

· 矿产资源 ·

黑龙江嫩江地区三矿沟矽卡岩型铜-铁-钼多金属矿床的成矿流体特征与成矿机制

吕鹏瑞¹, 顾雪祥¹, 李德荣^{1,2}, 彭涛涛¹, 张明洋¹

LÜ Peng-rui¹, GU Xue-xiang¹, LI De-rong^{1,2}, PENG Tao-tao¹, ZHANG Ming-yang¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150036

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Heilongjiang Mining Group Co., Ltd., Haerbin 150036, Heilongjiang, China

摘要:三矿沟铜-铁-钼多金属矿床是大兴安岭地区三矿沟-多宝山构造-成矿带中一个比较典型的矽卡岩型矿床。对于矽卡岩阶段(Ⅰ)的石榴子石、湿矽卡岩-氧化物阶段(Ⅱ)的石英、早期硫化物阶段(Ⅲ)的石英和晚期硫化物阶段(Ⅳ)的方解石中的流体包裹体进行了岩相学观察和显微测温研究。研究表明,成矿各阶段热液矿物中的原生流体包裹体类型丰富,主要为气液两相包裹体,其次为纯气相包裹体,偶见纯液相包裹体。石英中也有大量含 NaCl 子矿物的多相包裹体,其均一温度变化于 152~478℃之间,盐度为 1.57~58.02wt% NaCl,密度变化范围为 0.64~1.18g/cm³,总体属中-高温、中-高盐度、中等密度的体系;据此计算的成矿压力范围为 39.44~133.65MPa,成矿深度介于 3.94~9.64km 之间,表明该矿床形成于中深成环境。

关键词:黑龙江嫩江地区;矽卡岩型;铜-铁-钼多金属矿床;流体包裹体;成矿流体

中图分类号:P618.41; P618.31; P618.65; P612

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)10-1563-12

Lü P R, Gu X X, Li D R, Peng T T, Zhang M Y. Ore-forming fluid characteristics and mineralization mechanism of the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo polymetallic deposit in Nenjiang area of Heilongjiang Province. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (10):1563-1574

Abstract: Located in the Sankuanggou-Duobaoshan tectonic-metallogenic belt of Da Hinggan Mountains, the Sankuanggou Cu-Fe-Mo polymetallic deposit is a typical skarn deposit. Petrographic observation and microthermometric study were carried out for fluid inclusions from garnet at the anhydrous skarn stage (Ⅰ), quartz at the hydrous skarn-oxide stage (Ⅱ), quartz at the early sulfide stage (Ⅲ) and calcite at the early late sulfide stage (Ⅳ). Petrographic observations reveal that various types of fluid inclusions are present in hydrothermal minerals of different ore-forming stages, comprising mainly vapor-liquid two-phase inclusions, subordinately vapor inclusions, and occasionally liquid inclusions as well as NaCl daughter mineral-bearing multiphase inclusions in quartz. Studies show that their homogenization temperatures vary from 152℃ to 478℃, their salinities are 1.57~58.02 wt% NaCl, and their densities range from 0.64 g/cm³ to 1.18 g/cm³, thus belonging to the ore-forming system of medium-high temperature, medium-high salinity and medium density. In addition, mineralization pressures were calculated on the basis of homogenization temperatures and salinities, and the results show that the mineralization pressures vary from 39.44 MPa to 133.65 MPa, whereas the ore-forming depths are in the range of 3.94 km to 9.64 km, indicating that this ore deposit was formed in a mesogene ore-forming environment.

Key words: skarn-type; Cu-Fe-Mo polymetallic deposit; fluid inclusions; ore-forming fluid; Nenjiang area of Heilongjiang

收稿日期:2011-04-25;修订日期:2011-06-01

资助项目:全国危机矿山接替资源找矿项目办公室《全国危机矿山接替资源找矿》项目(编号:200623016)

作者简介:吕鹏瑞(1984-),男,在读硕士,矿床学和矿床地球化学专业。E-mail:Lvpengrui0910@163.com

通讯作者:顾雪祥(1963-),男,教授,博士生导师,从事矿床学和矿床地球化学研究。E-mail:xuexiang_gu@cugb.edu.cn

三矿沟铜-铁-钼多金属矿床是大兴安岭地区三矿沟-多宝山构造-成矿带中一个比较典型的矽卡岩型矿床。前人对该成矿带的研究,大多侧重于成矿带中多宝山和铜山斑岩矿床的地质特征^[1]、矿床成因模式^[2]、成矿作用^[3]、成矿流体^[4-5]、成矿年代学^[6]、同位素地球化学^[7-8]等方面。三矿沟矽卡岩型铜-铁-钼多金属矿床自20世纪50年代被发现以来,仅有李之彤等^[9]研究了该矿床的地质特征,王洪瑜等^[10]研究了该矿床的地质特征及成因,刘军等^[11]研究了该矿床成矿物质的流体特征与成矿机制。本文在大量野外地质调查、室内岩矿鉴定、流体包裹体岩相学观察和显微测温的基础上,进一步探讨该矿床的成矿流体特征、成矿体系、成矿环境和成矿物质的沉淀机制。

1 地质背景

1.1 矿区地质概况

三矿沟铜-铁-钼多金属矿床的大地构造位置处于天山-兴蒙造山区大兴安岭岛弧系扎兰屯-多宝山岛弧上的三矿沟-多宝山北西向构造-成矿带的西北端(图1)。该成矿带位于嫩江和新开岭北东向岩石圈断裂之间的多宝山火山弧附近。

区内出露地层较为复杂,主要有奥陶系中统铜山组、下统裸河组,泥盆系中统腰桑南组和第四系。铜山组主要为凝灰质砂砾岩、凝灰质粉砂岩、长石石英砂岩、角岩化粉砂岩、角岩化云母长石砂岩,夹薄层板岩和大理岩;裸河组为角岩化粉砂岩,局部为云母石英角岩夹大理岩透镜体;腰桑南组主要为砂岩、杂砂岩、泥质板岩,夹变质粉砂岩和凝灰岩。其中,奥陶系是三矿沟铜-铁-钼多金属矿床的矿源岩和成矿围岩(图2)。

经过加里东、华力西、印支、燕山、喜山等多期构造运动以后,该矿区构造变形强烈、形式复杂多样,形成了各种背斜、向斜、断裂、环形构造和岩浆侵入穹隆。其中,花朵山向斜和大孤山-育宝山背斜是三矿沟矿床的主要赋矿构造,花朵山向斜中局部紧闭的直立地段是成矿的有利部位,为三矿沟矿床2号矿带提供了赋矿空间;大孤山-育宝山背斜局部地段形成紧闭背斜或倒转背斜,其鞍部及两翼是三矿沟矿床1号矿带的有利赋矿空间;北西向窝理河断裂、北东向三矿沟断裂和花朵山环形构造是三矿沟矿床的导矿构造。

三矿沟-多宝山成矿带岩浆活动强烈,具多旋

回、多期、多阶段、继承演化的特点^[12],先后经历了奥陶纪中加里东期岛弧型花岗闪长岩成矿作用、石炭纪造山型花岗闪长斑岩成矿作用、早三叠世基性—中酸性小岩体成矿作用、晚三叠期—中侏罗世中性—中酸性侵入岩体成矿作用、晚侏罗世—早白垩世岩浆成矿作用^[13]。区内晚印支期—燕山中期构造—岩浆—成矿作用最为强烈,侵入岩为印支晚期—燕山早期的三矿沟复式英云闪长岩体。

1.2 矿体特征

三矿沟铜-铁-钼多金属矿床位于花朵山环形构造的西部,北东向与北西向环状断裂的交会处。矿体赋存于大理岩与角岩的接触界面和大理岩的底部,特别是当包有薄层角岩的大理岩被英云闪长岩捕虏时,其底部或近底部的两侧常形成较厚的矿体,且铜铁共生。

该矿床在空间上可划分为3个矿带,包括5个主要矿体和80个次要矿体(图2)。矿体主要赋存于大理岩与角岩的接触界面和大理岩底部的矽卡岩中,总体呈小的扁豆状、似层状,其中主矿体主要呈似层状产出,扁豆状矿体常成群断续分布,总体产状随地层产状的变化而变化,其厚度沿走向或倾向呈现突然收缩、尖灭的现象。矿体产状主要有 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 、 $30^{\circ}\sim 86^{\circ}$ 、 $103^{\circ}\sim 35^{\circ}\sim 86^{\circ}$ 、 $212^{\circ}\sim 227^{\circ}\sim 53^{\circ}\sim 68^{\circ}$ 。主要矿体中较大的矿体长254m,最大厚度13.6m,平均厚度4.53m,最大延深100m;较小者长25~80m,平均厚度1.02~4.15m,延深小于70m。3个矿带中铜的品位分别为0.37%~10.79%、0.43%~1.92%、1.64%^{①②③}。

1.3 矿石特征

矿石矿物主要有黄铜矿、斑铜矿、蓝铜矿、孔雀石、磁铁矿、辉钼矿,脉石矿物主要有石榴子石、方解石、石英、绿帘石、绿泥石、赤铁矿。矿石结构主要有它形粒状结构、半自形粒状结构、自形粒状结构、短柱状结构、针状结构、放射状结构、粒状连晶或固溶体分离结构、假像结构或填隙结构。矿石构造主要有团块状构造、胶状构造、浸染状构造、钟乳状或皮壳状构造、角砾状构造。其中,斑铜矿、黄铜矿、磁铁矿与钙铁石榴子石密切共生;辉钼矿与透辉石、石英密切共生;镜铁矿与磁铁矿密切共生;银金矿与斑铜矿、黄铜矿密切共生;孔雀石与蓝铜矿密切共生;黄铜矿和磁铁矿共生,常呈浸染状分布于磁铁矿内或脉石矿物间;斑铜矿与黄铜矿呈粒状连晶或固溶体分离结构,或被黄铜矿包裹。

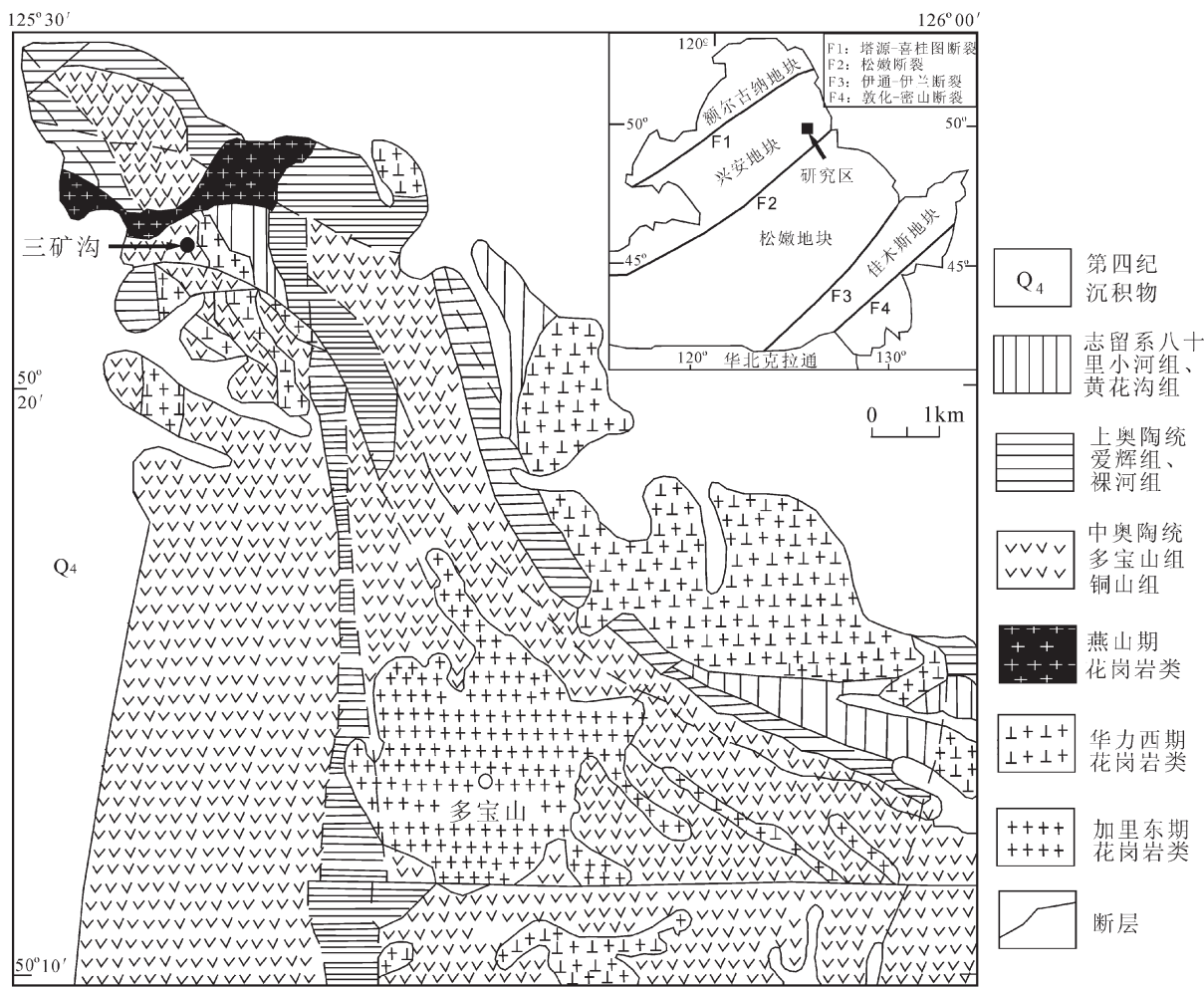


图 1 三矿沟-多宝山成矿带区域地质图^[14]

Fig. 1 Regional geological map of the Sankuanggou-Duobaoshan metallogenic belt

1.4 围岩蚀变和成矿阶段

矿体围岩主要有石榴子石矽卡岩、透辉石矽卡岩、流纹斑岩、大理岩、黑云母石英角岩,其次为硅灰石矽卡岩、长石石英角岩、闪石角岩等。围岩蚀变以矽卡岩化为主,绿帘石化、绿泥石化、钾化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化、黄铁矿化等次之。矽卡岩化是在接触交代时期形成的,与成矿作用关系密切,矿体大多产于石榴子石矽卡岩和透辉石矽卡岩中,其中铁铜矿体产于粒状钙铁石榴子石矽卡岩中,钼矿体产于晶洞构造发育的钙铁石榴子石矽卡岩或黑云母石英角岩中的透辉石矽卡岩中。绿泥石化、绿帘石化、钾化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化、黄铁矿化等是晚期岩浆热液充填交代的产物,多发育于矽卡岩、大理岩、角

岩等岩石的空洞和裂隙中。

该矿区主要发育印支晚期—燕山早期的三矿沟复式英云闪长岩体,岩体主要由英云闪长岩、花岗闪长岩和碱长花岗岩组成。英云闪长岩总体环绕花朵山呈环形分布,局部相变为花岗岩、花岗闪长岩和斑状花岗岩。当英云闪长岩侵入大理岩时,在内、外接触带均可形成矽卡岩,并具有黄铜矿化和黄铁矿化;碱长花岗岩呈小岩株状或不规则岩枝状侵入于地层或英云闪长岩中,形成辉钼矿化。根据成矿过程中矿物生成的顺序可将该矿床的成矿作用过程分为矽卡岩阶段(Ⅰ,透辉石、石榴子石、硅灰石)、湿矽卡岩—氧化物阶段(Ⅱ,绿帘石、磁铁矿、镜铁矿、石英)、早期硫化物阶段(Ⅲ,磁铁矿、黄铁矿、斑铜矿、黄铜矿、辉钼矿、银金矿、绿泥石、

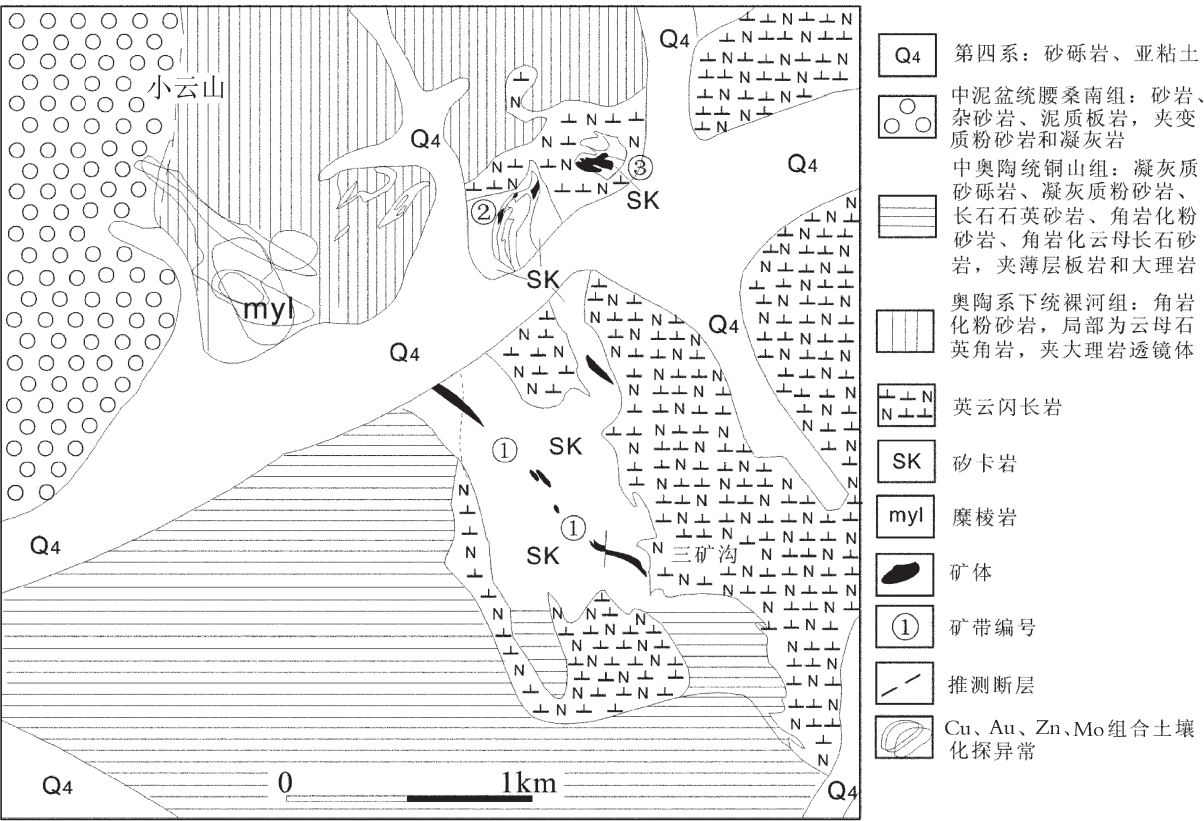


图 2 三矿沟铜-铁-钼多金属矿床地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Sankuanggou Cu-Fe-Mo polymetallic deposit

石英)和晚期硫化物阶段(Ⅳ,黄铜矿、闪锌矿、方解石)^{①②③}。

2 流体包裹体分析

2.1 样品采集和分析方法

本文测试分析样品均采自三矿沟铜-铁-钼多金属矿床的钻孔岩心,采样时尽量选取代表不同成矿阶段的样品。包裹体岩相学观察和显微测温在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院包裹体实验室完成,使用仪器为英国产 Linkam THMS600 型冷热台,技术参数为:铂电阻传感器,测温范围-196~600℃,温度显示 0.01℃,控制稳定温度±0.01℃,光孔直径 1.3mm,样品轴向移动 16mm,加热/冷冻速率 0.01~130℃/min。仪器标定采用标准物质(KNO₃、K₂CrO₃、CCl₄ 和人工配制的 NaCl 标准溶液),400℃时相对于标准物质误差为±2℃,-22℃时误差为±0.1℃。在加热或冷冻过程中设置的控温速率一般为 20℃/min,在相变点附近速率小于 2℃/min。

2.2 包裹体岩相学特征

本次研究中用于岩相学观察和显微测温的流体包裹体寄主矿物主要有 1 件代表干砂卡岩阶段(Ⅰ)的石榴子石、1 件代表湿砂卡岩-氧化物阶段(Ⅱ)的石英、4 件代表早期硫化物阶段(Ⅲ)的石英和 3 件代表晚期硫化物阶段(Ⅳ)的方解石。

流体包裹体岩相学观察表明,三矿沟铜-铁-钼多金属矿床石榴子石、石英和方解石中的流体包裹体主要为原生包裹体,次生包裹体很少,且原生包裹体主要为气液两相包裹体(图版 I-A、B、C、E、G、I、J、M、N、O、P),其次为纯气相包裹体(图版 I-B、C、G、H、K),也有少量纯液相包裹体(图版 I-C、G、L),石英中也有大量含 NaCl 子矿物的多相包裹体(图版 I-D、F、N、O)。各类热液矿物中的流体包裹体大小不一,最小者小于 1μm,最大者约 60μm,大多为 3~30μm。室温(25℃)条件下气泡一般都比较小,气液相比变化于 3%~60%之间,大多为 5%~30%。包裹体形态各异,主要有椭圆形、长方形、三角形、长

条形、多边形、不规则状等,通常呈星散状或孤立状随机分布。

不同热液矿物中流体包裹体的类型和组合特征有一定的差异,反映了不同成矿阶段流体的演化特征。石榴子石中包裹体较少,呈孤立状随机分布,最小者小于 $1\mu\text{m}$,最大者 $12\sim 13\mu\text{m}$,多数为 $3\sim 8\mu\text{m}$,形态主要为不规则状和长条形。原生包裹体主要为气液水两相包裹体、气液两相有机包裹体和纯气相有机包裹体(图版 I-B),偶见纯气相水包裹体和纯液相水包裹体(图版 I-C),气液两相包裹体气泡一般较大,多呈椭圆形且颜色较深,室温(25°C)条件下气液相比多数为 $5\%\sim 60\%$ 。

石英中流体包裹体主要呈不规则状、椭圆形等,原生包裹体总体呈星散状或孤立状随机分布。包裹体最小者小于 $3\mu\text{m}$,最大者约 $60\mu\text{m}$,多数为 $3\sim 30\mu\text{m}$,主要为气液水两相包裹体(图版 I-E、G)和含 NaCl 子矿物的多相包裹体(图版 I-D、F、N、O),偶见纯气相水包裹体(图版 I-G、H)和纯液相水包裹体(图版 I-G),室温(25°C)条件下气液两相包裹体气液比约为 $3\%\sim 60\%$,多数为 $5\%\sim 30\%$ 。NaCl 子矿物均为透明矿物,一般呈立方体,加热时大部分包裹体气泡先消失,子矿物后消失,最后均一到液相;也有部分包裹体子矿物先消失,气泡后消失,最后均一到气相。

方解石中流体包裹体数量较石英相对偏少,总体呈孤立状随机分布。原生包裹体形态多样,呈不规则状、长方形、长条形、椭圆形、多边形等。包裹体一般个体较小,最小者小于 $1\mu\text{m}$,最大者约 $14\mu\text{m}$,多数 $4\sim 12\mu\text{m}$ 。原生包裹体类型以气液水两相包裹体为主(图版 I-I、J),偶见纯液相有机包裹体(图版 I-K)和纯气相水包裹体(图版 I-L)。气液两相包裹体的气相填充度多数为 $5\%\sim 50\%$ 。

2.3 成矿物理化学条件

2.3.1 均一温度

本次研究对不同成矿阶段热液矿物中普遍发育的原生气液两相包裹体和含 NaCl 子矿物的多相包裹体进行了均一温度测定,测定结果见表 1 和图 3。

I 阶段石榴子石中气液两相包裹体的均一温度为 $422\sim 478^\circ\text{C}$,平均值为 449°C (表 1)。II 阶段石英中气液两相包裹体的均一温度为 $255\sim 392^\circ\text{C}$,平均为 317°C ;含 NaCl 子矿物多相包裹体的气相均一温度为 $315\sim 387^\circ\text{C}$,平均为 350°C (表 1、图 3)。III 阶段

中石英包裹体均一温度变化较大,介于 $178\sim 352^\circ\text{C}$ 之间,其中与磁铁矿-黄铜矿共生的石英脉中气液两相包裹体的均一温度较高,变化于 $223\sim 337^\circ\text{C}$ 之间,平均为 299°C ;与黄铜矿共生的石英脉中气液两相包裹体的均一温度较低,介于 $178\sim 330^\circ\text{C}$ 之间,平均为 258°C ;含 NaCl 子矿物多相包裹体的气相均一温度为 $216\sim 311^\circ\text{C}$,平均为 259°C (表 1、图 3)。IV 阶段方解石中包裹体的均一温度变化也较大,介于 $152\sim 289^\circ\text{C}$ 之间。其中,与黄铜矿共生的方解石脉中包裹体的均一温度较高,介于 $171\sim 289^\circ\text{C}$ 之间,平均为 249°C ;与闪锌矿共生的方解石脉中包裹体的均一温度较低,介于 $152\sim 253^\circ\text{C}$ 之间,平均为 206°C (表 1、图 3)。

总体来看,该矿床属中—高温流体成矿,从干矽卡岩阶段→湿矽卡岩—氧化物阶段→早期硫化物阶段→晚期硫化物阶段,成矿流体的温度呈现从 $422\sim 478^\circ\text{C}\rightarrow 255\sim 392^\circ\text{C}\rightarrow 178\sim 337^\circ\text{C}\rightarrow 152\sim 289^\circ\text{C}$ 递减的趋势,表明随着成矿作用的进行,成矿流体有较为明显的降温趋势。后 3 个阶段的均一温度有重合区间,反映成矿流体的连续演化过程。

2.3.2 盐度

矿床中包裹体的类型主要为气液两相包裹体,石英中也发育大量含 NaCl 子矿物的多相包裹体。本次研究先通过冷热台测定流体包裹体的冰点温度和 NaCl 子晶的融化温度,然后再通过冰点温度或 NaCl 子晶融化温度来计算流体的盐度。

气液两相包裹体冰点温度与盐度之间的计算公式为^[14]:

$$S=0.00+1.78\theta-0.0442\theta^2+0.000557\theta^3$$

式中, S 表示盐度(wt% NaCl), θ 表示冰点温度($^\circ\text{C}$)。冰点温度测试结果和计算的盐度值见表 1、图 3。

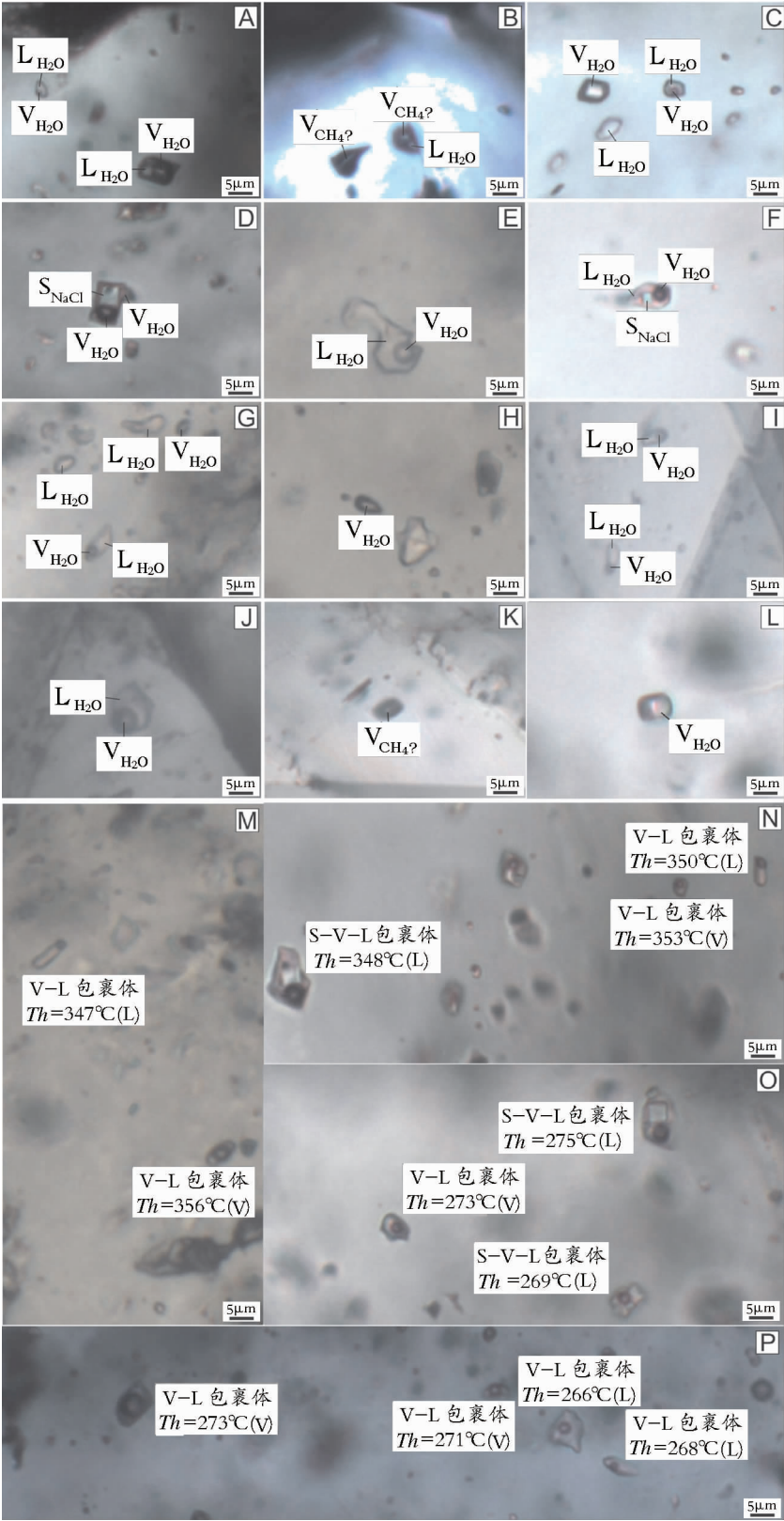
含 NaCl 子矿物的多相包裹体子晶融化温度与盐度的关系式为^[15]:

$$S=26.242+0.4928\varphi+1.42\varphi^2-0.223\varphi^3+0.04129\varphi^4+0.006295\varphi^5-0.001967\varphi^6+0.0001112\varphi^7$$

此公式的应用范围为 $0.1^\circ\text{C}\leq T\leq 801^\circ\text{C}$,其中 S 表示盐度(wt% NaCl), T 表示 NaCl 子晶融化温度($^\circ\text{C}$), $\varphi=T/100$ 。NaCl 子晶的融化温度测试结果和计算的盐度值见表 1、图 3。

I 阶段石榴子石中气液两相包裹体的盐度为 $14.25\sim 19.53\text{wt}\%$ NaCl,平均值为 $16.40\text{wt}\%$ NaCl(表 1)。II 阶段石英中气液两相包裹体的盐度变化范围

图版 I Plate I



A. I 阶段石榴子石中的气液两相包裹体;B. I 阶段石榴子石中气液两相包裹体、纯气相包裹体共生;C. I 阶段石榴子石中气液两相包裹体、纯气相包裹体、纯液相包裹体共生;D. II 阶段石英中含 NaCl 子矿物多相包裹体;E. II 阶段石英中的气液两相包裹体;F. III 阶段石英中含 NaCl 子矿物多相包裹体;G. III 阶段石英中气液两相包裹体、纯气相包裹体、纯液相包裹体共生;H. III 阶段石英中的纯气相包裹体;I. IV 阶段方解石中的气液两相包裹体;j. IV 阶段方解石中气液两相包裹体;K. IV 阶段方解石中的纯气相包裹体;L. IV 阶段方解石中的纯液相包裹体;M. II 阶段石英中不同相比的气液两相包裹体共存及其均一温度值;N. II 阶段石英中气液两相包裹体与含 NaCl 子矿物多相包裹体共生及其均一温度值;O. III 阶段石英中气液两相包裹体与含 NaCl 子矿物多相包裹体共生及其均一温度值;P. III 阶段石英中不同相比的气液两相包裹体共存及其均一温度值。
 L_{H_2O} —液相水, V_{H_2O} —气相水, $V_{CH_4?}$ —可能为气相甲烷, S_{NaCl} —NaCl 子矿物, V-L—气液两相,S-V-L—含子晶多相

表 1 三矿沟铜-铁-钼多金属矿床各成矿阶段代表性矿物中流体包裹体的均一温度、冰点温度和盐度

Table 1 Microthermometric, freezing temperature and salinity data of fluid inclusions within representative minerals from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo polymetallic deposit at various mineralization stages

样品编号	样品类型 /成矿阶段	包裹 体类型	均一温度/℃		冰点温度/℃		子晶融化温度/℃		气泡消失温度/℃		盐度/wt% NaCl	
			变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值
ZK2-2-9	石榴子石矽卡岩/I	V-L	422~478(7)	449	-16.1~-10.3(7)	-12.6					14.25~19.53(7)	16.40
ZK 1020-4-3	与磁铁矿共 生的石英/II	V-L	255~392(21)	317	-10.9~-4.4(21)	-6.7					7.02~14.87(21)	10.10
	与磁铁矿-黄铜矿 共生的石英/III	S-V-L					259~487(10)	397	315~387(10)	350	36.19~58.02(10)	47.78
ZK104-9	与黄铜矿共 生的石英/III	V-L	223~337(14)	299	-8.3~-3.2(14)	-5.5					5.26~12.05(14)	8.47
ZK104-7	与黄铜矿共 生的石英/III	V-L	202~330(18)	273	-5.6~-2.7(18)	-4.4					4.49~8.68(18)	7.05
YM2-1	与黄铜矿共 生的石英/III	V-L	197~319(16)	265	-5.3~-2.0(16)	-3.9					3.39~8.28(16)	6.20
	与黄铜矿共 生的石英/III	S-V-L					174~352(21)	274	216~311(21)	259	30.65~42.59(21)	36.49
ZK0-1-2	与黄铜矿共 生的石英/III	V-L	178~323(16)	237	-4.5~-2.1(16)	-3.4					3.55~7.17(16)	5.52
ZK101-1-4	与黄铜矿共 生的方解石/IV	V-L	171~289(16)	249	-4.7~-1.7(16)	-3.0					2.90~7.45(16)	4.92
ZK101-1-3	与闪锌矿共 生的方解石/IV	V-L	154~253(24)	211	-3.7~-1.2(24)	-2.5					2.07~6.01(24)	4.10
ZK104-6	与闪锌矿共 生的方解石/IV	V-L	152~237(18)	200	-3.6~-0.9(18)	-2.4					1.57~5.86(18)	3.92

注:V-L 为气液两相包裹体;S-V-L 为含 NaCl 子矿物的多相包裹体

为 7.02~14.87wt% NaCl,平均值为 10.10 wt%NaCl;含 NaCl 子矿物多相包裹体的盐度为 36.19~58.02 wt% NaCl,平均值为 47.78wt% NaCl(表 1、图 3)。Ⅲ阶段中,与磁铁矿-黄铜矿共生的石英脉中气液两相包裹体的盐度较高,为 5.26~12.05wt% NaCl,平均值为 8.47wt% NaCl;与黄铜矿共生的石英脉中气液两相包裹体的盐度较低,介于 3.39~8.68wt% NaCl 之间,平均值为 6.26wt% NaCl;含 NaCl 子矿物多相包裹体盐度的变化范围为 30.65~42.59wt% NaCl,平均值为 36.49wt% NaCl(表 1、图 3)。Ⅳ阶段中,与黄铜矿共生的方解石脉中包裹体的盐度较高,介于 2.90~7.45wt% NaCl 之间,平均值为 4.92wt% NaCl;与闪锌矿共生的方解石包裹体的盐度较低,为 1.57~6.01wt% NaCl,平均值为 3.96wt% NaCl(表 1、图 3)。

三矿沟铜-铁-钼多金属矿床流体包裹体的盐度变化范围非常大(1.57~58.02wt% NaCl),Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳ阶段总体呈现出由中—高盐度→中等盐度→中—低盐度→低等盐度的变化趋势,但总体显示中—高盐度的特征。其中,Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英中发育大量含子矿物的多相包裹体和气液两相包裹体,流体包裹体分别出现高盐度与中等盐度或中低盐度共存的现象(图 4),同一视域中常见相比变化

很大的气液两相包裹体共存或气液两相包裹体与含子矿物多相包裹体共生(图版Ⅰ-M、N、O、P)的现象,并且显微测温数据表明共生的不同类型包裹体的均一温度相近,表明这 2 个阶段存在沸腾包裹体群。此外,成矿流体盐度的降低可能与后期大气降水的加入有一定的关系。

2.3.3 密度

NaCl-H₂O 溶液包裹体的密度计算公式如下^[16-17]:

$$D=A+Bt+Ct^2$$

式中,D—流体密度(g/cm³);t—均一温度(℃);A、B、C 为无量纲参数,它们又是盐度的函数:A=A₀+A₁W+A₂W²,B=B₀+B₁W+B₂W²;C=C₀+C₁W+C₂W²,式中 W 为含盐度(wt% NaCl),A₀、A₁、A₂、B₀、B₁、B₂、C₀、C₁、C₂ 均为无量纲参数,其数值如下:

(1)均一温度≤500℃、含盐度≤30wt% NaCl 时:

$$\begin{aligned} A_0 &= 0.993531, A_1 = 8.72417 \times 10^{-3}, A_2 = -2.43975 \times 10^{-5} \\ B_0 &= 7.11652 \times 10^{-5}, B_1 = -5.2208 \times 10^{-5}, B_2 = 1.26656 \times 10^{-6} \\ C_0 &= -3.4997 \times 10^{-6}, C_1 = 2.12124 \times 10^{-7}, C_2 = -4.52318 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

(2)当盐度≥23.3wt% NaCl~<60wt% NaCl 时:

$$\begin{aligned} A_0 &= 1.376294, A_1 = 0.0106328, A_2 = -2.449428 \times 10^{-4} \\ B_0 &= -2.752237 \times 10^{-3}, B_1 = 1.324187 \times 10^{-5}, B_2 = 6.503339 \times 10^{-7} \\ C_0 &= 1.703392 \times 10^{-6}, C_1 = -1.49158 \times 10^{-8}, C_2 = -4.020795 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

把不同成矿阶段热液矿物中原生包裹体的均一温度和盐度值代入密度计算公式, 得出各阶段代表性矿物中流体包裹体的密度, 计算结果见表 2。

由表 2 可以得出, 成矿流体的密度介于 0.64~

1.18g/cm³ 之间, 平均为 0.86g/cm³, 其中 II 阶段和 III 阶段石英中含 NaCl 子矿物多相包裹体的密度范围分别为 0.99~1.18g/cm³ (平均 1.1g/cm³) 和 1.06~1.16g/cm³ (平均 1.12g/cm³), 表明成矿流体总体属于

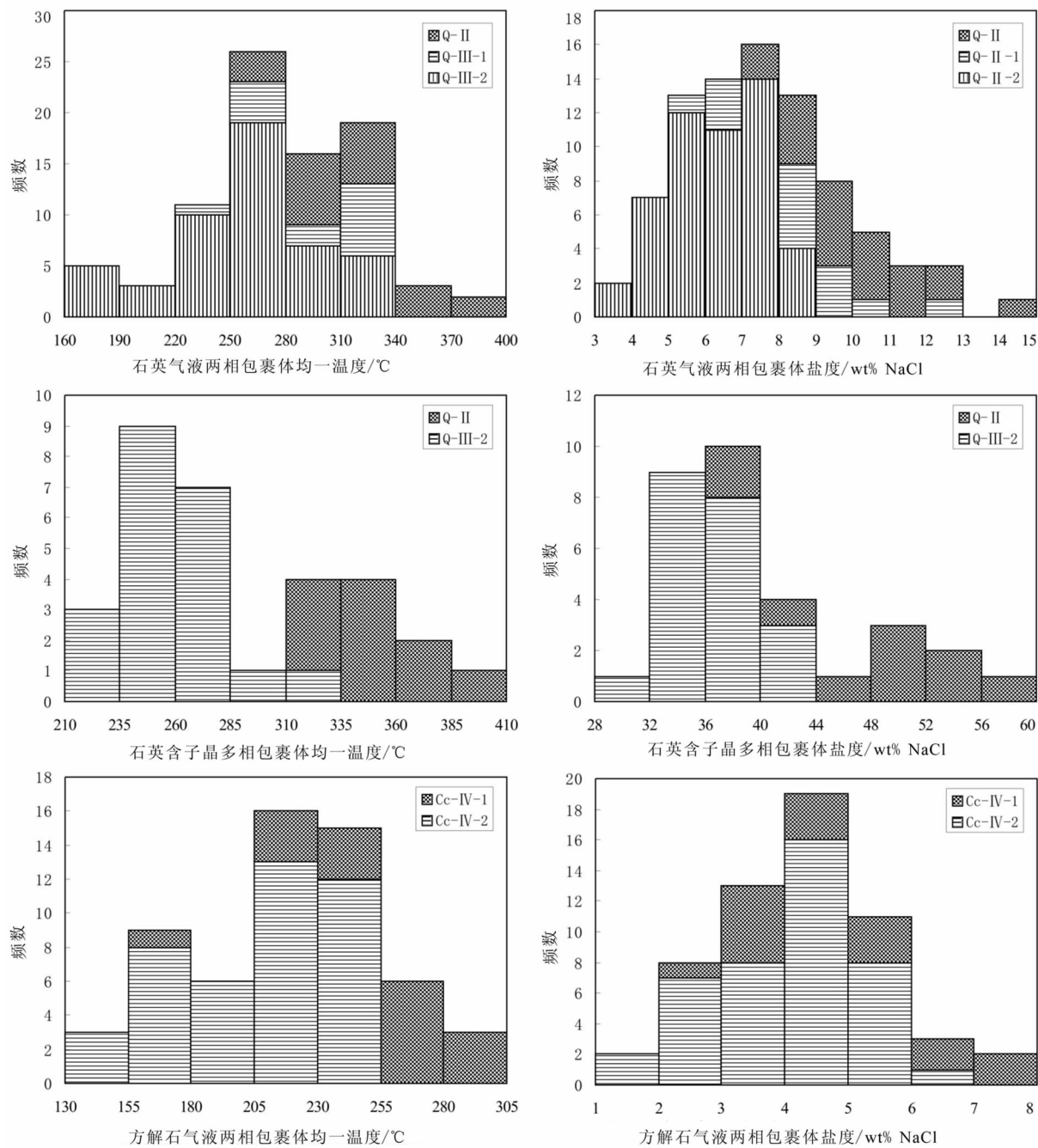


图 3 三矿沟铜-铁-钼多金属矿床中流体包裹体的均一温度和盐度频数直方图

Fig. 3 Histogram showing homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo polymetallic deposit

Q-II—II 阶段中的石英; Q-III-1—III 阶段中与磁铁矿-黄铜矿共生的石英; Q-III-2—III 阶段中与黄铜矿共生的石英; Cc-IV-1—IV 阶段中与黄铜矿共生的方解石; Cc-IV-2—IV 阶段中与闪锌矿共生的方解石

中等密度的体系。随着均一温度和盐度的不断降低,矿床成矿流体的密度逐渐增大(从Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅲ阶段,气液两相包裹体的密度由0.64~0.73g/cm³→0.69~0.86g/cm³→0.71~0.92g/cm³→0.80~0.95g/cm³,平均值由0.68g/cm³→0.79g/cm³→0.82g/cm³→0.90g/cm³;从Ⅱ→Ⅲ阶段,含NaCl子矿物多相包裹体的密度由0.99~1.18g/cm³→1.06~1.16g/cm³,平均值1.11g/cm³→1.12g/cm³),但总体变化不大。

2.3.4 成矿压力与成矿深度

邵洁涟等^[18]依据以往的研究经验,得出了成矿

压力的经验计算公式,通过各阶段代表性矿物流体包裹体的均一温度和盐度值可计算出三矿沟铜-铁-钼多金属矿床各阶段代表性矿物的成矿压力,计算结果见表2。

成矿压力与成矿深度的计算公式为:

$$T_0=374+920\times S(^{\circ}\text{C})$$

$$P_0=219+2620\times S(10^5\text{Pa})$$

$$P=P_0\times T_t/T_0(10^5\text{Pa})$$

式中, T_0 为初始温度(°C), T_t 为包裹体的均一温度(°C), S 为流体的盐度(wt% NaCl), P_0 为初始压力

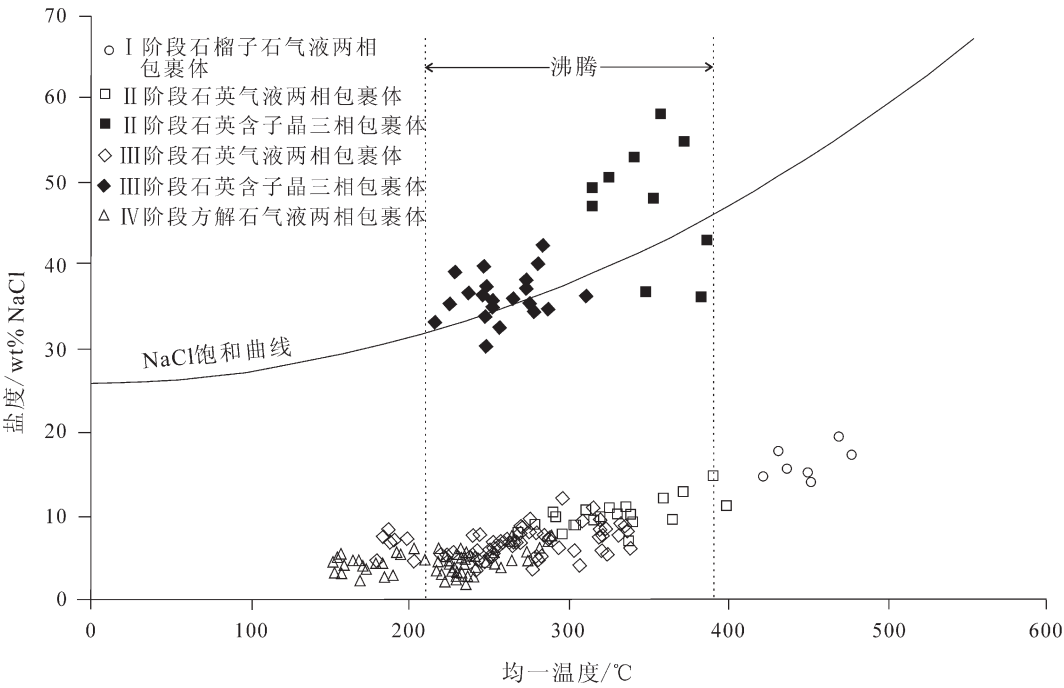


图 4 三矿沟铜-铁-钼多金属矿床流体包裹体盐度与均一温度的关系

Fig. 4 Diagram of homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Sankuanggou Cu-Fe-Mo polymetallic deposit

表 2 三矿沟铜-铁-钼多金属矿床各成矿阶段代表性矿物中流体包裹体的密度、成矿压力和成矿深度

Table 2 Density, mineralization pressure and ore-forming depth data of fluid inclusions within representative minerals from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo polymetallic deposit at various mineralization stages

样品编号	寄主矿物/ 成矿阶段	包裹 体类型	均一温度/°C		盐度/wt% NaCl		密度/g·cm ³		成矿压力/MPa		成矿深度/km	
			变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值	变化范围(测 定包裹体数)	均值
ZK2-2-9	石榴子石/Ⅰ	V-L	422~478(7)	449	14.25~19.53(7)	16.40	0.64~0.73(7)	0.68	117.70~133.65(7)	125.46	9.01~9.64(7)	9.32
ZK1020-4-3	石英/Ⅱ	V-L	255~392(21)	317	7.02~14.87(21)	10.10	0.69~0.86(21)	0.79	69.96~108.56(21)	87.44	6.78~8.63(21)	7.65
		S-V-L	315~387(10)	350	36.19~58.02(10)	47.78	0.99~1.18(10)	1.11	89.10~109.39(10)	98.96	7.75~8.67(10)	8.20
ZK104-9	石英/Ⅲ	V-L	223~337(14)	299	5.26~12.05(14)	8.47	0.71~0.88(14)	0.80	59.75~91.96(14)	81.93	6.21~7.88(14)	7.38
ZK104-7	石英/Ⅲ	V-L	202~330(18)	273	4.49~8.68(18)	7.05	0.74~0.90(18)	0.82	53.82~90.29(18)	74.41	5.86~7.80(18)	7.00
YM2-1	石英/Ⅲ	V-L	197~319(16)	265	3.39~8.28(16)	6.20	0.76~0.89(16)	0.83	52.63~87.28(16)	71.49	5.79~7.66(16)	6.85
		S-V-L	216~311(21)	259	30.65~42.59(21)	36.49	1.06~1.16(10)	1.12	60.92~87.79(21)	73.02	6.28~7.68(21)	6.93
ZK0-1-2	石英/Ⅲ	V-L	178~323(16)	237	3.55~7.17(16)	5.52	0.73~0.92(16)	0.85	47.38~87.57(16)	63.84	5.47~7.67(16)	6.42
ZK101-1-4	方解石/Ⅳ	V-L	171~289(16)	249	2.90~7.45(16)	4.92	0.80~0.92(16)	0.84	44.55~78.92(16)	66.36	5.30~7.24(16)	6.57
ZK101-1-3	方解石/Ⅳ	V-L	154~253(24)	211	2.07~6.01(24)	4.10	0.83~0.95(24)	0.88	41.06~68.00(24)	55.34	5.07~6.67(24)	5.94
ZK104-6	方解石/Ⅳ	V-L	152~237(18)	200	1.57~5.86(18)	3.92	0.83~0.95(18)	0.89	39.44~63.51(18)	52.31	3.94~6.42(18)	5.71

(MPa), P 为成矿压力 (MPa)。

孙丰月等^[19]对断裂带内流体的数据进行了分段拟合, 得出了流体压力和深度之间的关系式:

当测得的流体压力小于 40MPa 时, 用静水压力梯度 (10MPa/km) 来计算, 即

$$H=P/10$$

当测得的流体压力为 40~220MPa 时

$$H=0.0868/(1/P+0.00388)+2$$

当测得的流体压力为 220~370MPa 时

$$H=11+e^{(P-221.95)/79.057}$$

当测得的流体压力大于 370MPa 时

$$H=0.0331385 \times P + 4.19898$$

上边各式中, P 为成矿压力 (MPa), H 为成矿深度 (km)。依据上述关系式可以计算出成矿深度, 结果见表 2。

总的来说, 三矿沟铜-铁-钼多金属矿床的成矿压力和成矿深度变化范围较大, 分别为 39.44~133.65MPa 和 3.94~9.64km, 由表 2 计算出的二者平均值分别为 81.3MPa 和 7.09km, 显示中深成环境的特征。从 I → II → III → IV 阶段, 成矿压力和成矿深度呈现出明显减小 (变浅) 的趋势, 分别为 117.70~133.65 MPa → 69.96~109.39MPa → 47.38~91.96MPa → 39.44~78.92MPa 和 9.01~9.64km → 6.78~8.67km → 5.47~7.88km → 3.94~7.24km, 表明流体发生了明显的减压过程, 成矿深度明显变浅。

3 讨论

3.1 成矿流体特征、成矿环境与成矿体系

流体包裹体研究是探讨成矿流体性质、成矿物理化学条件和成矿作用演化历史的重要方法之一^[20]。三矿沟铜-铁-钼多金属矿床矽卡岩阶段 (I) 石榴子石中气液两相包裹体的均一温度为 422~478℃, 盐度为 14.25~19.53wt% NaCl, 该阶段成矿流体属于高温 (平均 449℃)、中-高盐度 (平均 16.40 wt% NaCl) 体系 (表 1、图 4)。湿矽卡岩-氧化物阶段 (II) 石英中气液两相包裹体的均一温度为 255~392℃ (平均 317℃), 盐度介于 7.02~14.87wt% NaCl 之间 (平均 10.10wt% NaCl); 含 NaCl 子矿物多相包裹体的均一温度为 315~387℃ (平均 350℃), 盐度为 36.19~58.02wt% NaCl (平均 47.78wt% NaCl), 显示该阶段成矿流体体系中高温、中等盐度与高盐度共存特征 (表 1、图 3、图 4)。早期硫化物阶段 (III) 石

英中气液两相包裹体的均一温度变化范围为 178~337℃, 盐度为 3.39~12.05wt% NaCl; 含 NaCl 子矿物多相包裹体的均一温度和盐度分别为 216~311℃ 和 30.65~42.59wt% NaCl, 成矿流体总体属于中低温 (平均 267℃)、中低盐度 (平均 7.24wt% NaCl) 与高盐度 (36.49wt% NaCl) 共存的体系 (表 1、图 3、图 4); 晚期硫化物阶段 (III) 方解石中包裹体的均一温度介于 152~289℃ 之间 (平均 220℃), 盐度变化于 1.57~7.45wt% NaCl 之间 (平均 4.31wt% NaCl), 反映了中低温、低盐度体系的特征 (表 1、图 3、图 4)。包裹体的均一温度和盐度从 I → II → III → IV 阶段总体均呈现出明显降低的趋势, 而流体的密度则呈现略渐增大的趋势 (从 I → II → III → III 阶段, 气液两相包裹体的密度由 0.64~0.73g/cm³ → 0.69~0.86g/cm³ → 0.71~0.92g/cm³ → 0.80~0.95g/cm³, 平均值由 0.68g/cm³ → 0.79g/cm³ → 0.82g/cm³ → 0.90g/cm³; 从 II → III 阶段, 含 NaCl 子矿物多相包裹体的密度由 0.99~1.18g/cm³ → 1.06~1.16g/cm³, 平均值 1.11g/cm³ → 1.12g/cm³) (表 2)。三矿沟铜-铁-钼多金属矿床的成矿压力和成矿深度呈现出明显减小 (变浅) 的趋势 (从 I → II → III → IV 阶段, 分别由 117.70~133.65MPa → 69.96~109.39MPa → 47.38~91.96MPa → 39.44~78.92MPa 和 由 9.01~9.64km → 6.78~8.67km → 5.47~7.88km → 3.94~7.24km), 成矿压力范围为 39.44~133.65MPa, 成矿深度介于 3.94~9.64km 之间 (表 2)。根据波卡洛夫^[21]的研究, 该矿床形成于中深成环境, 这与张德会等^[22]所统计的大多数矽卡岩型矿床的成矿深度一致。

三矿沟英云闪长岩岩体的侵入为铜铁钼矿体的形成提供了物源和热源, 是三矿沟铜-铁-钼多金属矿床形成的主要动因^[9], 三矿沟矿床发现的铜铁钼矿体主要赋存于石榴子石矽卡岩或透辉石矽卡岩中。奥陶纪中加里东期形成了岛弧型花岗闪长岩, 华力西期形成了造山型花岗闪长斑岩, 岩浆侵入接触变质作用强烈, 形成了各种角岩和大理岩。印支晚期—燕山早期酸性英云闪长岩侵入先前形成的各种角岩和大理岩中, 英云闪长岩总体环绕花朵山呈环形分布, 局部相变为花岗岩、花岗闪长岩及斑状花岗岩, 当英云闪长岩侵入大理岩时, 在内、外接触带均可形成各种类型的矽卡岩 (例如钙铁石榴子石矽卡岩、硅灰石矽卡岩和透辉石榴矽卡岩) 和矽卡岩化角岩, 同时伴随着磁铁矿的大量沉

淀及少量黄铁矿、磁黄铁矿的沉淀。随后,燕山中期碱长花岗岩侵入先成地层或英云闪长岩,发育大量矿化,导致各种金属硫化物、氧化物相继沉淀结晶,形成黄铜矿和辉钼矿矿体。

在三矿沟铜-铁-钼多金属矿床中,成矿流体总体属中—高温、中—高盐度、中等密度的体系,该矿床形成于中深—浅成矿环境。随着成矿作用的进行,成矿流体逐渐上升,成矿压力和成矿深度不断减小、变浅,成矿流体的均一温度和盐度不断降低,成矿密度也随之略有增大。

3.2 成矿流体的沸腾作用与成矿

前人的研究表明,成矿流体中金属的沉淀机制主要有以下几种:沸腾作用(相分离)^[23-24]、流体的冷却^[25]、岩浆流体与大气水的混合^[26]、水-岩反应^[27-28]和流体的浓缩作用^[29]。

Ⅱ阶段和Ⅲ阶段的石英中存在沸腾包裹体群,并且该阶段的矽卡岩矿体均产于火山角砾岩围岩中,围岩发育矽卡岩化、绿帘石化、绿泥石化、钾化、硅化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化、黄铁矿化等,这些就是沸腾作用存在的直接证据^[20,30]。北西向窝理河断裂和北东向三矿沟断裂均为三矿沟矿床的重要控矿构造,这些断裂的活动导致压力的突然降低,使成矿流体发生减压沸腾作用,形成了大量含NaCl子矿物的高盐度流体和富含挥发分的中—低盐度流体。显微测温数据表明,Ⅱ阶段和Ⅲ阶段石英中的部分含NaCl子矿物包裹体在加热时气泡先消失,然后实验溶解达到均一状态,说明这类包裹体是在原始过饱和溶液中捕获的;部分含NaCl子矿物包裹体在加热时是通过气泡的最终消失达到均一状态的,它们被认为是从原始不饱和溶液中捕获的^[20](表1、图4),表明这2个阶段存在2种不同的流体。此外,从三矿沟矿床盐度—均一温度关系图(图4)中可以看出,Ⅱ阶段和Ⅲ阶段的成矿流体在220~400℃的区间内显示出高低盐度流体的分离趋势,表明它们是在2种不同的流体中捕获的,即一种为较低盐度、较低密度的流体(Ⅱ阶段:7.02~14.87wt% NaCl和0.69~0.86g/cm³,Ⅲ阶段:3.39~12.05wt% NaCl和0.76~0.89g/cm³。表1、表2),另一种为较高盐度、较高密度的流体(Ⅱ阶段:36.19~58.02wt% NaCl和0.99~1.15g/cm³,Ⅲ阶段:30.65~42.59wt% NaCl和1.06~1.14g/cm³。表1、表2)。沸腾作用打破了原始成

矿流体物化体系的平衡状态,气相H₂O和H₂S、CO₂等酸性组分从原始均匀的流体相中不断逸出,导致流体的温度降低、盐度增高、pH值升高,促使金属络合物分解,导致金属氧化物(磁铁矿)、硫化物(黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿)沉淀出来^[31],形成金属氧化物矿体和硫化物矿体。可见,成矿流体的沸腾作用是导致成矿流体沉淀成矿的主要因素。此外,Ⅳ阶段的方解石包裹体中未发现沸腾现象,该阶段流体的温度和盐度均明显降低,也不存在高低盐度流体分离等趋势,因而认为Cu、Zn等矿物质的沉淀可能是大气降水大量加入的结果。

4 结 论

(1)三矿沟铜-铁-钼多金属矿床中的原生流体包裹体主要为气液两相包裹体,其次为纯气相包裹体,也有少量纯液相包裹体,石英中也有大量含NaCl子矿物的多相包裹体,其均一温度变化于152~478℃之间,盐度介于1.57~58.02wt% NaCl之间,密度变化于0.64~1.18g/cm³之间,总体属中—高温、中—高盐度、中等密度的体系。成矿压力范围为39.44~133.65MPa,成矿深度介于3.94~9.64km之间,表明该矿床形成于中深成环境。

(2)从Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳ阶段,流体包裹体均一温度、盐度、成矿压力和成矿深度的总体变化趋势表明,该矿床的成矿作用是一个均一温度、盐度、成矿压力和成矿深度总体显著降低(减小),密度略渐增大的过程。

(3)湿矽卡岩—氧化物阶段(Ⅱ,磁铁矿、镜铁矿)流体温度范围为255~487℃,盐度为7.02~58.02wt% NaCl;早期硫化物阶段(Ⅲ,磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿)流体温度变化范围为178~352℃,盐度为3.39~42.59wt% NaCl,表明磁铁矿、黄铜矿、辉钼矿等主要形成于高温、高盐度阶段。

(4)Ⅱ阶段和Ⅲ阶段的成矿流体在210~390℃区间内发生了沸腾作用,导致磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿的沉淀,形成金属氧化物矿体和硫化物矿体。Ⅳ阶段中Cu、Zn等矿物质的沉淀可能是大气降水大量加入的结果。

致谢: 流体包裹体显微测温过程中得到中国地质大学(北京)流体包裹体实验室刘丽老师的指导和帮助,审稿过程中相关专家提出了宝贵的意见和建议,在此一并致谢。

参考文献

[1]杜琦.多宝山斑岩铜矿床蚀变与矿化特征[J].地质学报,1980,(4):310-323.

[2]杜琦,陈明秀.多宝山斑岩铜矿床成因模式[J].矿床地质,1983,(2):42-48.

[3]王喜臣,王训练,王琳,等.黑龙江多宝山超大型斑岩铜矿的成矿作用和后期改造[J].地质科学,2007,42(1):124-133.

[4]李克生.多宝山斑岩铜(钼)矿床气液包裹体研究[J].地质与勘探,1979,(3):22-23.

[5]武广,刘军,钟伟,等.黑龙江省铜山斑岩铜矿床流体包裹体研究[J].岩石学报,2009,25(11):2996-3006.

[6]葛文春,吴福元,周长勇,等.兴蒙造山带东段斑岩型 Cu-Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J].科学通报,2007,52(20):2407-2417.

[7]刘驰.多宝山斑岩铜矿区水热蚀变矿物的激光显微探针 Ar^{40}/Ar^{39} 定年[J].地质科学,1995,30(4):329-337.

[8]赵一鸣,毕承思,邹晓秋,等.黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄[J].地球学报,1997,18(1):61-67.

[9]李之彤,王希金,王宏博,等.黑龙江省嫩江县三矿沟含金铁铜矿床地质特征[J].地质与资源,2008,17(3):170-174.

[10]王洪瑜,马丽玲,王卓.黑龙江省嫩江县三矿沟铜(铁)矿床地质特征及成因探讨[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(增刊):214-218.

[11]刘军,武广,钟伟,等.黑龙江省三矿沟矽卡岩型铁铜矿床流体包裹体研究[J].地质通报,2010,29(2/3):436-445.

[12]谭成印,王根厚,李永胜.黑龙江多宝山成矿区找矿新进展及其地质意义[J].地质通报,2010,29(2/3):436-445.

[13]李德荣,朱朝利,吕军,等.黑龙江三矿沟-多宝山成矿带构造-岩浆成矿作用[J].中国矿业,2010,19(增刊):142-146.

[14]Potter R W I, Clynnne M A, Brown D L. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions[J]. Econ. Geol., 1978,73: 284-285.

[15]Hall D L, Stemer S M, Bodnar R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solutions[J]. Econ. Geol., 1988, 83:197-202.

[16]刘斌,段光贤.NaCl-H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J].矿物学报,1987,7(4):345-352.

[17]刘斌.中高盐度 NaCl-H₂O 包裹体的密度式和等容式及其应用[J].地质评论,2001,47(6):617-622.

[18]邵洁涟,梅建明.浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因找矿意义[J].矿物岩石,1986,6(3):103-111.

[19]孙丰月,金巍,李碧乐,等.关于脉状热液金矿床成矿深度的思考[J].长春科技大学学报,2000,30(增刊):27-30.

[20]卢焕章,范宏瑞,倪培,等.流体包裹体[M].北京:科学出版社,2004:1-486.

[21]波卡洛夫 BT.矿床预测与评价原理(上册)[M].北京:地质出版社,1981:218.

[22]张德会,徐九华,余心起,等.成岩成矿深度:主要影响因素与压力估算方法[J].地质通报,2011,30(1):112-125.

[23]Reynolds T J, Beane R E. Evolution of hydrothermal characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit[J]. Economic Geology, 1985, 80:1328-1347.

[24]Gu X X, Tang J X, Wang C S, et al. Himalayan magmatism and porphyry copper-molybdenum mineralization in the Yulong ore belt, East Tibet[J]. Mineralogy and Petrology, 2003,78:1-20.

[25]Gustafson L B, Hunt J P. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile[J]. Economic Geology, 1975, 70: 857-912.

[26]Hedenquist J W, Arribas A, Reynolds T J. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines[J]. Economic Geology, 1998, 93: 374-404.

[27]张文淮,张志坚,伍刚.成矿流体及成矿机制[J].地学前缘,1996,3(3/4):245-252.

[28]张德会.成矿流体中金属沉淀机制研究综述[J].地质科技情报,1997,16(3):53-58.

[29]黄朋,顾雪祥,唐菊兴.西藏玉龙斑岩铜(钼)矿金属迁移、沉淀机制探讨[J].四川地质学报,2000,20(1):57-61.

[30]范宏瑞,谢奕汉,翟明国,等.豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用[J].岩石学报,2003,19(2):260-266.

[31]Reed M H, Spycher N F. Boiling, cooling, and oxidation in epithermal systems: A numerical modeling approach[J]. Reviews in Economic Geology, 1985, 1:249-272.

① 黑龙江省矿业集团有限责任公司.黑龙江省嫩江县多宝山铜矿接替资源勘查报告.2010.

② 黑龙江省地质局第二地质大队.黑龙江省嫩江县三矿沟铜矿床详细普查报告.1965.

③ 黑龙江省地质局第二地质大队.黑龙江省嫩江县三矿沟铜矿床地质勘探报告.1967.