

# 青海赛什塘铜矿床流体包裹体研究

何 鹏<sup>1</sup> 严光生<sup>2</sup> 祝新友<sup>3</sup> 张忠义<sup>3</sup> 王艳丽<sup>3</sup>  
程细音<sup>3</sup> 李永胜<sup>2</sup> 甄世民<sup>1</sup> 杜泽忠<sup>1</sup> 贾德龙<sup>1</sup> 巩小栋<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;  
3. 北京矿产地质研究院, 北京 100012)

**摘要:**对青海赛什塘铜矿床内与成矿有关的矽卡岩中石榴子石、透辉石及硫化物石英脉中流体包裹体的岩相学、显微测温学和显微激光拉曼光谱分析等的研究表明, 流体包裹体有富液相、富气相和含子矿物多相包裹体 3 种类型; 早期矽卡岩阶段均一温度 436~562℃, 盐度为 34 wt%~45wt%NaCl eqv., 代表了高温、高盐度岩浆流体; 退变质阶段均一温度 322~419℃, 盐度为 15wt%~39 wt%NaCl eqv.; 硫化物阶段均一温度 235~366℃, 盐度 5wt%~36wt%NaCl eqv.。激光拉曼光谱分析结果表明, 包裹体中气相成分以 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 为主。成矿流体属于中高温、高盐度的 NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 体系, 在 290~360℃之间发生了强烈的流体沸腾作用, 导致大量的金属硫化物沉淀, 成矿流体的沸腾作用是导致铜矿床形成的重要因素。

**关键词:**流体包裹体; 沸腾作用; 矽卡岩铜矿床; 赛什塘; 青海

**中图分类号:** P618.41      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2013)02-0580-14

青海东部鄂拉山地区是中国重要的铜多金属成矿带之一, 包括赛什塘铜矿床、铜峪沟铜矿床、索拉沟铜多金属矿床、日龙沟锡多金属矿床等<sup>[1-9]</sup>。赛什塘铜矿地质矿产勘查和地质科研工作都具有较长的历史, 前人在矿床地质特征、岩浆岩特征、成矿条件、成矿作用、成矿模式等方面做了大量的研究工作<sup>[1,6,7,10-12]</sup>。对矽卡岩方面的研究也较深入<sup>[1,3,7]</sup>, 但对矽卡岩有关的成矿流体和流体的成矿作用研究基本上处于空白, 在一定程度上影响了该区矽卡岩型矿床的找矿工作。笔者在详实的野外工作基础上, 对赛什塘铜矿床矽卡岩阶段的石榴子石、透辉石、硫化物阶段的石英和石英-碳酸盐阶段的石英中的流体包裹体开展了岩相学、显微测温及包裹体气相成分的激光拉曼光谱分析, 重点讨论赛什塘铜矿成矿流体特征、演化规律及其成矿机制, 以期为区域上寻找该类型矿床提供借鉴和参考。

## 1 区域地质背景

研究区处于东昆仑、西秦岭造山带的衔接转换区, 鄂拉山构造带的东南部, 苦海—赛什塘蛇绿混杂带的东缘, 为近东西向、北西—北北西向与北东向多组构造交汇处(图 1)。成矿区划为鄂拉山多金属矿带(Ⅱ级)的赛什塘—日龙沟亚矿带(Ⅳ级), 本矿区位于该亚矿带南东段, 属于秦祁昆造山系的一部分。经历了早古生代和晚古生代—早中生代的复合造山作用, 发育多期(次)岩浆作用和成矿作用<sup>[13-15]</sup>。由于矿区处于不同构造带的交接部位, 并且自海西运动之后又经历了印支运动及喜山运动等构造变动改造及影响, 因此构造格局较为复杂, 成矿条件优越, 具有良好的找矿前景。

赛什塘矿区内出露地层为中—下三叠统、古近—新近系、第四系。Subcolumbites 化石是早三叠世

收稿日期: 2012-08-21; 改回日期: 2012-12-11

作者简介: 何鹏, 男, 1987 年生, 硕士生, 地球化学专业; E-mail: hepeng198761@163.com。

通讯作者: 祝新友, 男, 教授级高级工程师, 主要从事矿床学研究; E-mail: zhuxinyou@tom.com。

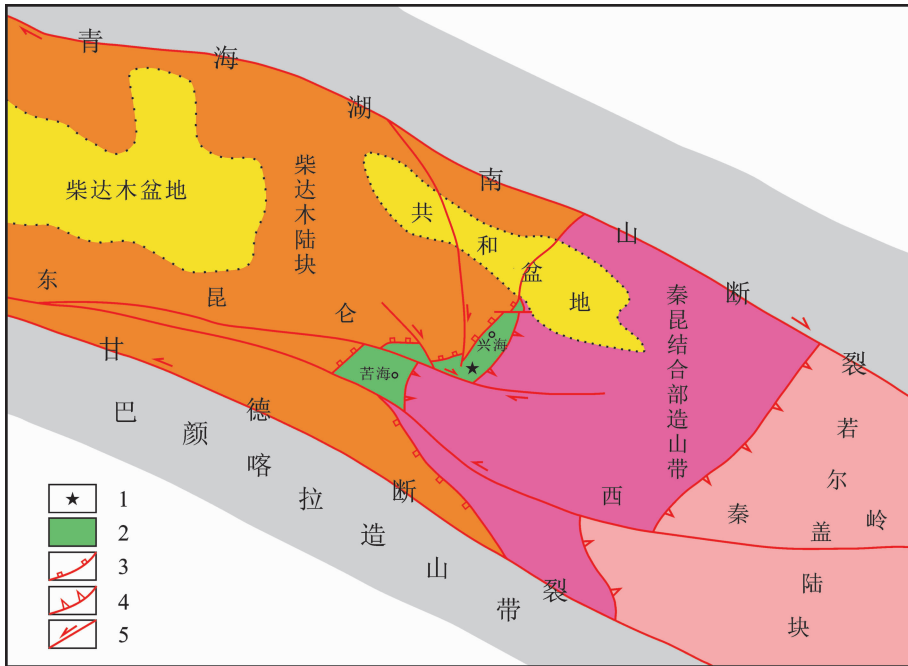


图 1 秦昆接合部区域构造略图(据张志勇等,2001,修改)

1—赛什塘工作区位置;2—苦海—兴海蛇绿混杂带;3—逆冲(走滑)带;4—滑脱带;5—横推(走滑)断裂

Fig.1 Simplified regional tectonic map of the juncture between Qinling and Kunlun

1- Saishitang working area; 2- Kuhai-Saishitang ophiolite melange zone; 3-Thrust (strike-slip) belt; 4-Decollement zone; 5-Transverse(strike-slip) thrust

晚期一个典型的世界属性,区域地层内这一化石的发现可以将地层时代定为早—中三叠世<sup>[6,17]</sup>。中—下三叠统主体为一套变碎屑岩—变碳酸盐岩岩石组合。变质长石石英细砂岩与黑云母千枚岩互层或者互为夹层,夹透镜状大理岩。大理岩厚度变化较大,沿走向可渐变或突变为黑云母千枚岩、变质粉砂岩。岩石普遍具条带(纹)状构造。靠近侵入岩的岩层,发生强烈的接触(交代)变质作用,形成角岩和矽卡岩。

矿区内以北西向构造为骨架,且以褶皱构造为主,断裂次之。主要的褶皱构造为位于矿区东南部北西向延伸的雪青沟复式背斜,由下二叠统下岩组构成。在雪青沟复式背斜西南翼有次级的赛什塘背斜,对控矿作用影响较强,总体走向北西—南东向,轴面直立或略向西倾,岩浆岩主体出露于其核部。由于地层岩性组合物理性质差异较大,所以在褶皱发展过程中容易产生层间剥离,在厚层状大理岩的顶、底板,这种构造特别发育,为岩浆侵入、矽卡岩的形成及矿液沉淀创造了良好的空间条件<sup>[1]</sup>。

中—酸性岩浆岩呈北西向带状在矿区内广泛分布,横贯矿区中部,其中以石英闪长岩岩体最大,与

成矿关系也最密切,其次有花岗闪长岩、石英闪长斑岩、石英斑岩、英安斑岩、流纹斑岩等。根据侵入接触关系及岩性特征划分形成顺序为:闪长岩→中粒石英闪长岩→中细粒石英闪长斑岩→花岗闪长斑岩或英云闪长斑岩→花岗斑岩→石英斑岩<sup>[10,16]</sup>。赛什塘铜矿及鄂拉山铜矿带的侵入岩成岩年代学研究资料较多,自 20 世纪 70 年代以来,多个单位研究工作在赛什塘及邻区开展了相关岩体的 K-Ar、Rb-Sr、U-Pb 等方法的定年研究工作,基本确定了赛什塘地区侵入岩的年代为印支期。

## 2 矿床地质特征

### 2.1 矿体特征

主矿体产于石英闪长岩与大理岩及钙质变粉砂岩接触带的矽卡岩中(图 2),并且主要产于矽卡岩的外接触带。主体发育于赛什塘中部背斜的西翼,总体走向北西,倾向南西,倾角 20°~40°;东翼矿体总体倾向北东,倾角 30°。矿体形态主要为层状、似层状,次为透镜状、细脉状,见有分枝复合现象。

赛什塘铜多金属矿床以铜为主,共(伴)生铅、

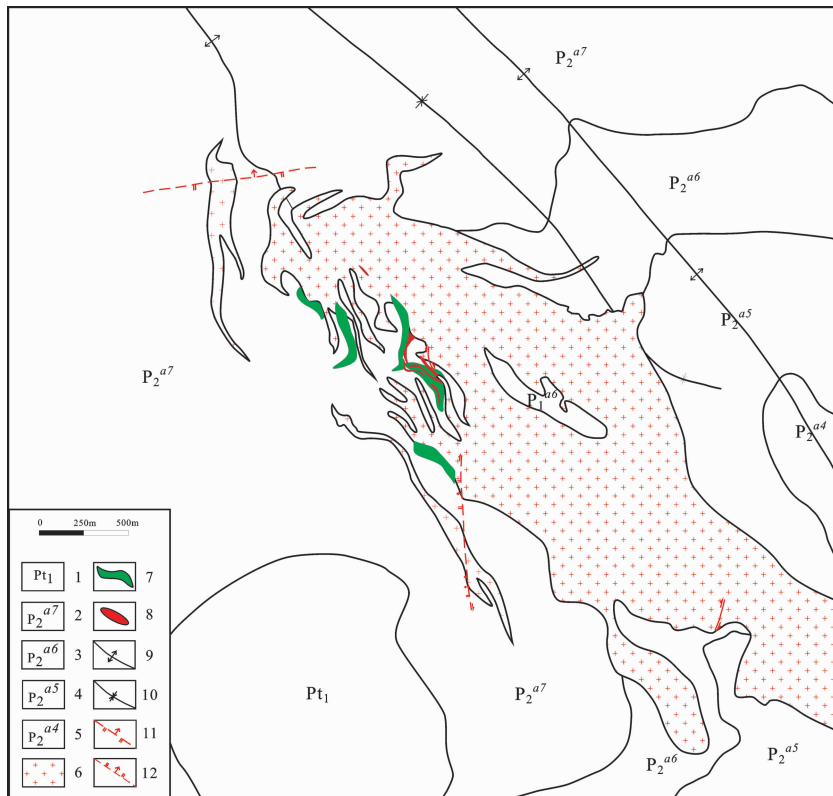


图 2 赛什塘铜矿地质简图

1—混合岩、斜长片麻岩、黑云石英片岩、绿泥石英片岩、绢云石英片岩;2—黑云母千枚岩、变质粉砂岩、大理岩、长石石英砂岩;3—黑云母千枚岩、长石石英砂岩、透镜状大理岩、变质粉砂岩;4—绢云母千枚岩、透镜状大理岩、长石石英砂岩及变质粉砂岩;5—绢云母千枚岩、长石石英砂岩、大理岩;6—石英闪长岩;7—矽卡岩;8—矿体;9—背斜;10—向斜;11—逆断层;12—正断层

Fig.2 Generalized geological map of the Saishitang copper deposit

1— Migmatite, plagioclase gneiss, biotite quartz schist, chlorite quartz schist, sericite-quartz schist; 2— Biotite phyllite, metamorphic siltstone, marble, feldspar-quartz sandstone; 3—Biotite phyllite, feldspar-quartz sandstone, lenticular marble, metamorphic siltstone; 4—Sericite phyllite, lenticular marble, feldspar-quartz sandstone and metamorphic siltstone; 5—Sericite phyllite, feldspar-quartz sandstone, marble; 6—Quartz diorite; 7—Skarn; 8—Ore body; 9—Anticline; 10— Syncline; 11—Reverse fault; 12—Normal fault

锌、金、银、锡、铁、硫等有益组分。现已查明矿体有 176 个,其中铜矿体 116 个、硫矿体 26 个、铅锌矿体 32 个、铁矿体 2 个。

2.2 矿石特征

磁黄铁黄铜矿石(图 3-A):为区内最主要矿石类型,构成区内工业矿体主体,除磁黄铁矿和黄铜矿外,金属矿物还有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等,矿石具他形粒状、填隙和交代溶蚀结构,块状、浸染状、条带状构造,脉石矿物为矽卡岩矿物。

磁铁黄铜矿石:主要金属矿物为磁铁矿和黄铜矿,少量磁黄铁矿,偶见少量黄铁矿和闪锌矿。矿石具他形粒状和交代溶蚀结构,块状、浸染状、纹带状构造,脉石矿物有透辉石、阳起石等。

黄铁黄铜矿石:主要金属矿物为黄铁矿和黄铜矿,少量磁黄铁矿,有时含较多闪锌矿,构成闪锌黄铁黄铜矿石;矿石具半自形-他形粒状和交代溶蚀结构,浸染状、纹带状构造,脉石矿物中见透闪石、阳起石等。

围岩黄铜矿石(图 3-B):此类矿石分布较广、种类多,多见于小矿体中,主要有矽卡岩黄铜矿石、变粉砂岩黄铜矿石等,主要金属矿物为黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿,有时见辉铜矿和辉钼矿;矿石具他形粒状结构,浸染状、纹带状和细脉状构造,脉石矿物随岩石种类不同而异。

2.3 矿石矿物成分

矿石矿物主要为黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿,次

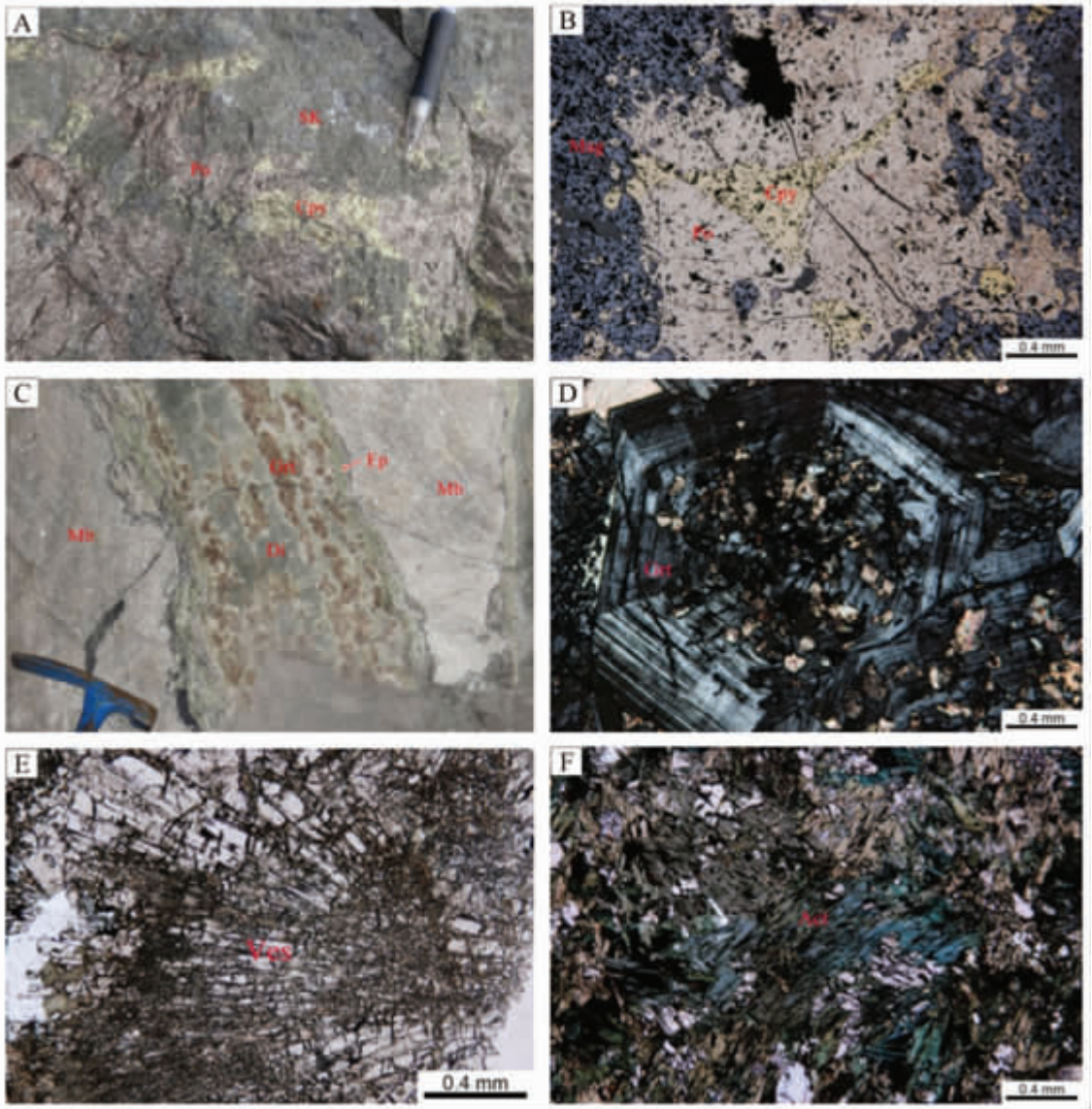


图 3 赛什塘铜矿矿石和矽卡岩野外和镜下照片

A—矽卡岩化磁黄铁矿黄铜矿;B—黄铜矿磁黄铁矿磁铁矿矿石;C—大理岩中矽卡岩脉;  
D—石榴子石矽卡岩;E—矽卡岩中符山石;F—矽卡岩中阳起石

Fig.3 Photographs of ores and skarn of the Saishitang copper deposit

A—Skarnized pyrrhotite chalcopyrite ore; B—Chalcopyrite pyrrhotite magnetite ore;

C—Skarn vein in the marble; D—Garnet skarn; E—Idocrase in the skarn; F—Actinolite in the skarn

为闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、白钨矿、黝锡矿、毒砂;  
少—微量的斑铜矿、辉钼矿、菱铁矿、孔雀石、褐铁  
矿、辉铜矿、自然铜、自然金、自然银、自然铋、硫铋铜  
矿、银黝铜矿、淡红银矿、深红银矿、辉铜银矿、黄铜  
矿、硫铋镍矿、硫砷钴矿等。

脉石矿物有透辉石、石榴子石、硅灰石、符山石、  
尖晶石、榍石、阳起石、透闪石、绿帘石、绿泥石、绢云  
母、石英、方解石等(图 3-D,E,F)。

### 2.4 围岩蚀变及矿化阶段

赛什塘矿床的围岩蚀变主要是矽卡岩化, 根据  
矽卡岩空间分布和原岩岩性特征可分为内矽卡岩带  
与外矽卡岩带。内矽卡岩带主要由石英闪长岩、花岗  
闪长岩经矽卡岩化作用形成; 外矽卡岩带主要发育  
于岩体与围岩接触的碳酸盐岩及变质粉砂岩地层  
内, 依据矽卡岩化矿物主体不同, 可划分为石榴子石  
矽卡岩、石榴子石透辉石矽卡岩(图 3-C)、符山石透

辉石矽卡岩、绿帘石化透辉石矽卡岩等。此外,在内接触带还发育有绿泥石化、碳酸岩化等;外接触带发育有透闪石化、阳起石化、方解石化等。

根据岩相学特征、矿石结构构造、围岩蚀变、矿物共生组合以及穿插关系,赛什塘铜矿床演化过程可划分为4个阶段:矽卡岩阶段、退变质-氧化物阶段、硫化物阶段、石英-碳酸岩阶段。矿物组合及矿物生成顺序具典型的矽卡岩成岩成矿特征(图4)。

(1)矽卡岩阶段

主要形成石榴子石和透辉石、硅灰石及少量符山石等矽卡岩矿物,在空间上主要位于接触带中心及内侧。可以分为早期矽卡岩阶段和晚期矽卡岩阶段。形成石榴子石、透辉石矽卡岩及少量磁铁矿。

(2)退变质-氧化物阶段

矿区内这一阶段非常发育,见有阳起石、透闪石、绿泥石、绿帘石等。同时开始出现少量硫化物,如辉钼矿、磁黄铁矿等,有较大量的磁铁矿产出。

(3)硫化物阶段

为铜矿的主成矿阶段,在矿区内发育。金属矿物主要有磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、斑铜矿、毒砂和少量辉钼矿等。主要蚀变类型有绿帘石化、绿帘石化、硅化和碳酸盐化等。

(4)石英-碳酸岩阶段

石英和方解石呈块状及脉状出现,见极少量黄铁矿化、黄铜矿化,为成矿最晚阶段的产物。

### 3 流体包裹体岩相学及显微测温学

本次工作主要针对赛什塘铜矿床中的矽卡岩矿物石榴子石、透辉石及部分含矿石英脉中的石英进行了包裹体岩相学、显微测温分析和包裹体成分的激光拉曼探针分析。

#### 3.1 样品及研究方法

为了探讨赛什塘铜矿床成矿流体来源、成分及演化特征,对赛什塘铜矿床矽卡岩矿物石榴子石、透辉石单矿物以及硫化物阶段、石英-碳酸岩阶段的石英脉进行了系统取样;样品均来自坑道内和岩心

矿物	矽卡岩阶段	退变质-氧化物阶段	硫化物阶段	石英-碳酸岩阶段
硅灰石	—————			
符山石	—————			
石榴子石	—————			
透辉石	—————			
阳起石		—————		
透闪石		—————		
绿帘石		—————		
绿泥石		—————		
磁铁矿		—————		
磁黄铁矿			—————	
白钨矿		—————		
毒砂			—————	
辉钼矿		—————	—————	
黄铜矿			—————	
黄铁矿			—————	
斑铜矿			—————	
方铅矿			—————	
闪锌矿			—————	
石英		—————	—————	
方解石				—————

图4 矿物组合及矿物生成顺序表

Fig.4 Mineral association and sequence of crystallization

中,在垂向和水平方向上具有一定的连续性。首先,通过对包裹体片在光学显微镜下观察,确定主矿物特征和原生或假次生包裹体的大小、形态、分布、类型、共生组合及充填度,照相、定位后再进行热力学研究,挑选有代表性的包裹体进行显微测温和激光拉曼成分测定。

流体包裹体显微测温工作在有色地质调查中心包裹体实验室进行,冷热台为 Linkam 600 型,可测温度范围为 $-198\sim+600^{\circ}\text{C}$ ,冷冻和加热温度精度分别为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。冷冻测温时,利用液氮对包裹体降温,在温度下降过程中观察包裹体的变化,包裹体冷冻后,缓慢升温,观察三相点、冰点等,当温度接近相变点时,控制升温速度至小于 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

进行均一温度测定主要分两种情况:气液两相包裹体,在升温过程中观察气液两相的变化,当气液相接近均一时,将升温速度控制到 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,以便准确记录均一温度;含子晶的多相包裹体,在升温过程中观察气、液、固三相的变化,先测部分均一温度,当子晶将要消失或气液相接近均一时,降低升温速度至 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,记录子晶消失温度及气液相均一温度。

### 3.2 流体包裹体岩相学

在显微镜下观察发现,赛什塘铜矿床石榴子石颗粒大,结晶程度好,有明显的环带结构,其内包裹体发育数量较少,流体包裹体体积均较小, $2\sim 8\mu\text{m}$ ,形态各异,通常呈椭球形、不规则形出现。透辉石中包裹体数量也较少,分布较分散,体积小, $3\sim 10\mu\text{m}$ ,呈椭圆形、负晶形、不规则状等。在石榴子石与透辉石中气相、气液两相和含子晶三相包裹体均有发现。含石英英脉中包裹体较发育,气相和气液两相包裹体居多,部分为三相包裹体,含有透明矿物子晶。大小为 $2\sim 15\mu\text{m}$ ,包裹体形态多样,呈椭圆形、负晶形、长条状、不规则状。前人也对石英内包裹体做了较系统的测试工作<sup>[7]</sup>,故本次工作主要以矽卡岩矿物内包裹体为重点。依据室温条件下流体包裹体的相态种类、充填度特征以及均一过程等,可将其分为3类:

I类为富液相包裹体,室温下由气液两相(V+L)组成的盐水溶液包裹体,是最为常见类型。包裹体大小 $5\sim 22\mu\text{m}$ ,形态为圆形、椭圆形、负晶形、不规则状等。室温下气液比一般 $<50\%$ ,加热后最终均一至液相。在石英、石榴子石、透辉石中均有发现,尤其在石英中的较大,常与富气相包裹体、含子晶三相包裹体密切共生。

II类为富气相包裹体,由气相和液相组成的盐水溶液包裹体,多呈椭球状,大小 $3\sim 10\mu\text{m}$ ,室温下一般气液比 $>50\%$ ,气泡都呈椭球状,加热时最终均一至气相,颜色较深。在石英、石榴子石、透辉石中均有发现,但总体数量较少。

III类为含子矿物三相包裹体,与富液相包裹体、富气相包裹体共存,室温下为三相(V+L+S),在石榴子石、透辉石中较多见。包裹体呈椭球状或不规则状,大小 $3\sim 12\mu\text{m}$ ,气液比多为 $5\%\sim 10\%$ 。子晶多数为透明矿物,大部分为石盐,少量为浑圆状钾盐子晶,另外,还发现有不透明金属子矿物存在。子晶数量总体较少,在局部大量集中出现,石盐子晶多呈立方体,淡绿色,大小一般 $<5\mu\text{m}$ ;不透明矿物子晶主要为黄铜矿和黄铁矿,液相体积一般较大,金属子矿物显示成矿流体富含金属矿质的特性。多子晶包裹体内常有石盐和金属子晶等多个子晶共存,有时同一包裹体内能发现2个甚至2个以上的透明子矿物。加热时,大部分包裹体子晶先消失,气泡后消失,最后均一为液相。

### 3.3 包裹体显微测温及盐度

#### 3.3.1 石榴子石中的流体包裹体

流体包裹体测温结果列于表1中,早期阶段,主要以高温高盐度为特征(图7),代表了早期成矿流体的活动情况。在石榴子石中包裹体测温过程中,冷冻现象不明显,部分 $10\%$ 左右气液比包裹体(图5-B)升温至 $350^{\circ}\text{C}$ 以上均一到液相,少量较大气液比包裹体加热到 $580^{\circ}\text{C}$ 仍不均一,说明石榴子石包裹体形成于高温、高盐度流体环境中。石榴子石包裹体的均一温度较高,集中在 $498\sim 562^{\circ}\text{C}$ (图6-A),大部分均一到液相,少量大气液比包裹体均一到气相。石榴子石中多相包裹体的子晶主要是石盐,融化温度为 $241\sim 379^{\circ}\text{C}$ ,盐度为 $34.13\text{wt}\%\sim 45.23\text{wt}\%\text{NaCl eqv.}$ 。常见含黑色金属子晶的包裹体(图5-A),根据形态和光性特征推断不透明子矿物可能有黄铁矿、黄铜矿等,加温到约 $580^{\circ}\text{C}$ 金属子晶仍不溶解,显示矽卡岩早期流体富含金属物质。

#### 3.3.2 透辉石中的流体包裹体

透辉石中的包裹体冷冻现象也不明显,较难测到冰点温度。透辉石的流体包裹体少量为大气液比包裹体(图5-C),常见含石盐的三相包裹体(图5-D),部分液相包裹体均一温度较高,可达 $464\sim 481^{\circ}\text{C}$ ,大部分集中在 $352\sim 446^{\circ}\text{C}$ (图6-B)。石盐熔

表 1 流体包裹体测温结果统计  
Table 1 Microthermometric results of fluid inclusions

成矿期	样品号	主矿物	包体类型	冰点温度/°C	石盐熔化温度/°C	均一温度/°C	盐度/wt%NaCl eqv.			
				范围	平均值	范围	平均值			
砂卡岩阶段	SSB-41	石榴子石	I		483~562(7)	538				
			II		479~543(4)	512				
			III	353~379(8)	365	42.68~45.23	43.82			
		透辉石	I		464~481(4)	473				
			I	-5.3~-10.9(6)		297~392(8)	358	8.28~14.87	11.36	
			II		348~378(2)	367				
	SSB-57	透辉石	III	346~359(5)	353	366~396(6)	381	42.03~43.25	42.66	
			I		339~387(6)	366				
			II		327~358(4)	340				
	SSB-87	透辉石	III	354~366(6)	359	379~459(6)	426	42.78~43.93	43.29	
			I		356~483(5)	438				
			III	241~346(7)	294	373~549(6)	476	34.13~42.03	37.71	
	SSB-123	石榴子石	I		278~351(9)	317	461~534(4)	492		
			III		226~343(6)	285	455~551(7)	513	36.54~42.50	39.52
			I	-3.6~-9.7(5)		268~372(6)	328	5.86~13.62	10.36	
SSB-251	透辉石	III		231~249(5)	240.5	352~395(7)	364	33.25~41.76	37.04	
		I	-1.1~-6.7(16)		262~366(18)	327	1.91~10.11	5.98		
		II	-2.3~-5.9(7)		286~345(7)	322	3.87~9.08	5.82		
SSB-86	石英	III				297~348(6)	331	33.54~34.62	34.1	
		I	-3.1~-8.2(9)		310~371(11)	342	5.11~11.93	8.32		
		III		237~262(4)	250.75	308~324(5)	318	33.89~35.45	34.74	
SSB-56A	石英	I	-3.6~-8.7(14)		235~337(16)	319	5.86~12.51	8.92		
		II	-5.6~-9.1(6)		256~323(6)	284	8.68~12.96	10.62		
		III		243~258(3)	260	314~352(4)	337	34.25~36.61	35.40	

石英硫化物阶段

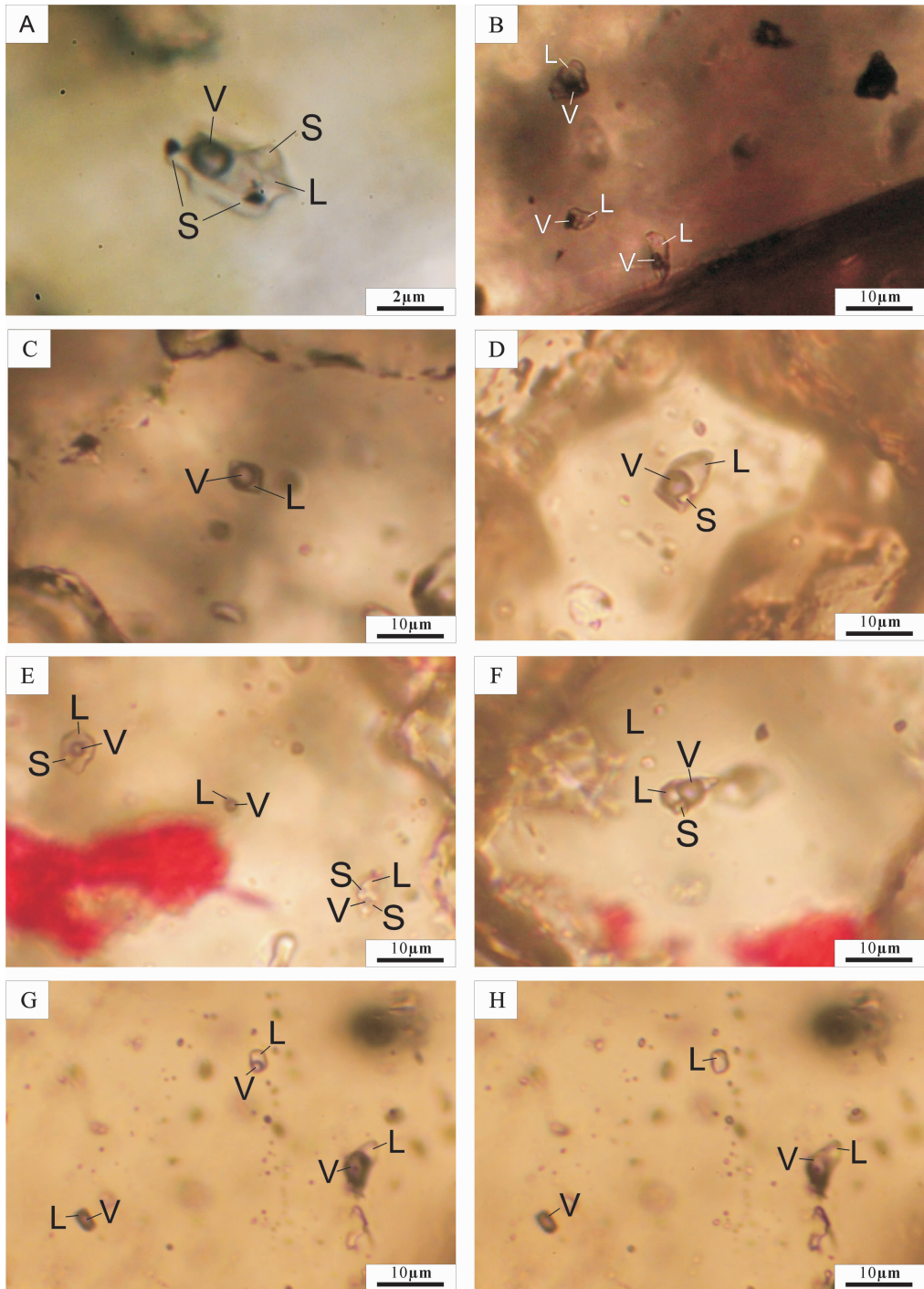


图 5 赛什塘铜矿流体包裹体照片

A—石榴子石中含有黑色金属子矿物的Ⅲ类流体包裹体;B—石榴子石中的Ⅰ类包裹体;C—透辉石中的Ⅱ类包裹体;  
 D—透辉石中含有石盐子晶的Ⅲ类包裹体;E—石英中Ⅲ类包裹体;F—石英中的大气液比含子晶包裹体;  
 G—石英中不同类型包裹体均一前共存现象;H—石英中不同类型包裹体均一后共存现象

Fig.5 Microphotographs of fluid inclusions from the Saishitang copper deposit

A—Ⅲ-type inclusion of garnet containing black daughter minerals; B—I-type inclusion of garnet C—Ⅱ-type inclusion of diopside;  
 D—Ⅲ-type inclusion of diopside containing halite daughter minerals; E—Ⅲ-type inclusion of quartz; F—Fluid inclusions containing  
 cubic daughter minerals in quartz; G—Coexistence of different types of fluid inclusions with similar homogenization temperatures in  
 different homogenization ways before they become homogenous in quartz; H—Coexistence of different types of fluid inclusions with  
 similar homogenization temperatures in different homogenization ways after they become homogenous in quartz



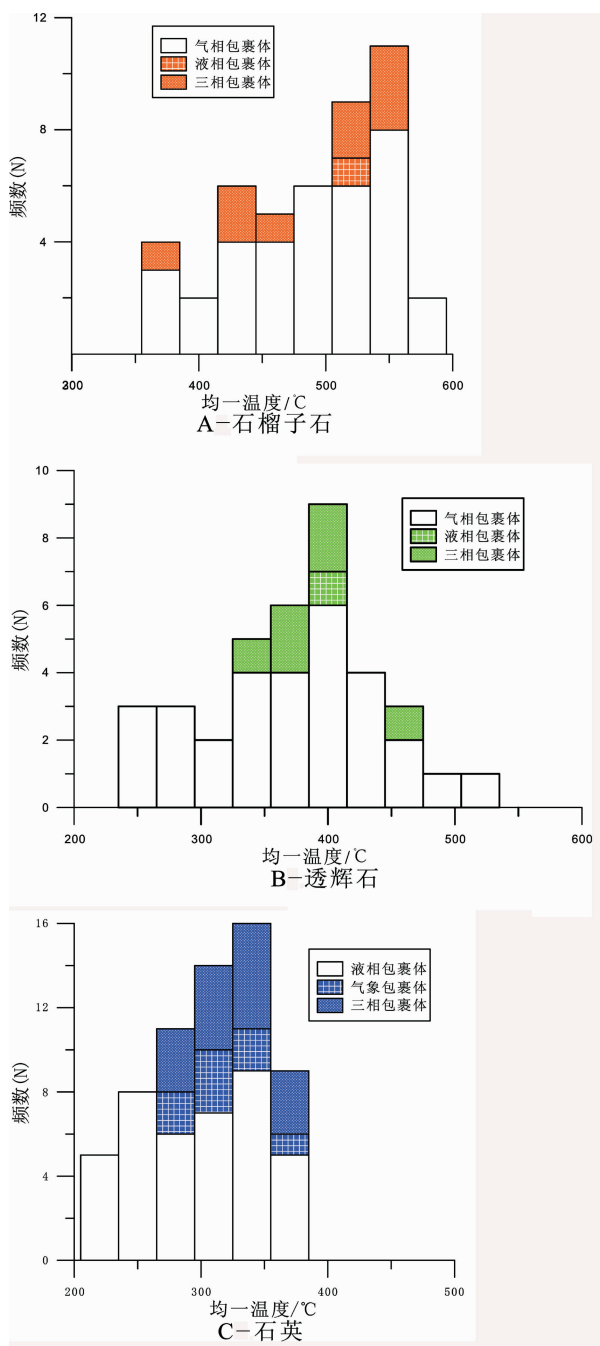


图6 赛什塘铜矿流体包裹体均一温度直方图

Fig.6 Histograms of homogenization temperatures of the fluid inclusions from the Saishitang copper deposit

化温度在 226~379℃, 盐度为 33.25wt%~45.23wt% NaCl eqv., 部分包裹体内也发现有含黑色黄铁矿、黄铜矿金属子晶的包裹体, 加温到约 580℃时不溶解。

### 3.3.3 石英中的流体包裹体

石英中含多种类型包裹体, 大部分为气液两相, 有少量含子晶的三相包裹体(图 5-E), 也有大气液比

含子晶包裹体(图 5-F)。流体包裹体均一温度主要集中在 262~358℃。常见气相包裹体和液相包裹体出现于同一石英颗粒中(图 5-G,H), 而且它们的均一温度大体一致, 集中在 290~360℃(图 6-C), 显示出沸腾包裹体的特点, 这一现象在石英的均一温度直方图中可以明显反映出来(图 7)。大部分气液包裹体盐度为 1.91wt%~12.96wt% NaCl eqv., 变化较大; 含子晶包裹体盐度为 33.54wt%~36.61wt% NaCl eqv.。

## 4 流体包裹体激光拉曼光谱分析

为进一步确定流体成分, 对各类包裹体的气相、液相、部分子晶以及包裹体寄主矿物进行了激光拉曼光谱峰值扫描分析。测试在中国地质科学院激光拉曼实验室进行, 仪器为英国 Renishaw System-2000 显微共焦激光拉曼光谱仪, 激发激光波长 514.53nm, 激光功率 20 mW, 激光束斑最小直径 1 μm, 光谱分辨率 1~2cm<sup>-1</sup>。获得的部分激光拉曼图谱如图 8。

测试结果表明, 石榴子石包裹体中, 部分气相峰值为 2915.8 cm<sup>-1</sup>, 气相成分主要为 CH<sub>4</sub>, 部分为 H<sub>2</sub>O(图 8-A); 透辉石中有明显的 2 915.8 cm<sup>-1</sup>、3 446.9 cm<sup>-1</sup>、3 454.9 cm<sup>-1</sup> 峰值, 气相成分为 CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>O, 液相成分为 H<sub>2</sub>O(图 8-B,C); 石英中的成分稍复杂, 气相成分中部分峰值为 1 386.5 cm<sup>-1</sup>、2 915.8 cm<sup>-1</sup>, 部分气相成分 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 共存(图 8-D), 部分只有 CH<sub>4</sub>, 更多的气相成分只有 H<sub>2</sub>O。从早期的石榴子石、透辉石到晚期的石英中, 包裹体中 H<sub>2</sub>O 的含量增多, 说明矽卡岩后期阶段, 有较多天水的加入。激光拉曼光谱分析结果表明成矿流体属于 NaCl-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> 体系。

## 5 讨论

### 5.1 流体演化过程

流体包裹体是研究成矿流体的直接样本, 其物质组成和形成的物理化学条件反映了成岩、成矿时介质的环境特征。在赛什塘铜矿床的初期矽卡岩阶段, 均一温度范围为 436~562℃, 盐度为 34wt%~45wt% NaCl eqv., 部分包裹体加热到 580℃仍不均一, 表现出高温、高盐度的岩浆热液特点, 与中国和世界其他地区的矽卡岩型矿床成矿流体特征<sup>[18-21]</sup>相似。发现较多发育多相含子晶包裹体, 有些含有黄铁矿、黄铜矿等金属子晶, 说明矽卡岩早期流体富含有

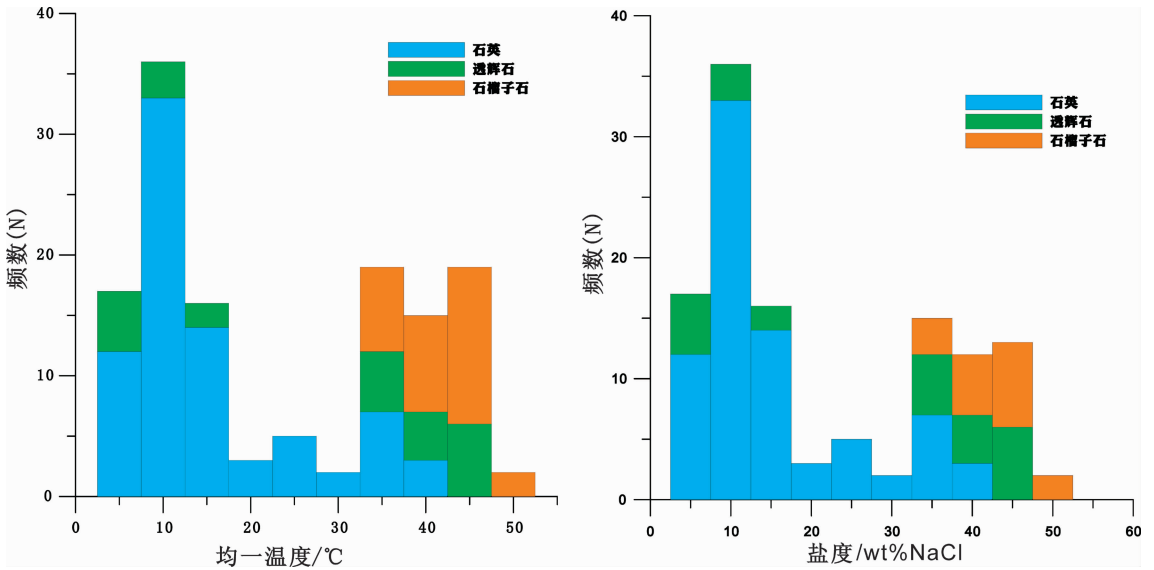


图 7 赛什塘铜矿流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig.7 Histograms of homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions from the Saishitang copper deposit

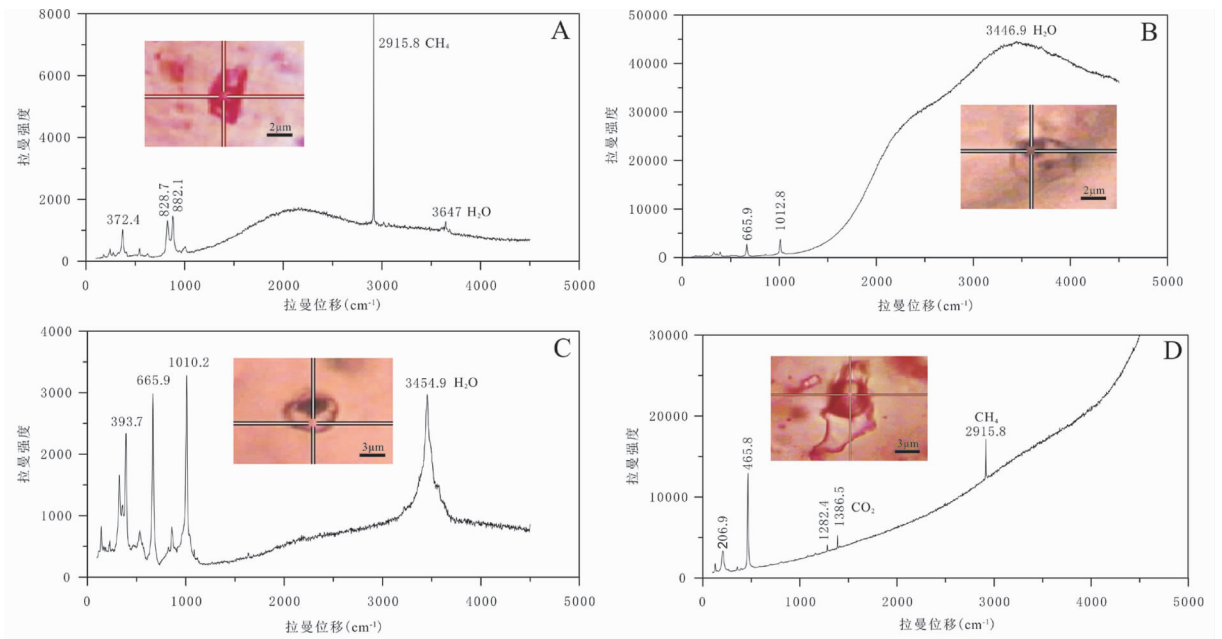


图 8 流体包裹体的激光拉曼图谱

A—石榴子石中的气相成分;B—透辉石中的气相成分;C—透辉石中的液相成分;D—石英中的气相成分

Fig.8 Laser Raman spectra of fluid inclusions

A- Gas composition of garnet; B- Gas composition of diopside; C- Liquid composition of diopside; D- Gas composition of quartz

丰富的金属元素，以上说明早期矽卡岩阶段处于高温、高盐度、富含金属矿质成分的环境，而这与长江中下游地区铜官山矽卡岩铜矿床极为相似<sup>[22]</sup>。从矽卡岩阶段末期到退变质-氧化物阶段，均一温度范围为 322~419℃，盐度为 15wt%~39wt%NaCl eqv.；退

变质-氧化物阶段向硫化物阶段过渡过程中，流体温度和盐度均明显降低，硫化物阶段均一温度 235~366℃，盐度 5wt%~36wt%NaCl eqv.，为低温、低盐度流体，表明该阶段温度降低，并且有大量大气降水的混入。流体包裹体均一温度、盐度的变化与成矿阶

段演化有良好的对应关系,从早期到晚期温度与盐度均逐步降低(图7、图9)。

李东生(2009)测试分析发现,硫同位素中,绝大部分  $\delta^{34}\text{S}$  变化区间窄,绝对值小,具塔式分布,  $\delta^{34}\text{S}$  值主要为 +5.6‰~-4.4‰,据此可以认为矿床硫具有岩浆硫的特点。铅同位素组成变化幅度较小,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 17.901~18.375,反映该类矿床矿质来源比较单一,即主要是岩浆来源<sup>[6]</sup>。流体中富集了以络合物形式进入的成矿金属元素,还带进了硫等部分来自地层的载体元素。富含丰富的挥发分如  $\text{CH}_4$  等的高温高盐度成矿流体,在成矿流体运移过程中,不断与围岩发生复杂的水-岩反应,高温流体与大理岩发生接触交代作用,彼此物质交换,透辉石、石榴子石等矽卡岩矿物首先结晶出来,形成了早期矽卡岩;在矽卡岩形成作用基本结束以后,开始了早期矽卡岩矿物的热液蚀变改造,即退变质阶段,矿物主要为含水硅酸盐,包括阳起石、透闪石、金云母、绿帘石、绿泥石等,其成分取决于原来矽卡岩的成分。随着矽卡岩形成过程的进行,硫化物也开始出现。

## 5.2 成矿流体的沸腾作用

成矿流体的沸腾作用是成矿物质从热液中沉淀的最重要机制之一<sup>[20,23-25]</sup>。从图6-C及图9可以看出,高低盐度流体分离在 290~360°C 温度范围最为显著,石英的均一温度及盐度数据投点显示出流体包裹体的均一温度相似,盐度不同,富液相包裹体、富气相包裹体和含子矿物多相包裹体在此温度区间内共存,而且它们的均一温度非常相近(图6-A),在显微镜下也可以观察到石英颗粒中同一视域内有均一到气相及均一到液相的包裹体(图5-G,H)。这种沸腾包裹体群的存在<sup>[23,26]</sup>,表明原始成矿流体在 290~360°C 温度区间发生了强烈的沸腾作用。沸腾与成矿体系中大规模的隐爆相对应,是矽卡岩型矿床的常见现象。赛什塘铜矿床中,早期的矽卡岩阶段,存在富含挥发分并含子矿物的高盐度流体,随着挥发分的不断聚集,以及矽卡岩矿物形成过程中  $\text{CO}_2$  等挥发分的不断释放,内部压力超过外部静岩压力时,发生隐爆作用。隐爆会使岩体及碳酸盐岩围岩发生震裂,产生许多裂隙,体系变得开放,挥发分快速散发,压力进一步得到释放,并且天水开始沿裂隙加入体系中,随之发生的沸腾作用导致成矿流体体系的物理化学平衡被打破,大量的铜以硫化物的形式从流体中沉淀出来,或者以金属硫化物脉的形式充

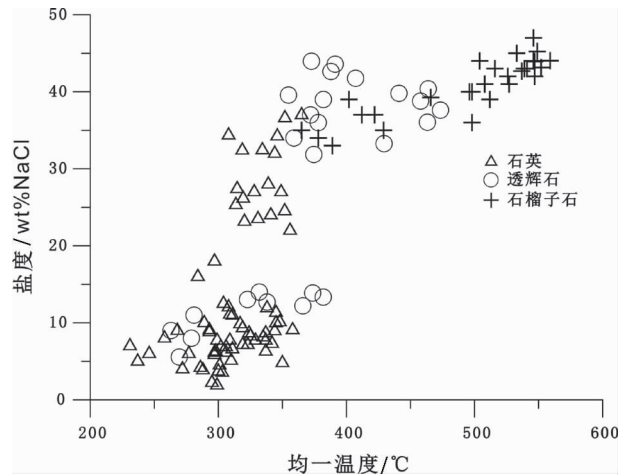


图9 赛什塘铜矿流体包裹体盐度-均一温度关系图

Fig.9 Diagram of homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions in the Saishitang copper deposit

填在构造裂隙中,形成了金属硫化物矿体。因此,成矿流体的沸腾作用是导致矿床中铜以硫化物形式析出、沉淀继而富集成矿的重要因素。

## 6 结论

(1)赛什塘铜矿床发育有富液相包裹体、富气相包裹体和含子矿物多相包裹体。成矿流体以高温、高盐度为特征,属于  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CH}_4$  体系。

(2)矽卡岩阶段流体温度主要为 436~562°C,盐度范围为 34wt%~45wt%  $\text{NaCl}$  eqv.,属于高温、高盐度流体。退变质-氧化物阶段均一温度 322~419°C,盐度为 15wt%~39 wt%  $\text{NaCl}$  eqv.,最后为相对低温低盐度(均一温度 235~366°C,盐度 5wt%~36wt%  $\text{NaCl}$  eqv.)的硫化物阶段,铜矿主要在硫化物阶段形成。

(3)成矿流体在 290~360°C 区间内发生了强烈的沸腾作用,改变了体系内的物理化学条件,导致大量铜的金属硫化物沉淀,沸腾作用对铜矿的形成和富集起着重要作用。

**致谢:**野外工作得到青海赛什塘铜业有限责任公司丁天柱总工以及廖方舟、刘恒、李树军、刘海红、李正明、缪军等的大力帮助,流体包裹体测试工作得到王莉娟老师的悉心指导,在此表示衷心感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 林德经. 青海赛什塘铜矿地质特征及矿床成因初步探讨[J]. 西北

- 地质, 1983, 4:30-39.
- Lin Dejing. Geological characters and deposit genesis preliminary discussion of the saishitang copper deposit in Qinghai Province [J]. Northwest Geoscience, 1983, 4:30-39(in Chinese).
- [2] 王移生. 青海日龙沟锡—多金属矿床地质特征及成矿作用 [J]. 西北地质, 1990, 23 (2):43-48.
- Wang Yisheng. Tin—multi—metal ore deposit geological features and metallogeny in Qinghai Province, Rilonggou region [J]. Northwestern Geology, 1990, 23 (2):43-48 (in Chinese with English abstract).
- [3] 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 Zhijie, Zhang Hanwen, Li Wenming, et al. Metallogenic conditions and model of copper—multi—metal deposits in Ngola Shan region, Qinghai Province [J]. Northwest Geoscience, 1995, 16 (1):134-144(in Chinese with English abstract).
- [4] 史长义, 沈夏初, 余正华. 青海索拉沟铜多金属矿床地质地球化学找矿模型[J]. 有色金属矿产与勘查, 1996, 5(6):368-374.
- Shi Changyi, Shen Xiachu, Yu Zhenghua. Geological and geochemical prospecting model for suolagou copper polymetallic deposits in Qinghai Province [J]. Geological Exploration For Non-ferrous Metals, 1996, 5 (6):368-374 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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, 4:30-42.
- Zhang Hanwen. Mineralized feature, tectonic setting and metallogenic type of Tongyugou copper deposit, Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2001, 4:30-42(in Chinese with English abstract).
- [6] 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 Dongsheng, Kui Mingjuan, Gu Fengbao, et al. Geological characteristics and genesis of the Saishitang copper deposit in Qinghai Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(5):719-730 (in Chinese with English abstract).
- [7] 吴庭祥. 青海赛什塘铜矿床地质特征及成矿模式 [J]. 矿产勘查, 2010, 1(2):140-144.
- Wu Tingxiang. Geological characteristics and metallogenic model of the Saishitang copper deposit in Qinghai Province [J]. Mineral Exploration, 2010, 1(2):140-144(in Chinese with English abstract).
- [8] 张子军, 黄丛运. 青海日龙沟锡多金属矿床地质特征及矿床成因探讨[J]. 上海地质, 2010, 31:187-191.
- Zhang Zijun, Huang Congyun. Qinghai Rilonggou polymetallic ore deposit geological feature and ore deposit origin discussion [J]. Shanghai Geology, 2010, 31:187-191 (in Chinese with English abstract).
- [9] 燕宁, 李社宏, 陆智平, 等. 青海省兴海县索拉沟铜多金属矿床地质特征与矿床成因[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 128(35):161-166.
- Yan Ning, Li Shehong, Lu Zhiping. Metallogenic characteristics and genesis of suolagou copper multi—metallic deposit in Xinghai county, Qinghai Province [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 128(35):161-166(in Chinese with English abstract).
- [10] 邱凤岐, 董景深. 青海赛什塘铜矿区岩浆岩及其成矿特征[J]. 青海地质, 1978:1-19.
- Qiu Fengqi, Dong Jingshen. Magmatic rock and metallogenic characteristics of the saishitang copper deposit in Qinghai Province [J]. Qinghai Geoscience, 1978:1-19(in Chinese).
- [11] 路远发. 赛什塘—日龙沟矿带成矿地球化学特征及矿床成因[J]. 西北地质, 1990, 3:20-26.
- Lu Yuanfa. The metallogenic geochemistry characters and deposit genesis of the Saishitang—Rilonggou metallogenic belt [J]. Northwestern Geology, 1990, 3:20-26(in Chinese).
- [12] 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 Shengyu. 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 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张德全, 丰成友, 李大新, 等. 柴北缘—东昆仑地区的造山型金矿床[J]. 矿床地质, 2001, 20(2):137-146.
- Zhang Dequan, Feng Chengyou, Li Daxin, et al. Orogenic gold deposit in the North Qaidam and East Kunlun orogen, West China [J]. Mineral Deposits, 2001, 20 (2):137-146 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张雪亭, 杨生德, 杨站君. 青海省板块构造研究—1:100万青海省大地构造图说明书[M]. 北京:地质出版社, 2007:1-221.
- Zhang Xueting, Yang Desheng, Yang Zhanjun. Qinghai Plate Tectonic Research—1:1 Million Qinghai Tectonic Map Specification [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2007:1-221(in Chinese).
- [15] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 东特提斯地质构造形成演化 [M]. 北京:地质出版社, 1997:86-98.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen. East Tethys Geological Structural Evolution [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1997:86-98(in Chinese).
- [16] 李福东, 张汉文, 宋治杰, 等. 鄂拉山地区热水成矿模式 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1993.
- Li Fudong, Zhang Hanwen, Song Zhijie, et al. The Ngola Shan Region Paleothermal Mineralization Pattern [M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press, 1993(in Chinese).
- [17] 张汉文. 青海铜峪沟铜矿床的热水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, (2):46-56.

- Zhang Hanwen. On the hydrothermal sedimentary laws and tectonic environment of Tongyugou deposit and the relationship between hydrothermal and volcanic activity [J]. Northwest Geoscience, 2001, (2):46-56(in Chinese with English abstract).
- [18] 安江华. 青海赛什塘铜多金属矿流体包裹体特征与成矿作用[D]. 长沙:中南大学, 2010.
- An Jianghua. The Characteristics of Fluid Inclusions and Mineralization of the SaiShitang Cu-polymetallic Deposit, Qinghai Province[D]. Changsha:Central South University, 2010(in Chinese with English abstract).
- [19] Baker T, Lang J R. Reconciling fluid inclusions, fluids process and fluid source in skarns: An example from the Bismark skarn deposit [J]. Mineralium Deposita, 2003, 38:474-495.
- [20] Baker T, Van Ryan A C E, Lang J R. Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit [J]. Geology, 2004, 32(2):117-120.
- [21] 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 Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9):2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 地球动力学的有效探针[J]. 中国地质, 2008, 35(6):1059-1073.
- Chen Yanjing, Xiao Wenjiao, Zhang Jinjiang. Ore-system as a geodynamic probe[J]. Geology in China, 2008, 35(6):1059-1073 (in Chinese with English abstract).
- [23] 谢玉玲, 徐九华, 杨竹森, 等. 铜官山铜矿床矽卡岩矿物中流体包裹体及子矿物的扫描电镜研究 [J]. 矿床地质, 2004, 23(3):375-382.
- Xie Yuling, Xu Jiuhua, Yang Zhusen, et al. SEM/EDS study of daughter minerals of fluid inclusions in garnet and diopside from Tongguanshan copper deposit [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3):375-382(in Chinese with English abstract).
- [24] 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.
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004:1-486(in Chinese).
- [25] 胡芳芳, 范宏瑞, 杨奎锋, 等. 胶东牟平邓格庄金矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(9):2155-2164.
- Hu Fangfang, Fan Hongrui, Yang kuifeng, et al. Fluid inclusions in the Denggezhuang lode gold deposit at Muping, Jiaodong Peninsula [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9):2155-2164(in Chinese with English abstract).
- [26] 武广, 孙丰月, 赵财胜, 等. 额尔古纳成矿带西北部金矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(9):2227-2240.
- Wu Guang, Sun Fengyue, Zhao Caisheng, et al. Fluid inclusion study on gold deposits in northwestern Erguna metallogenic belt, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (9):2227-2240 (in Chinese with English abstract).
- [27] 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.
- Fan Hongrui, Xie Yihan, Zhai Mingguo, et al. A three stage fluid flow model for Xiaolinling lode gold metallogenesis in the Henan and Shaanxi Provinces, central China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2):260-266(in Chinese with English abstract).

## Fluid inclusion study of the Saishitang Cu deposit in Qinghai

HE Peng<sup>1</sup>, YAN Guang-sheng<sup>2</sup>, ZHU Xin-you<sup>3</sup>, ZHANG Zhong-yi<sup>3</sup>,  
WANG Yan-li<sup>3</sup>, CHENG Xi-yin<sup>3</sup>, LI Yong-sheng<sup>2</sup>, ZHEN Shi-min<sup>1</sup>,  
DU Ze-zhong<sup>1</sup>, JIA De-long<sup>1</sup>, GONG Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. School of Earth & Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China.; 3. Beijing Institute of Geology and Mineral Resources, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The fluid inclusions in the Saishitang Cu deposit can be classified into liquid-rich two-phase, gas-rich two-phase and daughter mineral-bearing polyphase types. According to studies of petrography, microthermometry and laser Raman spectrographic analyses of fluid inclusions in garnet and diopside from skarn and sulfide-rich quartz veins, the fluid inclusion homogenization temperatures and salinities of the early skarn stage vary in the range of 436°C–562°C and 34%–45%wt%NaCl eqv. respectively, indicating that the fluid is dominated by magmatic water characterized by high temperature and high salinity; the fluid inclusion homogenization temperatures and salinities of the retrogressive metamorphic stage vary in the range of 322°C–419°C and 15%–39%wt%NaCl eqv. Respectively; the fluid inclusion homogenization temperatures and salinities of the sulfide stage vary in the range of 235°C–366°C and 5%~36%wt%NaCl eqv. respectively. Laser Raman spectrographic analyses show that the gas phase components of fluid inclusions are mainly composed of CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O, and the ore-forming fluids belong to the NaCl–H<sub>2</sub>O–CH<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>S–CO<sub>2</sub> system. The boiling event of ore-forming fluid occurred at temperatures of 290°C~360°C, resulting in the formation of massive metal sulfides. The fluid boiling was favorable for the formation of the Saishitang Cu deposit.

**Key words:** fluid inclusion; fluid boiling; skarn Cu deposit; Saishitang; Qinghai

---

**About the first author:** HE Peng, male, born in 1987, master candidate, majors in geochemistry; E-mail: hepeng198761@163.com.

**About the corresponding author:** ZHU Xin-you, male, doctor and senior researcher, engages in the study of mineral deposits; E-mail: zhuxinyou@tom.com.