岩的元素地球化学特征是:  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ , 高铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ ),  $\text{MgO} < 3\%$  (很少  $> 6\%$ ), 贫 Y 和 Yb ( $Y \leq 18 \mu\text{g/g}$ ,  $Yb \leq 1.9 \mu\text{g/g}$ ), 高 Sr ( $> 400 \mu\text{g/g}$ ), 富集 LREE, 贫 HREE, 无 Eu 异常或有轻微负 Eu 异常。值得注意的是,原作者并未提出  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  方面的判别标准。汤泉和四方花岗闪长岩都表现为明显的 Nb-Ta 亏损,  $\text{Nb/La} = 0.39 \sim 0.43$  与岛弧特征的岩石相似(典型岛弧岩石的  $\text{Nb/La} \sim 0.3$ , Li *et al.*, 2003)。Nb-Ta、Ti-Y 负异常和低的 Nb/La 值表明它们不可能直接由软流圈部分熔融形成( Miller *et al.*, 1999), 其源区或是受到了俯冲组分的影响,或是源区部分熔融过程中有一定量的石榴子石矿物残留( Floey *et al.*, 1992)。与典型的埃达克岩比较,中国东部中生代埃达克质岩地球化学特征总体来讲还有些差异,表现为 La/Yb 值较高, Sr 含量较低,可能反映岩浆的分馏程度较高,有一定程度的结晶分异,故中国东部的  $\text{K}_2\text{O}$  含量相对较高,而  $\text{Mg}^\#$  值较低(张旗等, 2001; 吴福元等, 2002)。但不同的是汤泉岩体富  $\text{Na}_2\text{O}$ , 而 180Ma 时华南地区不存在洋-陆或弧-陆俯冲碰撞作用的假设,笔者认为很可能是陆内岩浆作用的产物,推测是软流圈地幔的玄武岩浆底侵到加厚的陆壳( $\leq 45\text{km}$ )底部导致下地壳基性岩石(富  $\text{Na}_2\text{O}$  的斜长角闪岩)部分熔融形成的。就目前富  $\text{K}_2\text{O}$  的四方岩体的地球化学数据而言,受到俯冲组分改造或影响的富集的岩石圈地幔组成部分很可能对岩浆的形成有重要贡献,或可能是软流圈组成部分和中下地壳物质以不同比例混合的结果,从而导致岩石具较高的  $\text{K}_2\text{O}$  含量和较强烈的稀土元素分馏。紫金山强过铝壳源型花岗岩明显的 Eu 负异常,富集 HREE 和 K、Rb、Th, 贫 Sr、Ba, 表明是由泥质岩石通过部分熔融或地壳重熔所形成的。而才溪岩体更多地表现为壳幔混合源花岗岩特征。

### 3 成矿系列和主要矿床

斑岩铜矿作为一种重要的铜矿类型为世界提供了 50% 以上的铜资源量( Kirkham *et al.*, 1995), 而最具成矿潜力的斑岩通常具有埃达克岩岩浆的亲缘性,而不是典型的弧岩浆岩( Thieblemont *et al.*, 1997; Defant *et al.*, 2002)。由于埃达

克岩通常具有较低的 HREE 和 Y 含量,富集 Sr, 从而在 Sr/Y-Y 图中与弧火山岩和侵入岩可以明显区分开( Defant *et al.*, 2002; 候增谦等, 2003)。本文所讨论的具埃达克质岩特征汤泉岩体和四方岩体同样具有与铜多金属成矿作用的亲缘性,两个岩体因分别具有富  $\text{Na}_2\text{O}$  和富  $\text{K}_2\text{O}$  特征,可分为两个成矿系列。

#### 3.1 与早中生代花岗闪长岩有关的铜、铁、铅、锌矿床成矿系列

汤泉岩体的花岗闪长岩和花岗闪长斑岩是该成矿系列的含矿母岩。容矿围岩多种多样,但以船山组-棲霞组灰岩最为有利,多以交代方式形成不规则透镜状、似层状矿体,大部分有工业价值的矿床赋存于此层位中。

该矿田主要矿床类型是:

(1) 斑岩型铜、钼矿床:主要产在汤泉岩体边缘花岗闪长斑岩内及其外接触带附近的铜矿床(如马头山),呈细脉浸染状,伴生有钼矿化。

(2) 热液型多金属矿床:有多种产出形式,一是产于逆冲、滑脱推覆构造破碎带内的铜、铅、锌多金属矿床(如建爱、朱坂),二是产于岩体外接触带钙、硅泥质围岩裂隙中的铜铅锌矿床(电灌站脉状矿体等)。

(3) 矽卡岩型硫、铁多金属矿床:一是产于汤泉花岗闪长岩与碳酸盐岩接触带上的矽卡岩型铁、铜、铅、锌矿床(如汤泉和龙山崎矿床);二是产于远离岩体接触带的碳酸盐岩与碎屑岩断裂面上的似层状硫、铁多金属矿床(如龙凤场),又称为层控矽卡岩型。

尽管矿田内的矿床类型多样,产出形式、部位各异,但它们都与汤泉花岗闪长质岩浆活动密切相关,成岩与成矿具有密切的成生联系。容矿围岩岩性差异,成矿岩体侵位空间和岩石类型的变化是导致矿田内出现多种矿床类型的主要因素(石礼炎等, 1998)。当容矿岩石为多种成分的构造破碎带或钙、硅泥质围岩裂隙时,多形成斑岩型-热液型铜、铅锌多金属矿床;当围岩为灰岩时,在岩体接触带附近形成矽卡岩型硫、铁多金属矿床,远离接触带形成层控矽卡岩型硫、铁多金属矿床。

#### 3.2 与晚中生代花岗闪长斑岩有关的铜、金、铅、锌矿床成矿系列

产于紫金山大型铜金矿田的晚中生代四方岩体及其同源浅成斑岩体是该成矿系列的含矿母岩。主要岩石类型有:喷溢相安山质-粗安质-英安质熔岩、火山碎屑岩;潜火山岩相英安斑岩、花岗闪长斑岩、隐爆角砾岩、热液角砾岩;中深成相花岗闪长岩。它们形成的先后顺序为花岗闪长岩

→花岗闪长斑岩、中酸性火山岩→英安斑岩,属同源岩浆不同形成方式和不同定位深度的产物。容矿围岩以早中生代紫金山花岗岩为主,次为晚中生代英安质火山-侵入岩系。容矿构造主要为北西向裂隙带、斑岩体接触带构造和火山盖层与基底接触带构造,矿体呈脉状、细脉状。

构成该系列的矿床有:

- (1)高硫浅成低温热液型铜(金)矿床(紫金山);
- (2)中低温热液型铜金银矿床(五子骑龙、碧田);
- (3)斑岩型铜钼矿床(罗卜岭、紫金山南东矿段中寮等)。

晚中生代中酸性火山-侵入岩系与铜矿床有密切的时空及成因联系:时间上,四方花岗闪长岩体中单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄分别为 108Ma 和 105Ma,可以认为四方花岗闪长岩体形成的年龄约为 108Ma ±,花岗闪长斑岩体大是在花岗闪长岩开始冷却后形成的,推断其形成年龄为 105Ma ±,与成矿时间相近(矿体中绢云母、明矾石 K-Ar 年龄分别为 94Ma 和 82Ma;闽西地质大队,1994);空间上,蚀变矿化围绕着潜火山岩体呈规律性分布,表明成岩与成矿为同源岩浆演化不同阶段的产物。

多次脉动的中酸性火山-侵入岩定位和喷发,形成多阶段蚀变矿化,随着成岩成矿时空的迁移,自深部往浅部,构造裂隙由稀疏到密集,成矿岩体由花岗闪长斑岩变为英安斑岩,由岩浆岩分异的含矿热液所占比例由多到少,成矿物化参数 T、P、pH、盐度逐渐降低, fO<sub>2</sub>、fS<sub>2</sub> 不断升高,形成不同类型的矿床,在深部构造裂隙不发育的花岗闪长斑岩体接触带附近,形成斑岩型矿床或中低温热液型铜钼矿床;在潜火山岩中形成高硫浅成低温热液型铜(金)矿床;在紫金山矿床的英安质火山岩上部层位的粗安质火山岩中形成中低温热液铜、金、银矿床。

已有研究表明,与正常的长英质岩浆不同,埃达克质岩浆以其高水含量、高氧逸度和高硫为特征(Oyarzun *et al.*, 2001),成为斑岩铜矿的重要含矿母岩以及金属和硫的主要载体。尽管汤泉岩体和四方岩体都具有与斑岩型铜成矿作用的亲缘性,但是,成矿规模完全不同,前者规模小,后者形成大型铜金矿床,含矿斑岩地球化学特征的不同是导致汤泉矿田与紫金山矿田出现不同成矿元素组合的重要因素之一。汤泉岩体的花岗闪长(斑)岩作为斑岩铜矿的重要含矿母岩,相对富钠偏酸性,就其携带金属铜的能力而言,远不如相对富钾偏基性的四方岩体,除斑岩-热液型铜矿与含矿母岩有十分密切关系外,其铁-硫成矿作用还受特定的层位控制,是铁(铅、锌)、铜的成矿岩浆岩系列;四方岩体的花岗闪长(斑)岩成岩过程中有大量富集地幔物质的加入,元古代相当的地壳衍生物部分熔融的花岗质岩浆与来自富集地幔的

基性岩浆熔体的混合,这两种熔体的混合不仅使埃达克质岩浆的 K<sub>2</sub>O 含量增高,也从地幔中获取大量铜及其它金属和硫,而使其具备容纳大量金属铜和硫的能力,成为铜的成矿专属性岩浆岩系列。由此看来,在中国东部只有富钾的埃达克质岩石才有可能形成具有一定规模的斑岩型铜矿。

## 4 讨论

### 4.1 岩浆源区

中国东部中生代埃达克质岩的 Sr、Nd 同位素特征类似于古老地壳,因此,绝大多数学者都认为中国东部中生代埃达克岩源自下地壳或底侵玄武质岩石的部分熔融。汤泉花岗闪长岩的(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值为 0.7069 ~ 0.70822, <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 值范围为 0.10170 ~ 0.10275, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值为 0.512008 ~ 0.512032,以 183Ma 计算的 ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 -9.68 ~ -10.07,二阶段 Nd 模式年龄(T<sub>DM</sub>) 为 1.54 ~ 1.55Ga(Mao *et al.*, 2003)。目前有较可靠的年龄数据表明闽西南元古代麻源群形成的上限年龄为 1.9Ga,其下限年龄尚缺少可靠的年代学数据,中元古代马面群下部角斑岩中单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 1438 ~ 1100Ma(甘晓春等,1993),因此,汤泉花岗闪长岩与中国东南部元古代变质基性火山岩的 ε<sub>Nd</sub>(t) 和 T<sub>DM</sub> 模式年龄(凌洪飞等,1999)大致相近,在 ε<sub>Nd</sub>(t)-(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 图上汤泉岩体壳幔混合特征不明显(Mao *et al.*, 2003),结合其类似于富 Na<sub>2</sub>O 埃达克岩的元素地球化学特征,推断是地幔起源的玄武岩浆底侵到加厚的陆壳(≤45km)底部导致下地壳基性岩石(富 Na<sub>2</sub>O 的斜角闪岩)部分熔融形成的,并伴随铜、铁、铅、锌成矿作用。

四方岩体花岗闪长岩的(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 值为 0.70635 ~ 0.70898, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 值为 0.512306 ~ 0.512391,以 108Ma 和 105M 计算的 ε<sub>Nd</sub>(t) 值分别为 -5.24 和 -3.69, T<sub>DM</sub> 值分别为 1.33Ga 和 1.21Ga(毛建仁等,2002),在 ε<sub>Nd</sub>(t)-(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 图中明显与汤泉岩体不同,位于地幔与地壳延长线上,表明在成岩过程中有较多的地幔组分加入而具壳幔混合特征,致使 ε<sub>Nd</sub>(t) 值增大,而 T<sub>DM</sub> 值降低,晚期的斑岩体中幔源组分增加。据此,我们认为四方花岗闪长岩是元古代相当的地壳衍生物部分熔融的花岗质岩浆与来自于富集岩石圈地幔的基性岩浆混合作用的结果,在研究区和东南沿海地区较广泛产出的与其同时代高钾基性岩石(玄武岩、辉长岩、辉绿岩)高度富集 LREE 和 LILE,显示富集地幔来源的特征(周金城等,2000)。因此,与典型的埃达克岩不同,四方花岗闪长岩具有较高的 K<sub>2</sub>O 含量并伴随铜金成矿作用。紫金山强过铝岩体的(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 为 0.7130(闽西地质大队,1994,测试单位:



地科院地质所),其典型的高 K、Rb、Th、Y 和低 Sr、Ba 含量,表明应是元古代沉积变质泥岩部分熔融的产物,形成过程中可能存在强烈的熔体与流体相互作用(Zhao *et al.*, 2002)。弱过铝质才溪二长花岗岩体目前还缺少 Sr-Nd 同位素数据,就其元素地球化学特征而言,更多地接近于壳幔混合源花岗岩,与四方岩体相比,其中的幔源组分比例较低。

#### 4.2 构造环境演化

在秦岭-大别山地区,华北与华南陆块间的碰撞-变质峰期大约在 258 ~ 230Ma (Ames *et al.*, 1993; Carter *et al.*, 2001),在 230 ~ 200Ma,华南陆块内的碰撞-挤压形成壳源型花岗岩(如粤北下庄、长沙、帽峰过铝花岗岩年龄为 228.0 ~ 207Ma(孙涛, 2003))。近几年来,在南岭东段陆续有早、中侏罗世基性-超基性岩、碱性玄武岩、双峰式火山岩和 A 型花岗岩岩浆活动的年龄报道(许美辉, 1992; 赵振华等, 1998; 陈培荣, 1999; 邢光福等, 2001; Mao *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003); 在湘东南宝山、水口,铜山岭具幔源贡献的高钾花岗闪长岩体的年龄为 173.3 ~ 178.9(王岳军等, 2000); 桂东南钾玄质侵入岩带花山、牛庙、马山等花岗闪长岩体的年龄为 160 ~ 164Ma(李献华等, 1999),表明华南地区陆块内的碰撞促使地壳加厚后,自 200Ma 以后,已开始有软流圈物质上升导致岩石圈拉张减薄、幔源岩浆活动的记录,具幔源岩浆活动的相对活跃期是 180 ~ 160Ma。但总体来讲规模不大,仅呈线型局限展布于南岭东段和十万大山-杭州带等(Gildes *et al.*, 1991, 1996; Chen *et al.*, 1998),华南大部分地区还是处于加厚地壳区。目前的研究表明,180Ma 时华南地区不存在洋-陆或弧-陆俯冲碰撞作用的假设,同时已有研究表明,具有岛弧型微量元素特征的钙碱性岩石也可产于大陆板内环境(Leat *et al.*, 1988; Bergan *et al.*, 1988; Wybom, 1992)。据此,认为研究区汤泉花岗闪长岩不可能形成于岛弧构造环境,而是在地幔底侵条件下,经加厚的基性下地壳( $\leq 45\text{km}$ )部分熔融所形成,玄武质岩浆的底侵作用仅为花岗闪长质岩浆的形成提供热源。汤泉岩体的热历史研究表明,182 ~ 162Ma 岩体处于缓慢冷却( $4.76^\circ\text{C}/\text{Ma}$ )相对挤压松弛阶段,162 ~ 158Ma 是在较快冷却速率( $50^\circ\text{C}/\text{Ma}$ )的拉张构造环境下固结成岩的,这样快的冷却速率与浙闽沿海地区晚中生代的古农和新村等岩体的冷却速率相当(Mao *et al.*, 2003)。玄武质岩浆的底侵作用为紫金山强过铝花岗岩的形成提供热源,促使地壳泥砂质岩石的部分熔融,是中侏罗世伸展机制的延续,其形成的构造环境与华南中侏罗世总体已处于岩石圈伸展的大构造背景相关。随着岩石圈伸展程度随时间而增强,自早白垩世早期地壳减薄,底侵作用可以使得地幔在“成分”

和“热”两方面为才溪花岗岩体形成提供条件,壳幔混合作用开始显现;自早白垩世晚期,随着扩张的进一步增强,地幔组分在花岗质岩浆的形成过程中贡献越益增大,四方岩体成岩过程中富集岩石圈地幔组分的加入引起  $\text{K}_2\text{O}$  含量增高以及  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和  $T_{\text{DM}}$  值降低,晚期的斑岩中幔源组分增高。从早-中侏罗世到早白垩世晚期,随着岩石圈伸展程度和玄武质底侵作用的增强,研究区的地壳厚度不断减薄。笔者认为,汤泉岩体和四方岩体的形成并不一定意味研究区始终存在加厚地壳。构造环境的演化,地幔组分的加入,埃达克质岩浆的演化等都会对岩石地球化学特征产生较大的影响。总体上来讲,汤泉岩体和四方岩体的源岩应是元古代相当的下地壳基性岩石,其残留相为含一定量的石榴子石和角闪石,形成的压力范围应接近石榴子石稳定线,大约为 0.9 ~ 1.3Mpa,温度为 800 ~ 1000 $^\circ\text{C}$ ,相当于 30 ~ 45km。

## 5 结论

(1) 本文研究了四个不同时代的花岗岩体:汤泉岩体(183 ~ 158Ma),紫金山岩体(157 ~ 145Ma),才溪岩体(133Ma)和四方岩体(108 ~ 105Ma),汤泉和紫金山岩体分别属于早中生代中、晚侏罗世,才溪和四方岩体为晚中生代早白垩世。

(2) 岩体的元素地球化学特征表明,富  $\text{Na}_2\text{O}$  的汤泉岩体和富  $\text{K}_2\text{O}$  的四方岩体都为  $A/\text{CNK} < 1.0$  的准铝质花岗岩类,因富 Ba、Sr,贫 HREE、Y、Yb 而都具有埃达克质岩石的地球化学特征, $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量不是埃达克质岩石的判别标准。紫金山花岗岩体为  $A/\text{CNK} > 1.1$  的强过铝花岗岩,并富 K、Rb、Th、Y、HREE,贫 Sr、Ba、Ti,具壳源花岗岩的特征。才溪岩体为  $A/\text{CNK}$  介于 1.0 ~ 1.1 的弱过铝花岗岩,其元素地球化学特征介于四方岩体和紫金山岩体之间。

(3) 汤泉岩体和四方岩体都具有与铜多金属成矿作用的亲缘性,富  $\text{Na}_2\text{O}$  的汤泉岩体是由于地幔起源的基性岩浆底侵作用导致加厚的元古代下地壳基性火山岩部分熔融形成的,是铜、铁多金属矿床成矿系列的主要含矿母岩;富  $\text{K}_2\text{O}$  的四方岩体是下地壳物质部分熔融形成的花岗质岩浆与富集地幔起源的富钾基性岩浆混合的结果,引起  $\text{K}_2\text{O}$  含量增高以及  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和  $T_{\text{DM}}$  值降低,同时从地幔中获取了大量的铜及其它金属和硫,成为斑岩型铜金多金属矿床成矿系列的主要含矿母岩。

(4) 汤泉岩体的形成指示研究区自中侏罗世(180Ma)以来已有岩石圈伸展的岩石学记录,随时间推移,岩石圈伸展减薄作用和底侵作用增强,地幔组分在花岗质岩浆的形成

过程中贡献增大,因此,埃达克质岩石的形成并不一定意味研究区始终存在加厚地壳,构造环境的演化,地幔组分的加入,埃达克质岩浆的演化等都会对岩石地球化学特征产生较大的影响。

**致谢** 感谢福建省地质矿产局刘富祥、马金清、张金水、陈云钊等同志在野外工作过程中提供的帮助,文中引用了张德全等同志的部分资料,在此表示感谢。

## References

- Ames L, Tilton G R, Zhou G Z. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogite. *Geology*, 21(4):339-343
- Barbarin B. 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids. *Geology*, 24(4): 295-298
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605-626.
- Bergan S C, Dunn D P, Krol L C. 1988. Rock and mineral chemistry of Linhaisai minette and the origin of Borneo diamonds, Central Kalimantan, Indonesia. *Can. Mineral.*, 26:23-44
- Carter A, Roques D, Bristow C. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29:211-214
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 4: 173-174
- Charvet J, Lapiere H, Yu Y. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China. *Southeast Asian Earth Sci.*, 68: 387-396
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Evidence from Sr, Nd and Pb isotopic composition of granitoids and sedimentary rocks. *Tectonophysics*, 284: 101-133.
- Chen P R, Kong X G, Wang Y X. 1995. Rb-Sr geochronology of the Mesozoic bi-model volcano-intrusive complexes in South Jiangxi and their significance. *Geological Journal of China University*, (4):378-383 (in Chinese with English abstract)
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662-665
- Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, Wang Q, Zhang Q, Xiao L. 2002. Adakites: some variations on a theme. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18: 129-142.
- Foley S, Amand N, Liu J. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28:181-185
- Gang X C, Li H M, Sun D Z. 1993. Study of the geochronology for Precambrian metamorphic bases in northern Fujian. *Fujian Geology*, 12(1): 17-31 (in Chinese with English abstract)
- Gilder S A, Keller G R, Luo M. 1991. Timing and spatial distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197: 225-243.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S. 1996. Isotopic and palaeomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J. Geophysical Res.*, 101(B7): 16,137-16,154.
- Holloway N H. 1982. North Palawan, Philippines—its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 66:1355-1383
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, Qu X M and Meng X L. 2003. Adakite, a possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan plateau and in Northern Chile. *Mineral Deposits*, 22(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Hsu K J, Li J L, Chen H H, Pen H P and Senger A M C. 1988. Mesozoic overthrust tectonics in South China. *Geology*, 16: 418-421
- Hsu K J, Li J L, Chen H H, Pen H P and Senger A M C. 1990. Tectonics of south China: Key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 183:9-39
- Huang X, Sun S H, DePaolo C J. 1986. Nd-Sr isotope study of Cretaceous magmatic rocks from Fujian province. *Acta Petrologica Sinica*, 2(2): 50-63 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Chen P Y, Yen T P. 1976. Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86:763-776.
- Kirkham R V and Sinclair W D. 1995. Porphyry copper, gold, molybdenum, tungsten, tin and silver. *Geology of Canadian mineral deposit type*. *Delo. N. Am.*, P1:421-426
- Lan C Y, Jahn B M, Mertzman S A. 1996. Subduction-related granite of Taiwan. *Southeast Asian Earth Sci.*, 14: 11-28
- Leat P T, Thompson N R, Morrison M A. 1988. Silitic magma derived by fractional-crystallization from Miocene Minette, Elkhend Mountain, Colorado. *Mineral. Magazine*, 52:577-586
- Li X H. 1999. Cretaceous magmatic activity and lithosphere extension in South China:—constraining on geochronology and geochemistry. Edited by Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing: Sciences Press. 264-275 (in Chinese)
- Li X H, Zhou H W, Liu Y, Lee C Y, Su M, Chen C H. 1999. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry. *Chinese Sci. Bull.*, 44(18): 1992-1998 (in Chinese)
- Li X H, Zhou H, Liu Y, Lee C Y, Sun M, and Chen C H. 2000. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochronology. *Chinese Science Bulletin*, 45:653-658
- Li X H, Chen Z G, Liu D Y, Li W X. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from Southern Jiangxi province, SE China: age, origin and tectonic significance. *International Geology Review*, 45:1-24
- Li Z Y, Huang Z Z, Li X Z. 1998. Discussion of Mesozoic-Cenozoic mantle plume tectonic and Uranium mineralization in South China. *Mineral Deposits*, 17(sup.):99-102 (in Chinese with English abstract)
- Ling H F, Shen W Z, Huang X L. 1999. Nd and Sr isotopic compositions of granitoids of Fujian and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 255-262 (in Chinese with English abstract)
- Mao J R, Tao K Y, Chen S Y. 1998. The granitic magmatism and mineralization in southwestern Fujian. *Volcanology & Mineral Resources*, 19(4): 311-320 (in Chinese with English abstract)

- Mao J R, Tao K Y, Xing G F, Yang Z L, Zhao Y. 1999a. Petrological records of the Mesozoic-Cenozoic mantle plume tectonics in epicontinental area of Southeast China. *Bulletin of Chinese Academy of Geological Sciences*, 20(3):253 - 258 ( in Chinese with English abstract )
- Mao J R, Tao K Y, Xing G F, Yang Z L, Zhao Y. 1999b. Geochemical evidence for Cenozoic mantle plume in the South China. *Geological Review*, 45( sup ):698 - 702 ( in Chinese with English abstract )
- Mao J R, Tao K Y, Li J Y, Xie F G, Xu N Z. 2002. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton, southwestern Fujian, and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 18(04):449 - 458 ( in Chinese with English abstract )
- Mao J R, Xu N Z, Hu Q, Li J Y, Tao K Y. 2003. Geochronology and geochemical characteristics in Early Mesozoic Tangquan pluton, southwestern Fujian, and their tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 77(3):361 - 371
- Mao J W, Li H Y, Pei R F. 1998. Study of Nd-Sr isotopics for Qianlishan granite and petrogenesis. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 14(3):235 - 242 ( in Chinese with English abstract )
- Miller C, Schuster R, Klotzli U. *et al.* 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40(9):1399 - 1424.
- Oyarzun R, Marquez A, Lillo J. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposita*, 36:794 - 798
- Pitcher W S. Granite type and tectonic environment. Hsu K J. 1983. *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 19 - 40.
- Searle M P, Parrish R R, Hodges K V. 1997. Shisha Pangma leucogranite, south Tibetan Himalaya: field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement. *Journal of Geology*, 105: 295 - 317
- Shi L Y, Gao T J. 1998. The forecast of large scale hidden copper deposits in Fujian. *Fuzhou: Map Publishing House of Fujian*, 104 - 112 ( in Chinese )
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29 - 44
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. 1997. Gisements epithermaux et porphyriques: la connexion adakite. *Earth Planet. Sci.*, 325: 103 - 109.
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, Li X. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in Southeast Hunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1):169 - 175 ( in Chinese with English abstract )
- Wu F Y, Ge W C and Sun D M. 2002. The definition, discrimination of adakites and their geological role. Edited by Xiao QH *et al.*, Beijing: Geological Publishing House:172 - 191 ( in Chinese )
- Wyborn D. 1992. The tectonic significance of Ordovician magmatism in the eastern Lachlan Fold Belt. *Tectonophysics*, 214:177 - 192.
- Xie D K, Ma R S, Zhang Y S. 1996. Continental crust growth in South China and mantle tectonics. Beijing: Geological Publishing house ( in Chinese )
- Xie D K, Mao J R, Pen W Z. 1997. The petrological strata in South China and continental dynamics. *Chinese Journal of Geophysics*, 40:153 - 163 ( in Chinese with English abstract )
- Xie G Q, Hu R Z, Zhao J H. 2001. Discussion of relationship with mantle plume and large scale mineralization in southeastern China. *Tectonic and Mineralization*, 25(2):179 - 186 ( in Chinese with English abstract )
- Xing G F, Yang Z L, Tao K Y. 2001. Study of the stratified basic-ultrabasic pluton of Early-Jurassic in Meizhou, Guangdong. *Bulletin Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(3):172 - 175 ( in Chinese with English abstract )
- Xu M H. 1992. The Early Jurassic bi-model volcanic rocks and their tectonic environment. *Fujian Geology*, 2:115 - 125 ( in Chinese )
- Zhang D Q, She H Q, Yan S H, Xu W Y. 2001. Geochemistry of Mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion. *Geological Review*, 47(6):608 - 616 ( in Chinese with English abstract )
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q. 2001. The characteristics of adakites in East China and their tectonic-mineralization significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17:236 - 244 ( in Chinese with English abstract )
- Zhao Z H, Bao Z W, Zhang B Y. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basalts in South Hunan. in Chinese Science Chinese ( D ), 28 ( sup ):7 - 14 ( in Chinese )
- Zhao Z H, Xiong X L, Han X D. 2002. Control on the REE tetrad effect in granites: Evidence from the Qianlishan and Baerzhe Granites, China. *Geochemical Journal*. 36: 527 - 543
- Zhou J C and Chen R. 2000. Late Mesozoic interaction between crust and mantle in coastal area of Zhejiang-Fujian. *Progress in Natural Science*, 10(9):713 - 717 ( in Chinese with English abstract )
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in SE China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magma. *Tectonophysics*, 326: 269 - 287

### 附中文参考文献

- 陈培荣,孔兴功,王银喜. 1995. 赣南燕山期双峰式火山-侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义. *高校地质学报*, (4):378 - 383
- 侯增谦,莫宣学,高永丰,曲晓明,孟祥金. 2003. 埃达克岩:斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩. *矿床地质*, 22(1):1 - 12
- 黄萱,孙世华,DePaolo D J. 1986. 福建省白垩纪岩浆岩 Nd、Sr 同位素研究. *岩石学报*, 2: 28 - 36
- 甘晓春,李惠民,孙大中. 1993. 闽北前寒武纪基底的地质年代学研究. *福建地质*, 12(1):17 - 31
- 李献华,周汉文,刘颖. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. *科学通报*, 44(18):1992 - 1998
- 李献华. 1999. 华南白垩纪岩浆活动与岩石圈伸展 - 地质年代学和地球化学制约. 中国科学院地球化学研究所编. 资源环境与可持续发展. 北京:科学出版社, 264 - 275
- 凌洪飞,沈渭洲,黄小龙. 1999. 福建省花岗岩类 Nd, Sr 同位素特征及其意义. *岩石学报*, 15(2):255 - 262
- 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. *矿床地质*, 17(增刊):99 - 102
- 谢桂青,胡瑞忠,赵军红. 2001. 中国东南部地幔柱及其与中生代大规模成矿关系初探. *大地构造与成矿学*, 25(2):179 - 186
- 毛建仁,陶奎元,陈三元. 1998. 闽西南花岗岩质岩浆作用与成矿. *火山*

- 地质与成矿,19(4):311-320
- 毛建仁,陶奎元,邢光福,杨祝良,赵宇. 1999a. 中国东南大陆边缘中新世地幔柱活动的岩石记录. 地球学报,20(3):253-258
- 毛建仁,陶奎元,邢光福,赵宇,杨祝良. 1999b. 中国南方新生代地幔柱活动的地球化学证据. 地质论评,45(增刊):698-702
- 毛建仁,陶奎元,李寄嶠,谢芳贵,许乃政. 2002. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报,18(04):449-458
- 毛景文,李红艳,裴荣富. 1998. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究. 岩石矿物学杂志,14(3):235-242
- 石礼炎,高天均. 1998. 福建省大型隐伏铜矿床预测. 福州:福建省地图出版社,104-112
- 王岳军,范蔚茗,郭峰,李旭. 2001. 湘东南中生代花岗闪长质小岩体的岩石地球化学特征. 岩石学报,3(9):745-751
- 吴福元,葛文春,孙德有. 2002. 埃达克岩的概念、识别标志及其地质意义. 肖庆辉等编. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社,172-191
- 谢寰克,马荣生,张禹慎. 1996. 华南大陆化壳生长过程与地幔柱构造. 北京:地质出版社,1-257
- 谢寰克,毛建仁,彭维震. 1997. 华南岩石层与大陆动力学. 地球物理学报,40:153-163
- 邢光福,杨祝良,陶奎元. 2001. 广东梅州早侏罗世层状基性-超基性岩体研究. 矿物岩石地球化学通报,20(3):172-175
- 许美辉. 1992. 福建永定地区早侏罗世双峰式火山岩及其构造环境. 福建地质,2:115-125
- 赵振华,包志伟,张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学(D辑),28(增刊):7-14.
- 张德全,余宏全,阎升好,徐文艺. 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. 地质论评,47(6):608-616
- 张旗,王焰,钱青. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石学报,17:236-244
- 周金城,陈荣. 2000. 浙闽沿海晚中生代壳幔作用研究. 自然科学进展,10(6):571-574