

doi:10.3799/dqkx.2017.500

# 赣东北东乡铜矿侵入岩与成矿年龄的确定及意义

蔡逸涛<sup>1,2,3,4</sup>,倪培<sup>1,2,3\*</sup>,王国光<sup>1,2,3</sup>,陈辉<sup>1,2,3</sup>,张洁<sup>4</sup>

1. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏南京 210093
2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093
3. 南京大学地质流体研究所, 江苏南京 210093
4. 南京地质矿产研究所, 江苏南京 210016

**摘要:**对于赣东北地区东乡铜矿床的成因机制,一直存在着海西期海底喷流沉积成矿作用与燕山期岩浆热液成矿作用的成因争议,获得精确的成矿年龄是解决这一成因争议的关键。利用 LA-ICP-MS 技术对矿区中与矿体伴生的花岗闪长斑岩进行了锆石 U-Pb 同位素定年,两个花岗闪长斑岩样品的形成年龄分别为  $164 \pm 2$  Ma、 $160 \pm 1$  Ma。同时对东乡铜矿床块状硫化物矿石中的石英,开展了流体包裹体 Rb-Sr 同位素定年研究,获得一条等时线年龄为  $161.8 \pm 9.6$  Ma (MSDW=1.3)。结合对流体包裹体以及区域成矿作用的研究,认为该年龄可以代表东乡铜矿的形成时代。这些定年结果表明,东乡铜矿的形成可能与该区燕山期花岗闪长斑岩侵入活动带来的岩浆流体成矿作用有关。

**关键词:**流体包裹体;Rb-Sr 等时线;年代学;成矿年龄;东乡铜矿;矿床。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2017)09-1495-13

收稿日期: 2016-11-30

## Determination of Diagenetic and Metallogenic Age and Their Significance in Dongxiang Copper Deposit, Northeast Jiangxi Province, China

Cai Yitao<sup>1,2,3,4</sup>, Ni Pei<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Guoguang<sup>1,2,3</sup>, Chen Hui<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jie<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China
2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China
3. Institute of Geo-Fluid Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China
4. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China

**Abstract:** The formation of the Dongxiang copper deposit has been hotly debated for the last 20 years. In particular, the origin of the Dongxiang Cu deposit was controversial, with models ranging from Hercynian SEDEX (sedimentary exhalative deposit) to Yanshanian magmatic hydrothermal origins. Accurate dating on the mineralization and associated igneous rocks is a key to solve this problem. Using Rb-Sr isochron method on quartz (fluid inclusions) samples from the massive sulfide ore, an ore formation age of  $161.8 \pm 9.6$  Ma (MSDW=1.3) was obtained. Intrusive rocks (i.e., granodiorite-porphry specially related to Cu ore-forming) in Dongxiang region was also studied. The zircon U-Pb ages are  $164 \pm 2$  Ma and  $160 \pm 1$  Ma for granodiorite porphyry. These results indicate that the metallogenic epoch of the Dongxiang copper deposit occurred in the Yanshanian. Combined with fluid inclusion results and regional metallogeny, it is proposed that the Dongxiang copper deposit was related to magmatic hydrothermal activities associated with the Yanshanian intrusive porphyries nearby.

**Key words:** fluid inclusion; Rb-Sr isochron dating; geochronology; metallogenetic age; Dongxiang Cu deposit; ore deposits.

**基金项目:**中国地质调查局项目(No.20089935);国家重点研发计划(No.2016YFC0600206)。

**作者简介:**蔡逸涛(1982-),男,助理研究员,研究方向为内生金属矿床成矿规律及流体包裹体研究,ORCID:0000-0003-0957-5997,E-mail:cytj@foxmail.com

\* **通讯作者:**倪培,ORCID:0000-0002-2107-5082,E-mail:peini@nju.edu.cn

**引用格式:**蔡逸涛,倪培,王国光,等,2017.赣东北东乡铜矿侵入岩与成矿年龄的确定及意义.地球科学,42(9):1495-1507.

## 0 引言

赣东北地区是我国最重要的铜(金)多金属矿化密集区之一,先后探明大、中型铜(金)多金属矿床多处,比如著名的德兴铜矿、永平铜矿、银山铜金多金属矿以及东乡铜矿等(王勇等,2003;蔡逸涛等,2011;Wang *et al.*,2012,2015,2017;Zhao *et al.*,2013;Wang *et al.*,2013;Chen *et al.*,2015;陈辉等,2016a,2016b;Cai *et al.*,2016;Zhu *et al.*,2016).对于东乡铜矿,前人已开展有矿床地质(张祖廉和黄旭初,1979;徐跃通,1997;薛纪越等,2000;张国林,2001)、矿田构造(张国林,2001)、赋矿地层沉积岩(徐跃通,1997)与火山岩(张祖廉和黄旭初,1979)和流体包裹体(蔡逸涛等,2011;倪培,2012;Wang *et al.*,2012,2017;倪培等,2014)等方面的研究以及找矿勘查工作(中南大学地质系,1997,东乡铜矿富矿预测及外围找矿研究),但对东乡铜矿床的成因,仍然存在不同的认识.部分研究者认为东乡铜矿是中温为主的热液型铜矿床,或是斑岩型铜矿床(付守会,2003;毛景文等,2011),但也有研究者认为是海底火山喷气(喷流)沉积一后期热液改造型(顾连兴和徐克勤,1986;徐克勤等,1996).造成矿床成因争议的关键是缺乏精确成矿年龄的约束(赵葵东和蒋少涌,2004;石文杰等,2014).对此,笔者采用流体包裹体 Rb-Sr 同位素定年的方法,获得了东乡铜矿块状矿石的形成时代.同时对与成矿紧密相关的斑岩体进行了锆石 U-Pb 同位素定年工作.这些测年结果确定了东乡铜矿的主体成矿年龄以及侵入斑岩体的年龄,进而为矿床成因提供了最重要的证据.

## 1 矿区地质背景

东乡铜矿位于钦杭结合带北东段的赣东北地区(图 1a).钦杭结合带系扬子地块与华夏地块在新元古代碰撞的拼接带(杨明桂和梅勇文,1997),于侏罗纪中晚期再次发生构造活动,对中国东南部地质演化有着显著的控制作用.沿钦杭结合带发育有一系列的铜钨锡多金属矿床,构成一条我国重要的金属成矿带(杨明桂和梅勇文,1997;Wang *et al.*,2013;Zhao *et al.*,2013;葛肖虹等,2014).位于该带中的赣东北地区是重要的金属矿集区之一,自晋宁期至燕山期岩浆活动频繁而强烈,尤以燕山期岩浆活动为甚,并以酸性、中酸性岩为主.其中,燕山期中酸性花

岗闪长斑岩与铜矿关系密切(Hsü *et al.*,1990;Zhou and Yue,1998;Chen *et al.*,2015;Cai *et al.*,2016),具有直接的成因和时空关系(李培铮等,1999).

东乡铜矿矿区位于赣东北深断裂和萍乡—广丰深断裂的交汇处(图 1b)、进贤—东乡复式背斜的东南翼.东乡矿区的地质由下至上依次为新元古界双桥山群、上泥盆统一下石炭统中棚组、下一上石炭统梓山组、上石炭统壶天群、上白垩统南雄组以及第四系,依次呈角度不整合、平行不整合、整合和角度不整合关系;双桥山群是以千枚岩为主的浅变质岩系,中棚组及梓山组以海相硅质碎屑岩夹粘土岩为主,壶天群由海相碳酸盐岩构成,南雄组以陆相硅质碎屑岩为主;双桥山群大片出露于矿区西北部,上古生界呈北东—南西向展布并出露于矿区中部和隐伏于矿区东南部,而中生界零星出露于矿区中部;此外,除中生代火山岩大面积分布于矿区之南、东南(图 1b)外,矿区还发育燕山期侵入岩,为浅成相—超浅成相的花岗闪长斑岩及石英斑岩,呈脉状、扁豆状产出,与新元古界及上古生界接触并分布于矿区中部地表及地下(图 1c),出露面积虽很小,但分布很有规律,基本沿断层顺层产出,与矿体展布方向一致(付守会,2003),在空间上与矿体关系十分密切.由此表明,东乡地区是以新元古界作为褶皱基底、上古生界及中生界作为沉积盖层的地区,先后经历了加里东末期—海西初期的强烈剥蚀阶段、海西—印支期以滨浅海相为主的沉积阶段和燕山期陆相沉积及中酸性岩浆活动阶段的地质演化过程.

江西东乡铜矿至今已开采四十余年,是一个以铜为主,共(伴)生有硫、铁、钨等多种组分的综合性矿床,主要由 6 个铜矿体、1 个硫矿体、8 个钨矿体和 4 个铁矿体组成.矿体分布在东西长 2 600 m,南北宽 400 m,总厚度为 100 m 的矿化地段.其主要的矿体包含 I、V、Ⅶ号矿体,其中尤以目前仍然开采的 V、Ⅶ号铜矿体为主.矿区内 V、Ⅶ号铜矿体主要赋存于梓山组上段( $C_1z$ )的砂页岩中和壶天群下段( $C_{2-3}$ )的砂页岩中,矿体产状基本上与地层走向一致,并受区内 NE 向断裂构造的控制,矿体形态多透镜状、似层状,并具分枝复合,尖灭再现膨大狭缩现象,由于后期断裂作用,各矿体均受到不同程度的破坏,矿体以浸染状、层状、块状、角砾状构造为主.尤其值得关注的是,矿体展布与 NE-NEE 向控岩控矿张性断裂(张国林,2001)、扁豆状或脉状产出的花岗闪长斑岩体延展三者具有方向一致性,并且还呈现矿体、断层

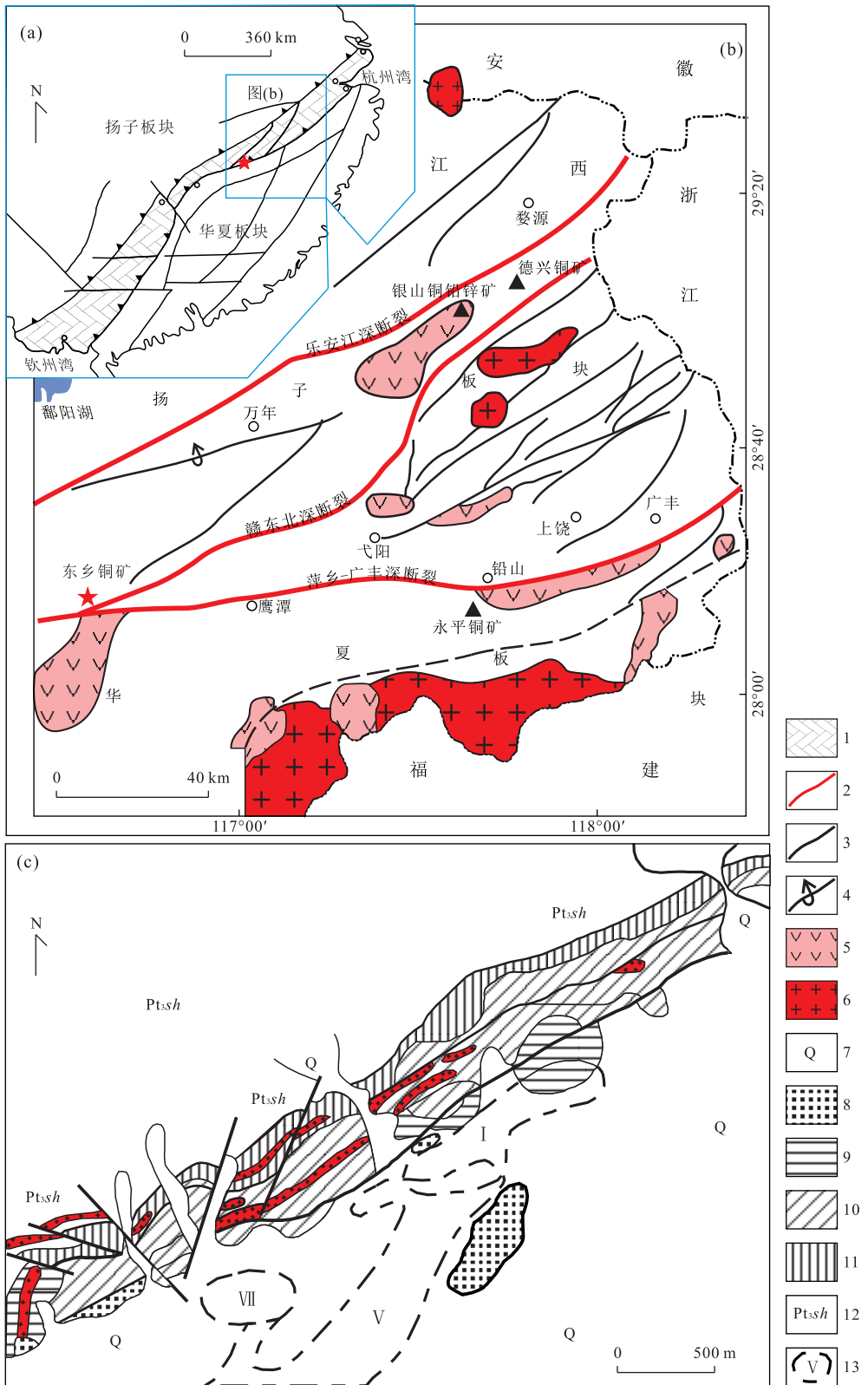


图 1 赣东北区域地质及矿区地质简图

Fig.1 Geological sketch of northeast Jiangxi Province and geological sketch of the Dongxiang copper deposit

图 a 据杨明桂和梅勇文(1997);图 b 据李培铮等(1999);图 c 据张国林和何国朝(2002)。1. 软杭结合带;2. 深大断裂;3. 一般断裂;4. 倒转背斜;5. 中生代火山岩;6. 燕山期侵入岩;7. 第四系;8. 上白垩统南雄组;9. 上石炭统壶天群;10. 石炭系梓山组;11. 上泥盆统一下石炭统中棚组;12. 新元古界双桥山群;13. 矿体平面投影位置

及花岗闪长斑岩体在空间上相邻的分布特点。

矿区内与成矿作用有关的围岩蚀变主要有硅化、绿泥石化、菱铁矿化,其次有绢云母化、高岭土化等。与斑岩体有关的蚀变主要为绢云母化、绿泥石化。

矿石构造以散染状和块状矿石为主,矿石类型以黄铜黄铁矿为主,胶状黄铁矿和黄铁矿石次之,少量黄铁黄铜矿和黄铜辉铜矿石。矿石结构以晶粒状、镶嵌、压碎结构为主。矿物主要为胶黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、黑钨矿和赤铁矿等;脉石矿物主要为石英、方解石、绿泥石等(中南大学地质系,1997,东乡铜矿富矿预测及外围找矿研究)。

朱金初和张承华(1981)发现东乡铜矿具有沉积成矿的证据,主要表现在:矿体严格受层位控制,主要以层状、似层状、透镜状顺层产出;矿体主要产于石炭纪断裂凹陷带的底部;梓山组中可见较多火山岩;胶黄铁矿在本区大量出现,并且某些矿石具有同心环带、显微球粒、层纹状条带状等结构构造特征。这些证据目前在矿区范围内已经很难观察到,但是部分学者认为在印支期至少存在一个矿源层,而后

再经过了热液叠加改造(付守会和陈广浩,2003;陈小惠和郑孙华,2008),本文就对东乡铜矿是否经历过岩浆热液事件提出新的有力证据。

## 2 样品及特征

流体包裹体 Rb-Sr 同位素分析采用矿区-275 m分段 33 线所采集的块状硫化物矿石中所包含的石英(图 2a)。主要矿物为黄铁矿、黄铜矿以及石英。黄铁矿主要为自形一半自形粒状结构,碎裂现象明显,而黄铜矿则以他形分布于黄铁矿的裂隙和黄铁矿颗粒之间(图 2b)。矿石中包含较多石英,在显微镜下观察,多为半自形-不规则状,多分布于黄铜矿、黄铁矿的周围及空洞和港湾中,常常与金属硫化物嵌生,表明石英应于黄铜矿同时形成(Cai *et al.*, 2016)。石英中以原生包裹体为主,类型较为丰富,主要为富液气液两相包裹体(图 2e),富气气液两相包裹体(图 2d),气相包裹体和含子晶三相包裹体(图 2c)以及液相包裹体。包裹体多孤立存在或

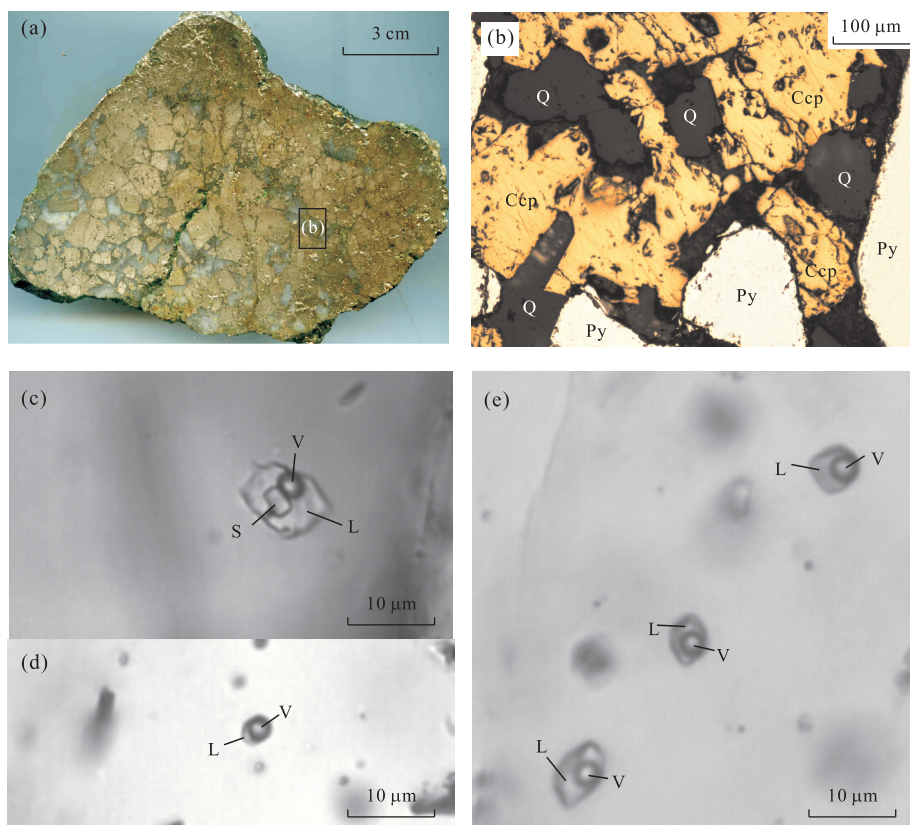


图 2 东乡铜矿矿石样品及流体包裹体照片

Fig.2 Photos of mineral in the Dongxiang copper deposit and fluid inclusions in the ore stage of quartz veins

a. 黄铁黄铜矿矿石,可见金属硫化物矿物之间石英,黄铁矿晶粒较大,碎裂现象明显(DT656);b. 黄铜矿,他形;c. 成矿阶段石英中含子晶三相流体包裹体;d. 富气相包裹体;e. 富液相包裹体.Ccp. 黄铜矿;Q. 石英;Py. 黄铁矿;S. 子晶;L. 液相;V. 气相



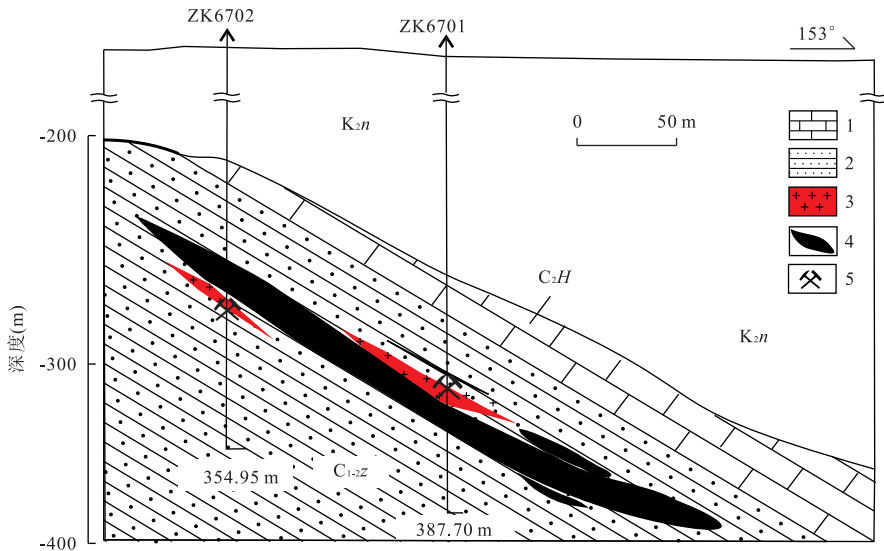


图 3 东乡铜矿区 67 线勘探线剖面采样点示意

Fig.3 Profile sketch of prospecting line 67 of Dongxiang copper deposit

1.白云质灰岩;2.细砂岩;3.花岗闪长斑岩;4.铜矿体;5.采样点.C<sub>1-2z</sub>.下—上石炭统梓山组;C<sub>2H</sub>.中石炭统壶天群;K<sub>2n</sub>.上白垩纪南雄组

成群出现,气相所占包裹体体积多为 15%~30%,在某些视域内往往可以看见含子晶包裹体和富气气液两相包裹体共生,以及不同相比例的两相包裹体同时出现(杨艳等,2008;蔡逸涛等,2011)。

花岗闪长斑岩是本区内分布比较广泛的侵入岩。代表性样品为取自岩心的 DT050 和 DT086(分别取自 ZK6702 和 ZK6701)(图 3)。两处岩体均侵入石炭系梓山组砂岩中。样品呈灰白色到灰红色,块状构造,斑状结构,斑晶有斜长石、石英、角闪石和少量钾长石等,占 20%左右,粒度不大,一般为 2~5 mm。基质具微粒或隐晶质结构,成分与斑晶相似,但含量有所不同。副矿物为锆石、榍石等。长石斑晶多发生绢云母化,表面密集排列绢云母鳞片,并且有时沿着斜长石环带分布;黑云母具有暗化边,大多褪色。石英普遍可见再生加大边,石英含量大于 30%。

### 3 分析方法

石英流体包裹体 Rb-Sr 同位素分析样品的制备采用前人(李华芹和尹国师,1985;李华芹等,2000;李华芹等,2006;王登红等,2009)所报道的流程,首先用热爆法将样品中次生包裹体去除,而后采用高温爆裂—超声提取—离心分离获得原生(假次生)流体包裹体。Rb、Sr 同位素分析在武汉地质矿产研究所同位素实验室 MAT-261 可调多接收型质谱仪上完成;分析过程中采用国际标准样品 NBS-987 监控

仪器工作状态,用 NBS-607 和 Rb-Sr 测年国家一级标准物质 GBW04411 监控分析流程。上述标准物质的测定值分别为:(1) NBS-987,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71026 \pm 0.00006$ ; (2) NBS607,  $\text{Rb}/10^{-6} = 523.22$ ,  $\text{Sr}/10^{-6} = 65.56$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 1.20035 \pm 0.00009$ ; (3) GBW04411,  $\text{Rb}/10^{-6} = 249.08 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sr}/10^{-6} = 158.39 \times 10^{-6}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.76006 \pm 0.00025$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  的测定精度分别好于 0.008%~0.02% 和 1%~2%。所用试剂为市售高纯试剂经亚沸蒸馏器蒸馏,其 Rb、Sr 空白为  $10^{-11} \sim 10^{-12}$  g/g。高纯水由 Milli-Q 水纯化系统纯化,其 Rb、Sr 空白为  $10^{-12}$  g/g;与样品同时测定的全流程空白都在 0.3 ng 左右。当样品 Rb、Sr 含量低于  $10^{-6}$  时,均做了空白校正。

锆石分选采用传统的重液和磁法完成。将挑选好的锆石颗粒用环氧树脂固定,并抛光至锆石颗粒中心附近以使其内部结构剥露,制成样品靶。对抛光后的锆石样品在显微镜下观察和透、反射光观察,并在在西北大学大陆动力学国家重点实验室 FEI XL30 型 SFEG 上进行了阴极发光照片拍摄。

锆石 U-Pb 年龄测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS,激光剥蚀系统为 New Wave UP213。工作参数为:Ar 气流量 1 L/min,He 气流量 0.9~1.2 L/min。剥蚀系统激光波长 213 nm,激光脉冲频率 5 Hz,剥蚀孔径 18  $\mu\text{m}$ ,剥蚀时间 60 s,背景测量时间 40 s,脉冲能量为 10~20 J/cm<sup>2</sup>,<sup>206</sup>Pb、

$^{207}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}$  和  $^{238}\text{U}$  的停留时间依次为 15, 30, 10, 10, 15 ms. 实验原理和详细测试方法可参考 Griffin *et al.* (2004). 应用锆石标样 GJ-1 进行同位素分馏校正, GJ-1 锆石标样的测试值为  $601.0 \pm 1.2$  Ma (Jackson *et al.*, 2004); 此外, 在分析中加入“未知”标样 Mud Tank (Black and Gulson, 1978) (分析值  $735 \pm 12$  Ma), 用于监控测试的重现性和仪器的稳定性, 本实验室对 GJ-1 和 Mud Tank 锆石标样的测试结果与其他实验室的测试结果一致. 质谱的分析数据通过即时分析软件 GLITTER 计算获得相应的同位素比值、年龄以及误差, 上述数据采用 Andersen (2002) 的方法进行普通铅校正, 校正后的最终结果应用 Isoplot (Ludwig, 2003) 程序完成年龄计算和和谐图的绘制.

## 4 测试结果

### 4.1 流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄

分析结果列于表 1.  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值变化为 3.41~4.79,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值变化为 0.722 78~0.726 02. 本文采用目前国际通用的 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 2003) 进行年龄计算. 所选衰变常数为  $\lambda^{87}\text{Rb} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ . 5 点构成一条 Rb-Sr 等时线, 年龄为  $161.8 \pm 9.6$  Ma (MSDW = 1.3) (图 4).  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值为  $0.714 90 \pm 0.000 54$ .

### 4.2 锆石 U-Pb 年代学

东乡铜矿区花岗闪长斑岩中锆石为无色透明或浅黄色, 大多数锆石晶型较好, 为短柱—长柱状, 长轴为 100~250  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 1:1~3:1. 从锆石阴极发光图像 (图 5) 看出锆石具明显的的岩浆振荡环带, 应为典型岩浆结晶锆石.

两个花岗闪长斑岩样品 (DT050 和 DT086) 的 LA-ICP-MS 分析结果见表 2. 样品 DT050 中 14 个锆石分析点获得的 Th 和 U 含量变化分别为  $380 \times 10^{-6} \sim 3 571 \times 10^{-6}$  和  $352 \times 10^{-6} \sim 1 232 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $1 975 \times 10^{-6}$  和  $792 \times 10^{-6}$ . 锆石的 Th/U 比值范围不大, 为 0.75~1.74 (除一个异常高的比值为 3.12), 均大于 0.1, 表明这些锆石为典型岩浆成因的锆石 (Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002; 陈正乐等, 2013; 曹正琦等, 2016). 14 个锆石分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $164.3 \pm 1.6$  Ma.

样品 DT086 中 22 个锆石分析点获得的 Th 和 U 含量变化分别为  $171 \times 10^{-6} \sim 1 092 \times 10^{-6}$  和

Table 1 Rb-Sr isotope data of fluid inclusion in quiz from Dongxiang mineral

样品	Rb( $10^{-6}$ )	Sr( $10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$
DT365	0.785 6	0.569 7	3.98	0.724 01	0.000 04
DT366-2	0.990 2	0.646 4	4.43	0.724 97	0.000 06
DT366-3	1.642 0	1.227 0	3.86	0.723 80	0.000 09
DT367	2.080 0	1.254 0	4.79	0.726 02	0.000 01
DT368	0.867 9	0.734 1	3.41	0.722 78	0.000 01

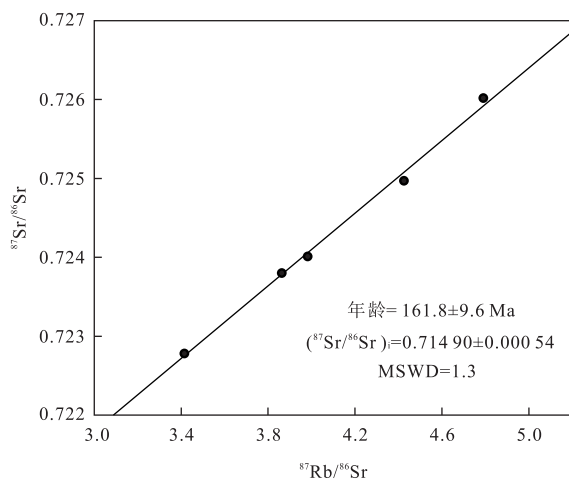


图 4 东乡铜矿矿石中石英流体包裹体中 Rb-Sr 同位素等时线

Fig.4 Rb-Sr isotope data and isochron ages of fluid inclusion in quiz from Dongxiang mineral

$146 \times 10^{-6} \sim 906 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $632 \times 10^{-6}$  和  $526 \times 10^{-6}$ . Th/U 比值变化为 0.40~1.65, 也表明这些锆石为典型岩浆成因的锆石 (Hoskin and Black, 2000; Belousova *et al.*, 2002). 22 个锆石分析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $160.3 \pm 1.0$  Ma.

在和谐图上, 花岗闪长斑岩的样品点都有不同程度的沿水平方向偏离和谐线, 可能与锆石中  $^{207}\text{Pb}$  丰度较低而难以测准有关, 因此主要采用精度较高的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  来计算加权平均年龄 (图 6).

## 5 讨论

### 5.1 东乡铜矿的成矿时代和成因探讨

在热液矿床中, 石英是普遍存在的一种矿物. 英国矿物学家 Shepherd 和 Darbyshire 在 1981 年首次对 Carrock Fell 石英脉型钨矿成矿阶段中石英矿物流体包裹体 Rb-Sr 等时线法进行了测定, 测得年龄为  $392 \pm 5$  Ma, 该年龄与矿脉内白云母 K-Ar 年龄 ( $387 \pm 6$  Ma) 基本吻合, 从而验证了流体包裹体 Rb-

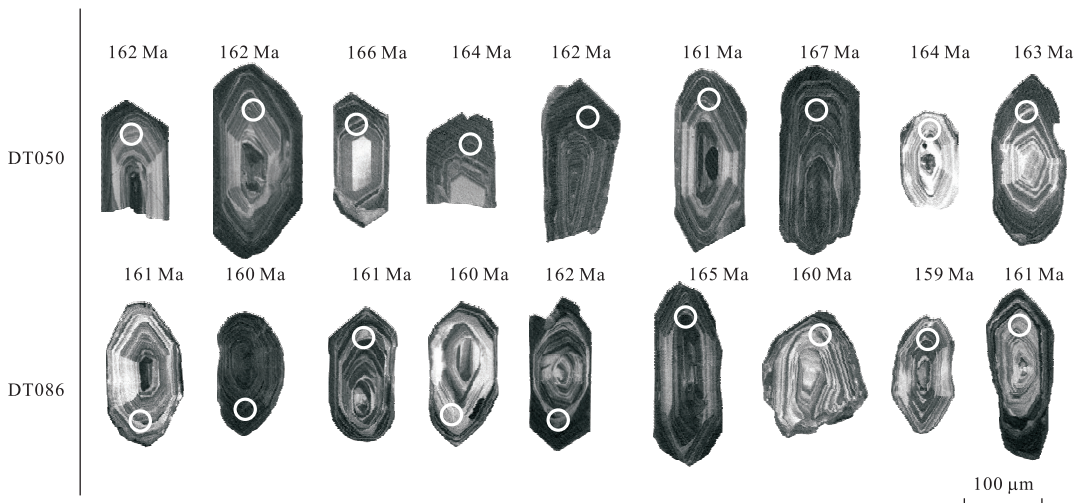


图 5 样品的锆石的 CL 图像

Fig.5 CL images of zircon grains from Samples of Dongxiang

实线圆为年龄分析点

Sr 等时线测定年龄的可行性和可信性 (Shepherd and Darbyshire, 1981). 国内学者也进一步论证或检验流体包裹体直接测定成矿年龄的可行性和可靠性, 使这一技术可以广泛应用于不同类型的热液矿床的年代学研究中, 如对荡坪钨锡矿床、大宝山多金属矿床和玲珑金矿床的流体包裹体和成矿母岩的年代学的对比研究, 有力地证明热液金属矿床石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄方法是直接测定金属矿床成矿时代的有效手段之一 (李华芹等, 1992, 2006; 赵葵东和蒋少涌, 2004; 侯明兰等, 2007).

本次研究中所采用样品为与块状硫化物共生的石英矿物, 多分布于黄铜矿、黄铁矿的周围及空洞和港湾中, 常常与金属硫化物嵌生. 显微镜下石英中流体包裹体也主要为原生包裹体, 即包括富液气液两相包裹体, 富气气液两相包裹体, 气相包裹体和含子晶三相包裹体以及液相包裹体. 富液气液两相包裹体多孤立存在或成群出现, 气相所占包裹体体积多为 15%~30%, 此类包裹体在石英中丰度一般, 为 5~20  $\mu\text{m}$ . 富液气液两相包裹体均一温度为 272~392  $^{\circ}\text{C}$ , 峰值范围在 320~380  $^{\circ}\text{C}$ , 盐度 2.24% NaCl~19.4% NaCl, 峰值为 58% NaCl~8% NaCl. 视域内同时出现的富气相包裹体、含透明子矿物包裹体, 富气相包裹体和含子晶三相包裹体的盐度范围分别为 0.35% NaCl~5.86% NaCl 和 29.4% NaCl~41.9% NaCl. 均一温度峰值分别为 300~340  $^{\circ}\text{C}$  和 280~320  $^{\circ}\text{C}$  (蔡逸涛等, 2011). 显示了沸腾条件下捕获的特征, 属于较典型的岩浆热液流体. 因此其流体包裹体应该可以代表成矿时期的

流体特征. Cai *et al.* (2016) 对成矿期流体包裹体进行了 H-O 同位素的测定,  $\delta^{18}\text{O}$  值为 5.04‰~9.01‰,  $\delta\text{D}$  变化范围为 -42‰~-69‰. 结合包裹体测温结果, 进一步证明了成矿流体具有较典型的岩浆流体的特征.

本次研究测得石英中流体包裹体 Rb-Sr 等时线年龄为  $161.8 \pm 9.6 \text{ Ma}$  (MSDW=1.3), 应该可以代表块状矿体的成矿年龄. 因此, 这一定年结果支持东乡铜矿主体成矿期应为燕山期成矿, 而非海西期成矿.

同时, 对矿区内侵入岩的定年结果, 两个花岗闪长斑岩样品的形成年龄分别为  $164.3 \pm 1.6 \text{ Ma}$  和  $160.3 \pm 1.0 \text{ Ma}$ . 成矿年龄与花岗闪长斑岩的形成时代较为一致. 同时, 花岗闪长斑岩也含有很高的铜含量 (平均约  $160 \times 10^{-6}$ ), 某些地段侵入岩体本身就是矿体. Cai *et al.* (2016) 对东乡铜矿 H-O-S-Pb 等同位素的研究也表明矿体的成矿物质、成矿流体均来自于矿区内燕山期的侵入岩. 同时野外观察也可以表明矿区内岩浆热液充填的矿化现象比较明显, 如岩体的围岩为砂岩时, 常见有黄铁矿、黄铜矿细脉沿砂岩中的裂隙充填. 从整个矿区来看, 岩浆活动与成矿密切联系还体现在两者的空间分布上. 中南大学根据钻孔资料, 将所揭露到的岩体和矿体厚度分别取值, 并取相应坐标, 模拟出两者厚度等值线图, 大家可以发现岩体集中、厚大的地段也是矿体厚大的部位, 比如在 85-75 线、51-23 线、0-4 线等 (中南大学地质系, 1997. 东乡铜矿富矿预测及外围找矿研究).

表 2 东乡铜矿侵入岩 LA-ICP-MS U-Pb results for intrusion of Dongxiang copper deposit

样品	Th		U		Th/U	同位素比值			同位素年龄(Ma)						
	(10 <sup>-6</sup> )	U	207Pb/235U	error		206Pb/238U	error	207Pb/206Pb	1σ	207Pb/235U	1σ	206Pb/238U	1σ		
DT050															
1	381	436	0.87	0.053 89	0.001 44	0.189 02	0.004 97	0.025 47	0.000 33	366	62	176	4	162	2
2	870	789	1.10	0.052 61	0.001 16	0.184 32	0.004 10	0.025 44	0.000 33	312	51	172	4	162	2
3	567	434	1.31	0.051 80	0.001 97	0.182 74	0.006 75	0.025 63	0.000 40	277	89	170	6	163	3
4	666	579	1.15	0.057 50	0.001 85	0.202 11	0.006 35	0.025 52	0.000 36	511	72	187	5	162	2
5	536	499	1.07	0.048 93	0.001 52	0.170 76	0.005 17	0.025 34	0.000 35	144	74	160	4	161	2
6	1 139	877	1.30	0.050 78	0.001 61	0.179 62	0.005 67	0.025 67	0.000 40	231	75	168	5	163	3
7	635	521	1.22	0.051 27	0.002 36	0.182 15	0.008 25	0.025 78	0.000 42	253	108	170	7	164	3
9	705	734	0.96	0.052 32	0.001 31	0.189 67	0.004 76	0.026 30	0.000 37	299	58	176	4	167	2
12	553	527	1.05	0.049 15	0.001 33	0.172 24	0.004 67	0.025 42	0.000 36	155	65	161	4	162	2
14	927	532	1.74	0.046 46	0.001 24	0.166 57	0.004 44	0.026 01	0.000 36	22	56	156	4	166	2
15	3 572	1 146	3.12	0.053 33	0.001 14	0.195 11	0.004 25	0.026 54	0.000 36	343	50	181	4	169	2
16	713	954	0.75	0.056 27	0.001 47	0.199 42	0.005 24	0.025 71	0.000 39	463	59	185	4	164	2
17	1 180	830	1.42	0.048 95	0.001 10	0.179 41	0.004 06	0.026 59	0.000 36	145	54	168	3	169	2
18	449	353	1.27	0.071 76	0.001 88	0.256 01	0.006 60	0.025 88	0.000 37	979	55	231	5	165	2
DT086															
1	238	223	1.06	0.046 53	0.001 58	0.161 37	0.005 43	0.025 15	0.000 38	25	72	152	5	160	2
2	540	489	1.10	0.049 68	0.001 57	0.170 22	0.005 33	0.024 85	0.000 39	180	75	160	5	158	2
3	563	439	1.28	0.048 00	0.001 41	0.170 27	0.005 08	0.025 73	0.000 42	99	68	160	4	164	3
4	441	341	1.30	0.049 61	0.001 32	0.170 99	0.004 61	0.025 00	0.000 38	177	64	160	4	159	2
6	242	229	1.06	0.047 83	0.001 27	0.167 63	0.004 45	0.02 542	0.000 36	91	62	157	4	162	2
7	327	250	1.31	0.058 74	0.001 97	0.204 44	0.006 77	0.025 24	0.000 42	557	75	189	6	161	3
8	623	425	1.47	0.049 01	0.001 12	0.155 44	0.003 55	0.023 00	0.000 30	148	55	147	3	147	2
9	171	146	1.17	0.049 63	0.004 37	0.172 06	0.014 70	0.025 15	0.000 72	178	200	161	13	160	5
10	447	292	1.53	0.048 97	0.001 51	0.170 63	0.005 26	0.025 27	0.000 40	146	74	160	5	161	3
12	867	867	1.00	0.048 69	0.001 06	0.168 61	0.003 74	0.025 12	0.000 35	133	52	158	3	160	2
13	808	635	1.27	0.049 28	0.000 98	0.171 37	0.003 53	0.025 23	0.000 34	161	48	161	3	161	2
14	701	732	0.96	0.049 01	0.000 88	0.218 98	0.004 25	0.032 41	0.000 47	148	43	201	4	206	3
16	363	906	0.40	0.051 06	0.001 56	0.178 35	0.005 27	0.025 35	0.000 36	244	72	167	5	161	2
17	889	740	1.20	0.048 67	0.001 07	0.167 30	0.003 79	0.024 94	0.000 36	132	53	157	3	159	2
18	256	289	0.89	0.049 51	0.001 46	0.191 45	0.005 67	0.028 05	0.000 43	172	70	178	5	178	3
19	376	246	1.53	0.050 52	0.001 64	0.173 70	0.005 54	0.024 94	0.000 38	219	77	163	5	159	2
20	670	453	1.48	0.048 80	0.003 18	0.169 21	0.010 74	0.025 16	0.000 62	138	147	159	9	160	4
21	297	249	1.19	0.049 42	0.001 88	0.170 79	0.006 34	0.025 07	0.000 40	168	90	160	5	160	3
22	298	300	0.99	0.045 77	0.002 90	0.165 22	0.010 22	0.026 17	0.000 63	-14	139	155	9	167	4
23	626	545	1.15	0.050 59	0.003 34	0.177 58	0.011 35	0.025 50	0.000 66	222	151	166	10	162	4
24	1092	663	1.65	0.048 96	0.001 25	0.174 51	0.004 49	0.025 87	0.000 39	146	61	163	4	165	2
25	247	252	0.98	0.051 99	0.001 39	0.176 55	0.004 75	0.024 65	0.000 37	285	63	165	4	157	2



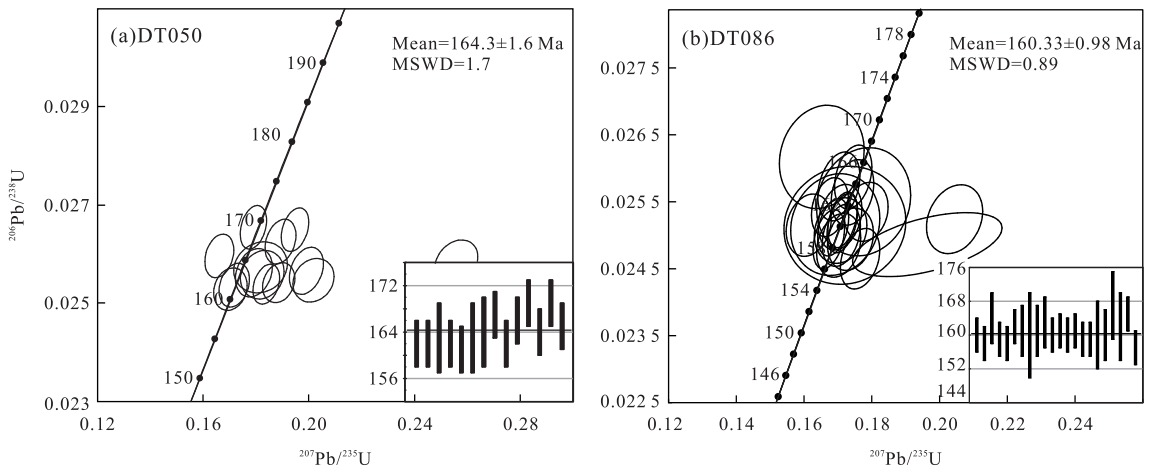


图 6 花岗闪长斑岩的锆石  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  同位素年龄谱和图

Fig.6 The  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages of zircon grains from granodiorite-porphyrries and quartz porphyry 样品 DT050、DT086 为花岗闪长斑岩

Cai *et al.* (2016)对东乡铜矿 S-Pb 同位素的研究认为东乡铜矿矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  的变化范围为  $0.3\text{‰} \sim -2.2\text{‰}$ , 离差  $1.9\text{‰}$ , 平均  $1.1\text{‰}$ , 其变化范围窄, 绝对值小, 其平均值与地幔硫同位素组成比较接近, 呈塔式分布, 具有典型岩浆硫源的特征. 铅同位素数值显示矿石铅同位素与岩体铅同位素组成范围较为一致, 来源基本相同, 从而说明成矿物质来源于岩体具有密切的联系.

综上所述, 东乡铜矿矿石中 S 同位素变化范围窄, 绝对值小, 其平均值接近零值, 显示了硫主要来自岩浆, 或直接来自岩浆热液. 岩体与矿体 Pb 同位素两者组成范围较为一致, 来源基本相同. 矿石中石英内的流体包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  明显大于 0.710, 与岩体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素范围 (0.706 675 ~ 0.715 872) 较为一致, 显示了成矿流体主要为壳源, 因而, 笔者认为铜矿主成矿时代应在 162 Ma 左右, 并且与燕山期岩浆热液作用有着密切联系.

### 5.2 对区域成矿作用的指示

赣东北地区在燕山期构造—岩浆活动极其剧烈, 导致了岩浆与成矿大爆炸, 形成系列火山盆地和火山—花岗质杂岩, 是区内最重要的铅锌银铜成矿期. 本期成矿作用多样, 矿床类型多, 有斑岩型铜金矿(铜厂等)、火山热液型铜铅锌银矿(银山等)、岩浆热液型铜矿(东乡等)等, 均有大型—超大型矿床产出. 该系列矿床的最主要特点是矿化围绕一系列深来源和高侵位的小花岗质岩体分布(毛景文等, 2011, 2012; 陈辉等, 2016a, 2016b), 但形成时代略有差异. 德兴斑岩型铜矿, 其含矿花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄为  $171 \pm 3$  Ma(王强等, 2004), 辉钼矿 Re-Os 年龄确定其

成矿时代为  $170.4 \pm 1.8$  Ma(Lu *et al.*, 2005), 矿化时代与斑岩同期. 银山铜多金属矿火山岩一次火山岩的形成时代为 176~166 Ma(本项目组未发表数据). 永平铜矿中黑云母斑状花岗岩的锆石年龄为  $160.0 \pm 2.3$  Ma(丁昕等, 2005), 辉钼矿 Re-Os 年龄 162 Ma(未发表数据). 本次研究所确定的东乡铜矿花岗闪长斑岩形成时代为 164~160 Ma, 成矿时代为 162 Ma. 综合来看, 赣东北地区含矿岩体和铜的矿化时间从 171 Ma 持续到 160 Ma, 并且从北往南方向有逐渐变年轻的趋势.

毛景文等(2004, 2008, 2009)初步提出华南中生代 3 次爆发式成矿作用, 认为它们可能与侏罗纪晚期局部伸展和白垩纪岩石圈全面大减薄相关. 大量研究表明(Zhao *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; 王强等, 2004, 2005), 华南地区早—中侏罗世较为广泛的岩浆活动与成矿作用是在伸展的构造环境下形成的, 暗示该阶段华南为一伸展的动力学背景. 毛景文等(2011)认为, 由于太平洋板块的持续低角度俯冲, 在弧后地区出现一系列 NE 方向岩石圈伸展带和深大断裂, 导致了 160 Ma 左右大规模岩浆侵位爆发式地出现在钦杭带东端赣东北地区. 而东乡铜矿的成岩成矿年龄与华南的早—中侏罗世的爆发式成矿相一致.

## 6 结论

通过对东乡铜矿块状矿石中石英流体包裹体 Rb-Sr 等时线定年, 确定成矿时代为  $161.8 \pm 9.6$  Ma

(MSDW=1.3). 矿区中两个花岗闪长斑岩样品的锆石 U-Pb 定年结果为  $164 \pm 2$  Ma 到  $160 \pm 1$  Ma. 综合流体包裹体和区域成矿作用的研究, 认为东乡铜矿的形成应与燕山早期花岗闪长斑岩的侵入所带来岩浆流体成矿作用有关.

致谢: 野外工作得到江铜集团地勘公司徐积辉、陈小惠、郑孙华工程师以及江西东同矿业公司张秀昌工程师的热情帮助, Rb-Sr 等时线同位素测试得到了武汉地质矿产研究所李华芹老师的帮助, 感谢匿名审稿专家提出了宝贵的审稿意见, 在此一并表示衷心的感谢.

## References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that Do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-x
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622. doi: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Black, L. P., Gulson, B. L., 1978. The Age of the Mud Tank Carbonatite, Strangways Range, Northern Territory. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3(3): 227-232.
- Cai, Y. T., Ni, P., Shen, K., et al., 2011. Study on the Fluid Inclusion from Dongxiang Copper Deposit, Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1375-1386 (in Chinese with English abstract).
- Cai, Y. T., Ni, P., Wang, G. G., et al., 2016. Fluid Inclusion and H-O-S-Pb Isotopic Evidence for the Dongxiang Manto-Type Copper Deposit, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 171: 71-82. doi: 10.1016/j.gexplo.2016.01.019
- Cao, Z. Q., Zhai, W. J., Jiang, X. F., et al., 2016. About 2.5 Ga Tectono-Metamorphic Event in Southern Margin of North China Craton and Its Significance. *Earth Science*, 41(4): 570-585 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H., Ni, P., Chen, R. Y., et al., 2016. Chronology and Geological Significance of Spillite-Keratophyre in Pingshui Formation, Northwest Zhejiang Province. *Geology in China*, 43(2): 410-418 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H., Ni, P., Chen, R. Y., et al., 2016. Fluid Inclusion Studies of the Jiande Copper Deposit, Zhejiang Province, China. *Geological Journal of China Universities*, 22(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H., Ni, P., Wang, R. C., et al., 2015. A Combined Fluid Inclusion and S-Pb Isotope Study of the Neoproterozoic Pingshui Volcanogenic Massive Sulfide Cu-Zn Deposit, Southeast China. *Ore Geology Reviews*, 66(66): 388-402. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.11.002
- Chen, P. R., Hua, R. M., Zhang, B. T., et al., 2002. Early Yanshanian Post-Orogenic Granitoids in the Nanling Region. *Science China Earth Sciences*, 45(8): 755-768. doi: 10.1007/bf02878432
- Chen, X. H., Zheng, S. H., 2008. Geological Characteristics and Prospecting Direction of V-Copper Mine in the Dongxiang Copper Deposit. *Mineral Resources and Geology*, 22(6): 528-530 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Wang, Y., Zhou, Y. G., et al., 2013. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from Volcanic-Intrusive Complexes in the Xiangshan Uranium Orefield, Jiangxi Province, and Its Geological Implications. *Geology in China*, 40(1): 217-231 (in Chinese with English abstract).
- Ding, X., Jiang, S. Y., Ni, P., et al., 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).
- Fu, S. H., Chen, G. H., 2003. Metallogenic Features and Prospecting Research of Dongxiang Porphyry Copper Deposit. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(3): 282-286 (in Chinese with English abstract).
- Ge, X. H., Liu, J. L., Ren, S. M., et al., 2014. The Formation and Evolution of the Mesozoic-Cenozoic Continental Tectonics in Eastern China. *Geology in China*, 41(1): 19-38 (in Chinese with English abstract).
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.011
- Gu, L. X., Xu, K. Q., 1986. On the South China Type Massive Sulfide Ore Deposits Formed in Marine Fault Depression Troughs on the Continental Crust. *Mineral Deposits*, (2): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P. W. O., Black, L. P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423-439. doi: 10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x
- Hou, M. L., Jiang, S. Y., Shen, K., et al., 2007. Fluid Inclusion and H-O Isotope Study of Gold Mineralization in the Penglai Gold Field, Eastern Shandong. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2241-2256 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., Li, J. L., Chen, H. H., et al., 1990. Tectonics of

- South China; Key to Understanding West Pacific Geology. *Tectonophysics*, 183 (1-4): 9-39. doi: 10.1016/0040-1951(90)90186-c
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., et al., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211 (1-2): 47-69. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
- Li, H. Q., Lu, Y. F., Wang, D. H., et al., 2006. Dating of the Rock-Forming and Ore-Forming Ages and Their Geological Significances in the Furong Ore-Field, Qitian Mountain, Hunan. *Geological Review*, 52 (1): 113-121 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Yin, G. S., 1985. A New Method for Sample Preparation in Rb-Sr Dating. *Rock and Mineral Analysis*, 4 (3): 238-242 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Chen, F. W., Cai, H., 2000. Study on Rb-Sr Isotopic Ages of Gold Deposits in West Junggar Area, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 74 (2): 181-192 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. Q., Liu, J. Q., Du, G. M., et al., 1992. Chronological Study on Metallization of Endogenetic Metallic Deposits—An Example From Xihuashan Tungsten Deposit, South China. *Chinese Science Bulletin*, 37 (12): 1109-1112 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. Z., Deng, G. P., Tao, H., et al., 1999. Analysis of Tectonic Evolution and Major Cu(Au) Polymetallic Metallogenic Series in Northeast Jiangxi Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 23 (4): 300-307 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Chen, Z. G., Liu, D. Y., et al., 2003. Jurassic Gabbro-Granite-Syenite Suites from Southern Jiangxi Province, SE China: Age, Origin, and Tectonic Significance. *International Geology Review*, 45 (10): 898-921. doi: 10.2747/0020-6814.45.10.898
- Lu, J. J., Hua, R. M., Yao, C. L., 2005. Re-Os Age for Molybdenite from the Dexing Porphyry Cu-Au Deposit of Jiangxi Province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69 (S1): A882.
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, 1-60.
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Guo, C. L., et al., 2008. Spatial-Temporal Distribution of Mesozoic Ore Deposits in South China and Their Metallogenic Settings. *Geological Journal of China Universities*, 14 (4): 510-526 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Li, X. F., et al., 2004. Mesozoic Large Scale Mineralization and Multiple Lithospheric Extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 45-55 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Chen, M. H., Yuan, S. D., et al., 2011. Geological Characteristics of the Qinhang (or Shihang) Metallogenic Belt in South China and Spatial-Temporal Distribution Regularity of Mineral Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85 (5): 636-658 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Xie, G. Q., Cheng, Y. B., et al., 2012. Mineral Deposit Models of Mesozoic Ore Deposits in South China. *Geological Review*, 55 (3): 347-354 (in Chinese with English abstract).
- Mao, J. W., Zhou, Z. H., Feng, C. Y., et al., 2012. A Preliminary Study of the Triassic Large-Scale Mineralization in China and Its Geodynamic Setting. *Geology in China*, 39 (6): 1437-1471 (in Chinese with English abstract).
- Ni, P., 2012. Progress of Researches on Fluid Inclusions. *Journal of Nanjing University: Nat. Sci. Ed.*, 48 (3): 237-239 (in Chinese with English abstract).
- Ni, P., Fan, H. R., Ding, J. Y., 2014. Progress in Fluid Inclusions. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33 (1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Shepherd, T. J., Darbyshire, D. P. F., 1981. Fluid Inclusion Rb-Sr Isochrons for Dating Mineral Deposits. *Nature*, 290 (5807): 578-579. doi: 10.1038/290578a0
- Shi, W. J., Wei, J. H., Tan, J., et al., 2014. Late Early Cretaceous Gold Mineralization in Tan-Lu Fault Zone: Evidence from Rb-Sr Isotopic Dating of Pyrite from Longquanzhan Gold Deposit. *Earth Science*, 39 (3): 325-340 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Li, H. Q., Qin, Y., et al., 2009. Rock-Forming and Ore-Forming Ages of the Yaogangxian Tungsten Deposit of Hunan Province. *Rock and Mineral Analysis*, 28 (3): 201-208 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. G., Ni, P., Wang, R. C., et al., 2013. Geological, Fluid Inclusion and Isotopic Studies of the Yinshan Cu-AU-Pb-Zn-Ag Deposit, South China: Implications for Ore Genesis and Exploration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 343-360. doi: 10.1016/j.jseas.2012.11.038
- Wang, G. G., Ni, P., Yao, J., et al., 2015. The Link between Subduction-Modified Lithosphere and the Giant Dexing Porphyry Copper Deposit, South China: Constraints from High-Mg Adakitic Rocks. *Ore Geology Reviews*, 67: 109-126. doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.12.004
- Wang, G. G., Ni, P., Zhao, C., et al., 2017. A Combined Fluid Inclusion and Isotopic Geochemistry Study of the Zhilingtou Mo Deposit, South China: Implications for Ore Genesis and Metallogenic Setting. *Ore Geology Reviews*, 81: 884-897. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.11.023

- Wang, G. G., Ni, P., Zhao, K. D., et al., 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan Volcanic-Intrusive Complex, SE China: Implications for Tectonic Evolution and Cu-Au Mineralization. *Lithos*, 150: 135–154. doi: 10.1016/j.lithos.2012.05.030
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2004. Shrimp Zircon Geochronology and Nd-Sr Isotopic Geochemistry of the Dexing Granodiorite Porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315–324 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zhao, Z. H., Jian, P., et al., 2005. Geochronology of Cretaceous A-Type Granitoids or Alkaline Intrusive Rocks in the Hinterland, South China: Constraints for Late-Mesozoic Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 795–808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Mo, X. X., Dong, F. L., et al., 2003. Fluid-Geological Mapping in the Weishan-Yongping Mineralization District, Yunnan Theory and Practice. *Geology in China*, 30(1): 73–83 (in Chinese with English abstract).
- Xu, K. Q., Wang, H. N., Zhou, J. P., et al., 1996. A Discussion on the Exhalative Sedimentary Massive Sulfide Deposits of South China. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 2–17 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. T., 1997. The Origin and Geochemical Characteristics of Sedimentary Silicalites in Dongxiang Mine, Jiangxi Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 112–116 (in Chinese with English abstract).
- Xue, J. Y., Sun, T., Zhang, W. L., et al., 2000. Some Microstructures of Copper Sulfides in Dongxiang Copper Mine, Jiangxi Province, and Their Geological Implications. *Geological Journal of China Universities*, 6(2): 149–155 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. G., Mei, Y. W., 1997. Characteristics of Geology and Metallization in the Qin Zhou-Hangzhou Paleoplate Junction. *Geology and Mineral Resources of South China*, 13(3): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Zhang, J., Liu, J. J., et al., 2008. Hydrothermal Metallogeny of the Tangjiaping Molybdenum Deposit, Henan Province. *Geology in China*, 35(6): 1240–1249 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. L., 2001. Peel Fault System of Dongxiang Copper Deposit and Its Ore-controlling Significance. *Mineral Resources and Geology*, 15(3): 157–161 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. L., He, G. C., 2002. The Tectonic Geochemistry and Prospecting Characters of Fault Zone in Dongxiang Copper Deposit. *Geology and Prospecting*, 38(6): 22–24 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Huang, X., 1979. Dongxiang Fenglin Carboniferous Volcano Rock, Jiangxi Province. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Sciences Edition)*, (1): 41–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C., Ni, P., Wang, G. G., et al., 2013. Geology, Fluid Inclusion, and Isotope Constraints on Ore Genesis of the Neoproterozoic Jinshan Orogenic Gold Deposit, South China. *Geofluids*, 13(4): 506–527. doi: 10.1111/gfl.12052
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., 2004. Direct Isotope Dating for Metallic Ore Deposits. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 425–434 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Bao, Z. W., Zhang, B. Y., 1998. Geochemistry of the Mesozoic Basaltic Rocks in Southern Hunan Province. *Science China Earth Sciences*, 41(S1): 102–112. doi: 10.1007/bf02875640
- Zhou, T. F., Yue, S. C., 1998. Geochronology and Isotope Geochemistry of the CU-AU Mineralization Belt in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Area, China. *Chinese Science Bulletin*, 43(S1): 164–164. doi: 10.1007/bf02891667
- Zhu, J. C., Zhang, C. H., 1981. On the Occurrence of Carboniferous Volcanics and Origin of the Copper and Tungsten Deposits of the Fenglin District, Dongxiang, Jiangxi. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 17(2): 269–282 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. T., Ni, P., Wang, G. G., et al., 2016. Fluid Inclusion, H-O Isotope and Pb-Pb Age Constraints on the Genesis of the Yongping Copper Deposit, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 171: 55–70. doi: 10.1016/j.gexplo.2016.01.018

### 附中文参考文献

- 蔡逸涛, 倪培, 沈昆, 等, 2011. 江西东乡铜矿流体包裹体研究. *岩石学报*, 27(5): 1375–1386.
- 曹正琦, 翟文建, 蒋幸福, 等, 2016. 华北克拉通南缘约 2.5 Ga 构造变质事件及意义. *地球科学*, 41(4): 570–585.
- 陈辉, 倪培, 陈仁义, 等, 2016a. 浙江建德铜矿流体包裹体研究. *高校地质学报*, 22(1): 1–11.
- 陈辉, 倪培, 陈仁义, 等, 2016b. 浙西北平水铜矿细碧角斑岩成岩年龄及其地质意义. *中国地质*, 43(2): 410–418.
- 陈小惠, 郑孙华, 2008. 东乡铜矿 V 号矿体成矿地质特征及找矿方向探讨. *矿产与地质*, 22(6): 528–530.
- 陈正乐, 王永, 周永贵, 等, 2013. 江西相山火山—侵入杂岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *中国地质*, 40(1): 217–231.
- 丁昕, 蒋少涌, 倪培, 等, 2005. 江西武山和永平铜矿含矿花岗岩体锆石 SIMSU-Pb 年代学. *高校地质学报*, 11(3): 383–389.
- 付守会, 陈广浩, 2003. 江西东乡铜矿成矿地质特征与找矿实



- 践.大地构造与成矿学,27(3):282-286.
- 付守会,2003.江西东乡铜矿成矿元素分布规律及构造成矿特征研究(硕士学位论文).广州:中国科学院研究生院(广州地球化学研究所).
- 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等,2014.中国东部中-新生代大陆构造的形成与演化.中国地质,41(1):19-38.
- 顾连兴,徐克勤,1986.论大陆地壳断裂拗陷带中的华南型块状硫化物矿床.矿床地质(2):1-13.
- 侯明兰,蒋少涌,沈昆,等,2007.胶东蓬莱金矿区流体包裹体和氢氧同位素地球化学研究.岩石学报,23(9):2241-2256.
- 李华芹,陈富文,蔡红,2000.新疆准噶尔地区不同类型金矿床 Rb-Sr 同位素年代研究.地质学报,74(2):181-192.
- 李华芹,刘家齐,杜国民,等,1992.内生金属矿床成矿作用年代学研究——以西华山钨矿床为例.科学通报,37(12):1109-1112.
- 李华芹,路远发,王登红,等,2006.湖南骑田岭芙蓉矿田成矿时代的厘定及其地质意义.地质论评,52(1):113-121.
- 李华芹,尹国师,1985.铷-锶年龄测定中样品制备的一种新方法.岩石矿物及测试,4(3):238-242.
- 李培铮,邓国萍,陶红,等,1999.赣东北壳体构造演化与铜(金)多金属成矿系列.大地构造与成矿学,23(4):300-307.
- 毛景文,陈懋弘,袁顺达,等,2011.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律.地质学报,85(5):636-658.
- 毛景文,谢桂青,程彦博,等,2009.华南地区中生代主要金属矿床模型.地质论评,55(3):347-354.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,等,2008.华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境.高校地质学报,14(4):510-526.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,等,2004.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展.地学前缘,11(1):45-55.
- 毛景文,周振华,丰成友,2012.初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景.中国地质,39(6):1437-1471.
- 倪培,2012.前言:流体包裹体研究进展.南京大学学报:自然科学版,48(3):237-239.
- 倪培,范宏瑞,丁俊英,2014.流体包裹体研究进展.矿物岩石地球化学通报,33(1):1-5.
- 石文杰,魏俊浩,谭俊,等,2014.郟庐断裂带晚白垩世金成矿作用:来自龙泉站金矿床黄铁矿 Rb-Sr 年代学证据.地球科学,39(3):325-340.
- 王登红,李华芹,秦燕,等,2009.湖南瑶岗仙钨矿成岩成矿作用年代学研究.岩矿测试,28(3):201-208.
- 王强,赵振华,简平,等,2004.德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学.岩石学报,20(2):315-324.
- 王强,赵振华,简平,等,2005.华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约.岩石学报,21(3):795-808.
- 王勇,莫宣学,董方浏,2003.云南巍山-永平矿集区流体地质填图的理论与实践.中国地质,30(1):73-83.
- 徐克勤,王鹤年,周建平,等,1996.论华南喷流-沉积块状硫化物矿床.高校地质学报,2(3):2-17.
- 徐跃通,1997.江西东乡矿区沉积硅质岩的地球化学特征和成因.沉积学报,15(3):112-116.
- 薛纪越,孙涛,张文兰,等,2000.江西东乡铜矿中含铜硫化物的几种微结构及其地质意义.高校地质学报,6(2):149-155.
- 杨明桂,梅勇文,1997.钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征.华南地质与矿产,13(3):52-59.
- 杨艳,张静,刘家军,等,2008.河南汤家坪钼矿床流体成矿作用研究.中国地质,35(6):1240-1249.
- 张国林,2001.东乡铜矿剥离断层系统及其控矿意义.矿产与地质,15(3):157-161.
- 张国林,何国朝,2002.东乡铜矿断裂带构造地球化学及找矿标志.地质与勘探,38(6):22-24.
- 张祖廉,黄旭初,1979.江西东乡枫林石炭系火山岩.江西师院学报:自然科学版,(1):41-50.
- 赵葵东,蒋少涌,2004.金属矿床的同位素直接定年方法.地学前缘,11(2):425-434.
- 朱金初,张承华,1981.江西东乡枫林石炭纪火山岩及铜、钨矿床的成因.南京大学学报:自然科学版,17(2):269-282.