

doi: 10.12029/gc20170107

王继强, 孙维安, 袁峰, 尚世贵, 周涛发, 钟富明, 张若飞. 2017. 庐枞盆地大倪庄铜矿床地质特征、成岩时代及成因探讨[J]. 中国地质, 44(1): 86-100.

Wang Jiqiang, Sun Weian, Yuan Feng, Shang Shigui, Zhou Taofa, Zhong Fuming, Zhang Ruofei. 2017. Geological characteristics, rock-forming epoch and genesis of the Danizhuang Cu deposit in Luzong basin[J]. Geology in China, 44(1): 86-100(in Chinese with English abstract).

庐枞盆地大倪庄铜矿床地质特征、成岩时代 及成因探讨

王继强¹ 孙维安¹ 袁峰¹ 尚世贵² 周涛发¹ 钟富明¹ 张若飞¹

(1.合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 2.安徽省地矿局327地质队, 安徽合肥 230009)

摘要: 大倪庄铜矿是庐枞盆地内部近年来发现的一处小型斑岩型矿床。本次工作以大倪庄铜矿为研究对象, 基于详细的野外观察和系统的岩相学、矿相学工作, 总结了矿床的蚀变特征, 即主要发育: 钾硅酸盐化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、碳酸盐化蚀变; 确定了矿化特征、矿物生成顺序并划分了成矿阶段, 即: 钾硅酸盐化阶段、硫化物阶段、碳酸盐化阶段, 其中硫化物阶段可进一步划分为石英硫化物亚阶段、绿帘石-绿泥石亚阶段。通过对与成矿有关的侵入岩体(正长斑岩)采用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年, 获得正长斑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为(126.6±1.8) Ma, 形成时代为早白垩世, 对应于盆地内双庙旋回岩浆侵入活动。通过与其他区域相似矿床对比分析, 探究了此类矿床控矿因素, 为该地区斑岩型铜矿找矿勘查提供参考。

关键词: 斑岩型铜矿; 围岩蚀变; 成矿期次; LA-ICP-MS锆石U-Pb定年

中图分类号: P618.41; P597+.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2017)01-0086-15

Geological characteristics, rock-forming epoch and genesis of the Danizhuang Cu deposit in Luzong basin

WANG Jiqiang¹, SUN Weian¹, YUAN Feng¹, SHANG Shigui², ZHOU Taofa¹,
ZHONG Fuming¹, ZHANG Ruofei¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. No. 327 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: The Danizhuang copper deposit is a small porphyry deposit discovered from Luzong basin in recent years. The authors investigated wall rock alterations of the Danizhuang copper deposit on the basis of detailed field observations and petrographic and mineralogical studies, and revealed that the alterations include potassic alteration, beresitization and carbonatization. The characteristics of mineralization, the sequence of mineral deposition and the ore-forming stages, i.e., potassium silicate stage, sulfide stage, carbonate stage, were determined. The sulfide stage can be further divided into quartz sulfide sub-stage and epidote-

收稿日期: 2015-12-17; 改回日期: 2016-05-05

基金项目: 安徽省公益性地质工作项目(2011-g-2)和新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0324)联合资助。

作者简介: 王继强, 男, 1991年生, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: wangjiqiang2012@sina.com。

chlorite sub-stage. The authors collected magmatic rocks (orthophyre) related to mineralization and obtained the age of $(126.6 \pm 1.8 \text{ Ma})$ by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, which belongs to Early Cretaceous and was related to the intrusive activity of Shuangmiao Formation. Based on a comparison with similar deposits in other volcanic basins of eastern China, the authors discussed ore-control factors for the formation of this type of deposits, which provides reference for finding porphyry copper deposits in this area.

Key words: porphyry copper deposit; wall rock alteration; ore-forming stage; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating

About the first author: WANG Jiqiang, male, born in 1991, master, majors in mineralogy, petrology and ore deposits; E-mail: wangjiqiang2012@sina.com.

Fund support: Supported by Academy of Geological Survey of Anhui Province (No. 2011-g-2) and New Century Excellent Talents in University Support Program (No. NCET-10-0324).

1 引言

庐枞盆地是中国东部成岩成矿特色明显的陆相火山岩盆地,是长江中下游成矿带的重要组成部分,以发育著名的“玢岩型铁矿”为主要特征。近年来随着找矿勘查工作的不断开展,以龙桥为代表的沉积热液改造型铁矿、庐枞盆地深部小包庄铁矿床、东顾山钨多金属矿床的发现,丰富了以往对盆地的矿化类型的认识(赵文津等, 2008; 范裕等, 2010; Zhou et al., 2011; 刘一男等, 2016; 聂利青等, 2016)。与此同时,庐枞盆地中与正长岩类有关的铁-铜矿化系列已逐步受到重视,并可能成为庐枞矿集区未来重要的找矿方向(李洪英等, 2009; 张舒等, 2014)。一直以来对庐枞盆地铜金矿化的寻找都难有进展。现已知的铜矿床主要以盆地外围的沙溪斑岩型铜矿为代表(王世伟等, 2014; 周涛发等, 2016),而盆地内部只有一些小型热液脉型铜矿床并且研究程度相对匮乏。大倪庄矿床是安徽省地矿局327地质队近年来新发现的小型规模的铜矿床,同时也是庐枞盆地内部发现的新的铜矿化类型。对大倪庄矿床开展相关研究,可以为庐枞盆地未来找矿勘查提供一定的资料。

大倪庄铜矿位于巴家滩岩体西侧,整体上处于庐枞火山-构造洼地中心七家山火山机构边缘。围绕巴家滩辉石二长岩在 60 km^2 范围内共有25个脉状铜(金)矿床、矿化点分布(任启江等, 1993; 刘珺等, 2007),前人(姜福芝等, 2003)认为火山活动对铁、铜多金属矿床的形成具有重要意义,尤其在火山岩地区,火山机构对铜金矿化分布有重要控制作用。有关学者(杨荣勇等, 1993; 覃永军等, 2010; 张乐骏等, 2010)研究后提出庐枞火山岩盆地中部巴家

滩周围地区铜矿化的形成与巴家滩辉石二长岩体的形成密切相关,庐枞巴家滩岩体周围具有寻找斑岩型铜矿的前景。

2 区域地质特征

庐枞盆地位于长江中下游成矿带中部,介于安徽省庐江县(庐)和枞阳县(枞)之间,为中生代陆相火山岩盆地,是长江中下游多金属成矿带中的一个重要的多金属矿集区(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992)。庐枞盆地形状上呈耳壳状,受3组深大断裂控制(图1)。盆地广泛发育属于橄榄安粗质的火山-侵入岩(刘洪等, 2002; 袁峰等, 2008; 薛怀民等, 2010)。陆相火山岩形成于早白垩世,空间分布特征呈半环形,由老到新,自盆地边缘至盆地中心依次出露龙门院组(K_1l)、砖桥组(K_1z)、双庙组(K_1s)和浮山组(K_1f),各组之间均为喷发不整合接触,构成4个旋回。各旋回均有其相应的岩浆侵入活动,并形成各种类型的侵入岩、次火山岩。

3 矿床地质特征

大倪庄矿床位于庐枞火山-构造洼地中心矾母山地区,巴家滩岩体西侧,向西距罗河铁矿 2.5 km (图1)。

3.1 地层

矿区主要出露砖桥组(K_1z)、双庙组(K_1s)、浮山组(K_1f)火山岩地层,局部分布第四系(Q) (图2a)。砖桥组分布于矿区西北部,主要岩性为灰白色晶屑凝灰岩及灰色角闪粗安岩;双庙组分布于矿区中南部,主要岩性为紫红色粗安岩、杂色火山角砾岩,与下伏双庙组火山岩呈喷发不整合接触关系;浮山组主要在矿区南部出露,岩性为灰紫色集块角砾岩、

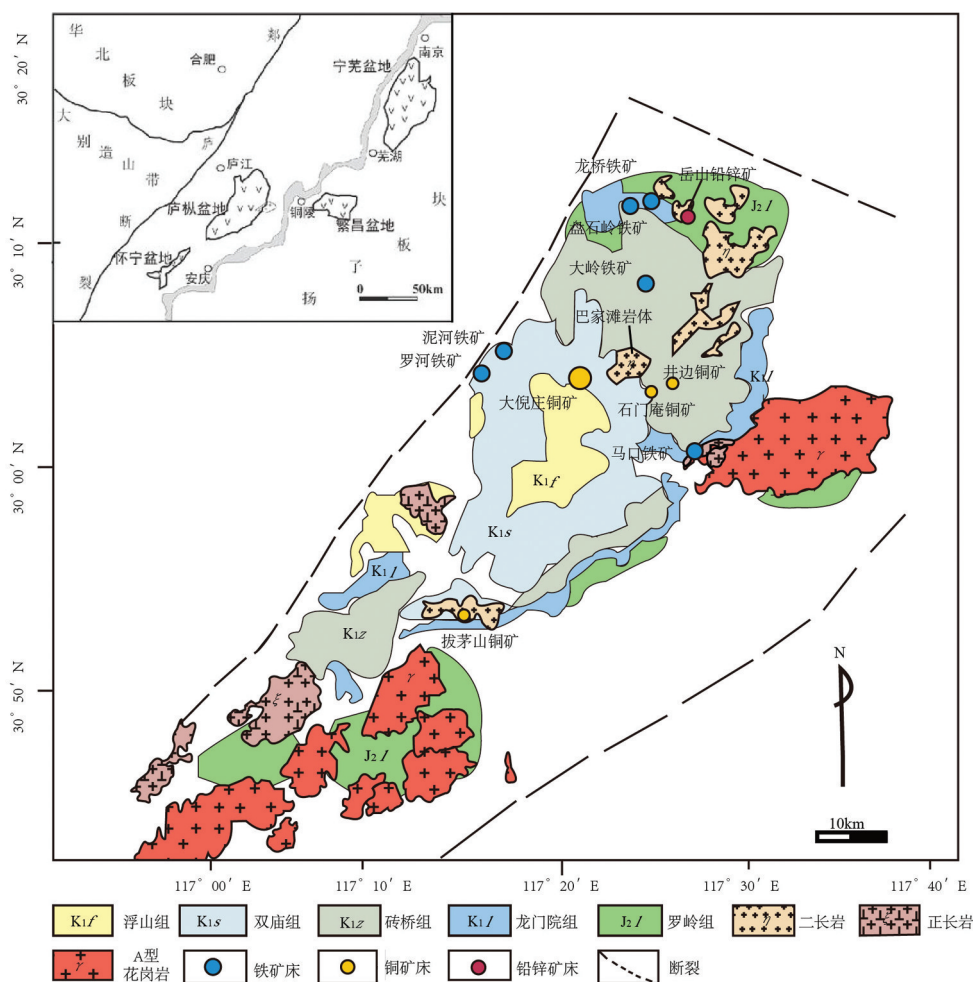


图1 庐枞盆地岩浆岩及矿产分布图(据周涛发等, 2016修改)

Fig.1 Distribution of magmatic rocks and ore deposits in Luzong volcanic basin (modified from Zhou et al., 2016)

深灰色粗面玄武岩, 与下伏双庙组火山岩呈喷发不整合接触; 第四系由黏土、粉砂黏土、砂砾组成。

3.2 构造

矿区内构造以断裂为主, 有NW向、SN向2组, 其中NW向断裂最为发育(图2a)。断层走向NW310°~330°, 倾向SW, 倾角50°~70°。

3.3 侵入岩

矿区侵入岩规模较小, 主要有正长斑岩、安山玢岩及辉绿岩等(图2a)。

安山玢岩主要位于矿区深部, 呈深灰色, 似斑状结构, 块状构造。斑晶主要为斜长石、黑云母、角闪石, 斑晶大小0.5~1.5 mm, 基质为细粒的长石、石英颗粒, 偶见磷灰石、榍石、磁铁矿等。岩体多发育绿帘石、绿泥石化蚀变。

正长斑岩见于矿区浅部, 肉红色, 斑状结构, 块

状构造。斑晶占30%, 基质占70%, 主要矿物成分为正长石65%, 斜长石25%, 少量黑云母5%、辉石2%、角闪石2%、石英1%~2%。斑晶中正长石: 半自形板状, 大小为1~2.5 mm; 斜长石: 半自形—他形板状, 粒径0.5~1 mm, 部分斜长石斑晶发育钾长石化、绢云母化强烈; 辉石: 主要为普通辉石, 半自形粒状, 正高突起, 干涉色呈二级蓝绿; 角闪石: 短柱状, 自形粒状, 干涉色二级黄; 黑云母: 半自形—自形片状, 棕褐色, 粒径0.07~1 mm。基质为长石、石英等。岩体常发育绢云母化蚀变, 并可见黄铜矿矿化现象, 呈浸染状构造, 矿化分布与岩体关系密切。

3.4 矿化特征

大倪庄铜矿化体在平面上呈长条形, 矿体在纵向延展大于横向, 根据矿体分布特征及赋存状态将钻孔所见矿体分为上下2个矿(化)体(图2b)。I号

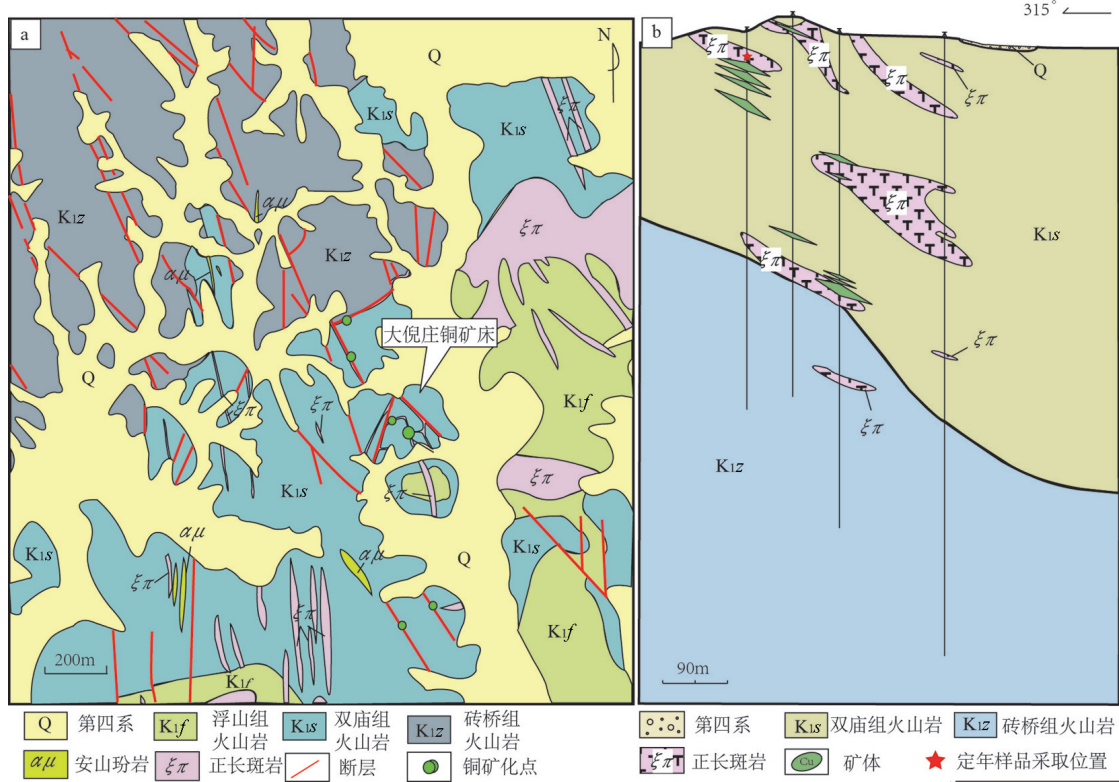


图2 大倪庄铜矿床地质图(a)和24号勘探线地质特征剖面图(b)
(据安徽省地矿局327地质队, 2010修改)

Fig.2 Geological map of the Danizhuang copper deposit and geological characteristic cross section along No. 24 exploration line of the Danizhuang copper deposit (modified from No. 327 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, 2010)

矿(化)体有5个小铜矿体组成, 铜矿(化)体产于正长斑岩岩体、岩体与火山岩的接触带以及双庙组火山岩中, 铜矿体呈透镜状, 倾向SE, 倾角20°~25°。II号矿(化)体位于I号矿化体下部, 有9个小矿体组成, 铜矿(化)体产于双庙组火山岩地层中, 铜矿体呈透镜状, 倾向SE, 倾角20°~25°。铜矿床中的矿石主要类型为黄铜矿-镜铁矿浸染状矿石, 黄铜矿-镜铁矿-石英脉状矿石。

主要的矿石矿物有: 黄铜矿、斑铜矿。脉石矿物有: 黄铁矿、镜铁矿、磁铁矿、石英、绿泥石、绿帘石、方解石等。矿石的结构为自形一半自形粒状结构、他形粒状结构、交代(溶蚀)结构(图3a、d、e)、骸晶结构(图3a、b)、碎裂结构(图3f)、乳滴状结构等(图3c)。矿石主要构造为稀疏浸染状构造、脉状构造、网脉状构造。

铜矿(化)体主要赋存于正长斑岩岩体和岩体与火山岩地层的接触带中, 矿化从岩体中心向外, 矿

化特征表现各异, 呈现一定的空间关系, 在钻孔中表现最明显。产于岩体与火山岩接触带中的矿化, 矿体呈透镜状, 厚13.50 m, 平均品位0.38%, 矿石构造为浸染状, 主要发育钾硅酸盐化、绢云母化、硅化蚀变。位于斑岩体外侧的火山岩中也见有矿化, 矿体厚13.12 m, 铜平均品位0.53%, 矿石构造为浸染状、脉状。如粗安岩中矿石构造以浸染状, 细脉状为主, 在火山角砾岩、凝灰岩可见脉状构造, 并发育绢云母化、硅化、绿泥石化、绿帘石化蚀变。

4 锆石U-Pb定年

4.1 样品的采集与分析方法

本次研究工作运用LA-ICP-MS锆石U-Pb定年分析方法测定了大倪庄铜矿中正长斑岩的形成年代, 样品采自大倪庄铜矿钻孔ZK2403中(图2b), 样品较新鲜呈肉红色, 斑状结构, 块状构造。斑晶矿物主要为正长石、斜长石, 基质为隐晶质(图4)。

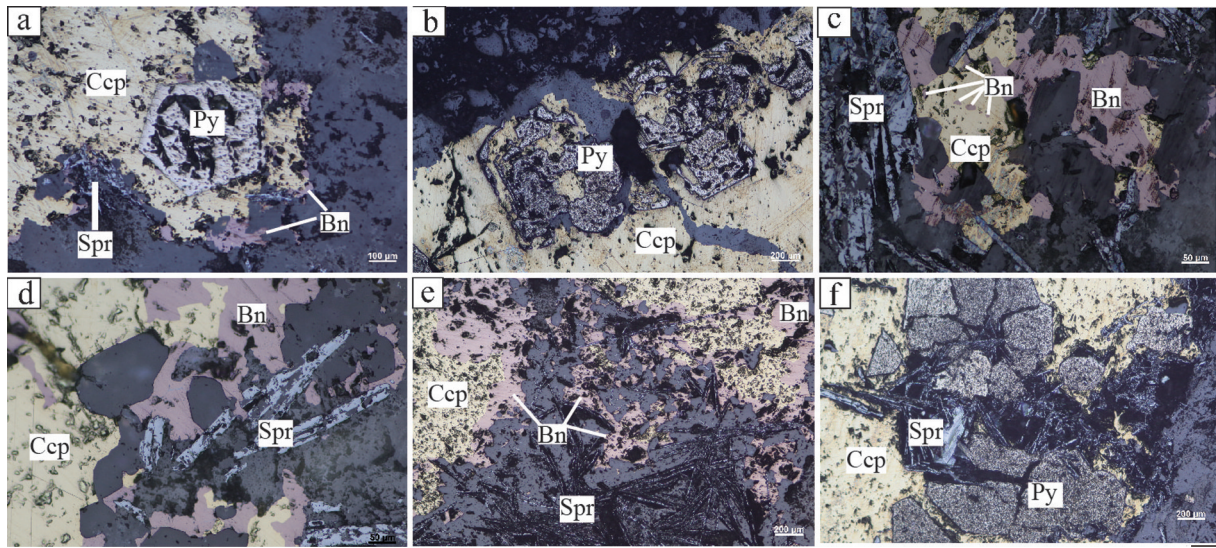


图3 大倪庄铜矿床主要矿石结构

a—交代(溶蚀)结构, 黄铜矿溶蚀早期的斑铜矿; b—骸晶结构, 黄铜矿交代早期的黄铁矿, 黄铁矿呈骸晶残留; c—乳滴状结构, 斑铜矿呈乳滴状残留在黄铜矿中; d、e—交代(溶蚀)结构, 镜铁矿晶体穿插较早期的斑铜矿与黄铜矿; 少量斑铜矿在黄铜矿中呈交代残留; f—碎裂结构, 镜铁矿穿插黄铁矿; Bn—斑铜矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Spr—镜铁矿

Fig.3 Ore texture of the Danizhuang copper deposit

a—Metasomatic texture, chalcocopyrite reacted with bornite; b—Skeletal texture, chalcocopyrite reacted with pyrite, residual pyrite as skeleton crystal; c—Emulsion texture, residual bornite in chalcocopyrite as droplet; d,e—Metasomatic texture, specularite crystal that intruded into bornite and chalcocopyrite, residual bornite in chalcocopyrite; f—Cataclastic texture, specularite crystal that intruded into pyrite crystal; Bn—Bornite; Ccp—Chalcocopyrite; Py—Pyrite; Spr—Specularite

年代学测试的样品前期处理的大体流程为: (1) 分选: 将要分选锆石单矿物的侵入岩样品破碎至矿物自然粒度之(50~150 μm), 通过磁选和重液等选矿技术, 将矿物初步分离, 此过程在河北廊坊单矿物挑选的实验室完成, 然后配合双目镜手选方法进行单矿物分离提纯, 分选出晶型完好、颗粒大于 50 μm 的锆石(>60 颗)作为定年和成分测定的对象。(2) 制

靶: 将锆石单矿物黏在双面胶上, 然后用无色透明的环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后, 抛光至锆石单颗粒露出 1/3 以上。(3) 观察照相: 对抛光好的锆石进行清洗后进行透、反射显微镜观察, 并在镀上导电粉后进行二次电子(SE)、背散射(BSE)和阴极发光(CL)等仪器观察并记录, 测年实验将依据观察照片选取岩浆环带清晰、自形程度高、大小适中、

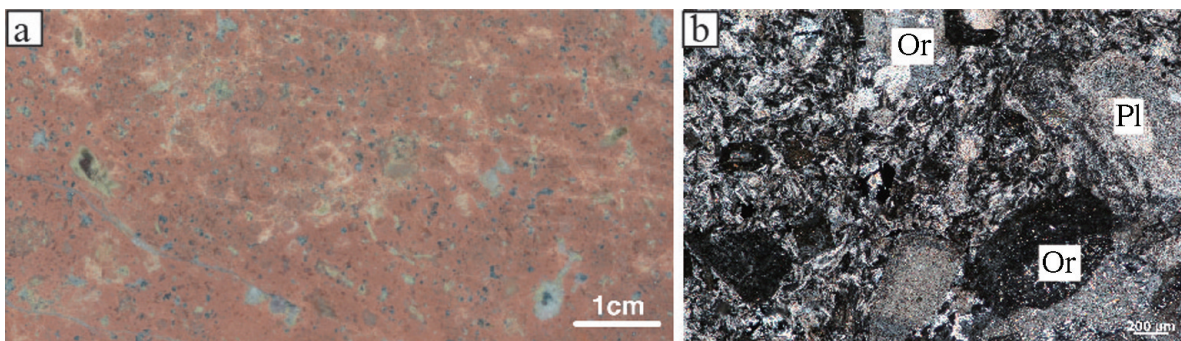


图4 测年样品特征

a—手标本照片; b—镜下显微照片

Fig.4 Characteristics of samples

a— Photograph of samples; b—Photomicrograph of samples

表面光滑、无裂纹的岩浆成因特征的锆石进行U-Pb测试分析, 锆石阴极发光显微照相(CL图)在合肥工业大学电子探针室完成。

样品的LA-ICP-MS锆石U-Pb定年分析在合肥工业大学资源与环境工程学院LA-ICP-MS实验室完成。测试前分别用酒精和稀硝酸(5%)轻擦样品表面, 以除去可能的污染。采用仪器为Agilent 7500a ICP-MS, 采用He作为剥蚀物质载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610进行仪器最佳化。锆石年龄分析采用的光斑直径为30 μm, 并采用国际标准锆石91500作为外标标准物质, 并每隔5个样品分析点测一次标准, 每隔10个点进行仪器最佳化, 确保标准和样品的仪器条件完全一致。样品的同位素数据处理采用ICPMS DataCal (V8.6版)软件进行, 普通铅校正采用的Andersen的方法, 年龄计算及谐和图的绘制采用Isoplot (2.49版)进行, 实验过程中误差为1σ。

4.2 测试结果

测试的大多数锆石自形程度好, 为细长的柱状、短柱状、双锥状晶体, 表面光滑, 晶面清晰, 锆石颗粒长轴变化集中于30~200 μm, 长短轴的比值为1.5~3.0, 锆石中的Th/U比值可以指示锆石的成因(表1), 岩浆锆石的Th/U比值一般大于0.1, 而变质锆石的Th/U比值一般小于0.1 (Belousova et al., 2002)。样品ZK2403-05中锆石的Th/U比值变化范围在0.8~2.1, 均大于0.1, 应属于典型的岩浆成因锆石。由锆石的阴极发光图像可以看出, 大部分锆石晶体内部发育较好的岩浆震荡环带。无后期变质壳, 表明这些锆石是岩浆成因, 应代表的是岩浆岩的形成时代。此次测试的18个点都集中分布于一致曲线上或其附近, 具有较好的一致性(图5)。得到大倪庄铜矿床正长斑岩²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(126.6±1.8) Ma。

5 讨论

5.1 矿床类型探讨

基于矿床地质特征的认识和年代学测试工作的结果, 笔者将从成岩成矿时代、成矿期次、围岩蚀变方面对大倪庄铜矿床类型加以探讨并分析其形成原因。

5.1.1 成岩成矿时代分析

矿床成矿时代的厘定是探究矿床成因的基础, 本文研究获得了正长斑岩的形成时代为(126.6±1.8) Ma, 前人(任启江, 1991; 吴明安等, 1996)通过庐枞盆地内矿化和蚀变现象与不同类型侵入岩的关系研究, 确定盆地内的成矿作用主要发生在岩体侵位以后, 侵入岩的成岩年龄可以近似代表矿床的成矿年龄。大倪庄正长斑岩的形成时代对应于129~123 Ma双庙旋回火山岩浆活动形成的正长岩类侵入岩, 成岩成矿时代小于双庙旋回火山岩的绝对年龄(130.5±0.8) Ma (周涛发等, 2010), 与矿床地质特征相符。大倪庄铜矿为长江中下游成矿带第二阶段大规模成岩成矿作用的产物, 对应于典型的拉张构造背景(Yang et al., 2014; 邓晋福等, 2006; 肖庆辉等, 2006)。

5.1.2 成矿期次分析

根据矿床不同脉体之间的穿切关系和不同矿物之间的交代关系等, 可以把矿床成矿期次划分为热液期和表生期。其中, 热液期可分为钾硅酸盐化阶段、硫化物阶段、碳酸盐化阶段, 硫化物阶段包括石英硫化物亚阶段和绿帘石-绿泥石亚阶段2个亚阶段(图6)。

(1) 热液期

① 钾硅酸盐化阶段: 该阶段发生在成矿作用早期, 持续时间较短, 出现的矿物组合为: 钾长石±黑云母±磁铁矿。这一阶段可见原生长石钾化, 主要表现为钾长石主要沿斜长石的边缘、解理和裂隙发生交代作用, 岩体基质中有鳞片状热液黑云母生成, 矿床中晚期磁铁矿交代角闪石、辉石等暗色矿物。

② 硫化物阶段: 本阶段为铜矿化主要阶段, 发生在钾硅酸盐化阶段后。此阶段可细分为石英硫化物亚阶段和绿帘石-绿泥石亚阶段。石英硫化物亚阶段的主要矿物组合为: 绢云母±黄铁矿±石英±斑铜矿±黄铜矿, 以矿床中绢云母、石英等矿物和黄铁矿、黄铜矿等硫化物的大量出现为主要标志; 绿帘石-绿泥石亚阶段的主要矿物组合为: 绿帘石±绿泥石±方解石±石膏±黄铜矿。绿帘石-绿泥石亚阶段为石英硫化物亚阶段的继续, 但以脉石矿物中石英向方解石转变为特点。此阶段可见石英-黄铜矿-斑铜矿-黄铁矿脉和方解石-绿泥石-绿帘石脉两种脉体(图7f、g); 团块状钾化岩体被石英-黄铜矿

表 1 大倪庄铜矿床正长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of orthophyre from the Danizhuang copper deposit

Sample No.	U (ppm)	Pb (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (ratio)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (ratio)	Age (Ma)
[Redacted content]					

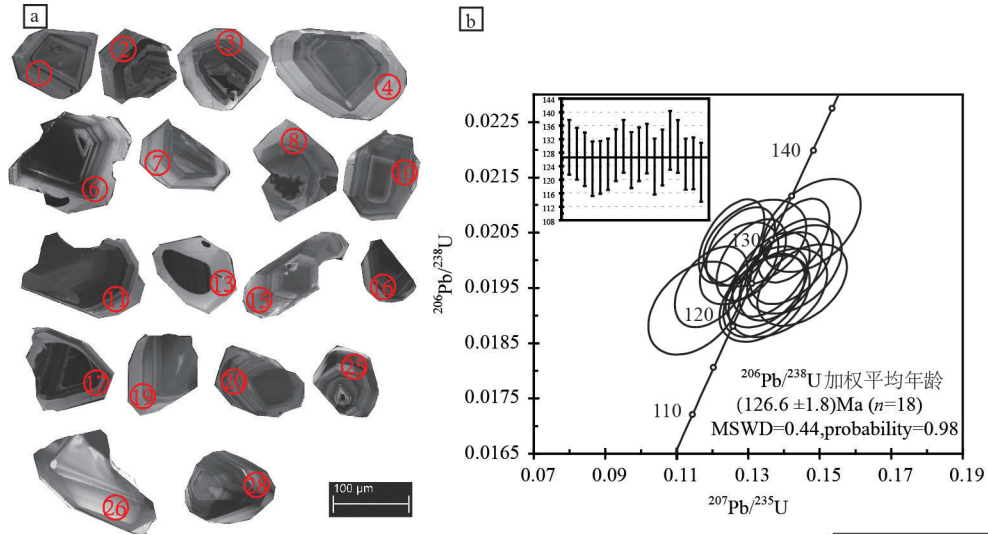


图5 大倪庄铜矿正长斑岩锆石阴极发光(CL)图像(a)和大倪庄铜矿正长斑岩锆石 U-Pb 谐和图(b)
Fig.5 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from orthophyre of the Danizhuang copper deposit (a); U-Pb concordia diagram of zircons from orthophyre of the Danizhuang copper deposit (b)

矿物名称	热液期				表生期
	钾硅酸盐化阶段	硫化物阶段		碳酸盐化阶段	
		石英硫化物亚阶段	绿帘石-绿泥石亚阶段		
钾长石	▬				
黑云母	▬				
磁铁矿	▬				
绢云母		▬			
黄铁矿		▬			
石英		▬			
斑铜矿		▬			
黄铜矿		▬			
绿泥石			▬		
绿帘石			▬		
石膏				▬	
方解石				▬	
镜铁矿				▬	
电气石				▬	
孔雀石					▬
褐铁矿					▬
高岭土					▬
明矾石					▬

图6 大倪庄铜矿矿物生成顺序
Fig.6 Paragenetic sequence of the Danizhuang copper deposit

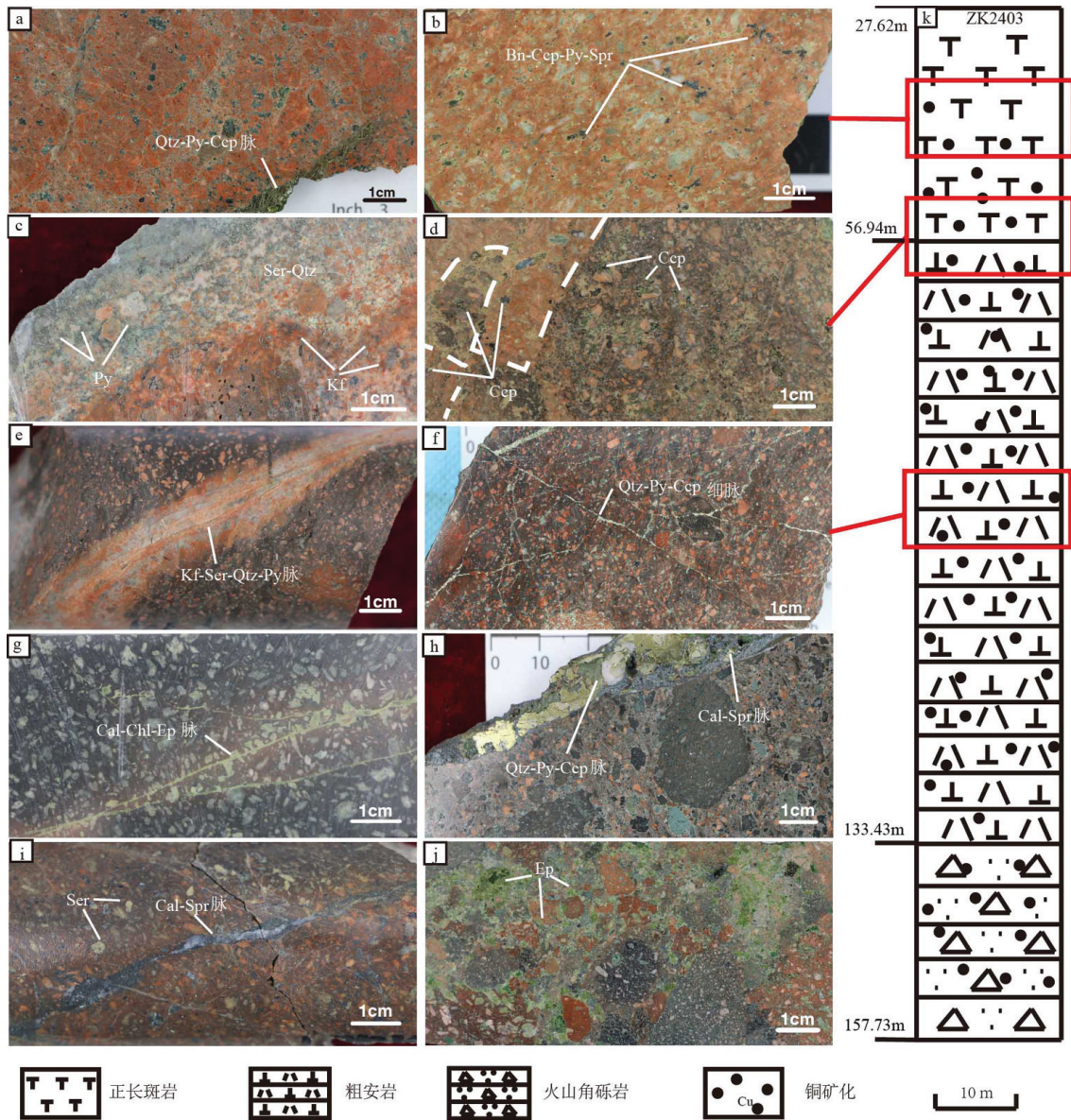


图7 大倪庄铜矿床手标本照片

a—粗安岩发育团块状钾化, 黄铜矿-黄铁矿-石英脉体穿切岩体; b—正长斑岩发育浸染状黄铜矿化并有绢云母化及硅化蚀变; c—火山角砾岩发育强烈绢云母化、黄铁矿化、硅化, 叠加于钾化蚀变; d—围岩(粗安岩)与正长斑岩接触带, 发育浸染状黄铜矿化; e—绢云母-石英-黄铁矿脉穿切粗安岩, 脉体两侧发育钾化晕; f—石英-黄铁矿-黄铜矿组合在粗安岩中呈细脉-浸染状; g—方解石-绿泥石-绿帘石脉穿切粗安岩, 脉体两侧发育钾长石晕; h—黄铜矿-黄铁矿-石英脉沿裂隙充填穿切火山角砾岩, 后期又被方解石-镜铁矿脉充填; i—方解石-镜铁矿脉穿切粗安岩, 粗安岩斑晶发育钾长石化、绢云母化; j—火山角砾岩发育团块状绿帘石化; k—钻孔ZK2403柱状图(部分); Kf—钾长石; Qtz—石英; Ser—绢云母; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cal—方解石; Bn—斑铜矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Spr—镜铁矿

Fig.7 Photograph of the Danizhuang copper deposit

a—Massive potassic alteration in trachyandesite, chalcopyrite-pyrite-quartz vein cutting trachyandesite; b—Disseminated mineralization in orthophyre, with sericitization and silicification; c—Massive sericitization, silicification, pyritization in volcanic breccia, and superimposed upon massive potassic alteration; d—Contact zone showing orthophyre intruding into wall rock (trachyandesite), disseminated chalcopyrite developed; e—K-feldspar-sericite-quartz-pyrite vein cutting trachyandesite, potassic alteration aureole growing on both sides of vein; f—Chalcopyrite-pyrite-quartz showing veinlet-dissemination in trachyandesite; g—Calcite-chlorite-epidote vein cutting trachyandesite, K-feldspar growing on both sides of the vein; h—Chalcopyrite-pyrite-quartz cutting volcanic breccia along fractures, then filled by calcite-specularite; i—Calcite-specularite vein cutting growing massive potassic alteration and sericitized trachyandesite; j—Massive epidotization growing at volcanic breccia; k—Part of ZK2403 drill hole column; Kf—K-feldspar; Qtz—Quartz; Ser—Sericite; Chl—Chlorite; Ep—Epidote; Cal—Calcite; Bn—Bornite; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Spr—Specularite

脉穿插(图 7a); 石英-黄铜矿-斑铜矿脉穿切团块状绢云母化基质(图 8c); 方解石、绿帘石、黄铜矿共生, 绿帘石脉穿切绢云母化火山岩基质(图 8g、h、i); 斜长石斑晶被绿泥石、绿帘石交代等现象(图 8j)。

③ 碳酸盐化阶段: 此阶段发生在成矿作用晚

期, 主要矿物组合为: 方解石±电气石±镜铁矿。矿床中可见镜铁矿±方解石脉穿插成矿早期热液脉体现象(图 7i), 如晚期的方解石脉穿切绿泥石、绿帘石脉(图 8k、l)等。矿床深部镜铁矿为细粒、他形, 只在火山岩裂隙、空隙中晶形较好, 而在矿床浅部镜铁

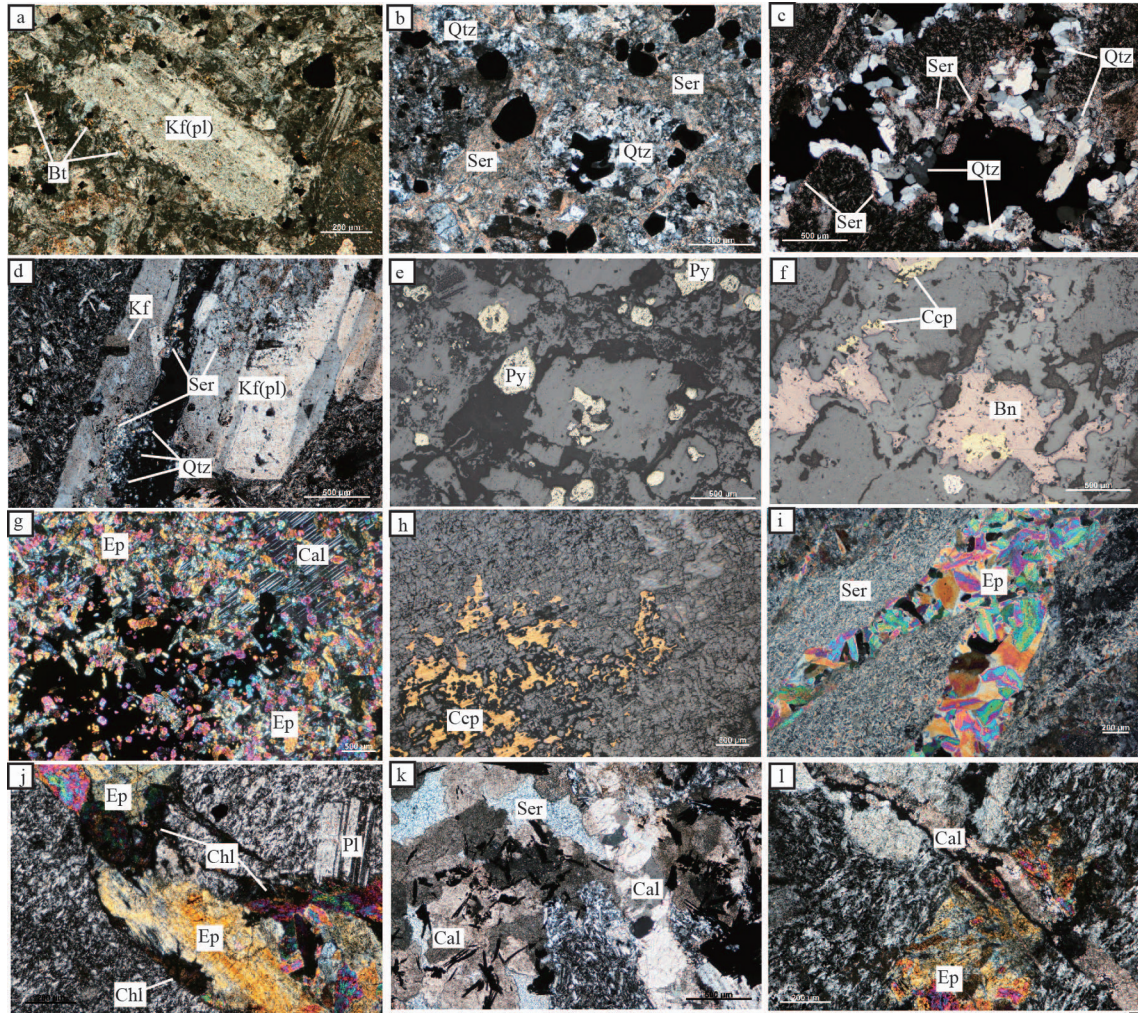


图 8 大倪庄铜矿床镜下显微照片

a—斜长石斑晶发生钾长石化, 斑晶周围的基质中有碎屑状的黑云母; b—岩石斑晶基质整体绢云母化、硅化、黄铁矿化; c—火山岩基质绢云母化, 后期被石英-斑铜矿-黄铜矿脉穿切; d—发育钾长石化的斜长石斑晶后期被石英绢云母化脉穿切; e—b 的反射光照片; f—c 的反射光照片; g—方解石-绿帘石-黄铜矿组合; h—g 的反射光照片; i—绿帘石脉穿切绢云母化火山岩基质; j—粗安岩斑晶和基质上团块状绿帘石、绿泥石组合; k—镜铁矿、方解石组合呈脉状、团块状叠加于早期绢云母化上; l—方解石脉穿切绿帘石化蚀变 Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bt—黑云母; Qtz—石英; Ser—绢云母; Chl—绿泥石; Ep—绿帘石; Cal—方解石 Bn—斑铜矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Spr—镜铁矿

Fig. 8 Photomicrograph of the Danizhuang copper deposit

a— Plagioclase phenocrysts with potassic alteration, matrix with clastic biotites; b— Phenocrysts and matrix with sericitization, silicification, pyritization; c— Volcanic rock matrix with sericitization, cut by quartz- bornite- chalcopyrite vein; d— Plagioclase phenocrysts with potassic alteration, cut by quartz- sericite vein; e— Reflected light photo of (b); f— Reflected light photo of (c); g— Calcite -epidote- chalcopyrite assembly; h— Reflected light photo of (g); i— Volcanic matrix with sericitization, cut by epidote vein; j— Epidote - chlorite assembly on trachyandesite; k— Calcite - specularite assembly showing cloddy or veinlike shape, superimposed upon or cutting sericitization; l— Calcite vein cutting epidotization; Pl— Plagioclase; Kf— K-feldspar; Bt— Biotite; Qtz— Quartz; Ser— Sericite; Chl— Chlorite; Ep— Epidote; Cal— Calcite; Bn— Bornite; Ccp— Chalcopyrite; Py— Pyrite; Spr— Specularite

矿极为发育并交代早期的黄铜矿、黄铁矿。

(2) 表生期

热液期形成的矿物受浅部地下水、天水的影响发生氧化作用,生成其他矿物,多分布于矿床浅部以及局部构造破碎带,表现为长石等矿物表面明矾石,高岭土等黏土类矿物生成,黄铜矿氧化成孔雀石,镜铁矿氧化成褐铁矿。

5.1.3 围岩蚀变分析

矿床围岩蚀变强烈,发育的主要蚀变类型为钾硅酸盐化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、碳酸盐化等(图9)。钾硅酸盐化蚀变靠近岩体,黄铁绢英岩化分布较为广泛并叠加钾硅酸盐化蚀变,青磐岩化蚀变主要位于矿床深部。

(1) 钾硅酸盐化

矿床的钾硅酸盐化以发育钾长石、黑云母为特征。钾硅酸盐化主要分布于岩体与接触带中,钾长石化表现为长石发生钾化呈肉红色,原生的长石斑晶颗粒变大,边界变模糊,镜下表现为斜长石的边缘、节理及裂缝中生长细粒的钾长石。矿床中黑云母化发育较弱,镜下特征为沿着钾化长石斑晶周围偶见次生黑云母呈叶片状、鳞片状集合体生长在基质中。并可见次生的钾长石发生绢云母化、硅化现象(图8a、b、d)。钾长石化的形式有团块状(图7a)、细脉状(图7c)、脉体晕(图7e、g)3种。团块状发育于岩体及岩体与围岩的接触带中,团块直径为4~5 cm;脉状钾长石化距岩体稍远,脉宽0.5~3 mm。团块状、脉体晕、细脉状3种形式的钾化空间上按照距离正长斑岩体距离的远近依次出现,反映钾化强弱

(2) 绢云母化

矿床中绢云母化蚀变会叠加钾硅酸盐化蚀变,范围更广,呈团块状(图7e)。绢云母化蚀变在火山角砾岩中最强烈,岩体表面发白,黄铁矿呈稠密浸染状分布(图7c),镜下表现为长石斑晶表面被细小鳞片状的绢云母交代,强烈者基质完全交代(图8b、i)。矿床中可见绢云母化蚀变被后期绿帘石化、碳酸盐化交代现象(图8i、j)。

(3) 硅化

矿床中硅化蚀变强烈,硅化与绢云母化常相伴生,硅化蚀变岩石中次生石英增多,以粒状集合体、团块状不均匀状分布于基质中,长石斑晶周围由细

颗粒的灰白色石英交代,与基质边界变模糊(图8b),团块状硅化表现为火山岩局部孔隙状(图7c),脉状硅化表现为细颗粒石英沿裂隙呈脉状,脉体两侧发育钾化晕(图8d、图7b)。矿床中石英脉主要集中在正长斑岩附近,脉宽1~3 cm。

(4) 青磐岩化

矿床中青磐岩化蚀变强烈,青磐岩化以绿泥石化、绿帘石化发育为主要特征,发育在绢云母化外侧,青磐岩化蚀变主要形式有团块状(图7j)、脉状(图7g)。镜下表现为绿泥石、绿帘石交代斜长石、角闪石、黑云母斑晶(图8j、图8l)。脉状青磐岩化表现为由绿泥石、绿帘石组成的脉体,脉体中常含有石膏、方解石(图8i)。

(5) 碳酸盐化

主要成分为方解石,多呈不规则团块状聚集体(图8k),或呈细脉状,脉宽0.2~1 cm(图7i、图8l),穿插或叠加早期的各种蚀变现象。

基于以上分析,初步认为大倪庄铜矿为一处斑岩型铜矿。①矿体主要赋存在岩体、接触带中,呈透镜状、似层状产出,矿石以细脉浸染状构造为主;②围岩主要为双庙组火山岩,钾硅酸盐化、黄铁绢英岩化、青磐岩化等围岩蚀变沿斑岩体中心向外依

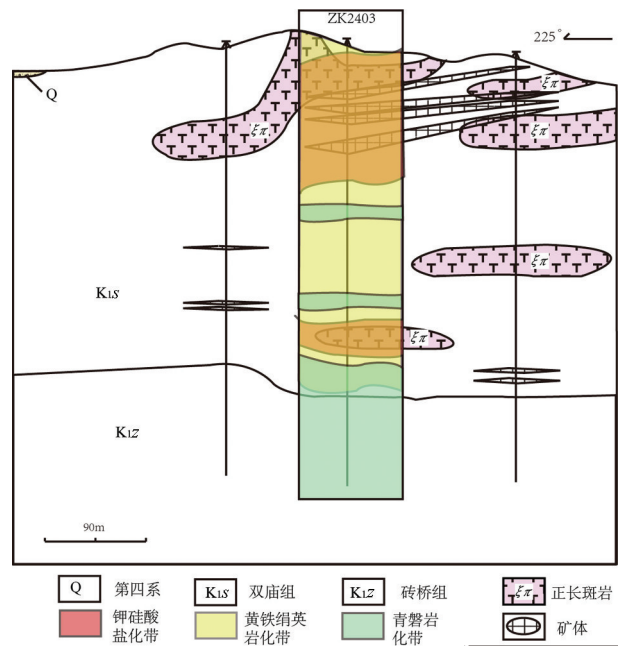


图9 钻孔 ZK2403 围岩蚀变位置图
Fig.9 Alteration zone map of ZK2403 drill hole

表2 大倪庄铜矿与其他陆相火山岩盆地中铜(Au)矿床对比
Table 2 A comparison with other porphyry Cu(Au) deposits in the continental volcanic basin

对比项目	大倪庄铜矿	井边铜矿	其他陆相火山岩盆地中铜(Au)矿床
赋矿围岩	双庙组火山岩	砖桥组火山岩	火山岩
成矿时代	126.6±1.8 Ma	133.3±8.3 Ma	130 Ma左右
成矿作用	斑岩型	斑岩型	斑岩型
矿体赋存	斑岩体中	斑岩体中	斑岩体中
围岩蚀变	黄铁绢英岩化	黄铁绢英岩化	黄铁绢英岩化
矿床成因	斑岩型	斑岩型	斑岩型

次出现,呈现出典型斑岩矿化蚀变特点;③硫化物阶段为矿床中铜质的主要沉淀阶段,空间上,矿体位置主要与黄铁绢英岩化带相关,可能是因为火山岩作为成矿围岩,尤其是火山角砾岩中孔隙较多,岩浆热液流体迁移至此,温度、压力的变化导致了铜在火山岩空隙中沉淀,同时火山岩结构松散也为周围围岩中建造水、大气降水与岩浆流体的混合提供通道,同时也促进了火山岩地层中铜元素的活化、迁移。

5.2 区域成矿规律探讨

本次工作选择宁芜火山岩盆地大平山铜矿(王少华等, 2014)、庐枞火山岩盆地井边铜矿(张乐骏等, 2010)与大倪庄铜矿作对比(表2),探讨此类型矿床的控矿因素,可见:

(1) 与成矿有关的侵入岩主要为钙碱性—碱性中酸性侵入岩。

(2) 矿体主要产于岩体与火山岩或次火山岩接触带以及直接赋存于火山岩中。

(3) 围岩蚀变具有较好的分带性,矿化位置与绢英岩化蚀变有关。

(4) 矿床的成岩成矿阶段集中于130 Ma左右,属早白垩世。

(5) 矿床主要产于火山岩盆地中的火山机构内或者火山机构边缘,受火山机构环状构造影响,火山机构代表火山岩浆构造和地热体系中心,既是有利的成矿空间,又是成矿热液的来源。

(6) 庐枞盆地中发育有多个规模不等的热液脉状铜金矿床,以井边铜矿为代表,与大倪庄铜矿相比,围岩性质相同都为火山岩,差别是井边铜矿赋矿地层为砖桥组火山岩,大倪庄铜矿的赋矿地层为双庙组火山岩地层,前人认为(杨荣勇等, 1993; 周涛发等, 2007)井边铜矿与成矿有关的侵入岩可能为巴家滩辉石二长岩体,测得井边铜矿的成矿时代为(133.3±8.3) Ma(张乐骏等, 2010),早于大倪庄铜矿的成矿时代(126.6±1.8) Ma。

5.3 找矿潜力讨论

大倪庄铜矿是庐枞火山岩盆地内部新发现的铜矿化新类型,斑岩型铜矿化在长江中下游火山岩盆地中是少见的。大倪庄铜矿与已知的庐枞盆地内部的热液脉型井边铜矿空间上都围绕着巴家滩杂岩体分布;井边铜矿的赋矿地层为砖桥旋回火山岩、大倪庄赋矿地层为双庙旋回火山岩;地球化学

特征上,大倪庄铜矿中正长斑岩和井边铜矿都与巴家滩主岩体具有极高的相关性(作者未刊资料);反映了它们可能是相同成矿物质来源的、时间先后的、同一成矿系统形成的不同矿化类型。

庐枞盆地内火山机构的空间位置与成矿作用空间展布有密切关系。庐枞火山岩盆地存在3个一级火山机构即北部矾山火山机构、东南部七家山火山机构、区域西部的浮山火山机构,矾山火山机构集中产出了龙桥铁矿、岳山铅锌银矿床和若干小规模脉状Cu-Au矿;盆地中部的七家山火山机构外围主要有井边铜(金)矿等若干脉状热液型矿床(点)的分布;西南部的浮山破火山机构则主要控制了雨坛铜金矿床、朱家凹铜金矿床等矿产。火山机构及其周围具有形成斑岩型铜矿的构造条件。陆相火山岩盆地中寻找Cu-Au矿床要加强对火山机构的找矿勘查力度。

庐枞火山岩盆地中部的巴家滩岩体由辉石二长岩、含英辉石二长岩、二长岩、二长斑岩、石英正长岩、正长斑岩组成的杂岩体,位置上与盆地中部七家山火山机构套合,具有较高的寻找Cu-Au矿化的潜力。

6 结 论

(1)大倪庄铜矿为一处斑岩型铜矿,矿体主要赋存在正长斑岩岩体与火山岩接触带以及火山岩地层中,呈似层状和透镜状产出。矿床主要发育钾硅酸盐化、黄铁绢英岩化、青磐岩化、碳酸盐化蚀变;成矿期次可以划分为热液期和表生期,热液期分为钾硅酸盐化阶段、硫化物阶段、碳酸盐化阶段,其中硫化物阶段可进一步划分为石英硫化物亚阶段、绿帘石-绿泥石亚阶段,其中,硫化物阶段是黄铜矿的主要沉淀阶段。

(2)矿床的形成与正长斑岩的侵入作用有关,正长斑岩的形成时代为(126.6±1.8) Ma,代表了矿床的形成时代,大倪庄铜矿的形成时代与长江中下游地区第二期大规模成岩成矿作用相对应,形成于区域拉张的构造环境。

(3)在庐枞火山岩盆地内部寻找斑岩型铜(金)矿化,应将盆地中火山机构及其周围钙碱性-碱性中酸性侵入岩作为找矿靶区。

致谢: 审稿专家及责任编辑老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

References:

- Belousova E A, Griffin W L, O' Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143: 602-622.
- Chang Yinbo, Liu Xiangpei, Wu Yanchang. 1991. The Copper-iron Belt of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-379(in Chinese).
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Liu Cui, Zhao Guochun, Yu Bingsong, Zhou Xiao, Zhong Changting, Wu Zongxu. 2006. Cenozoic lithospheric extension and thinning of North China: Mechanism and process[J]. *Geology in China*, 33(4): 751-761 (in Chinese with English abstract).
- Fan Yu, Zhou Taofa, Yuan Feng, Tang Minhui, Zhang Lejun, Ma Liang, Xie Jie. 2010. High sulfidation epithermal hydrothermal system in Lu-Zong volcanic basin: Evidence from geological characteristics and sulfur isotope data of Fanshan alunite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3657-3666(in Chinese with English abstract).
- Jiang Fuzhi, Wang Yuwang. 2003. Volcanism and gold deposits[J]. *Geology in China*, 30(1): 84-92(in Chinese with English abstract).
- Li Hongying, Zhang Ronghua, Hu Shumin. 2009. Geochemical Characteristics of syenite and its genesis in the Luzong Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 39(5): 839-848 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hong, Qiu Jiansheng, Luoqinhua, Xu Xisheng, Ling Wenli, Wang Dezi. 2002. Petrogenesis of the Mesozoic potash-rich volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province: Geochemical constraints[J]. *Geochimica*, 31(2): 129-140 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Zhou Taofa, Yuan Feng, Fan Yu, Wu Mingan, Lu Sanming, Qian Chunchao. 2007. Rock geochemistry and genesis of the Bajiatan intrusion in the Lujiang-Zongyang volcanic basin, Anhui[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2615-2622(in Chinese with English abstract).
- Liu Yanan, Fan Yu, Gao Changsheng, Zhang Qianming, Zhang Lejun. 2016. Geological characteristics of Xiaobaozhuang iron deposit in the Lu-Zong volcanic basin, the Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 319-333(in Chinese with English abstract).
- Nie Liqing, Zhou Taofa, Fan Yu, Zhang Qianming, Wang Longhu. 2016. LA-ICPMS U-Pb zircon age and molybdenite Re-Os dating of Donggushan, the first tungsten deposit found in the Luzong orefield, Middle-Lower Yangtze River Valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(2): 303-318(in Chinese with English abstract).
- Qin Yongjun, Zeng Jiannian, Wang Siyuan, Lu Jiangpei, Yang Meizhen, Chen Jinhua. 2010. Metallogenic characteristics and ore-control factors of Jingbian copper(gold) deposit in Luzong basin,

- Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 29(5): 915–930(in Chinese with English abstract).
- Ren Qijiang, Wang Dezi, Xu Zhaowen, Dong Huogeng, Pan Longquan, Yang Rongyong, Fang Changquan, Hu Jinan. 1993. Formation and development of the Mesozoic Lujiang–Zongyang volcanic–structural depression in Anhui Province and their relation to mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 67(2): 131–145(in Chinese with English abstract).
- Ren Qijiang. 1991. Mesozoic Volcano–Tectonic Depression and Its Mineralizing Process in Lujiang–Zongyang Area, Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–20 (in Chinese).
- Wang Shaohua, Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Wang Rucheng, Wang Hao, Cheng Meng, Zhu Xiangyu. 2014. Mode of occurrence of arsenic and S, Pb isotope in the Dapingshan copper deposit, Nanjing[J]. Journal of Nanjing University(natural sciences), 50(2): 181–191(in Chinese with English abstract).
- Wang Shiwei, Zhou Taofa, Yuan Feng, Fan Yu, Yu Canghai, Ge Linghong, Shi Cheng, Chi Yueyu. 2014. Emplacement sequences and geochronology of the Shaxi porphyry copper–gold deposit, Anhui Province, East China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(4): 979–994(in Chinese with English abstract).
- Wu Mingan, Zhang Qianming, Wang Xiangyun. 1996. Longqiao Iron Deposit in Lujiang County, Anhui Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–19 (in Chinese).
- Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Wu Guangying, Xing Zuoyun, Zhang Yu, Tong Jinsong. 2006. Mesozoic asthenospheric upwelling orogeny in eastern China[J]. Geology in China, 33(4): 730–750 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Dong Shuwen, Ma Fang. 2010. Geochemistry of shoshonitic volcanic rocks in the Luzong basin, Anhui Province (Eastern China): Constraints on Cretaceous lithospheric thinning of the Lower Yangtze region[J]. Acta Geologica Sinica, 84(5), 664–681(in Chinese with English abstract).
- Yang Rongyong, Ren Qijiang, Xu Zhaowen, Sun Yedong, Guo Guozhang, Qiu Jiangsheng. 1993. The magma source of Bajiatan volcanic–intrusive complex in the Lujiang–Zongyang area, Anhui Province[J]. Geochimica, 2: 197–206(in Chinese with English abstract).
- Yang Yizeng, Chen Fukun, Siebel Wolfgang, Zhang He, Long Qun, He Jianfeng, Hou Zhenhui, Zhu Xiyan. 2014. Age and composition of Cu–Au related rocks from the lower Yangtze River belt: Constraints on paleo–Pacific slab roll–back beneath eastern China[J]. Lithos, 202–203: 331–346.
- Yu Liangfan, Yang Xiaoyong, Sun Weidong, Chi Yueyu, Zhang Qianming. 2008. The adakite and mineralization of the Shaxi porphyry copper–gold deposit, Central Anhui[J]. Geology in China, 35(6): 1150–1161(in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa, Fan Yu, Lu Sanming, Qian Chunchao, Zhang Lejun, Duan Chao, Tang Minhui. 2008. Source, evolution and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks in Luzong basin, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1691–1702(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzheng, Lin Xinduo, Jin Fuquan, Zhou Xunruo, Wan Tianfeng, Zhou Zonggui. 1992. Metallogenic regularity of iron and copper deposits in the middle and lower valley of the Yangtze River[J]. Mineral Deposits, 11(1): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lejun, Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Ma Liang, Qian Bin. 2010. Dating of copper mineralization in Jingbian deposit and its prospecting significance in Luzong basin, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2729–2738(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shu, Wu Mingan, Wang Jing, Li Xiaolong, Zhao Wenguang, Wei Guohui. 2014. The Mineralization related with the Syenite in Luzong Basin, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, 88(4): 519–531(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Yuan Feng, Yang Wenping, He Lixin, Tan Luguai, Fan Yu, Yue Shucang. 2006. Permian volcanism in the Sawr’er area, western Junggar[J]. Geology in China, 33(3): 553–558(in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Fan Yu, Yuan Feng, Song Chuanzhong, Zhang Lejun, Qian Chunchao, Lu Sanming, David R.Cooke. 2010. Temporal–spatial framework of magmatic intrusions in Luzong volcanic basin in East China and their constrain to mineralizations[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(9): 2694–2714 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Wu Mingan, Fan Yu, Duan Chao, Yuan Feng, Zhang Lejun, Liu Jun, Qian Bing, Fanco Pirano, David R Cooke. 2011. Geological, geochemical characteristics and isotope systematics of the Longqiao iron deposit in the Lu–Zong volcano–sedimentary basin, Middle–Lower Yangtze (Changjiang) River Valley, Eastern China[J]. Ore Geology Reviews, 43: 154–169.
- Zhou Taofa, Song Minyi, Fan Yu, Liu Jun, Wu Mingan, Qian Chunchao, Lu Sanming. 2007. Chronology of the Bajiatan intrusion in the Lu Zong basin, Anhui and its significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 237–2386 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Taofa, Wang Shiwei, Yuan Feng, Fan Yu, Zhang Dayu, Chang Yinfo, Noel C.White. 2016. Magmatism and related Mineralization of the intracontinental porphyry deposits in the Middle–Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(2): 271–288(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenjin. 2008. Ore prospects and ore exploration methods for metal deposits in the middle and lower Yangtze River valley[J]. Geology in China, 35(5): 771–802(in Chinese with English abstract).
- Zhou Weiwei, Cai Jianhui, Yan Guohan, Wang Yaying, Yan

- Xingguang, Yan Zhijiao. 2014. Geochronology and petrogeochemistry of Xianghongdian alkaline intrusion in Jinzhai County of Anhui Province and its significance[J]. Mineral Deposits, 33 (1): 104–122(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaodong, Guo Kunyi, Chen Guoguang, Zeng Yong, Song Shiming, Shen Jinchao. 2013. Geological and ore-forming fluid characteristics of vein type copper deposits in northern Ningwu area[J]. Geology in China, 40(5): 1622–1633(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1–379.
- 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照, 刘翠, 赵国春, 于炳松, 周肃, 钟长汀, 吴宗絮. 2006. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 33(4): 751–761.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 唐敏惠, 张乐骏, 马良, 谢杰. 2010. 庐枞盆地高硫化型浅成低温热液成矿系统: 来自矾山明矾石矿床地质特征和硫同位素地球化学的证据[J]. 岩石学报, 26(12): 3657–3666.
- 姜福芝, 王玉往. 2003. 火山活动与金矿床[J]. 中国地质, 30(1): 84–92.
- 李洪英, 张荣华, 胡书敏. 2009. 庐枞盆地正长岩类地球化学特征及成因探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 839–848.
- 刘洪, 邱检生, 罗清华, 徐夕生, 凌文黎, 王德滋. 2002. 安徽庐枞中生代富钾火山岩成因的地球化学制约[J]. 地球化学, 31(2): 129–140.
- 刘珺, 周涛发, 袁峰, 范裕, 吴明安, 陆三明, 钱存超. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的岩石地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(10): 2615–2622.
- 刘一男, 范裕, 高昌生, 张千明, 张乐骏. 2016. 长江中下游成矿带庐枞盆地小包庄铁矿床地质特征研究[J]. 岩石学报, 32(2): 319–333.
- 聂利青, 周涛发, 范裕, 张千明, 汪龙虎. 2016. 长江中下游成矿带庐枞矿集区首例钨矿床成矿时代及其意义[J]. 岩石学报, 32(2): 303–318.
- 任启江, 王德滋, 徐兆文, 董火根, 潘龙泉, 杨荣勇, 方长泉, 胡进安. 1993. 安徽庐枞火山-构造洼的形成、演化及成矿[J]. 地质学报, 67(2): 131–145.
- 任启江. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1–20.
- 覃永军, 曾键年, 王思源, 陆建培, 杨梅珍, 陈津华. 2010. 安徽庐枞盆地井边铜(金)矿床成矿特征及控矿地质因素探讨[J]. 矿床地质, 29(5): 915–930.
- 王少华, 徐兆文, 陆现彩, 王汝成, 王浩, 陈锰, 朱翔宇. 2014. 南京大平山铜矿砷的赋存状态及矿石S、Pb同位素[J]. 南京大学学报(自然科学), 50(2): 181–191.
- 王世伟, 周涛发, 袁峰, 范裕, 俞沧海, 葛玲虹, 石诚, 池月余. 2014. 安徽沙溪斑岩型铜金矿床成岩序列及成岩成矿年代学研究[J]. 岩石学报, 30(4): 979–994.
- 吴明安, 张千明, 汪祥云. 1996. 安徽庐江龙桥铁矿[M]. 北京: 地质出版社, 1–19.
- 肖庆辉, 邱瑞照, 伍光英, 邢作云, 张煜, 童劲松. 2006. 中国东部中生代软流层上涌造山作用[J]. 中国地质, 33(4): 730–750.
- 薛怀民, 董树文, 马芳. 2010. 安徽庐枞火山岩盆地橄辉玄武岩系的地球化学特征及其对下扬子地区晚中生代岩石圈减薄机制的约束[J]. 地质学报, 84(05): 664–681.
- 杨荣勇, 任启江, 徐兆文, 孙冶东, 郭国章, 邱检生. 1993. 安徽庐枞地区巴家滩火山-侵入体的岩浆来源[J]. 地球化学, 02: 197–206.
- 余良范, 杨晓勇, 孙卫东, 池月余, 张千明. 2008. 埃达克岩与皖中沙溪斑岩铜矿的成矿作用[J]. 中国地质, 35(6): 1150–1161.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏惠. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景[J]. 岩石学报, 24(8): 1691–1702.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多, 金福全, 周珣若, 万天丰, 周宗桂. 1992. 长江中下游地区铁、铜等成矿规律研究[J]. 矿床地质, 11(1): 1–12.
- 张乐骏, 周涛发, 范裕, 袁峰, 马良, 钱兵. 2010. 安徽庐枞盆地井边铜矿床的成矿时代及其找矿指示意义[J]. 岩石学报, 26(09): 2729–2738.
- 张舒, 吴明安, 汪晶, 李小龙, 赵文广, 魏国辉. 2014. 安徽庐枞盆地与正长岩有关的成矿作用[J]. 地质学报, 88(4): 519–531.
- 赵文津. 2008. 长江中下游金属矿找矿前景与找矿方法[J]. 中国地质, 35(5): 771–802.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 宋传中, 张乐骏, 钱存超, 陆三明, David R. Cooke. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿的制约[J]. 岩石学报, 26(9): 2694–2714.
- 周涛发, 宋明义, 范裕, 刘珺, 吴明安, 钱存超, 陆三明. 2007. 安徽庐枞盆地中巴家滩岩体的年代学研究及其意义[J]. 岩石学报, 23(10): 2379–2386.
- 周涛发, 王世伟, 袁峰, 范裕, 张达玉, 常印佛, Noel C. White. 2016. 长江中下游成矿带陆内斑岩型矿床的成岩成矿作用[J]. 岩石学报, 32(2): 271–288.
- 周涛发, 袁峰, 杨文平, 何立新, 谭绿贵, 范裕, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区二叠纪火山活动规律[J]. 中国地质, 33(3): 553–558.
- 周伟伟, 蔡剑辉, 阎国翰, 王亚莹, 闫星光, 闫志娇. 2014. 安徽金寨响洪甸碱性侵入岩年代学、岩石地球化学及其意义[J]. 矿床地质, 33(1): 104–122.
- 周小栋, 郭坤一, 陈国光, 曾勇, 宋世明, 申金超. 2013. 宁芜北部脉状铜矿床地质与成矿流体特征研究[J]. 中国地质, 40(5): 1622–1633.