

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.02.005

引用格式:魏国辉,杜玉雕,赵文广,等. 安徽庐枞盆地井边地区脉状铜矿成矿流体特征与成矿过程研究[J]. 华东地质, 2018, 39(2):116-125.

安徽庐枞盆地井边地区脉状铜矿 成矿流体特征与成矿过程研究

魏国辉,杜玉雕,赵文广,张赞赞

(安徽省地质调查院,合肥 230001)

摘要: 庐枞盆地是长江中下游成矿带重要的矿集区之一,盆地内发育众多脉状铜矿床(点)。文章以井边地区的张家店铜矿、井边铜矿、周洼铜矿和虎栈铜矿为研究对象,分析井边地区脉状铜矿成矿流体特征,探讨脉状铜矿的成矿机制。研究表明:该区流体包裹体主要为气液两相包裹体,偶见纯液相包裹体和纯气相包裹体,流体系统为 $H_2O-NaCl$ 型。流体包裹体显微测温结果显示,成矿流体具有中温($220\sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$)、中低盐度($8\text{wt}\%\sim 20\text{wt}\%$)、低密度($0.86\sim 1.16\text{ g/cm}^3$)的特征,流体体系沸腾作用不强。岩浆热液与大气降水的混合作用使成矿物质在岩体及围岩裂隙中析出、沉淀并富集成矿,形成受断裂控制的脉状铜矿床。

关键词: 庐枞盆地;井边地区;流体包裹体;脉状铜矿床;成矿机制

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2018)02-116-10

庐枞盆地处于扬子地块北东缘长江中下游断陷带内,西邻郟庐断裂带,是长江中下游成矿带重要的矿集区^[1-2],区内矿产资源丰富,主要有铁、硫、明矾石、铜和硬石膏等^[3]。近几年,庐枞地区开展了系统的地质研究工作,在庐枞盆地岩浆岩时空格架,地球化学特征及其源区、演化、深部过程以及盆地内典型矿床研究等方面取得了重要进展^[4-10]。值得关注的是,作为盆地内重要矿化类型之一的脉状铜矿床,其研究尚不深入,目前仅报道过个别矿床的年代学和流体包裹体研究成果^[11-13],这制约了对脉状铜矿床成矿机制的深入研究。为了进一步认识脉状铜矿床的成矿作用机制,开展成矿流体特征研究尤为重要。

结合庐枞地区脉状铜矿矿化分布规律^[14],选择庐枞盆地井边地区张家店铜矿、井边铜矿、周洼铜矿、虎栈铜矿为研究对象,结合井边地区 H、O、C 和 S 同位素研究成果,分析该区脉状铜矿成矿流体特征及流体包裹体类型,探讨脉状铜矿的成矿机制,

为进一步研究脉状铜矿床的成矿过程提供依据。

1 区域地质背景

庐枞盆地是一个呈 NE 向展布的中生代火山岩盆地(图 1)。寒武系—奥陶系碳酸盐岩及碎屑岩主要出露于庐枞火山岩盆地外围北部盛桥—东顾山地区,志留系—中三叠系主要出露于盆地周边地区。盆地主要为早白垩世陆相火山岩,由老到新分别为 4 个火山喷发旋回形成的龙门院组、砖桥组、双庙组和浮山组^[15],呈半环形依次分布,每一火山喷发旋回均以爆发相开始,以火山沉积相结束。

庐枞盆地构造活动强烈,主要有 NE 向、NW 向、近 SN 向和 EW 向 4 个断裂,不同方向的断裂构成了区内独特的网络状断裂体系,基底断裂带控制庐枞盆地中生代构造、岩浆及成矿作用的系统格架。庐枞盆地有大量侵入岩分布,可分为早、晚 2 期:早期侵入岩主要为二长岩和闪长岩类,晚期侵入岩可分为正长岩类和 A 型花岗岩^[9]。

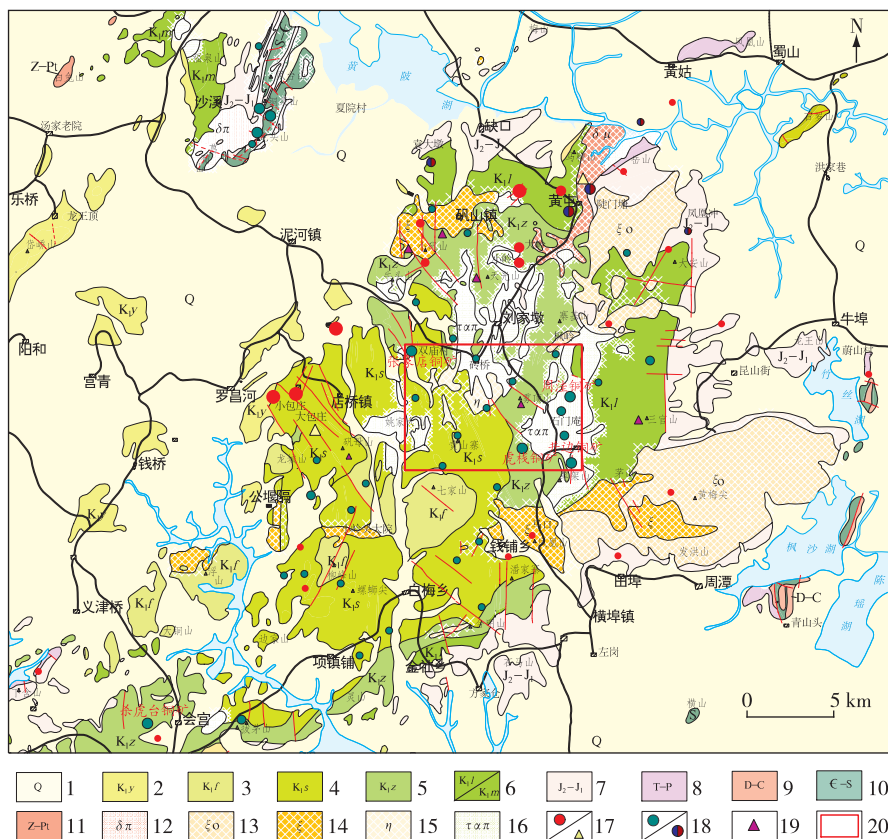
* 收稿日期:2017-07-14 修订日期:2017-08-29 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“安徽庐枞山—枞阳周潭地区深部找矿靶区验证与评价(编号:12120114012701)”项目资助。

第一作者简介:魏国辉,1981 年生,男,工程师,主要从事地质调查与矿产勘查工作。

庐枞盆地成矿作用主要集中在早白垩世^[9],按成矿作用时间与类型大致分为龙门院旋回与火山热液作用有关的 Pb、Zn、Ag 成矿系列,如岳山铅锌矿床;砖桥旋回与火山—潜火山岩活动有关的玢岩

型铁矿,如泥河铁矿、罗河铁矿等;砖桥旋回与潜火山热液活动有关的脉状铜矿床,如井边铜矿、石门庵铜矿等;与正长岩类岩有关的 Fe-Cu-U 成矿系列,如马口铁矿、34 铀矿等^[16]。



1. 第四系;2. 早白垩世杨湾组;3. 早白垩世浮山组;4. 早白垩世双庙组;5. 早白垩世砖桥组;6. 早白垩世龙门院组/毛坦厂组;7. 中—晚侏罗世罗岭组—钟山组;8. 三叠系—二叠系;9. 泥盆系—石炭系;10. 寒武系—志留系;11. 青白口系—震旦系;12. 闪长斑(玢)岩;13. 石英正长岩;14. 正长岩;15. 二长岩;16. 粗安斑岩;17. 铁矿床(点)/硫铁矿床(点);18. 铜矿床(点)/铅锌矿床(点);19. 明矾石矿床(点);20. 研究区范围。

图 1 庐枞地区区域地质矿产简图(据 1:20 万地质矿产图修编)

Fig. 1 Regional geology and mineral resources of the Lujiang-Zongyang area(modified after 1:200 000 geology and mineral resources map)

2 地质特征

脉状铜金矿床(点)位于庐枞盆地中心部位、隆起构造或火山机构内,具有经济价值的脉状铜(金)矿床(点)几乎全部产于龙门院旋回与砖桥旋回火山岩中(井边、朱家凹),也有部分延向盆地边缘(天头山)。矿体主要呈脉状、网脉状,多受断层或断层破碎带控制,部分矿体受放射状原生火山断裂或裂隙控制。

张家店铜矿床位于庐江县双庙村附近,矿脉产于早白垩世双庙组第二岩性段粗安岩—粗面玄武质凝灰熔岩中,受走向 357°的张扭性破碎带控制。该矿床有 1 个主矿脉,矿化体呈脉状,走向近南北,倾向东,倾角 70°,长 50 m,宽 2~4.7 m。矿石矿物为黄铜矿、褐铁矿等,脉石矿物主要为石英,次为方解石等,矿石呈浸染状、斑点状、块状构造,含铜量为 1.8%~5.02%,伴生金。

井边铜矿床位于枞阳县井边地区,矿体产于早

白垩世砖桥组第一岩性段粗安岩及次火山岩辉石粗安玢岩中。主要矿体赋存部位受 NW 向张扭性断裂控制,尤以 NW 向与 EW 向断裂交汇处矿脉较富集。矿体呈脉状、不连续透镜状,具有分枝复合、膨缩现象,走向 $280^{\circ}\sim 310^{\circ}$,倾向 SW,倾角近直立,由 4 个矿化带 11 条大小不等的矿脉组成,1 号矿脉长 540 m,平均厚 2.7 m,延深 248 m;8 号矿脉长 340 m,平均厚 2.2 m,延深 241 m,其余矿脉规模较小。矿石矿物以黄铜矿为主,次有辉钼矿和孔雀石等;脉石矿物为石英、方解石、重晶石和萤石。矿石呈细脉状、浸染状、块状、角砾状构造,平均含铜量为 1.25%。

周洼铜矿床位于庐江县与枞阳县交界井边地区偏北部,矿脉产于早白垩世砖桥组第一岩性段粗安岩中,受走向 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 的张扭性断裂控制。该矿床有矿化带 6 条,大小矿脉 22 条,走向 $280^{\circ}\sim 305^{\circ}$,脉长 16.7~500 m,宽 0.01~2 m。主矿脉 1 条,长 120 m,平均厚 4.16 m。矿石矿物为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿和辉铜矿等;脉石矿物主要为石英、方解石和重晶石等,矿石呈细脉状、浸染状、角砾状、块状构造,含铜量为 0.02%~3.14%。

虎栈铜矿床位于庐江县与枞阳县交界井边地区西侧,矿脉产于早白垩世砖桥组第一岩性段粗安岩中,沿走向 315° 的张扭性破碎带控制。矿体呈脉状,产状 $45^{\circ}\angle 75^{\circ}$,矿化带长约 900 m,宽数十米,其间含铜石英脉 3 条,长 <150 m,宽 0.7 m。矿石矿物为黄铜矿、黄铁矿和孔雀石等;脉石矿物主要为石英,矿石主要呈细脉状、浸染状构造,含铜量约为 0.2%~0.3%。

3 成矿流体特征

3.1 样品采集

选择庐枞盆地井边地区张家店铜矿、井边铜矿、周洼铜矿和虎栈铜矿为研究对象,样品以采坑内取样为主(表 1),主要为井边地区脉状铜矿床主成矿期与金属硫化物共生的石英和方解石。将样品磨制成双面抛光的薄片,在镜下进行岩相学观察,区分原生包裹体和次生包裹体,划分包裹体类型,选取具有代表性的原生包裹体开展显微测温工作。

3.2 测试方法

包裹体显微测温分析在合肥工业大学流体包

裹体实验室完成,仪器为 Linkam THM S600 型冷热台,冷热台温度为 $-195\sim 600^{\circ}\text{C}$,冷冻温度和均一温度精度分别为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$;测试前利用人工合成包裹体标准样对冷热台进行温度校正。包裹体测试过程中,升温及降温速率控制在 $(1\sim 10^{\circ}\text{C})/\text{min}$ 以内,相变点附近控制在 $(0.2\sim 1^{\circ}\text{C})/\text{min}$ 以内。

表 1 脉状铜矿样品特征

Table 1 Characteristics of samples from the vein-type copper deposits

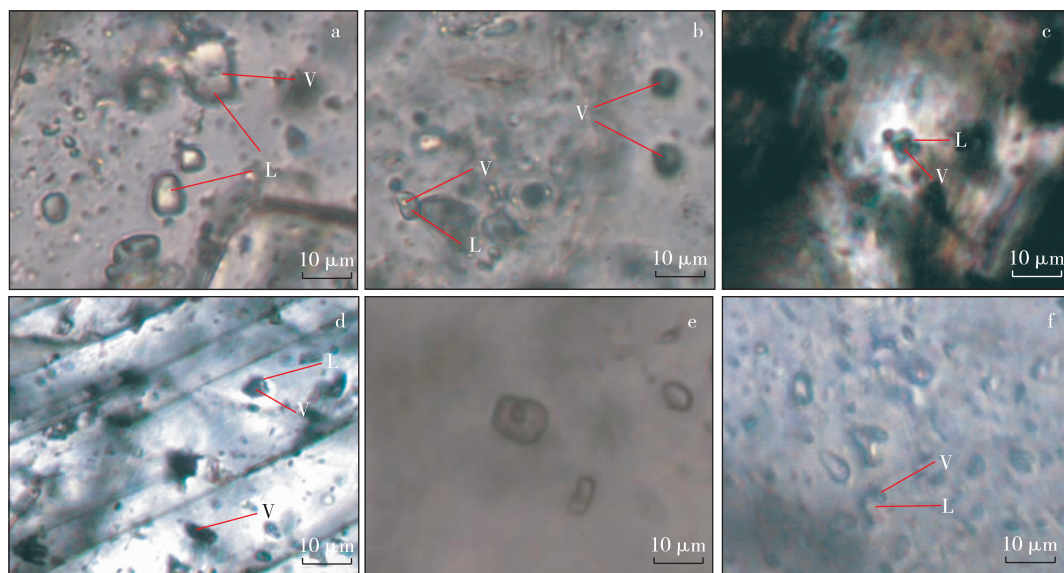
矿床名称	成矿阶段	围岩蚀变	测试矿物
张家店铜矿	石英—碳酸盐—硫化物	赋矿围岩为双庙组粗安岩,发育黄铜矿化、方解石化、黄铁矿化等	方解石(2)
井边铜矿	石英—硫化物	赋矿围岩为砖桥组粗安岩,发育黄铜矿化、重晶石化、黄铁矿化、硅化、菱铁矿化等,局部见含铜石英脉	石英(6)
周洼铜矿	石英—硫化物	赋矿围岩为砖桥组粗安岩,发育黄铜矿化、重晶石化、硅化等	石英(2)
虎栈铜矿	石英—硫化物	赋矿围岩为砖桥组粗安岩,发育黄铜矿化、重晶石化、硅化等	石英(3)

注:括号内数字为样品数。

3.3 流体包裹体特征

岩相学研究表明,本次研究的流体包裹体主要发育在石英脉和方解石中,既有原生包裹体,也有次生包裹体,贯穿成矿全过程;流体包裹体数量不多,个体较小,多呈孤立分布。假次生及次生包裹体主要沿裂隙呈线性分布,多为负晶形,假次生包裹体主要以水溶液包裹体和气液包裹体为主。根据室温下的相态特征和组成,原生包裹体可分为气液两相包裹体(I型)、纯气相包裹体(II型)和纯液相包裹体(III型)3类。

井边铜矿床原生包裹体类型以气液两相包裹体(I型)为主(图 2a),占包裹体总数的 98% 以上,偶见纯气相包裹体(II型)和纯液相包裹体(III型)。常孤立随机分布,个体偏小,大者达 $4\mu\text{m}\times 6\mu\text{m}$,小者仅 $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$,形态各异,一般多为椭圆形,个别呈长条形。室温下,气液两相包裹体(I型)可见气相和液相,以液相为主,气液比变化范围为 5%~20%,绝大多数集中在 10%~15% 之间。显微测温时,绝大多数气液两相包裹体均一为液相。纯气相包裹体(II型)呈黑色圆状孤立分布,室温下仅见单



a. 井边铜矿纯液相包裹体与气液两相包裹体共生于同一结晶平面; b. 井边铜矿纯气相包裹体与气液两相包裹体共生于同一结晶平面; c. 张家店铜矿方解石内气液两相包裹体; d. 张家店铜矿纯气相包裹体与气液两相包裹体共生于同一结晶平面; e. 虎栈铜矿纯液相包裹体与气液两相包裹体共生于同一结晶平面; f. 周洼铜矿气液两相包裹体; V. 气相; L. 液相。

图 2 脉状铜矿流体包裹体显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of fluid inclusions of the vein-type copper deposits

一的气相态(图 2b),数量极少,与气液包裹体共生于同一结晶平面,包裹体个体不大($2\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$)。纯液相包裹体(Ⅲ型)呈亮白色椭圆状,室温下仅见单一液相态,数量极少,常与气液包裹体共生于同一结晶面(图 2a),个体不大($2\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$)。

张家店铜矿床原生包裹体类型以气液两相包裹体(Ⅰ型)为主(图 2c),占包裹体总数的 99%以上,偶见纯气相包裹体(Ⅱ型)。常孤立随机分布,其个体偏小,大者可达 $3\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$,小者仅为 $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$,一般多为椭圆形,个别呈长条形。室温下,气液两相包裹体(Ⅰ型)可见气相和液相,以液相为主,气液比变化范围为 5%~15%,绝大多数集中在 5%~10%之间;显微测温时,绝大多数气液两相包裹体均一为液相。纯气相包裹体(Ⅱ型)呈黑色圆状孤立分布,室温下仅见单一的气相态(图 2d),数量极少,与气液包裹体共生于同一结晶平面,个体不大($1\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$)。

虎栈铜矿床原生包裹体类型以气液两相包裹体(Ⅰ型)为主,占包裹体总数的 97%以上,偶见纯液相包裹体(Ⅲ型)。常孤立随机分布,其个体偏小,大者达 $5\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}$,小者仅 $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$,形态

各异,一般多为椭圆形,个别呈长条形。室温下,气液两相包裹体(Ⅰ型)可见气相和液相,以液相为主,气液比变化范围为 5%~15%,绝大多数集中在 5%~10%之间;在显微测温时,绝大多数气液两相包裹体均一为液相。纯液相包裹体(Ⅲ型)呈亮白色椭圆状,室温下仅见单一液相态,数量极少,常与气液包裹体共生于同一结晶面(图 2e),且个体不大($2\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$)。

周洼铜矿床原生包裹体类型主要为气液两相包裹体(Ⅰ型),室温下可见气相和液相(图 2f),以液相为主。常孤立随机分布,其个体偏小,大者可达 $5\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}$,小者仅 $1\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$,形态多为椭圆形,个别呈长条形。气液比变化范围为 5%~15%,绝大多数集中在 5%~10%之间;在显微测温时,绝大多数气液两相包裹体均一为液相。

值得注意的是,纯气相包裹体和纯液相包裹个体较小,呈椭圆状、孤立状分布于石英和方解石中,可见Ⅱ型和Ⅲ型包裹体与Ⅰ型包裹体共生于同一个结晶面,说明它们近似于同时捕获。

3.4 流体包裹体显微测温

在流体包裹体岩相学研究的基础上,选取原生包裹体开展均一温度测量和盐度计算。均一温度

通过冷热台直接测定,获得张家店铜矿区成矿期石英-碳酸盐-硫化物阶段流体包裹体的均一温度为 $191.1 \sim 244.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $200 \sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 3a)。井边铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体均一温度为 $203.1 \sim 304.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $220 \sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 3b)。虎栈铜矿区成矿期石英-硫化

物阶段流体包裹体的均一温度为 $189 \sim 328\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $220 \sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 3c)。周洼铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体均一温度 $191.6 \sim 251.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $220 \sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 3d)。可见,脉状铜矿的成矿流体均一温度主要集中于 $220 \sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属中温流体体系。

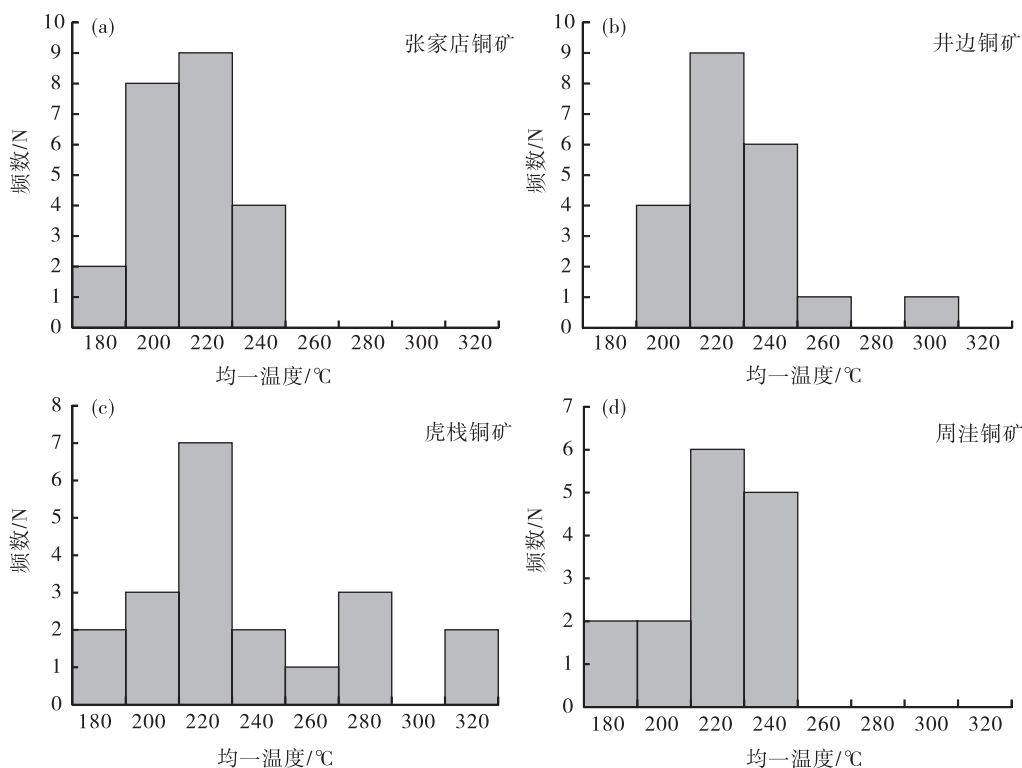


图 3 流体包裹体均一温度直方图

Fig. 3 Histograms of the homogenization temperatures of fluid inclusions

流体包裹体岩相学特征显示,包裹体类型以气液两相包裹体为主,且流体包裹体的气液比范围较小,绝大多数集中在 $10\% \sim 15\%$ 之间,偶见纯气相包裹体和纯液相包裹体。冷冻—升温过程中仅观测到少数包裹体初熔,多数初熔温度低于纯 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 溶液共结点温度 ($-20.8\text{ }^{\circ}\text{C}$), 反映流体中除 Na^+ 外,还可能存在微量的 K^+ 和 Ca^{2+} 等阳离子^[17-18],这与脉状铜矿成矿流体的液相成分以 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主^[19]的结论一致。因此,本文将流体包裹体近似为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型流体体系。

根据 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型包裹体冷冻法冰点与盐度关系^[20-21],计算获得张家店铜矿区成矿期石英-碳酸盐-硫化物阶段流体包裹体盐度 $\omega(\text{NaCleq})$ 为 $6.58\text{ wt}\% \sim 10.74\text{ wt}\%$,且主要集中于 $7\text{ wt}\% \sim 10\text{ wt}\%$ 之间(图

4a)。井边铜矿区成矿期石英-硫化物阶段的流体包裹体盐度 $\omega(\text{NaCleq})$ 为 $8.67\text{ wt}\% \sim 18.87\text{ wt}\%$,主要集中于 $17\text{ wt}\% \sim 19\text{ wt}\%$ 之间(图 4b)。虎栈铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体盐度 $\omega(\text{NaCleq})$ 为 $9.73\text{ wt}\% \sim 22.37\text{ wt}\%$,主要集中于 $9\text{ wt}\% \sim 19\text{ wt}\%$ (图 4c)。周洼铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体盐度 $\omega(\text{NaCleq})$ 为 $8.94\text{ wt}\% \sim 13.33\text{ wt}\%$,主要集中于 $9\text{ wt}\% \sim 12\text{ wt}\%$ 之间(图 4d),进一步说明该区成矿流体属于中低盐度流体体系。

根据 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型包裹体密度公式^[20],计算获得张家店铜矿区成矿期石英-碳酸盐-硫化物阶段流体包裹体的密度约为 $0.87 \sim 0.93\text{ g/cm}^3$,周洼铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体密度为

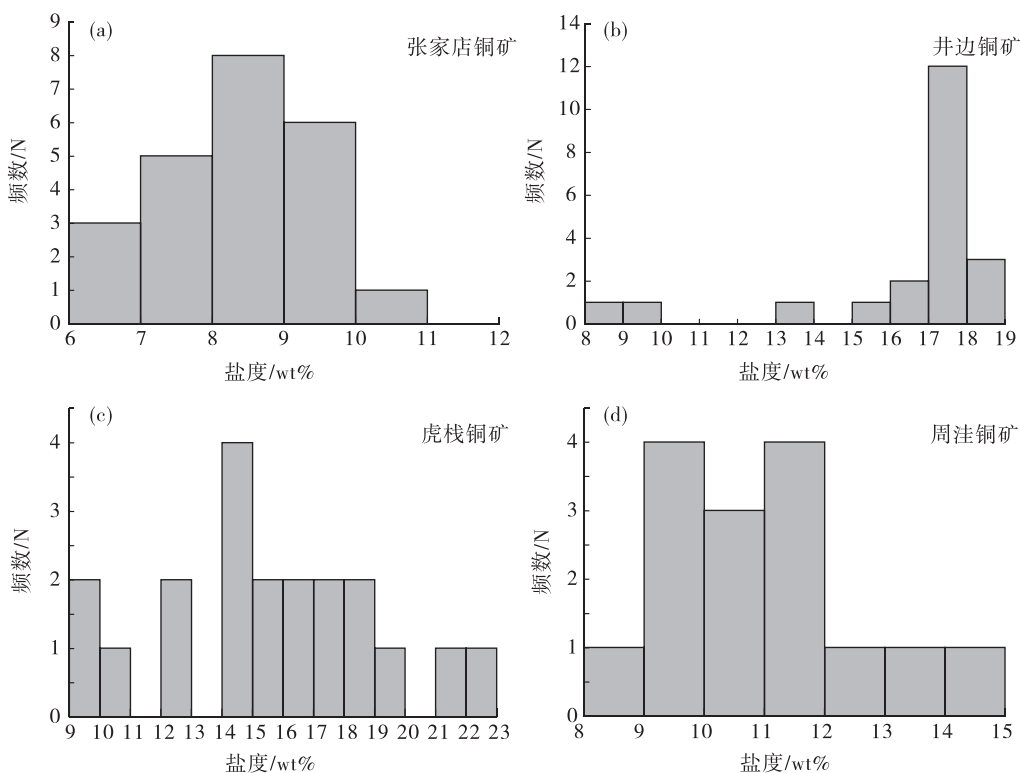


图 4 流体包裹体盐度直方图

Fig. 4 Histograms of the salinities of fluid inclusions

0.88~0.94 g/cm³,井边铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体密度为 0.85~1.00 g/cm³,虎棧铜矿区成矿期石英-硫化物阶段流体包裹体密度为 0.86~1.16 g/cm³,均属于低密度流体体系。

4 讨论

4.1 流体性质与成矿

前人对该区部分代表性矿床开展流体包裹体显微测温工作,如杀虎台铜矿床成矿流体的均一温度集中于 170~260 °C^[13],天头山铜矿床成矿流体均一温度集中于 170~245 °C (平均温度为 207.6 °C),盘洼铜矿床成矿流体的均一温度集中于 175~270 °C (平均温度为 223 °C),巴家滩铜矿床成矿流体的均一温度集中于 215~275 °C (平均温度为 245 °C)^[14],白柳铜矿床成矿流体的均一温度集中于 212~347 °C^[17],与本次流体包裹体显微测温结果(成矿流体均一温度集中于 210~240 °C)基本一致。结合本次流体包裹体岩相学特征和显微测温结果(表 2),认为庐枞盆地井边地区脉状铜矿的成

矿流体属于中温中低盐度低密度 H₂O-NaCl 型流体体系。

流体包裹体岩相学特征显示,脉状铜矿床偶见共生于同一结晶平面的气液两相包裹体和纯气相包裹体(图 2b,图 2d),以及共生于同一结晶平面的气液两相包裹体和纯液相包裹体(图 2a,图 2e)。此外,镜下并未观察到这些不同类型的包裹体之间具有交叉和切割关系,而且也没有见到包裹体颈缩现象,表明这些流体包裹体应是大致同时形成的。杀虎台铜矿、天头山铜矿和盘洼铜矿的成矿流体中偶见含子矿物多相包裹体^[13-14],符合不混溶流体的特征,表明它们捕获于某种不均匀的流体^[22],这种现象可能是由单一流体不混溶而产生的相分离作用所致,说明寄主矿物在形成时同时捕获了 2 种不同类型的流体。野外调研未见水力-热液角砾岩(即爆破角砾岩)和脉状充填角砾岩,包裹体的盐度变化范围为 6.58 wt%~22.37 wt%,均一温度为 189~328 °C,包裹体气液比变化范围 5%~20%,说明流体体系可能经历了微弱的不混溶沸腾作用。

表 2 脉状铜矿流体包裹体显微测温结果

Table 2 The microthermometric results of fluid inclusions from vein type copper deposits

矿床名称	测试矿物	冰晶消失温度/ ℃	均一温度/℃		盐度/wt% NaCleq		密度/ (g·cm ⁻³)
			范围	集中区间	范围	集中区间	
张家店铜矿	方解石	-4.1~-7.2	191.1~244.7	200~240	6.58~10.74	7~10	0.87~0.93
周洼铜矿	石英	-5.8~-9.4	191.6~251.1	220~260	8.94~13.33	9~12	0.88~0.94
井边铜矿	石英	-5.6~-15.1	203.1~304.7	220~260	8.67~18.87	17~19	0.85~1.00
虎栈铜矿	石英	-6.4~-19.6	189~328	220~240	9.73~22.37	9~19	0.86~1.01
杀虎台铜矿 ^[13]	石英	-19.4~-4.4	127~290	170~260	7.02~21.96	11~19	

4.2 流体来源

研究表明^[14,17],井边地区脉状铜矿 δD 值介于 -88.01‰ ~ -64.96‰ 之间,平均值为 -75.73‰ 。多数样品 δD 值为正常岩浆水范围(-80‰ ~ -50‰)^[23],说明成矿流体原始流体来自岩浆。井边地区脉状铜矿 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值介于 -5.61‰ ~ 3.87‰ 之间,平均值为 -0.47‰ ,偏离岩浆水 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 变化范围(5.5‰ ~ 9.5‰)^[23]。在 δD - $\delta^{18}O_{SMOW}$ 图解中(图 5),样品落在岩浆水下方及左侧,即岩浆水与大气降水过渡区域,构成微弱的线性趋势。 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值偏离正常岩浆水值,发生明显“氧漂移”,可能由于大气降水加入,造成氧同位素向大气降水漂移,与成矿流体具有大气降水特征、偏离正常岩浆水区域的赣南淘锡坑钨矿床(δD 值为 -77‰ ~ -45‰ , $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值为 -3.1‰ ~ 1.2‰)^[24] 类似。

井边地区脉状铜矿 $\delta^{13}C_{(PDB)}$ 为 -3.42‰ ~ -13.80‰ ,平均值为 -8.40‰ ,接近岩浆来源的 $\delta^{13}C_{(PDB)}$ 值(-9‰ ~ -3‰); $\delta^{18}O_{SMOW}$ 为 0.41‰ ~ 2.06‰ ,平均值为 1.06‰ ,低于岩浆成因流体的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值(5.0‰ ~ 10.5‰)^[23]。在 C-O 同位素相关图解中(图 6),样品主要落在岩浆—地幔源区及其左侧,主要受大气降水的影响,成矿流体具有深部岩浆特征。

井边地区脉状铜矿 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 为 -9.28‰ ~ 3.43‰ ,平均值为 -5.11‰ ,具有岩浆来源矿床硫同位素特征,S、Pb 同位素特征显示成矿物质是多来源的^[14,17]。野外调查发现,井边地区脉状铜矿发育明显的重晶石化,重晶石化是流体混合作用的重要标志^[27]。研究表明,Cu 在流体中的含量与温度呈正相关^[28],成矿流体在岩浆上升侵位中受岩浆流体和大气降水的混合作用,对成矿流体产生稀释,温度降低,导致成矿物质的溶解度降低,含矿热液系

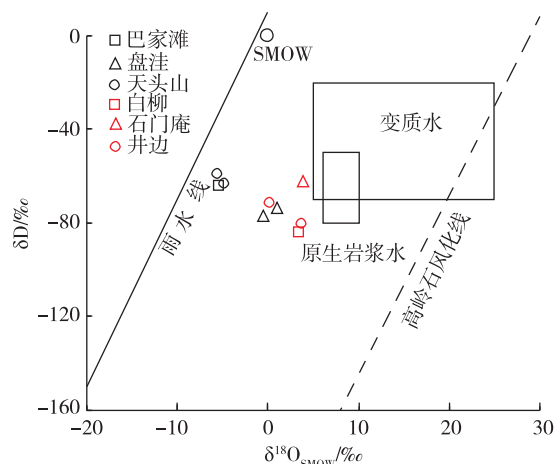


图 5 井边地区脉状铜矿成矿流体 H-O 同位素相关图 (底图据文献[25])

Fig. 5 H-O isotope diagram of ore-forming fluids from the vein-type copper deposit in the Jingbian area (modified after [25])

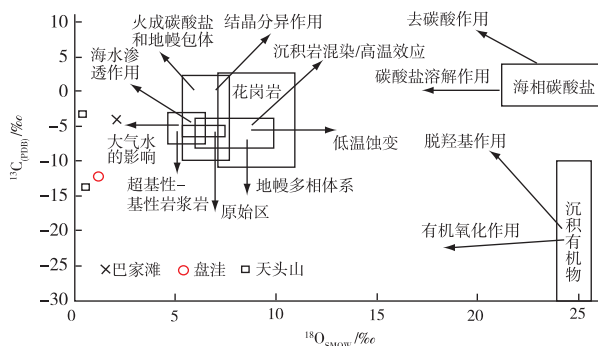


图 6 井边地区脉状铜矿成矿流体 C-O 同位素相关图 (底图据文献[26])

Fig. 6 C-O isotope diagram of ore-forming fluids from the vein type copper deposits in the Jingbian area (modified after [26])

统不稳定,造成大量成矿物质析出、沉淀、富集成矿。可见,流体的混合作用对脉状铜矿的形成具有重要作用。

综上所述,庐枞盆地井边地区脉状铜矿床的C、H、O、S同位素组成显示其成矿流体以岩浆水为主,大气降水参与。同时,井边地区包裹体类型以气液两相包裹体居多,说明流体体系可能为开放状态,流体包裹体气相成分中含有甲烷等烃类^[14,17],可能指示存在深源流体。

4.3 脉状铜矿成矿过程

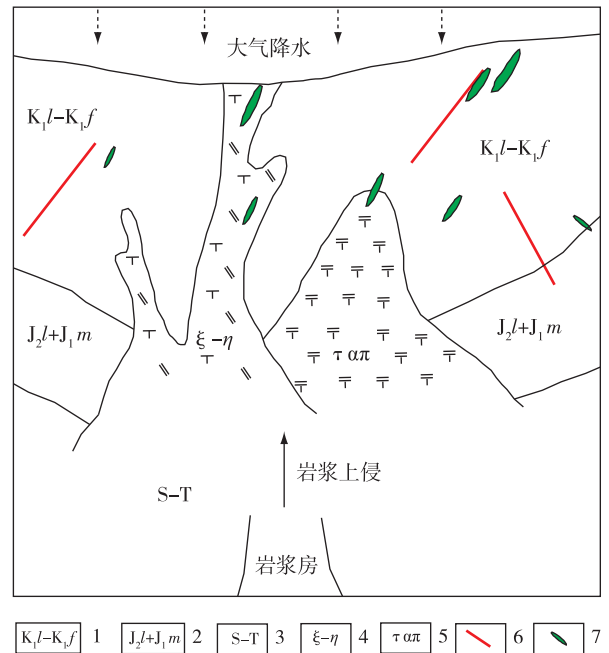
晚侏罗世—早白垩世,庐枞地区区域构造环境由挤压向伸展转换,壳幔相互作用强烈,并发生岩石圈地幔拆沉,下地壳和上涌地幔部分熔融,引发大规模中酸性岩浆侵入^[4]。砖桥旋回末期至双庙旋回,橄榄玄粗质岩浆沿盆地基底断裂上升侵位,形成浅表火山-次火山岩,从岩浆熔体中溶出部分岩浆流体。

膏盐层是庐枞盆地基底的组成部分^[29],富含大量 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等,使出溶的流体富含 Cl^- ,进一步促使 Cl^- 进入流体形成富 Cl^- 卤水流体。Cu在流体中主要以稳定Cl络合物存在^[30],络合物随流体迁移、富集,这种富 Cl^- 卤水流体有利于萃取围岩中的Cu。岩浆沿基底断裂上升,同化混染基底地层(S-T)(图7),在岩浆热效应作用驱动下,不断提供矿化剂元素,随流体发生迁移、富集。基底断裂和火山构造活动使该区火山岩层($\text{K}_1\text{l}-\text{K}_1\text{f}$)产生大量破碎带和断裂带,提高岩石的渗透率,具有大气来源的地下水沿裂隙向下渗透,深部岩浆热源驱动具有大气降水来源的地下水沿浅表断裂及火山原生断裂运移循环,增强萃取成矿物质的能力,成矿元素随地下水迁移、富集,形成含矿热液。

当大量地下水与岩浆热液发生混合时,对成矿流体产生稀释,温度降低,使成矿流体中 Cl^- 浓度下降,pH值增大,改变了流体体系的物理化学条件,破坏含矿体系原有的平衡状态,促使铜氯络合物离解^[27],造成大量铜等硫化物析出、沉淀,在岩体($\xi+\eta+\tau\alpha\pi$)及火山岩($\text{K}_1\text{l}-\text{K}_1\text{f}$)裂隙中富集成矿,形成受断裂控制的脉状铜矿床。

5 结 论

(1)井边地区脉状铜矿床的包裹体类型主要为



1. 白垩纪龙门院旋回至浮山旋回火山岩;2. 侏罗纪磨山组和罗岭组;3. 志留系—三叠系;4. 正长岩—二长岩类;5. 粗安斑岩;6. 断裂;7. 脉状铜矿床。

图7 脉状铜矿床成矿模式图(据文献[31]修改)

Fig. 7 Schematic diagram depicting the ore-forming model of vein-type copper deposits (modified after [31])

气液两相包裹体,偶见纯液相包裹体和纯气相包裹体,流体系统属于 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型系。

(2)井边地区脉状铜矿床流体体系具有中温($220\sim 240\text{ }^\circ\text{C}$)、中低盐度($8\text{ wt}\%\sim 20\text{ wt}\%$)、低密度($0.86\sim 1.16\text{ g/cm}^3$)的特征,流体体系沸腾作用不强,成矿流体以大气降水为主,有不同比例的岩浆水参与。

(3)砖桥旋回末期至双庙旋回,岩浆热液与大气降水发生混合作用,成矿物质在岩体及围岩的裂隙中析出、沉淀,富集成矿,形成受断裂控制的脉状铜矿床。

参考文献

- [1] 吴明安,侯明金,赵文广. 安徽省庐枞地区成矿规律及找矿方向[J]. 资源调查与环境, 2007, 28(4): 269-277.
- [2] 赵文广,吴明安,张宜勇,等. 安徽省庐江县泥河铁硫矿床地质特征及成因初步分析[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 789-802.

- [3] 吴明安,汪青宋,郑光文,等.安徽庐江泥河铁矿的发现及意义[J].地质学报,2011,85(5):802-809.
- [4] 覃永军.安徽庐枞盆地燕山期成矿地球动力学背景及成矿模式[D].武汉:中国地质大学(武汉),2010:1-149.
- [5] 汤家富,陆三明,李建设,等.安徽庐枞火山岩盆地与邻区基底构造变形、形成演化及其对矿床分布的控制[J].岩石学报,2010,26(9):2587-2597.
- [6] 张乐骏.安徽庐枞盆地成岩成矿作用研究[D].合肥:合肥工业大学,2011:1-239.
- [7] 袁峰,周涛发,范裕,等.庐纵盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景[J].岩石学报,2008,24(10):1691-1702.
- [8] 周涛发,范裕,袁峰,等.长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J].地质学报,2011,85(5):712-730.
- [9] 周涛发,范裕,袁峰,等.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,2010,26(9):2694-2714.
- [10] 周涛发,范裕,袁峰.长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J].岩石学报,2008,24(8):1665-1678.
- [11] 张乐骏,周涛发,范裕,等.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,2010,26(9):2729-2738.
- [12] 覃永军,曾键年,王思源,等.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,2010,29(5):915-930.
- [13] 张靖怡,张赞赞,郑光文,等.安徽庐枞盆地杀虎台铜矿床成矿流体特征研究[J].安徽地质,2017,27(1):29-32.
- [14] 徐兆文,任启江,杨荣勇,等.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,1992,28(1):8-15.
- [15] 李玉松,蔡晓兵,汪晶,等.安徽庐枞盆地黄寅冲铅锌矿床闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].华东地质,2016,37(1):19-27.
- [16] 张舒,吴明安,汪晶,等.安徽庐枞盆地与正长岩有关的成矿作用[J].地质学报,2014,88(4):519-531.
- [17] Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(17): 3057-3067.
- [18] 张文淮,陈紫英.流体包裹体地质学[M].武汉:中国地质大学出版社,1993:1-246.
- [19] 石磊.安徽庐枞地区铜(金)矿床地质地球化学特征及成因[D].合肥:合肥工业大学,2011:1-60.
- [20] 刘斌,沈昆.流体包裹体热力学[M].北京:地质出版社,1999:31-277.
- [21] 卢焕章,范洪瑞,倪培,等.流体包裹体[M].北京:科学出版社,2004:207.
- [22] Shepherd T J, Rakin A, Alderton D H M. A practical guide to fluid inclusion studies[M]. Glasgow: Blackie Academic & Professional, 1985: 1-154.
- [23] 郑永飞,陈江峰.稳定同位素地球化学[M].北京:科学出版社,2000:1-316.
- [24] 周龙全,李光来,唐傲,等.赣南地区石英脉型钨矿成矿流体特征[J].华东地质,2016,37(2):136-146.
- [25] 杜玉雕,余心起,刘家军,等.皖南东源钨钼矿成矿流体特征和成矿物质来源[J].中国地质,2011,38(5):1334-1346.
- [26] 杜玉雕,刘家军,余心起,等.安徽逍遥钨多金属矿床成矿物质来源与成矿:碳、硫和铅同位素证据[J].中国地质,2013,40(2):566-579.
- [27] 张德会.流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义[J].地球科学进展,1997,12(6):546-552.
- [28] 卢焕章,单强.金属矿床的成矿流体成分和流体包裹体[J].岩石学报,2015,31(4):1108-1116.
- [29] 周涛发,范裕,袁峰,等.安徽庐枞盆地泥河铁矿床与膏盐层的成因联系及矿床成矿模式[J].地质学报,2014,88(4):562-573.
- [30] 左晓敏,杜杨松,曹毅,等.安徽桂花冲铜矿床成矿流体演化特征研究[J].矿床地质,2016,35(1):117-129.
- [31] 周小栋.宁芜北部脉状铜矿床成因及成矿机制研究[D].合肥:合肥工业大学,2013:1-74.

Characteristic of ore-forming fluids of vein-type copper deposits in the Jingbian area of Lujiang-Zongyang volcanic basin in Anhui Province and its implications for mineralization

WEI Guo-hui, DU Yu-diao, ZHAO Wen-guang, ZHANG Zan-zan

(*Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, China*)

Abstract: The Lujiang-Zongyang volcanic basin in Anhui Province is one of the important ore cluster regions in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt, which hosts many vein-type copper deposits (points). In this study, four vein-type copper deposits at Zhangjiadian, Jingbian, Zhouwa and Huzhan in the Jingbian area were chosen to study the characteristics of ore-forming fluids in order to preliminarily understand the metallogenic mechanism of vein type copper deposits. The study shows that fluid inclusions in the deposits are dominated by two-phase gas-liquid inclusions, occasionally with gaseous inclusions and pure liquid inclusions, suggesting that fluid system belongs to a H_2O -NaCl system. The microthermometric analyses of the fluid inclusions show that the ore-forming fluids are characterized by medium temperature ($220 \sim 240\text{ }^\circ\text{C}$), low-medium salinity ($8\text{wt}\% \sim 20\text{wt}\%$) and low density ($0.86 \sim 1.16\text{ g/cm}^3$), indicating that the ore-forming fluid experienced weak fluid-boiling. It can be concluded that mixing between magmatic water and meteoric water resulted in extraction, precipitation and enrichment of the ore-forming materials in the fractures of rock mass and country rocks, thus forming fault-controlled vein-type copper deposits.

Key words: Lujiang-Zongyang basin; Jingbian area; fluid inclusion; vein-type copper deposit; metallogenic mechanism