

安徽铜陵地区胡村铜矿床流体包裹体研究

郑平¹, 文春华^{2,3}

(1. 湖南工程职业技术学院 资源工程系, 湖南 长沙 410151; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083; 3. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410116)

摘要: 胡村铜矿床位于安徽铜陵狮子山矿田的南部, 以矽卡岩型铜多金属矿为主, 矿床浅部主要为铜金矿体, 深部主要为铜-辉钼矿体。本文对其浅部矽卡岩型铜矿体开展了系统的成矿流体研究。根据矿物学、岩石学、成岩、成矿作用划分为3个演化阶段: 矽卡岩阶段(Ⅰ阶段)(细分为Ⅰ-1、Ⅰ-2阶段)、石英硫化物阶段(Ⅱ阶段)(细分为Ⅱ-1、Ⅱ-2a和Ⅱ-2b和Ⅱ-2c阶段)和碳酸盐阶段(Ⅲ阶段)。流体包裹体主要有富液相(Ⅰ型)、含子晶(Ⅱ型)、富气相(Ⅲ型)3种类型。不同阶段成矿流体演化特征为: Ⅰ阶段矽卡岩流体包裹体以高温(543~631℃), 中-高盐度(14.8%~20.1%和44%~50.1% NaCl_{eq}, 质量分数, 下同)为特征; Ⅱ阶段主成矿硫化物阶段流体包裹体以中温(172~298℃), 众值范围为210~230℃, 低-中等盐度(5.9%~16.9%)为特征; Ⅲ阶段流体包裹体以中-低温(158~247℃), 众值范围为170~190℃, 低等盐度(1.7%~6.2%)为特征。H-O同位素研究表明成矿流体源自岩浆水, 演化到硫化物成矿阶段为与大气降水混合热液特征。流体包裹体地球化学研究表明胡村矿床浅部矿体成矿作用主要受温度控制, 铜在高温状态呈迁移状态, 在水-岩反应的影响作用下大气降水与成矿流体不断混合导致流体体系温度快速下降, 成矿物质开始沉淀富集成矿。

关键词: 铜陵; 胡村; 铜矿床; 流体包裹体; H-O同位素

中图分类号: P618.41; P597+.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)04-0564-17

Fluid inclusion evidence for the Hucun copper ore deposit in Tongling area of Anhui Province

ZHENG Ping¹ and WEN Chun-hua^{2,3}

(1. Resource Engineering Department of Hunan Engineering Professional College, Changsha 410151, China; 2. School of Geoscience and InfoPhysics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China)

Abstract: The Hucun copper deposit, located in the south of the Shizishan deposit in Anhui Province, is a typical skarn-type copper polymetallic deposit, which is mainly characterized by copper-gold orebodies in the shallow and copper-molybdenite orebodies in the depth. A systematic study of its ore-forming fluids of the shallow skarn-type copper deposit indicates that three evolutionary stages could be recognized in its rock-forming and ore-forming process, i. e., skarn stage (Stage I, subdivided into I-1 and I-2), quartz sulfide stage (Stage II, subdivided into II-1, II-2a and II-2b stages) and carbonate stage (Stage III). The results also show that there are three main types of fluid inclusions, namely liquid-rich phase (Type I), subcrystal (Type II)

收稿日期: 2017-02-14; 接受日期: 2017-06-02

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(16C0416); 中南大学博士后课题(201670)

作者简介: 郑平(1982-), 女, 大学讲师, 地质工程师, 中南大学矿物学、岩石学、矿床学专业硕士研究生, 主要从事地质调查与矿产勘查相关的生产、科研、教育教学研究, E-mail: 85019157@qq.com; 通讯作者: 文春华, 高级工程师, 主要从事矿床地球化学及成矿流体研究, E-mail: herowch2004@163.com。

and gas-rich phase (Type III). The evolution of ore-forming fluids at different stages are as follows: it was of high temperature ($543\sim 631^{\circ}\text{C}$) and moderate-high salinity ($14.8\%\sim 20.1\%$ and $44\%\sim 50.1\%$) at Stage I, medium temperature ($172\sim 298^{\circ}\text{C}$) and low-moderate salinity ($5.9\%\sim 16.9\%$) at Stage II, and medium-low temperature ($158\sim 247^{\circ}\text{C}$) and low-moderate salinity ($1.7\%\sim 6.2\%$) at Stage III. H-O isotope studies indicate that ore-forming fluid originated from magmatic water and then was mixed with meteoric water at the sulfide metallogenic stage. Geochemical characteristics of fluid inclusions reveal that the temperature was the main controlling factor for the shallow orebodies, the copper migrated at high temperature and then the ore-forming materials began to precipitate and concentrate to mineralize when the temperature rapidly fell with the continuous mixing of meteoric water and ore-forming fluids.

Key words: Tongling; Hucun; copper deposit; fluid inclusion; H-O isotope

Fund support: The Scientific Research Project of Hunan Provincial Education Department (16C0416); The Postdoctoral Research Program of Central South University (201670)

铜陵矿集区是中国东部长江中下游多金属成矿带中一个重要的铜-金-多金属矿集区, 广泛发育矽卡岩型和斑岩型铜多金属矿床。其中的狮子山矿田内研究程度较高, 在成矿地质背景条件, 矿床地质特征及矿床成因方面积累了丰富的成果(常印佛等, 1983, 1991; 翟裕生等, 1992; 唐永成等, 1998; Pan and Dong, 1999; 毛景文等, 2004, 2009)。胡村铜矿床位于狮子山铜多金属矿田南部, 以矽卡岩型铜矿为特征。该矿床的研究程度相对较低, 陆顺富等(2014)对胡村岩体开展了年代学及地球化学研究, 锆石 U-Pb 年龄为 139.6 ± 2.2 Ma, 认为胡村岩体与狮子山矿田内的其它岩体具相似的地球化学特征; 徐晓春等(2011)对胡村矿床开展了地质特征研究; 在矿物学研究方面吴亚飞等(2013)开展了黄铁矿微量元素地球化学研究; 在成矿流体动力学方面李进文等(2007)开展了水-岩动力学实验研究, 认为 Cu 可能在超临界状态下迁移; 房海波(2009)对狮子山矿田铜矿床开展了成矿流体特征研究, 在胡村矿床仅对稳定同位素进行了分析, 但在成矿流体研究及铜矿富集机理方面还缺乏系统的研究。因此为深入探讨胡村矿床成矿流体演化与成矿作用, 本次研究在前人的工作基础之上通过系统采集不同成矿阶段岩石(矿石)样品开展流体包裹体岩相学、显微测温学、显微激光拉曼研究, 详细分析胡村矿床成矿流体的地球化学特征以及铜矿的富集沉淀机制。

1 地质概况

狮子山铜金矿田位于铜陵市区以东 7 km 处, 构造上处在东西向铜陵市-沙滩角构造岩浆岩带与北

东向顺安复向斜青山次级背斜的交汇部位, 是铜陵矿集区内研究程度最高的矿田。矿田出露的地层主要为中下三叠统, 包括中三叠统月山组(T_{2y})、马鞍山组(T_{2d}); 下三叠统和龙山组(T_{1h})、南陵湖组(T_{1n})。岩浆岩呈中-浅成小岩枝或岩墙状侵入体产出, 侵入到三叠系地层中, 岩性主要为石英二长闪长岩、花岗闪长岩、辉石二长闪长岩和二长花岗斑岩(图 1), 岩浆岩锆石 SHRIMP 和 LA-ICP MS U-Pb 同位素年龄为 $135\sim 145$ Ma(吴才来等, 1996, 2008; 唐永成等, 1998; 王彦斌等, 2004; 徐晓春等, 2008)。伴随着岩浆的侵入作用, 矽卡岩化、角岩化、大理岩化普遍发育, 形成了与岩浆侵入作用有关的 Cu、Au、Fe、Pb-Zn 等矿床。矿床有东狮子山铜矿床、西狮子山铜(金)矿床、老鸦岭铜(钼)矿床、胡村铜矿床、大团山铜(金)矿床、花树坡铜(金)矿床、冬瓜山铜(金)矿床、朝山金矿床和鸡冠山银(金)矿床等。主要为层控矽卡岩型、矽卡岩型、斑岩型、隐爆角砾岩型和中低温热液脉型(唐永成等, 1998; 储国正, 2003)。

胡村铜矿床位于狮子山矿田的南部, 构造上处在青山背斜北东段的南东翼或朱村向斜的北西翼。矿区出露地层主要为下三叠统和龙山组(T_{1h})和南陵湖组(T_{1n})的条带状灰岩和薄-中厚层灰岩。区内发育近南北向、北北西向和北北东向断裂, 控制了胡村花岗闪长岩体的分布。胡村花岗闪长岩体长 700 m, 宽 500 m, 出露面积 0.35 km^2 , 呈不规则小岩株状由南向北侵入, 南深北浅, 向北逐渐过渡为花岗闪长斑岩, 锆石 U-Pb SHRIMP 年龄为 140 ± 2.6 Ma(徐晓春等, 2008)。矿体赋存于岩体与围岩的接触带上, 主要见于地表以下 300~600 m 深度, 主矿体长 400 m, 延深约 400 m(图 2)。主要矿石矿物有黄铜

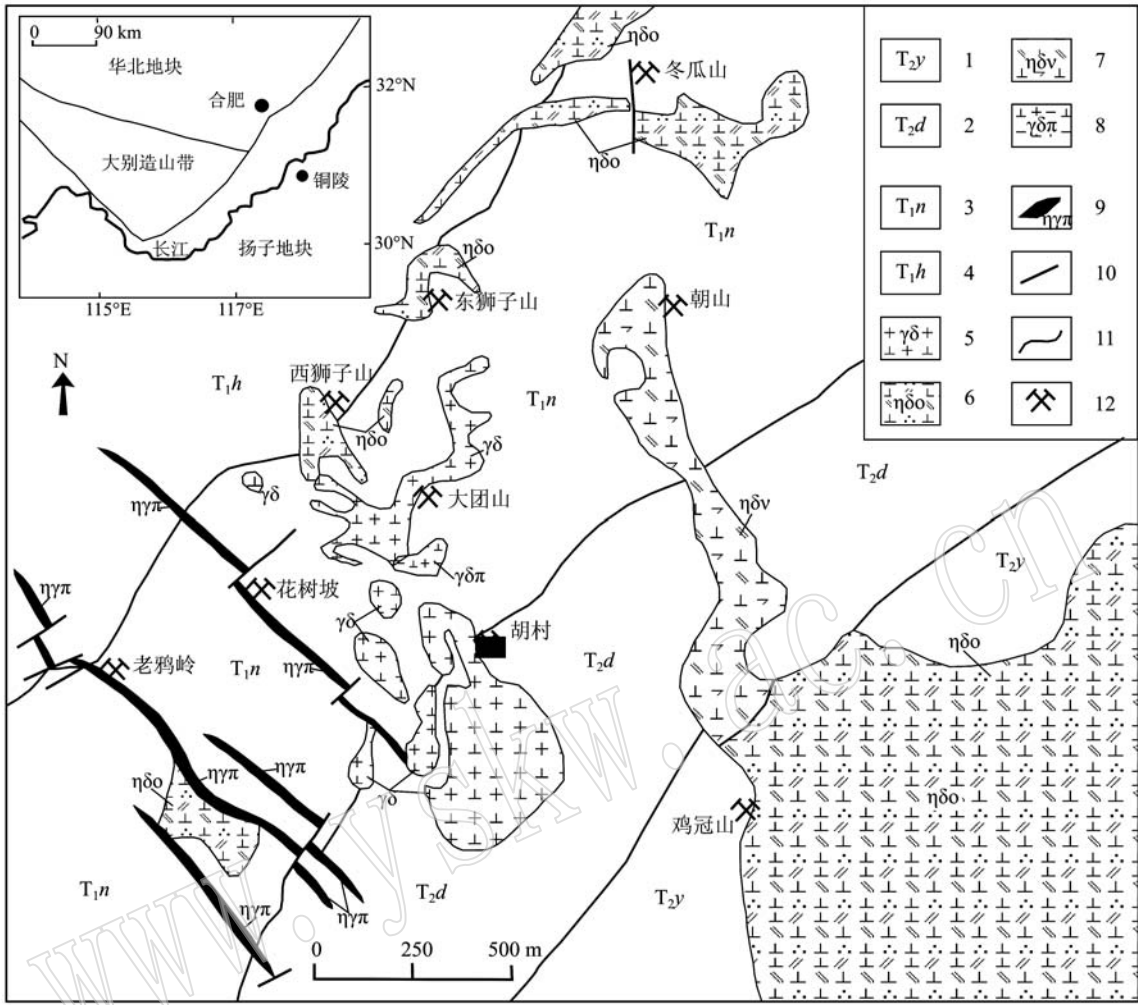


图 1 安徽省铜陵狮子山矿田地质示意图(徐晓春等,2014)

Fig. 1 Geological sketch map of the Shizishan orefield in Tongling, Anhui Province (after Xu Xiaochun *et al.*, 2014)
1—中三叠统马山组砂岩; 2—中三叠统东马鞍山组碳酸盐岩; 3—下三叠统南陵湖组碳酸盐岩及灰岩; 4—下三叠统和龙山组灰岩; 5—花岗闪长岩; 6—石英二长闪长岩; 7—辉石二长闪长岩; 8—花岗闪长斑岩; 9—二长花岗斑岩; 10—断层; 11—地质界线; 12—矿床
1—Middle Triassic Yueshan Formation; 2—Middle Triassic Dongma’ anshan Formation; 3—Lower Triassic Nanlinghu Formation; 4—Lower Triassic Helongshan Formation; 5—granodiorite; 6—quartz monzodiorite; 7—pyroxene monzodiorite; 8—granodiorite porphyry; 9—monzogranite porphyry; 10—fault; 11—geological boundary; 12—ore deposit

矿、黄铁矿, 次为辉钼矿、闪锌矿、方铅矿, 铜品位为 0.02%~9.15%, 平均 1.13% (徐晓春等, 2011)。岩体周边及其围岩发育不同程度的接触交代变质作用, 蚀变类型主要有矽卡岩化, 绿帘石和绿泥石化, 碳酸盐化, 大理岩化等。其中以绿帘石化、绿泥石化与铜矿化的关系最密切。矽卡岩化主要分布在花岗闪长岩与碳酸盐类岩石围岩的接触带上, 矽卡岩矿物主要组成为石榴石矽卡岩。绿帘石化和绿泥石化主要发育在矽卡岩和接触带两侧围岩中, 绿帘石、绿帘石交代简单矽卡岩中透辉石、石榴石, 形成含水矽卡岩。碳酸盐化以方解石-黄铁矿脉等形式出现。

大理岩化围绕花岗闪长斑岩侵入体呈环带状分布, 南陵湖组的碳酸盐类岩石, 已大部分矽卡岩化。随着接触交代及蚀变作用过程, 胡村铜矿床成矿作用可划分为 3 期 7 个阶段 (表 1)。

矽卡岩期 (I): 可细划分为 2 个阶段, 早期石榴石矽卡岩阶段 (I-1 阶段); 晚期绿帘石、绿泥化矽卡岩阶段 (I-2 阶段)。I-1 阶段: 矽卡岩矿物主要为钙铁榴石+钙铝榴石+透辉石 (图 3a)。以钙铁榴石为主, 显微镜下观察石榴石有明显的环带结构, 钙铁榴石、钙铝榴石裂隙发育, 常被后期的硫化物矿物充填交代。I-2 阶段: 绿帘石和绿泥化发育 (图 3a), 分

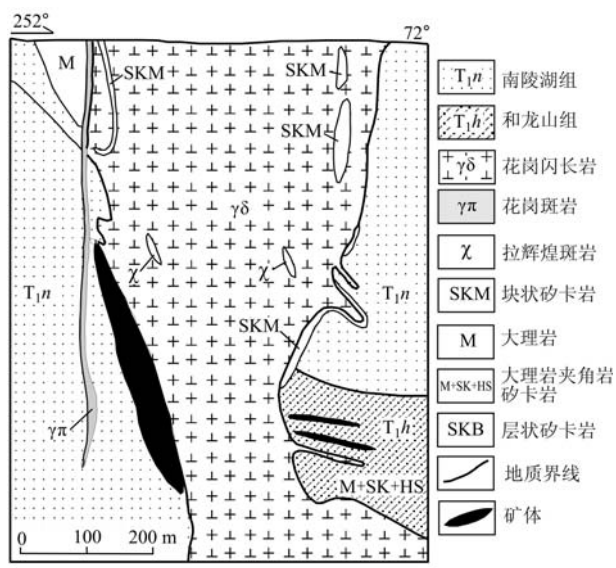


图 2 胡村铜矿床 36 线地质剖面图(徐晓春等, 2014)

Fig. 2 Geological section along No. 36 exploration line of the Hucun copper deposit(after Xu Xiaochun *et al.*, 2014)

布在钙铝榴石矽卡岩中,交代早期矽卡岩。显微镜下观察该阶段中见少量的黄铁矿、黄铜矿与方解石共生。还见有大量的磷灰石包体存在。

主成矿(氧化物、硫化物)期(Ⅱ):可划分为 2 个阶段:磁铁矿氧化物阶段(Ⅱ-1 阶段)和硫化物阶段(Ⅱ-2 阶段);其中硫化物阶段又可分为 3 个亚阶段:浸染状辉钼矿-方解石矿石(Ⅱ-2a 阶段);团块状黄铜矿-方解石-石英矿石(Ⅱ-2b 阶段);脉状黄铜矿-黄铁矿-闪锌矿-石英-方解石矿石(Ⅱ-2c 阶段)。

Ⅱ-1 阶段:磁铁矿呈团块状分布(图 3b),磁铁矿与方解石共生,见后期的细方解石-黄铁矿脉穿插。

Ⅱ-2a 阶段:浸染状辉钼矿石,分布在钙铁榴石矽卡岩中,辉钼矿与方解石共生(图 3c),显微镜下观察辉钼矿与黄铁矿共生(图 4a)。

Ⅱ-2b 阶段:矿物组成主要为团块状黄铜矿,黄铜矿与方解石、石英共生(图 3d)。显微镜下观察黄铜矿有两种结构关系。黄铜矿交代早期自形的黄铁矿(图 4b);黄铜矿与黄铁矿

表 1 胡村矿床矿物共生组合及生成顺序表

Table 1 Mineral paragenesis and generating sequence of the Hucun copper deposit

成矿期 矿化/矿物	矽卡岩期		主成矿期				碳酸盐期
	I-1阶段	I-2阶段	Ⅱ-1阶段	Ⅱ-2a阶段	Ⅱ-2b阶段	Ⅱ-2c阶段	Ⅲ阶段
钙铁榴石矽卡岩							
钙铝榴石矽卡岩							
透辉石							
绿帘石							
绿泥石							
磷灰石							
黄铁矿							
黄铜矿							
磁铁矿							
辉钼矿							
石英							
方解石							
闪锌矿							

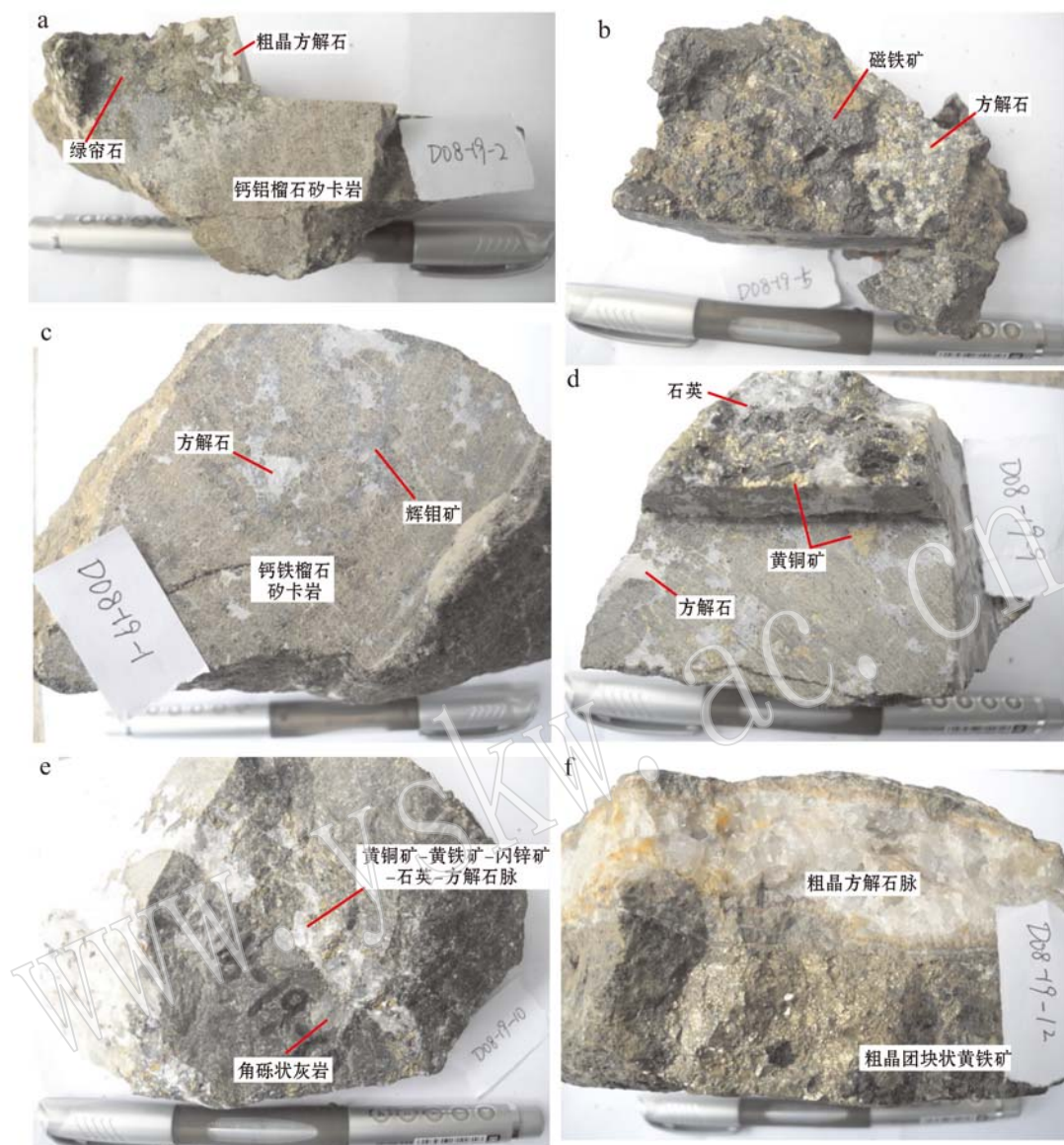


图 3 胡村铜矿床各阶段的蚀变矿化照片

Fig. 3 Photographs showing alteration and mineralization in the Hucun copper deposit

a—I-2 阶段, 绿帘石钙铝榴石矽卡岩; b—II-1 阶段, 团块状磁铁矿矿石; c—II-2a 阶段, 辉钼矿化钙铁榴石矽卡岩, 浸染状辉钼矿与方解石共生; d—II-2b 阶段, 团块状黄铜矿矿石, 黄铜矿、方解石、石英共生; e—II-2c 阶段, 脉状黄铜矿矿石, 黄铜矿-黄铁矿-闪锌矿-石英-方解石共生; f—III 阶段, 碳酸盐中黄铁矿-方解石脉, 粗晶黄铁矿分布在粗晶方解石边缘

a—epidotized grossular skarn (Stage I-2); b—massive magnetite ore (Stage II-1); c—molybdenitized andradite skarn, disseminated molybdenite and calcite intergrowth (Stage II-2a); d—massive chalcopyrite ore, chalcopyrite, calcite, quartz intergrowth (Stage II-2b); e—veined chalcopyrite ore, chalcopyrite-pyrite-sphalerite-quartz-calcite intergrowth (Stage II-2c); f—pyrite and calcite veins in carbonate, coarse-grained pyrite distributed at the edge of the coarse-grained calcite (Stage III)

共生(图 4c)。II-2c 阶段: 矿石呈脉状分布, 主要有黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方解石、石英(图 3e)。显微镜下观察黄铁矿和闪锌矿共同交代自形的黄铜矿(图 4d)。

碳酸盐期(III): 碳酸盐中发育粗晶黄铁矿-方解石脉(图 3f)。自形的黄铁矿、方解石表明该阶段矿物发育在张性的环境中。

2 样品采集及测试方法

2.1 样品采集

本次研究的样品均采自胡村铜矿床坑道, 对矿床内的矽卡岩, 绿帘石化矽卡岩, 硫化物矿石和碳酸岩脉进行样品采集和记录, 共获得样品数 13 件, 将

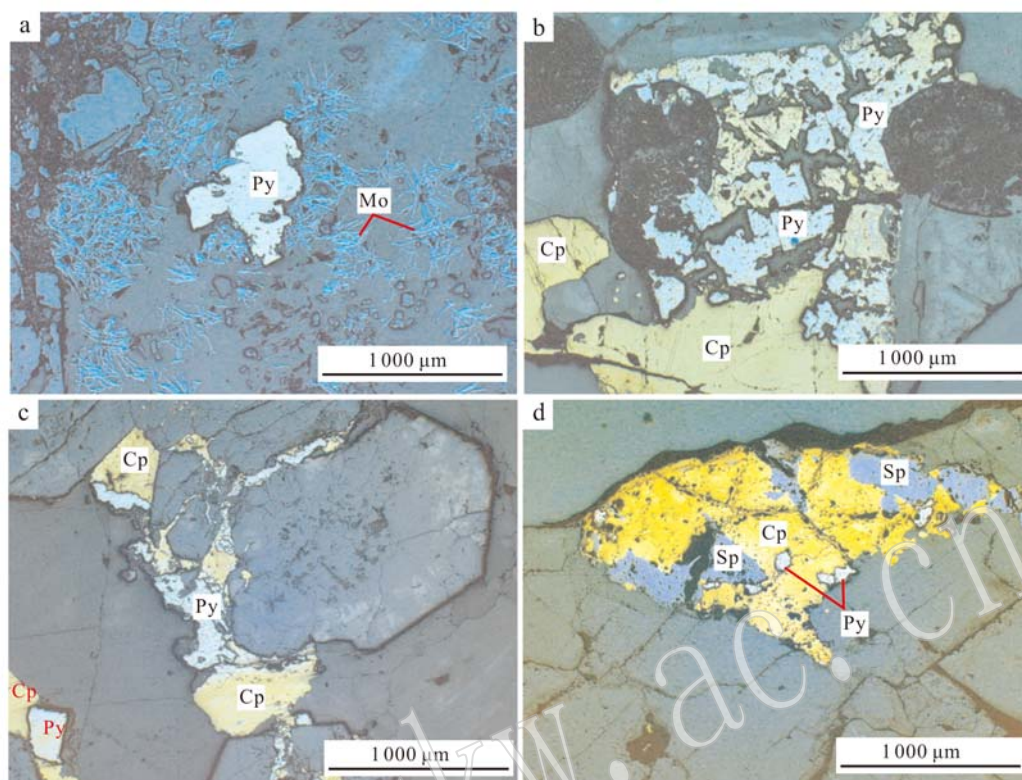


图4 硫化物阶段金属矿物结构、共生关系显微照片(反射光)

Fig. 4 Metal mineral structure, association relationship photomicrograph at the sulfide stage (Stage II-2) (reflected light)
a—II-2a 阶段黄铁矿与针状辉钼矿共生; b—II-2b 阶段黄铜矿交代早期自形的黄铁矿; c—II-2b 阶段黄铁矿与黄铜矿共生; d—II-2c 阶段黄铁矿与闪锌矿共同交代黄铜矿; Py—黄铁矿; Cp—黄铜矿; Mo—辉钼矿

a—pyrite and acicular molybdenite intergrowth (Stage II-2a); b—chalcopyrite at Stage II-2b replacing early euhedral pyrite; c—pyrite and chalcopyrite intergrowth (Stage II-2b); d—pyrite and sphalerite together in Stage II-2c replacing chalcopyrite; Py—pyrite; Cp—chalcopyrite; Mo—molybdenite

样品磨制成厚度约为 0.2 mm, 双面抛光的薄片做矿相学和流体包裹体观察, 其中制备的包裹体片 10 片, 选取具代表性的样品 9 件样品进行包裹体显微测温 and 激光拉曼探针分析。同时, 采集了胡村铜矿床中方解石单矿物样品 6 件进行 H-O 同位素分析。

2.2 测试方法

2.2.1 流体包裹体激光拉曼分析

为了解流体包裹体的成分特征, 在中国地质科学院矿产资源研究所成矿流体实验室进行了激光拉曼探针(LRM)分析, 测试仪器为英国 Renishaw-2000 型显微共焦激光拉曼光谱仪, 激光功率 20 mW, 激发波长 514 nm, 激光最小束斑 1 μm; 光谱范围: 100~4 000 cm⁻¹, 可连续扫描; 光谱分辨率为 1~2 cm⁻¹; 空间分辨率: 50 倍镜头下, 横向分辨率小于 1 μm, 纵向小于 2 μm; 光谱重复性 ±0.2 μm。对胡村铜矿床各阶段石英、石榴石、方解石、磷灰石中 I 型、II 型、III 型共 80 多个包裹体均进行了详细的拉曼探针研究。

2.2.2 流体包裹体测温

包裹体显微测温在中国地质科学院矿产资源研究所实验室完成, 测试仪器为 Linkam THMSG 600 型显微冷热台, 温度范围 -196~+600℃, ≤30℃ 时相变点的测试精度为 ±0.1℃, >30℃ 时为 ±1℃; 部分石榴石中高温包裹体采用 TS1500 型高温热台, 温度范围 0~1 500℃, 相变点的测试精度 ±1℃。测试升温速率一般为 1~5℃/min; 水溶液包裹体在其冰点和均一温度附近的升温速率为 0.2~0.5℃/min。对于 I、II、III 型均一温度 <600℃ 的包裹体盐度、密度和均一压力估算采用 NaCl-H₂O 体系, 由 FLINCOR 软件(Brown, 1989; Brown and Lamb, 1989)计算得到; 温度 >600℃ 的 II 型包裹体盐度、密度采用 NaCl-H₂O 体系由刘斌等(1999)编写的《流体包裹体热力学》中公式计算得到。

2.2.3 氢、氧同位素地球化学分析

样品的氢、氧同位素分析由中国地质科学院测试中心同位素实验室完成。流体包裹体氢同位素用

爆裂法取水, 锌法制氢; 氧同位素用 Br 法。氢、氧同位素采用 MAT 251EM 质谱计测定, 氢、氧同位素采用的国际标准为 SMOW。氧同位素分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$, 氢同位素分析精度为 $\pm 2\text{‰}$ 。根据方解石中流体包裹体的均一温度和矿物-水氧同位素方程, 计算出流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值。样品 HC-10-2 温度取自 II-2a 阶段中包裹体均一温度的平均值 (230°C), 样品 HC-10-4 温度取自 II-2b 阶段中包裹体均一温度的平均值 (226°C), 样品 HC-10-3 和样品 HC-10-1 温度取自 II-2c 阶段中包裹体均一温度的平均值 (222°C), 样品 HC-10-18 温度取自 II-2b 阶段中包裹体均一温度的平均值 (196°C)。方解石与水的氧同位素平衡公式采用 $1000 \ln \alpha = 3.38 \times 10^6 / t^2 - 3.4$ (Clayton *et al.*, 1972), 其中 α 为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ 值 (‰), t 为温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

3 流体包裹体岩相学

根据 Roedder (1984) 对包裹体成因判别, 所测的大部分包裹体均为原生包裹体, 综观石榴石、磷灰石、绿帘石、石英和方解石中流体包裹体, 根据室温下的相组成和加热时的相变特征, 可划分为 3 个大

的类型: 即气-液包裹体 (I 型)、多相包裹体 (II 型)、富气相包裹体 (III 型)。

I 型: 分布在石榴石、石英、绿帘石和方解石中, 富液相水溶液包裹体 (L+G) (图 5b、c、e、f)。包裹体气相百分比范围以在 10%~30% 之间为主, 少数在 30%~50% 之间。在 I-III 阶段的矿物中均发育, 个体较小, 包裹体一般在 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 之间。形态多样, 以负晶形和椭圆形为主, 多成群分布。

II 型: 分布在石榴石中, 含子矿物包裹体 (L+G+S) (图 5a)。子矿物有石盐和方解石, 除根据结晶形态、光性以及加热溶解特性可在镜下识别常见的石盐, 石盐一般颗粒较大, 呈立方体状; 对于其它透明矿物拉曼探针分析鉴定出为方解石。此类包裹体仅见于 I-1 阶段石榴石中, 个体较大, 包裹体一般在 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 之间。形态以椭圆形为主, 多孤立分布。

III 型: 分布在方解石中, 数量较少。富气相水溶液包裹体 (G+L) (图 5d)。包裹体气相百分比范围以在 55%~90% 之间。仅在 I-2 阶段方解石中见少量分布, 个体变化较小, 一般在 $5\sim 13\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 以负晶为主。多孤立分布。

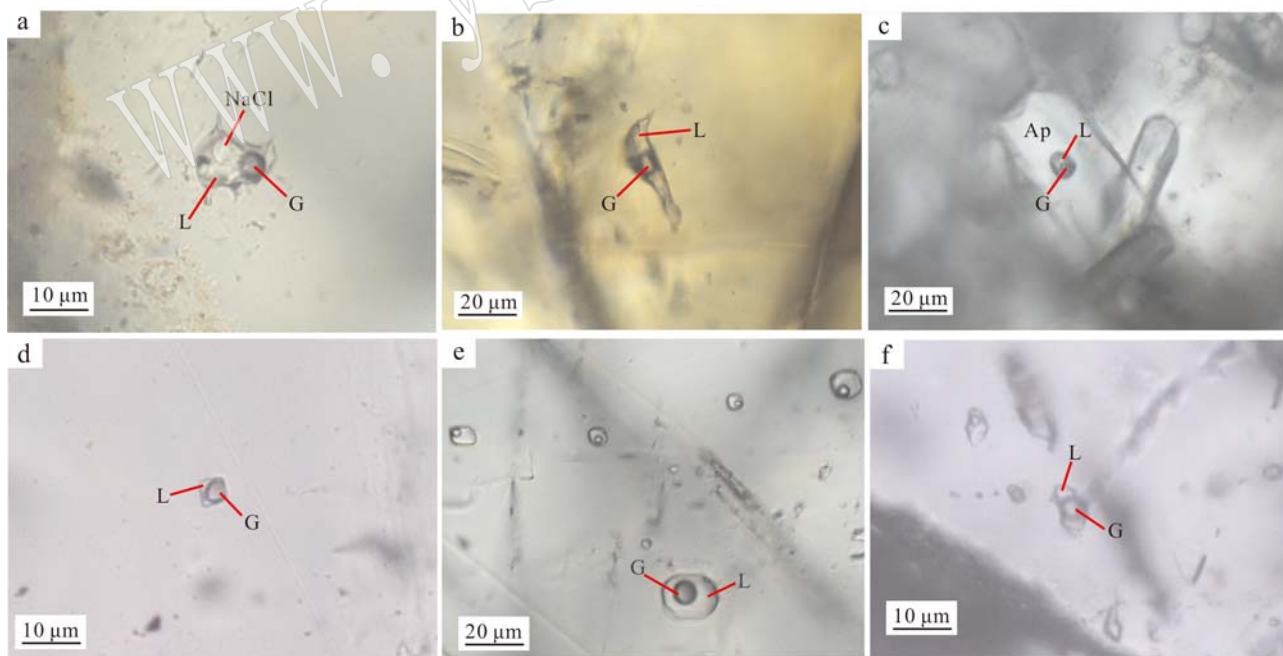


图 5 胡村铜矿床不同类型包裹体显微照片

Fig. 5 Photomicrographs showing modes of occurrence of fluid inclusions in the Hucun copper deposit

a—钙铝石榴石中 II 型包裹体, I-1 阶段; b—钙铁石榴石中 I 型包裹体, I-1 阶段; c—磷灰石包体中 I 型包裹体, I-2 阶段; d—方解石中 III 型包裹体, I-2 阶段; e—方解石中 I 型包裹体群, II-2b 阶段; f—石英中 I 型包裹体, III 阶段; G—气相; L—液相; NaCl—石盐; Ap—磷灰石

a—fluid inclusions of Type II in grossular, Stage I-1; b—fluid inclusions of Type I in andradite, Stage I-1; c—fluid inclusions of Type I in apatite, Stage I-2; d—fluid inclusions of Type III in calcite, Stage I-2; e—fluid inclusions group of Type I in calcite, Stage II-2b; f—fluid inclusions of Type I in quartz, Stage III; G—gas; L—liquid; NaCl—halite; Ap—apatite

4 测试结果

4.1 激光拉曼分析结果

拉曼探针分析结果显示(图 6a~6h),胡村铜矿床 3 个阶段中钙铁榴石、钙铝榴石、磷灰石、方解石、石英中的 I、Ⅲ型包裹体成分为简单的盐-水体系,气相中除水外,未检测到其它气体;Ⅰ-1 阶段中钙铁榴石、钙铝榴石中的Ⅱ型包裹体子矿物为常见的镜下易识别的石盐,拉曼鉴定出个别包裹体中含方解石子矿物(图 6c)。

4.2 流体包裹体测温结果

Ⅰ期:综合该阶段钙铁榴石、钙铝榴石、磷灰石、绿帘石、方解石、石英中包裹体测温结果(表 2,图 7 中 a-1,a-2),流体包裹体总体均一温度范围为 290~631℃;盐度范围为 $[\text{NaCl}_{\text{eq}}]$ 质量分数,下同 $10.2\% \sim 20.1\%$ 和 $44\% \sim 50.1\%$;密度范围为 $0.51 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$;含子晶包裹体均一压力为 $108.7 \sim 138.2 \text{ MPa}$ 。

其中Ⅰ-1 阶段钙铁榴石和钙铝榴石中Ⅰ类包裹体均一温度范围在 $543 \sim 582^\circ\text{C}$ 之间,Ⅱ类包裹体均一温度范围为 $608 \sim 631^\circ\text{C}$,其中子晶消失温度为 $395 \sim 424^\circ\text{C}$,以 NaCl 子晶先消失,气泡后消失为特征,其众值范围在 $550 \sim 590^\circ\text{C}$ 之间(图 7a-1);盐度范围为 $14.8\% \sim 20.1\%$ 和 $44\% \sim 50.1\%$,众值范围在 $46\% \sim 48\%$ 之间(图 7a-2)。该阶段流体包裹体主体以高温、高盐度为特征。Ⅰ-2 阶段流体包裹体均一温度范围在 $290 \sim 420^\circ\text{C}$ 之间,众值范围在 $350 \sim 370^\circ\text{C}$ 之间(图 7a-1);盐度范围为 $10.2\% \sim 17.4\%$,众值范围在 $14\% \sim 16\%$ 之间(图 7a-2)。该阶段流体包裹体主体以中高温、中高等盐度为特征。

Ⅱ期:综合该阶段石英和方解石中包裹体测温结果(表 2,图 7 中 b-1,b-2),该阶段流体包裹体总体均一温度范围为 $172 \sim 298^\circ\text{C}$,盐度范围为 $5.9\% \sim 16.9\%$;密度范围为 $0.81 \sim 0.99 \text{ g/cm}^3$;均一压力 $0.7 \sim 7.9 \text{ MPa}$ 。

其中Ⅱ-2a 阶段流体包裹体均一温度范围在 $192 \sim 296^\circ\text{C}$ 之间,众值范围在 $210 \sim 230^\circ\text{C}$ 之间(图 7b-1);盐度范围为 $5.9\% \sim 14.9\%$,众值范围在 $10\% \sim 12\%$ 之间(图 7b-2)。该阶段流体包裹体主体以中低温、低-中等盐度为特征。Ⅱ-2b 阶段流体包裹体均一温度范围在 $204 \sim 273^\circ\text{C}$ 之间,众值范围在 $210 \sim 230^\circ\text{C}$ 之间(图 7b-1);盐度范围为 $9.1\% \sim 13.1\%$,众

值范围在 $10\% \sim 12\%$ 之间(图 7b-2)。该阶段流体包裹体主体以中低温、中等盐度为特征。Ⅱ-2c 阶段流体包裹体均一温度范围在 $172 \sim 298^\circ\text{C}$ 之间,众值范围在 $210 \sim 230^\circ\text{C}$ 之间(图 7b-1);盐度范围为 $6.4\% \sim 13.5\%$,众值范围在 $10\% \sim 12\%$ 之间(图 7b-2)。该阶段流体包裹体主体以中低温、低-中等盐度为特征。Ⅱ-2a 阶段到Ⅱ-2c 阶段流体均一温度、盐度变化范围基本一致,表明Ⅱ-2a 阶段辉钼矿矿石、Ⅱ-2b 阶段团块状黄铜矿、Ⅱ-2c 阶段脉状黄铜矿在相同的温度条件下形成。

Ⅲ期:综合该阶段石英、方解石中包裹体测温结果(表 2,图 7 中 c-1,c-2),该阶段流体包裹体均一温度范围为 $158 \sim 247^\circ\text{C}$,众值范围在 $170 \sim 190^\circ\text{C}$ (图 7c-1);盐度范围为 $1.7\% \sim 6.2\%$,众值范围在 $2\% \sim 4\%$ 之间(图 7c-2);密度范围 $0.85 \sim 0.93 \text{ g/cm}^3$;均一压力范围 $0.5 \sim 3.4 \text{ MPa}$ 。表现为低温、低盐度的特征。

4.3 氢、氧同位素地球化学分析结果

由表 3 和图 8 可知, δD 值变化范围在 $-77.15\text{‰} \sim -42\text{‰}$ 之间,其中矽卡岩阶段(Ⅰ-1 阶段)的石榴石 $\delta\text{D}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值为 -77.15‰ ;硫化物阶段(Ⅱ-2 阶段)方解石的 $\delta\text{D}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值变化范围在 $-74\text{‰} \sim -69\text{‰}$ 之间;碳酸盐阶段(Ⅲ阶段)方解石的 $\delta\text{D}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值为 -42‰ 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}\text{‰}(\text{SMOW})$ 值变化范围在 $-0.5\text{‰} \sim +6.97\text{‰}$ 之间,其中矽卡岩阶段(Ⅰ-1 阶段)的石榴石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值为 $+6.97\text{‰}$;硫化物阶段(Ⅱ-2 阶段)方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值变化范围为 $-0.5\text{‰} \sim +2.7\text{‰}$;碳酸盐阶段(Ⅲ阶段)方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值为 $+0.24\text{‰}$ 。从图 8 中清楚看出,矽卡岩阶段(Ⅰ-1 阶段)H-O 同位素组成位于正常岩浆水(Taylor, 1974)范围内,硫化物阶段(Ⅱ-2 阶段)H-O 同位素组成显示出岩浆水与大气降水混合热液流体特征,碳酸盐阶段(Ⅲ阶段)H-O 同位素组成以大气降水混合较多的热液。

5 讨论

5.1 成矿流体来源

胡村铜矿床中各阶段矿物的氢、氧同位素资料提供了成矿流体来源及其演化的重要信息。矽卡岩阶段(Ⅰ-1 阶段)石榴石样品的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值为 $+6.97\text{‰}$ 左右,基本位于正常岩浆水(Taylor, 1974)(图8)范围内; $\delta\text{D}_{\text{水}}/\text{SMOW}$ 值为 -77.15‰ 左右,位

表 2 胡村铜矿床流体包裹体显微测温结果
Table 2 Microthermometric data of fluid inclusions from the Hucun copper deposit

成矿期	成矿阶段	主矿物	包裹体类型	个数	冰点/℃	均一温度/℃	NaCl溶解 温度/℃	盐度范围/%	密度/g·cm ⁻³	均一压力/MPa
I 期	I-1阶段	钙铁榴石	I	7	-10.8~-16.8	543~582		14.8~20.1	0.51~0.65	87.1~112.1
			II	3		608~631	395~424	46.9~50.1	1.09~1.1	131.2~138.2
		钙铝榴石	I	1	-13.2	567		17.1	0.58	103.9
			II	7		577~611	367~404	44~47	1.08~1.09	108.7~137.6
	I-2阶段	石英	I	15	-6.8~-11.1	310~401		10.2~15.1	0.68~0.86	9.4~27.4
			I	21	-6.9~-13.6	292~417		10.4~17.4	0.61~0.87	7.2~32
		方解石	III	4	-6.8~-7.8	383~420		10.2~11.5	0.62~0.69	22.8~32.9
			I	13	-8.4~-11.1	290~405		12.2~15.1	0.7~0.89	7~28.5
	II-2a 阶段	方解石	I	19	-3.7~-13	197~296		5.9~16.9	0.81~0.95	1.2~7.7
			I	6	-7.6~-11	192~216		11.2~14.9	0.94~0.98	1.1~1.8
II 期	II-2b 阶段	方解石	I	12	-5.9~-9.2	204~273		9.1~13.1	0.86~0.95	1.4~5.4
			I	15	-4~-9.6	172~298		6.4~13.5	0.83~0.99	0.7~7.9
	III 阶段	石英	I	7	-2.2~-3.9	173~247		3.6~6.2	0.86~0.93	0.7~3.4
			I	6	-1~-2.9	158~231		1.7~4.7	0.85~0.93	0.5~2.5

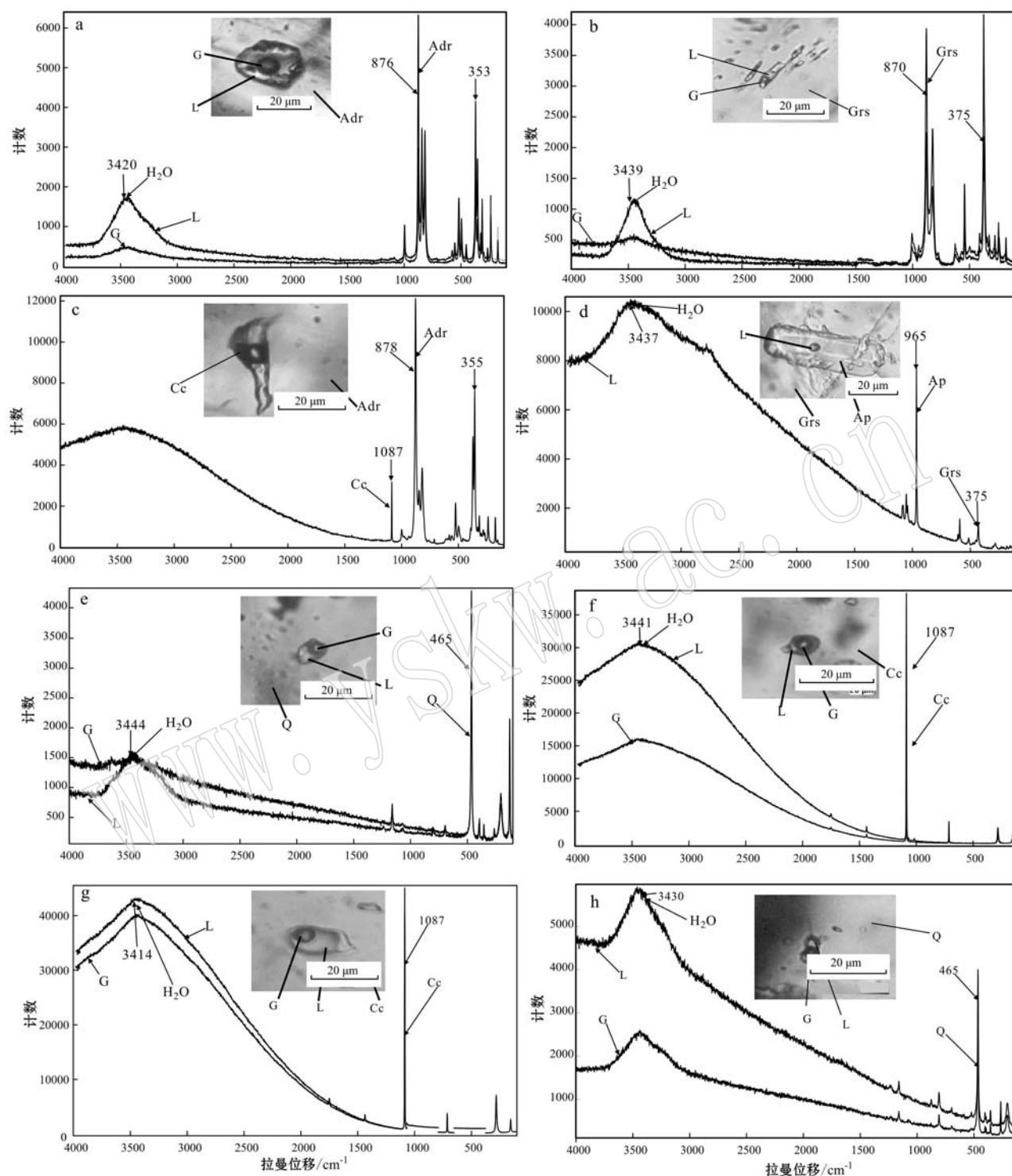


图6 胡村铜矿床流体包裹体激光拉曼分析

Fig. 6 Raman probe analyses of fluid inclusions from the Hucun copper deposit

a—I-1阶段钙铁榴石中包裹体气相、液相成分均为水；b—I-1阶段钙铝榴石中包裹体气相、液相成分均为水；c—I-1阶段钙铁榴石中包裹体含方解石矿物；d—I-2阶段钙铝榴石中磷灰石包体中包裹体液相成分均为水；e—II-2a阶段石英中包裹体气相、液相均为水；f—II-2b阶段方解石中包裹体气相、液相均为水；g—II-2c阶段方解石中包裹体气相、液相均为水；h—III阶段石英中包裹体气相、液相均为水；

Adr—钙铁榴石；Grs—钙铝榴石；Ap—磷灰石；Cc—方解石；Q—石英；G—气相；L—液相

a—fluid inclusions of gas, liquid being water in andradite at Stage I-1; b—fluid inclusions of gas, liquid being water in grossular at Stage I-1; c—calcite daughter mineral inclusions in andradite at Stage I-1; d—fluid inclusions of gas and liquid (completely water) in apatite at Stage I-2; e—fluid inclusions of gas and liquid (completely water) in quartz at Stage II-2a; f—fluid inclusions of gas and liquid (completely water) in calcite at Stage II-2b; g—fluid inclusions of gas and liquid (completely water) in calcite at Stage II-2c; h—fluid inclusions of gas and liquid (completely water) in quartz at stage III; Adr—andradite; Grs—grossular; Ap—apatite; Cc—calcite; Q—quartz; G—gas; L—liquid

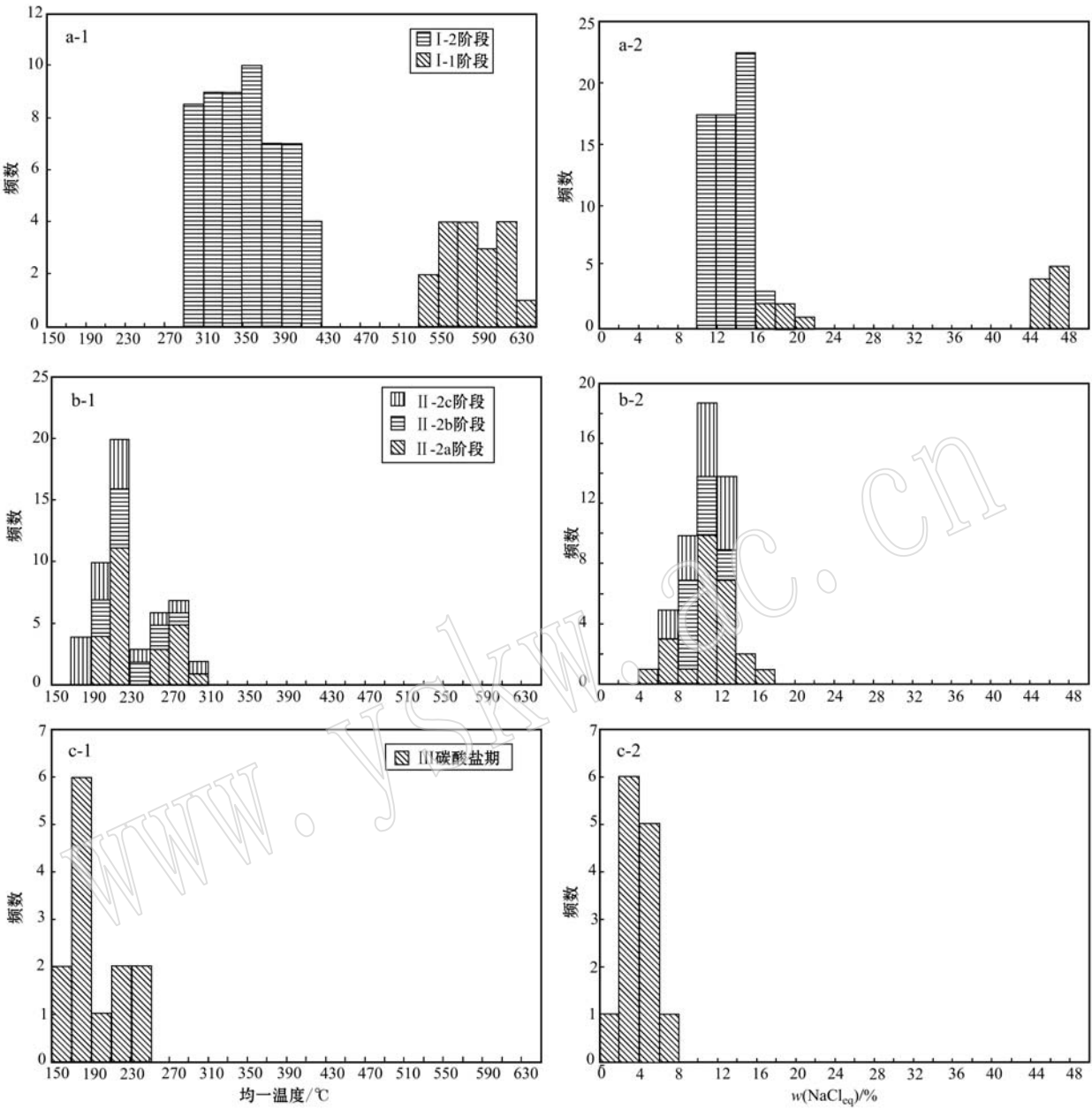


图 7 流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 7 Histogram of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions

表 3 胡村铜矿床氢-氧同位素组成

Table 3 Hydrogen-oxygen isotopic compositions of the Hucun skarn-type copper deposit

样号	成矿阶段	样品描述	测定矿物	温度/℃	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$ (SMOW)/‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$ (SMOW)/‰	$\delta\text{D}_{\text{水}}$ (SMOW)/‰	资料来源
HC-10-18	Ⅲ	含黄铁矿方解石	方解石	196	12.6	0.9	-42	本文
HC-10-2	Ⅱ-2	含黄铜矿、黄铁矿方解石	方解石	230	2.7	3.26	-70	本文
HC-10-4	Ⅱ-2	含黄铜矿、黄铁矿方解石	方解石	226	12.1	2.66	-74	本文
HC-10-3	Ⅱ-2	含黄铜矿、黄铁矿方解石	方解石	222	10	0.56	-74	本文
HC-10-1	Ⅱ-2	含黄铜矿、黄铁矿方解石	方解石	222	13.2	3.76	-69	本文
HC-01-1	I-1	不含矿矽卡岩	石榴石	-	16.3	6.97	-77.15	房海波, 2009

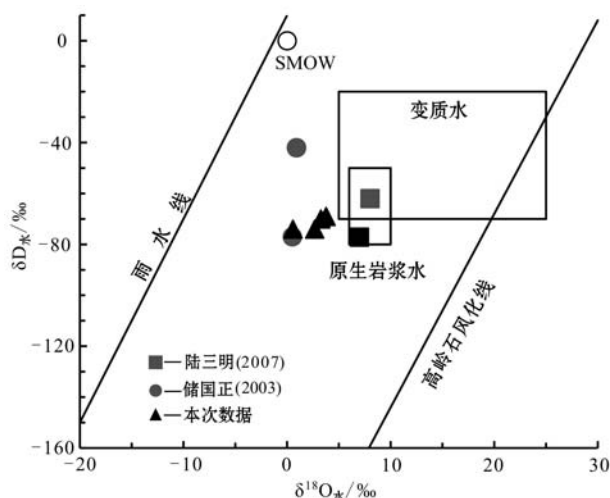


图8 胡村铜矿床成矿流体氢-氧同位素图解
(底图据 Taylor, 1974)

Fig. 8 Diagram of hydrogen-oxygen isotopic compositions of ore-forming fluid in the Hucun copper deposit (after Taylor, 1974)

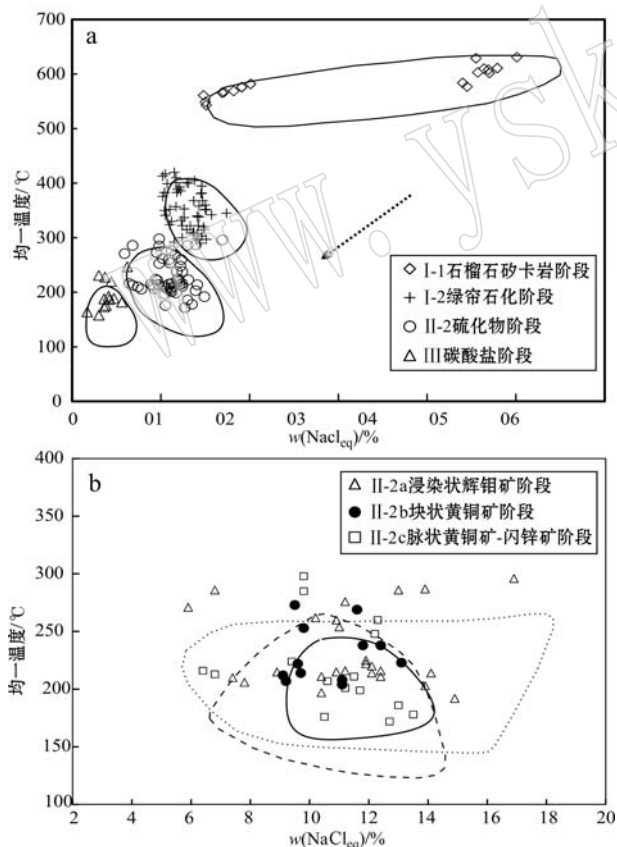


图9 胡村铜矿床流体包裹体盐度-均一温度关系图

Fig. 9 Homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions from the Hucun copper deposit

于正常岩浆水(Suzuoki and Epstein, 1976)范围内。表明胡村铜矿床的成矿流体来自于岩浆水。硫化物

阶段(Ⅱ-2 阶段)成矿流体的 $\delta D_{\text{H}}/\text{SMOW}$ 值 ($-74\text{‰} \sim -69\text{‰}$) 仍具岩浆水特征, 但 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}}/\text{SMOW}$ 值 ($-0.5\text{‰} \sim +2.7\text{‰}$) 低于岩浆水特征值 ($+6\text{‰} \sim +9\text{‰}$, Taylor, 1974), 显示出“ $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}}$ 漂移”的大气降水混合热液流体特征, 表明此阶段的成矿流体为岩浆水与大气降水的混合热液。Pan 等(1999)统计了鄂东、九瑞和铜陵矿集区的流体包裹体的氢-氧同位素数据, 划分出了早期矽卡岩阶段、石英硫化物阶段和晚期石英-方解石脉阶段的流体 H-O 同位素演化特征。本文研究结果与其相似, 表明了长江中下游地区矽卡岩型矿床 H-O 同位素有类似的演化过程。

对于矽卡岩、斑岩铜矿, 高温 ($>400^{\circ}\text{C}$)、高盐度 ($>30\%$) 流体一般认为来源于岩浆热液 (Diamond *et al.*, 1990; Heinrich *et al.*, 1992), 胡村铜矿床石榴石中的高温 ($577 \sim 631^{\circ}\text{C}$)、高盐度 ($44\% \sim 50.1\%$) 流体包裹体暗示了早期矽卡岩阶段(Ⅰ-1 阶段)流体来源于岩浆热液。

5.2 流体性质及演化特征

在图 9a 中清楚看出, 胡村铜矿床成矿流体呈现连续的演化序列。从Ⅰ-1 石榴石矽卡岩阶段到Ⅲ 碳酸盐阶段, 流体温度由高温演变到低温, 盐度由高盐度演变为低盐度。

Ⅰ 期: Ⅰ-1 矽卡岩化阶段包裹体类型为Ⅰ型和Ⅱ型, 其中Ⅱ型包裹体中子矿物有石盐、方解石, 表明成矿流体中富含 Na、Ca 等元素, 流体体系可能为 $\text{NaCl} + \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ 体系。该阶段流体包裹体以高温 (主体在 $550 \sim 590^{\circ}\text{C}$ 之间, 众值范围), 高盐度 (主体在 $46\% \sim 48\%$, 众值范围) 为特征 (图 7a-1, a-2, 图 9a)。芮宗瑶等(2003)认为钙矽卡岩是在高温气液参与下, 由碳酸盐和部分铝硅酸围岩与花岗岩岩浆 (侵入岩和火山岩) 相互反应的产物。从而表明该矿床是一个高温接触交代的起源矽卡岩型矿床。在矽卡岩退变质过程中, 随着水岩作用的不段进行, 绿帘石、绿帘石化蚀变发育, 形成大量含水矽卡岩矿物。Ⅰ-2 绿帘石化阶段包裹体类型为Ⅰ型和Ⅲ型, 流体体系演化成简单的盐水体系。该阶段流体包裹体以中高温 (主体在 $350 \sim 370^{\circ}\text{C}$ 之间, 众值范围), 中高盐度 (主体在 $14\% \sim 16\%$, 众值范围) 为特征 (图 7a-1, a-2, 图 9a)。该阶段见少量的黄铜矿、黄铁矿与方解石共生, 表明黄铜矿在 $350 \sim 370^{\circ}\text{C}$ 左右开始沉淀, 李进文等(2007)对胡村铜矿床进行水岩反应实验得出成矿流体中的 Cu 可能主要是在超临界态流体中迁

移,而在低于临界态条件下从流体中析出(370℃)。

Ⅱ期:Ⅱ-2a、Ⅱ-2b、Ⅱ-2c阶段中包裹体类型均为Ⅰ型,拉曼鉴定包裹体的气相、液相成分均为水(图6e、f、g),流体体系为NaCl+H₂O体系。测温结果显示该阶段流体主体以中温(210~230℃,众值范围)(图7b-1,图9b),中等盐度10%~12%,众值范围(图7b-2,图9b)为特征。在高温高压下主要呈Fe²⁺迁移,铜主要以CuCl₂⁻和CuCl⁰形式迁移,伴随着绿帘石化、绿泥石化,流体中除进一步富集了以络合物形式进入的成矿元素外还带进了硫等部分载体元素,流体体系随着温度的快速降低最终导致流体内金属络合物分解和硫化物溶解度的降低,将促进金属配合物的不稳定。Reed等(1985)研究认为体系的化学平衡被打破,铁、铜从流体中分离出来,导致金属氧化物(磁铁矿),硫化物(黄铜矿,黄铁矿)和自然金沉淀。胡村矿床形成了以方解石-黄铜矿脉为主的矽卡岩型铜矿床。

Ⅲ期:包裹体类型为Ⅰ型,拉曼鉴定包裹体中气相和液相成分均为盐水溶液(图6h)。芮宗瑶等(2003)认为岩浆水与大气降水的混合,温度快速降低,成矿物质迁移中止。包裹体测温结果显示该阶段流体以低温(170~190℃,众值范围)(图7c-1,图9a),低盐度(2%~4%,众值范围)(图7c-2,图9a)为特征。碳酸盐中见粗晶黄铁矿-方解石脉,表明成矿后期构造处于为张性的伸展环境。此种构造环境下,有利于大气降水向下渗透与热液混合,从图8中可以看出该阶段为大气降水混合较多的热液体系,不利于矿质沉淀。

5.3 矿质沉淀机制

前人对大量的斑岩、矽卡岩型矿床进行了成矿流体地球化学研究,结果表明成矿流体的沸腾被认为是许多热液矿床金属沉淀富集的重要机制(Rodder, 1984; Diamond, 2002; Calagari, 2004; 卢焕章等, 2004; Pokrovski *et al.*, 2008)。如铜陵地区朝山、冬瓜山、凤凰山、狮子山矿床主成矿阶段都发生了流体沸腾作用。笔者对铜陵矿集区内主要的矽卡岩热液矿床进行了成矿流体地球化学对比研究(表4),发现胡村铜矿床成矿机制与其它矿床有着明显的不同。从表4中矿床包裹体特征对比可以看出:朝山、冬瓜山、凤凰山、狮子山包裹体类型较复杂,有富液相、富气相、富二氧化碳和含子晶包裹体,包裹体成分有CO₂、CH₄、N₂、H₂O等,温度、盐度具中到高温、中到高等盐度的特征;而胡村矿床主成矿阶段包裹体类型仅为富液相,包裹体成分为H₂O,温度、盐度为中低温、中低盐度。通过上述对比研究,可以看出朝山、冬瓜山、凤凰山、狮子山矿床主成矿阶段流体沸腾作用导致包裹体相分离,沸腾作用的发生引起一系列的化学变化,打破了原有的流体平衡体系,导致气相H₂O以及H₂S、CO₂、HCl等酸性组分从原先均匀的流体相中不断逸出,络合物的稳定性降低而发生分解,最终导致金属硫化物(黄铜矿、黄铁矿)沉淀。而胡村矿床在石英-硫化物阶段包裹体类型仅为简单的Ⅰ型,未发现流体沸腾和不混溶现象。胡村矿床成矿流体与狮子山矿田其它矿床成矿流体存在区别的原因可能如下:

(1) 从野外调查来看,本次样品位于矿区浅部坑

表4 铜陵矿集区内典型矿床包裹体特征对比研究

Table 4 Comparison of inclusion characteristics between the typical ore deposits in the Tongling ore concentration area

矿床名称	矿床类型	矿种	成矿阶段包裹体类型	均一温度/℃	盐度/%	拉曼鉴定包裹体成分	成矿机制	资料来源
朝山	热液交代	金、铜	富液相、富气相、含子晶包裹体	富气相:260~360; 富液相:126~361; 含子晶:220~347	富气相:7.31~22.98; 富液相:15.57~22.91; 含子晶:28.43~42.59	CO ₂ 、CH ₄ 、H ₂ O	沸腾	杨小男等,2008
冬瓜山	矽卡岩	铜、铁	富液相、富二氧化碳、含子晶包裹体	富液相:141~278; 富二氧化碳和含子晶:219~403	18~44.9	CO ₂ 、CH ₄ 、H ₂ O	沸腾	徐兆文等,2005 邱士东等,2007
凤凰山	矽卡岩	铜、铁	富液相、富气相、富二氧化碳包裹体	富液相:105~399; 富气相:399; 富二氧化碳:258	富液相:1.4~15.57; 富气相:13.9; 富二氧化碳:15.04	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ 、H ₂ O	降温 沸腾	瞿泓滢等,2011
狮子山	矽卡岩	铜、金	富液相、富气相、含子晶包裹体	337~439	3~30		沸腾	肖建新等,2002
胡村	矽卡岩	铜、金	富液相	172~298	5.9~16.9	H ₂ O	降温	本文

道,所采集的样品的结果主要反映出流体浅部的变化特征。浅部铜(金)矿体接触热变质和接触交代变质作用强烈,自岩体向围岩依次为矽卡岩化花岗闪长岩→内矽卡岩→块状矽卡岩→层状矽卡岩→大理岩或角岩(储国正,2003)。热液蚀变主要有硅化、绿泥石化、碳酸盐化、绿帘石化,其次为黄铁矿化、赤铁矿化、高岭土化,叠加在矽卡岩化和大理岩化之上。成矿流体在大气降水的混合下,其温度快速降低,盐度被稀释,因此,成矿流体中未见流体沸腾现象。另据郑泽军等(2015)研究结果来看,在矽卡岩石英-黄铜矿阶段流体包裹体类型主要为简单的 L-V 包裹体,其均一温度为 203~344℃,与本文研究结果相似。这种特征反映出胡村矿床浅部铜矿化以温度的快速降低,大气降水与成矿流体的混合导致铜矿沉淀。而深部铜钼矿床赋花岗岩闪长岩岩体中发育有云英岩化、硅化、钾长石化、黑云母化、绢云母化、绿帘石化等热液蚀变(徐晓春等,2014),矿体主要为斑岩型石英-辉钼矿和矽卡岩型石英-辉钼矿,本次未采集到此类样品。郑泽军等(2015)分析此类矿体包裹体均一温度为 227~398℃,成矿流体具沸腾特征。因此,本次实验结代表的胡村矿床浅部矿体成矿流体的特征。

(2) 李进文等(2007)对胡村矿床开展水-岩反应实验认为体系温度对元素从岩石中的溶解速率具有重要的控制作用。在中低温条件下,尤其是温度低于 100℃时,主要成矿元素 Cu 基本不发生从岩石中的溶出,即溶解速率很低;温度升高到 200℃时,仅有微弱的 Cu 从岩石中溶出;在中高温条件下,Cu 从岩石中的移出增高。这种特征表明 Cu 在高温下处于迁移状态,随着水-岩反应的进行,大气降水与成矿流体不断混合,成矿流体体系温度逐渐降低,Cu 的迁移逐渐中止富集成矿。从流体包裹体地球化学分析结果来看(图 9a),从 I 阶段到 III 阶段成矿流体温度和盐度均呈快速降低变化趋势,这种温度快速变化和成矿流体性质的变化可能是制约胡村矿床浅部矿体成矿物质沉淀的主要机制。

6 结论

(1) 岩相学研究显示胡村铜矿床各阶段矿包裹体可划分为富液相(I 型)、含子晶(II 型)、富气相(III 型)3 类;激光拉曼探针分析发现石榴石包裹体中含方解石矿物,表明在早期矽卡岩阶段(I-1 阶

段)流体富含钙元素。II-2 阶段和 III 阶段包裹体均为简单的盐水体系;

(2) H-O 同位素研究表明在早期矽卡岩阶段(I-1 阶段)成矿流体以岩浆水为主;硫化物阶段(II-2 阶段)成矿流体为岩浆水与大气降水的混合热液。碳酸盐阶段(III 阶段)以大气降水混合较多的热液;

(3) 矿床的成矿过程划分为 3 个阶段。其中矽卡岩阶段(I 阶段)划分为 2 个亚阶段,早期矽卡岩阶段(I-1 阶段)流体以高温(543~631℃),中-高盐度(14.8%~20.1%和 44%~50.1%)为特征;暗示早期矽卡岩阶段流体来自岩浆热液。绿帘石、绿泥石阶段(I-2 阶段)流体以中高温(290~420℃),中等盐度(10.2%~17.4%)为特征;主成矿期(氧化物、硫化物期)(II 阶段)可细分为两个亚阶段,氧化物阶段(II-1 阶段)和硫化物阶段(II-2 阶段)。硫化物阶段矿石类型有浸染状辉钼矿-方解石(II-2a 阶段)、块状黄铜矿-石英-方解石(II-2b 阶段)、脉状黄铜矿-黄铁矿-方解石(II-2c 阶段)。II-2 阶段成矿流体总体以中低温(172~298℃),低-中等盐度(5.9%~16.9%)为特征;碳酸盐期(III 期)流体以低温(158~247℃),低等盐度(1.7%~6.2%)为特征。流体包裹体岩相学特征和显微测温结果揭示出在硫化物阶段(II-2 阶段)温度的降低是导致矿质沉淀的主要因素。

References

- Brown P E. 1989. Flincor: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data[J]. *Am. Mineralogist*, 74: 1390~1393.
- Brown P E and Lamb W M. 1989. P-V-T properties of fluids in the system H₂O-CO₂-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 53: 1209~1221.
- Calagari A A. 2004. Fluid inclusion studies in quartz veinlets in the porphyry copper deposit at Sungun, East-Azarbaidjan, Iran[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 179~189.
- Chang Yinfo and Liu Xuegui. 1983. On stratabound skarn: example from some deposits of the Lower Yangtze River area in Anhui Province[J]. *Mineral Deposits*, 2(1): 11~20(in Chinese with English abstract).

- Chang Yinbo, Liu Xiangpei and Wu Yanchang. 1991. The Copper-iron Belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~379(in Chinese).
- Chu Guozheng. 2003. Metallogenic system and prospecting significance of Shizishan copper gold deposit, Tongling area[D]. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences, 1~89(in Chinese).
- Clayton R N, O'Neil J R and Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope fractionation in quartz and water[J]. *Geophys. Res.*, 77: 57~67.
- Diamond L W. 2002. Introduction to gas-bearing, aqueous fluid inclusions[A]. Samson I, Anderson A and Marshall D. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*[C]. Mineralogical Association of Canada Short Course Volumes, 32: 101~158.
- Diamond L W, Marshall D D, Jackman J A, *et al.* 1990. Elemental analysis of individual fluid inclusions in minerals by secondary ion mass spectrometry (SIMS): Application to cation ratios of fluid inclusions in an Archaean mesothermal gold-quartz vein[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 545~552.
- Fang Haibo. 2009. Characteristics and evolution of ore-forming fluid of copper deposits and gold deposits in Shizishan Ore Field, Tongling, Anhui Province[D]. Hefei University of Technology Master Dissertation, 1~85(in Chinese).
- Heinrich C A, Ryan C G, Mernagh T P, *et al.* 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: A fluid inclusion study using PIXE microanalysis[J]. *Economic Geology*, 87: 1 566~1 583.
- Li Jinwen, Pei Rongfu, Zhang Ronghua, *et al.* 2007. Experimental study on Kinetics of water-rock interaction of the Hucun skarn copper deposit in Tongling, Anhui Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 261~271(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin and Shen Kun. 1999. *Fluid Inclusion Thermodynamics*[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1~290(in Chinese).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. *Fluid inclusion*[M]. Beijing: Science Publishing House, 1~487(in Chinese).
- Lu Sanming. 2007. The magmatism and fluid mineralation in Shizishan Copper-gold ore-field of Tongling, Anhui Province[D]. Doctoral Dissertation of Hefei University of Technology, 1~158(in Chinese with English abstract).
- Lu Shunfu, Li Jinwei, Zeng Jiannian, *et al.* 2014. Geochemical characteristics and petrogenesis of intrusive rocks from Shizishan ore field, Tongling Region[J]. *Geological Science and Technology Information*, 33(5): 43~52(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Shao Yongjun, Xie Guiqing, *et al.* 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense district of Middle- Lower Yangtze Valley metallogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 109~119(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in south China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45~55(in Chinese with English abstract).
- Pan Yuanming and Dong Ping. 1999. The lower Changjiang (Yangzi/ Yangtze River) metallogenic belt, East Central China: Intrusion and wall rock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 15(4): 177~241.
- Pokrovski G S, Borisova A Y and Harrichoury J C. 2008. The effect of sulfur on vapor-liquid fractionation of metals in hydrothermal systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 266: 345~362.
- Qiu Shidong, Xie Yuling, Xu Jiuhua, *et al.* 2007. Characteristics and evolution of ore forming fluids associated with Yanshanian magmatic activity in Dongguashan copper deposit, Anhui Province, China [J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 205~212(in Chinese with English abstract).
- Qu Hongying, Pei Rongfu, Wang haolin, *et al.* 2011. Metallogenic fluid characteristic study of the Fenghuangshan Cu deposit at Tongling, Anhui Province[J]. *Geological Review*, 57(1): 50~62(in Chinese with English abstract).
- Reed M H and Spycher N F. 1985. Boiling, cooling and oxidation in epithermal systems: A numerical modeling approach[J]. *Reviews in Economic Geology*, 1: 249~272.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions[J]. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 1~645.
- Rui Zongyao, Zhao Yiming, Wang Longsheng, *et al.* 2003. Role of volatile components in Formation of skarn and porphyry deposits [J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 141~148(in Chinese).
- Suzuoki T and Epstein S. 1976. Hydrogen isotope fractionation between OH-bearing minerals and water[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 1 229~1 240.
- Tang Yongcheng, Wu Yanchang, Chu Guozheng, *et al.* 1998. *Geology of Copper Gold Polymetallic Deposits in the along-Changjiang Area of Anhui Province*[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 1~351(in Chinese).
- Taylor H P. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition[J]. *E-*

- conomic Geology, 69: 843~883.
- Wang Yanbin, Liu Danyi, Zeng Pusheng, *et al.* 2004. SHRIMP U-Pb geochronology of pyroxene diorite in the Chaoshan Gold deposit and its geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(4): 423~427(in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shuwen, Guo Heping, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intermediate-acid intrusive rocks from Shizishan, Tongling and the deep processes of magmatism[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(8): 1 801~1 812(in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, *et al.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of intrusive rocks from Tongling[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 15(4): 299~307(in Chinese with English abstract).
- Wu Yafei, Zeng Jiannian and Li Jinwei. 2013. Geochemical characteristics of trace elements in pyrite and their genetic significance of copper-molybdenum deposit in Hucun of Tongling, Anhui Province[J]. Acta Mineralogica Sinica (Suppl.), 620~621(in Chinese).
- Xiao Jianxin, Gu Lianxing and Ni Pei. 2002. Repeated boiling of fluid and its relationship with mineralization in Shi Zishan Cu-Au deposit, Anhui Province[J]. Science in China (Series D), 32(3): 200~206(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Lu Sanming, Xie Qiaoqin, *et al.* 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Dating for the Magmatic Rocks in Shizishan Ore-field of Tongling, Anhui Province, and Its Geological Implications[J]. Acta geological sinica, 82(4): 500~510(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Fan Ziliang, He Jun, *et al.* 2014. Metallogenic model for the copper-gold-polymetallic deposits in Shizishan ore-field, Tongling, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(4): 1 054~1 074(in Chinese).
- Xu Xiaochun, Lou Jinwei, Chen Linjie, *et al.* 2011. Geologic feature of Hucun Cu-Mo deposit in Shi Zishan orefield. Anhui Province. Bulletin of Mineralogy[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 30: 233~234(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhaowen, Huang Shunsheng, Ni Pei, *et al.* 2005. Characteristics and evolution of ore fluids in Dongguashan copper deposit, Anhui Province, China[J]. Geological Review, 51(1): 36~41.
- Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Xu Xisheng, *et al.* 2008. Zircon U-Pb geochronology and its implication for the temperature of Yanshanian Magma in Tongling, Anhui Province[J]. Acta Geological Sinica, 82(4): 511~516(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen and Lin Xinduo. 1992. Metallogenic Regularity of Iron Ore (gold) in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~233 (in Chinese).
- Zheng Zejun, Di Yangsong, Lu Yinghui, *et al.* 2015. Fluid mineralization process of Hucun Cu-Mo deposit, Tongling, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 34(4): 692~710(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1~379.
- 常印佛, 刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床: 以安徽省内下扬子坳陷中一些矿床为例[J]. 矿床地质, 2(1): 11~20.
- 储国正. 2003. 铜陵狮子山铜金矿田成矿系统及其找矿意义[D]. 中国地质大学博士论文, 1~89.
- 房海波. 2009. 安徽铜陵狮子山矿田铜矿床和金矿床的成矿流体特征及演化[D]. 合肥工业大学硕士学位论文, 1~85.
- 李进文, 裴荣富, 张荣华, 等. 2007. 安徽铜陵胡村矽卡岩型铜矿水-岩反应动力学实验研究[J]. 高校地质学报, 13(2): 261~271.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1~290.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 1~487.
- 陆三明. 2007. 安徽铜陵狮子山铜金矿田岩浆作用和流体成矿[D]. 博士学位论文. 合肥: 合肥工业大学, 1~158.
- 陆顺富, 李锦伟, 曾键年, 等. 2014. 铜陵地区狮子山矿田侵入岩地球化学特征及成岩机制探讨[J]. 地质科技情报, 33(5): 43~52.
- 毛景文, 邵拥军, 谢桂清, 等. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 28(2): 109~119.
- 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[J]. 地学前缘, 11(1): 45~55.
- 邱士东, 谢玉玲, 徐九华, 等. 2007. 安徽铜陵冬瓜山铜矿床成矿流体特征及演化[J]. 矿床地质, 26(2): 204~212.
- 瞿泓澄, 裴荣富, 王浩琳, 等. 2011. 安徽铜陵凤凰山铜矿床成矿流体特征研究[J]. 地质论评, 57(1): 50~62.
- 芮宗瑶, 赵一鸣, 王龙生, 等. 2003. 挥发份在矽卡岩型和斑岩型矿床形成中的作用[J]. 矿床地质, 22(1): 141~148.
- 唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1~351.
- 王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 2004. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的年代-朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 地球学报,

- 25(4): 423~427.
- 吴才来, 董树文, 国和平, 等. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程[J]. 岩石学报, 24(8): 1 801~1 812.
- 吴才来, 周 若, 黄许陈, 等. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 15(4): 299~307.
- 吴亚飞, 曾键年, 李锦伟. 2013. 安徽铜陵胡村铜钼矿床黄铁矿微量元素地球化学特征及其成因意义[J]. 矿物学报(增刊), 620~621.
- 肖建新, 顾连兴, 倪 培. 2002. 安徽铜陵狮子山铜-金矿床流体多次沸腾及其与成矿的关系[J]. 中国科学(D 辑), 32(3): 200~206.
- 徐晓春, 范子良, 何 俊, 等. 2014. 安徽铜陵狮子山矿田铜金多金属矿床的成矿模式[J]. 岩石学报, 30(4): 1 054~1 074.
- 徐晓春, 楼金伟, 陈林杰, 等. 2011. 安徽铜陵狮子山矿田胡村铜钼矿床的地质特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30: 233~234.
- 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 等. 2008. 铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义[J]. 地质学报, 82(4): 500~509.
- 徐兆文, 黄顺生, 倪 培, 等. 2005. 铜陵冬瓜山铜矿成矿流体特征和演化[J]. 地质论评, 51(1): 36~41.
- 杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 等. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 U-Pb 年龄意义[J]. 地质学报, 82(4): 511~516.
- 翟裕生, 姚书振, 林新多. 1992. 长江中下游铁矿成矿(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 1~233.
- 郑泽军, 杜杨松, 鲁颖淮, 等. 2015. 安徽铜陵胡村南铜钼矿床流体成矿过程[J]. 矿床地质, 34(4): 692~710.