

福建紫金山矿田浸铜湖矿床石英正长斑岩锆石 U-Pb 年代学及其岩石地球化学特征*

武丽艳 胡瑞忠 齐有强 朱经经

WU LiYan, HU RuiZhong, QI YouQiang and ZHU JingJing

中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550002

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Guiyang 550002, China

2013-08-16 收稿, 2013-10-20 改回.

WU LY, HU RZ, QI YQ and ZHU JJ. 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical characteristics of quartz syenite porphyry from Jintonghu deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4151-4166

Abstract The Jintonghu porphyry Cu (Mo) deposit locates in the northeastern Zijinshan ore field. Whole-rock major, rare and trace elements, Nd isotopic composition and zircon LA-ICP-MS U-Pb age of quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit are analyzed in this paper. The major elements results show that the contents of SiO₂ and alkali range from 57.59% to 71.19% and 7.73% to 10.01%, respectively. The Rittmann Index and Aluminum Saturation Index are from 2.21 to 6.05 and 1.24 to 1.53 respectively, indicating that the rock belong to peraluminous and high-K calc-alkaline series. The quartz-syenite porphyry have Σ REE range from 152×10^{-6} to 212×10^{-6} , and negative Eu anomalies ($Eu/Eu^* = 0.71 \sim 0.97$), with $(La/Yb)_N$ values from 16.62 to 33.49, exhibiting relative LREE enrichment and HREE depletion. Compared to primitive mantle values, all the rocks are enriched in LILEs and depleted in HFSEs (Nb, Ta, P, Ti). The geochemical results show characteristic of arc volcanic rock. The low $\varepsilon_{Nd}(t)$ values and low Nd isotopic model ages, which range from -6.60 to -4.37 and from 1.25Ga to 1.43Ga respectively, indicate the characteristic of crust-mantle interaction. In situ zircon U-Pb LA-ICP-MS dating on the two quartz-syenite porphyry samples yielded ages of 95.3 ± 0.9 Ma and 96.7 ± 0.9 Ma. Combined with former researches, we conclude that the quartz-syenite porphyry formed in an extensional tectonic setting, and was a product of mixing of lithospheric mantle material (modified or influenced by subduction components) and granitic magma (derived from partial melting of middle and lower crust).

Key words Zircon U-Pb dating; Quartz-syenite porphyry; Jintonghu deposit; Zijinshan ore field; South China

摘要 浸铜湖斑岩铜(钼)矿床位于福建紫金山矿田的北东侧,本文分析了出露于该矿床的石英正长斑岩的主量元素、稀土和微量元素组成, Nd 同位素组成, 并对其进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年。研究结果显示, 岩石 SiO₂ 含量变化于 57.59% ~ 71.19%, 岩石全碱含量为 7.73% ~ 10.01%, 里特曼指数 σ 为 2.21 ~ 6.05, 铝饱和指数 A/CNK 为 1.24 ~ 1.53, 为过铝质、高钾钙碱性系列。稀土元素总量为 152×10^{-6} ~ 212×10^{-6} , 具有弱 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.71 \sim 0.97$), $(La/Yb)_N$ 为 16.62 ~ 33.49, 表现出轻稀土富集, 重稀土亏损。微量元素具有亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 富集大离子亲石元素的特点, 显示弧岩浆作用特点。岩石具有低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和低的 Nd 模式年龄, 分别为 -6.60 ~ -4.37 和 1.25 ~ 1.43Ga, 显示壳-幔相互作用特征。对石英正长斑岩两个样品的锆石进行激光探针等离子体质谱(LA-ICP-MS) U-Pb 微区测定, 结果分别为 95.3 ± 0.9 Ma 和 96.7 ± 0.9 Ma, 为晚白垩世早期岩浆活动产物。结合已有的研究成果, 本文认为石英正长斑岩形成于拉张的构造背景之下, 由受到俯冲组分改造或影响的岩石圈地幔物质与中、下地壳物质部分熔融形成的花岗岩岩浆混合形成。

关键词 锆石 U-Pb 年龄; 石英正长斑岩; 浸铜湖矿床; 紫金山矿田; 华南

中图法分类号 P588.133; P597.3

* 本文受国家 973 项目(2012CB416705)、国家自然科学基金项目(41103023)和中国科学院“百人计划”项目联合资助。

第一作者简介: 武丽艳, 女, 1981 年生, 博士, 副研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: wuliyan@mail.gyig.ac.cn

紫金山矿田位于福建省上杭县境内,属于典型的斑岩-浅成低温热液成矿系统(张德全等 2003;黄仁生 2008;邱小平等 2010),长期受到地质学家的广泛关注。中生代以来,紫金山地区火山-侵入岩浆活动频繁,构成了一个比较完整的中酸性火山-侵入岩系列(张德全等 2001)。紫金山铜金矿田主要与早白垩世岩浆活动有关,他形成于区域挤压转换到拉伸的构造环境(张德全等 2001;赵希林等 2007;李晓峰等 2008)。以往研究多集中在与成矿作用关系密切的四坊花岗闪长岩、英安玢岩、萝卜岭岩体以及紫金山复式岩体和才溪岩体等,对其成岩时代(周肃和陈好寿,1996;张德全等,2001;赵希林等,2007;2008;胡春杰等,2012;毛建仁等,2002a;黄文婷等,2013)、岩石和矿物地球化学特征(周玲棣和王扬传,1991;赵希林等 2007,2008,2009,2010)等进行了研究,并在岩浆成因(周玲棣和王扬传,1991;赵希林等,

2009)、构造演化(张德全等 2001;毛建仁等 2002b)以及成矿成矿的关系(张德全等 2001,2003;黄仁生 2008)等方面取得了重要进展。但对区内的脉岩研究相对较少,在一定程度上,严重制约了人们对该区岩浆演化序列、源区演化以及构造背景演化等方面的全面认识。

在详细野外考察的基础上,本文对浸铜湖矿床出露的石英正长斑岩,进行了主、微量元素分析、Nd 同位素测定及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年,系统研究了其岩相学特征、地球化学特征及侵入时代,在此基础上,探讨了其构造背景、源区特征及成因。

1 区域地质及矿床地质

福建省上杭县紫金山矿田位于华南褶皱系东部,闽西南

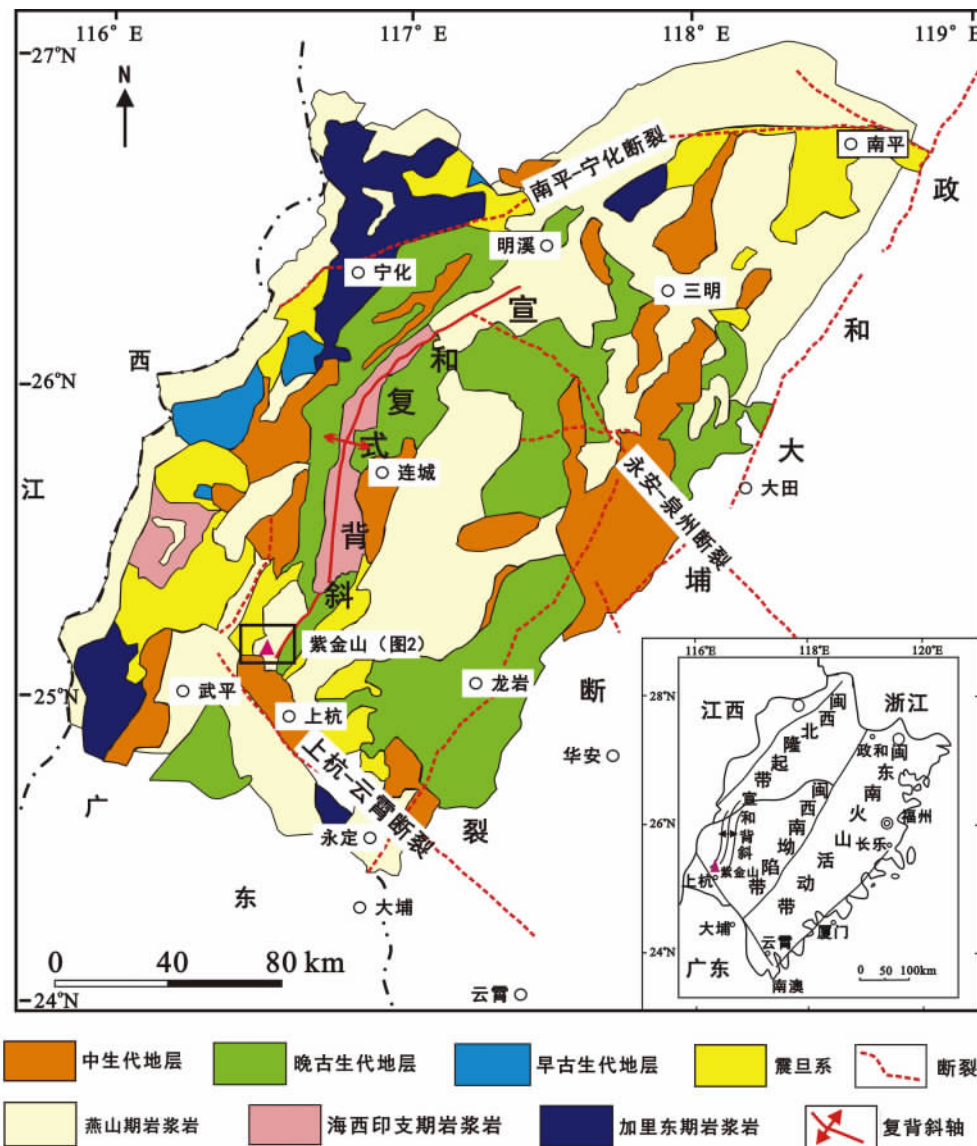


图1 紫金山矿田区域地质图(据钟军等 2011)

Fig.1 Regional geological map of the Zijinshan ore field, South China (modified after Zhong et al., 2011)

表1 紫金山矿田不同岩体的同位素年龄

Table 1 The ages of igneous rocks in the Zijinshan ore field

| 岩体名称 | 定年对象 | 定年方法 | 年龄值(Ma) | 数据来源 |
|------------|------|----------------|---------------------|------------|
| 紫金山复式岩体 | 锆石 | SURIMP U-Pb | 168 ± 4 | 赵希林等 2008 |
| 才溪二长花岗岩 | 锆石 | SHRIMP U-Pb | 150 ± 3 | 赵希林等 2007 |
| | 锆石 | LA-ICP-MS U-Pb | 146.4 ± 8.6 | 胡春杰等 2012 |
| 四坊花岗闪长岩 | 锆石 | LA-ICP-MS U-Pb | 107.8 ± 1.2 | 毛建仁等 2002a |
| | 角闪石 | Ar-Ar 坪年龄 | 104.8 ± 0.8 | |
| | 锆石 | LA-ICP-MS U-Pb | 104.8 ± 1.7 | 胡春杰等 2012 |
| | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 128 ± 12 | 周肃等, 1996 |
| 萝卜岭花岗闪长斑岩 | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 105 ± 7.2 | 张德全等 2001 |
| | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 135 ± 5 | 陈好寿等, 1994 |
| | 锆石 | LA-ICP-MS U-Pb | 早期 103.7 ± 1.2, | 黄文婷等 2013 |
| | | | 103.0 ± 0.9, | |
| | | | 晚期 97.6 ± 2.1 | |
| 白垩系石帽山群火山岩 | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 94 ± 7.7, 125 ± 9.8 | 张德全等 2001 |
| 英安玢岩 | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 73 ± 6 | 陈好寿, 1996 |
| | 锆石 | LA-ICP-MS | 105.0 ± 0.7 | 胡春杰等 2012 |
| 中寮花岗闪长岩 | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 128 ± 9 | 张德全等 2001 |
| 石英闪长玢岩 | 全岩 | Rb-Sr 等时线 | 102 ± 9 | 陈好寿等, 1994 |

上古生界拗陷之西南(图1), 云霄-上杭 NW 向深断裂带与宣和 NE 向复式背斜的交汇处, 上杭 NW 向的白垩纪火山-沉积盆地的东缘(陈景河, 1992; 余学东等, 1995; 黄崇珂等, 2001)。

紫金山矿田内出露地层主要有: 早震旦系楼子坝群浅海相变质细碎屑岩, 晚泥盆系天瓦寨组和桃子坑组浅海-滨海相碎屑岩, 早石炭系林地组滨海相碎屑岩, 早白垩系石帽山群英安质、粗安质、流纹质熔岩和火山碎屑岩, 及第四系砂砾岩。其中, 早震旦系楼子坝群构成紫金山地区的基底地层。上述地层构成北东向复式褶皱, 早震旦系分布于复式背斜核部, 上古生界地层依次于两翼呈北东向展布(陈景河, 1992; 黄崇珂等 2001)。

区域构造活动十分强烈, 以 NE 向、NW 向为主, 是紫金山地区早白垩世火山-侵入活动及 Cu、Au 矿化最重要的导矿和赋矿构造。区内褶皱主要有宣和复式背斜, 由震旦系和古生代地层构成(图1), 呈北东走向的“S”形展布。区内断裂, 具有成带性和近等距性分布特点。

矿田内中生代岩浆活动强烈, 发育多期次的中酸性岩浆活动, 从早到晚依次有: 紫金山复式岩体(包括逐美碎裂似斑状中粗粒花岗岩、五龙寺中细粒花岗岩和金龙桥细粒花岗岩)、才溪二长花岗岩、四坊花岗闪长岩及萝卜岭花岗闪长斑岩等(图2)。其中紫金山复式岩体出露于矿田的西南部, 呈侵入体产出; 才溪岩体侵入于紫金山岩体的东北部, 四坊岩体侵入于紫金山岩体东北部及才溪岩体西南部, 萝卜岭岩体在地表仅出露在四坊岩体中。白垩系石帽山群火山岩系不整合覆盖于紫金山花岗岩之上, 英安玢岩分布于紫金山矿田火山机构及其邻近大笄岗、二庙沟地区的紫金山复式岩体中(胡春杰等 2012)。以上火山-侵入岩的同位素年龄数据见表1。

紫金山矿田主要由紫金山高硫型铜金矿床、萝卜岭斑岩型铜钼矿床、悦洋低硫型银多金属矿床、浸铜湖斑岩铜(钼)矿床及五子骑龙铜矿、龙江亭铜矿等共同构成了紫金山斑岩-浅成热液成矿系统。其中, 浸铜湖斑岩铜(钼)矿位于紫金山矿田的北东侧(图2), 矿体主要赋存于花岗闪长斑岩与似斑状花岗闪长岩的内外接触带上。矿体走向北东-南西, 平面上呈半环形展布, 剖面上呈马鞍状。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿, 少量蓝辉铜矿, 极少方铅矿和闪锌矿; 其中黄铜矿占铜矿物总量的 99% 以上, 钼矿物仅有辉钼矿。矿石结构主要有半自形-自形、他形粒状结构、填隙结构、包含结构和交代残余结构等; 构造主要有浸染状构造、脉状构造、网脉状构造为主, 其次有角砾状构造。浸铜湖矿床蚀变发育, 自斑岩体中心向边部分别是: (弱) 钾化-绢英岩化蚀变带、(弱) 绿泥石化-绢英岩化蚀变带、高岭石化-黄铁绢英岩化蚀变带、地开石化-硅化蚀变带。其中铜(钼)矿体主要产于(弱) 钾化-绢英岩化蚀变带和(弱) 绿泥石化-绢英岩化蚀变带中(紫金矿业集团股份有限公司, 2013^①)。

浸铜湖矿床侵入岩约占矿段面积的 90%, 以中酸性岩体为主, 受北东向区域性构造带控制, 总体呈北东向展布。主要出露的岩体为燕山晚期的四坊岩体和萝卜岭岩体, 次为燕山早期的五龙寺岩体, 燕山晚期的中寮岩体和一部分脉岩。矿段内常见的脉岩有石英正长斑岩脉、英安玢岩脉、闪长岩脉、细粒花岗岩脉、基性岩脉等。其中石英闪长斑岩稍早于花岗闪长斑岩形成, 且经历同期蚀变和矿化。石英正长斑岩在地表出露较少, 个别钻孔在中深部有揭露。该脉岩视厚度介于几十厘米至四十米之间, 个别钻孔视厚度达 132.43m。

① 紫金矿业集团股份有限公司. 2013. 福建省上杭县紫金山外围浸铜湖矿段铜(钼)矿勘探实施方案

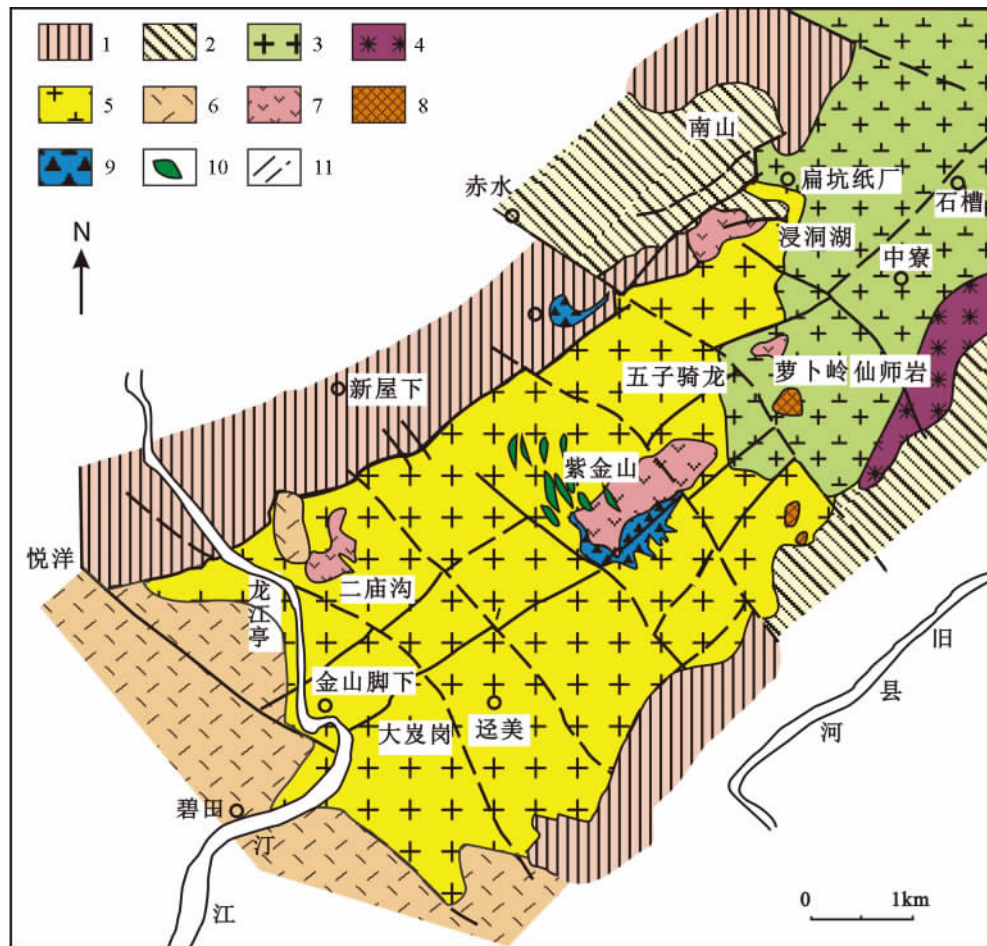


图2 紫金山矿田地质简图(据高天均和黄仁生,1998 修改)

1-震旦-寒武系变质细碎屑岩;2-泥盆-石炭系粗碎屑岩;3-燕山早期花岗岩;4-才溪二长花岗岩;5-四坊花岗闪长岩;6-早白垩世中酸性火山岩;7-英安玢岩;8-萝卜岭花岗闪长斑岩;9-引爆角砾岩;10-热液角砾岩;11-断层

Fig.2 Geological map of Zijinshan ore field, Fujian Province (modified after Gao and Huang, 1998)

该岩体侵入于似斑状花岗闪长岩、花岗闪长斑岩、花岗闪长岩(紫金矿业集团股份有限公司,2013)。

2 分析测试方法

本文研究所采样品石英正长斑岩位于紫金山矿田浸洞湖矿床公路旁的采石场。主量元素测试采用X荧光光谱法(XRF)在澳实分析检测(广州)有限公司完成。样品煅烧后加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2$ 助熔物,充分混合后,放置在自动熔炼仪中,使之在 1000°C 以上熔融;熔融物倒出后形成扁平玻璃片,再用X荧光光谱仪分析,分析精度好于1%。

微量元素和稀土元素在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,使用仪器为ELAN DRc-e型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度优于5%。实验流程如下:称取50mg样品放入带不锈钢外套的密封装置中,加入1mL HF,在电热板上蒸干以去掉大部分 SiO_2 ,再加入1mL HF和0.5mL HNO_3 ,加盖后放入烘箱中,在

200°C 下消解48h。取出冷却后在电热板上低温蒸干,加入1mL HNO_3 再蒸干,重复一次。最后加入2mL HNO_3 和5mL蒸馏水重新加盖后在 130°C 溶解残渣3h,再取出冷却后加入1mL $1\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ Rh的内标溶液,转移至50mL离心管中上机测试,具体分析过程见Qi and Gregoire(2000)。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。193nm ArF 准分子激光剥蚀系统由德国哥廷根 Lamda Physik 公司制造,型号为 GeoLasPro。电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)由日本东京安捷伦公司制造,型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面,束斑直径为 $44\mu\text{m}$,频率为3Hz,共剥蚀60s,剥蚀气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏,以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样,检验 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标,以 Si 为内标,标定锆石中 Pb 的元素含量(Liu et al., 2010a; Hu et al., 2011)。测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成

(Liu et al. 2010a, b)。

Nd 同位素前处理在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室超净室完成, 化学处理流程见 Yang et al. (2004)。Nd 同位素测试在天津地质调查中心完成, 采用热电离质谱(ID-TIMS), 仪器型号为美国 Thermo Fisher 公司生产的 TRITON。测试过程中采用¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正仪器质量歧视效应。

3 结果

3.1 岩相学特征

石英正长斑岩呈肉红色, 具有斑状结构、块状构造(图 3)。斑晶成分主要为钾长石(5% ~ 15%)、斜长石(5% ~ 10%)、石英(10% ~ 15%) 和黑云母(3% ~ 5%), 其中钾长石发育卡氏双晶, 以正长石为主, 部分钾长石斑晶以巨斑晶出现, 粒径 0.5 ~ 2cm。斜长石发育聚片双晶, 以钠长石为主, 石英具熔蚀港湾外形(图 3), 部分石英斑晶次生加大后呈浑圆状。基质主要由长英质矿物组成。

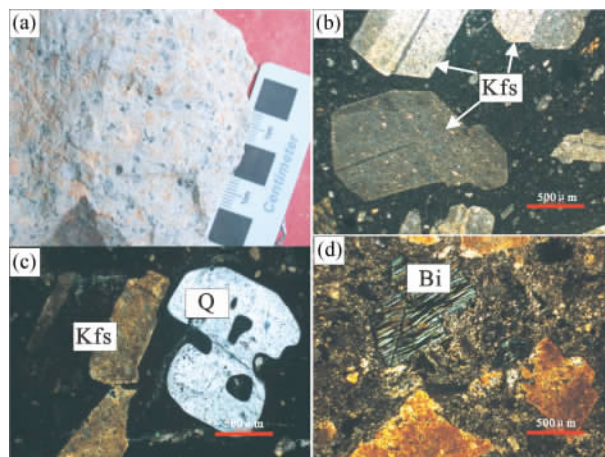


图 3 浸铜湖矿床石英正长斑岩岩石及显微照片

(a) 岩石手标本照片; (b、c、d) 正交偏光下照片。Q-石英; Kfs-钾长石; Bi-黑云母

Fig. 3 Photos and micrographs of quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province

表 2 浸铜湖矿床石英正长斑岩主量(wt%)、稀土和微量元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 2 Analyzed data of major (wt%), rare earth and trace elements (×10⁻⁶) of quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province

| 样品号 | CX-3-1 | CX-3-2 | CX-5-2 | CX-6 | CX-7 | CX-9-1 | CX-9-2 | CX-18-1 | CX-18-2 | CX-19-1 | CX-19-2 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | 71.19 | 69.46 | 69.05 | 70.90 | 69.52 | 65.77 | 59.55 | 64.09 | 66.49 | 57.59 | 58.09 |
| Al ₂ O ₃ | 14.07 | 13.67 | 13.76 | 13.93 | 13.85 | 15.03 | 18.39 | 14.83 | 14.90 | 15.14 | 15.14 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.03 | 2.17 | 2.36 | 2.16 | 2.37 | 3.24 | 3.80 | 3.28 | 2.69 | 5.75 | 5.38 |
| CaO | 1.33 | 1.86 | 1.68 | 1.24 | 1.54 | 2.04 | 2.68 | 2.91 | 1.91 | 3.63 | 3.39 |
| MgO | 0.58 | 0.57 | 0.70 | 0.64 | 0.60 | 1.20 | 1.53 | 1.11 | 0.81 | 4.17 | 2.52 |
| Na ₂ O | 3.04 | 2.65 | 3.63 | 3.37 | 3.51 | 4.73 | 6.81 | 5.09 | 2.82 | 4.59 | 4.56 |
| K ₂ O | 4.85 | 5.08 | 5.45 | 5.40 | 4.74 | 3.93 | 3.20 | 3.65 | 5.02 | 3.94 | 4.25 |
| Cr ₂ O ₃ | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |
| TiO ₂ | 0.32 | 0.30 | 0.35 | 0.36 | 0.34 | 0.57 | 0.64 | 0.55 | 0.44 | 0.79 | 0.74 |
| MnO | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.13 | 0.14 |
| P ₂ O ₅ | 0.113 | 0.102 | 0.136 | 0.134 | 0.137 | 0.212 | 0.250 | 0.200 | 0.157 | 0.265 | 0.252 |
| LOI | 1.83 | 2.25 | 1.73 | 1.62 | 1.87 | 2.22 | 2.97 | 2.76 | 3.10 | 3.46 | 3.99 |
| Total | 99.52 | 98.30 | 99.03 | 99.9 | 98.63 | 99.11 | 99.99 | 98.65 | 98.52 | 99.60 | 98.60 |
| AR | 3.1 | 2.98 | 3.86 | 3.74 | 3.31 | 3.06 | 2.81 | 2.94 | 2.75 | 2.67 | 2.81 |
| Na ₂ O + K ₂ O | 7.89 | 7.73 | 9.08 | 8.77 | 8.25 | 8.66 | 10.01 | 8.74 | 7.84 | 8.53 | 8.81 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 1.60 | 1.92 | 1.50 | 1.60 | 1.35 | 0.83 | 0.47 | 0.72 | 1.78 | 0.86 | 0.93 |
| A/CNK | 1.53 | 1.43 | 1.28 | 1.39 | 1.41 | 1.40 | 1.45 | 1.27 | 1.53 | 1.25 | 1.24 |
| σ | 2.21 | 2.26 | 3.16 | 2.76 | 2.57 | 3.29 | 6.05 | 3.62 | 2.62 | 4.99 | 5.14 |
| Li | 18.6 | 19.6 | 22.2 | 21.1 | 20.6 | 74.2 | 58.0 | 47.7 | 49.6 | 137 | 68.1 |
| Be | 3.02 | 2.85 | 2.57 | 2.97 | 3.14 | 2.64 | 3.99 | 3.04 | 2.52 | 2.76 | 2.29 |
| Sc | 5.74 | 5.22 | 6.16 | 5.74 | 5.09 | 7.73 | 9.39 | 8.07 | 7.00 | 2.06 | 15.9 |
| V | 27.4 | 26.6 | 30.8 | 32.9 | 32.0 | 58.6 | 65.3 | 56.7 | 57.6 | 40.3 | 132 |
| Cr | 8.15 | 9.00 | 9.88 | 8.29 | 6.87 | 10.1 | 10.5 | 16.9 | 15.7 | 5.26 | 60.1 |
| Co | 3.31 | 2.85 | 3.69 | 3.16 | 3.08 | 6.08 | 6.60 | 6.57 | 6.29 | 3.97 | 18.6 |
| Ni | - | - | - | - | - | - | - | 0.93 | - | - | 15.6 |
| Cu | 39.7 | 4.61 | 1.60 | 2.14 | 6.65 | 8.12 | 11.5 | 8.61 | 8.27 | 1.25 | 20.2 |
| Zn | 53.7 | 46.3 | 77.1 | 60.1 | 60.6 | 83.7 | 275 | 97.3 | 99.9 | 68.2 | 110 |
| Ga | 18.1 | 18.4 | 16.9 | 18.9 | 20.0 | 19.5 | 24.3 | 20.4 | 19.6 | 20.5 | 16.6 |

续表 2

Continued Table 2

| 样品号 | CX-3-1 | CX-3-2 | CX-5-2 | CX-6 | CX-7 | CX-9-1 | CX-9-2 | CX-18-1 | CX-18-2 | CX-19-1 | CX-19-2 |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Ge | 1.13 | 1.19 | 0.74 | 0.93 | 1.11 | 1.19 | 1.08 | 1.33 | 1.44 | 0.87 | 1.81 |
| As | 14.8 | 15.4 | 15.2 | 16.3 | 14.8 | 14.8 | 14.1 | 17.6 | 18.5 | 16.5 | 18.0 |
| Rb | 163 | 172 | 173 | 189 | 171 | 137 | 146 | 127 | 129 | 141 | 143 |
| Sr | 349 | 331 | 258 | 261 | 277 | 326 | 315 | 263 | 275 | 161 | 365 |
| Y | 14.8 | 14.6 | 11.1 | 10.1 | 10.9 | 9.80 | 12.2 | 10.3 | 10.6 | 11.4 | 22.6 |
| Zr | 154 | 129 | 131 | 131 | 136 | 139 | 151 | 142 | 146 | 193 | 152 |
| Nb | 13.2 | 13.7 | 12.0 | 12.7 | 12.2 | 11.4 | 12.5 | 11.3 | 11.2 | 12.5 | 13.5 |
| Mo | 0.59 | 1.07 | 1.62 | 0.39 | 0.38 | 0.46 | 0.39 | 1.00 | 0.95 | 0.55 | 0.77 |
| Ag | 0.92 | 0.35 | 0.60 | 0.27 | 0.41 | 0.23 | 0.70 | 0.51 | 0.53 | 0.41 | 0.35 |
| Cd | 0.07 | 0.03 | 0.10 | 0.07 | 0.06 | 0.04 | 1.93 | 0.08 | 0.06 | 0.10 | 0.20 |
| In | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.04 |
| Sn | 2.02 | 1.42 | 1.54 | 1.51 | 1.47 | 1.35 | 1.60 | 1.58 | 1.64 | 2.07 | 1.90 |
| Sb | 0.16 | 0.07 | 0.13 | 0.04 | 0.07 | 0.12 | 0.31 | 0.26 | 0.19 | 0.14 | 0.20 |
| Cs | 3.84 | 3.96 | 2.17 | 3.52 | 3.78 | 4.75 | 5.46 | 2.80 | 2.92 | 7.08 | 4.34 |
| Ba | 892 | 991 | 1030 | 921 | 866 | 892 | 743 | 889 | 905 | 1147 | 996 |
| Hf | 4.35 | 3.70 | 3.70 | 3.88 | 3.62 | 3.77 | 3.99 | 3.71 | 3.50 | 4.92 | 3.89 |
| Ta | 1.18 | 1.15 | 1.10 | 1.09 | 1.16 | 1.00 | 1.16 | 1.04 | 1.02 | 0.90 | 1.14 |
| W | 2.40 | 1.33 | 1.38 | 1.37 | 1.53 | 1.79 | 6.32 | 2.50 | 2.76 | 4.40 | 2.95 |
| Tl | 1.12 | 1.15 | 1.42 | 1.40 | 0.98 | 0.80 | 0.95 | 0.98 | 1.00 | 1.01 | 0.92 |
| Pb | 37.0 | 24.0 | 33.9 | 20.8 | 20.9 | 20.5 | 22.3 | 27.7 | 25.1 | 20.1 | 18.0 |
| Bi | 0.48 | 0.08 | 1.01 | 0.08 | 0.19 | 0.09 | 0.23 | 0.26 | 0.18 | 0.17 | 0.10 |
| Th | 14.5 | 15.4 | 15.8 | 16.8 | 15.4 | 11.9 | 13.2 | 11.6 | 12.1 | 11.1 | 9.93 |
| U | 2.99 | 3.28 | 4.17 | 3.48 | 3.26 | 3.15 | 3.47 | 2.90 | 2.92 | 4.76 | 2.66 |
| La | 36.4 | 41.8 | 37.5 | 41.6 | 42.2 | 38.1 | 40.2 | 39.4 | 40.6 | 41.0 | 46.4 |
| Ce | 69.1 | 75.2 | 69.0 | 77.0 | 74.7 | 72.7 | 81.0 | 75.3 | 75.8 | 76.5 | 90.7 |
| Pr | 7.33 | 7.88 | 7.37 | 8.03 | 8.17 | 7.88 | 8.99 | 8.36 | 8.49 | 8.54 | 10.8 |
| Nd | 25.5 | 27.2 | 25.9 | 27.6 | 28.2 | 29.3 | 33.4 | 30.7 | 30.6 | 30.9 | 40.9 |
| Sm | 4.10 | 4.21 | 3.83 | 4.17 | 4.32 | 4.55 | 5.29 | 4.65 | 4.83 | 4.76 | 6.50 |
| Eu | 0.92 | 0.86 | 0.84 | 0.90 | 0.93 | 1.25 | 1.36 | 1.31 | 1.26 | 1.05 | 1.60 |
| Gd | 3.28 | 2.96 | 2.78 | 2.71 | 3.02 | 3.04 | 3.71 | 3.35 | 3.10 | 2.93 | 4.60 |
| Tb | 0.48 | 0.48 | 0.41 | 0.39 | 0.40 | 0.44 | 0.54 | 0.48 | 0.39 | 0.40 | 0.69 |
| Dy | 2.49 | 2.48 | 1.89 | 1.76 | 1.78 | 1.83 | 2.20 | 1.87 | 1.90 | 2.13 | 3.95 |
| Ho | 0.49 | 0.49 | 0.34 | 0.33 | 0.35 | 0.35 | 0.43 | 0.36 | 0.33 | 0.38 | 0.78 |
| Er | 1.43 | 1.46 | 1.01 | 0.93 | 1.02 | 1.01 | 1.14 | 0.97 | 0.99 | 1.22 | 2.34 |
| Tm | 0.21 | 0.21 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.13 | 0.16 | 0.13 | 0.13 | 0.16 | 0.35 |
| Yb | 1.51 | 1.49 | 0.91 | 0.91 | 0.98 | 0.82 | 0.92 | 0.85 | 0.93 | 0.99 | 2.00 |
| Lu | 0.24 | 0.23 | 0.15 | 0.15 | 0.14 | 0.11 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.15 | 0.33 |
| ΣREE | 153.5 | 167.0 | 152.1 | 166.6 | 166.4 | 161.5 | 179.5 | 167.9 | 169.5 | 171.0 | 211.9 |
| LREE | 143.4 | 157.2 | 144.4 | 159.3 | 158.5 | 153.8 | 170.2 | 159.7 | 161.5 | 162.7 | 196.8 |
| HREE | 10.14 | 9.80 | 7.63 | 7.31 | 7.84 | 7.72 | 9.24 | 8.13 | 7.91 | 8.36 | 15.04 |
| LREE/HREE | 14.14 | 16.03 | 18.92 | 21.78 | 20.21 | 19.91 | 18.43 | 19.64 | 20.41 | 19.45 | 13.08 |
| (La/Yb) _N | 17.29 | 20.12 | 29.46 | 32.68 | 31.05 | 33.49 | 31.31 | 33.33 | 31.32 | 29.80 | 16.62 |
| Eu/Eu* | 0.74 | 0.71 | 0.75 | 0.77 | 0.75 | 0.97 | 0.89 | 0.97 | 0.93 | 0.80 | 0.85 |
| Ce/Ce* | 0.98 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.92 | 0.97 | 1.00 | 0.97 | 0.95 | 0.95 | 0.96 |
| Zr/Hf | 35.40 | 34.86 | 35.41 | 33.76 | 37.57 | 36.87 | 37.84 | 38.27 | 41.58 | 39.22 | 39.06 |
| Nb/Ta | 11.19 | 11.95 | 10.88 | 11.63 | 10.54 | 11.35 | 10.78 | 10.83 | 10.98 | 13.91 | 11.88 |

3.2 岩石地球化学

石英正长斑岩的 SiO₂ 含量变化于 57.59% ~ 71.19% (表 2), 平均 65.61%, 属于中酸性岩类; Al₂O₃ 含量介于 13.7% ~ 18.4% 之间, 平均 14.79%; 岩石全碱(K₂O + Na₂O)

含量为 7.73% ~ 10.01%, 平均 8.57%; K₂O/Na₂O = 0.47 ~ 1.92, 平均值为 1.23; MgO、CaO 和 Fe₂O₃^T 含量分别为 0.57% ~ 4.17%, 1.24% ~ 3.63% 和 2.03% ~ 5.75%; 岩石具低 Ti (TiO₂ = 0.30% ~ 0.79%)、富 Al (Al₂O₃ = 13.67% ~ 18.39%) 等特征。里特曼指数 σ 为 2.21 ~ 6.05, 平均 3.5,

表3 浸铜湖矿床石英正长斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb results for the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province

| 测点号 | ²⁰⁶ Pb | ²³² Th | ²³⁸ U | Th/U | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U | | ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U | | ²⁰⁸ Pb/ ²³² Th | |
|---------|----------------------|-------------------|------------------|------|--------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|
| | (×10 ⁻⁶) | | | | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | 比值 | 1σ | (Ma) | 1σ | (Ma) | 1σ | (Ma) | 1σ |
| CX-6-1 | 11.58 | 447 | 582 | 0.8 | 0.0517 | 0.0027 | 0.0948 | 0.0050 | 0.0147 | 0.0003 | 272 | 119 | 91.9 | 4.6 | 93.8 | 1.7 |
| CX-6-2 | 13.58 | 709 | 653 | 1.1 | 0.0470 | 0.0032 | 0.0953 | 0.0091 | 0.0145 | 0.0003 | 55.7 | 156 | 92.4 | 8.4 | 92.8 | 1.7 |
| CX-6-3 | 16.93 | 734 | 750 | 1.0 | 0.0525 | 0.0025 | 0.1034 | 0.0052 | 0.0155 | 0.0002 | 306 | 109 | 99.9 | 4.8 | 98.8 | 1.5 |
| CX-6-4 | 15.51 | 636 | 789 | 0.8 | 0.0500 | 0.0034 | 0.0994 | 0.0092 | 0.0145 | 0.0002 | 195 | 156 | 96.3 | 8.5 | 92.8 | 1.5 |
| CX-6-5 | 12.36 | 500 | 608 | 0.8 | 0.0482 | 0.0032 | 0.0949 | 0.0069 | 0.0149 | 0.0002 | 109 | 152 | 92.1 | 6.4 | 95.6 | 1.5 |
| CX-6-6 | 12.07 | 393 | 591 | 0.7 | 0.0502 | 0.0032 | 0.1030 | 0.0083 | 0.0153 | 0.0003 | 206 | 145 | 99.5 | 7.7 | 98.0 | 1.6 |
| CX-6-7 | 14.36 | 541 | 702 | 0.8 | 0.0467 | 0.0034 | 0.0993 | 0.0097 | 0.0154 | 0.0003 | 35.3 | 163 | 96.2 | 8.9 | 98.8 | 1.7 |
| CX-6-8 | 15.25 | 729 | 699 | 1.0 | 0.0509 | 0.0031 | 0.1000 | 0.0073 | 0.0148 | 0.0002 | 239 | 136 | 96.8 | 6.7 | 94.9 | 1.5 |
| CX-6-9 | 12.34 | 394 | 640 | 0.6 | 0.0465 | 0.0033 | 0.0946 | 0.0087 | 0.0151 | 0.0003 | 33.4 | 150 | 91.8 | 8.1 | 96.6 | 1.8 |
| CX-6-10 | 10.55 | 354 | 538 | 0.7 | 0.0527 | 0.0044 | 0.1036 | 0.0097 | 0.0152 | 0.0003 | 317 | 189 | 100 | 8.9 | 97.1 | 1.7 |
| CX-6-11 | 10.76 | 380 | 539 | 0.7 | 0.0514 | 0.0027 | 0.0984 | 0.0049 | 0.0149 | 0.0002 | 261 | 88.0 | 95.3 | 4.6 | 95.6 | 1.4 |
| CX-6-12 | 9.75 | 277 | 509 | 0.5 | 0.0513 | 0.0027 | 0.1009 | 0.0056 | 0.0150 | 0.0002 | 254 | 122 | 97.6 | 5.2 | 95.8 | 1.5 |
| CX-6-13 | 12.07 | 483 | 606 | 0.8 | 0.0506 | 0.0030 | 0.0969 | 0.0055 | 0.0148 | 0.0002 | 233 | 135 | 93.9 | 5.1 | 94.7 | 1.5 |
| CX-6-14 | 8.09 | 243 | 430 | 0.6 | 0.0510 | 0.0030 | 0.0983 | 0.0058 | 0.0148 | 0.0003 | 239 | 135 | 95.2 | 5.4 | 94.6 | 1.7 |
| CX-6-15 | 13.01 | 552 | 628 | 0.9 | 0.0480 | 0.0032 | 0.0968 | 0.0069 | 0.0152 | 0.0003 | 98.2 | 152 | 93.8 | 6.4 | 97.5 | 1.7 |
| CX-6-16 | 11.41 | 380 | 598 | 0.6 | 0.0505 | 0.0040 | 0.0974 | 0.0078 | 0.0147 | 0.0002 | 220 | 179 | 94.3 | 7.2 | 93.8 | 1.4 |
| CX-6-17 | 12.84 | 506 | 649 | 0.8 | 0.0501 | 0.0028 | 0.1000 | 0.0063 | 0.0148 | 0.0002 | 211 | 123 | 96.8 | 5.8 | 94.7 | 1.5 |
| CX-6-18 | 15.73 | 722 | 756 | 1.0 | 0.0502 | 0.0027 | 0.0989 | 0.0059 | 0.0147 | 0.0002 | 211 | 126 | 95.7 | 5.4 | 93.9 | 1.4 |
| CX-6-19 | 11.69 | 429 | 600 | 0.7 | 0.0482 | 0.0028 | 0.0965 | 0.0063 | 0.0148 | 0.0002 | 106 | 137 | 93.6 | 5.8 | 95.0 | 1.5 |
| CX-6-20 | 17.00 | 743 | 842 | 0.9 | 0.0492 | 0.0032 | 0.0981 | 0.0073 | 0.0146 | 0.0002 | 167 | 135 | 95.0 | 6.8 | 93.2 | 1.5 |
| CX-9-1 | 10.16 | 336 | 496 | 0.7 | 0.0533 | 0.0032 | 0.1150 | 0.0070 | 0.0155 | 0.0003 | 343 | 131 | 111 | 6.4 | 99.5 | 2.2 |
| CX-9-2 | 14.79 | 1000 | 611 | 1.6 | 0.0515 | 0.0032 | 0.1046 | 0.0061 | 0.0150 | 0.0003 | 261 | 138 | 101 | 5.6 | 96.0 | 2.0 |
| CX-9-3 | 14.05 | 660 | 667 | 1.0 | 0.0488 | 0.0029 | 0.0975 | 0.0052 | 0.0147 | 0.0003 | 139 | 133 | 94 | 4.8 | 94.3 | 2.0 |
| CX-9-4 | 20.2 | 1131 | 855 | 1.3 | 0.0544 | 0.0028 | 0.1133 | 0.0055 | 0.0153 | 0.0003 | 387 | 117 | 109 | 5.0 | 97.7 | 1.8 |
| CX-9-5 | 15.65 | 799 | 712 | 1.1 | 0.0471 | 0.0025 | 0.0985 | 0.0055 | 0.0149 | 0.0003 | 54 | 122 | 95 | 5.0 | 95.5 | 2.0 |
| CX-9-6 | 10.12 | 377 | 517 | 0.7 | 0.0529 | 0.0040 | 0.1059 | 0.0067 | 0.0153 | 0.0003 | 324 | 179 | 102 | 6.2 | 98.0 | 2.1 |
| CX-9-7 | 17.64 | 933 | 809 | 1.2 | 0.0488 | 0.0025 | 0.1038 | 0.0049 | 0.0156 | 0.0003 | 200 | 119 | 100 | 4.5 | 99 | 1.8 |
| CX-9-8 | 10.15 | 408 | 522 | 0.8 | 0.0502 | 0.0032 | 0.1063 | 0.0063 | 0.0154 | 0.0003 | 211 | 145 | 103 | 5.8 | 98.4 | 2.1 |
| CX-9-9 | 9.11 | 319 | 489 | 0.7 | 0.0531 | 0.0037 | 0.1097 | 0.0072 | 0.0153 | 0.0003 | 345 | 156 | 106 | 6.6 | 97.8 | 2.1 |
| CX-9-10 | 12.79 | 569 | 634 | 0.9 | 0.0477 | 0.0032 | 0.1004 | 0.0068 | 0.0152 | 0.0003 | 83.4 | 156 | 97.1 | 6.3 | 97.3 | 1.9 |
| CX-9-11 | 13.57 | 620 | 699 | 0.9 | 0.0497 | 0.0035 | 0.0992 | 0.0067 | 0.0146 | 0.0003 | 189 | 168 | 96.1 | 6.2 | 93.7 | 1.9 |
| CX-9-12 | 9.64 | 338 | 504 | 0.7 | 0.0542 | 0.0036 | 0.1094 | 0.0064 | 0.0154 | 0.0004 | 389 | 144 | 105 | 5.9 | 98.3 | 2.4 |
| CX-9-13 | 8.09 | 243 | 427 | 0.6 | 0.0541 | 0.0036 | 0.1128 | 0.0072 | 0.0153 | 0.0004 | 372 | 152 | 109 | 6.5 | 98.1 | 2.2 |
| CX-9-14 | 12.14 | 512 | 623 | 0.8 | 0.0493 | 0.0031 | 0.0992 | 0.0053 | 0.0150 | 0.0003 | 161 | 148 | 96 | 4.9 | 95.8 | 2.0 |
| CX-9-15 | 11.24 | 391 | 607 | 0.6 | 0.0480 | 0.0030 | 0.0973 | 0.0058 | 0.0148 | 0.0003 | 98.2 | 144 | 94.3 | 5.4 | 94.5 | 1.8 |
| CX-9-16 | 11.97 | 555 | 574 | 1.0 | 0.0490 | 0.0033 | 0.1009 | 0.0062 | 0.0153 | 0.0003 | 150 | 148 | 98 | 5.8 | 98 | 2.2 |
| CX-9-17 | 17.49 | 712 | 905 | 0.8 | 0.0501 | 0.0029 | 0.1001 | 0.0051 | 0.0149 | 0.0003 | 198 | 135 | 96.9 | 4.7 | 95.4 | 1.9 |
| CX-9-18 | 11.65 | 608 | 608 | 1.0 | 0.0492 | 0.0031 | 0.0975 | 0.0060 | 0.0148 | 0.0004 | 167 | -51 | 94 | 5.5 | 94.4 | 2.3 |
| CX-9-19 | 12.45 | 617 | 608 | 1.0 | 0.0523 | 0.0035 | 0.1031 | 0.0065 | 0.0149 | 0.0003 | 298 | 128 | 100 | 6.0 | 95.5 | 2.2 |

为钙碱性-碱性岩; 铝饱和指数(A/CNK) = 1.24 ~ 1.53, 为过铝质岩石系列。由 Harker 图解(图 4) 得知, 随着 SiO₂ 含量的增高, Al₂O₃、MgO、CaO、Fe₂O₃^T、MnO、TiO₂、P₂O₅ 和 (K₂O + Na₂O) 含量逐渐降低。在 TAS 图解(图 5) 中, 石英正长斑岩落入二长岩、石英正长岩和花岗岩范围。由 SiO₂-K₂O 图(图 6) 判断岩石系列为钾玄岩系列-高钾钙碱性岩系列。在 A/CNK-A/NK 图解(图 7) 中落入过铝质区域。

所有样品都具有相似稀土配分模式(图 8), 岩石的稀土元素总量在 152 × 10⁻⁶ ~ 212 × 10⁻⁶ 之间(表 2), LREE/

HREE 值较高, 为 13.08 ~ 21.78 ((La/Yb)_N) 为 16.62 ~ 33.49, 说明岩石发生了轻、重稀土的强烈分异, 呈轻稀土高度富集的分布模式(图 8)。(La/Sm)_N 为 4.61 ~ 6.45, 表明轻稀土之间发生了分馏; 而(Gd/Yb)_N 为 1.21 ~ 3.33, 表明重稀土之间也有一定的分馏。Eu/Eu* 为 0.71 ~ 0.97, 平均值为 0.83, 显示弱负异常; Ce/Ce* 为 0.92 ~ 1.0 之间, 平均 0.96, 显示弱或无负异常。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 9), 所有样品均亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 富集 Rb、K 等大离子亲石元素以及 La、Nd、Zr 等元素。岩石的 Ba 含量

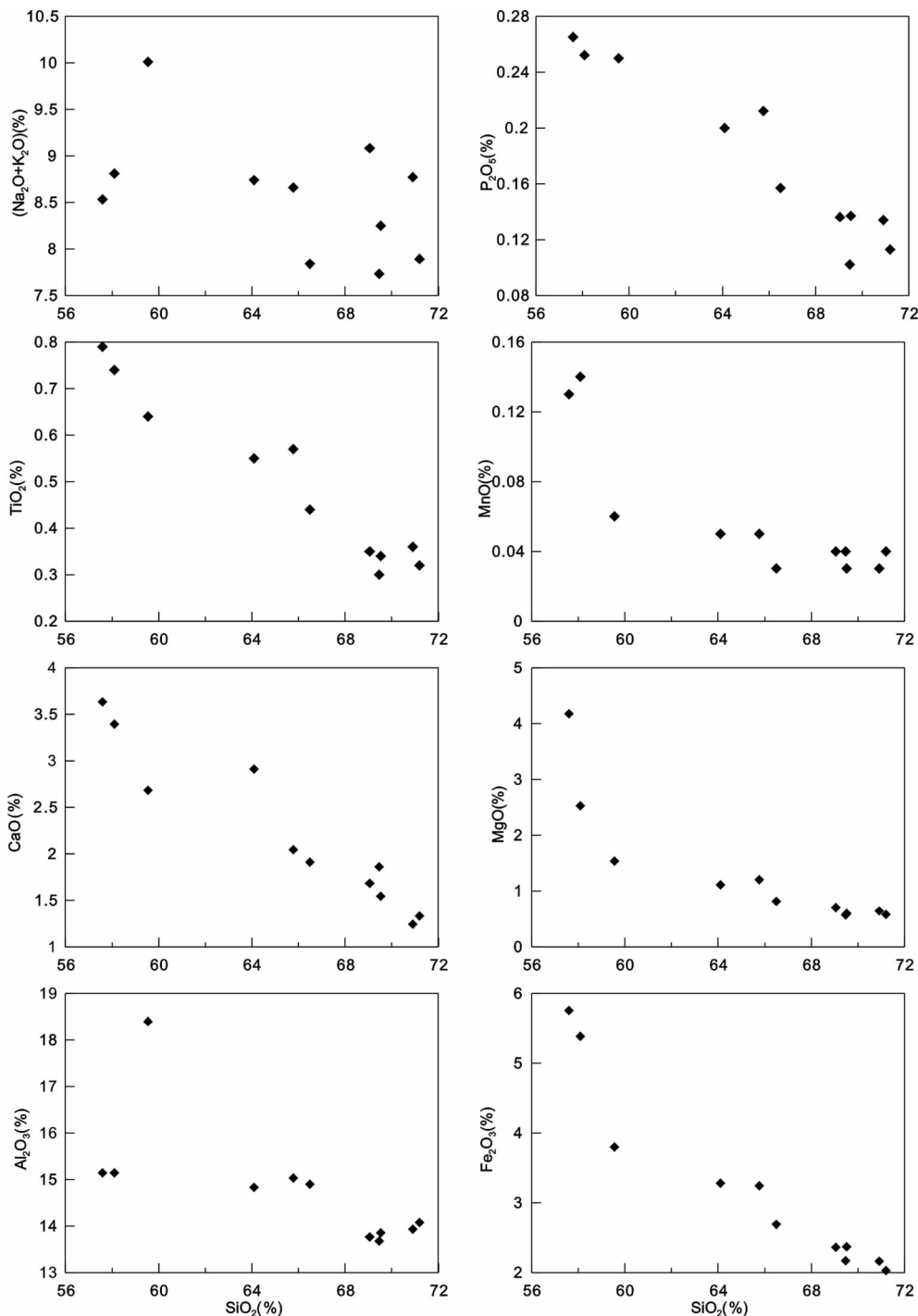


图4 浸铜湖矿床石英正长斑岩 Harker 图解

Fig.4 Harker diagrams for the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province

相对较低,呈低谷, Sr 也具有明显的负异常。

3.3 锆石 LA-ICP-MS 年龄

锆石阴极发光图像及测点年龄见图 10。本文测定了石英正长斑岩样品的锆石 U-Pb 同位素年龄(表 3) 根据测定数据获得锆石 U-Pb 年龄谐和图(图 11)。进行测试分析的

两个样品的锆石颗粒晶形良好,晶核晶面清晰,长轴在 80 ~ 200μm 之间。长宽比为 1 : 1 到 3 : 1 之间。锆石颗粒晶形完整,柱面、锥面均可见。所有锆石在阴极发光图像上均具有较清晰的震荡式生长环带,个别锆石中心部位可见浑圆状核, Th/U 比值均大于 0.4, 为典型的岩浆成因锆石 (Rubatto, 2002; Wu and Zheng, 2004; Schulz *et al.*, 2006)。两个石英正

表4 浸铜湖矿床石英正长斑岩的 Sm-Nd 同位素组成

Table 4 Sm-Nd isotopic compositions for the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province

| 样品号 | 年龄 (Ma) | Sm ($\times 10^{-6}$) | Nd ($\times 10^{-6}$) | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | $t_{2\text{DM}}(\text{Ga})$ | fA |
|---------|---------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------|
| CX-3-1 | | 4.1 | 25.5 | 0.0972 | 0.512253 \pm 12 | -6.30 | 1.41 | 0.52 |
| CX-3-2 | | 4.1 | 27.5 | 0.0901 | 0.512238 \pm 3 | -6.50 | 1.43 | 0.53 |
| CX-5-2 | | 3.83 | 25.9 | 0.0894 | 0.512233 \pm 4 | -6.60 | 1.43 | 0.53 |
| CX-6 | | 3.99 | 27.5 | 0.0877 | 0.512250 \pm 4 | -6.23 | 1.40 | 0.51 |
| CX-9-1 | 96 | 4.55 | 29.3 | 0.0939 | 0.512291 \pm 4 | -5.51 | 1.35 | 0.48 |
| CX-9-2 | | 5.29 | 33.4 | 0.0957 | 0.512296 \pm 5 | -5.43 | 1.34 | 0.48 |
| CX-18-1 | | 4.65 | 30.7 | 0.0916 | 0.512291 \pm 4 | -5.49 | 1.34 | 0.48 |
| CX-18-2 | | 4.83 | 30.6 | 0.0956 | 0.512247 \pm 5 | -6.39 | 1.42 | 0.52 |
| CX-19-1 | | 4.76 | 30.9 | 0.0933 | 0.512328 \pm 4 | -4.78 | 1.29 | 0.45 |
| CX-19-2 | | 6.50 | 40.9 | 0.0961 | 0.512351 \pm 5 | -4.37 | 1.25 | 0.43 |

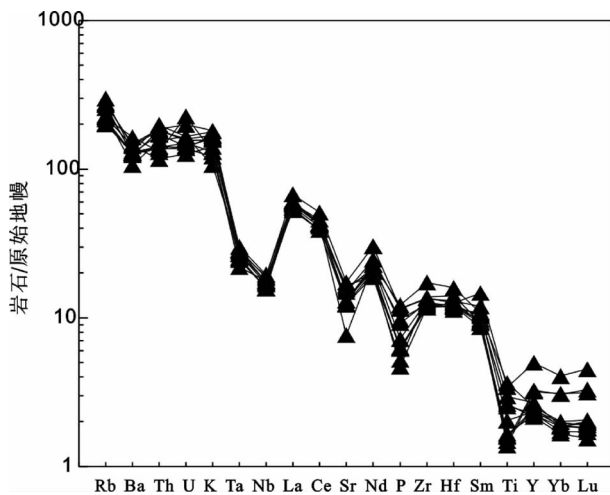


图9 浸铜湖矿床石英正长斑岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province (primitive mantle data after Sun and McDonough, 1989)

它的形成稍晚于四坊花岗岩长岩 ($104.8 \pm 1.7\text{Ma}$)、英安玢岩 ($105 \pm 1\text{Ma}$) 和罗卜岭花岗岩长斑岩 ($103.7 \pm 1.2\text{Ma}$, $103.0 \pm 0.9\text{Ma}$ 和 $97.6 \pm 2.1\text{Ma}$) (表1), 而与罗卜岭晚期黑云母花岗岩长斑岩的年龄 ($97.6 \pm 2.1\text{Ma}$) 在误差范围内是一致的。这与该岩体侵入于花岗岩长岩、花岗岩长斑岩中的地质事实一致。

紫金山地区中生代岩浆岩可分为早中生代中、晚侏罗世和晚中生代早白垩世两个幕。其中紫金山岩体和才溪岩体的锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 $168 \pm 4\text{Ma}$ (赵希林等, 2008) 和 $150 \pm 3\text{Ma}$ (赵希林等, 2007), 才溪岩体的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $146.4 \pm 8.6\text{Ma}$ (胡春杰等, 2012), 属早中生代中、晚侏罗世; 而紫金山岩体是本区铜、金、钼矿化的主要围岩。四坊岩体、罗卜岭岩体、英安玢岩及本文报道的

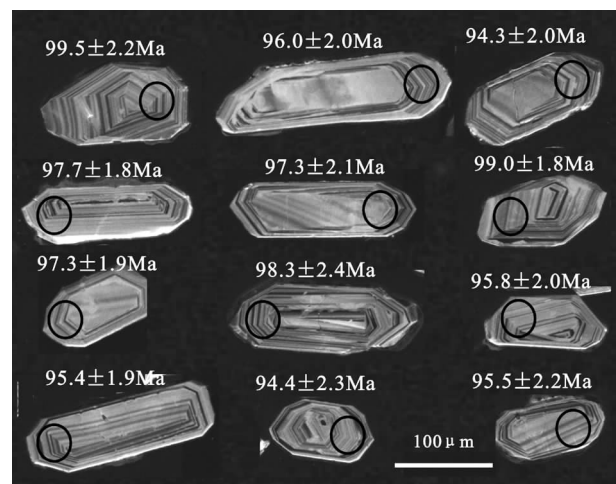


图10 浸铜湖矿床石英正长斑岩锆石阴极发光 (CL) 图像及年龄

Fig. 10 CL images and ages of zircons of the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field, Fujian Province

石英正长斑岩均形成于晚中生代白垩世, 这些岩体与该区的铜、金、钼成矿关系密切 (周肃和陈好寿, 1996; 张德全等, 2003), 其中四坊岩体锆石 U-Pb 年龄为 $107.8 \pm 1.2\text{Ma}$ (毛建仁等, 2002a) 和 $104.8 \pm 1.7\text{Ma}$ (胡春杰等, 2012), 英安玢岩锆石 LA-ICP-MS 年龄为 $105.0 \pm 0.7\text{Ma}$ (胡春杰等, 2012), 罗卜岭岩体早期花岗岩长斑岩锆石 U-Pb 年龄为 $103.7 \pm 1.2\text{Ma}$ 和 $103.0 \pm 0.9\text{Ma}$, 晚期花岗岩长斑岩形成时代为 $97.6 \pm 2.1\text{Ma}$ (黄文婷等, 2013); 这表明紫金山地区与成矿有关的岩浆活动具有相对较长的演化历史, 这一现象与德兴斑岩铜矿 (Zhou et al., 2012; Li et al., 2013a) 和永平铜矿基本一致 (丁昕等, 2005; Li et al., 2013b)。

4.2 成岩构造背景

在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 石英正长斑岩显示出 Rb、Th、U、K、La 正异常和 Nb、Ta、Ti、Ba、Sr、P 负异常,

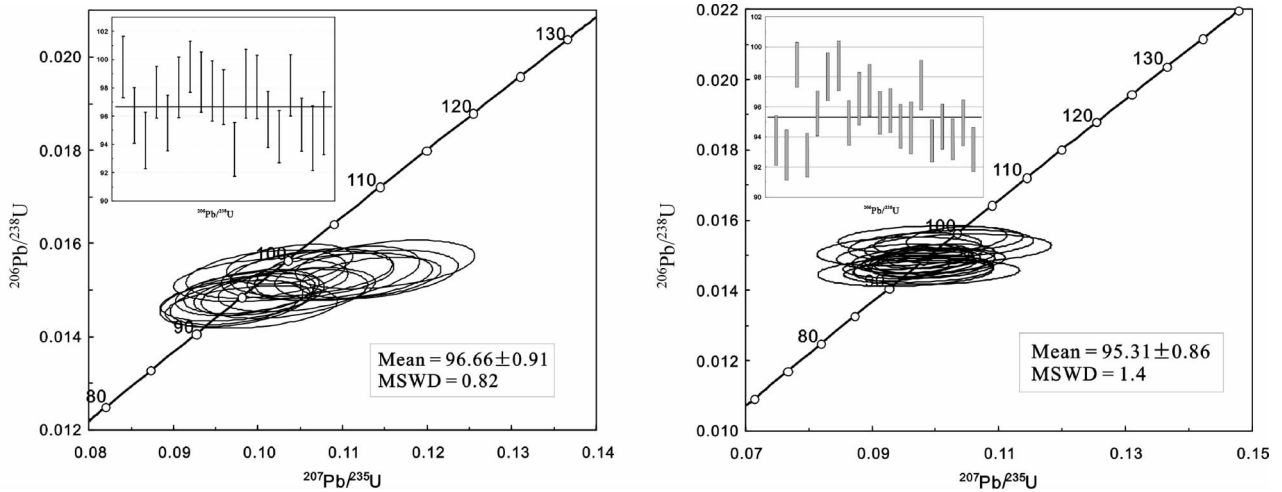


图 11 浸铜湖矿床石英正长斑岩中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 谐和图

Fig. 11 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram of the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field , Fujian Province

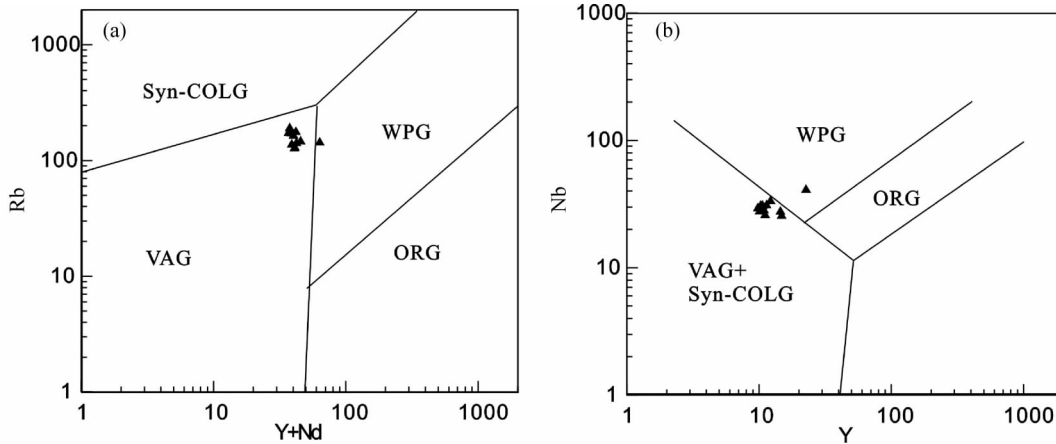


图 12 浸铜湖矿床石英二长斑岩 Y + Nd-Rb(a) 和 Y-Nb(b) 构造环境判别图解(据 Pearce *et al.* ,1984)

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

Fig. 12 Tectonic discrimination diagrams for the quartz-syenite porphyry from Jintonghu deposit of Zijinshan ore field , Fujian Province(after Pearce *et al.* , 1984)

具有活动大陆边缘钙碱性岩系的特征。在 Pearce *et al.* (1984) 提出的花岗岩构造环境判别图上, 石英正长斑岩样品投影于火山弧花岗岩区域(图 12), 显示弧火山岩亲缘性。结合本区的区域位置及本区地质演化历史, 推测其可能形成于活动大陆边缘环境。

已有研究表明, 在 230 ~ 200Ma, 华南陆块内处于碰撞挤压环境。在 170 ~ 150Ma 是特提斯构造体系向环太平洋活动边缘构造体系转换的时期, 这一时期中国东南部发育了大规模的 S 型过铝-弱过铝质花岗岩和二长花岗岩(王德滋和周新民 2000); 由于紫金山地区正处于特提斯构造体系向环太平洋活动边缘构造体系转换部位, 这一时期本区可能受两大构造域的同时作用而处于一种挤压松弛环境, 才溪岩体正是形成于这种构造背景之下(张德全等, 2001; 赵希林等,

2007)。在 150 ~ 100Ma, 中国东南部受太平洋动力学体系的影响, 造成沿海地区拉张伸展, 地壳变薄, 地幔上隆, 地幔来源玄武质岩浆底侵, 并使下部地壳部分熔融形成花岗岩岩浆, 形成了中国东南部地质历史上规模最大的花岗岩质火山-侵入杂岩(Li 2000; Zhou and Li 2000; Zhou *et al.* 2006), 本区的四坊岩体及罗卜岭岩体即形成于这种构造背景之下(毛建仁等 2002b)。

对比石英正长斑岩和区内的四坊岩体与罗卜岭岩体的地球化学特征(图 8、图 9、图 13), 发现这三个岩体具有相似的稀土元素配分模式, 即轻稀土富集, 重稀土亏损的右倾型, 具有弱 Eu 负异常; 都具有 Rb、Th、U、K 富集, Nb、Ta、P、Ti、Ba、Sr 亏损等特征。另外, 在 Nb-Ta、Zr-Hf 图解中, 石英正长斑岩与四坊花岗闪长岩和罗卜岭花岗闪长岩两个元素对

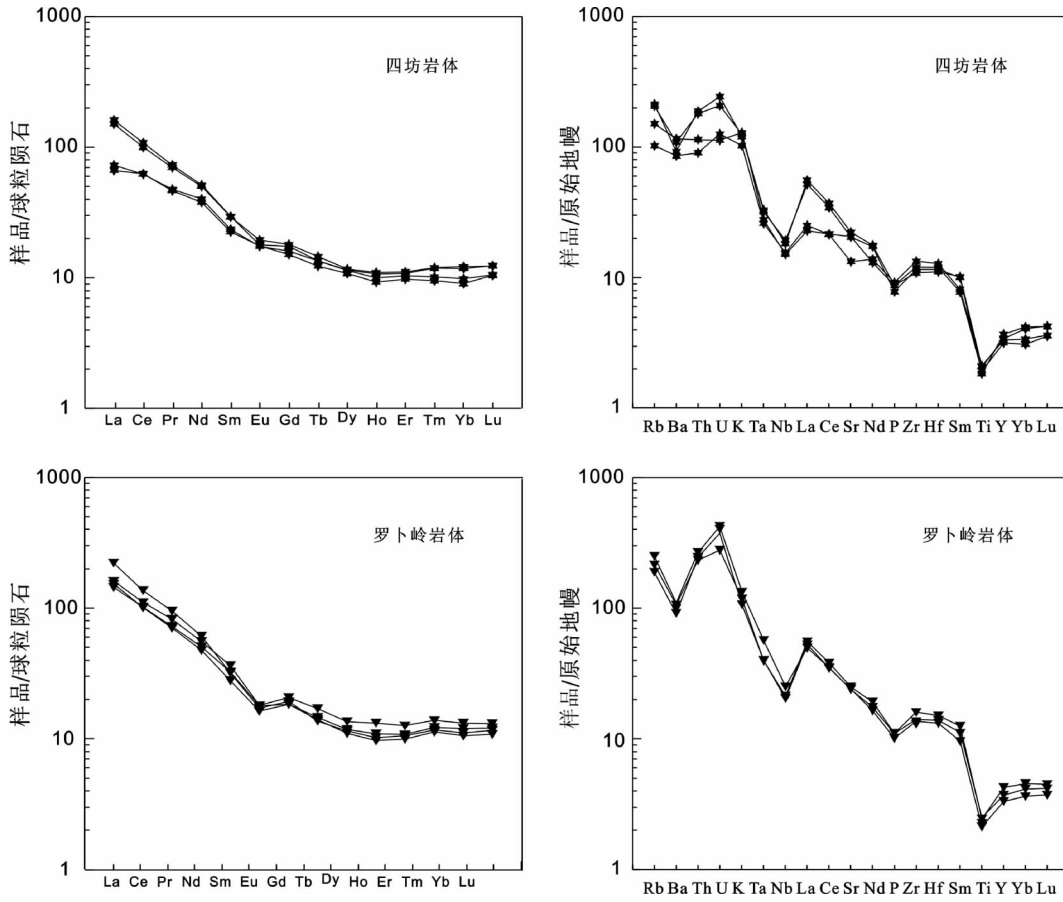


图 13 四坊岩体和罗卜岭岩体的稀土配分模式及微量元素蛛网图(数据引自赵希林 2007)

Fig. 13 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for Sifang and Luoboling porphyry of Zijinshan ore field, Fujian Province (data from Zhao, 2007)

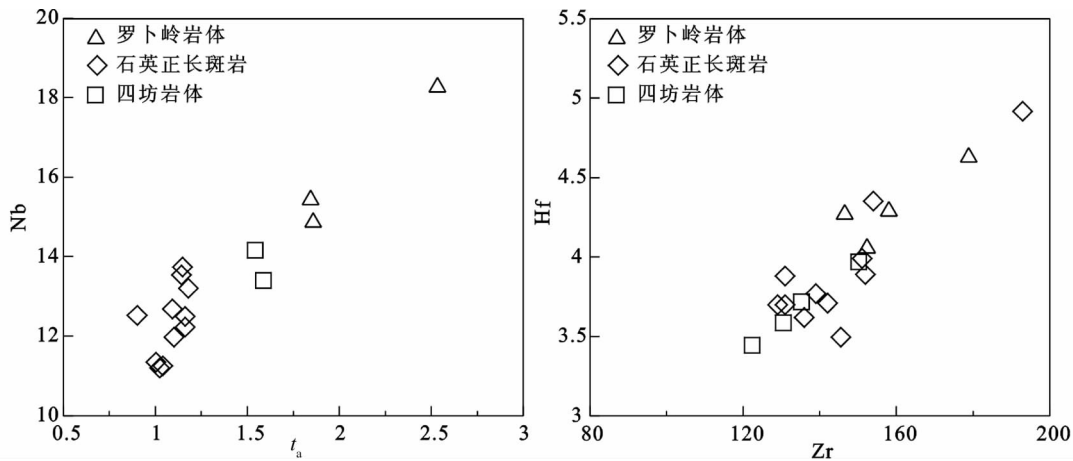


图 14 紫金山地区四个岩体的 Nb-Ta 和 Zr-Hf 组成(罗卜岭岩体和四坊岩体数据引自胡春杰等 2012)

Fig. 14 Nb-Ta and Zr-Hf diagrams for the four plutons in Zijinshan area (data of Luoboling porphyry and Sifang porphyry are quoted from Hu *et al.*, 2012)

都具有很好的正相关关系(图 14),表明他们属于同源岩浆在同一构造背景下不同演化阶段的产物(Mao *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2007; 沈晓明等, 2008)。

浸铜湖矿床的石英正长斑岩属于高钾钙碱性岩, Barbarin(1999)认为这种高钾钙碱性系列岩石反映了一种变化的地球动力学环境,即由挤压向伸展环境下的过渡。

Duchesne *et al.* (1998) 也认为这种富钾钙碱性岩指示弧后扩张或碰撞后伸展环境。结合岩石地球化学特征及本区构造演化历史, 本文推测石英正长斑岩可能与四坊岩体和萝卜岭岩体一样形成于伸展构造背景之下。

4.3 岩浆源区及成因

浸铜湖矿床石英正长斑岩具有明显的 Nb、Ta 亏损, Nb/La = 0.28 ~ 0.36, 与岛弧特征的钾质岩相似。Nb、Ta、Ti 负异常及低 Nb/La 值表明其源区可能受到了俯冲组分的影响, 或是源区部分熔融过程中有石榴石残留 (Foley and Peccerillo, 1992)。弱的 Eu 负异常, 指示岩浆演化过程中有少量斜长石结晶分异或部分熔融过程中源区有少量的斜长石残留。岩石 Ba、Sr 亏损反映了其源区可能有壳源物质的参与 (Harris and Inger, 1992)。岩石的 Nb/Ta 比值介于 10.5 ~ 13.9 之间, 平均 11.4, 总体位于大陆地壳范围 (Nb/Ta = 10 ~ 14, 赵振华等 2008), 而明显偏离原始地幔的 Nb/Ta 值 (Nb/Ta = 17.5, 赵振华等 2008)。

在 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - t 关系图上, 样品的投影点位于华南元古代地壳演化域的上方 (图 15), 说明它们并非单纯起源于基底变质岩的部分熔融, 成岩过程中应有幔源组份或初生地壳物质的参与。石英正长斑岩的二阶段 Nd 模式年龄变化于 1.25 ~ 1.43 Ga 之间, 与中国东南部中元古代变质岩年龄 (1100 ~ 1438 Ma, 甘晓春等, 1993) 大致接近, 较之华夏地块基底变质岩的 Nd 模式年龄 (主要为 1.8 ~ 2.2 Ga, 陈江峰等, 1999) 显著偏低。目前普遍认为这些具低 Nd 模式年龄的花岗岩是地幔物质参与成岩过程的重要表现 (Gilder *et al.*, 1996; Chen and Jahn, 1998; Shen *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2006), 因此, 浸铜湖矿床石英正长斑岩表现出的明显偏低的 Nd 模式年龄, 无疑也指示成岩过程中存在大量地幔组分, 即壳幔相互作用对岩石成因具有重要贡献。根据 Faure (1986) 给出的简单二元混合方程, 利用刘昌实等 (1990) 采用的华南上地壳和亏损地幔两个端元的 Sr、Nd 同位素参数, 进行二元混合模拟计算, 结果显示地壳组分在石英正长斑岩形成过程中所占的比例为 43% ~ 53% (见表 4), 地幔组分占 47% ~ 57%。因此, 本文认为石英正长斑岩的形成很可能是受到俯冲组分改造或影响的岩石圈地幔组分与中、下地壳物质部分熔融形成的花岗质岩浆混合作用的结果。

前人研究显示 (赵希林 2007), 在 CMF-AMF 图上 (图见赵希林 2007) 紫金山岩体落入变泥质岩部分熔融区, 才溪岩体落入变质砂岩部分熔融区, 四坊岩体和萝卜岭岩体均落入变质砂岩部分熔融和基性岩部分熔融交汇区; 在黑云母成分及物质来源相关图上 (图见赵希林 2007), 才溪岩体落入壳幔混源区靠近壳源区部分, 四坊岩体和萝卜岭岩体均落入壳幔混源区靠近幔源区部分; 在 Si-(Mg/(Mg + Fe³⁺ + Fe²⁺ + Mn)) 图上 (图见赵希林 2007), 才溪岩体投影于同熔型花岗岩与改造型花岗岩交汇区, 四坊岩体和萝卜岭岩体投影于同熔型花岗岩区; 因此, 紫金山岩体为壳源物质熔融形成的 S

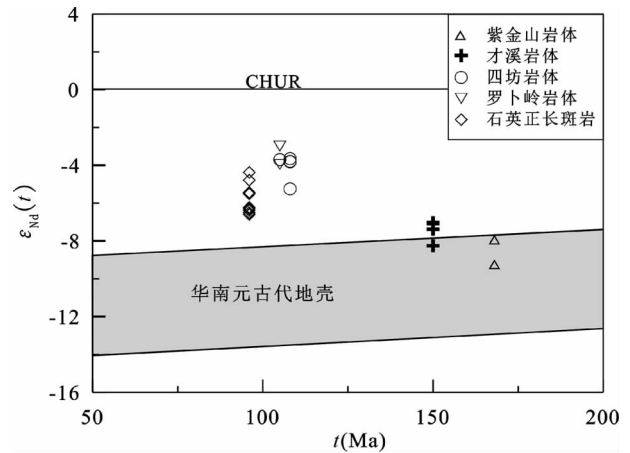


图 15 花岗岩 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - t 图 (紫金山岩体、才溪岩体、四坊岩体和萝卜岭岩体数据引自毛建仁等, 2002a; 赵希林, 2007)

Fig. 15 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - t diagrams for the five plutons in Zijinshan area (data of Zijinshan pluton, Caixi pluton, Luoboling pluton and Sifang pluton are quoted from Mao *et al.*, 2002a; Zhao, 2007)

型花岗岩, 四坊岩体和萝卜岭岩体为壳幔相互作用形成的同熔型 I 型花岗岩, 而才溪岩体为 S 型和 I 型之间的一种过渡类型。另外, 在 $\varepsilon_{Nd}(t)$ - t 关系图上 (图 15), 紫金山岩体样品的投影点落入华南元古代地壳演化区域的上部边界, 才溪岩体样品的投影点落入华南元古代地壳演化区域的上部边界及上部边界之上, 而四坊岩体、萝卜岭岩体和石英正长斑岩样品的投影点全部落入华南元古代地壳演化区域之上, 表明紫金山地区中生代花岗岩的形成主要为元古代地壳物质重熔的产物, 但随着时间演化, 地幔物质加入逐渐增多。

5 结论

(1) 紫金山矿田浸铜湖矿床石英正长斑岩具有高碱、富钾、过铝质、富大离子亲石元素及亏损高场强元素等地球化学特征。岩石属钾玄岩-高钾钙碱性岩系列。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 岩石形成时代为 95 ~ 96 Ma, 属于晚白垩世早期。

(3) 紫金山矿田浸铜湖矿床石英正长斑岩可能形成于扩张的构造背景之下, 受到俯冲组分改造或影响的岩石圈地幔组分与中下地壳物质部分熔融形成的花岗质岩浆混合作用的结果。

致谢 野外工作得到紫金矿业集团公司的大力支持; 中国科学院地球化学研究所王新松同学在锆石年代学测试过程中给予帮助; 蒋少涌教授和李晓峰研究员等对本文提出了指导性的修改意见和建议; 在此一并表示衷心感谢!

References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605–626
- Chen HS, Zhou S and Wei L. 1994. Chronology of Minerogenesis and Isotope Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1–242 (in Chinese)
- Chen HS. 1996. The research on the mineralization chronology and isotopic exploration assessment for Zijinshan copper-gold deposit. *Geotectonica et Metallogenia*, 20(4): 348–360 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF and Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1–2): 101–133
- Chen JF, Guo XS, Tang JF and Zhou TX. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 35(6): 649–658 (in Chinese with English abstract)
- Chen JH. 1992. The metallogenic model of Zijinshan copper (gold) deposit. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, (6): 337–344, 367 (in Chinese with English abstract)
- Ding X, Jiang SY, Ni P, Gu LX and Jiang YH. 2005. Zircon SIMS U-Pb geochronology of host granitoids in Wushan and Yongping copper deposits, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 383–389 (in Chinese with English abstract)
- Duchesne JC, Berza T, Liegeois JP and Auwera JV. 1998. Shoshonitic liquid line of descent from diorite to granite: The Late Precambrian post-collisional Tismana pluton (South Carpathians, Romania). *Lithos*, 45(1–4): 281–303
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology. New York: John Wiley and Sons, 200–249
- Foley S and Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin. *Lithos*, 28(3–6): 181–185
- Gan XC, Li HM, Sun DZ and Zhuang JM. 1993. Geochronological study on the Precambrian metamorphic basement in northern Fujian. *Geology of Fujian*, 12(1): 17–32 (in Chinese with English abstract)
- Gao TJ and Huang RS. 1998. Comparison of typical characters of Zijinshan copper gold silver deposit Shanghang Fujian Province. *Volcanology and Mineral Resources*, 19(4): 283–294
- Gilder SA, Gill J, Coe RS, Zhao X, Liu Z, Wang G, Yuan K, Liu W, Kuang G and Wu H. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16137–16154
- Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 46–56
- Hu CJ, Huang WT, Bao ZW, Liang HY and Wang CL. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the dacite porphyry from Zijinshan Cu-Au deposit and its metallogenetic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2): 284–292 (in Chinese with English abstract)
- Hu ZC, Liu YS, Chen L, Zhou L, Li M, Zong KQ, Zhu LY and Gao S. 2011. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(2): 423–430
- Huang CK, Bai Y, Zhu YS, Wang HZ and Shang XZ. 2001. Copper Deposit in China (Volume One). Beijing: Geological Publishing House, 1–371 (in Chinese with English abstract)
- Huang RS. 2008. Igneous series and epithermal porphyry Cu-Au-Ag mineralization system in the Zijinshan ore field, Fujian Province. *Journal of Geomechanics*, 14(1): 74–86 (in Chinese with English abstract)
- Huang WT, Li J, Liang HY, Wang CL, Lin SP and Wang XZ. 2013. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and highly oxidized features of magma associated with Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 283–293 (in Chinese with English abstract)
- Li XF, Watanabe Y, Hua RM and Mao JW. 2008. Mesozoic Cu-Mo-W-Sn mineralization and ridge/triple subduction in South China. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 625–640 (in Chinese with English abstract)
- Li XF, Hu RZ, Rusk B, Xiao R, Wang CY and Yang F. 2013a. U-Pb and Ar-Ar geochronology of the Fujiawu porphyry Cu-Mo deposit, Dexing district, Southeast China: Implications for magmatism, hydrothermal alteration, and mineralization. *Journal of Asia Earth Sciences*, 74: 330–345
- Li XF, Watanabe Y and Yi XK. 2013b. Ages and sources of ore-related porphyries at Yongping Cu-Mo deposit in Jiangxi Province, southeast China. *Resource Geology*, 63(3): 288–312
- Li XH. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China. *Journal of Asian Earth Science*, 18(3): 293–305
- Liu CS, Zhu JC, Shen WZ and Xu SJ. 1990. Classification and source materials of continental crust transformation series granitoids in South China. *Acta Geologica Sinica*, 64(1): 43–52
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010a. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Mao JR, Tao KY, Lee CY, Xie FG and Xu NZ. 2002a. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton, southwestern Fujian, and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 449–458 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Tao KY, Lee CY and Xie FG. 2002b. Characteristics of Mesozoic granodioritic rocks in southwestern Fujian and their tectonic evolution. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(2): 135–142 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Hu Q, Xu NZ, Chen R, Ye HM and Zhao XL. 2006. Mesozoic magmatism and copper polymetallic mineralization processes in the Shanghang-Datian region, Fujian Province, Southeast China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25(3): 266–278
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma /igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace-element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Qi L and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 24(1): 51–63
- Qiu XP, Lan YZ and Liu Y. 2010. The key to the study of deep mineralization and the evaluation of ore-prospecting potential in the Zijinshan gold and copper deposit. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(2): 209–215 (in Chinese with English abstract)
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1–2): 123–138
- Schulz B, Klemd R and Brätz H. 2006. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Austroalpine basement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3): 697–710
- Shen WZ, Ling HF, Li WX and Wang DZ. 2000. Crust evolution in Southeast China: Evidence from Nd model ages of granitoids.

- Science in China (Series D), 43(1): 36-49
- Shen XM, Zhang HX and Zhang BY. 2008. A preliminary study of relationship between metamorphic core complexes and lithospheric thinning over the Mesozoic in South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 11-19 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- Sun W, Ding X, Hu YH and Li XH. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4): 533-542
- Wang DZ and Zhou XM. 2000. Crustal Evolution and Petrogenesis of Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes in Southeast China. Beijing: Science Press, 1-295 (in Chinese)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569
- Yang JH, Chung SL, Zhai MG and Zhou XH. 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: Evidence for vein-plus peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73(3-4): 145-160
- Yu XD, Shao Y and Li YG. 1995. The Geological-geochemical prospecting model of the Zijinshan copper-gold deposit and its application. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 19(5): 321-331 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DQ, Li DX, Feng CY and Dong YJ. 2001. The temporal and spatial framework of the Mesozoic magmatic system in Zijinshan area and its geological significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(5): 403-408 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DQ, Yu HQ, Li DX and Feng CY. 2003. The porphyry-epithermal metallogenic system in the Zijinshan region, Fujian Province. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 253-261 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL. 2007. The geochronology petrography and geochemical characteristics of Mesozoic granitoids from Shanghang area in SW Fujian and their implications. Master Degree Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1-57 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Mao JR, Chen R, Xu NZ, Zeng QT and Ye HM. 2007. Zircon SHRIMP age and geochemical characteristics of the Caixi pluton in southwestern Fujian Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 223-321 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Mao JR, Chen R and Xu NZ. 2008. SHRIMP zircon dating of the Zijinshan pluton in southwestern Fujian and its implications. *Geology in China*, 35(4): 590-597 (in Chinese with English abstract)
- Zhao XL, Mao JR, Ye HM, Xu NZ and Hu Q. 2009. The geochemical characteristics of biotite and its petrogenesis implication in the Caixi pluton and Sifang pluton from Shanghang area of Fujian Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(2): 162-168
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q and Qiao YL. 2008. Some aspects on geochemistry of Nb and Ta. *Geochimica*, 37(4): 304-320 (in Chinese with English abstract)
- Zhong J, Chen YJ, Chen J, Li J, Qi JP and Dai MC. 2011. Fluid inclusion study of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in the Zijinshan ore field, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1410-1424 (in Chinese with English abstract)
- Zhou LD and Wang YC. 1991. REE geochemistry and genetic model of Saima and Zhijingshan alkaline rock bodies. *Geochimica*, (3): 229-235 (in Chinese with English abstract)
- Zhou S and Chen HS. 1996. Geochronology and geological significance of the Zijinshan copper-gold deposit. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 15(4): 216-219 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Q, Jiang YH, Zhao P, Liao SY and Jin GD. 2012. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: Elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. *International Geology Review*, 54(5): 527-592
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3-4): 269-287
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26-33

附中文参考文献

- 陈好寿, 周肃, 魏琳. 1994. 成矿作用年代学及同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 1-242
- 陈好寿. 1996. 紫金山铜金矿床成矿年代及同位素找矿评价研究. *大地构造与成矿学*, 20(4): 348-360
- 陈江峰, 郭新生, 汤家富, 周泰禧. 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
- 陈景河. 1992. 紫金山铜(金)矿床成矿模式. *有色金属矿产与勘查*, (6): 337-344, 367
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 顾连兴, 姜耀辉. 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石 SIMS U-Pb 年代学. *高校地质学报*, 11(3): 383-389
- 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 庄建民. 1993. 闽北前寒武纪基底的地质年代学研究. *福建地质*, 12(1): 17-32
- 高天均, 黄仁生. 1998. 福建省上杭紫金山矿田铜金银矿床类型及对比. *火山地质与矿产*, 19(4): 283-294
- 胡春杰, 黄文婷, 包志伟, 梁华英, 王春龙. 2012. 福建紫金山矿田晚中生代英安玢岩形成时代及其成矿意义. *大地构造与成矿学*, 36(2): 284-292
- 黄仁生. 2008. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液-斑岩铜金银成矿系统. *地质力学学报*, 14(1): 74-86
- 黄崇珂, 白治, 朱裕生, 王惠章, 尚修治. 2001. 中国铜矿床(上册). 北京: 地质出版社, 1-371
- 黄文婷, 李晶, 梁华英, 王春龙, 林书平, 王秀璋. 2013. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及成矿岩浆高氧化特征研究. *岩石学报*, 29(1): 283-293
- 李晓峰, Watanabe Y, 华仁民, 毛景文. 2008. 华南地区中生代 Cu-(Mo)-W-Sn 矿床成矿作用与洋岭-转换断层俯冲. *地质学报*, 82(5): 625-640
- 刘昌实, 朱金初, 沈渭洲, 徐士进. 1990. 华南陆壳改造系列花岗岩类型划分和成岩物质来源. *地质学报*, 64(1): 43-52
- 毛建仁, 陶奎元, 李寄嶠, 谢方贵, 许乃政. 2002a. 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(4): 449-458
- 毛建仁, 陶奎元, 李寄嶠, 谢芳贵. 2002b. 闽西南地区中生代花岗岩闪长质岩石的特征及其构造演化. *岩石矿物学杂志*, 21(2): 135-142
- 邱小平, 蓝岳彰, 刘羽. 2010. 紫金山金铜矿床深部成矿作用研究和找矿前景评价的关键. *地球学报*, 31(2): 209-215
- 沈晓明, 张海祥, 张伯友. 2008. 华南中生代变质核杂岩构造及其与岩石圈减薄机制的关系初探. *大地构造与成矿学*, 32(1): 11-19

- 王德滋,周新民. 2000. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社, 1-295
- 余学东,邵跃,李应桂. 1995. 福建紫金山铜金矿床地质地球化学找矿模型及应用. 物探与化探, 19(5): 321-331
- 张德全,李大新,丰成友,董英君. 2001. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义. 地球学报, 22(5): 403-408
- 张德全,余宏全,李大新,丰成友. 2003. 紫金山地区的斑岩-浅成热液成矿系统. 地质学报, 77(2): 253-261
- 赵希林. 2007. 福建省上杭地区中生代花岗岩体的年代学、岩石学、地球化学特征及其地质意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-57
- 赵希林,毛建仁,陈荣,许乃政,曾庆涛,叶海敏. 2007. 闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 26(3): 223-321
- 赵希林,毛建仁,陈荣,许乃政. 2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 中国地质, 35(4): 590-597
- 赵希林,毛建仁,叶海敏,许乃政,胡青. 2009. 福建上杭地区晚中生代花岗质岩体黑云母的地球化学特征及成因意义. 矿物岩石地球化学通报, 28(2): 162-168
- 赵振华,熊小林,王强,乔玉楼. 2008. 铌与钽的某些地球化学问题. 地球化学, 37(4): 304-320
- 钟军,陈衍景,陈静,李晶,祁进平,戴茂昌. 2011. 福建省紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 27(5): 1410-1424
- 周玲棣,王扬传. 1991. 赛马和紫金山碱性杂岩体稀土元素地球化学及成因模式. 地球化学, (3): 229-235
- 周肃,陈好寿. 1996. 紫金山铜金矿同位素年代学及其地质意义. 矿物岩石地球化学通报, 15(4): 216-219