

文章编号: 1004-5589 (2014) 04-0808-14

## 青海铜峪沟铜矿床成矿流体特征及矿床类型探讨

孙昊<sup>1</sup>, 张栋<sup>1</sup>, 路英川<sup>1</sup>, 李光琪<sup>1</sup>, 王英德<sup>2</sup>, 曹守林<sup>3</sup>

1. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000;
2. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
3. 青海省有色地质矿产勘查局七队, 西宁 810007

**摘要:** 青海省铜峪沟铜矿床位于东昆仑东西向构造岩浆带与鄂拉山北西向构造岩浆带的复合部位。依据矿物共生组合、交代与穿插关系可将铜峪沟铜矿成矿过程分为3个阶段: 矽卡岩阶段、石英—多金属硫化物阶段及石英—方解石阶段。对不同阶段包裹体进行了包裹体岩相学、显微测温学和包裹体成分分析。研究表明, 流体包裹体主要为液相包裹体(L型)、气相包裹体(G型)及含子矿物包裹体(S型)。其中矽卡岩阶段以含子矿物包裹体(均一温度为 $322^{\circ}\text{C} \sim >600^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 $32.92\% \sim >73.97\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )和液相包裹体(均一温度为 $231^{\circ}\text{C} \sim >600^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 $10.74\% \sim 21.68\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )为主。石英—多金属硫化物阶段以液相包裹体(均一温度为 $176^{\circ}\text{C} \sim 381^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 $2.74\% \sim 21.96\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )和气相包裹体(均一温度为 $127^{\circ}\text{C} \sim 419^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 $4.49\% \sim 8.81\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )为主。石英—方解石阶段仅发育液相包裹体(均一温度为 $143^{\circ}\text{C} \sim 201^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 $5.25\% \sim 9.21\% \text{NaCl}_{\text{eqv}}$ )。计算得到流体压力、密度变化范围分别为 $0.37 \sim 132.2 \text{MPa}$ 、 $0.53 \sim 1.17 \text{g/cm}^3$ 。成矿流体具有从高温高盐度向低温低盐度的演化特征。矽卡岩阶段发生了流体的混合作用, 石英—多金属硫化物阶段发生了流体的减压沸腾作用导致了大量金属硫化物沉淀, 成矿晚阶段流体可能来源于大气降水。分析认为, 铜峪沟铜矿为岩浆热液层矽卡岩矿床。

**关键词:** 铜峪沟; 流体包裹体; 岩浆热液; 青海

中图分类号: P618.41; P575.9 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2014.04.008

## Characteristics of ore-forming fluid and discussion on deposit type of Tongyugou copper deposit, Qinghai

SUN Hao<sup>1</sup>, ZHANG Dong<sup>1</sup>, LU Ying-chuan<sup>1</sup>, LI Guang-qi<sup>1</sup>, WANG Ying-de<sup>2</sup>, CAO Shou-lin<sup>3</sup>

1. The Geological Institute of CAPF, Langfang 065000, Hebei, China;
2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
3. The Seventh Team of Geology and Mineral Resources Exploration Bureau, Xining 810007, China

**Abstract:** Tongyugou copper deposit is located at the intersection part between the eastern Kunlun E-W direction tectonic magmatic belt and Elashan N-W direction tectonic magmatic belt. On the basis of the mineral assemblage and metasomatic alteration intercalation, the process of ore-forming can be divided into three phases: skarn stage, quartz-polymetallic sulfides stage and quartz-calcite stage. The results of petrographic, microthermometric

收稿日期: 2014-07-26; 改回日期: 2014-10-16

基金项目: 青海省秦岭西段金多金属矿产成矿规律与找矿预测研究项目(1212011220899)。

and composition studies on the fluid inclusions show that Tongyugou copper deposit have three types of fluid inclusions: aqueous inclusions ( type L ) , gas phase inclusions ( type G ) and daughter mineral brine inclusions ( type S ) . In skarn stage , fluid inclusions are characterized by mainly daughter mineral brine type with 322°C ~ >600°C in homogenization temperature and 32.92% ~ >73.97% in NaCl salinities , and aqueous inclusions type with 231°C ~ >600°C in homogenization temperature and 10.74% ~ 21.68% in NaCl salinities. In quartz-polymetallic sulfides stage , fluid inclusions are aqueous type with 176°C ~ 381°C in homogenization temperature and 2.74% ~ 21.96% in NaCl salinities , and gas phase inclusions type with 127°C ~ 419°C in homogenization temperature and 4.49% ~ 8.81% in NaCl salinities. Inclusions of the quartz-calcite stage only contain aqueous phase type with 143°C ~ 201°C in homogenization temperature and 5.25% ~ 9.21% in NaCl salinities. The calculation of fluid pressure and density indicates that these values range from 0.37 to 132.2 MPa and from 0.53 to 1.17 g/cm<sup>3</sup>. The ore-forming fluid is characterized by the evolution from the high to low in temperature and salinity. Fluid mixing occurred in the skarn stage , quartz-polymetallic sulfides stage had a fluid decompression boiling resulted in great amount of metal sulfide precipitation. The low temperature and low salinity aqueous phase inclusions of late mineralization stage may be derived from meteoric water. On the basis of features and the geological characteristics , the genetic type of Tongyugou copper is defined as magmatic hydrothermal stratabound skarn deposit.

**Key words:** Tongyugou; fluid inclusions; magmatic hydrothermal; Qinghai

## 0 引言

鄂拉山铜多金属成矿带是青海省重要的铜矿集区。区内有日龙沟大中型锡多金属矿床、铜峪沟大型铜矿床、赛什塘中型铜矿床、杂科合铜银矿点和拉届亥钼铜矿点,显示了区内巨大的找矿潜力<sup>[1]</sup>。铜峪沟铜矿床位于青海省兴海县境内,发现于1958年,是鄂拉山地区唯一经过详查且铜储量规模超过50万t的大型铜矿床。关于铜峪沟铜矿床的成因,目前仍存在争议。宋治杰等<sup>[2]</sup>认为其为后期变质改造的热液沉积矿床;张汉文<sup>[3,4]</sup>认为铜峪沟铜矿床形成于陆缘裂陷盆地环境,矿床类型介于Sedex型和陆壳背景下的别子型之间而更接近后者;李东升等<sup>[5]</sup>、吴健辉等<sup>[6]</sup>认为铜峪沟、赛什塘铜矿床属于矽卡岩型-斑岩型复合矿床,成矿与晚印支期花岗岩有关。总的来说,铜峪沟铜矿床的研究程度还很低,特别是流体特征、矿床成因方面的研究较为薄弱。笔者拟通过详细的野外调查和室内流体包裹体显微测温及H-O同位素分析,揭示成矿流体的演化及矿床成因类型,为铜峪沟铜矿床的研究提供借鉴。

## 1 区域地质背景

研究区位于东昆仑东西向构造岩浆带与鄂拉山北西向构造岩浆带的复合部位(图1)。该区早—

中三叠世在二叠纪碳酸盐台地基础上,发生了弧后拉张裂陷,形成了巨厚陆源复理石沉积,混有二叠纪外来岩块,晚期又发生双峰式火山喷发。沿昆中断裂延至该区发现有晚三叠世埃达克岩分布<sup>[7]</sup>。其控岩控矿表现出东西向与北西向构造复合特点。

区域上地层主要包括古元古界金水口岩群,石炭系一中二叠统甘家组(CPg),下一中三叠统隆务河群,下一中三叠统千枚岩、灰岩夹火山岩,上三叠统鄂拉山组陆相火山岩,新近系贵德群红色砂砾岩、泥岩及第四系。金水口岩群岩性主要为一套混合岩、变粒岩、片麻岩、斜长角闪岩及大理岩。甘家组(CPg)为一套碎屑岩、碳酸盐岩组合。隆务河群总体为一套下细上粗的碎屑岩,局部夹中、基性火山岩。

区域构造以断裂为主,发育有北西向、东西向及少量北东向、近南北向的断裂,其中近东西向、北西向断裂与成矿关系密切。

区内岩浆岩大致可分为四期:第一期侵入的是闪长玢岩;第二期侵入的有中一中细粒石英闪长岩、细粒石英闪长岩、石英闪长玢岩和闪长玢岩;第三期侵入的是斜长花岗斑岩;第四期侵入的是花岗斑岩、石英斑岩和细粒花岗岩。其中以第二次侵入活动规模最大,形成了赛什塘复合岩体的主体—石英闪长岩体,呈灰白色细粒半自形粒状结构,块状构造,绢云母化、绿泥石化强烈。本区其他岩石

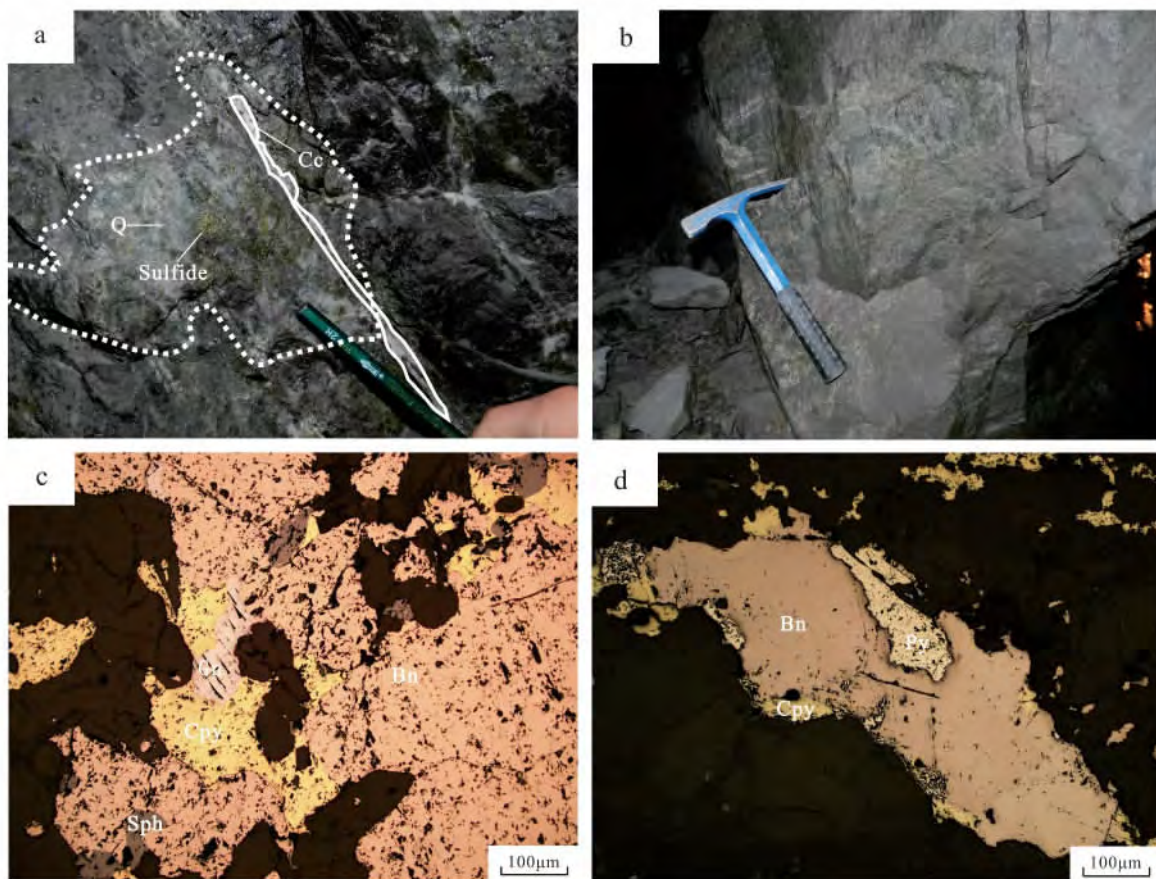


粒状变晶结构和交代结构, 矿石构造主要为层状构造、条纹条带状构造、脉状及团块状构造。

矿床围岩蚀变主要有层砂卡岩化、硅化、碳酸盐化、绿泥—绿帘石化和绢云母化, 其中层砂卡岩化和硅化与矿化关系较为密切。层砂卡岩与正统砂卡岩的矿物组成相同, 但由于矿区内无岩体出露, 这种砂卡岩整合于地层层状产出, 但规模和数量较矿体大得多, 它们有时与矿体重合, 有时不构成矿体, 即轻微矿化砂卡岩。矿区内并没有较大规模的硅质岩, 代之出现的是较多富硅质的沉积岩, 表现为矿体及围岩地层中脉状或团块状小石英脉体和大

量硅质胶结的沉积岩, 硅化蚀变具有一定的区域特征。

根据矿物共生组合、矿石组构及脉体穿插关系, 可将流体成矿过程分为三个成矿阶段: (1) 砂卡岩阶段: 标志性矿物组合为石榴石 + 透辉石 + 绿泥石; (2) 石英—多金属硫化物阶段: 以石英 + 多金属硫化物组合为标志, 该阶段石英颗粒较粗, 常见硫化物包括黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、方铅矿及闪锌矿; (3) 石英—方解石阶段: 发育石英—方解石脉, 脉体中基本不含硫化物。该类脉体形成最晚, 可切割早期脉体。



a. 变质砂岩型矿石及其穿插关系; b. 层砂卡岩矿石; c、d. 矿石中主要金属矿物组合. 矿物缩写: Q. 石英; Cc. 方解石; Gn. 方铅矿; Sph. 闪锌矿; Cpy. 黄铜矿; Bn. 斑铜矿; Py. 黄铁矿.

图 2 铜峪沟铜矿床矿石露头及显微照片

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs of metallic mineral assemblage from Tongyugou copper deposit

### 3 流体包裹体研究

#### 3.1 样品特征和研究方法

本次铜峪沟铜矿床研究样品包括各成矿阶段打

块样品共计 9 件 (其中砂卡岩阶段 4 件, 石英—多金属硫化物阶段 4 件, 石英—方解石阶段 1 件), 并对 8 件样品进行了显微测温研究。

流体包裹体测温在中国地质大学 (北京) 流

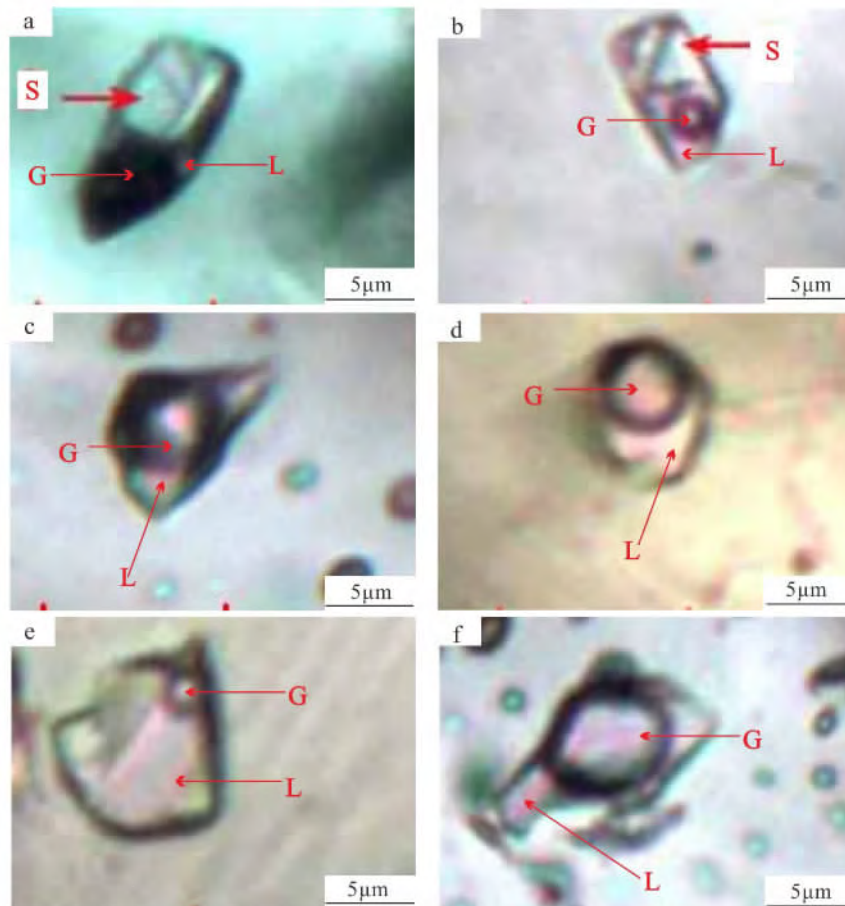
体包裹体实验室进行,使用仪器为英国产的 Linkam THM600 冷热台,均一温度重现误差  $< 2^{\circ}\text{C}$ ,冰点温度重现误差  $< 0.2^{\circ}\text{C}$ 。测冰点时,采用液氮对包裹体迅速降温至过冷却,使流体相全部凝固,在温度下降过程中观察包裹体变化,当温度降至  $-120^{\circ}\text{C}$  时,缓慢升温,直至最后一块冰晶融化,从而测得冰点温度 ( $t_m$ )<sup>[8]</sup>。测定均一温度时,开始的升温速度为  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,当相态接近均一时,降低升温速度,并及时记录均一温度。

流体包裹体的液相成分和气相成分均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。测试液相成分仪器为 DIONEX-500 离子色谱仪,仪器编号: 6319,相对湿度为 35%,温度  $22^{\circ}\text{C}$ 。测试气相成分检测器为 TCD,型号 PE. Clarus600,载气流速为  $25\text{ ml}/\text{min}$ ,载气压力为  $100\text{ kPa}$ ,室温  $25^{\circ}\text{C}$ ,载气  $\text{Ar}_2$ ,爆裂温度  $550^{\circ}\text{C}$ ,爆裂时间为  $5\text{ min}$ 。

### 3.2 包裹体岩相学

流体包裹体岩相学研究表明,铜峪沟铜矿床砂卡岩阶段、石英—多金属硫化物阶段、石英—方解石阶段脉石矿物中均发育有流体包裹体。这些包裹体个体大小变化较大,以  $3\sim 17\ \mu\text{m}$  为主,包裹体形态多样。根据室温条件下包裹体出现的相态及所包含的透明子矿物,可将本矿区流体包裹体分为 3 种类型:

含子矿物多相包裹体 (S 型) 由水溶液 (L)、气泡 (G)、一个或多个子矿物 (S) 组成。子矿物多为透明立方体,应为食盐晶体。这类包裹体多为不规则状、浑圆状及短棒状,大小集中在  $3\sim 9\ \mu\text{m}$  (图 3a),气相分数为  $5\%\sim 20\%$ ,主要在石榴石、透辉石、绿泥石及石英等寄主矿物中发育。加热时气泡先消失或子矿物先消失,大部分均一到液相,少数包裹体均一到气相。



a, b. 含子矿物流体包裹体; c, d, f. 气相包裹体; e. 液相包裹体; G. 气相; L. 液相; S. 子矿物。

图3 铜峪沟铜矿床流体包裹体显微照片

Fig. 3 Microphotographs of fluid inclusions from Tongyugou copper deposit

气相包裹体 (G 型) 由气液两相组成, 但以气相为主, 气相分数达到 50% 以上 (图 3c、3d、3f), 这类包裹体多为短棒状、水滴状及不规则状, 大小集中在 3~8 μm, 少数达到 10~17 μm, 主要在石英—多金属硫化物阶段的石英中出现, 在矽卡岩阶段石榴石、透辉石等寄主矿物中也有少数此类包裹体。加热时绝大多数包裹体向气相均一。

液相包裹体 (L 型) 由气液两相组成, 气相分数在 50% 以下, 这类包裹体多为短棒状、混圆状、水滴状及不规则状, 大小集中在 3~10 μm, 少数达到 12~26 μm, 在各个阶段所有寄主矿物中均出现, 加热时向液相均一 (图 3e)。

### 3.3 流体包裹体显微测温及盐度

本文对铜峪沟铜矿床各成矿阶段的流体包裹体进行了详细的显微测温分析。显微测温分析获得三个阶段包裹体数据共计 159 件 (表 1)。

(1) 矽卡岩 (Sk) 阶段的石榴石、透辉石、绿泥石及石英中流体包裹体较为发育。主要为 L

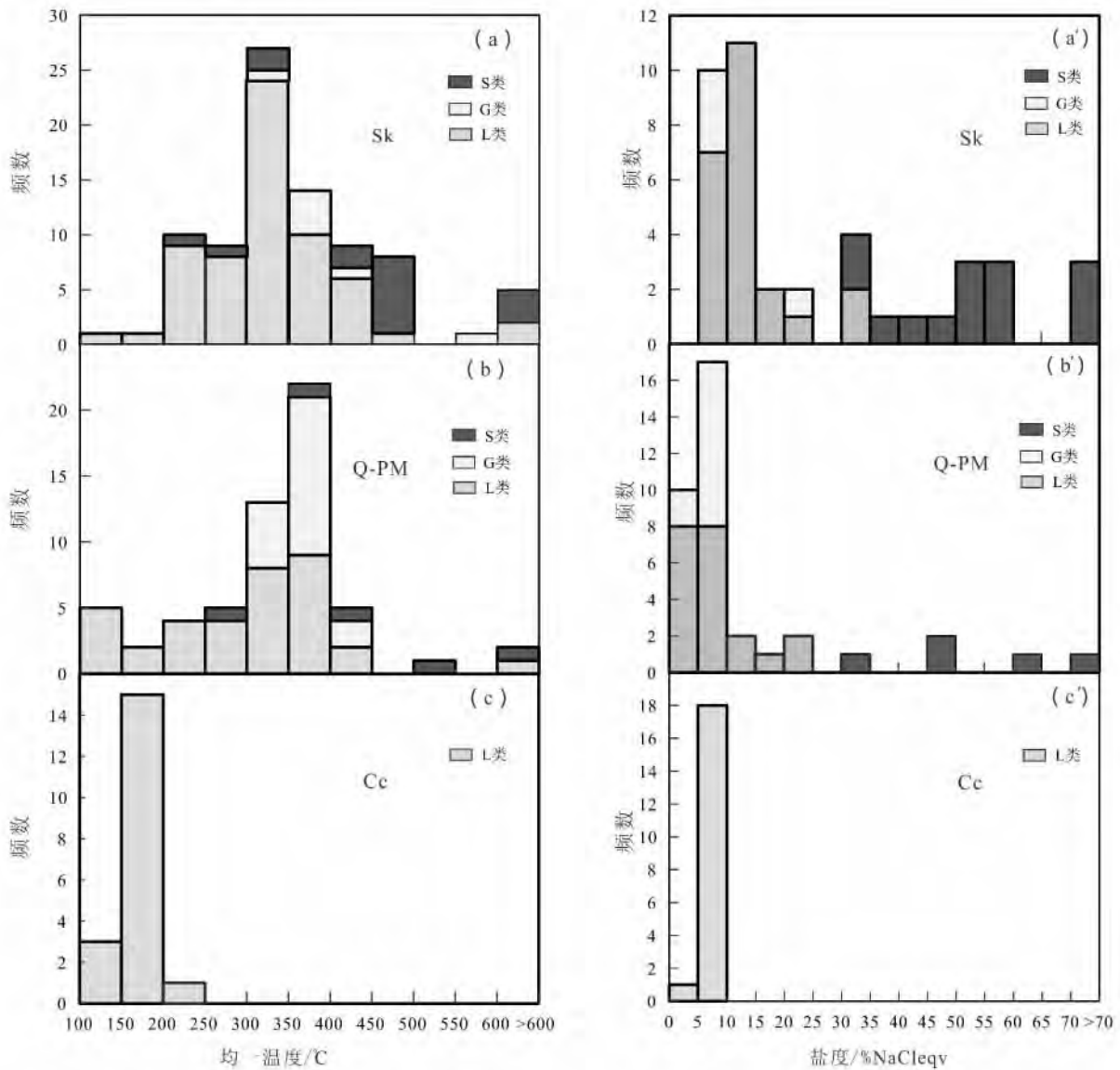
型包裹体, 其次为 S 型包裹体及少量 G 包裹体。L 型包裹体均一至液相, 此类包裹体完全均一温度变化于 191℃ ~ > 600℃, 其盐度为 10.74% ~ 21.68% NaCl<sub>eqv</sub>; S 型包裹体均一方式为气泡先消失后子矿物消失, 最终均一至液相, 包裹体完全均一温度变化于 322℃ ~ > 600℃, 其盐度为 32.92% ~ > 73.97% NaCl<sub>eqv</sub>。其中部分子矿物加热至 600℃ 仍未均一, 其盐度估计远大于 73.97% NaCl<sub>eqv</sub>。G 型包裹体均一至气相, 包裹体完全均一温度变化于 340℃ ~ 576℃, 其盐度为 8.55% ~ 21.11% NaCl<sub>eqv</sub>。

(2) 石英—多金属硫化物阶段 (Q-PM) 的石英、绿帘石中流体包裹体较为发育。主要为 L 型包裹体、G 型气相包裹体及少量 S 型包裹体。L 型包裹体均一至液相, 此类包裹体完全均一温度变化于 176℃ ~ 444℃, 其盐度为 2.74% ~ 21.96% NaCl<sub>eqv</sub>; G 型包裹体均一至气相, 包裹体完全均一温度变化于 127℃ ~ 419℃, 其盐度为 4.49% ~ 8.81%

表 1 铜峪沟铜矿床流体包裹体显微测温结果及参数

Table 1 Microthermometric data and relative parameters of fluid inclusions from Tongyugou copper deposit

矿物	成矿阶段	样品数	包裹体数	包裹体特征			均一温度/℃	盐度/%	
				类型	气相分数/%	包体形态			大小/μm
石榴子石	Sk	2	18	L	10~30	规则—不规则	2×4~10×26	231~260; 301~350; 350~484; >600	13.94~21.68
			3	G	50	规则	6×10~10×17	372~404	8.55~21.11
			4	S	5~10	规则—不规则	5×7~5×10	322~376; >600	32.92; >73.97
透辉石	Sk	3	18	L	5~30	规则—不规则	2×5~4×10	224~271; 303~349; 389~417	11.14~13.81; 32.44~33.09
			2	G	50	规则	4×4~6×7	340; 368	8.81; 9.47
			4	S	20	规则—不规则	3×4~3×9	407~492; >600	46.69~56.31; >73.97
石英	Sk	2	18	L	3~40	规则—不规则	1×4~4×8	191~426	10.74~11.71
			1	G	60	规则	4×5	576	
	Q-PM	3	2	S	12~20	规则	3×4~3×6	492; >600	58.68; >73.97
			24	L	5~40	规则—不规则	1×3~12×17	176~182; 230~381	2.74~7.31; 21.96
			19	G	50~70	规则	3×4~7×12	127~419	4.49~8.81
绿泥石	Sk	1	6	L	10~20	规则	1×3~4×6	231~313	
			6	S	10~15	规则	2×3~5×7	328~467	32.92~55.02
绿帘石	Q-PM	1	11	L	10~40	规则—不规则	2×4~4×10	226~444	12.28~21.96
方解石	Cc	1	19	L	5~10	规则	2×3~9×10	143~201	5.25~9.21



(a) 矽卡岩阶段; (b) 石英—多金属硫化物阶段; (c) 方解石阶段; S. 含子矿物包裹体; L. 液相包裹体; G. 气相包裹体。

图4 铜峪沟铜矿床均一温度、盐度直方图

Fig. 4 Histograms of homogenization temperatures and salinities of Tongyugou copper deposit

NaCl<sub>eqv</sub>; S型包裹体均一方式为气泡先消失后子矿物消失, 最终均一至液相, 包裹体完全均一温度变化于 386℃ ~ > 600℃, 其盐度为 32.39% ~ > 73.97% NaCl<sub>eqv</sub>。其中部分子矿物加热至 600℃ 仍未均一, 其盐度估计远大于 73.97% NaCl<sub>eqv</sub>。

(3) 方解石阶段 (Cc) 的方解石中仅发育液相包裹体。获得包裹体冰点温度介于 -6.0℃ ~ -4.0℃, 完全均一温度变化于 143℃ ~ 201℃, 集中于 170℃ ~ 190℃。包裹体全部均一至液相 (图

4)。包裹体盐度为 5.25% ~ 9.21% NaCl<sub>eqv</sub>。

综上所述, 矽卡岩阶段为中高温—高温、中—高盐度流体; 石英—多金属硫化物阶段为中温—中高温、中—低盐度流体; 方解石阶段为低温、低盐度流体。随着成矿作用的进行, 成矿流体从早期到晚期温度和盐度有逐渐降低的趋势。

### 3.4 包裹体密度、压力

各类型包裹体的流体密度, 根据刘斌<sup>[9]</sup>推导的经验公式  $\rho = a + bT_h + cT_h^2$  ( $a, b, c$  均为无量纲

参数,均由盐度换算而来),求得包裹体的密度,并参考 NaCl-H<sub>2</sub>O 体系 P-T 相图<sup>[10]</sup>,获得各阶段成矿流体的压力值。

矽卡岩阶段 (Sk) 含子矿物包裹体密度介于 1.06 ~ 1.17 g/cm<sup>3</sup>,液相包裹体密度介于 0.85 ~ 1.06 g/cm<sup>3</sup>,气相包裹体密度介于 0.61 ~ 0.75 g/cm<sup>3</sup>。包裹体捕获压力介于 18.6 ~ 132.2 MPa。石英—多金属硫化物阶段 (Q-PM) 密度介于 0.53 ~ 1.09 g/cm<sup>3</sup>,其中气相包裹体密度介于 0.53 ~ 0.73 g/cm<sup>3</sup>,液相包裹体密度介于 0.63 ~ 0.94 g/cm<sup>3</sup>,含子矿物包裹体密度为 1.06 ~ 1.09 g/cm<sup>3</sup>。包裹体捕获压力介于 0.99 ~ 30.9 MPa。方解石阶段密度介于 0.93 ~ 0.98 g/cm<sup>3</sup>,包裹体捕获压力介于 0.37 ~ 1.29 MPa。利用静水压力计算出各个阶段的

成矿深度: 矽卡岩阶段介于 2.83 ~ 5.65 km,平均 4.4 km; 石英—多金属硫化物阶段介于 1.41 ~ 3.27 km,平均 1.9 km; 方解石阶段 (Cc) 介于 0.05 ~ 0.14 km,平均 0.11 km。总体上矽卡岩阶段流体属于中高密度流体,石英—多金属硫化物阶段及方解石阶段属于中低密度流体。由于石英—多金属硫化物阶段出现大量的气相包裹体,导致其密度偏低。

### 3.5 流体包裹体成分

#### 3.5.1 液相成分分析

成矿流体阳离子均以 Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 为主, K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量偏低。阴离子中以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 为主, F<sup>-</sup> 次之, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 甚微或未检出 (表 2)。成矿流体主要属于 Na<sup>+</sup> - Ca<sup>2+</sup> - SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Cl<sup>-</sup> 型。

表 2 铜峪沟铜矿床流体包裹体液相成分统计表

Table 2 Aqueous composition in fluid inclusions of Tongyugou copper deposit

样号	成矿阶段	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> / K <sup>+</sup>	F <sup>-</sup> / Cl <sup>-</sup>	X(Cl <sup>-</sup> ) / X(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	数据来源
12TYG04	Sk	3.997	13.42	0.284	14.24	9.894	3.575	0.29	2.157	2.77	0.30	0.94	
12TYG08	Q-PM	3.551	6.915	/	117.4	7.928	1.24	0.64	10.08	6.39	0.51	0.06	本文 (ug/g)
12TYG01	Q-PM	1.227	3.687	0.153	18.28	4.657	0.683	0.78	6.389	6.81	0.33	0.20	
变质砂岩中与黄铜矿共生的石英		2.92	12.94	/	1.08	10.16	5.95	0.74	4.9	1.71	0.23	11.98	
		8.77	43.51	/	3.23	20.33	4.76	0.78	6.57	4.27	0.20	13.47	黄填才 (1990)
层砂卡岩中与黄铜矿共生的方解石		53.44	16.46	/	1.08	7.24	14.13	1.76	43.7	0.51	3.25	15.24	(mg/10g)
		25.89	22.34	/	4.31	6.27	6.14	1.72	3575	1.02	1.16	5.18	

注: /表示未检出

根据 Roedder<sup>[11]</sup>的研究,流体包裹体液相成分摩尔比值  $X(\text{Na}^+) / X(\text{K}^+) < 2$  且  $X(\text{Na}^+) / X(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > 4$  是典型的岩浆或变质热液,  $X(\text{Na}^+) / X(\text{K}^+) > 2$  且  $X(\text{Na}^+) / X(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < 1.5$  属于热卤水。经计算铜峪沟铜矿床矽卡岩阶段  $X(\text{Na}^+) / X(\text{K}^+)$  和  $X(\text{Na}^+) / X(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  比值分别为 2.77 和 4.04,既有岩浆水,又有热卤水的特征。而石英—多金属硫化物阶段的包裹体成分  $X(\text{Na}^+) / X(\text{K}^+)$  为 6.39 ~ 6.81,  $X(\text{Na}^+) / X(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  为 0.65 ~ 0.74,主要表现为热卤水的特征。 $X(\text{F}^-) / (\text{Cl}^-)$  较小时常反映成矿为地下热卤水或大气降水成因<sup>[12]</sup>,本地区  $X(\text{F}^-) / (\text{Cl}^-)$  值为 0.05

~ 0.42,表现为地下卤水的特征。溶液中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 代表了流体包裹体中所有含硫化物相,如 S<sup>2-</sup>、HS<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 等,成矿流体中高的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度是岩浆水存在的有效证据<sup>[13]</sup>,铜峪沟铜矿床各阶段 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量均较高 (14.24 ~ 117.4),又表现出岩浆水特征。

#### 3.5.2 气相成分分析

铜峪沟铜矿床成矿热液气相成分表现为 H<sub>2</sub>O > CO<sub>2</sub> > H<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub> > N<sub>2</sub> > CO; 主要气相成分为 H<sub>2</sub>O。深源岩浆水或变质水  $X(\text{N}_2) / X(\text{Ar})$  的比值一般 > 200<sup>[14,15]</sup>。铜峪沟铜矿 N<sub>2</sub> 含量很低,Ar 气含量低于检出限,在一定程度上反映出了岩浆水的特征。

表3 铜峪沟铜矿床流体包裹体气相成分统计表  
Table 3 Gas composition in inclusions of Tongyugou copper deposit

样品编号	阶段	单矿物	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (气相)	数据来源
12TYG01	Q-PM	单矿物石英	0.210 9	0.159 4	0.137 5	0.189 1	0.21	423 300	
12TYG08	Q-PM	单矿物石英	0.250 8	0.205 6	0.150 5	0.308	0.907 2	85 450	本文
12TYG04	Sk	单矿物透辉石	0.200 5	0.063 7	0.070 9	0.113	0.205 5	95 160	

/10<sup>-6</sup>

#### 4 H-O 同位素研究

铜峪沟铜矿床从矽卡岩阶段到后期方解石阶段  $\delta D_{V-SMOW}$  值介于  $-137.4 \times 10^{-3} \sim -122.9 \times 10^{-3}$ 、 $-122.7 \times 10^{-3} \sim -110.2 \times 10^{-3}$ 、 $-134.6 \times 10^{-3} \sim -120.1 \times 10^{-3}$ ;  $O_{V-SMOW}$  值介于  $6.5 \times 10^{-3} \sim 14.0 \times 10^{-3}$ 、 $13.4 \times 10^{-3} \sim 13.9 \times 10^{-3}$ 、 $10.8 \times$

$10^{-3} \sim 13.8 \times 10^{-3}$ 。根据矿物与水之间氧同位素平衡交换分馏方程<sup>[16,17]</sup>, 通过计算获得各个阶段  $\delta O_{H_2O}$  值分别为  $6.970 \times 10^{-3} \sim 10.284 \times 10^{-3}$ 、 $7.025 \times 10^{-3} \sim 7.654 \times 10^{-3}$ 、 $0.271 \times 10^{-3} \sim -2.729 \times 10^{-3}$ 。从矽卡岩阶段到方解石阶段, 其  $\delta O_{H_2O}$  值有明显降低的趋势。

表4 铜峪沟铜矿床流体包裹体 H-O 同位素组成  
Table 4 Hydrogen and oxygen of fluid inclusions in Tongyugou copper deposit

阶段	样品号	矿物	$\delta D_{V-SMOW}$	$\delta O_{V-SMOW}$	T/°C	$\delta O_{H_2O}$
Sk	12TYG04	石榴石	-122.9	8.7	402.83	9.899
	12TYG05	石榴石	-123.9	9.5	352.08	10.284
	12TYG06	石榴石	-137.4	6.5	320.95	6.970
	12TYG09	石英	-137.3	14.0	334.25	8.238
	12TYG01	石英	-122.7	13.4	322.55	7.275
Q-PM	12TYG03	石英	-110.2	13.9	318.79	7.654
	12TYG08	石英	-113.8	13.8	303.20	7.025
Cc	12TYG07	方解石	-120.1	13.8	179.68	0.271
	12TYG07	方解石	-134.6	10.8	173.68	-2.729

/10<sup>-3</sup>

注: Sk. 矽卡岩阶段; Q-PM. 石英多金属硫化物阶段; Cc. 方解石阶段。

## 5 讨论

### 5.1 成矿流体特征、来源与演化

铜峪沟铜矿床矽卡岩阶段石榴石、透辉石及绿泥石中含 NaCl 子晶包裹体在加热过程中大部分均为气泡先消失, 之后通过 NaCl 子晶熔化达到均一, 表明当时成矿流体为相对于 NaCl 的不饱和流体。其均一温度介于  $234^\circ\text{C} \sim 492^\circ\text{C}$ , 集中于  $400^\circ\text{C} \sim 492^\circ\text{C}$ , 部分  $> 600^\circ\text{C}$ , 盐度介于  $32.39\% \sim 56.31\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ , 部分  $> 70\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ; 液相包裹体温度介于  $121^\circ\text{C} \sim 484^\circ\text{C}$ , 集中于  $200^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ ,

盐度介于  $10.74\% \sim 21.68\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ; 气相包裹体均一温度介于  $340^\circ\text{C} \sim 576^\circ\text{C}$ , 盐度介于  $8.55\% \sim 21.11\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ 。显示出矽卡岩阶段成矿流体具有高盐度与中—低盐度共存的中—高温流体的特点。石英—多金属硫化物阶段液相包裹体均一温度介于  $106^\circ\text{C} \sim 444^\circ\text{C}$ , 集中于  $230^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ , 盐度介于  $2.74\% \sim 21.96\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ , 分别集中  $2.74\% \sim 7.31\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ,  $12.28 \sim 21.96\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ; 气相包裹体均一温度介于  $127^\circ\text{C} \sim 419^\circ\text{C}$ , 集中于  $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ , 盐度介于  $4.49\% \sim 8.81\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ; 含 NaCl 子矿物包裹体均一温度介于  $386^\circ\text{C} \sim 422^\circ\text{C}$ , 并有

一颗  $> 600^{\circ}\text{C}$ ，盐度介于  $32.39\% \sim 49.91\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ，显示该阶段成矿流体具有高盐度与低盐度共存的中温—中高温流体。方解石阶段液相包裹体均一温度介于  $143^{\circ}\text{C} \sim 201^{\circ}\text{C}$ ，盐度介于  $5.25\% \sim 9.21\% \text{ NaCl}_{\text{eqv}}$ ，显示为低温、低盐度流体。各个阶段成矿流体密度、压力分别介于  $0.61 \sim 1.17 \text{ g/cm}^3$ 、 $38.62 \sim 132.2 \text{ MPa}$ ， $0.53 \sim 0.94 \text{ g/cm}^3$ 、 $7.2 \sim 30.9 \text{ MPa}$  和  $0.93 \sim 0.98 \text{ g/cm}^3$ 、 $0.51 \sim 1.28 \text{ MPa}$ 。

关于铜峪沟铜矿床的成矿流体来源，田生玉<sup>[18]</sup>通过研究矿床与赛什塘—日龙沟矿田岩浆岩的关系，认为成矿流体为岩浆后期热液，成矿物质主要来源于深部岩浆。本文的流体包裹体研究表明，铜峪沟铜矿床矽卡岩阶段、石英—多金属硫化物阶段均发育有含子矿物水溶液包裹体，此类包裹体以中高温、高温、高盐度为特征。总体而言，高盐度、高温的含子晶包裹体是岩浆热液的标志<sup>[19]</sup>。铜峪沟铜矿床这类高盐度、高温的含子晶包裹体特征不同于变质热液中包裹体中温、富  $\text{CO}_2$  特征，亦不同于地层热水中包裹体低温、低盐度特征，显示其可能为岩浆热液。方解石阶段仅发育水溶液包裹体，成矿流体以中、低温、低盐度为特征。

氢氧同位素图解（图 5）表明，矽卡岩阶段和石英硫化物阶段的投点都位于原生岩浆水的正下方，部分投点接近于张理刚<sup>[20]</sup>所提出的初始混合

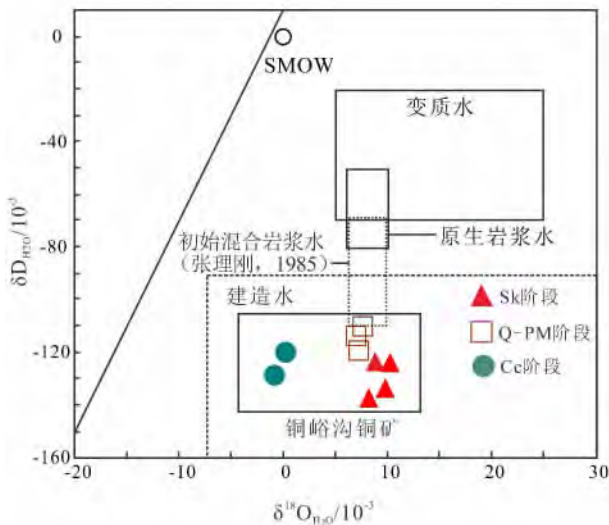


图 5 铜峪沟铜矿床成矿流体  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  同位素图解

Fig. 5  $\delta\text{D}$  versus  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  for ore forming fluids from Tongyugou copper deposit

岩浆水，且矽卡岩阶段的  $\delta\text{D}$  值明显低于石英—多金属硫化物阶段，表明矽卡岩阶段可能混入了低  $\delta\text{D}$  值热液。从矽卡岩阶段到后期的方解石阶段， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  有持续降低的趋势，方解石阶段有明显的向大气降水线“漂移”的趋势，说明后期有大气降水的参与。

综上所述，铜峪沟铜矿床不同阶段流体包裹体的特征反映了流体的演化规律。从成矿早期矽卡岩阶段到晚期方解石阶段，成矿流体的温度、盐度及压力均显示为逐渐降低的趋势，表明了成矿流体演化的连续性。早阶段成矿流体显示为岩浆热液，晚阶段有大气降水混入。

5.2 流体的混合作用、沸腾作用与成矿

研究表明，简单的冷却并不是金属沉淀的最有效机制，而流体的沸腾和混合机制对成矿物质的沉淀富集显得尤为重要<sup>[21-22]</sup>。流体的沸腾作用广泛发生于斑岩型铜钼矿床、矽卡岩矿床、浅成热液矿床及脉状多金属等矿床中，并被认为是这些矿床金属物质沉淀富集的主要机理<sup>[23-24]</sup>。

流体包裹体均一温度—盐度双变量关系图解可以有效地判别流体的演化趋势。研究表明，在流体混合过程中捕获的流体包裹体其均一温度与盐度在一定程度上均表现为正相关的关系，而在流体沸腾或相分离过程中捕获的流体包裹体的均一温度与盐度呈现负相关性<sup>[25]</sup>。铜峪沟铜矿床流体演化图解（图 6）表明矽卡岩阶段的包裹体温度和盐度明显呈正相关，显示在该阶段存在成矿流体的混合作用。从前述的矽卡岩阶段的石榴石包裹体中液相成

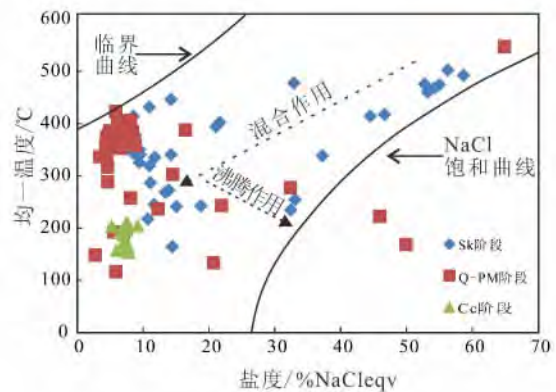


图 6 铜峪沟铜矿床均一温度—盐度双变量协变图

Fig. 6 Homogenization temperature versus salinities of fluid inclusions of Tongyugou copper deposit

分来看,其  $X(\text{Na}^+)/X(\text{K}^+) > 2$  且  $X(\text{Na}^+)/X(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > 4$ ,  $X(\text{F}^-)/X(\text{Cl}^-)$  值低,并含有较高浓度的  $\text{SO}_4^{2-}$ ,也说明了该阶段既表现出岩浆热液的特征,又有地层热卤水的特征,可能为高温、高盐度的岩浆热液与低温低盐度的地层水的混合流体。

石英—多金属硫化物阶段包裹体温度和盐度明显呈正相关,表明该阶段曾发生了流体沸腾作用。该阶段流体包裹体的特征也为发生沸腾作用提供了有力的证据:①石英—多金属硫化物阶段同一寄主矿物中气液两相、气相包裹体、少量  $\text{NaCl}$  子晶包裹体共存(沸腾包裹体群),其气相分数变化范围很大(5%~70%),多种类型包裹体共生于同一结晶面上,应为同时捕获,是含矿热液流体自超临界状态向临界点转化时压力骤然降低的结果,是流体沸腾的典型标志<sup>[21]</sup>。对比矽卡岩阶段(18.62~132.2 MPa)和石英—多金属硫化物阶段(7.2~30.9 MPa)的流体压力,说明石英—多金属硫化物阶段的减压作用十分明显。②液相包裹体均一温度集中于328℃~382℃,气相包裹体均一温度集中于352℃~413℃,包裹体盐度值分别集中于12.28%~21.96%  $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ 、2.74%~7.31%  $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ 。该阶段出现少量含  $\text{NaCl}$  子晶包裹体,均一温度介于386℃~422℃,盐度介于32.39%~49.91%  $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$ ,表明它们是从不同性质的流体中捕获的。以上证据充分表明石英—多金属硫化物阶段发生了流体的减压沸腾作用。

不同温度、压力、盐度和密度的流体相混合,可以引起流体的沸腾。大量研究表明<sup>[26-29]</sup>,热液体系发生显著的沸腾作用可使得热液体系的相平衡发生显著的改变,相态的变化可促使热液中金属络合物发生分解,从而造成大量金属硫化物沉淀形成金属矿物。铜峪沟铜矿床早期矽卡岩阶段发生了流体的混合作用,进而导致了在石英—多金属硫化物阶段发生了流体的减压沸腾作用,从而使大量的金属硫化物在此阶段形成,即铜峪沟铜矿床石英—多金属硫化物阶段为主成矿阶段。

### 5.3 矿床成因类型探讨

成矿流体的性质和活动规律是判别矿床成因、揭示矿体规律的重要依据,流体包裹体是判别矿床类型的关键性依据<sup>[19]</sup>。通过对铜峪沟铜矿床与典型岩浆热液接触交代矽卡岩矿床和典型热水喷流沉积矿床包裹体特征进行对比表明(表5),铜峪沟铜矿床成矿流体均一温度、盐度、成矿深度与芮宗瑶等<sup>[30]</sup>、陈衍景等<sup>[19]</sup>所总结的典型岩浆热液接触交代矽卡岩矿床流体特征十分接近,而与典型的热液沉积矿床的流体特征则有很大差别。铜峪沟铜矿床与典型矽卡岩矿床相类似主要表现在:①铜峪沟铜矿床石英—多金属硫化物阶段成矿流体发生了减压沸腾作用导致大量金属硫化物的沉淀,与矽卡岩型矿床中往往出现岩浆的二次沸腾作用<sup>[30]</sup>的现象是一致的。②铜峪沟铜矿床与典型的岩浆热液接触交代矽卡岩矿床在成矿流体温度、盐度演变特征上也具有相似性,即早阶段成矿流体温度高、盐度

表5 铜峪沟铜矿床包裹体特征与典型矽卡岩矿床、热水沉积矿床对比表

Table 5 Comparison of inclusion characteristics between Tongyugou copper deposit and typical skarn, hydrothermal sedimentary deposits

	包裹体类型	均一温度集中范围 /℃	盐度集中范围 /% $\text{NaCl}_{\text{eqv}}$	成矿深度 /km	资料来源
铜峪沟铜矿床	液相包裹体	230~500, 少数>600	Ce: 5.25~9.21	0.05~0.14	本文
	气相包裹体		Q-PM: 8.81~21.96	1.41~3.27	
	含子晶包裹体		Sk: 21.68~58.68	2.83~5.65	
典型岩浆热液接触交代矽卡岩矿床	液相包裹体	250~650	低盐度区: 1~10	1~6	芮宗瑶等 [30] 陈衍景等 [19]
	气相包裹体		中盐度区: 10~24		
	含子晶包裹体		高盐度区: 30~60		
	$\text{CO}_2$ 包裹体				
熔融包裹体					
典型热水沉积矿床	液相包裹体	100~350	3.5~15	1~2	

高,晚阶段成矿流体温度低、盐度低。③从铜峪沟铜矿床的氧同位素特征来看,代表层砂卡岩典型矿物组合中石榴石的  $\delta O_{V-SMOW}$  值介于  $6.5 \times 10^{-3} \sim 9.5 \times 10^{-3}$ ,这与正常岩浆水的  $\delta O_{V-SMOW}$  值介于  $5.5 \times 10^{-3} \sim 9.5 \times 10^{-3}$  的特征比较类似<sup>[31]</sup>,说明层砂卡岩继承了岩浆热液的属性,即层砂卡岩的形成与岩浆热液密切相关。因此,笔者通过对铜峪沟铜矿床的流体包裹体及氢氧同位素研究认为,该矿床为岩浆热液层砂卡岩矿床。

砂卡岩型矿床形成通常与岩体侵位带来的热液活动密切相关,其成矿时代大致与岩体侵位时代相同<sup>[32,33]</sup>。近年研究发现鄂拉山地区的赛什塘铜矿床、铜峪沟铜矿床、杂科合铜银砷矿点和拉届亥钼铜矿点的形成与区内的三叠纪石英闪长岩、闪长玢岩、斜长花岗斑岩及石英斑岩等花岗质岩浆活动密切相关<sup>[34]</sup>。在铜峪沟铜矿床东南8 km的赛什塘铜矿为砂卡岩、斑岩复合矿床<sup>[5]</sup>,铜峪沟、赛什塘铜矿有着相似的大地构造和地球化学背景。地球化学研究结果表明,鄂拉山构造岩浆岩带花岗质岩石属于钙碱性—高钾钙碱性—钾玄岩系列岩石组合,具有典型俯冲带岛弧花岗岩相一致的岩石地球化学特征和壳幔混合源区特征,成矿时代为205~234 Ma<sup>[35,36]</sup>,这暗示了铜峪沟铜矿床的形成可能与区域上中—晚三叠世岩浆活动有关。

## 6 结论

(1) 铜峪沟铜矿床各成矿阶段发育的包裹体类型有含子矿物多相包裹体(S)、气相包裹体(G)和液相包裹体(L)。根据镜下特征显示,多相包裹体中的子矿物主要为NaCl晶体。

(2) 随着成矿流体的演化和成矿作用的进行,从早期砂卡岩阶段到晚期石英—方解石阶段,成矿流体的温度、盐度、密度有明显降低的趋势。

(3) 成矿流体为  $Na^+ - Ca^{2+} - SO_4^{2-} - Cl^-$  型,主要为岩浆热液和地层水的混合流体。砂卡岩阶段成矿流体发生了混合作用,石英—多金属硫化物阶段成矿流体发生了减压沸腾作用,导致了多金属硫化物在此阶段大量沉淀。

(4) 矿床地质及成矿流体特征表明,铜峪沟铜矿床为岩浆热液型层砂卡岩矿床,铜峪沟铜矿床的形成可能与中—晚三叠世岩浆活动有关。

## 参考文献:

- [1] 刘增铁,任家琪,邬介入,等. 青海铜矿 [M]. 北京:地质出版社,2008:1-291.  
LIU Zeng-tie, REN Jia-qi, WU Jie-ru, et al. Qinghai copper deposits [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 1-291.
- [2] 宋治杰,张汉文,李文明,等. 青海鄂拉山地区铜多金属矿床的成矿条件及成矿模式 [J]. 西北地质科学,1995,16(1):134-144.  
SONG Zhi-jie, ZHANG Han-wen, LI Wen-ming, et al. Metallogenic condition and model of copper multimetal deposits in Ngolashan region, Qinghai Province [J]. Northwest Geoscience, 1995, 16(1): 134-144.
- [3] 张汉文. 青海铜峪沟铜矿床的矿化特征、形成环境和矿床类型 [J]. 西北地质,2001,34(4):30-42.  
ZHANG Han-wen. Mineralized feature, tectonic setting and metallogenic type of Tongyugou copper deposit, Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2001, 34(4): 30-42.
- [4] 张汉文. 青海省铜峪沟铜矿床的热液沉积规律及形成环境—兼论热水作用与火山活动的关系 [J]. 西北地质科学,2000,21(2):46-56.  
ZHANG Han-wen. On the hydrothermal sedimentary laws and tectonic environment of Tongyugou deposit and the relationship between hydrothermal and volcanic activity [J]. Northwest Geoscience, 2000, 21(2): 46-56.
- [5] 李东生,奎明娟,古凤宝,等. 青海赛什塘铜矿床的地质特征及成因探讨 [J]. 地质学报,2009,83(5):719-730.  
LI Dong-sheng, KUI Ming-juan, GU Feng-bao, et al. Geological characteristics and genesis of the Saishitang copper deposit in Qinghai Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(5): 719-730.
- [6] 吴健辉,丰成友,张德全,等. 柴达木盆地南缘祁漫塔格—鄂拉山地区斑岩—砂卡岩矿床地质 [J]. 矿床地质,2010,29(5):760-774.  
WU Jian-hui, FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, et al. Geology of porphyry and skarn type copper polymetallic deposits in southern margin of Qaidan Basin [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(5): 760-774.
- [7] 詹发余,古凤宝,李东生,等. 青海东昆仑埃达克岩的构造环境及成矿意义 [J]. 地质学报,2007,81(10):1352-1368.  
ZHAN Fa-yu, GU Feng-bao, LI Dong-sheng, et al. Tectonic environment of adakite in eastern Kunlun area,

- Qinghai, and its ore-forming significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (10): 1352-1368.
- [8] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 171-248.  
LIU Bin, SHEN Kun. Fluid inclusion thermodynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 171-248.
- [9] 刘斌. 中高盐度 NaCl-H<sub>2</sub>O 包裹体的密度式和等容式及其应用 [J]. *地质论评*, 2001, 47: 617-622.  
LIU Bin. Density and isochoric formulae for NaCl-H<sub>2</sub>O inclusions with medium and high salinity and their applications [J]. *Geological Review*. 2001, 47: 617-622.
- [10] Bodnar R J, Vityk M O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions [C] // De Vivo B, Frezzotti M L. Fluid inclusions in minerals, methods and applications. Virginia Tech, Blacksburg, VA, 1994: 117-130.
- [11] Roedder E. Fluid inclusions [J]. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 1984, 12: 644.
- [12] 卢焕章, 范洪瑞, 倪培, 等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科技出版社, 2004: 1-355.  
LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, et al. Fluid inclusion [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-355.
- [13] 姜耀辉, 陈鹤年, 巫全淮, 等. 福建周宁芹溪官印铅锌矿化地质特征、成因及进一步找矿方向 [J]. *地质与勘探*, 1994, 30 (4): 21-25.  
JIANG Yao-hui, CHEN He-nian, WU Quan-huai, et al. Geological characteristics, genesis and further prospecting direction of Ag-Pb-Zn mineralization of Qinxiguansi, Zhouning, Fujian [J]. *Geology and Prospecting*, 1994, 30 (4): 21-25.
- [14] Norman D I, Musgrave J. N<sub>2</sub>-Ar-He compositions in fluid inclusions: indicators of fluid source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58 (3): 1119-1131.
- [15] Norman D I, Moor J N, Vonaka B. Gaseous species in fluid inclusions: a tracer of fluids and indicator of fluid processes [C] // Proceedings of the 21<sup>st</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 1996: 233-240.
- [16] 卢武长, 杨绍全. 利用氧键计算兰晶石、十字石等矿物的氧同位素分馏方程 [J]. *矿物岩石*, 1982, 2: 106-112.  
LU Wu-chang, YANG Shao-quan. Use of oxygen bonds to calculate fractionation on equations of oxygen isotope for minerals containing kyanite and staurolite [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1982, 2: 106-112.
- [17] 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究 [J]. *地学前缘*, 2000, 7 (2): 299-320.  
ZHENG Yong-fei, XU Bao-long, ZHOU Gen-tao. Geochemical studies of stable isotopes in minerals [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 (2): 299-320.
- [18] 田生玉. 青海赛什塘-日龙沟矿田岩浆岩与成矿的关系探讨 [J]. *有色金属矿产与勘查*, 1999, 8 (6): 383-387.  
TIAN Sheng-yu. Relations between magmatic rocks and metallization of the Saishitang-Rilonggou ore field in Qinghai [J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 1999, 8 (6): 383-387.
- [19] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征 [J]. *岩石学报*, 2007, 23 (9): 2085-2108.  
CHEN Yan-jing, NI Pei, FAN Hong-rui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types gold deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (9): 2085-2108.
- [20] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985: 1-267.  
ZHANG Li-gang. The application of the stable isotope to geology [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Publishing House, 1985: 1-267.
- [21] 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.  
ZHANG De-hui. Some new advances in ore-forming fluid geochemistry on boiling and mixing of fluids during the processes of hydrothermal deposits [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12 (6): 546-552.
- [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.  
ZHANG De-hui, XU Jiu-hua, YU Xin-qi, et al. The diagenetic and metallogenic depth: main constraints and the estimation methods [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (1): 112-125.
- [23] ZENG Qing-dong, LIU Jian-ming, ZHANG Zuo-lun, et al. Geology, fluid inclusion, and sulfur isotope studies of the Chehugou porphyry molybdenum-copper deposit, Xilamulun metallogenic belt, NE China [J]. *Resource Geology*, 2011, 61 (3): 241-258.
- [24] 靳皇玉, 于政涛, 吴敬欣. 吉林松江河金矿床流体包裹体特征及矿床成因 [J]. *世界地质*, 2014, 33 (1): 77-85.  
JIN Huang-yu, YU Zheng-tao, WU Jing-xin. Character-

- istics of fluid inclusions and genesis of Songjianghe gold deposit in Jilin Province [J]. *Global Geology*, 2014, 33 (1): 77-85.
- [25] Shepherd T J, Rankin A H, Alderton D H M. A practical guide to fluid inclusion studies [M]. London: Blackie & Son Ltd, 1985: 1-239.
- [26] Reed M H, Palandri J. Sulfide mineral precipitation from hydrothermal fluids [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 61 (1): 609-631.
- [27] 吴华英, 张连昌, 陈志广, 等. 西拉木伦多金属成矿带鸡冠山斑岩钼矿富氟高盐度高氧逸度流体包裹体研究 [J]. *岩石学报*, 2010, 26 (5): 1363-1374.  
WU Hua-ying, ZHANG Lian-chang, CHEN Zhi-guang, et al. Hypersaline, high-oxygen fugacity and F-rich fluid inclusions in Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, Xilamulun metallogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (5): 1363-1374.
- [28] 顾雪祥, 刘丽, 董树义, 等. 山东沂南金铜铁矿床中的液态不混溶作用与成矿: 流体包裹体和氢氧同位素证据 [J]. *矿床地质*, 2010, 29 (1): 43-57.  
GU Xue-xiang, LIU Li, DONG Shu-yi, et al. Immiscibility during mineralization of Yinan Au-Cu-Fe deposit, Shandong Province: evidence from fluid inclusions and H-O isotopes [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29 (1): 43-57.
- [29] 王键, 李碧乐, 张晗, 等. 山西中条山铜矿峪铜矿流体演化特征 [J]. *世界地质*, 2013, 33 (2): 201-210.  
WANG Jian, LI Bi-le, ZHANG Han, et al. Evolution characteristics of Tongkuangyu copper fluid in the Zhongtiaoshan Mountains, Shanxi Province [J]. *Global Geology*, 2013, 33 (2): 201-210.
- [30] 芮宗瑶, 李荫清, 王龙生, 等. 从流体包裹体研究探讨金属矿床成矿条件 [J]. *矿床地质*, 2003, 22 (1): 13-23.  
RUI Zong-yao, LI Yin-qing, WANG Long-sheng, et al. Approach to ore forming conditions in light of ore fluid inclusions [J]. *Mineral Deposit*, 2003, 22 (1): 13-23.
- [31] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-166.  
WEI Ju-ying, WANG Guan-yu. *Isotope geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-166.
- [32] Watanabe M, Nishido H, Moriwaki H, et al. K-Ar ages of skarn deposits in the inner zone of southwestern Japan [J]. *Geochemical Journal*, 1988, 22: 231-236.
- [33] Annikova I Y, Vladimirov A G, Vystavnov S A. U-Pb,  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  data and Sm-Nd, Pb-Pb isotopic study of Kalguta Mo-W ore-magmatic system [J]. *Petrologiya*, 2006, 149: 1-108.
- [34] 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程 [J]. *岩石学报*, 2012, 28 (6): 1808-1828.  
YAN Zhen, WANG Zong-qi, LI Ji-liang, et al. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West Qinling Terrane, northeastern margin of the Tibet Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28 (6): 1808-1828.
- [35] 刘建平, 赖健清, 谷湘平, 等. 青海赛什塘铜矿区侵入岩体地球化学及锆石 LA-ICPMS U-Pb 年代学 [J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22 (3): 622-632.  
LIU Jian-ping, LAI Jian-qing, GU Xiang-ping, et al. Geochemistry and zircon LA-ICPMS U-Pb geochronology of intrusive body in Saishitang copper deposit, Qinghai Province, China [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22 (3): 622-632.
- [36] 王松, 丰成友, 李世金, 等. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2009, 36 (1): 74-84.  
WANG Song, FENG Cheng-you, LI Shi-jin, et al. Zircon SHEIMP U-Pb dating of granodiorite Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (1): 74-84.