

中条山落家河铜矿流体包裹体初步研究*

姜玉航^{1,2} 罗勇³ 牛贺才^{1**} 郭双龙⁴ 李宁波^{1,2}

JIANG YuHang^{1,2}, LUO Yong³, NIU HeCai^{1**}, GUO ShuangLong⁴ and LI NingBo^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 南阳师范学院环境科学与旅游学院, 南阳 473061

4. 中条山有色金属集团有限公司, 垣曲 043700

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Environment Science and Tourism, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China

4. Zhongtiaoshan Non-Ferrous Metals Group Co., Ltd., Yuanqu 043700, China

2013-02-13 收稿, 2013-05-30 改回.

Jiang YH, Luo Y, Niu HC, Guo SL and Li NB. 2013. Study on fluid inclusions from the Luojahe copper deposit in Zhongtiaoshan region. Acta Petrologica Sinica, 29(7): 2583–2592

Abstract Luojahe copper deposit is located in the Luojahe tectonic-erosion window, southeastern of Zhongtiao rift. Cu-mineralization occurs in the metamorphic volcanic-sediments of the Songjiashan Formation which is covered by Mesoproterozoic andesitic rocks of the Xiyanghe Group. This paper focuses on the study of fluid inclusions in ore-bearing quartz veins which are intergrowth with ore-body, to discuss the features of ore-forming fluids and the implications for Cu-mineralization. Based on systematically petrographic observation, fluid inclusions are classified into five types by phases: Pure vapor inclusions (I-type), pure aqueous inclusions (II-type), vapor-rich inclusions (III-type), aqueous-rich inclusions (IV-type) and daughter mineral-bearing inclusions (V-type). II-type and IV-type inclusions are dominant in the upper orebody, and I-type and V-type inclusions are dominant in the lower orebody. The coexistence of V-type with I-type inclusions shows the features of boiling assemblage. Microthermometry data indicates that there are two different systems of $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ system (IVa1-type) and $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ system (IVa2-type) in the liquid-rich aqueous inclusions (IVa types), corresponding to the upper quartz veins and the lower quartz veins. Both homogenization temperature (T_h) and salinity of the two types are different, indicating that the ore-forming fluids might originate from two different fluid sources. The T_h of IVa1-type range from 100°C to 208°C and salinities range from 10.24% to 20.45% NaCleqv. It is suggest that the fluid of IVa1-type is hot brine derived from sea water. In contrary, the IVa2-type is from magmatic fluid, with T_h of 151~306°C and salinities of 3.39%~15.07% NaCleqv, respectively. T_h and salinities of the V-type inclusions are in range of 175~300°C and 30.7%~38.16% NaCleqv. In this regards, we can infer that hot brine and magmatic fluids have different influences to Cu-mineralization. The former extracted metal elements from volcanic rocks, and then precipitated when loss of temperature and pressure. The later released metal elements by phase separation. Laser-Raman microspectroscopy analyses show that the vapour phase of the fluid inclusions is composed of H_2O and a few CO_2 . Regarding the regional tectonic setting, fluids channel, mechanism and the features of ore-forming fluids, we conclude that the Luojahe Cu deposit is a volcanic-associated massive sulfide deposit of Precambrian.

Key words Fluid inclusions; Luojahe copper deposit; Source of fluids; Convective circulation; Boiling

摘要 落家河铜矿位于中条裂谷东南部的构造-剥蚀天窗内, 矿体赋存于中元古界西阳河群安山岩覆盖区下部的宋家山组沉积-火山变质岩系中。本文重点研究了不同空间位置与矿体共生的石英脉中的流体包裹体, 以探讨落家河铜矿的成矿流

* 本文受国家 973 项目(2012CB416603)资助。

第一作者简介: 姜玉航, 男, 1987 年生, 硕士生, 地球化学专业, E-mail: jiangyuhang@gig.ac.cn

** 通讯作者: 牛贺才, 男, 研究员, 地球化学专业, E-mail: niuhc@gig.ac.cn

体特征和成矿机制。系统的包裹体岩相学观察表明, 落家河铜矿床流体包裹体类型按相态主要分为纯气相包裹体(I型)、纯液相包裹体(II型)、富气相的气液两相包裹体(III型)、富液相的气液两相包裹体(IV型)和含子矿物多相包裹体(V型)五种类型。矿体上部石英脉中主要为II型和IV型包裹体, 矿体下部石英脉中主要为V型和I型包裹体, 且两种包裹体紧密共存, 体现了沸腾包裹体组合的特征。显微测温结果显示, 原生的富液相气液两相包裹体(IVa型)具有 $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ 体系(IVa1型)和 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系(IVa2型)两种流体体系, 其均一温度分别为 $100\sim 208^\circ\text{C}$ 和 $151\sim 306^\circ\text{C}$, 盐度为 $10.2\%\sim 20.4\%$ NaCl_{eq} 和 $3.4\%\sim 15.1\%$ NaCl_{eq} , 分别对应矿体上部和下部石英脉, 显示出热卤水和岩浆热液两种不同的流体来源。V型包裹体的均一温度为 $175\sim 300^\circ\text{C}$, 盐度达 $30.7\%\sim 38.2\%$ NaCl_{eq} 。研究结果显示, 热卤水和岩浆热液的流体作用机制有所不同, 前者是古海水在花岗岩侵入体的驱动下形成对流循环并从火山岩中萃取金属元素形成的含矿热卤水。热卤水在沿断裂通道上升过程中由于降温、减压使成矿物质沉淀; 后者主要是从岩浆中分离出的中温中盐度流体, 它在到达断裂通道时由于压力骤降发生流体沸腾作用, 并产生矿质沉淀。激光拉曼探针分析显示, 流体包裹体气相成分主要是水, 含有少量 CO_2 。结合矿床形成的构造背景、热液通道、驱动机制和成矿流体特征, 作者认为落家河铜矿可能是一个前寒武纪海相火山成因块状硫化物矿床。

关键词 流体包裹体; 落家河铜矿; 流体来源; 对流循环; 沸腾作用

中图法分类号 P618.41

1 引言

中条山落家河铜矿是一个以铜为主, 伴生有铁、钴、镍、锌等多种组分的中型铜矿。该矿床是20世纪60年代末原山西省冶金地质勘探公司313队在矿产普查中发现的。整个矿区内广泛出露中元古界西阳河群安山岩, 矿体主要赋存在遭受剥蚀而出露地表的晚太古界绛县群宋家山组沉积-火山变质岩系中。前人对落家河铜矿开展了较为系统的研究工作(李继英, 1986; 真允庆和席增仁, 1990; 真允庆等, 1993; Gu *et al.*, 1993), 但对矿床成因的认识仍不够深入。李继英(1986)通过矿区变质岩原岩恢复、黄铁矿硫同位素等研究, 认为落家河铜矿为火山沉积变质型层控矿床。真允庆等(1993)从含矿岩系特征、岩浆活动和同位素地球化学等方面对矿床成因进行了探讨, 认为落家河铜矿是一个海底热液沉积-变质改造铜矿床。到目前为止, 对于该矿床的成矿过程及矿床成因尚缺乏系统研究。成矿流体研究, 对于揭示成矿作用机制及矿床成因起着至关重要的作用(Roedder, 1984; 卢焕章, 1997; 卢焕章等, 2004)。因此, 系统地开展落家河铜矿流体包裹体研究非常必要。前人对落家河铜矿石英中的流体包裹体进行了显微测温 and 氢、氧同位素研究(真允庆等, 1993), 但主要侧重于对数据的统计, 缺乏对成矿流体类型、性质及作用机制的系统研究。本文对与落家河铜矿体相伴生的石英脉中的流体包裹体进行了系统的岩相学观察、显微测温研究, 并对包裹体的成分进行了激光拉曼探针分析, 详细研究了成矿流体的类型及流体作用机制, 为探讨落家河铜矿成矿作用过程及矿床成因提供了依据。

2 区域地质概况

中条山位于华北克拉通南缘, 古元古代晋豫活动带的南部(翟明国和彭澎, 2007), 是我国前寒武纪岩石发育的地区之一, 也是重要的铜资源集中区(中条山铜矿地质编写组,

1978)。目前, 中条山地区已知铜矿床有20多个, 其中特大型矿床1个、中-大型矿床5个。前寒武纪成矿作用与克拉通的形成与演化有密切关系, 与前寒武纪构造事件一一对应(翟明国和彭澎, 2007; 翟明国, 2010; Zhai and Santosh, 2013)。区内断裂构造发育, 以北东向和北西向两组基底断裂为边界, 形成“人字型”三叉裂谷。著名的铜矿峪铜矿、胡家峪-篦子沟铜矿及落家河铜矿等区内的主要铜矿床均受控于交叉的两个大型断裂(图1)。该区燕山期断裂活动频繁, 在裂谷东南支的西阳河群安山岩中剥蚀出露了古元古界绛县群宋家山组地层, 并形成构造-剥蚀天窗, 落家河铜矿即赋存于该组地层中。

中条山地区前寒武系自下而上可分为: 新太古界涑水杂岩, 古元古界绛县群和中条群, 中元古界担山石群和西阳河群(胡维兴和孙大中, 1987; Sun *et al.*, 1990)。涑水杂岩主要出露于中条山主山脉西侧, 北东向展布, 主要由太古代TTG片麻岩组成。中条山中部地区主要出露绛县群和中条群(及担山石群)。绛县群下部为以陆源碎屑沉积物为主的横岭关亚群, 上部为以双峰式火山岩为主的铜矿峪亚群。在绛县群和中条群之间存在着明显的不整合, 为五台运动的结果。中条群总体上为一套碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩的大海侵层序。上述岩层均遭受中条运动I幕的低级区域变质作用过程。在中条运动II幕, 形成了以磨拉石建造为特征的担山石群砾岩及石英岩, 在此过程中伴随着地壳抬升、剥蚀、花岗岩浆侵位及区域变质作用等一系列地质事件, 标志着本区克拉通化的终结(孙大中等, 1991)。古元古代晚期开始, 华北克拉通与扬子克拉通碰撞挤压(孙继源等, 1995), 产生了大量西阳河群(相当于熊耳群)安山岩浆喷溢, 广泛出露于中条山中东部地区。

中条山地区的岩浆活动主要发生在古元古代, 其中绛县期火山喷发以钾质基性火山岩、石英斑岩、流纹岩、石英晶屑凝灰岩为主, 体现出双峰式火山岩组合特征; 中条期也喷发有钾质基性火山岩, 并有钙碱质斜长角闪岩产出。多期火山喷发活动携带了大量的成矿元素, 为区域成矿作用提供了丰

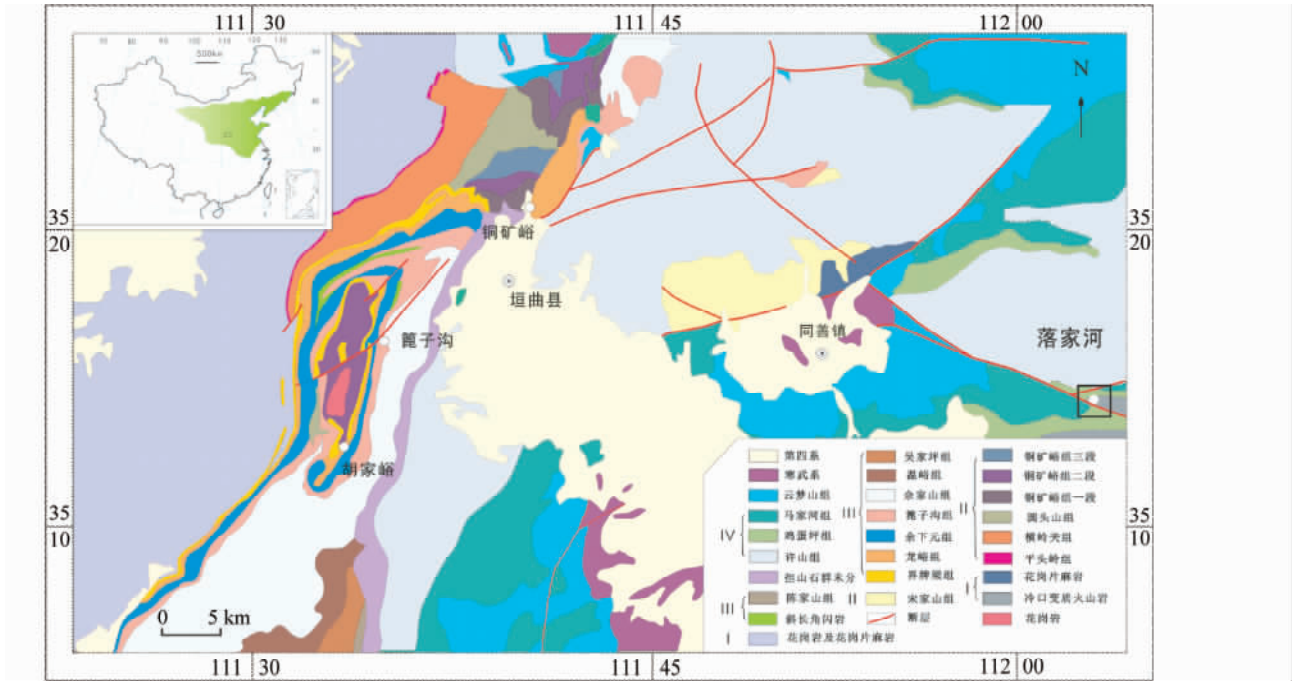


图1 中条山区域地质略图(据孙大中和胡维兴,1993 修改)

I-涑水杂岩; II-绛县群; III-中条群; IV-西阳河群

Fig.1 Geological sketch map of Zhongtiaoshan region (modified after Sun and Hu, 1993)

I-Sushui Complex; II-Jiangxian Group; III-Zhongtiaoshan Group; IV-Xiyanghe Group

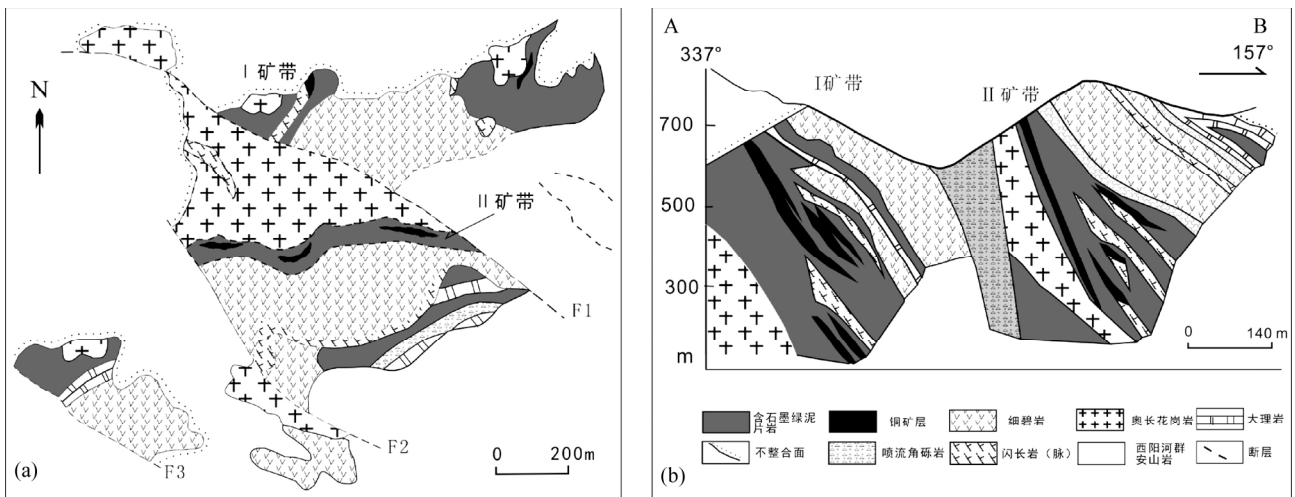


图2 落家河铜矿地质略图(据黄崇轲等 2001 修改)

Fig.2 Geological sketch map of Luojiache copper deposit (modified after Huang et al., 2001)

富的物质基础。

3 矿床地质特征

落家河铜矿区出露的地层主要有古元古界绛县群宋家山组、中元古界西阳河群鸡蛋坪组,侵入岩主要为奥长花岗岩和闪长岩。宋家山组地层出露于断裂形成的构造天窗内,

四周广泛出露西阳河群安山岩(图2a)。宋家山组为一套沉积-火山变质岩系,上部为变质陆源碎屑-碳酸盐建造,主要由白云质大理岩、喷流角砾岩和绢云绿泥片岩组成;下部以变钠质基性火山岩为主,主要岩性为细碧岩、绿泥石片岩、石墨绿泥石片岩夹绢云片岩等。铜矿体主要赋存于绿泥石片岩和石墨绢云绿泥石片岩内(图2b)。

落家河铜矿处于北西向展布的同善-落家河-王屋伸展构

造带上。矿区断裂构造发育,主要由3组近平行的北西向断层(F_1 、 F_2 、 F_3)组成,分别为铜里沟平移-逆断层、水出窑逆断层和铜沟逆断层(图2a)。这三条断层均属成矿后构造,对铜矿层起到破坏作用。矿区主要出露的侵入岩体为呈岩株状侵入的奥长花岗岩,部分地区有闪长岩脉侵入到绿泥石片岩层中。奥长花岗岩中硅质交代和钾质交代均很发育,与围岩接触界限清晰,为绛县期产物(Gu *et al.*, 1993; 孙继源等, 1995)。

落家河铜矿由断裂分割为英子岭-落家河(I矿带)、杨树坑(II矿带)、灰土凹(III矿带)三个矿带。其中I、II矿带原为同一矿带,被 F_1 断层错断分割。落家河铜矿床的赋矿岩石主要为石墨绿泥石片岩,矿体主要呈北东向展布。矿体产状与围岩基本一致,且具同步褶皱,层状、似层状产出。矿石构造以细脉浸染状、条带状、脉状及团块状为主。矿石矿物主要为黄铜矿和黄铁矿,还有少量斑铜矿、磁铁矿和赤铁矿等;氧化矿物有孔雀石、铜蓝、自然铜和褐铁矿;脉石矿物有绿泥石、绢云母、石英、方解石、石墨和电气石等。矿石矿物组合有黄铜矿-黄铁矿-斑铜矿-磁铁矿-黄铜矿-黄铁矿等,具明显分带性。矿区围岩蚀变发育,主要有硅化、碳酸盐化、石墨化、绢云母化和绿泥石化等。

真允庆等(1993)测定矿石中硫化物的Pb-Pb等时线年龄为2368Ma,另据孙大中(1993)测定宋家山组(赋矿地层)地层Rb-Sr等时线年龄为 2394 ± 26 Ma,奥长花岗岩锆石U-Pb等时线年龄为 2485 ± 1 Ma。野外观察显示,宋家山组上覆的西洋河群安山岩对落家河铜矿顶部进行了再次加热,在接触面形成了自然铜。孙大中(1991)对西洋河群进行了系统测年,认为其结晶年龄为1.83Ga。因此,落家河铜矿的成矿时代应为古元古代早期,奥长花岗岩的侵入与成矿作用有密切关系。

4 流体包裹体岩相学及显微测温研究

本次研究的样品主要采自落家河铜矿II矿带的含黄铜矿、黄铁矿石英脉。其中采自矿体上部的含矿石英脉样品3件,采自矿体底部的含矿石英脉样品6件。首先将样品磨制成0.2mm厚的双面抛光薄片,进行仔细的矿相学和流体包裹体岩相学观察,然后选择有代表性的薄片进行系统的包裹体显微测温研究和激光拉曼探针分析。

显微测温研究在中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室采用英国产Linkam MDS 600型冷热台完成。仪器经过人工合成流体包裹体标准样品的标定,测定温度范围为 $-196 \sim 600^\circ\text{C}$,在 $-100 \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内测量精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, $25 \sim 400^\circ\text{C}$ 范围内为 $\pm 1^\circ\text{C}$, 400°C 以上为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。在流体包裹体测试过程中,升温速率一般为 $0.2 \sim 5^\circ\text{C}/\text{min}$,水溶液包裹体在接近冰点时升温速率降至 $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$,在接近均一温度时升温速率降至 $0.2 \sim 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$,以准确记录相转变过程。

4.1 流体包裹体岩相学

系统的岩相学观察表明,落家河铜矿的含矿石英脉中含有多种类型的流体包裹体。根据Roedder(1984)提出的流体包裹体在室温下的相态分类方案,将落家河铜矿流体包裹体划分为5种类型(图3),现分述如下。

I型:纯气相包裹体,呈单一气相,大小 $3 \sim 15\mu\text{m}$,形态以椭圆状为主,长条状及不规则状包裹体也有产出(图3c)。该类包裹体较为常见,分散分布于主矿物内,为原生包裹体。

II型:纯液相包裹体,呈单一液相,大小 $1 \sim 26\mu\text{m}$,呈长条状、扁圆状及不规则状,数量很多。此类包裹体常成群出现在石英中,与I型包裹体共存,为原生包裹体(图3b)。

III型:富气相水溶液包裹体,气相成分占包裹体总体积50%以上,大小 $1 \sim 21\mu\text{m}$,主要呈椭圆状,数量较少,呈孤立状分布,为原生包裹体(图3a)。

IV型:富液相水溶液包裹体,液相成分占包裹体总体积50%以上,此类包裹体在石英中分布最广、数量最多。按包裹体成因类型(卢焕章等,2004)又可细分为原生富液相水溶液包裹体(IVa型)和次生富液相水溶液包裹体(IVb型)。IVa型:气液比变化于 $10\% \sim 30\%$,大小为 $6 \sim 25\mu\text{m}$,以扁圆状为主,长条状、方形及不规则状均有产出。该类包裹体为最常见的包裹体类型,孤立分布、成群分布均可观察到,为原生包裹体(图3b)。IVb型:此类包裹体大小为 $1 \sim 10\mu\text{m}$,主要集中在 $5\mu\text{m}$ 以下,分布非常规律,密集排列成线状穿插不同石英颗粒,数量极多,为典型的次生包裹体(图3h)。

V型:含子矿物多相包裹体,气液比为 $8\% \sim 25\%$,大小 $3 \sim 25\mu\text{m}$,主要集中在 $10 \sim 15\mu\text{m}$,呈椭圆状、长条状,孤立或成群分布。子矿物主要为石盐,其次为钾盐和方解石,还有部分为红褐色未知子矿物(图3d)。子矿物在包裹体中多数单个出现,但部分包裹体中存在多个子矿物(图3e),表明成矿流体具有高盐度特征。岩相学研究表明,含子矿物三相包裹体与纯气相包裹体(I型)联系紧密,常同时出现在同一视域(图3f、g),体现了沸腾包裹体组合的特征,暗示成矿流体可能发生了相分离过程。

岩相学观察结果显示,矿体上部的含矿石英脉中的流体包裹体主要以II型和IV型为主,未见到I型、III型和V型包裹体;矿体底部的含矿石英脉主要以V型包裹体和I型包裹体为主,此外还有一定量IV型包裹体和少量III型包裹体,I型和V型包裹体共存暗示流体可能经历过沸腾作用。由此可见,矿体不同空间位置的含矿石英脉中流体包裹体特征有明显区别。

4.2 流体包裹体显微测温研究

在详细的岩相学观察基础上,重点对(III型)富气相气液两相包裹体、(IVa型)富液相气液两相包裹体和(V型)含子矿物多相包裹体进行了显微测温研究。测温结果显示(表1),III型包裹体的初始熔化温度为 -21.2°C ,为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$

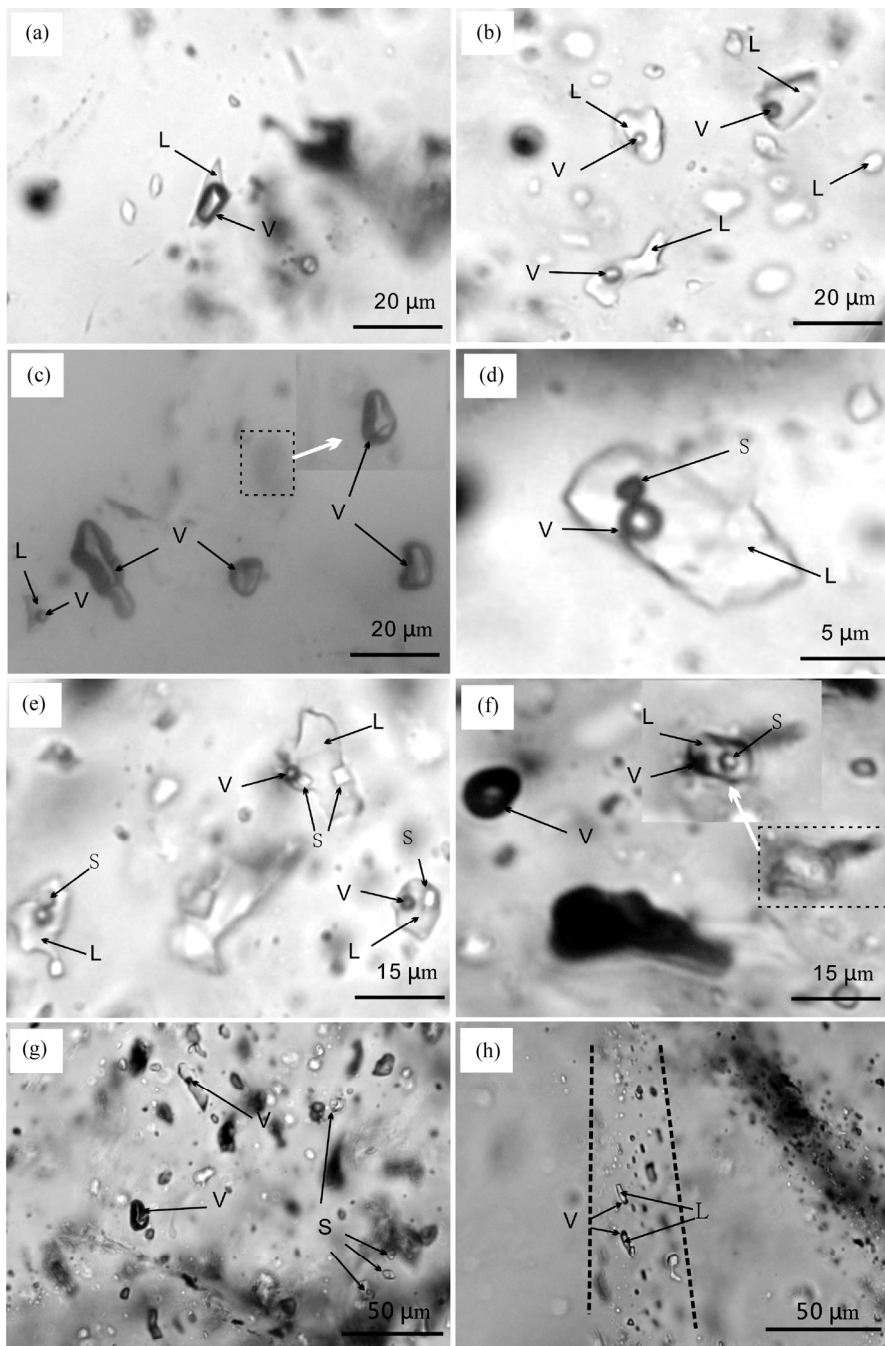


图3 落家河铜矿流体包裹体显微照片

(a) -富气相水溶液包裹体(III型);(b) -富液相水溶液包裹体(IVa1型)和纯液相包裹体(II型);(c) -纯气相包裹体(I型)(不同焦平面)和富液相水溶液包裹体(IVa2型);(d) -含未知子矿物的多相包裹体(V型);(e) -含石盐子矿物包裹体(V型);(f) -纯气相包裹体(I型)与含子矿物多相包裹体(V型)共存(不同焦平面);(g) -I型包裹体与V型包裹体和IVa1型包裹体共存;(h) -IVb型包裹体呈线状排列.S-子矿物;L-液相;V-气相

Fig.3 Photomicrographs of fluid inclusions in the Luojiahe copper deposit

(a) -vapor-rich aqueous fluid inclusions (III-type); (b) -liquid-rich aqueous fluid inclusions (IVa1-type) and pure aqueous fluid inclusions (II-type); (c) -pure vapor inclusions (I-type) and liquid-rich aqueous fluid inclusions (IVa2-type); (d) -multiple phases inclusions with unknown daughter mineral (V-type); (e) -multiple phases inclusions with halite daughter minerals (V-type); (f) -pure vapor phase inclusions (I-type) coexist with the daughter mineral-bearing inclusions (V-type); (g) -I-type inclusions coexist with the V-type inclusions and IVa1-type inclusions; (h) -IVb-type inclusions arrange linearly. S-daughter mineral; L-liquid phase; V-vapor phase

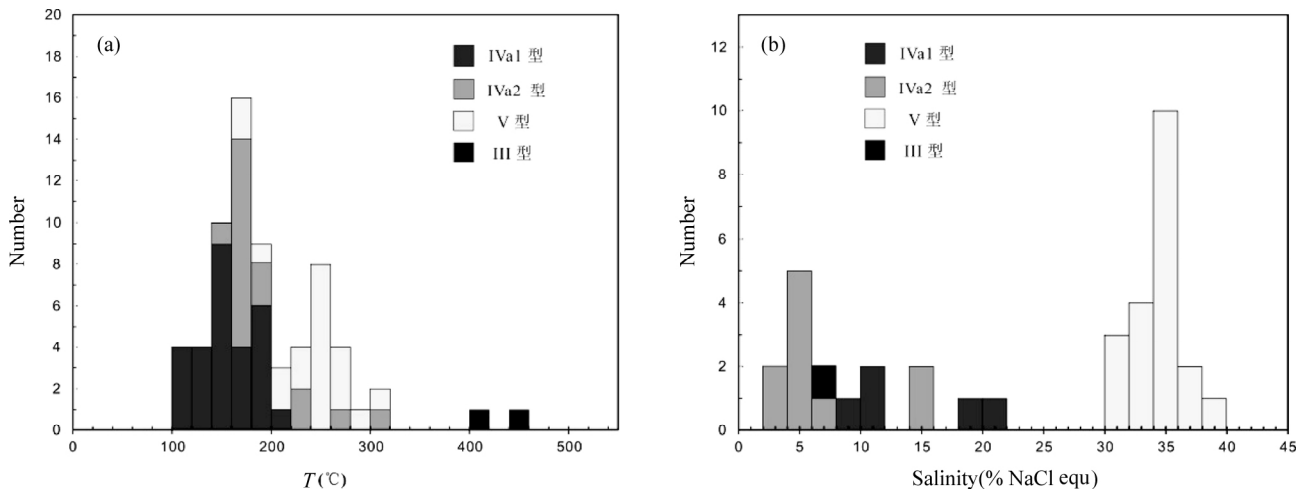


图4 石英中流体包裹体均一温度(a)和盐度(b)直方图

Fig. 4 Histogram of homogenization temperature (a) and salinity (b) for fluid inclusions in quartz

表1 落家河铜矿流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions of the Luojiahe copper deposit

包裹体类型	包裹体数 (个数)	均一温度 (°C)	盐度 (wt% NaCleqv)
III型	2	400~449	6.45
IVa1型	28	100~208	10.2~20.4
IVa2型	17	151~306	3.4~15.1
V型	20	175~300	30.7~38.2

流体体系,盐度在6.45% NaCleqv左右。IVa型包裹体的初熔温度有 -52°C 和 -21.2°C 两种,分别代表了 $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ 三元流体体系和 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 二元流体体系(后文称前者为IVa1型包裹体,后者为IVa2型包裹体)。从空间位置来看,IVa1型包裹体均位于矿体上部的含矿石英脉中,而IVa2型包裹体位于矿体底部靠近奥长花岗岩的含矿石英脉中,暗示该类包裹体可能具有不同的流体来源。将冰点温度测定结果换算成流体的盐度(Hall *et al.*, 1988)显示,IVa1型和IVa2型包裹体的盐度范围分别为10.2%~20.4% NaCleqv和3.4%~15.1% NaCleqv。V型包裹体的石盐子晶融化温度测定结果显示,其盐度区间为30.7%~38.2% NaCleqv(图4b)。

在升温过程中,发现V型含盐类子矿物三相包裹体均表现为气泡先消失、子晶后消失,最后均一至液相的特征,其均一温度区间为175~300°C(主要集中在240~280°C);III型包裹体的均一温度为400~449°C;IVa1型和IVa2型包裹体的均一温度区间分别为100~208°C和151~306°C(图4a)。

5 激光拉曼探针分析

单个流体包裹体的激光拉曼探针分析在中国科学院地

质与地球物理研究所流体包裹体实验室用法国HORIBA Scientific生产的LabRam HR800可见显微共焦拉曼光谱仪完成。光源为532nm氩激光器,输出功率为44mW,计数时间为10s,每 1cm^{-1} (波数)计数1次,100~4000 cm^{-1} 全波段一次取峰,激光束斑大小约为 $1\mu\text{m}$,光谱分辨率 0.65cm^{-1} ,测试之前使用单晶硅片对拉曼光谱进行校正,经校正使单晶硅片的拉曼位移对应 520.7cm^{-1} 。

激光拉曼探针分析表明,不同类型的流体包裹体的气相成分均显示出水的明显的包络峰。证明流体包裹体的气相成分主要为水(图5a-c),部分包裹体的气相成分中含有少量 CO_2 (图5a)。另外,拉曼光谱数据显示V型包裹体中存在方解石子矿物(图5d)。

6 讨论

6.1 成矿流体的性质

落家河铜矿床与成矿有关的含铜石英脉原生流体包裹体的均一温度范围较大,从 100°C 变化到 449°C ,表现出三个峰值,矿体上部和矿体底部的石英脉中的流体包裹体类型和均一温度有明显区别,暗示成矿流体可能具有多种来源。

气液两相包裹体的初熔温度测定结果显示,IVa型包裹体具有 $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ 体系和 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系两种不同类型的流体体系,均一温度、盐度数据进一步证实了两种体系包裹体的差异性,前者(IVa1型)的均一温度集中在100~208°C,盐度为10.2%~20.4% NaCleqv;后者(IVa2型)均一温度为151~306°C,盐度为3.4%~15.1% NaCleqv。海底热液成矿作用及古海水研究显示,前寒武纪的海水的盐度明显高于显生宙的海水,更高的盐度更有利于成矿金属元素的搬运(Huston *et al.*, 2010)。IVa1型包裹体很可能是下渗过程中被加热的海水从围岩中萃取了成矿金属元素后形成的低温中盐度热卤水(Franklin *et al.*, 1981; Ohmoto, 1996)。

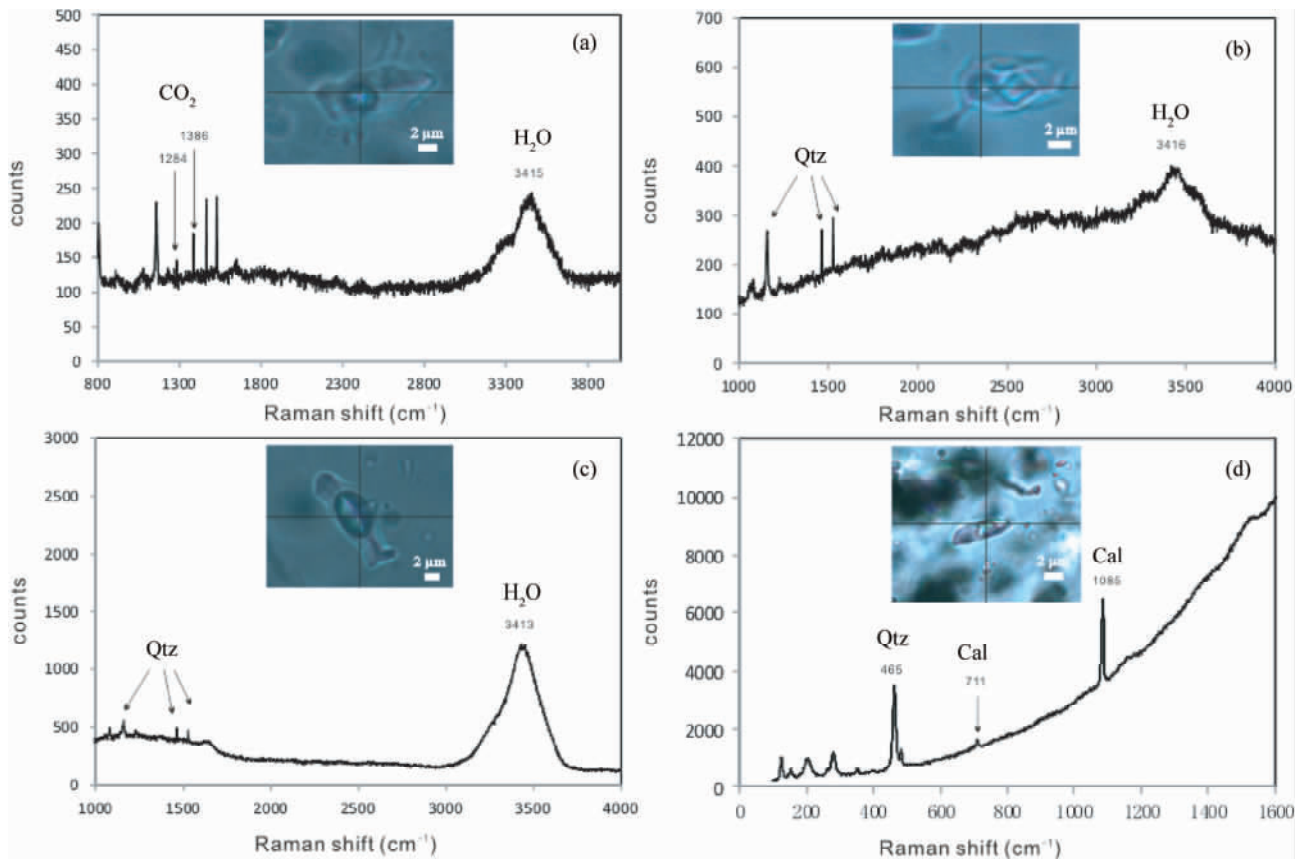


图5 落家河铜矿石英中流体包裹体的激光拉曼光谱

(a) -IVa2型包裹体,气相成分主要为H₂O,少数含有CO₂; (b) -V型包裹体,气相成分为H₂O; (c) -III型包裹体,气相成分为H₂O; (d) -V型包裹体,子矿物成分为方解石·Qtz-石英; Cal-方解石

Fig. 5 Laser Raman spectra for the fluid inclusions in quartz from the Luojiahe copper deposit

(a) -IVa2-type inclusions, the vapor phase is main of H₂O, a few inclusions contain CO₂; (b) -V-type inclusions, the vapor phase is H₂O; (c) -III-type inclusions, the vapor phase is H₂O; (d) -V-type inclusions, the daughter mineral is calcite. Qtz-quartz; Cal-calcite

IVa2型包裹体常与V型含子矿物包裹体及I型纯气相包裹体共存在一起,其均一温度范围与V型包裹体相近。V型含子矿物包裹体和I型纯气相包裹体共存同一视域内,体现了高盐度高密度和低盐度低密度两个端员的特征。虽然无法测定I型纯气相包裹体的均一温度,但普遍出现的这一组合仍能体现沸腾条件下捕获的特点,同时出现的IVa2型气液两相包裹体均一温度与V型包裹体相近,体现了不均一捕获的特征,指示中温中盐度的岩浆热液发生了沸腾作用。使其分离成中温较高盐度的液相(V型包裹体)和中温低盐度的气相(I型包裹体),同时残留有部分中温中盐度的岩浆流体(IVa2型)。

对于III型富气相水溶液包裹体,其均一温度范围为400~449℃,盐度为6.45% NaCleqv左右,代表高温富气相的流体端员。Henley and McNabb (1978)在研究斑岩铜矿时首次提出了水蒸气柱迁移成矿元素的观点, Yang and Scott (2002)指出岩浆去气作用是导致岩浆流体参与海底热液成矿作用的主要机制。侯增谦等(2003)对我国甘肃白银厂矿

床和四川岷村矿床两个典型的海相火山成因块状硫化物矿床进行了系统的流体包裹体研究,并详细地划分了参与海底热液成矿作用的流体端员。其所划分的高温富气流体端员的流体包裹体盐度和均一温度特征与落家河III型包裹体的特征相似,均为高温中等盐度的富气相气液两相包裹体。由此可见,III型包裹体可能是一种由于岩浆去气作用而产生的岩浆气流。

6.2 成矿流体的来源

海底热液成矿作用的流体来源一直是人们关注的科学问题(Bradshaw *et al.*, 2008; Skirrow and Franklin, 1994; Yang and Scott, 2005; Hou *et al.*, 2008)。早期提出的热液淋滤作用模型认为,在下渗过程中受到岩浆房加热的海水与岩石发生水岩反应,促使成矿元素富集于热卤水中(Franklin *et al.*, 1981)。Ohmoto *et al.* (1983)在研究日本黑矿的流体包裹体过程中,发现其 δD 、 $\delta^{18}O$ 和盐度与正常海水十分接近,认为成矿流体来源于海水。海水受深部岩浆

房驱动进行对流循环,从火山岩中获取了金属元素(刘亮明等,1997)。然而,随着包裹体研究的发展,越来越多的证据表明岩浆流体参与了海底热液成矿作用(Munhá *et al.*, 1986; Yang and Scott 2006)。Yang and Scott (1996)对西太平洋 Manus 弧后盆地的现代海底热液系统中的熔体包裹体进行了系统研究,发现包裹体的气相成分中存在高浓度的氯化物和硫化物,为岩浆流体参与海底热液成矿作用提供了直接证据。

落家河铜矿含铜石英脉的流体包裹体研究显示,均一温度和盐度变化范围较大。不同的流体类型暗示成矿流体可能具有多种来源。Bischoff and Dickson (1975)将海水和玄武岩在 200°C、500bar 的条件下共同放置 4752h,结果显示海水的成分从原始的 Na-Mg-SO₄-Cl 体系转变为 Na-Ca-Cl 体系,而且 Cu 和 Ni 进入了海水溶液中,证实了在较高的温度条件下海水可以萃取火山岩中的金属元素。落家河铜矿赋矿围岩的原岩恢复结果表明,赋矿围岩为角斑质火山碎屑岩和细碧质凝灰岩夹泥、砂、钙质正常沉积物,属火山-沉积岩建造(李继英,1986)。由此可见,代表中低温中盐度流体的 IVa1 型包裹体很可能来源于海水,海水被较深部的岩浆房加热并萃取了火山-沉积岩系中的金属元素,从而形成了 CaCl₂-NaCl-H₂O 体系的含矿热卤水。

夏林圻等(1985)在白银厂矿床石英钠长斑岩和石英角斑岩的石英斑晶中发现了中高温高盐度的流体包裹体,这些流体包裹体常以显微裂隙与脱玻化岩浆包裹体相连。侯增谦等(2003)在白银厂和呷村矿床下伏不整合脉状-网脉状带内发现了大量的含子晶多相包裹体和部分高温气液两相包裹体,证实了浅位岩浆房可以分离出高温岩浆流体。值得注意的是,落家河铜矿 V 型包裹体的均一温度和盐度范围与白银厂和呷村矿床的含子晶多相包裹体非常相近。对落家河铜矿底部花岗质侵入体的微量元素分析显示,花岗岩中铜的含量主要集中在 $619 \times 10^{-6} \sim 728 \times 10^{-6}$ 的区间内(未发表数据),显示出了较高的铜含量。因此,矿体底部奥长花岗岩侵入体也可能为落家河铜矿的形成提供了流体和成矿物质来源。

真允庆等(1993)对落家河铜矿矿体中的石英、方解石脉进行了 H-O 同位素分析,结果显示介质的变化区域较大,也表明流体具有多源性。其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 分析数据主要集中在 $-3.00\text{‰} \sim +2.36\text{‰}$ 和 $+4.00\text{‰} \sim +8.4\text{‰}$ 两个区段。前者代表了来源于古海水的成矿热卤水,而后的正高值与美国 Blue Hill 矿床、加拿大 KiddCreek 矿床等前寒武纪 VMS 矿床的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值极为接近(Beaty and Taylor 1982; Munhá *et al.*, 1986),基本位于岩浆水的范畴。

综上所述,代表中低温中盐度流体的 IVa1 型包裹体主要捕获自古海水,代表中温高盐度流体的 V 型包裹体则捕获了岩浆热液。

6.3 流体作用机制及矿床成因讨论

前已述及,落家河铜矿成矿流体主要有海水和岩浆水两

个端元。根据流体包裹体研究结果,作者认为两者具有不同的流体作用机制。海水下渗过程中受到下部岩浆房的热驱动形成了稳定长期的对流循环,在经过火山岩时发生了流体-岩石反应,萃取了火山岩中的金属元素,形成了 CaCl₂-NaCl-H₂O 体系的含矿热卤水。这种热的、高盐度流体在进入断裂裂隙时,温度降低、压力减小,改变了体系的物理化学平衡条件,导致成矿金属元素卸载并在较浅部沉淀成矿。下部岩浆房活动过程中,分离出部分中高温中盐度的含矿岩浆流体,这种较高温度的流体在运移至断裂通道时由于压力骤降发生了沸腾作用(Burnham, 1979; Pichavant *et al.*, 1982),分离成高盐度的液相和低盐度的气相,同时伴随着成矿元素在较深部沉淀。

落家河铜矿床形成于华北克拉通南缘的中条古元古代裂谷中,构造环境属于裂谷控制的拉张环境。矿区位于中条三叉裂谷东南支的王屋-落家河-同善伸展构造断裂带内,断裂构造发育,为成矿热液的运移提供了有利通道。原岩恢复结果表明,赋矿岩石为一套细碧角斑岩建造,是典型的 VMS 型矿床容矿岩石。铜矿体下部有多期的花岗质岩浆侵入活动,为海水对流循环系统提供了驱动力,同时也提供了部分岩浆热液和成矿物质。通过流体包裹体特征的对比分析,发现落家河铜矿的成矿流体特征与国内外许多典型 VMS 矿床有很多相似之处。从构造环境、热液通道、驱动机制和成矿流体特征四个方面来看,笔者认为落家河铜矿可能是一个前寒武纪海相火山成因块状硫化物矿床。

7 结论

(1) 落家河铜矿的初始成矿流体主要有两种,即来源于海水的含矿热卤水和从同期的花岗质岩浆中分离出的岩浆热液。IVa1 型包裹体初熔温度为 -52°C ,均一温度范围在 $100 \sim 208^\circ\text{C}$ 之间,盐度为 $10.2\% \sim 20.4\%$ NaCleqv,是 CaCl₂-NaCl-H₂O 体系的中低温中盐度流体,体现了海水来源的热卤水特征。IVa2 型和 V 型包裹体为 NaCl-H₂O 体系,均一温度分别为 $151 \sim 306^\circ\text{C}$ 和 $175 \sim 300^\circ\text{C}$,盐度范围分别为 $3.4\% \sim 15.1\%$ NaCleqv 和 $30.7\% \sim 38.2\%$ NaCleqv,具有岩浆热液特征。

(2) 不同来源的两种流体的流体作用机制有所不同。热卤水(IVa1 型包裹体)在下部岩浆活动的驱动下形成长期稳定的对流循环,并从火山岩中萃取了成矿金属元素,通过断裂通道上升,在降温、减压的条件下发生矿石的沉淀堆积。从岩浆中分离出来的中温中盐度流体(IVa2 型包裹体)在上升至断裂通道处由于压力骤降导致气相成分逸失并形成中温高盐度流体(V 型包裹体),表明流体发生了沸腾作用,伴随着成矿元素的卸载。

(3) 综合成矿构造环境、热液运移通道、驱动机制和成矿流体特征以及与典型 VMS 型矿床的对比,作者认为落家河铜矿床很可能是一个前寒武纪海相火山成因块状硫化物矿床。

致谢 野外工作得到中条山有色金属集团有限责任公司的的大力支持和包志伟副研究员的悉心指导; 流体包裹体研究工作获得了卢焕章教授和单强副研究员的宝贵建议, 以及杨武斌博士、刘玄博士和文博杰同学的热情帮助; 审稿人真允庆教授级高工、胡芳芳副研究员和刘吉强博士提出了诸多宝贵意见; 特在此一并表示感谢。

References

- Beatty DW and Taylor HP. 1982. Some petrologic and oxygen isotopic relationships in the Amulet Mine, Noranda, Quebec, and their bearing on the origin of Archean massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 77(1): 95–108
- Bischoff JL and Dickson FW. 1975. Seawater-basalt interaction at 200°C and 500bars: Implications for origin of sea-floor heavy-metal deposits and regulation of seawater chemistry. *Earth and Planetary Science Letters*, 25(3): 385–397
- Bradshaw GD, Rowins SM, Peter JM and Taylor BE. 2008. Genesis of the Wolverine volcanic sediment-hosted massive sulfide deposit, Finlayson Lake District, Yukon, Canada: Mineralogical, mineral chemical, fluid inclusion, and sulfur isotope evidence. *Economic Geology*, 103(1): 35–60
- Burnham CW. 1979. Magmas and hydrothermal fluids. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd Edition. US: John Wiley & Sons, 71–136
- Compile Group of Geology of Copper Deposits in Zhongtiao Mountain. 1978. *Geology of Copper Deposits in Zhongtiao Mountain*. Beijing: Geological Publishing House, 1–190 (in Chinese)
- Franklin J, Lydon J and Sangster D. 1981. Volcanic-associated massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 75: 485–627
- Gu LX, Liu XH, Zhen YQ and Wang YH. 1993. Rubidium-strontium and lead isotope geology of the Luojiahe granodiorite in the Zhongtiaoshan district. *Journal of Nanjing University (Nature Sciences Edition)*, 29(4): 651–657
- Hall DL, Sterner SM and Bodnar RJ. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions. *Economic Geology*, 83(1): 197–202
- Henley RW and McNabb A. 1978. Magmatic vapor plumes and ground-water interaction in porphyry copper emplacement. *Economic Geology*, 73(1): 1–20
- Hou ZQ, Li YQ, Zhang QL and Qu XM. 2003. End-members and mixing of fluids in submarine hydrothermal system: Evidence from fluid inclusions in the Baiyinchang and Gacun VMS deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 221–234 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Khin Z, Peter R, Li YQ, Qu XM, Song SH, Peng LG and Huang JJ. 2008. Geology, fluid inclusions, and oxygen isotope geochemistry of the Baiyinchang pipe-style volcanic-hosted massive sulfide Cu deposit in Gansu Province, northwestern China. *Economic Geology*, 103(1): 269–292
- Huang CK, Bai Y, Zhu YS *et al.* 2001. *Copper Deposit of China*. Beijing: Geological Publishing Press, 423–428 (in Chinese)
- Hu WX and Sun DZ. 1987. Mineralization and evolution of the Early Proterozoic copper deposits in the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 9(2): 152–165, 198 (in Chinese with English abstract)
- Huston DL, Pehrsson S, Eglington BM and Zaw K. 2010. The geology and metallogeny of volcanic-hosted massive sulfide deposits: Variations through geologic time and with tectonic setting. *Economic Geology*, 105(3): 571–591
- Li JY. 1986. Metallogenetic research of a new type copper deposit in Zhongtiaoshan. *Geology and Exploration*, (9): 17–23 (in Chinese)
- Liu LM, Peng XL and Wang ZR. 1997. Ore forming fluids of VMS deposits: Composition, origin and process mechanism. *Mineral Resources and Geology*, 11(6): 15–21 (in Chinese with English abstract)
- Lu HZ. 1997. *Ore-forming Fluid*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 120–151 (in Chinese)
- Lu HZ, Fan HR, Ni P *et al.* 2004. *Fluid Inclusion*. Beijing: Science Press, 406–419 (in Chinese)
- Munhó J, Barriga FJAS and Kerrich R. 1986. High ¹⁸O ore-forming fluids in volcanic-hosted base metal massive sulfide deposits; geologic, ¹⁸O/¹⁶O, and D/H evidence from the Iberian pyrite belt; Crandon, Wisconsin; and Blue Hill, Maine. *Economic Geology*, 81(3): 530–552
- Ohmoto H, Mizukami M, Drummond S, Eldridge C, Pisutha-Arnond V and Lenagh T. 1983. Chemical processes of Kuroko formation. *Economic Geology Monograph*, 5: 570–604
- Ohmoto H. 1996. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective. *Ore Geology Reviews*, 10(3–6): 135–177
- Pichavant M, Ramboz C and Weisbrod A. 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data. 1. Phase equilibria analysis: A theoretical and geometrical Approach. *Chemical Geology*, 37(1–2): 1–27
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy*, 12: 1–644
- Skirrow RG and Franklin JM. 1994. Silicification and metal leaching in semiconformable alteration beneath the Chisel Lake massive sulfide deposit, Snow Lake, Manitoba. *Economic Geology*, 89(1): 31–50
- Sun DZ, Hu WX, Tang M, Zhao FQ and Kent CC. 1990. Origin of Late Archean and Early Proterozoic rocks and associated mineral deposits from the Zhongtiao Mountains, east-central China. *Precambrian Research*, 47(3–4): 287–306
- Sun DZ, Li HM, Lin YX, Zhou HF, Zhao FQ and Tang M. 1991. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 65(3): 216–231 (in Chinese with English abstract)
- Sun DZ and Hu WX. 1993. *Precambrian Geochronology, Chronotectonic Framework and Model of Chronocrustal Structure of the Zhongtiao Mountains*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Sun JY, Ji SK and Zhen YQ. 1995. *The Copper Deposits in the Zhongtiao Rift*. Beijing: Geological Publishing House, 1–142 (in Chinese)
- Xia LY, Peng LG, Liu B and Xia ZC. 1985. Melt inclusions in quartz keratophyre at Baiyinchang. In: *Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource*. Beijing: Geological Society of China, 11: 1–8 (in Chinese)
- Yang KH and Scott SD. 1996. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, 383(6599): 420–423
- Yang KH and Scott SD. 2002. Magmatic degassing of volatiles and ore metals into a hydrothermal system on the modern sea floor of the eastern Manus back-arc basin, western Pacific. *Economic Geology*, 97(5): 1079–1100
- Yang KH and Scott SD. 2005. Magmatic sources of volatiles and metals for volcanogenic massive sulfide deposits on modern and ancient seafloors: Evidence from melt inclusions. In: *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Berlin: Springer-Verlag, 715–718
- Yang KH and Scott SD. 2006. Magmatic fluids as a source of metals in seafloor hydrothermal systems. *Geophysical Monograph Series*, 166: 163–184
- Zhai MG and Peng P. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665–2682 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24–36 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana*

Research, 24(1): 275–297

Zhen YQ and Xi ZR. 1990. Geochemical features of RE-elements in the Luojiahe Cu-deposit in Zhongtiao Mountain. *Geology and Exploration*, 26(12): 15–21 (in Chinese)

Zhen YQ, Du JS and Liu LL. 1993. The Zhongtiao Rift Zone and the Luojiahe Copper Deposit. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese)

附中文参考文献

侯增谦, 李荫清, 张绮玲, 曲晓明. 2003. 海底热水成矿系统中的流体端员与混合过程: 来自白银厂和呷村 VMS 矿床的流体包裹体证据. *岩石学报*, 19(2): 221–234

胡维兴, 孙大中. 1987. 中条山早元古代铜矿成矿作用与演化. *地质学报*, 9(2): 152–165, 198

黄崇轲, 白冶, 朱裕生等. 2001. 中国铜矿床. 北京: 地质出版社, 423–428

李继英. 1986. 中条山一个新型铜矿床的成因研究. *地质与勘探*, (9): 17–23

刘亮明, 彭省临, 王增润. 1997. VMS 矿床成矿流体的组成、来源及作用机制. *矿产与地质*, 11(62): 15–21

卢焕章. 1997. 成矿流体. 北京: 北京科学技术出版社, 120–151

卢焕章, 范宏瑞, 倪培等. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 406–419

孙大中, 李惠民, 林源贤, 周慧芳, 赵凤清, 唐敏. 1991. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. *地质学报*, 65(3): 216–231

孙大中, 胡维兴. 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社

孙继源, 冀树楷, 真允庆. 1995. 中条裂谷铜矿床. 北京: 地质出版社, 1–142

夏林圻, 彭礼贵, 刘斌, 夏祖春. 1985. 白银厂石英角斑岩中的岩浆包裹体. 见: 中国地质科学院西安地质矿产研究所文集. 北京: 中国地质学会, 11: 1–8

翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. *岩石学报*, 23(11): 2665–2682

翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. *矿床地质*, 29(1): 24–36

真允庆, 席增仁. 1990. 中条山落家河铜矿稀土元素地球化学特征及其地质意义. *地质与勘探*, 26(12): 15–21

真允庆, 杜继盛, 刘丽玲. 1993. 中条裂谷与落家河铜矿床. 武汉: 中国地质大学出版社

中条山铜矿地质编写组. 1978. 中条山铜矿地质. 北京: 地质出版社, 1–190