

编号 0258-7106(2010)05-0915-16

# 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\*

覃永军<sup>1,2</sup>, 曾键年<sup>1</sup>, 王思源<sup>1</sup>, 陆建培<sup>1</sup>, 杨梅珍<sup>1</sup>, 陈津华<sup>1</sup>

(1 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 2 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550005)

**摘要** 井边矿床位于庐枞盆地中部, 为中低温热液脉型铜(金)矿床。矿体沿断裂和构造破碎带呈陡倾脉状产出。矿石构造主要为细网脉状、晶洞簇状, 次为角砾状, 矿石结构为交代和结晶作用形成的各种结构。黄铁矿成分标型  $Co/Ni$ 、 $Fe/(S+As)$ 、 $S/Se$  等比值特征显示成矿热液主要为中低温岩浆热液。黄铜矿单矿物、巴家滩岩浆岩的稀土元素特征与盆地砖桥旋回火山-次火山岩的稀土元素特征总体类似, 矿石稀土元素继承或保存了含矿岩浆岩的源区信息。结合区域地质年代学资料以及矿体和正长斑岩脉均产于与火山-次火山安山玢岩相同的构造体系中等现象, 推测成矿热液可能来源于火山喷发之后的次火山-侵入岩的岩浆期后热液。断裂构造是控制井边矿床的重要因素。本区构造与中国东部中生代新华夏体系一致, 在区域南北左行对扭力场中, 发生了强烈的断裂构造活动。“应变菱形解析”显示: 第一序次的 NE 向、NW 向与第二序次 NW 向、EW 向、NNW 向断裂共同控制矿床的产出。井边矿化区的分布呈现出从虎栈—张桥总体沿 NE40°成带、NW310°成行的特点。

**关键词** 地质学; 成矿特征; 地质控矿因素; 黄铁矿标型; 井边铜(金)矿床; 安徽庐枞盆地

中文分类号: P618.41; P618.51

文献标识码: A

## Metallogenic characteristics and ore-control factors of Jingbian copper (gold) deposit in Luzong basin, Anhui Province

QIN YongJun<sup>1,2</sup>, ZENG JianNian<sup>1</sup>, WANG SiYuan<sup>1</sup>, LU JianPei<sup>1</sup>, YANG MeiZhen<sup>1</sup> and CHEN JinHua<sup>1</sup>

(1 Faculty of Earth Resources, China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China;

2 Geological Survey of Guizhou Province, Guiyang 550005, Guizhou, China)

### Abstract

The Jingbian ore deposit is a medium-low temperature hydrothermal type Cu (Au) deposit lying in central Luzong basin. The ores are mainly in the veinlet, stockwork, crystal aggregate forms with subordinate brecciated structure. The textures of the ore are complex, resulting from metasomatism and crystallization. The ore bodies are commonly steeply-dipping veins, controlled by fault structure and tectonic shatter zone. The typomorphic values of  $Co/Ni$ ,  $Fe/(S+As)$ , and  $S/Se$  of pyrite show that the hydrothermal ore-forming solution mainly came from medium-low temperature magmatic hydrothermal fluids. The overall REE characteristics are similar to those of chalcopyrite from the Jingbian copper (gold) deposit, Bajiatan intrusive rock and volcanic rock and subvolcanic rocks of Zhuanqiao Formation. The REE characteristics of chalcopyrite inherited or retained source

\* 本文得到中国地质调查局资源评价项目(编号: 1212010781014, 1212010631701) 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(编号: MGMR2001-1)资助

第一作者简介 覃永军, 男, 1983年生, 硕士, 从事矿床学、矿床地球化学及区域成矿规律与预测研究工作, Email: qinyongjun2008@163.com

收稿日期 2009-10-18; 改回日期 2010-01-19。张绮玲编辑。

characteristics of ore-bearing magmatic rocks. In addition, regional geochronology and the phenomenon that the same tectonic system controls ore bodies and syenite porphyry veins indicate that the hydrothermal ore-forming solution probably came from magmatic hydrothermal solution of the intrusive rocks subsequent to volcanic rock and subvolcanic rocks. Fracture structure is an important factor controlling the Jingbian ore deposit, and the structure in this area is consistent with the Neo-cathaysian tectonic system of Mesozoic in eastern China. The fault structural activity is strong in Luzong area, controlled by regional NS-trending sinistral shear force field and rotational action. Using the means of "Analysis of Diamond in Stress Action", the authors reveal that the formation of the Jingbian ore deposit was controlled by the structures which consisted mainly of NE- and NW-striking faults and subordinately of NW-, EW- and NNW-trending faults. It is inferred that the mining areas of Zhangban and Huzhan in the ore deposit constitute a NE-trending metallogenic belt, and that the two ends and two sides of the belt are promising areas for ore exploration.

**Key words:** geology, metallogenic characteristics, ore-control factors, typomorphic peculiarities of pyrite, Jingbian copper (gold) deposit, Luzong basin in Anhui

庐枞(庐江-枞阳)火山岩盆地是长江中下游铁-铜-金成矿带的一个重要矿集区,燕山期构造-岩浆活动在庐枞盆地形成了丰富的金属矿产。根据地质-地球化学特征、矿床成因和控矿地质条件等可将区内具有工业规模的金属矿床划分为玢岩型矿床、沉积-热液叠加改造型矿床、脉状热液型矿床和斑岩型矿床4种类型(吴明安等,2007;曾键年等<sup>①</sup>,2009)。脉状热液矿床可分为2期,均属于火山喷发后期或间歇期的次火山-侵入岩浆热液成矿(曾键年等,2009<sup>①</sup>,2010)。井边矿床为龙门院-砖桥火山喷发后期次火山-侵入的第一期脉状热液矿床(徐兆文等,1992),该期成矿规模较大;第二期脉状热液成矿主要发生于整个火山喷发活动后期。

从古至今井边地区民间采铜(金)矿不断。20世纪90年代,地勘单位对井边地区进行了铜矿工程普查工作<sup>②</sup>,目前钱铺乡矿业开发公司开采该铜(金)矿,以采铜为主,采金为附。近年来,在井边矿床西北的巴家滩岩体中发现了铜矿化闪长质包体,暗示深部可能存在潜在矿化岩浆作用(刘珺等,2007)。区域成矿规律显示井边-巴家滩地区可能是寻找沙溪式斑岩型铜(金)矿的有利靶区(吴明安等,2007)。因此,对井边矿床的地质地球化学特征、矿床成因等作进一步研究,分析总结该矿床和区域成矿规律,讨论成岩成矿模式,为区域找矿提供参考依据显得尤为重要。基于此,本文从成矿特征、黄铁矿成分标

型、成矿岩浆岩、控矿构造等方面对井边矿床进行了研究。

## 1 区域地质背景

庐枞火山盆地位于下扬子断陷带内,地处扬子板块北缘,接近华北与扬子两大板块的拼合带。盆地总体轮廓呈耳壳状,面积约1032 km<sup>2</sup>,长轴方向为NE40°,大致呈北东向延伸(图1)(任启江等,1993)。盆地边界受NE向、NEE向、NW向和SN向深大断裂控制。盆地内构造活动强烈,断裂构造发育与边界断裂一致的深大断裂及近EW向和SN向2组共轭断裂,构成了独特的网络状断裂构造体系(吴明安等,2007)。燕山期地球动力学环境主要与全球南北作用力场兼具旋转的三大动力体制共同作用有关(曾键年等,2009<sup>①</sup>,2010),在该动力学机制作用下,盆地中生代地球动力学环境属于与俯冲作用有关的大陆边缘火山弧环境(吴利仁等,1982),火山弧后期可能演化成板内裂谷或过渡性质环境(任启江等,1993;孙冶东等,1994),而A型花岗岩类的形成标志着后碰撞环境的出现(曹毅等,2008)。

庐枞盆地中生代岩浆岩属于中国东部橄榄安粗岩为主、高钾钙碱性岩系为次的火山-侵入岩浆作用的一部分。盆地燕山期岩浆活动形成于软流圈上涌-岩石圈拆沉的同一深部过程,可划分为源自地幔和

<sup>①</sup> 曾键年等,2009. 长江中下游重要矿集区成矿地球动力学背景及构造-成矿响应(庐枞盆地2008年度阶段性报告). 中国地质大学(武汉)地调院.

<sup>②</sup> 冶金部华东地质勘查局八一五队,1994. 安徽枞阳虎栈铜矿普查报告.

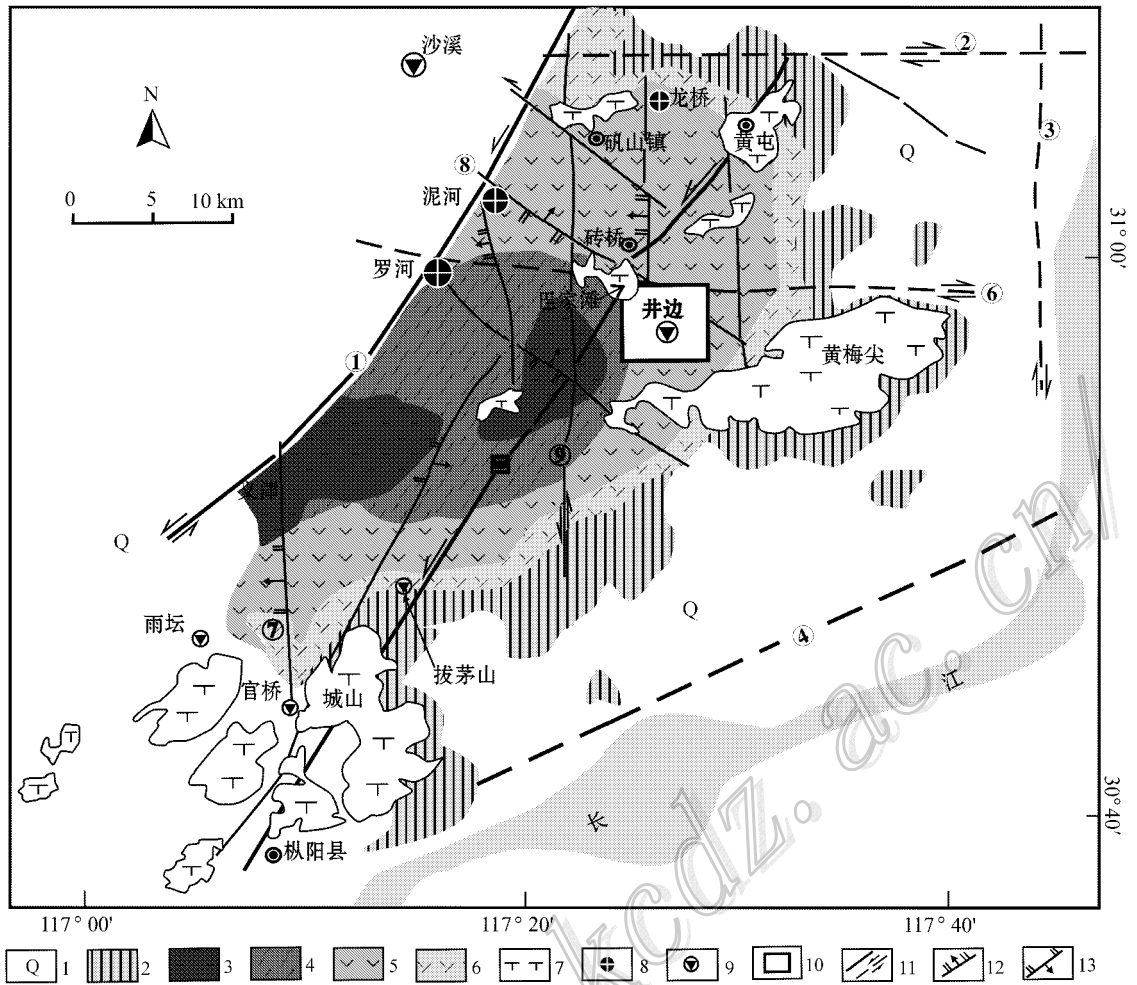


图 1 庐枞盆地地质简图(据曹毅等 2008;任启江等,1994;吴明安等 2007;周涛发等 2008 修编)

1—第四系；2—基底地层；3—浮山旋回(组)；4—双庙旋回(组)；5—砖桥旋回(组)；6—龙门院旋回(组)；7—正长质-二长质侵入岩；8—铁矿床；9—铜矿床；10—研究区；11—实测及推测平移断层；12—正断层；13—逆断层；①—罗河-裴岗-练潭断裂；②—陈坡湖-黄姑间-芜湖县断裂；③—襄安镇-大通镇断裂；④—沿江断裂；⑤—黄屯-枞阳断裂；⑥—罗河-石门庵断裂；⑦—义津-官桥断裂；⑧—泥河-砖桥断裂；⑨—砖桥-矾山断裂

Fig.1 Sketch geological map of the Luzong Basin(modified after Cao et al.,2008;Ren et al.,1994;Wu et al.,2007;Zhou et al.,2008)

1—Quaternary;2—Basement;3—Foushan Formation;4—Shuangmiao Formation;5—Zhuangqiao Formation;6—Longmenyuan Formation;7—Syenitic-monzonitic intrusive rock;8—Iron deposit;9—Copper deposit;10—Study area;11—Measured and inferred fault;12—Normal fault;13—Thrust fault;①—Luohe-Peigang-Liantan fault;②—Chenpihu-Huangguza-Wuhu fault;③—Xianganzhen-Datongzhen fault;④—Along Changjiang River fault;⑤—Huangtun-Zongyang fault;⑥—Luohe-Shimenyan fault;⑦—Yijin-Guanqiao fault;⑧—Nihe-Zhuangqiao fault;⑨—Zhuangqiao-Fanshan fault

源自玄武质下地壳不同源区的分别属于橄榄安粗岩系的火山-次火山-侵入岩和具有埃达克质特征的钙碱性侵入岩 2 个岩浆系列(Wang et al.,2006;曾键年等 2009<sup>①</sup>;2010)。两类岩浆控制区内 4 类成矿

作用,橄榄安粗岩系为本区主要的岩浆类型,控制玢岩型、沉积-热液叠加改造型和脉状热液型 3 类矿床产出,埃达克质岩浆主要控制斑岩型铜矿的产出(曾键年等 2009<sup>①</sup>;2010)。

① 曾键年,等. 2009. 长江中下游重要矿集区成矿地球动力学背景及构造-成矿响应(庐枞盆地 2008 年度阶段性报告). 中国地质大学(武汉)地调院.

关于盆地火山岩的命名,于学员等(1981)命名为安山岩,王德滋等(1996)认为是以橄榄安粗岩为主、高钾钙碱性岩系为次的橄榄安粗岩省,赵振华(2003)认为存在橄榄玄粗岩。盆地火山岩沿火山盆地边缘向中心呈同心椭圆状分布,从古到新依次划分为龙门院、砖桥、双庙、浮山4个火山旋回(图1)。龙门院-砖桥旋回组成早期喷发大旋回,双庙-浮山旋回组成晚期喷发大旋回。龙门院-砖桥旋回以安粗岩和玄武安粗岩为主,双庙旋回以粗玄岩和玄武安

粗岩为主,浮山旋回以粗面岩为主(刘洪等,2002),同属富集地幔的交代地幔同源岩浆的产物(袁峰等,2009)。

## 2 矿区地质

井边矿床位于盆地内部中偏东北部(图1),包括井边张榜采区、虎栈采区。地层主要为砖桥火山岩旋回上段(图2),岩性以次火山安山玢岩为主,其次

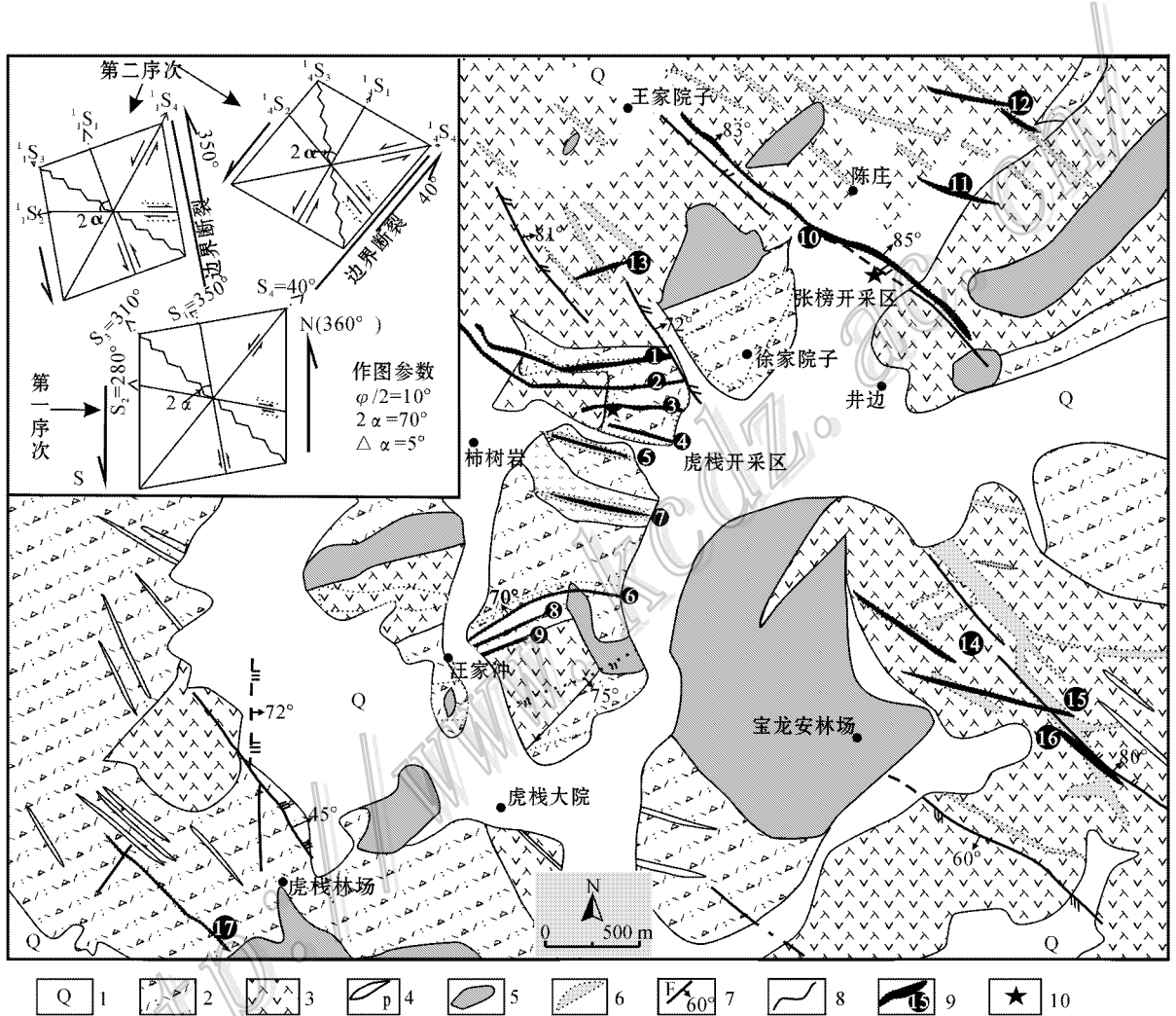


图2 井边矿床地质简图及“应变菱形解析法”图解(据安徽枞阳虎栈铜矿普查报告,1994<sup>①</sup>修编)

- 1—第四纪;2—砖桥组安山质凝灰岩、含砾凝灰岩等;3—砖桥组安山玢岩;4—正长斑岩脉;5—次生石英岩;6—构造破碎及蚀变带;
- 7—断层及产状;8—地质界线;9—矿体(硅化脉)及编号(h=-100~-150m位置在地表的投影);10—采样点(井口)位置示意

Fig. 2 Sketch geological map of the Jingbian copper (gold) deposit (modified after Survey Report of the Fuzan Copper Deposit in Luzong, Anhui Province, 1994)

- 1—Quaternary; 2—Andesitic welded tuff, shard tuff of Zhuangqiao Formation; 3—Andesitic porphyrites of Zhuangqiao Formation; 4—Orthoclase porphyry dike; 5—Secondary quartzite; 6—Structural shattered zone and alteration belt; 7—Fault; 8—Geological boundary; 9—Ore body and its serial number; 10—Sampling site (wellhead)

① 冶金部华东地质勘查局八一五队, 1994. 安徽枞阳虎栈铜矿普查报告.

为凝灰岩及凝灰质粉砂岩,主要分布于矿区北西、北东部,中部尚有零星分布,倾向北西,倾角 $20\sim 30^\circ$ ,多被安山玢岩包围。安山玢岩是矿区的主要矿化围岩,呈北西向大面积展布。矿区构造以断裂为主,是本区的重要控矿因素,为区域线性构造骨架之次级或复活次级构造,发育NW向、EW向、NNW向3组方向。NW向、EW向断裂常控制矿脉或矿化蚀变带,是本区主要容矿构造。根据地表和井下测量,其走向 $250\sim 320^\circ$ 之间,倾角多大于 $70^\circ$ ,工程控制延深大于200 m。其中NW向断裂多倾向北东,延长1 000~1 500 m,东西向断裂倾向不稳定,以北倾为主,延长800~1 000 m。NNE向断裂规模较小,一般控制斑岩脉带呈定向排列产出。矿区侵入岩主要为正长斑岩脉,出露地表达十多条(图2),岩脉走向在 $280\sim 340^\circ$ 之间,多数走向 $310\sim 320^\circ$ ,与矿体的走向一致<sup>①</sup>(图1、2)。

### 3 矿床地质特征

#### 3.1 矿体特征

矿体主要呈脉状严格受断裂控制,分布在张榜队(张榜采区)、虎栈大院(虎栈采区)。矿化蚀变带多达数十条,含矿体17条(图2)。主矿体延长500~2 500 m,深100~250 m,宽0.5~8.0 m,少数宽达10 m左右。图2显示,③号矿体、①、②号矿体东段的走向为 $EW265\sim 270^\circ$ ,①、②号矿体西段为 $NW310^\circ$ ;④、⑤、⑥、⑦、⑪、⑫和⑬号矿体的走向为 $NW280^\circ$ 左右;⑧、⑨和⑩号矿体走向为 $NE30\sim 40^\circ$ ;⑩、⑭、⑮和⑯号矿体的总体走向为 $310^\circ$ 左右。矿体倾向多数NE向或SW向,倾角 $60\sim 85^\circ$ 。多数为隐伏矿体,地表仅表现为含铜矿化蚀变带或硅化脉与构造蚀变带叠加<sup>①</sup>。以下仅对本次工作的①、③、⑦、⑩号矿体进行描述。

①号矿体:产于虎栈开采区,其矿体长约1 420 m,延深220 m,平均宽1.61 m,受北西向和近东西向2组断裂复合控制,分为东、西2个矿段。东段矿体长600 m,走向 $65\sim 80^\circ$ ,向北倾,倾角 $79\sim 85^\circ$ ,平均宽2.17 m,矿体在走向上产状稳定。西段矿体长820 m,走向 $285\sim 395^\circ$ ,向东倾,倾角 $74\sim 85^\circ$ ,平均宽1.68 m。东、西2段矿体交汇处矿体明显贯通膨

大。

③号矿体:位于虎栈开采区,其长度大于750 m,走向 $270\sim 280^\circ$ ,呈脉状产出,北倾,倾角 $79\sim 83^\circ$ ,其宽度为0.5~1.2 m,延深180 m,未见底。脉壁宽大光滑处一般矿化比较好。

⑦号矿体:位于虎栈开采区南部,其长度610 m,走向 $270\sim 280^\circ$ ,呈脉状产出,向南倾,倾角 $70\sim 80^\circ$ ,平均宽度3.9 m。

⑩号矿体:位于张榜开采区,全长2 500 m,主体走向 $310^\circ$ ,向北倾,倾角 $72\sim 82^\circ$ ,矿脉平均宽1.06 m。矿体由南、北两部分组成,其走向 $310^\circ$ ,中间由走向 $280^\circ$ 的矿脉连接,体现左行剪切特征,矿体产状稳定。

#### 3.2 矿石特征

##### 3.2.1 矿石矿物成分及产出状态

矿石中主要金属矿物为黄铜矿,次为黄铁矿、斑铜矿等,金以裂隙金和包体金等形式伴生,氧化带一般有孔雀石、褐铁矿等,鲜见自然铜;非金属矿物主要为石英、长石,次为方解石和粘土矿物等。典型矿物组合为石英-黄铜矿-黄铁矿。主要矿物产出状态:

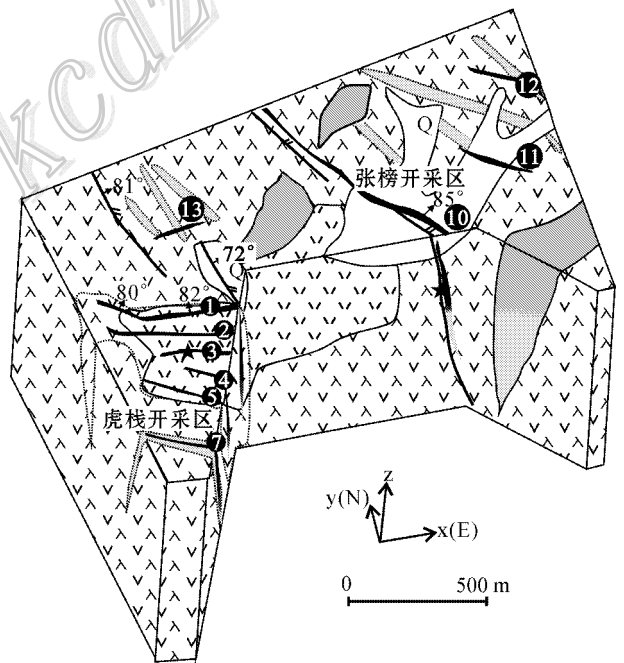


图3 矿体三维示意图(图例同图2)

Fig. 3 Schematic three-dimensional diagram of the ore body (legends as for Fig. 2)

① 黄铁矿呈五角十二面体晶、他形、半自形粒状或团块状产出;大小在 0.05~0.2 mm、0.3~0.7 mm 之间,在黄铜矿中包含的黄铁矿颗粒较大;② 黄铜矿呈脉状、不规则团块状,他形、半自形粒状;③ 赤铁矿呈针状、放射状产出,大小在 0.01~0.1 mm×0.03~0.5 mm 之间不等;④ 石英呈(网)脉状,团块状。

### 3.2.2 矿石组构

矿石结构主要有由交代作用形成的交代残余、充填等交代结构,由结晶作用形成的包含、填隙结构、自形或半自形粒状结构等(图 4):① 交代(残余)结构,黄铁矿被黄铜矿交代呈残余以及黄铜矿被赤铁矿交代(ZY36-c);② 充填结构,黄铜矿呈细脉状充填在脉石矿物中(ZY19-a);③ 包含结构,黄铁矿被黄铜矿包含(ZY19-c);④ 填隙结构,黄铜矿填隙在自形石英晶隙中(ZY17-a);⑤ 自形或半自形粒状结构,黄铁矿多呈自形、半自形(ZY19-c、ZY17-b);⑥ 细脉、网脉状结构,黄铜矿呈细脉填隙,被后期方解石脉穿插(ZY19-d)。

矿石构造主要有细脉状、网脉状和晶洞(簇)状构造,次为角砾状构造等。细脉状、网脉状构造主要表现为多阶段热液脉体之间的相互穿插(图 5),金属硫化物和金属氧化物呈浸染状和条带状分布于脉体中,脉壁光滑;脉体中局部可见晶洞(簇)状石英、碳酸盐矿物等。角砾状构造主要表现为围岩角砾或早阶段的矿石角砾被晚阶段的热液脉体胶结。这些特征均显示受断裂构造控制的热液充填作用的成矿特征。

### 3.3 围岩蚀变

矿化围岩蚀变主要有次生石英岩化、钾长石-石英化和浅色蚀变 3 大类型。钾长石-石英蚀变带沿着构造破碎带发育,与成矿关系密切。

次生石英岩化常呈面状分布在山坡或地形凸起部位,少数呈脉状,伴有较强的明矾石化和星点状细粒黄铁矿化;钾长石-石英化呈脉(带)状分布于蚀变带的裂隙中,与矿体产状基本一致,常伴生黄铁矿、黄铜矿化;浅色蚀变是成矿晚期或者是后期发育的青磐岩化、碳酸盐化及硅化等,呈带状或者面状产出(冶金部华东地质勘查局八一五队<sup>①</sup>,1994)。

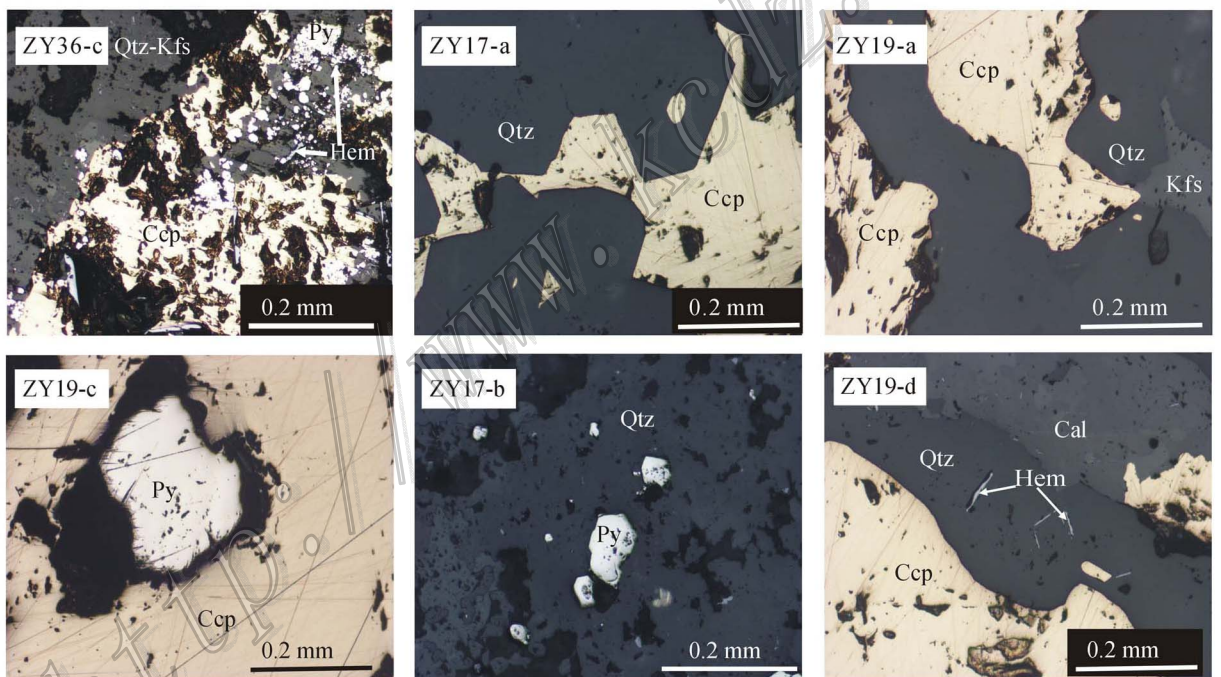


图 4 井边矿床矿石显微结构

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Hem—赤铁矿; Ccp—黄铜矿; Py—黄铁矿; Cal—方解石

Fig. 4 Microstructure of ores from the Jingbian copper (gold) deposit

Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Hem—Hematite; Ccp—Chalcopyrite; Py—Pyrite; Cal—Calcite

① 冶金部华东地质勘查局八一五队, 1994. 安徽枞阳虎栈铜矿普查报告.

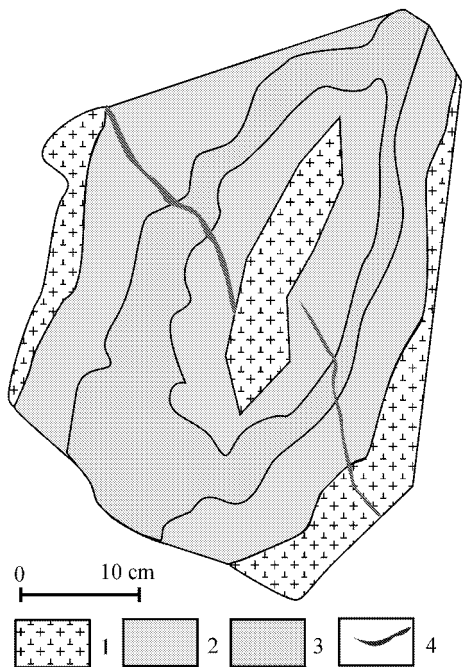


图 5 井边矿床⑩号矿体矿石手标本素描图  
1—浸染状黄铁矿化围岩角砾；2—石英-钾长石-赤铁矿脉；3—石英-黄铁矿-黄铜矿脉；4—微细石英-碳酸盐网脉(示意)

Fig. 5 Sketch of ore samples from the Jingbian copper (gold) deposit

1—Disseminated pyritized wall rock rubble; 2—Quartz-potash feldspar-hematite vein; 3—Quartz-pyrite-chalcocopyrite vein; 4—Fine quartz-carbonate stockwork

### 3.4 矿化期次及矿化阶段

井边矿床的成矿过程经历了岩浆热液和表生氧化等 2 个矿化期。根据热液矿脉的穿插关系与矿物共生组合等特点,将岩浆热液成矿期划分为 4 个阶段(表 1)。

(1)无矿石英岩化阶段(I) 在次火山安山玢岩和火山岩地层中产出 NE 带的面状次生石英岩化,常伴有弱的黄铁矿化。

(2)石英-钾长石-赤铁矿早阶段(II) 为成矿热液沿着裂隙充填,在裂隙两壁形成,出现钾长石为特征,由于温度迅速降低,在脉壁出现少量的赤铁矿细脉。该阶段中少量黄铁矿颗粒呈细粒或者浸染状产于石英脉中。

(3)石英-黄铁矿-黄铜矿主阶段(III) 该阶段出现大量的黄铜矿,它们沿早期形成的脉继续充填整个裂隙结构面,是成矿的主要阶段。金属硫化物呈团块、细脉充填在早期或者同期的石英脉中;显微结构中金属硫化物呈细脉浸染状、局部见团块状充填于脉石矿物中,细粒黄铁矿充填于黄铜矿中。是金伴生的主要阶段。

(4)石英-碳酸盐晚阶段(IV) 少量石英、碳酸盐脉充填或者穿插切割早期的石英、黄铜矿脉;早阶段的矿化围岩或矿化石英脉呈角砾被晚期石英-碳酸盐

表 1 井边铜(金)矿床主要矿物生成顺序图表

Table 1 Formation sequence of major minerals in the Jingbian copper (gold) deposit

|       | 岩浆热液期     |                |                                  |              | 表生期 |
|-------|-----------|----------------|----------------------------------|--------------|-----|
|       | 无矿石英阶段(I) | 石英-钾长石-赤铁矿(II) | 石英-黄铁矿-黄铜矿(III)                  | 石英-碳酸盐(IV)   |     |
| 石英    | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 黄铁矿   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 赤铁矿   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 镜铁矿   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 钾长石   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 黄铜矿   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 金(伴生) | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 斑铜矿   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 重晶石   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 方解石   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 孔雀石   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 褐铁矿   | —         | —              | —                                | —            | —   |
| 矿石结构  | —         | 脉状、自形、半自形粒状等结构 | (网)脉状、包含、填隙、充填、交代(残余)、(半)自形粒状等结构 | 脉状、网脉状       | —   |
| 矿石构造  | —         | 脉状、浸染状构造       | 脉状、浸染状构造                         | (网)脉状晶洞(簇)构造 | —   |
| 矿石类型  | —         | —              | 铜-金-硫矿石                          | —            | —   |

注: [ ] 表示构造活动; (I)表示成矿阶段

表 2 本次研究样品信息表  
Table 2 Some information of samples collected in this study

| 采集地      | GPS 点号或其他  | 样号     | 样品名称                | 研究内容                   |
|----------|--|--------|---------------------|------------------------|
| 张榜开采区⑩矿体 | 井口坐标 N30°59'22.9" E117°29'06.5" (采样深度井下 100 m 至 150 m) | ZY-17  | 黄铜矿矿石               | 光片观察, 黄铁矿电子探针          |
|          |  | ZY-19  | 黄铜矿矿石               | 光片观察, 黄铁矿电子探针, 黄铜矿稀土元素 |
|          |  | ZY-18  | 黄铜矿矿石               | 光片观察, 黄铜矿稀土元素          |
| 虎栈开采区③矿体 | 井口坐标 N30°59'22.9" E117°29'06.5"                        | ZY-37  | 黄铜矿矿石               | 光片观察, 黄铜矿稀土元素          |
|          |  | ZY-36  | 黄铜矿矿石               | 光片观察                   |
|          |  | 泥河矿床   | ZK0701 进尺深度 1 046 m | W29                    |
| 罗河矿床     | ZK1209 进尺深度 1 056 m-1 080 m                            | NHK1-2 | 辉石粗安玢岩              | 稀土元素测试                 |
| 罗河矿床     | 措施井, -650 m  | LJ-23  | 辉石粗安玢岩              | 稀土元素测试                 |
| 砖桥       | N31°02'55.4" E117°25'31.1"                             | 09LZ08 | 粗面安山岩               | 稀土元素测试                 |
| 沙溪       | N31°09'55.6" E117°18'11.6"                             | LJ-26  | 石英闪长斑岩              | 稀土元素测试                 |

脉胶结。显微结构中见针状赤铁矿充填在各种脉中。

## 4 矿床地球化学特征

### 4.1 研究样品信息

本次进行光片观察、黄铁矿电子探针、黄铜矿稀土元素和岩浆岩稀土元素研究的样品信息见表 2。

### 4.2 黄铁矿化学成分特征

手标本观察和显微鉴定显示存在 3 阶段黄铁矿围岩及其围岩角砾中星点状黄铁矿、石英-钾长石-赤铁矿脉中细脉浸染状黄铁矿和石英-黄铁矿-黄铜矿脉中的黄铁矿。选取石英-黄铁矿-黄铜矿主成矿阶段的样品进行矿相学观测, 可以发现 2 类黄铁矿: 一类

为微细粒状, 呈自形、半自形, 晶粒较粗大, 显微镜下主要为五角十二面体; 另一类为立方体或立方体与五角十二面体聚形。两类黄铁矿的颜色多为黄白色, 与石英细脉密切共生, 少量与方解石、黄铜矿等伴生, 其含金性较好。在构造应力作用下, 部分呈压碎型结构。黄铁矿中金以裂隙金和包体金存在, 微裂隙是储金的最佳场所(钱让清等, 2001)。挑选石英中的黄铁矿颗粒(ZY-17-1、ZY-17-2、ZY-19-2、ZY-19-3)和黄铜矿中的黄铁矿颗粒(ZY17-3、ZY-19-1), 标记后进行电子探针测试, 结果见表 3。

(1) 主要成分 黄铁矿的  $w(S)$  为 52.32% ~ 52.66%,  $w(Fe)$  为 45.81% ~ 46.42%, 接近黄铁矿理论值( $w(S)=53.45%$ ,  $w(Fe)=46.55%$ ,  $w(S)/$

表 3 庐枞脉状热液型 Cu-Au 矿床中黄铁矿电子探针成分特征

Table 3 Trace element characteristics of pyrite in the Jingbian copper (gold) deposit

|        | $w(B)/\%$ |       |                    |       | $w(B) \times 10^{-6}$ |            |               |                                    |     |      |     |      |     |     |     |
|--------|-----------|-------|--------------------|-------|-----------------------|------------|---------------|------------------------------------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|
|        | S         | Fe    | Co                 | Ni    | Cu                    | As         | Se            | Bi                                 | Ag  | Au   | Ba  | Sr   | Al  | Ga  | Mg  |
| Sigma  | 0.268     | 0.235 | 160                | 110   | 110                   | 100        | 110           | 200                                | 120 | 250  | 200 | 230  | 90  | 230 | 80  |
| ZY17-1 | 52.32     | 45.86 | 1640               | 450   | 570                   | -          | 220           | 2590                               | 450 | 2130 | 550 | 1150 | 340 | 310 | 420 |
| ZY17-2 | 52.53     | 45.81 | 870                | 330   | 830                   | -          | -             | 2150                               | 330 | 1090 | 610 | 1650 | 320 | 340 | 230 |
| ZY17-3 | 52.55     | 46.09 | 1660               | 450   | 600                   | 140        | 170           | 2560                               | 50  | 1410 | 610 | 1840 | 180 | 440 | 360 |
| ZY19-1 | 52.66     | 46.30 | 710                | 130   | 660                   | -          | 240           | 2010                               | 130 | 2280 | 820 | 1230 | 390 | 480 | 290 |
| ZY19-2 | 52.58     | 46.42 | 930                | 380   | 610                   | -          | 200           | 2250                               | 150 | 890  | 290 | 1590 | 430 | 960 | 220 |
| ZY19-3 | 52.47     | 46.24 | 890                | 210   | 760                   | -          | 30            | 2300                               | 250 | 1550 | 760 | 1520 | 190 | 310 | 270 |
|        | S+Fe      | S/Fe  | S/Se $\times 10^4$ | Co/Ni | Au/Ag                 | Fe/(As+Se) | $w(Au)/w(Ag)$ | D=0.652+0.266<br>[ $w(Au)/w(Ag)$ ] |     |      |     |      |     |     |     |
| ZY17-1 | 98.18     | 1.141 | 0.2378             | 3.64  | 4.73                  | 0.877      | 2.590         | 1.341                              |     |      |     |      |     |     |     |
| ZY17-2 | 98.34     | 1.147 | -                  | 2.64  | 3.30                  | 0.872      | 1.807         | 1.133                              |     |      |     |      |     |     |     |
| ZY17-3 | 98.64     | 1.140 | 0.3091             | 3.69  | 28.20                 | 0.877      | 15.431        | 4.757                              |     |      |     |      |     |     |     |
| ZY19-1 | 98.96     | 1.137 | 0.2194             | 5.46  | 17.54                 | 0.879      | 9.597         | 3.205                              |     |      |     |      |     |     |     |
| ZY19-2 | 99.00     | 1.133 | 0.2629             | 2.45  | 5.93                  | 0.883      | 3.247         | 1.516                              |     |      |     |      |     |     |     |
| ZY19-3 | 98.71     | 1.135 | 1.7490             | 4.24  | 6.20                  | 0.881      | 3.393         | 1.555                              |     |      |     |      |     |     |     |

注: 电子探针分析实验在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。实验仪器日本 JEOL 厂家, 型号 JXA-8100。检测下限为  $100 \times 10^{-6} \sim 150 \times 10^{-6}$ 。总量误差  $100 \pm 1.5\%$ 。



$w(\text{Fe})=1.148$  ( 靳是琴等, 1986 ), 且  $w(\text{S}+\text{Fe})=98.18\% \sim 99.00\% > 98\%$ 。

(2) 微量元素  $w(\text{Se})$  和  $w(\text{S})/w(\text{Se})$  分别为  $3.0 \times 10^{-3} \sim 24 \times 10^{-3}$  和  $0.22 \times 10^4 \sim 0.31 \times 10^4$  ( 个别  $1.7 \times 10^4$  )。  $w(\text{Au})$  为  $890 \times 10^{-6} \sim 2280 \times 10^{-6}$  ;  $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值为  $3.30 \sim 6.20$  , 均值为  $5.04$ 。 样品 ZY17-3、ZY19-1 中的  $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值分别达到  $17.54$ 、 $28.20$ 。  $w(\text{Co})$  为  $710 \times 10^{-6} \sim 1660 \times 10^{-6}$  , 均值为  $1117 \times 10^{-6}$  ;  $w(\text{Ni})$  为  $130 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$  , 均值为  $325 \times 10^{-6}$  ;  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值为  $2.447 \sim 5.462$  , 均值为  $3.686$ 。

(3) 采样位置 黄铁矿中  $w(\text{Fe})/w(\text{S}+\text{As})$  值与矿床形成深度有较好的相关性( СММРНОВА et al. , 1983 ; Новгородова et al. , 1986 ) 相关系数为  $0.878$  , 成矿的深、中、浅部位对应的  $w(\text{Fe})/w(\text{S}+\text{As})$  值分别为  $0.846$ 、 $0.863$  和  $0.926$  ( 周学武等, 2005 ) , 井边矿床的该值为  $0.872 \sim 0.883$  , 表明采样位置属于矿

床的中偏浅部。另外, 井边矿床的  $n(\text{Au})/n(\text{Ag})$  值为  $1.807 \sim 3.393$  , 均值为  $2.759$ 。 用该值计算的位置深度级别 D 值  $(D=0.652+0.266n(\text{Au})/n(\text{Ag}))$  为  $1.1328 \sim 1.5545$  , 均值为  $1.386$  , 浅部、中部和深部对应的 D 值分别为等于或小于  $1$ 、 $2$  左右和  $3$  ( Новгородова et al. , 1986 ) , 井边矿床的 D 值也表明样品采于矿床中偏浅部。

### 4.3 岩浆岩及井边矿床矿石稀土元素特征

矿区岩浆岩除砖桥旋回上段的火山(角砾)凝灰岩和次火山安山玢岩外, 矿区 NW 外围为砖桥旋回晚期次火山-侵入岩浆活动形成的巴家滩复式岩体, 矿区内发育正长斑岩脉。以下将井边矿床黄铜矿单矿物稀土元素特征与砖桥火山岩、砖桥旋回晚期的次火山岩(覃永军等, 2010) 和巴家滩岩体的稀土元素特征进行了对比(表 4)。

从表 4 可以看出, 巴家滩岩体、砖桥火山岩、砖桥次火山岩的稀土元素总量(不含 Y) 依次降低, 略

表 4 岩浆岩及井边矿床黄铁矿单矿物稀土元素特征(  $w_B/10^{-6}$  )

Table 4 REE characteristics of ore samples from the Jingbian copper( gold) deposit and magmatic rock(  $w_B/10^{-6}$  )

| 样号及岩性( 矿石 )       | La                     | Ce    | Pr    | Nd    | Sm    | Eu             | Gd                                     | Tb                                     | Dy                                     | Ho   | Er    |       |
|-------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|----------------|--|--|--|------|-------|-------|
| 巴家滩<br>岩体         | 1 <sup>☆</sup> 闪长质包体   | 63.30 | 127.0 | 14.20 | 52.6  | 9.24           | 1.90                                   | 7.40                                   | 1.07                                   | 5.41 | 1.01  | 2.97  |
|                   | 2 <sup>☆</sup> 闪长质包体   | 60.40 | 125.0 | 14.10 | 55.00 | 9.84           | 2.59                                   | 8.10                                   | 1.11                                   | 5.57 | 1.01  | 2.74  |
|                   | 3 <sup>☆</sup> 闪长质包体   | 47.80 | 101.0 | 11.60 | 44.70 | 8.73           | 1.49                                   | 7.08                                   | 1.09                                   | 5.47 | 1.03  | 3.02  |
|                   | 4 <sup>☆</sup> 辉石二长岩   | 59.20 | 121.0 | 13.30 | 49.20 | 8.87           | 1.81                                   | 7.10                                   | 1.04                                   | 5.31 | 1.00  | 2.93  |
|                   | 7 <sup>☆</sup> 含英辉石二长岩 | 48.80 | 102.0 | 11.40 | 42.90 | 7.81           | 1.80                                   | 6.14                                   | 0.90                                   | 4.65 | 0.86  | 2.43  |
| 砖桥火<br>山、次火<br>山岩 | 09LZ08 粗面安山岩           | 59.00 | 107.0 | 11.40 | 41.60 | 6.92           | 1.59                                   | 6.72                                   | 0.83                                   | 3.68 | 0.74  | 2.14  |
|                   | W29 辉石粗安玢岩             | 41.41 | 100.9 | 12.91 | 48.04 | 8.46           | 1.73                                   | 6.88                                   | 1.02                                   | 6.35 | 1.10  | 2.91  |
|                   | NHK1-2 辉石粗安玢岩          | 45.32 | 78.4  | 9.09  | 32.36 | 5.83           | 1.39                                   | 4.89                                   | 0.68                                   | 3.69 | 0.74  | 2.02  |
| LJ23 辉石粗安玢岩       | 39.10                  | 71.7  | 8.51  | 32.59 | 6.18  | 1.44           | 5.36                                   | 0.77                                   | 4.14                                   | 0.87 | 2.56  |       |
| 井边<br>矿床          | ZY-37 黄铜矿单矿物           | 0.09  | 0.16  | 0.02  | 0.06  | 0.01           | 0.004                                  | 0.01                                   | 0.002                                  | 0.01 | 0.003 | 0.009 |
|                   | ZY-18 黄铜矿单矿物           | 0.57  | 1.40  | 0.19  | 0.41  | 0.10           | 0.02                                   | 0.08                                   | 0.01                                   | 0.07 | 0.02  | 0.04  |
|                   | ZY-19 黄铜矿单矿物           | 1.47  | 1.48  | 0.20  | 0.85  | 0.17           | 0.02                                   | 0.08                                   | 0.01                                   | 0.06 | 0.01  | 0.04  |
| 样号及岩性( 矿石 )       | Tm                     | Yb    | Lu    | Y     | ΣREE  | LREE/<br>HREE* | La <sub>N</sub> /<br>Yb <sub>N</sub> * | La <sub>N</sub> /<br>Sm <sub>N</sub> * | Gd <sub>N</sub> /<br>Yb <sub>N</sub> * | δEu* | δCe*  |       |
| 巴家滩<br>岩体         | 1 <sup>☆</sup> 闪长质包体   | 0.42  | 2.84  | 0.41  | 28.50 | 289.8          | 12.46                                  | 16.00                                  | 7.58                                   | 2.87 | 0.68  | 1.00  |
|                   | 2 <sup>☆</sup> 闪长质包体   | 0.44  | 2.89  | 0.46  | 27.30 | 289.3          | 11.96                                  | 14.99                                  | 6.79                                   | 3.08 | 0.86  | 1.01  |
|                   | 3 <sup>☆</sup> 闪长质包体   | 0.42  | 2.84  | 0.41  | 28.50 | 236.7          | 10.08                                  | 12.07                                  | 6.06                                   | 2.74 | 0.56  | 1.02  |
|                   | 4 <sup>☆</sup> 辉石二长岩   | 0.38  | 2.37  | 0.33  | 21.87 | 273.8          | 12.38                                  | 17.92                                  | 7.39                                   | 3.29 | 0.67  | 1.01  |
|                   | 7 <sup>☆</sup> 含英辉石二长岩 | 0.38  | 2.55  | 0.39  | 26.31 | 233.0          | 11.73                                  | 13.73                                  | 6.92                                   | 2.65 | 0.77  | 1.02  |
| 砖桥火<br>山、次火<br>山岩 | 09LZ08 粗面安山岩           | 0.33  | 2.28  | 0.33  | 22.00 | 244.5          | 13.34                                  | 18.56                                  | 9.44                                   | 3.24 | 0.70  | 0.95  |
|                   | W29 辉石粗安玢岩             | 0.48  | 2.93  | 0.48  | 26.63 | 235.6          | 9.64                                   | 10.14                                  | 5.42                                   | 2.58 | 0.67  | 1.06  |
|                   | NHK1-2 辉石粗安玢岩          | 0.31  | 1.97  | 0.31  | 17.73 | 187.0          | 11.80                                  | 16.50                                  | 8.60                                   | 2.73 | 0.77  | 0.89  |
|                   | LJ23 辉石粗安玢岩            | 0.42  | 2.73  | 0.47  | 21.77 | 176.8          | 9.21                                   | 10.27                                  | 7.00                                   | 2.16 | 0.75  | 0.92  |
| 井边<br>矿床          | ZY-37 黄铜矿单矿物           | 0.002 | 0.012 | 0.002 | 0.27  | 0.40           | 6.38                                   | 5.48                                   | 9.96                                   | 0.92 | 0.95  | 0.93  |
|                   | ZY-18 黄铜矿单矿物           | 0.01  | 0.04  | 0.01  | 1.49  | 2.98           | 9.64                                   | 10.22                                  | 6.31                                   | 2.20 | 0.66  | 1.05  |
|                   | ZY-19 黄铜矿单矿物           | 0.01  | 0.04  | 0.01  | 1.13  | 4.45           | 16.12                                  | 26.36                                  | 9.57                                   | 2.20 | 0.46  | 0.58  |

注 样品测试由国土资源部中南矿产资源监督测试中心同位素地球化学研究所完成；☆来自刘琨等, 2007；\* 单位为 1。

低于世界花岗质岩石稀土元素平均含量( $290 \times 10^{-6}$ , 王之田等, 1991), 明显高于上地壳和下地壳的稀土元素总量(分别为  $146.4 \times 10^{-6}$ 、 $66.9 \times 10^{-6}$ , Taylor et al., 1985)。轻、重稀土元素的比值基本一致。Y 和 Yb 含量基本相当。 $La_N/Yb_N$  和  $La_N/Sm_N$  比值分别显示较强的轻稀土元素富集和分馏, 而  $Gd_N/Yb_N$  比值表明无明显重稀土元素分馏, 无明显的 Eu、Ce 异常。稀土元素配分模式(图 6a、6b)总体呈右倾型式, 重稀土元素配分模式较为平坦。

黄铜矿单矿物的稀土元素总量(不含 Y)较低(表 4), 轻、重稀土元素比值比岩浆岩的变化范围较大, 但均值相近。除  $La_N/Yb_N$  比值变化范围较岩浆岩大外,  $La_N/Sm_N$  和  $Gd_N/Yb_N$  比值的变化、均值都与岩浆岩相似, 显示较强的轻稀土元素富集, 以及不明显的轻重稀土元素分馏特征。稀土元素配分模式(图 6c)总体也与岩浆岩相似, 呈右倾型式, 重稀土元素配分模式较为平坦。

#### 4.4 成矿物质来源的地球化学制约

黄铁矿成分标型在金或铜(金)矿床的应用广泛且较为成熟(Bralia A et al., 1979; СММРНОВА et al., 1983; 靳是琴等, 1986; 栾世伟等, 1987; 邵洁涟, 1988; 周学武等, 2005), 能反映矿床成因和物质来源的一些信息。

不同成因类型的黄铁矿中的  $w(S)/w(Fe)$  值不尽相同, 沉积成因黄铁矿中的铁和硫的含量与理论值相近或硫的含量略多, 多金属矿床中亏硫(周学武等, 2005), 中低温热液矿床亏 S、亏 Fe(靳是琴等, 1986), 井边矿床黄铁矿表现亏 S、亏 Fe, 且  $S/Fe$  (1.133~1.147) 比值显示出明显亏硫趋势, 反映出与沉积成因相差较大而接近中低温热液矿床的特征。

Se 往往呈类质同象替代 S 而进入黄铁矿晶格中。井边矿床中黄铁矿的该值与沉积成因的明显不同( $w(Se): 0.2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ ,  $w(S)/w(Se)$  比值  $> 3 \times 10^4$ ), 与一般岩浆热液矿床中的范围一致 [ $w(Se) > 2 \times 10^{-6}$ ,  $w(S)/w(Se) < 1.5 \times 10^4$ ] (邵洁涟, 1988), 反映出岩浆成因的信息。

由于 Co、Ni 与 Fe 同为 VIII 族元素, 它们替代 Fe 进入到黄铁矿晶格中,  $w(Co)$ 、 $w(Ni)$ 、 $w(Co)/w(Ni)$  等特征值能反映成矿物质来源及成矿过程、矿化富集机制(靳是琴等, 1986), 但是其替代程度因不同成因而存在差异(陈光远等, 1988)。Co 的亲铁性大于 Ni, Ni 倾向富集在岩浆早期结晶形成的矿物

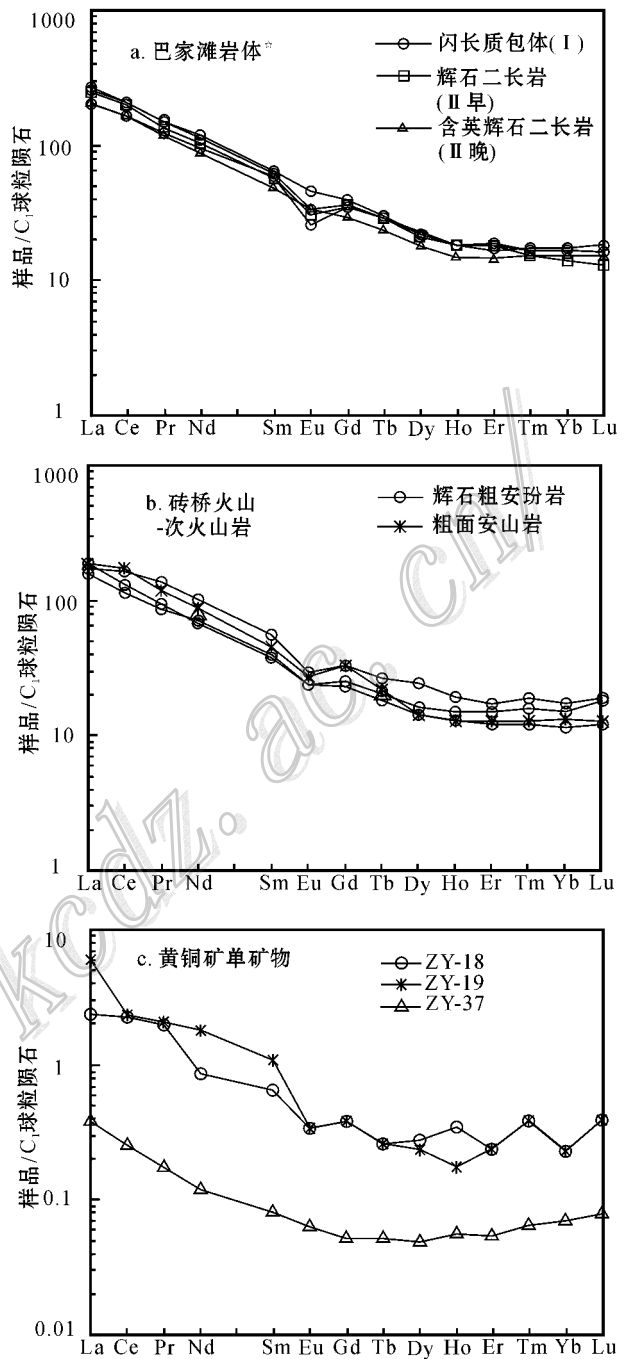


图 6 井边矿床岩浆岩及黄铜矿单矿物稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(C1 球粒陨石据 Sun et al., 1989) (I)—侵入期次, 数据来源: ☆—刘珺等, 2007

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of magmatic rocks and single mineral of chalcopyrite of the Jingbian deposit (I)—Stage of invasion, Data Source: ☆—Liu J et al., 2007

中, 而 Co 则富集在岩浆晚期矿物中, 使得岩浆热液  $w(Co)/w(Ni) > 1$ 。因此, 岩浆热液成因的黄铁矿中 Co 含量较高, 且  $w(Co)/w(Ni)$  值明显大于 1。

据此,国内外一些学者研究给出了沉积成因、岩浆热液成因和火山成因的黄铁矿的  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值分别为小于 1、小于 1 和大于 10(蔡元吉等,1999; Bralía et al., 1979)。井边矿床黄铁矿的  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  比值显著大于 1,属于岩浆热液成因,但远小于 10,表明不太可能是火山热液成因。对比浙江八宝山火山热液金矿床(1.43)、辽宁五龙岩浆热液金矿床(1.14)、豫西超浅成火山斑岩金矿床(4.52)和湖南七宝山接触交代金矿床(9.08)的黄铁矿  $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$  值(周学武等,2005),也说明井边矿床属于岩浆热液成因。

$w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值也可以反映矿床成因的信息(栾世伟等,1987),岩浆热液金矿床中黄铁矿含金较高,一般  $w(\text{Au})/w(\text{Ag}) \geq 0.5$ ;火山岩型、构造破碎带蚀变岩型和沉积变质热液交代型及各类伴生金矿床中黄铁矿的  $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值多数  $< 0.5$ 。井边矿床  $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值为 3.30~6.20,反映其属于岩浆热液型铜(金)矿床。而黄铜矿中的黄铁矿颗粒(ZY17-3、ZY19-1)中的  $w(\text{Au})/w(\text{Ag})$  比值极高,可能是黄铜矿中的金带进黄铁矿;同时造成  $n(\text{Au})/n(\text{Ag})$  比值异常。

已有人运用矿石单矿物的稀土元素特征研究矿床成因。其中,磁铁矿运用最早也较成熟(聂凤军,1976)。近年来,也有用闪锌矿、方解石和方铅矿等矿物的稀土元素特征作尝试的(李厚民等,2009)。从表 3 和图 6 可以看出,井边矿床黄铜矿的 REE 特征继承或保存了含矿岩浆岩的源区信息,矿物的 REE 总量明显较含矿岩浆岩的低,配分模式与相应岩浆岩的基本一致,表明成矿作用与岩浆流体关系密切。

综上所述,黄铁矿成分标型、黄铜矿稀土元素特征共同显示井边矿床(矿代区)的成矿热液来源于岩浆分异。且热液来源于火山岩喷气的可能性较小,可能来自火山后期的次火山-侵入岩浆岩热液。

## 5 控矿地质因素探讨

井边矿区出露的火山岩地层为砖桥旋回上段。控制井边矿床的地质因素包括岩浆岩和构造。

### 5.1 岩浆岩

井边矿床属于中低温岩浆热液矿床,矿区外围 SE 方向出露的黄梅尖 A 型花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为  $(126.5 \pm 2.1) \text{Ma}$ (范裕等,2008)。庐枞火山喷发在 127 Ma 左右结束(周涛发等,2008),盆地内该类 A 型花岗岩(126~124 Ma)形成于喷发之后。根据基础地质特征,有人认为井边矿床的形成与盆地内的第一期脉状热液成矿作用有关(徐兆文等,1992),其锆石 U-Pb 年龄为 130~129 Ma(曾键年等,2009<sup>①</sup>),由此判断,成矿岩浆热液不可能来自黄梅尖岩体。

矿区西北边缘出露的巴家滩岩体的锆石 U-Pb 和黑云母 Ar-Ar 年龄分别为  $(133.5 \pm 0.6) \text{Ma}$  和  $(129.1 \pm 0.5) \text{Ma}$ (刘珺,2005);表明该岩体属于砖桥旋回(锆石 U-Pb:  $134.1 \pm 1.6 \text{Ma}$ )与双庙旋回(锆石 U-Pb:  $130.5 \pm 0.8 \text{Ma}$ )间歇期岩浆侵入的产物。另外,砖桥火山岩、次火山岩和巴家滩岩体的稀土元素特征十分相似,可能属于同源岩浆演化不同阶段的产物。稀土元素特征反映岩浆岩演化的顺序可能为:砖桥旋回火山岩→次火山岩→巴家滩岩体。成矿与砖桥火山岩的时间间隔大概在 4 Ma 以上,且中间存在弱矿化的次火山安山玢岩。黄铁矿的成分标型表明,成矿热液也不可能来自砖桥火山喷发时期,而可能来自次火山岩、巴家滩岩体或同期次的类似岩体。

目前盆地内由橄榄安粗岩系控制的玢岩型、沉积热液叠加改造型、脉状热液型 3 类矿床均与火山喷发期后的次火山-侵入岩有关。如罗河、泥河的玢岩铁矿在砖桥旋回之后的次火山辉石粗安玢岩中成矿(覃永军等,2010);龙桥的沉积热液叠加改造型铁矿的成矿年龄为 130.6 Ma(段超等,2009),其岩浆热液可能与形成玢岩型矿床的次火山岩热液相似(曾键年等,2009<sup>①</sup>)。井边矿区砖桥上段次火山岩发生了稀疏浸染状的矿化,巴家滩岩体发育大面积铜、铅、锌次生晕异常(冶金部华东地质勘查局八一五队,1994<sup>②</sup>)表明砖桥旋回后期的次火山-侵入岩的含矿性高。因此,成矿岩浆热液可能来源于次火山-侵入岩。矿体和正长斑岩脉共同产出于次火山安山玢岩的构造破碎蚀变带中,受相同构造体系控制。

① 曾键年等,2009. 长江中下游重要矿集区成矿地球动力学背景及构造-成矿响应(庐枞盆地 2008 年度阶段性报告). 中国地质大学(武汉)地调院。

② 冶金部华东地质勘查局八一五队,1994. 安徽枞阳虎栈铜矿普查报告。

前人推测正长斑岩脉是巴家滩杂岩体晚期的产物,因为井边矿床的黄铜矿与巴家滩岩体中铜矿化较高的早期闪长质包体的稀土元素特征和配分模式一致,因此,成矿热液可能来源于巴家滩岩体,同时也暗示井边地区深部可能存在与巴家滩类似的侵入岩。

## 5.2 控矿构造

在区域构造应力场的持续作用下,地质体发生破碎总是有规律的。例如在里德尔剪切应力场中, $R$ 与剪应力的交角为内摩擦角的一半( $\varphi/2 = 15^\circ$ ), $R$ 与 $R$ 呈共轭剪切关系,共轭角 $2\alpha = 60^\circ$ 。经过对中国东部中生代华夏运动地区的研究,王思源(1990; 1993 2008<sup>①</sup>)总结出该区内摩擦角一半( $\varphi/2$ )平均为 $10^\circ$ 左右,共轭剪切角( $2\alpha$ )约为 $70^\circ$ 左右,进而建立了新华夏体系“应变菱形解析法”(图7)。

(1)在南北向( $180 \sim 360^\circ$ )左行对扭力场中,形成第一序次直扭体系结构面:①  $S_1$ 为NNW  $350^\circ$ 的扭→扭张性(对应里德尔剪切 $R$ )结构面,与南北剪应力的交角 $\varphi/2 = 10^\circ$ ;②  $S_2$ 与 $S_1$ 共轭,为NWW  $280^\circ$ 的扭→扭张→扭压性结构面;③  $S_3$ 为 $S_1$ 与 $S_2$ 追踪形成的NW  $310^\circ$ 的张→张扭性追踪结构面;④  $S_4$ 为NE  $40^\circ$ 的压→压扭性结构面。

(2)在持续应力的作用下,形成第二序次构造体系结构面,该体系是以第一序次结构面为边界条件形成的扭力场。在实际破碎过程中,不是所有的结构面都发育或者发育程度一致,往往是以某几个结构面为主。

应用“应变菱形解析法”解析庐枞盆地燕山期的构造,表现为(图1、图7):① NE( $45^\circ$ )向断裂( $S_4$ 结构面)为盆地的基底主干断裂,对盆地起到明显的控制作用。由于该结构面前期以挤压力为主,形成了大规模的褶皱。盆地内的基底隆起带(凤凰山-杨桥-黄屯-龙桥-罗河-义津桥)是该结构面的表现,它控制区内地层的空间分布,以及盆地的基底构造格架和岩浆活动,主导盆地的形成和演化,制约盆地内区域成矿规律。② 近EW( $280^\circ$ )向基底断裂( $S_2$ 结构面),该组断裂将盆地基底隆起带切割,产生右行错位,受其影响,晚期侵入岩体呈东西向展布,如罗河-石门庵基底断裂控制了罗河-巴家滩岩体的侵入。③ 近SN( $350^\circ$ )向( $S_1$ 结构面)与EW( $280^\circ$ )向结构

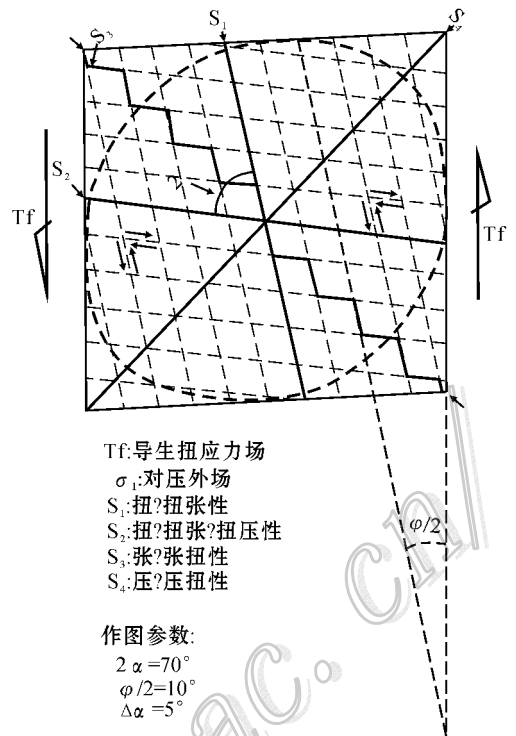


图7 扭力场的持续作用引起的结构面及其转变  
(据王思源 2008<sup>①</sup>)

Fig. 7 Structural plane changes due to prolonged action of the torsion field (after Wang 2008)

面共轭,以左行剪切为主。④ NW( $310^\circ$ )向断裂( $S_3$ 结构面)是由 $S_1$ 和 $S_2$ 共轭结构面追踪形成的,其共轭断裂交汇处形成构造薄弱带,是火山喷发、岩浆侵入以及成矿作用发生的最佳地段。盆地第一序次结构面以 $S_4$ 、 $S_1$ 为主, $S_3$ 次之。另外,据徐兆文等(1992)统计,盆地内热液脉状矿体走向玫瑰花图(图8),也与“应变菱形”分析一致。

将该方法进一步应用到井边矿床矿化区域,表现为以第一序次为主导、第二序次叠加复合的特征:① 矿区西南部至北东部是岩脉、矿体、断裂和构造蚀变带的主要分布区域,表明该区以第一序次结构面为主导,其中的 $S_4$ 结构面控制着本区构造带的展布;② 矿区内构造蚀变带、矿体和岩脉的单条走向均分布在NW—NNW向的区间,是因为该区间在解析图上属于扭张-张扭性质的结构面组成的区域,有利于热液活动。③ NWW向矿体对应解析图上的 $S_2$ 和 $S_1$ 结构面( $S_2$ 表示以第“1”序次的 $S_1$ 结构面为

① 王思源. 2008. 构造解构. 内部资料.

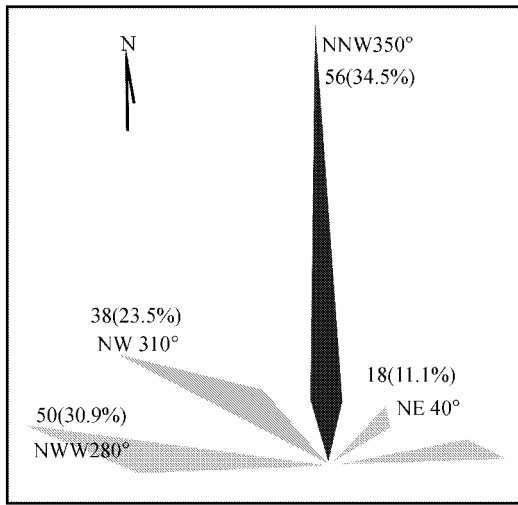


图 8 热液型 Cu 矿脉走向统计玫瑰图(据徐兆文等, 1992 修改)

Fig. 8 Statistical rose diagram of strikes of hydrothermal Cu veins(modified after Xu et al., 1992)

边界条件形成第二序次的  $S_2$  结构面,其他表达方式类似)。如 ③ 号矿体和 ② 号矿体的东段走向为 NWW270° 方向,对应  $2S_2$  结构面;④、⑤、⑥、⑦、⑪、⑫和 ⑮ 号矿体的走向为 EW280° 方向,对应  $S_2$  结构面;④ NE 向矿体对应  $S_4$  和  $1S_4$  结构面,如 ⑧、⑨ 和 ⑯ 号矿体走向为 NE30~40°。⑤ NW 向矿体对应  $S_3$  结构面,如 ⑩ 和 ⑰ 号矿体,以及由 ⑭、⑮ 和 ⑱ 号矿体组成的整体走向,该组结构面属于张性追踪断裂;⑥ 斑岩脉整体呈  $1S_3$  结构面方向展布,但单脉体现为  $1S_2$  结构面方向,表现出整体由个别追踪形成的特点。

综上所述,控制井边矿床成矿岩体的构造属于第一序次结构面,在 NE 向构造被 EW 向构造切割的部位最有利于成矿岩体的侵位。第一序次 NE 向结构面同时控制矿区内构造带的展布方向,而构造的个体走向受第一序次与第二序次结构面形成的扭张-张扭性结构面控制。因此,井边矿床的构造控制规律为 NE40° 成带和 NW310° 成行。寻找靶区或远景区应该在 NE40° 带上或者两侧平行的特定位置;追寻矿体应该沿 NW 向。

## 6 成矿背景模式

庐枞盆地存在 2 类岩浆,一类为埃达克质岩,主要分布于沙溪地区和盆地深部,沙溪岩体侵位的锆

石 U-Pb 年龄为 136.0~132.6 Ma(Wang et al., 2006 杨晓勇等, 2006),发生斑岩型成矿作用。另一类为组成盆地主体的橄榄安粗岩系火山-次火山岩。橄榄安粗岩的喷发时间为 135~127 Ma(锆石 U-Pb 法),又分为 2 个旋回:135~133 Ma 和 131~127 Ma(周涛发等, 2008)。而次火山-侵入岩主要发生于盆地火山活动的间隙期,如罗河-泥河辉石粗安玢岩侵位的锆石 U-Pb 年龄为 133.3~132.8 Ma(覃永军等, 2010),龙桥地区潜伏的正长岩类锆石 U-Pb 年龄为 131.1 Ma(段超, 2009),拔茅山和雨坛的正长岩类的锆石 U-Pb 年龄为 129.5 Ma 左右(曾键年等, 2010),巴家滩岩体的侵位的锆石 U-Pb 年龄为 133.5~129.1 Ma(刘珺, 2005),该类次火山-侵入岩主要控制玢岩型、沉积热液叠加改造型和脉状热液矿床的产出。井边矿床属于早期火山喷发旋回后期的次火山-侵入岩成矿。

区域上,中国东部中生代在 200~160 Ma、140 Ma 左右和 130~110 Ma 时三个动力学背景下,分别对应碰撞造山过程、构造体制大转折和岩石圈大规模拆沉作用地质事件(毛景文等, 2004)。庐枞盆地燕山期岩浆-成矿作用的地球动力学背景主要处于中国东部 140 Ma 左右的构造体制大转折和 130 Ma 左右的岩石圈大规模拆沉两大地质事件。进一步研究,认为其构造体制转折和岩石圈大规模拆沉的时间在 135 Ma 左右(覃永军等, 2010)。因此,推测井边矿床的成矿背景模式如图 9。

(1) 135 Ma 之前,庐枞盆地的构造体制以晚期拉张作用为主导,在深部,长期底侵于下地壳的软流圈物质与下地壳发生物质同熔作用,形成控制斑岩型成矿作用的埃达克质岩浆活动;在地表,形成了控制盆地基本格架和盆地发育、演化的区域性深大断裂。

(2) 135.0~133.0 Ma 间,庐枞处于拉张减薄阶段( $I_1$ )。在继续发生埃达克质岩浆作用的同时,大量的软流圈玄武质岩浆上侵、喷出形成盆地早期大规模的火山喷发(龙门院-砖桥旋回)。该时期井边地区的深部可能发生与埃达克质岩浆类似的岩浆活动。

(3) 133.0~131 Ma 时期,庐枞处于拉张减薄拆沉阶段( $I_2$ )。早期火山喷发(砖桥旋回)期后残留的岩浆继续上侵,在井边矿区地表形成次火山安山玢岩,在井边 NW 部的巴家滩和推测的井边深部发生稍晚于次火山安山玢岩的岩浆活动,形成辉石二

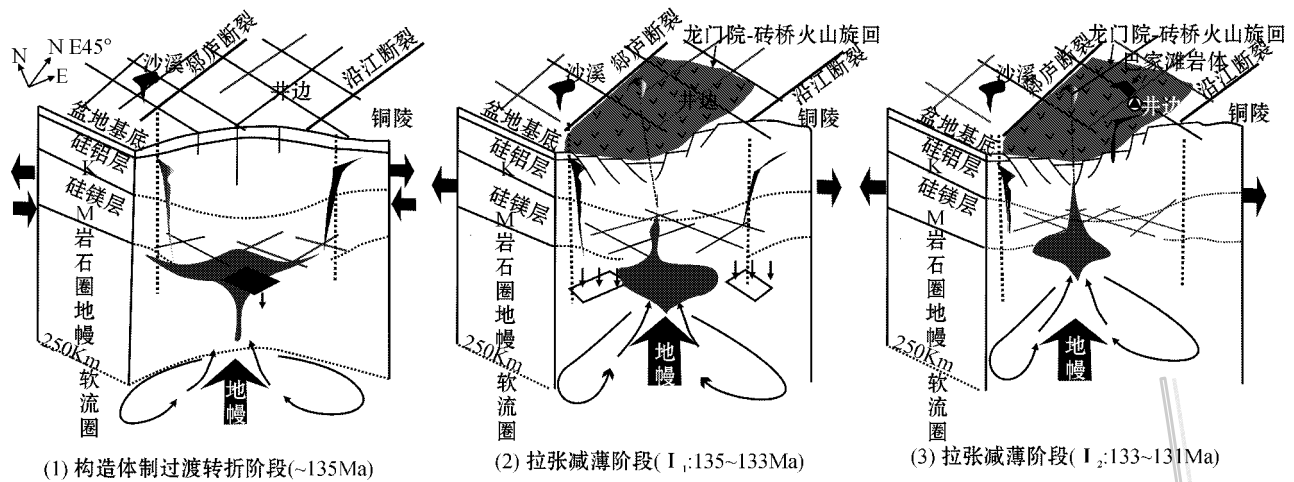


图9 井边铜(金)成矿背景模式示意图

Fig. 9 Sketch map of ore-forming setting model of the Jingbian copper (gold) deposit

长岩和闪长岩类侵入体。该类侵入岩的后期岩浆分异形成正长斑岩脉和含矿的硅化石英脉,发生矿化作用。

## 6 结论

(1) 井边矿床属于中低温热液脉型铜(金)矿床。矿体受断裂控制明显,脉壁光滑与围岩界线清楚。矿石成分单一,矿石组构及矿石类型反映热液受断裂构造控制;黄铁矿成分标型也显示中-低温岩浆热液成因;黄铜矿稀土元素特征继承或保存了含矿岩浆岩的源区信息,反映成矿热液为岩浆热液。

(2) 矿区内的岩体属于同源岩浆演化不同阶段的产物,控矿岩体属于砖桥火山岩后期的次火山-侵入岩。岩浆期后热液沿断裂构造充填交代成矿。

(3) 断裂构造是控制井边成矿的重要地质因素。本区构造与中国东部中生代新华夏体系一致,在区域南北左行直扭主力场中,发生了旋扭作用,产生了强烈的第二序次断裂构造活动。“应变菱形析解”显示,新华夏南北左行对扭主力场,形成的第一序次的NE向( $S_4$ 结构面)、NW向( $S_3$ 结构面)断裂构造,其左行对扭,又生成第二序次NW向( $S_2$ 、 $S_3$ 结构面)、EW向( $S_2$ 结构面)、NNW向( $S_3$ 、 $S_1$ 结构面)的破裂面。第二序次局部叠加复合第一序次破裂共同控制了矿床产出。于是,井边矿化区总体呈现NE40°成带,而虎栈、张榜两采区各自以

NW310°成行的特点。

(4)  $w(\text{Fe})/w(\text{S}+\text{As})$ 、 $n(\text{Au})/n(\text{Ag})$ 特征值表明采集的研究样品形成深度属于中浅层环境(-100~-150 m),即目前工程控制的是矿体中浅部位。

志谢 野外工作期间曾得到井边矿产开发公司的帮助和支持,资料收集得到安徽省地质资料馆张明霞工程师和其他工作人员的帮助,论文审稿专家提出了建设性意见,在此表示衷心的感谢!

## References

- Bralia A, Sabatini G and Troja F. 1979. A reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 14(3): 353-374.
- Cai Y J, Ma C A and Jiang Y C. 1999. The experimental study on thermal electricity forming mechanism of pyrite in Au deposit and its exploring practice[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 20(3): 218-224 (in Chinese).
- Cao Y. 2008. Studies on Mesozoic A-type granitoids and their rock xenoliths in Lujiang-Zongyang area, Anhui Province (master candidate paper [D]. Supervisor: Du Y S. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese).
- Смирнова С К и др. 1983. Применне типоморфных особенностей минералов оценки рудодорьявнсий Востчного Уэбкстана и ордслення уровня их эрозийонного среза, ВКН, Новые идеи в генетической минералогии[M]. Москва: Наука. 108-113 (in Russian).
- Chen G Y, Sun D S and Yin H A. 1988. Genetiemineralo-gyandprogny and prospecting mineralogy[M]. Chongqing: Chongqing Publishing

- House. 880p( in Chinese ).
- Duan C. 2009. Geological and geochemical characteristics and genesis of Longqiao iron deposit in Luzong Basin , Anhui , China( master candidate paper [ D ]. Supervisor : Zhou T F. Hefei : Hefei university of Technology. 5( in Chinese ).
- Fan Y , Zhou T F , Yuan F , Qian C C , Lu S M and Cooke D. 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the A-type granites in the Lu-Zong( Lu-jiang-Zongyang ) area and their geological significances[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 24( 8 ):1715-1724( in Chinese with English abstract ).
- Новгородова М И и др. 1986. Использование типоморфизма минералов и минералов и минеральных ассоциаций при минералогическом картировании полиформации Ных месторождени , В обтипоморфизм минерфлов и минеральных ассоциаций[ M ]. Москва :Наука. 88-95( in Russia ).
- Li H M ,Wang D H , Zhang C Q and Chen Y C. 2009. Characteristics of trace and rare earth elements in minerals from some typical lead-zinc deposits of Shaanxi Province[ J ]. Mineral Deposits , 28( 4 ) 434-448( in Chinese with English abstract ).
- Liu H , Qiu J S H , Luo Q H ,Xu X S ,Ling W L and Wang D Z. 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 J. 2005. Geology and geochemical characteristic and mineralization potential estimation of Bajiatan intrusion in Luzong volcanic basin , Anhui Province( master candidate paper [ D ]. Hefei : Hefei University of Technology( in Chinese ).
- Liu J , Zhou T F ,Fan Y ,Wu M A ,Lu S M and Qian C C. 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 ).
- Luan S W. 1987. Gold geology and direction of prospecting[ M ]. Chengdu : Sichuan Science and Technology Publishing House. 78-84( in Chinese ).
- Mao J W and Wang Zh L. 2004. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in east China[ J ]. Mineral Deposits , 19( 4 ): 91-99( in Chinese with English abstract ).
- Nie F J , translated. 1976. The distributed of the REE and other trace element in magnetite[ A ]. Foreign mining geology[ M ]. 1993. Institute of Geology and Mineral Resources. 26( 2 ): 119-133.
- Qing R Q ,Liu Z P ,Qian L P ,Wang S and Zhou W Y. 2001. Study of mode of occurrence of gong in the Jianbing gold deposit ,Zongyang County[ J ]. J. Hefei University of Technology , 24( 4 ): 523-528( in Chinese with English abstract ).
- Qin Y J ,Zeng J N ,Zeng Y ,Ma Z D ,Chen J H and Jin X. 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of ore-bearing pyroxene-trachyandesite porphyry and its geological significance in Luohe-Nihe iron ore field in Luzong basin , southern Anhui ,China[ J ]. Geological Bulletin of China , 29( 6 ): 851-862( in Chinese with English abstract ).
- Ren Q J , Wang D Z ,Xu Z W ,Dong S G ,Pan L Q ,Yang R Y ,Fang C Q and Hu J A. 1993. Formation and development of the Mesozoic Lu-jiang-Zongyang volcanic-Structural depression in Anhui Province and their relation to mineralization[ J ]. Acta Geologica Sinica , 62( 2 ): 121-136( in Chinese with English abstract ).
- Sun Y D , Yang R Y , Ren Q J and Liu X S. 1994. Discussion on the characteristics and tectonic setting of the Mesozoic volcanic sequences in Lujiang-Zongyang area[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 10( 1 ):94-103. ( in Chinese with English abstract ).
- Shao J L. 1988. Prospecting mineralogy of gold deposit[ M ]. Wuhan : China University of Geosciences Publishing House. 158p( in Chinese ).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental cruct :Its composition and evolution[ M ]. London :Blackwell Scientific Publications. 312.
- Wang D Z , Ren Q J , Qiu J S ,Chen K R , Xu Z W and Zen J H. 1996. Characteritics of volcanic rocks in the shoshonite province ,eastern China and their metallogenesis[ J ]. Acta Geologica Sinica , 70 : 23-34( in Chinese with English abstract ).
- Wang Q , Zhao Z H , Xiong X L and Xu J F. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust :Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorte-porphyrtes , Anhui Province , China[ J ]. Geochimica , 30( 4 ): 353-363( in Chinese with English abstract ).
- Wang Q , Derek A W and Xu J F. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area , Anhui Province( eastern China ) : Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[ J ]. Lithos , 89( 3-4 ): 424-446.
- Wang S Y. 1990. Metalloctectonic analysis for tin-multimetal deposits of strata-bound type[ J ]. Earth Science , 15( 4 ): 421-430( in Chinese with English abstract ).
- Wang S Y. 1993. Metallogenic tectonic analysis of eruptive-sedimentary-transformed type silver-polymetallic deposit in Yindongzi , Shanxi Province[ J ]. Geoscience , 7( 3 ): 73-82( in Chinese with English abstract ).
- Wang Z T and Qin K Z. 1991. The typer and metallogence mettings of large scale deposits in China and the potential of metellogenic concentrated area[ J ]. Mineral Deposits , 10( 3 ):119-120( in Chinese with English abstract ).
- Wu L R , Qi J Y , Wang T D , Zhang X Y and Xu Y S. 1982. Mesozoic volcanic rocks in eastern part of China[ J ]. Acta Geologica Sinica , ( 3 ): 223-235( in Chinese with English abstract ).
- Wu M A , Hong M J and Zhao W G. 2007. Mineralization regularity and exploration direction in Luzong area , Anhui[ J ]. Resources Survey and Envnomenn[ J ]. 28( 4 ): 269-278( in Chinese with English abstract ).
- Xu Z W , Ren Q J , Yang R Y and Wang S. 1992. Distribution regularities and metallogenic patterns of veinlike Cu( Au )-deposits in Lujiang-Zhongyang area[ J ]. Geology and Prospecting , 28( 1 ): 8-16( in Chinese with English abstract ).
- Yang X Y. 2006. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar dating and geological significance on the Cu-bearing porpyrite of Shaxi from southern Tan-Lu fault belt[ J ]. J. mineral Petrol. , 26( 4 ): 34-39( in Chinese with English abstract ).
- Yu X Y and Bai Z G. 1981. Latitic series in Lujiang-Zongyang region [ J ]. Geochimica , 10( 1 ): 57-65( in Chinese with English abstract ).
- Yuan F , Zhou T F , Fan Y , Lu S M , Qian C C , Zhang L J , Duan C and Tang H M. 2009. 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).
- Zhan S Q and Li H C. 1986. Causes of introduction to mineralogy ( Vol. 1 and 2 ) [ M ]. Changchun : Jilin University Press ( in Chinese ).
- Zhao Z H and Tu G C. 2003. Super-large deposits in china ( II ) [ M ]. Beijing : Science Press. 235 ( in Chinese ).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Lu S M, Shang S G, Cooke D, Meffre S and Zhao G C. 2008. Geochronology of volcanic rocks and its significance of Luzong Basin, Anhui Province [ J ]. Science in China ( Series D : Earth Sciences ), 18( 32 ): 1342-1353 ( in Chinese ).
- Zhou X W, Li S R, Lu L and Ling W B. 2005. Research on the composition typomorphism of pyrite from Longkeng gold-silver mineralization district in Wuyi, Zhejiang Province, China [ J ]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24( 4 ): 317-327 ( in Chinese with English abstract ).
- Zeng J N, Qin Y J, Guo K Y, Chen G G and Zeng Y. 2010. Zircon U-Pb dating of ore-bearing magmatic rocks and its constraint on the formation time of the ore deposits in Luzong Basin, Anhui Province [ J ]. Acta Geologica Sinica, 84( 4 ): 465-478 ( in Chinese with English abstract ).
- ### 附中文参考文献
- 蔡元吉, 马承安, 蒋永才. 1999. 金矿床黄铁矿热电性质形成机理实验研究及其找矿应用 [ J ]. 火山地质与矿产, 20( 3 ): 218-224.
- 曹毅. 2008. 安徽庐枞盆地中生代 A 型花岗岩类及其岩石包体研究 [ 硕士学位论文 ]. 导师: 杜杨松. 北京: 中国地质大学.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1988. 成因矿物学与找矿矿物学 [ M ]. 重庆: 重庆出版社. 880.
- 段超. 2009. 安徽庐枞盆地龙桥铁矿床地质地球化学特征和矿床成因研究 [ 硕士学位论文 ]. 导师: 周涛发. 合肥: 合肥工业大学. 5.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 钱存超, 陆三明, DAVID Cooke. 2008. 安徽庐江-枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义 [ J ]. 岩石学报, 24( 8 ): 1715-1724.
- 李厚民, 王登红, 张长青, 陈毓川, 李立兴. 2009. 陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征 [ J ]. 矿床地质, 28( 4 ): 434-448.
- 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.
- 刘瑗. 2005. 安徽庐枞火山岩盆地中巴家滩岩体的地质地球化学特征和成矿潜力评价 [ 硕士学位论文 ]. 导师: 周涛发. 合肥: 合肥工业大学.
- 刘瑗, 周涛发, 袁峰, 范裕, 吴明安, 陆三明, 钱存超. 2007. 安徽庐枞地区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.
- 毛景文, 王志良. 2004. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨 [ J ]. 矿床地质, 19( 4 ): 91-99.
- 聂凤军(译). 1976. 磁铁矿中稀土元素及其它微量元素的分布 [ A ]. 见: 外国矿产地质 [ M ]. 1993 地质矿产研究所. 26( 2 ): 119-133.
- 钱让清, 刘中平, 钱立平, 王实, 周文雅. 2001. 枞阳井边金矿金的赋存状态研究 [ J ]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 24( 4 ): 253-258.
- 覃永军, 曾键年, 曾勇, 马振东, 陈津华, 金希. 2010. 安徽庐枞盆地罗河-泥河铁矿田含矿辉石粗安玢岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义 [ J ]. 地质通报, 29( 6 ): 851-862.
- 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-构造洼地的形成、演化及成矿 [ J ]. 地质学报, 62( 2 ): 121-136.
- 孙治东, 杨荣勇, 任启江, 刘孝善. 1994. 安徽庐枞中生代火山岩系的特征及其形成的构造背景 [ J ]. 岩石学报, 10( 1 ): 94-103.
- 邵洁涟. 1988. 金矿找矿矿物学 [ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社. 158.
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用 [ J ]. 地质学报, 70: 23-34.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长岩的证据 [ J ]. 地球化学, 30( 4 ): 353-363.
- 王思源. 1990. 芒场矿田锡多金属成矿构造解析 [ J ]. 地球科学, 15( 4 ): 421-430.
- 王思源. 1993. 陕西银洞子喷溢沉积改造型银多金属矿床成矿构造解析 [ J ]. 现代地质, 7( 3 ): 73-82.
- 王之田, 秦克章. 1991. 中国大型铜矿类型、成矿环境与成矿集中区的潜力 [ J ]. 矿床地质, 10( 3 ): 119-120.
- 栾世伟. 1987. 金矿地质与找矿方向 [ M ]. 成都: 四川科学技术出版社. 78-84.
- 吴利仁, 齐进英, 王昕渡, 张秀棋, 徐永生. 1982. 中国东部中生代火山岩 [ J ]. 地质学报 ( 3 ): 223-235.
- 吴明安, 侯明金, 赵文广. 2007. 安徽省庐枞地区成矿规律及找矿方向 [ J ]. 资源调查与环境, 28( 4 ): 269-278.
- 徐兆文, 任启江, 杨荣勇, 王实. 1992. 安徽庐枞地区脉状铜矿、铜金矿化分布规律和矿床模式 [ J ]. 地质与勘探, 28( 1 ): 8-16.
- 杨晓勇. 2006. 郟庐断裂带南段沙溪含铜斑岩体的 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代学研究及意义 [ J ]. 矿物岩石, 26( 4 ): 34-39.
- 于学元, 白正华. 1981. 庐枞盆地安粗岩系 [ J ]. 地球化学, 10( 1 ): 57-65.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 陆三明, 钱存超, 张乐骏, 段超, 唐敏慧. 2009. 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.
- 靳是琴, 李鸿超. 1986. 成因矿物学概论 (上、下) [ M ]. 长春: 吉林大学出版社.
- 赵振华, 涂光炽. 2003. 中国超大型矿床 ( II ) [ M ]. 北京: 科学出版社. 325 页.
- 周涛发, 范裕, 袁峰, 陆三明, 尚世贵, David Cooke, Sebastien Meffre, 赵国春. 2008. 安徽庐枞 (庐江-枞阳) 盆地火山岩的年代学及其意义 [ J ]. 中国科学 ( D 辑: 地球科学 ), 18( 32 ): 1342-1353.
- 周学武, 李胜荣, 鲁力, 林卫兵. 2005. 浙江弄坑金银矿区黄铁矿成分标型研究 [ J ]. 矿物岩石地球化学通报, 24( 4 ): 317-327.
- 曾键年, 覃永军, 郭坤一, 陈国光, 曾勇. 2010. 安徽庐枞盆地含矿岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时限的约束 [ J ]. 地质学报, 84( 4 ): 465-478.