

西藏尼木岗讲铜矿床不同成矿阶段流体包裹体特征及其对成矿的指示意义

坚润堂*, 王岩梅, 田章武, 李俊刚, 宋小美, 苏富彬

百色学院, 广西 百色

收稿日期: 2021年11月1日; 录用日期: 2021年11月18日; 发布日期: 2021年11月25日

摘要

岗讲斑岩型铜矿床是西藏冈斯成矿带一个大型铜矿床。成矿作用主要与黑云二长花岗岩、石英二长斑岩和闪长斑岩密切相关。根据包裹体在室温下的相态充填度以及是否含有子矿物等, 将岗讲矿床的流体包裹体分为3大类: 富液相包裹体(I)、富气相包裹体(II)和含子矿物多相包裹体(III)。其中, 黄铜矿-黄铁矿化阶段流体包裹体主要为I、II和III类包裹体, 均一温度在173.2°C~493.2°C之间, 盐度为1.74%~36.2% NaCleqv; 辉钼矿-黄铜矿化阶段的流体包裹体主要为I、II和III类包裹体, 均一温度介于179.8°C~390°C之间, 盐度为7.13%~35.2% NaCleqv, 早晚成矿阶段流体包裹体均一温度略有降低, 盐度变化范围基本保持一致, 表示流体发生过多次不混溶作用, 预示压力的逐渐降低和硫化物的沉淀。成矿流体总体表现为中温、低盐度的NaCl-H₂O体系, 可能与青藏高原快速隆升过程中大量大气降水参与成矿活动有关。激光拉曼探针分析结果表明, 流体包裹体液相成分主要为H₂O, 气相成分含有CO₂, 子矿物含少量黄铜矿。但是该矿床品位总体偏低, 规模有限, 可能是原始岩浆流体“先天不足”造成。

关键词

流体包裹体, 流体演化, 成矿过程, 岗讲矿床, 冈底斯, 西藏

Characteristics of Fluid Inclusions in Different Metallogenic Stages and Their Implications for Ore Genesis in Nimu Gangjiang Cu Deposit, Tibet

Runtang Jian*, Yanmei Wang, Zhangwu Tian, Jungang Li, Xiaomei Song, Fubing Su

Baise University, Baise Guangxi

*第一作者。

文章引用: 坚润堂, 王岩梅, 田章武, 李俊刚, 宋小美, 苏富彬. 西藏尼木岗讲铜矿床不同成矿阶段流体包裹体特征及其对成矿的指示意义[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(11): 1476-1492. DOI: [10.12677/ag.2021.1111143](https://doi.org/10.12677/ag.2021.1111143)

Received: Nov. 1st, 2021; accepted: Nov. 18th, 2021; published: Nov. 25th, 2021

Abstract

The Gangjiang deposit is a large copper deposit in Tibet. Mineralization mainly occurs in bio-adamellite, quartz-monzonite-porphyry and diorite porphyry. A detailed fluid inclusion study was conducted for veins in the different host rocks to investigate the relationship between fluid evolution and ore-forming processes. According to the phase filling characteristics of inclusions at room temperature and whether they contain sub minerals, three types of fluid inclusions were recognized: aqueous fluid inclusions (I type), H₂O-CO₂ inclusions (II type), and daughter mineral-bearing fluid inclusions (III type). Measurement of inclusions trapped in quartz revealed that the total homogenization temperatures were 173.2°C~493.2°C in chalcopyrite-pyrite mineralization stage, 179.8°C~390°C in molybdenite-chalcopyrite mineralization stage, with corresponding salinities of 1.74%~36.2% NaCleqv and 7.13%~35.2% NaCleqv. The homogenization temperature of fluid inclusions decreased slightly in the early and late metallogenic stages, and the variation range of salinity remained basically the same, indicating that the fluid has been immiscible many times, with the decrease of pressure, the sulfide gradually precipitates. The ore-forming fluids is NaCl-H₂O system fluid with medium temperature, which may be related to the participation of a large amount of atmospheric precipitation in ore-forming activities during the rapid uplift of the Qinghai Tibet Plateau. The laser Raman probe analysis shows that the main component of fluid wrapped body fluid phase is H₂O, with the gas phaes containing CO₂, and containing a small amount of chalcopyrite. However, the grade of the Gangjiang deposit is generally low, and with limited scale, it may be caused by the “congenital deficiency” of primitive magmatic fluid.

Keywords

Fluid Inclusion, Fluid Evolution, Ore-Forming Processes, Gangjiang Deposit, Gangdisi, Tibet

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

流体包裹体已成为确定斑岩铜矿成矿流体物理化学性质、探讨成矿作用的重要手段[1]-[8]。成矿流体大量出溶对斑岩矿床的形成具有重大意义[9]，是探究矿床成因、成矿物质来源及其演化规律的关键因素[10]。

冈底斯铜多金属成矿带位于雅鲁藏布江缝合带(IYZSZ)和班公湖 - 怒江缝合带(BNSZ)之间，是我国重要成矿区带之一，找矿潜力巨大。自本世纪初开始，在国家地质调查局以及商业勘查资金的大力支持下，该区找矿成果斐然，相继发现了驱龙、甲玛、邦普、沙让、冲江、厅宫、岗讲、朱诺、雄村等一大批大型 - 超大型铜多金属矿床(图 1)，矿床类型以斑岩 - 矽卡岩型为主，累计探明铜资源量超过 5600 万 t [11] [12]，构成了著名的冈底斯巨型斑岩铜多金属成矿带[13]。岗讲是近些年新发现的一个大型斑岩铜钼矿床，矿床勘查和研究程度较低，仅在矿床地质、地球化学、蚀变特征和成矿年龄等方面有过少量报道 [14]-[19]。作者曾经参与主持该矿床地质找矿和成矿规律研究工作，多次深入现场一线开展地质编录和采样，获取了大量实证材料。在长期基础研究中发现，岗底期带发育众多斑岩铜矿床，虽然成矿时代、赋矿岩体均相同，但矿床规模、品位却大相径庭，而成矿流体性质可能是引起该差异的关键因素。故本文拟在详实的野外地质调研基础上，以岗讲铜矿区石英二长斑岩中的含矿石英脉和无矿石英脉为主要研究

对象, 开展流体包裹体研究, 探讨岩浆 - 热液的演化机理, 为进一步丰富和完善矿床的成矿机理奠定基础。

2. 成矿地质背景

2.1. 区域地质

冈底斯斑岩成矿带位于雅鲁藏布江北岸, 总体呈近东西向展布, 东起墨竹工卡县甲马, 西至谢通门县洞嘎, 东西长约 400 km, 南北宽约 80 km [11]。大地构造位置处于冈底斯 - 念青唐古拉板片次级构造单元冈底斯陆缘火山 - 岩浆弧东段[20]。区内出露地层以中生界三叠系 - 白垩系为主, 构造和岩浆活动十分强烈[21] [22]。构造以 EW 向剪切断裂和近 SN 向、NE 向拉张断裂为主, 受到岩浆活动和热穹隆的影响, 区域环形构造比较发育[17] [23]。区内岩浆岩十分发育, 主要有古新世的嘎冲单元、始新世的安岗超单元(包括俄岗、伦主岗、续迈、孔洞郎等单元)、彭岗超单元(山岗和卡布下爬单元)、渐新世的列顶单元以及中新世的雪古拉单元。岩石类型比较复杂, 黑云二长花岗岩、黑云花岗斑岩、石英二长闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩和英云闪长岩等均有出露[15]。其中与成矿关系有关的浅成侵入岩主要为续迈单元、伦主岗单元的斑岩体和卡布下爬单元的细粒钾长花岗(斑)岩[24], 成矿作用时间与斑岩活动时间基本一致, 集中在 14~17 Ma 之间, 岩浆活动和成矿事件发生在印度 - 亚洲大陆碰撞后的地壳伸展时期。

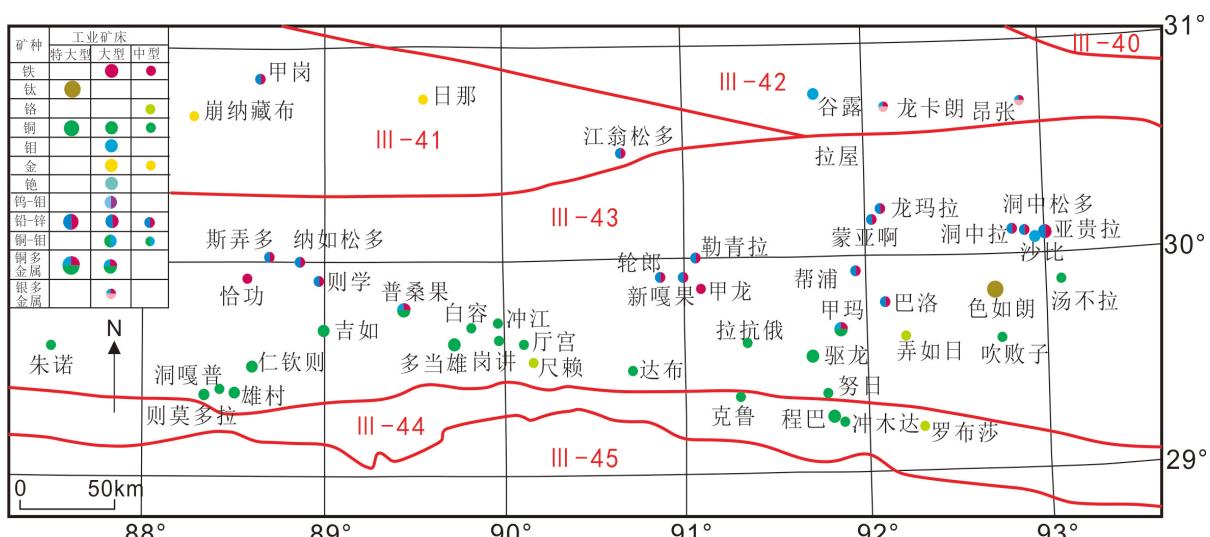


Figure 1. Distribution of large intermediate size ore deposits in the eastern part of the Gangdise metallogenic belt. III-40-Bangong Co-Salween River (suture zone) Cr metallogenic belt; III-41-Seng-ge Kambab-Xainza (magmatic arc) W-Mo (Cu-Fe) borax gold metallogenic belt; III-42-Bangor-Tengchong (magmatic arc) Sn-W-Be-Li-Fe-Pb-Zn metallogenic belt; III-43-Lhasa block (Gangdise magmatic arc) Cu-Au-Mo-Fe-Sb-Pb-Zn metallogenic belt; III-44-Yarlung Zangbo River (suture zone, Shigatse fore-arc basin include) Cr-Au-Ag-As-Sb metallogenic belt; III-45-Himalaya (fold belt) Au-Sb-Fe muscovite metallogenic belt

图 1. 岗底斯中段主要大中型矿床分布图。III-40-班公湖-怒江(缝合带)Cr 成矿带; III-41-狮泉河-申扎(岩浆弧)W, Mo (Cu, Fe)硼砂金成矿带; III-42-班戈-腾冲(岩浆弧)Sn, W, Be, Li, Fe, Pb, Zn 成矿带; III-43-拉萨地块(冈底斯岩浆弧)Cu, Au, Mo, Fe, Sb, Pb, Zn 成矿带; III-44-雅鲁藏布江(缝合带)Cr, Au, Ag, As, Sb 成矿带; III-45-喜马拉雅(造山带)Au, Sb, Fe 白云母成矿带

2.2. 矿区地质概况

岗讲铜矿床位于冈底斯成矿带中段, 隶属于西藏尼木县帕古乡管辖, 地理坐标为东经 89°56'00"~89°59'30", 北纬 29°33'00"~29°36'30", 矿区面积约 30 km²。区内主要出露下白垩统比马组(K_{1b})安山岩、凝灰岩、凝灰质粉砂岩和大理岩; 上白垩统设兴组(K_{2s})粉砂岩、粉砂质泥岩夹泥灰岩; 上白垩统 - 古新统

典中组(K_2E_{1d})玄武岩、安山岩、英安岩、火山角砾岩及凝灰岩；第四系冰碛物主要以沟谷地带发育。矿区主要发育近EW向和SN向断裂构造，由近EW向古清沟断裂、多列曲断裂和SN向断裂构成“井”字型构造格架，共同控制了含矿斑岩体的空间位置。区内共轭X型节理构造比较发育，以压剪性为主，节理面平直，延伸较远，产状陡倾，节理裂隙率10~30条/m，节理裂隙率与矿化强度呈正相关关系，节理越发育，矿化越强。

矿区岩浆岩极为发育，约占矿区总面积的90%，二长花岗斑岩呈岩株状侵位于含巨斑黑云角闪二长花岗岩基中，形成典型的斑岩成矿系统。晚期的英云闪长玢岩、花岗闪长斑岩、英安斑岩和流纹斑岩呈岩脉或岩枝状穿插于二长花岗斑岩体中。

矿区热液蚀变主要有钾化、硅化、绢云母化、青磐岩化、绿泥石化和粘土化，蚀变分带特征明显，从岩体中心向外依次发育钾化带、绢英岩化带和青磐岩化带。钾化在岗讲矿区并不发育，处于含矿斑岩体的中心部位。主要表现为新生成的正长石呈团斑状、云雾状交代斜长石斑晶和基质。钾长石交代斜长石斑晶时，呈现云雾状。钾长石交代斜长石基质时，呈团斑状，基质中钾长石含量增高，结晶粒度变大，自形程度变高，表面比较干净。钾化岩石中常伴有较强的浸染状及细脉状硫化物矿化。硅化在矿区普遍存在，特别是构造裂隙发育地带硅化较为强烈，常与钾化、黑云母化、绢云母化并存。主要表现为新生成石英(有时含碳酸盐)呈团斑状、脉状交代斑晶和基质。石英-方解石脉或硫化物发育的石英-方解石脉呈网状分布，方向不一，相互穿插。早、中期的石英脉颜色深，成分较复杂，石英脉内充填有黄铜矿、黄铁矿等矿物。绝大部分暗色石英脉中的黄铜矿含量很高。晚期的石英脉为白色，成分简单，矿化弱。黑云母化是钾化的另一种形式，在矿区局部有分布。主要表现为新生成的细小鳞片状的黑云母沿裂隙充填交代基质或者呈不规则团斑状交代基质。矿化呈浸染状分布其中。此外，玢岩中的角闪石斑晶在热液作用下，会变得不稳定而被黑云母交代。黑云母交代角闪石不彻底时，黑云母和角闪石共存；交代彻底时，则仅保留角闪石的假象。黑云母化岩石中铜矿化相对较弱。绢云母化是矿区最常见的蚀变类型，绢云母多和次生石英组成绢英岩产出。主要表现为新生成的绢云母呈细小鳞片状集合体交代基质和斑晶。绢云母交代斜长石斑晶不彻底时，仍可见斜长石的环带结构或斜长石的聚片双晶和卡钠复合双晶残留；绢云母完全交代斜长石斑晶时，整个斜长石斑晶被鳞片状绢云母集合体取代，只保留斜长石假象；绢云母也可呈团斑状交代基质斜长石。绢云母化岩石中，可见少量浸染状铜矿化。单一的绢英岩化带中，矿化通常很弱，铜品位大多小于0.3%，而当叠加了钾化时矿化规模就大大增强了[17]。青磐岩化位于矿区的外围，特征是绿泥石、绿帘石呈团斑状交代斑晶和基质。角闪石斑晶被绿泥石或绿帘石、碳酸盐取代，同时析出磁铁矿，少部分还保留外形，仍可见一组或两组完全解理。斜长石斑晶钠黝帘石化现象明显。该类蚀变岩中内无明显的铜矿化现象。区内的粘土化主要为高岭石化(泥化)，高岭石是玢岩中粘土化的主要蚀变矿物。高岭石一般交代玢岩中的斜长石和钾长石，蚀变很弱时，斜长石和钾长石能分别保留其钠长石聚片双晶和卡氏双晶，蚀变强烈时，岩石明显褪色。

岗讲矿床矿体全部为铜、钼共生，由含矿石英脉和石英-硫化物细脉群构成，与围岩没有明显的界线，根据工业指标圈定一个主要矿体(I号矿体)，地表投影呈向NW开口的“U”字型。矿体呈板状赋存在二长花岗斑岩体中，与围岩呈过渡关系，后期英安斑岩、花岗闪长斑岩、英云闪长玢岩和流纹岩呈岩脉状穿插破坏矿体完整性。

矿石矿物组合较简单，原生矿(硫化矿)石中主要有黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿和黄铁矿，以黄铜矿和黄铁矿最常见，斑铜矿仅在少数钻孔中见到，辉钼矿主要分布在石英脉中和裂隙面上。氧化矿有孔雀石、蓝铜矿和含铜硅锰矿，以孔雀石最为常见。矿化类型以浸染状为主，此外还发育少量网脉状、团块状矿化。总体矿化不均匀，以团块状矿化品位较高。

3. 流体包裹体研究

3.1. 样品与测试方法

作为封存在矿物晶格内的原始地质流体，流体包裹体是反映矿物形成环境和地质过程的重要原始记录，地质流体的组分、温度和压力测试分析是了解成矿流体物理化学性质最直接的手段[25]。本次研究样品分别采自岗讲不同钻孔中含矿石英脉和无矿石英脉共5件代表性样品，脉体间多以穿切关系呈现，反映出热液活动的多期性(表1，图2)。在对矿石样品详细描述产出特征、位置的基础上，选取合适部位进行切片，厚度均控制在0.3~0.5 mm以内，满足显微岩石学观察及测温测试的要求。包裹体岩相学研究及测温在中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成，岩相学研究利用Leica岩相学显微镜(配备50×、20×、10×、5×物镜)，主要观察流体包裹体的空间分布、形态大小及室温下的相态和气液比。显微测温使用英国Linkan公司生产的THMSG600型冷热台，温度范围为-196℃~+600℃，以美国FLUID INC公司的合成流体包裹体标准样品标定冷热台温度。流体包裹体测试水溶液冰点过程中，开始时升温(或降温)速度为10℃~20℃/min，相变点附近速率降至0.2℃~0.5℃/min，完全均一温度测定时，开始时的升温速率为20℃/min，临近相变时降到0.5℃~1℃/min，冷冻测试和均一温度误差分别为±0.1℃和±1.0℃。低盐度气液包裹体盐度根据Bodnar [26] [27]提出的H₂O-NaCl盐度-冰点关系表计算；含石盐子矿物的高盐度包裹体利用Hall *et al.* [28]总结的石盐熔化温度与盐度关系表计算；水溶液包裹体的密度根据Bodnar [29]的NaCl-H₂O体系T-W-ρ相图计算；捕获压力利用Bischoff [30]的NaCl-H₂O体系T-P相图估算[25]。

Table 1. Temperature measurement sample of fluid inclusions in Gangjiang mining area

表1. 岗讲矿区流体包裹体测温样品表

序号	样品编号	岩石类型	脉体类型	期次
1	ZK1407-211	石英二长斑岩	Qz	早期
2	ZK2608-181	石英二长斑岩	CP + Qz + Mo	成矿期
3	ZK2602-117	石英二长斑岩	Cp + Qz + Py	成矿期
4	GT06-161	石英二长斑岩	Qz + 少量 CP	成矿期
5	ZK1607-334	石英二长斑岩	Qz + Mo	成矿期



Figure 2. Photos and sections of fluid inclusion samples in Gangjiang copper deposit

图2. 岗讲铜矿流体包裹体样品照片及切片位置

流体包裹体原位激光拉曼光谱分析在中国科学院贵阳地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成, 所用仪器为英国 Renishaw System-2000 型显微共聚焦激光拉曼光谱, 光谱范围(spectral range)为 $-1000\sim9000\text{ cm}^{-1}$, 激发激光波长为 514.5 nm, 激光功率 20 mW, 激光束斑最小直径为 1 μm , 光谱分辨率达 1~2 cm^{-1} 。

3.2. 流体包裹体岩相学

通过对包裹体片的镜下观察发现, 5 件石英脉的石英斑晶中均发育大量包裹体, 这些包裹体多呈群分布, 少数呈孤立状分布; 包裹体形态多呈椭圆形、多边形、不规则状和负晶形状; 包裹体大小多集中于 5~12 μm 之间, 未出现熔融包裹体和熔体-流体包裹体。根据流体包裹体室温下相态特点和成分, 将岗讲铜矿流体包裹体分为以下 3 类(图 3):

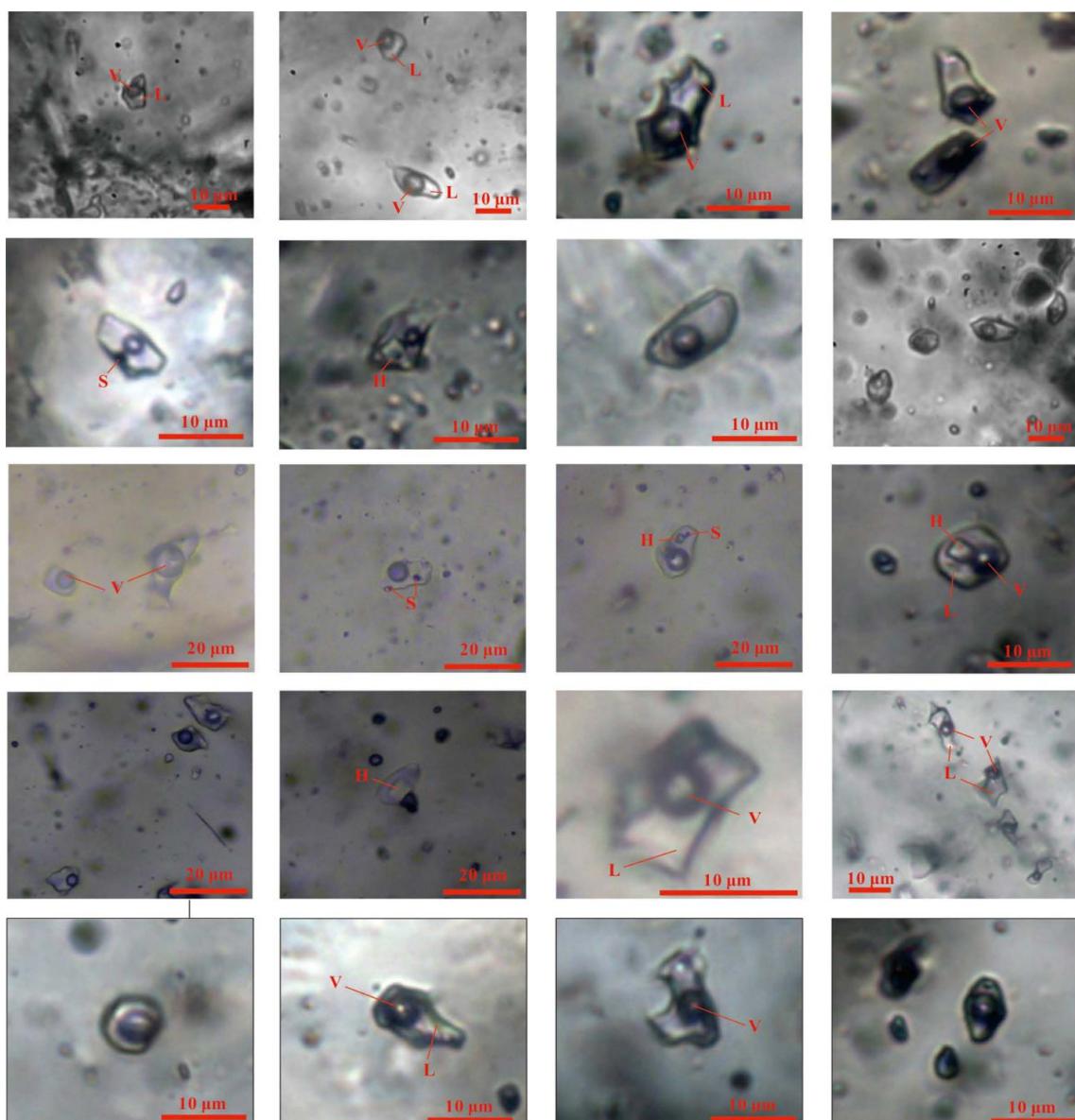


Figure 3. Microphotographs of fluid inclusions in the Gangjiang copper deposit. V-vapor; L-liquid; H-halite; S-sylvite
图 3. 岗讲铜矿床流体包裹体显微照片。V-气相; L-液相; H-石盐; S-钾盐

I 富液相包裹体(LV型):由液相(L)和气相(V)组成,加热时向液相均一。5件样品中此类包裹体普遍发育,数量极多,包裹体气液比一般为10%~35%,少数气液比为40%~45%。包裹体形态丰富,有长条形、椭圆形、不规则形等,成群或单独出现,长轴直径在6~22 μm之间。

II 富气相包裹体(VL型):各样品中发育最多的包裹体形式,由气相(V)和液相(L)组成,气液比一般为60%~85%,极少数为CO₂包裹体。多呈负晶形、椭圆形、不规则形、新月形、浑圆形及长条形,成群出现,亦或呈环、带状分布。长轴直径在7~20 μm之间,平均大小约8 μm。气泡呈圆形,无色、褐红色或黑色,加热时向气相均一。

III 含子矿物多相包裹体(LVH型):由气相(V)、液相(L)和子矿物(H)相组成,各样品中极少量发育,仅在3件(ZK1407-211、ZK2608-181和GT06-161)样品中偶尔发现。包裹体相态组合比较单一,仅有盐水溶液(L)+气体(V)+NaCl子矿物(N)或L+V+KCl子矿物(K)两种相态,并以前者为主。多呈长条状、规则状和椭圆状,呈星点状分布,长轴直径5~15 μm,多数大于8 μm。常含一个子矿物,子矿物呈正方体,无色或浅绿色、透明,其特征与石盐子矿物鉴别特征相似,部分子矿物可能为钾盐,个别包裹体含不透明金属矿物。子矿物升温后逐渐圆化,多在气相消失后均一为液相,部分子矿物与气相近于同时均为液相。

此外,个别样品中也发现极少量的纯液相包裹体,由于发育极少,且与成矿关系不密切,本次工作未对其进一步测试。

3.3. 流体包裹体均一温度和盐度

岗讲铜矿床各阶段脉中流体包裹体测温及盐度结果如表2所示。

Table 2. Microthermometric properties of fluid inclusions from different veins in Gangjiang Cu deposit
表2. 岗讲铜矿不同脉体类型流体包裹体显微测温结果

样品编号	脉体类型	类型	均一温度(℃)			盐度(wt%NaCleqv)		
			测试数	范围	均值	测试数	范围	均值
ZK1407-211	Qz + 少量 Cp	LV	16	256.3~320.3	286.13	16	10.11~14.04	12.90
		VL	15	247.5~336.8	294.52	-	-	-
		LVH	13	267~375	284.35	2	33.5~35.2	34.4
ZK2608-181	CP + Qz + Mo	LV	15	179.8~370.8	320.14	14	9.47~14.15	11.70
		VL	19	277.6~355.4	321.8	-	-	-
		LVH	14	257~390	346.7	1	35.2	35.2
ZK2602-117	Cp + Qz + Py	LV	20	173.2~482.7	297.78	14	1.74~14.97	9.85
		VL	12	248.7~493.2	355.9	-	-	-
GT06-161	Qz + 少量 CP	LV	20	252.4~480	386.08	14	7.31~14.15	12.75
		VL	11	330.5~447.6	388.3	-	-	-
		LVH	13	265~387 ℃	356.4	3	34.9~36.2	35.4
ZK1607-334	Qz + Mo	LV	15	221.7~372.6	283.3	15	7.73~13.40	10.76
		VL	15	304.3~379.5	332.8	-	-	-

黄铜矿 - 黄铁矿化阶段(黄铜矿化阶段)。以 ZK1407-211、ZK2602-117、GT06-161 等 3 件样品为代表。ZK1407-211 中呈液相均一的 LV 包裹体, 均一温度总体变化范围在 230℃~340℃之间, 峰值为 290℃~310℃, 平均温度 286℃; 盐度范围为 10.11% NaCleqv~14.04% NaCleqv, 平均盐度 12.9% NaCleqv (图 4), 气相均一的 VL 包裹体均一温度范围为 247.5℃~336.8℃, LVH 相包裹体以石盐矿物的消失而均一, 均一温度变化于 267℃~375℃之间, 盐度变化于 33.5% NaCleqv~35.2% NaCleqv 之间。ZK2602-117 中呈液相均一的 LV 包裹体的均一温度总体变化范围在 173.2℃~482.7℃之间, 大致可分为三个温度区域: 230℃~270℃、330℃~370℃和>400℃; 盐度范围为 1.74% NaCleqv~14.97% NaCleqv, 平均盐度为 9.85% NaCleqv (图 5)。气相均一的 VL 包裹体均一温度范围在 248.7℃~493.2℃之间。GT06-161 中呈液相均一的 LV 包裹体, 均一温度变化于 252.4℃~480℃之间, 峰值 > 400℃, 平均温度为 386℃; 盐度范围为 7.31% NaCleqv~14.15% NaCleqv, 平均盐度为 12.75% NaCleqv (图 6), 富气相包裹体均一温度范围 330.5℃~447.6℃。LVH 相包裹体以石盐矿物的消失而均一, 均一温度变化于 265℃~387℃之间, 盐度变化于 34.9% NaCleqv~36.2% NaCleqv 之间。ZK1407-211 和 GT06-161 中发育三种包裹体(LV、VL、LVH), 均一温度相似(介于 286℃~386℃), 而盐度变化范围大(7.31% NaCleqv~36.2% NaCleqv), 显示局部沸腾流体包裹体特征[2] [25] [31], 说明在成矿流体演化过程中发生了强烈的流体相分离作用。

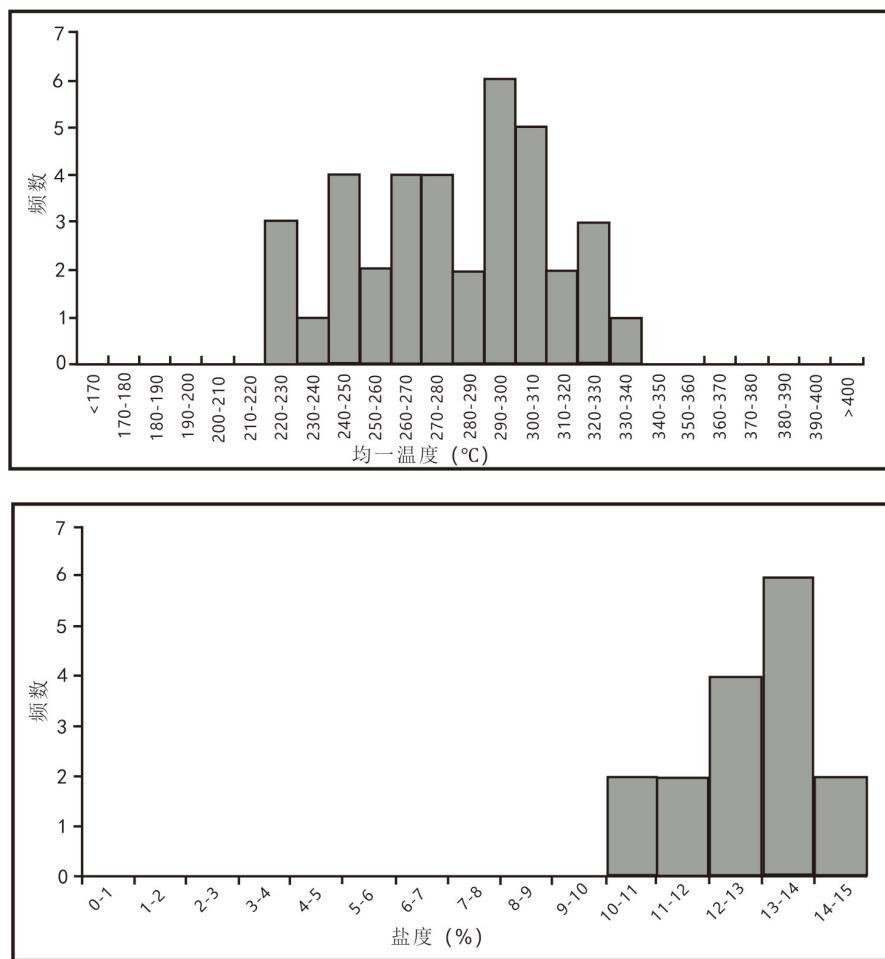


Figure 4. Homogenization temperatures (T - $^{\circ}\text{C}$) and salinity histograms (NaCl_{eqv}-%) of fluid inclusions in Gangjiang pyrrhotite copper deposit (ZK1407-211)

图 4. 岗讲矿区流体包裹体均一温度(T - $^{\circ}\text{C}$)直方图盐度(NaCl_{eqv}-%)直方图(ZK1407-211)

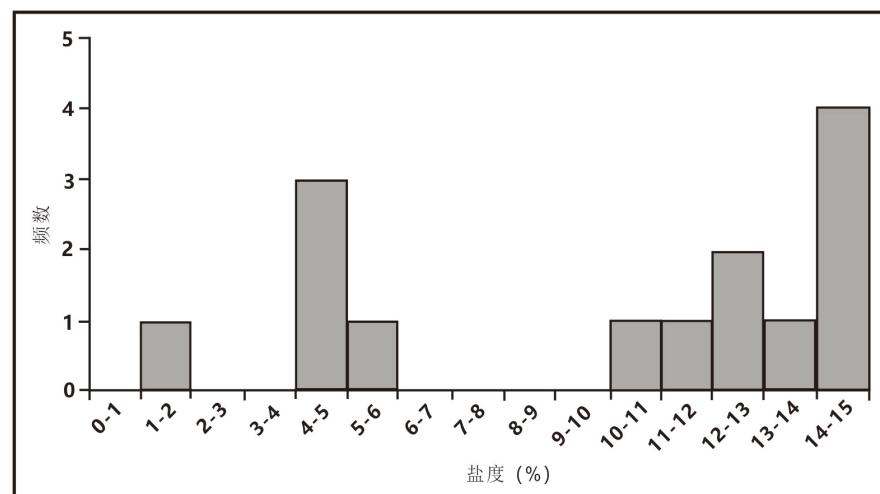
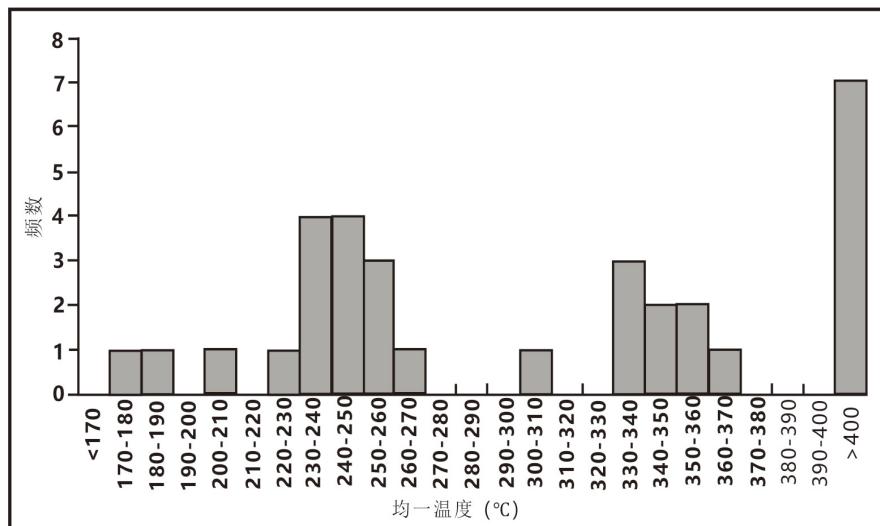
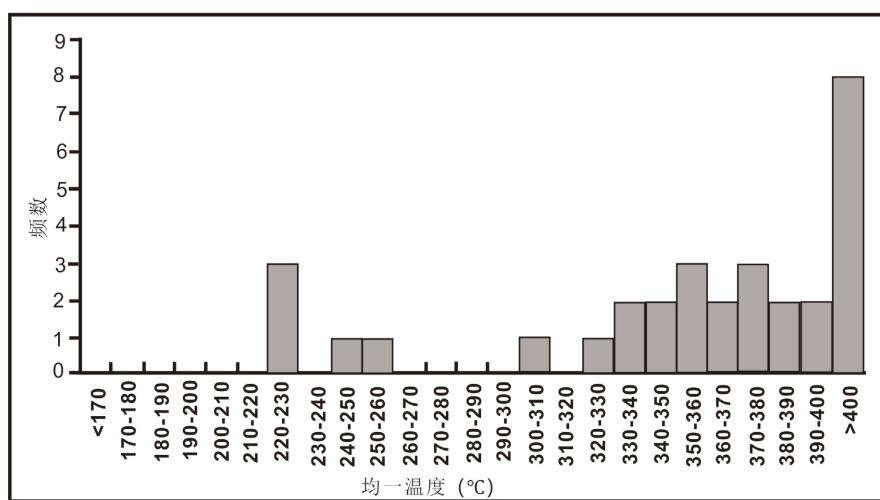


Figure 5. Homogenization temperatures (T - $^{\circ}\text{C}$) and salinity histograms ($\text{NaCl}_{\text{eqv}}\text{-}\%$) of fluid inclusions in Gangjiang pyrrhotite copper deposit (ZK2602-117)

图5. 岗讲矿区流体包裹体均一温度(T - $^{\circ}\text{C}$)直方图盐度($\text{NaCl}_{\text{eqv}}\text{-}\%$)直方图(ZK2602-117)



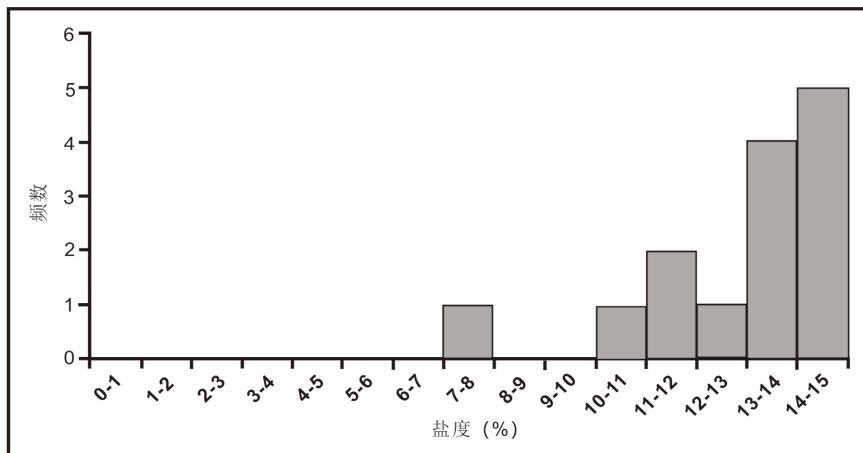


Figure 6. Homogenization temperatures (T - $^{\circ}\text{C}$) and salinity histograms ($\text{NaCl}_{\text{eqv}}\text{-}\%$) of fluid inclusions in Gangjiang pyrrhotite copper deposit (GT06-1161)

图6. 岗讲矿区流体包裹体均一温度(T - $^{\circ}\text{C}$)直方图盐度($\text{NaCl}_{\text{eqv}}\text{-}\%$)直方图(GT06-161)

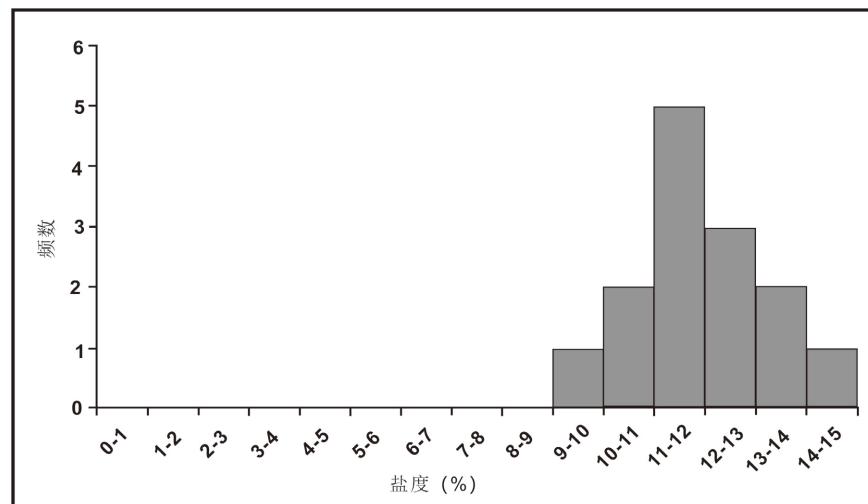
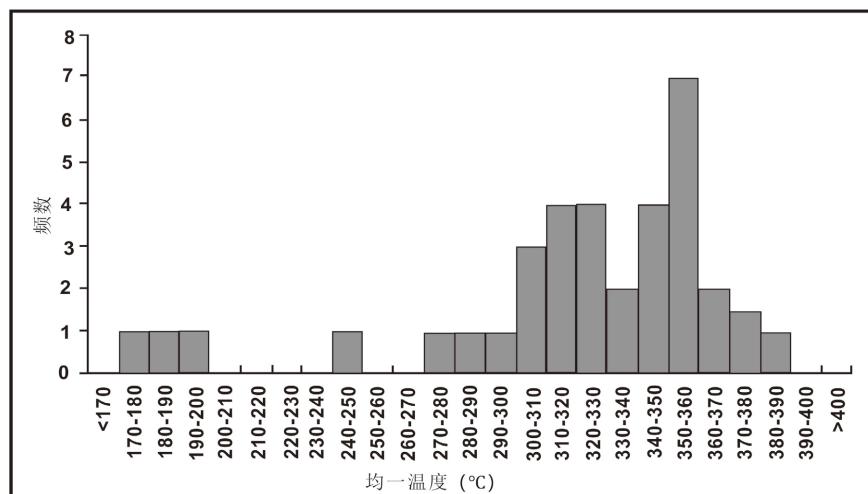


Figure 7. Homogenization temperatures (T - $^{\circ}\text{C}$) and salinity histograms ($\text{NaCl}_{\text{eqv}}\text{-}\%$) of fluid inclusions in Gangjiang pyrrhotite copper deposit (ZK2608-181)

图7. 岗讲矿区流体包裹体均一温度(T - $^{\circ}\text{C}$)直方图盐度($\text{NaCl}_{\text{eqv}}\text{-}\%$)直方图(ZK2608-181)

由表 2 可以看出, 岗讲铜矿床黄铜矿化阶段成矿流体具有中温 - 中低盐度特征, 3 类流体包裹体的共结点温度在-21.2℃附近, 含子矿物包裹体含有石盐子晶, 表明流体属 NaCl-H₂O 体系。

辉钼矿 - 黄铜矿化阶段(辉钼矿化阶段)。以 ZK2608-181 和 ZK1607-334 为代表。ZK2608-181 中呈液相均一的包裹体, 均一温度范围在 179.8℃~370.8℃之间, 峰值 350℃~360℃, 平均温度 320℃, 盐度范围为 9.47~14.15% NaCl_{eqv}, 平均盐度为 11.7% NaCl_{eqv}(图 7), 气相均一的包裹体, 均一温度范围为 277.6℃~355.4℃, LVH 相包裹体均一石盐矿物的消失而均一, 均一温度为变化于 257℃~390℃之间, 盐度为 35.2% NaCl_{eqv}。ZK1607-334 中呈液相均一的包裹体其均一温度范围为 221.7℃~372.6℃, 峰值为 310℃~330℃, 平均温度为 283℃; 盐度范围为 7.73~13.40% NaCl_{eqv}, 平均盐度为 10.76% NaCl_{eqv}(图 8), 气相均一的包裹体均一温度范围为 304.3℃~379.5℃。

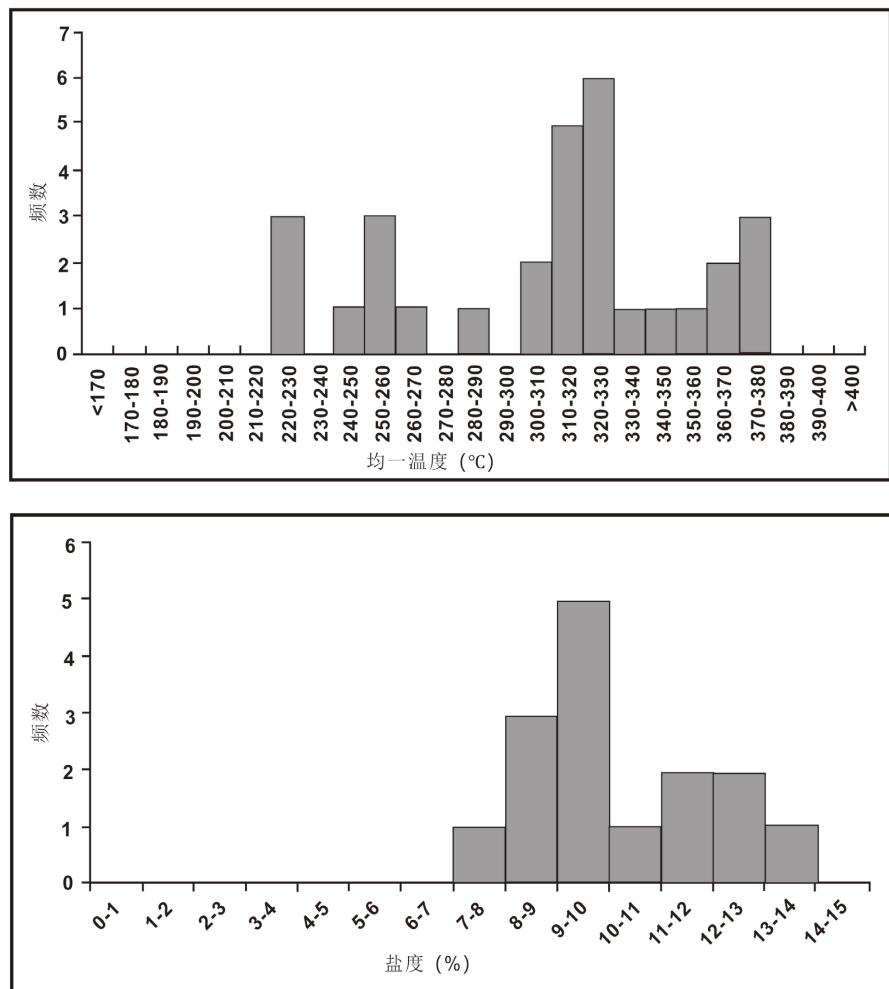


Figure 8. Homogenization temperatures (T-°C) and salinity histograms (NaCl_{eqv}-%) of fluid inclusions in Gangjiang pyrrhotite copper deposit (ZK1607-334)

图 8. 岗讲矿区流体包裹体均一温度(T-°C)直方图盐度(NaCl_{eqv}-%)直方图(ZK1607-334)

岗讲斑岩型铜矿床成矿温度和盐度从早期的黄铜矿化阶段到晚期的辉钼矿化阶段具有明显的连续性, 总体具中温、中低盐度特征, 未见 CO₂型包裹体, 溶液体系属 NaCl-H₂O 体系。此外, 含子晶多相包裹体(LVH 型)在本矿区极少发育, 这也可能是矿化较差、品位较低的原因之一。

Nashand Theodro [32]认为在斑岩矿床中有高温高盐度(温度 $> 400^{\circ}\text{C}$ 、盐度 $> 30\% \text{NaCl eqv}$)、中温中盐度(盐度 10%~25% NaCl eqv, 温度 200~400°C)两类包裹体；Misra (2000)总结了世界著名斑岩矿床后得出结论，斑岩矿床流体包裹体均一温度一般为 200~600°C，盐度从<5% NaCl eqv 到>60% NaCl eqv。芮宗瑶等[3]则认为斑岩型矿床包裹体均一温度范围 100~980°C，盐度 2%~64% NaCl eqv。Cline and Bodnar [33]认为，在侵位深、较高压力条件下，岩浆岩结晶过程中首先分异出高盐度流体，而随着结晶程度增加，分异流体盐度逐渐降低；而在侵位浅、较低压力条件下，岩浆结晶过程中首先分异出低盐度流体，而随着结晶作用的进行，特别是到了 80%以上结晶条件下，分异流体盐度急剧升高，甚至可达 80%。因此，岩浆结晶作用可直接分异出高盐度流体[34] [35]，也可分异出中等盐度的超临界流体或在 NaCl-H₂O 体系两相区内分异出高盐度卤水及共存的低盐度、低密度蒸气相[36]。岗讲斑岩热液成矿系统各阶段成矿流体的温度与盐度均在斑岩矿床范围内，但是高温流体包裹体明显偏少，盐度也偏低。野外调研和钻孔编录结果表明，矿区极少发育钾硅酸盐化带，推测岗讲地区岩浆侵位浅且为快速侵位，成矿作用发生在相对开放的环境中，大气降水高度参与，这可能与青藏高原快速隆升，岩浆浅成侵位，岩浆结晶过程中压力较低和裂隙发育有关。

3.4. 包裹体密度和压力

对于 NaCl-H₂O 体系流体包裹体，首先根据 Bodnar [26]提出的密度公式对岗讲包裹体样品计算出密度，结果显示：3 件代表黄铜矿化阶段的样品(ZK1407-211、ZK2602-117、GT06-161)包裹体平均密度为 0.92 g/cm³，2 件代表辉钼矿 - 黄铜矿化阶段的样品(ZK2608-181、ZK1607-334)包裹体平均密度为 0.93 g/cm³。在 T-W-ρ 关系图上(图 9)可以看出，不同阶段包裹体均一温度和盐度分布范围基本重叠，反映出成矿流体性质基本一致，可能均为早期岩浆水与后期大气降水的混合。

由于测试结果以 VL 和 LV 包裹体居多，压力估算参考 NaCl-H₂O 体系实验数据[37]获得最小捕获压力为 11~21 MPa，对应的静岩或静水压力深度分别为 400~800 m 或 1100~2100 m，属浅成范围。

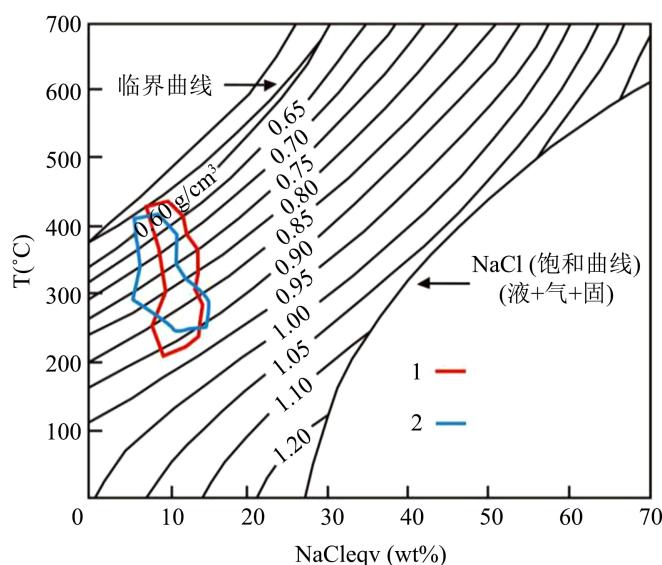


Figure 9. T-W-ρ phase diagram of fluid inclusions in Gangjiang deposit (base map according to Brown, 1989). 1) Sample of chalcopyrite stage; 2) Sample of Molybdeno-chalcopyrite stage

图 9. 岗讲流体包裹体 T-W-ρ 相图(底图据 Brown, 1989)。1) 黄铜矿化阶段的样品；2) 辉钼矿 - 黄铜矿化阶段的样品

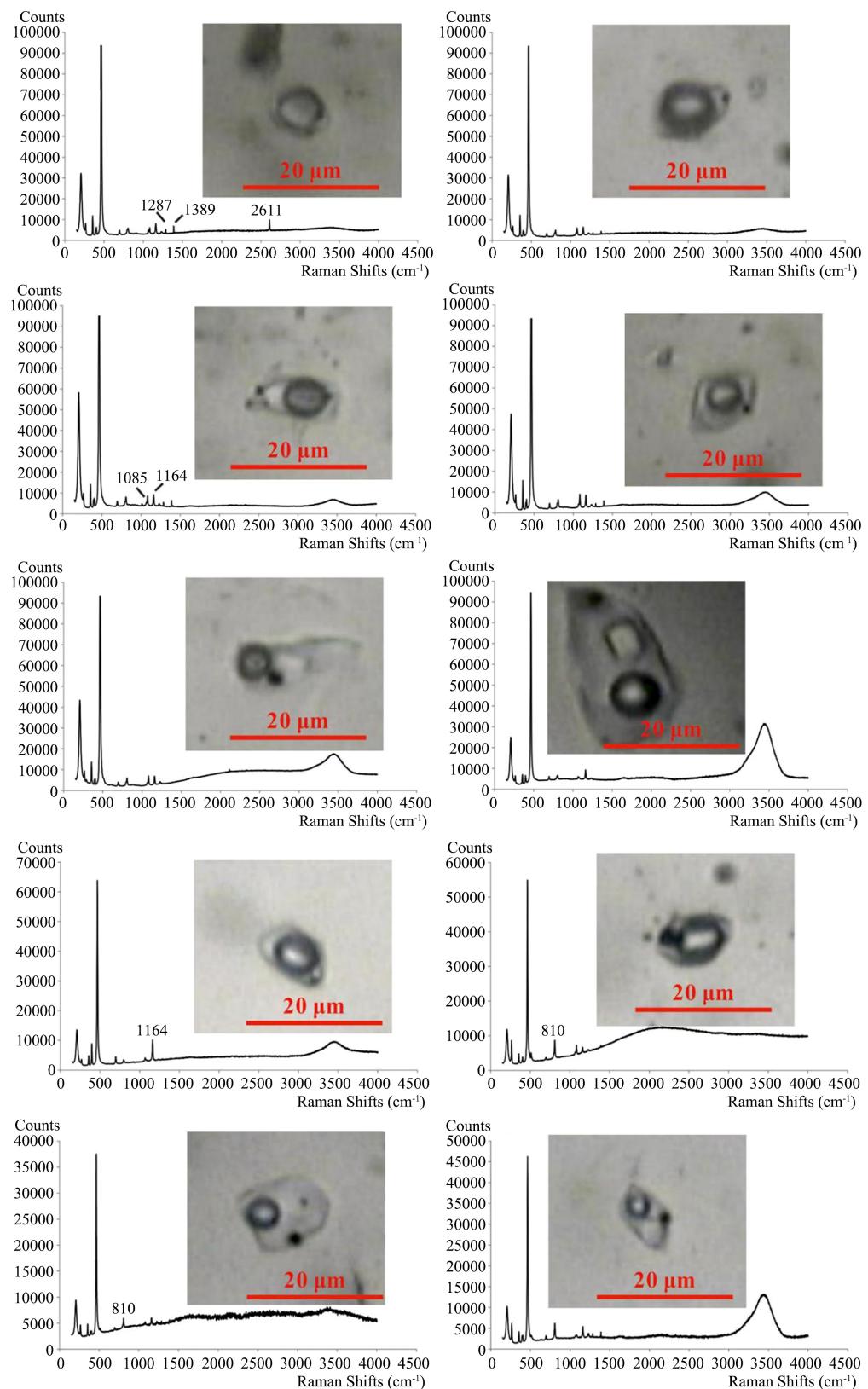


Figure 10. Representative raman spectra of fluid inclusions from the Gangjiang Cu deposit

图 10. 岗讲铜矿床流体包裹体激光拉曼光谱

3.5. 成矿流体激光拉曼探针成分分析

单个包裹体的激光拉曼探针成分分析是在中国科学院矿床地球化学重点实验室的激光拉曼光谱实验室完成的。测试仪器为Renishaw公司生产的InVia Reflex型显微共焦激光拉曼光谱仪，光源为Spectra-Physics氩离子激光器，波长514 nm，激光功率20 mW，空间分辨率为1~2 μm ，积分时间一般为30 s，局部测试积分时间适当延长，100~4000 cm^{-1} 。全波段一次取谱。共分析测点60个，室温下完成。由于方解石的荧光性，对部分测试结果有较大的影响，使得晚期石英-方解石脉中流体包裹体的拉曼激光测试受到影响，所得结果准确性降低，但仍有重要的指示意义，所测包裹体的拉曼位移见图10。

所测样品中， 1085 cm^{-1} 窄峰为 CO_3^{2-} 的拉曼位移； 1284 cm^{-1} 、 1289 cm^{-1} 与 1386 cm^{-1} 、 1388 cm^{-1} 左右的两组明显窄峰为 CO_2 的拉曼位移； 2611 cm^{-1} 为 H_2S ， H_2O 的振动位移在 $3200\sim3750 \text{ cm}^{-1}$ 左右的宽峰伸缩带。在LVH类包裹体中，多个不透明黑色子矿物的峰值均为 289 cm^{-1} ，指示子矿物为黄铜矿。

分析结果表明，各类流体包裹体的液相成分主要是水溶液，富液相包裹体的气相成分主要是水蒸气，极少量富气相包裹体的气相成分是 CO_2 ，不含 CH_4 和其它气体，表明有机质在岗讲矿区参与成矿的程度并不高；含子晶相包裹体的气相成分依所含子晶的不同而有较大的差异。根据子晶的晶型判断，其透明矿物主要是石盐，但激光拉曼分析证明，透明矿物还有大量的方解石，少量不透明子矿物推测为黄铜矿。该类包裹体长轴约为 $15 \mu\text{m}$ ，其中的黄铜矿成菱形状，紧靠方解石子晶和气泡生长，推测两种子晶共生可能为非均匀捕获的产物。

4. 讨论

流体包裹体研究表明，黄铜矿化阶段石英脉中出现的LV、VL和LVH型包裹体，表明初始流体为 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系。LV和VL流体包裹体均一温度集中于 $286.13^\circ\text{C}\sim388.3^\circ\text{C}$ ，盐度在9.85%~12.9% NaCleqv；LVH流体包裹体均一温度介于 $284.35^\circ\text{C}\sim356.4^\circ\text{C}$ 之间，盐度较高(35.4% NaCleqv)，同时LVH包裹体既有子晶先于气泡消失的样品，又有子晶晚于气泡消失的样品，而其中子晶晚于气泡消失的样品应该是非均匀捕获的结果，不能代表真实的流体盐度，但是子晶先于气泡消失的样品则可以证明早期流体具有高盐度的特征。岗讲矿区高温、高盐度流体包裹体并不发育，推断成矿流体可能缺少“初始沸腾”和“二次沸腾”作用[38][39]。

大量流体包裹体资料显示，斑岩铜矿床的流体包裹体通常具有很多共性(如高温，高盐度，具有沸腾包裹体等)[2][32][39][40][41][42][43]，高温、高氧逸度、富 CO_2 的高碱金属离子的初始岩浆-流体系统有利于氧化(活化)-萃取围岩中的Cu、Mo等成矿元素，使流体系统中聚集大量高价态成矿元素[3][44]，并且高温、高盐度流体具有很强的金属元素携带能力。岗讲铜矿的流体包裹体却显示出中等温度、低盐度、很少 CO_2 的特征，这可能也是造成岗讲铜矿床规模有限、品位不高(<0.36%)的原因之一。

前人在区内多个矿床的早期VL相包裹体中发现了黄铜矿等金属子矿物[7]，但本次在岗讲矿床早期的VL相包裹体中并没有发现，根据本区斑岩型矿床主要发育在冈底斯花岗岩基之上，矿床成群成带出现并且成矿时间一致的基本事实，再结合前人研究成果，我们认为，早期成矿流体虽然携带了充足的成矿金属元素和丰富的流体，但在不同矿床之间成矿元素的分配有所不同，个别矿床规模大(如驱龙、甲玛等)，多数矿床(如岗讲、冲江、厅宫等)规模较小，充分说明在相似的成矿背景条件下局部成矿环境仍存较大差别，建立在区域背景条件下的成矿模式和找矿模型不可生搬硬套。同时，含子矿物包裹体(VLH)中未发现钾盐子矿物，结合岗讲石英二长斑岩中 K_2O 含量较小(<4%)分析，很有可能原始岩浆流体中缺少 K^+ ，这与野外不发育典型的钾硅酸岩化带的地质事实相吻合。与典型斑岩铜矿对比可以发现，岗讲矿床包裹体的均一温度普遍低于钾化带的温度($420^\circ\text{C}\sim700^\circ\text{C}$)，而与绢英岩化带的温度($280^\circ\text{C}\sim420^\circ\text{C}$)相当[3]，这可能与成矿过程中大气降水参与程度较高有关，也可能是原始岩浆流体“先天不足”所致。

5. 结论

- 1) 岗讲斑岩铜矿床流体包裹体主要为富液相包裹体、富气相包裹体和含子矿物包裹体3类。激光拉曼探针分析表明, 包裹体中液相成分主要是水, 气相成分主要为水蒸气和少量CO₂, 子晶主要为石盐, 次为方解石, 黄铜矿等金属矿物含量很低。
- 2) 岗讲矿床不同成矿阶段流体包裹体特征基本一致, 均显示为中温, 中低盐度, 很少CO₂含量, 表明原始岩浆快速浅成侵位, 岩浆结晶程度不高, 成矿作用发生在相对开放环境, 流体来自岩浆水和大气降水的混合, 且以大气降水为主。
- 3) 成矿期流体包裹体内含有少量黄铜矿等子矿物, 说明岩浆结晶分异过程中有成矿金属物质流体的存在, 但是中低盐度的岩浆流体携带成矿元素的能力较弱。含子矿物包裹体中未发现钾盐子矿物, 推测原始岩浆流体中缺少K⁺, 结合地质背景研究成果分析, 认为岗讲斑岩铜矿床规模有限、品位不高可能是一方面初始岩浆流体“先天不足”, 成矿作用发生在相对开放的环境以及岩浆高位快速侵位等综合因素所致。

致 谢

感谢拉萨天利矿业有限公司领导在野外工作期间提供的帮助, 感谢地球科学前沿编辑部多年来对作者的热心支持和帮助, 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议!

基金项目

云南省科技惠民计划(应用研究开发) (2013CA019)、云南省对外科技合作计划(省院省校科技合作) (2014IB001)联合资助。

参考文献

- [1] 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶, 周耀华, 朱贤甲, 胡淙声, 梅占魁. 德兴斑岩铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 1-336.
- [2] Roedder, E. (1984) Fluid Inclusions, Mineralogical Society of America. *Reviews in Mineralogy*, **12**, 644-645.
<https://doi.org/10.1515/9781501508271>
- [3] 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 中国斑岩铜(钼)矿[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-350.
- [4] Candela, P.A. and Holland, H.D. (1986) A Mass Transfer Model for Copper and Molybdenum in Magmatic Hydrothermal Systems: The Origin of Porphyry-Type Ore Deposits. *Economic Geology*, **81**, 1-19.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.1.1>
- [5] Hemley, J.J. and Hunt, J.P. (1992) Hydrothermal Ore-Forming Processes in the Light of Studies in Rock-Buffered Systems II: Some General Geologic Applications. *Economic Geology*, **87**, 23-43.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.87.1.23>
- [6] Heinrich, C.A., Guenther, D., Audetat, A., Ulrich, T. and Frischknecht, R. (1999) Metal Fractionation between Magmatic Brine and Vapor, Determined by Microanalysis of Fluid Inclusions. *Geology*, **27**, 755-758.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0755:MFBMBA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0755:MFBMBA>2.3.CO;2)
- [7] Ulrich, T., Gunther, D. and Heinrich, C.A. (2001) The Evolution of a Porphyry Cu-Au Deposit, Based on LA-ICP-MS Analysis of Fluid Inclusions: Bajo de la Alumbra, Argentina. *Economic Geology*, **96**, 1743-1774.
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.8.1743>
- [8] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno, F., 赖勇, 苏文超, 张辉. 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.
- [9] Richards, J.P. (2009) Postsubduction Porphyry Cu-Au and Epithermal Au Deposits: Products of Remelting of Subduction-Modified Lithosphere. *Geology*, **37**, 247-250. <https://doi.org/10.1130/G25451A.1>
- [10] 谢玉玲, 衣龙升, 徐九华, 李光明, 杨志明, 尹淑萍. 冈底斯斑岩铜矿带冲江铜矿含矿流体的形成和演化: 来自流体包裹体的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 1023-1030.
- [11] 郑有业, 薛迎喜, 程力军, 樊子珲, 高顺宝. 西藏驱龙超大型斑岩铜(钼)矿床: 发现、特征及意义[J]. 地球科学—

- 中国地质大学学报, 2004, 29(1): 103-108.
- [12] 芮宗瑶, 侯增谦, 李光明, 刘波, 张立生, 王龙生. 冈底斯斑岩铜矿成矿模式[J]. 地质论评, 2006, 52(4): 459-466.
- [13] 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带[J]. 矿床地质, 2001, 20(4): 355-366.
- [14] 李金祥, 秦克章, 李光明, 杨列坤. 冈底斯中段尼木斑岩铜矿田的 K-Ar、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄: 对岩浆 - 热液系统演化和成矿构造背景的制约[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 953-966.
- [15] 王小春, 晏子贵, 周维德, 贾向勘, 李作华, 文军, 徐德章, 袁剑飞. 初论西藏冈底斯中段尼木西北部斑岩铜矿地质特征[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 5-8.
- [16] 周维德, 张庆松. 西藏尼木岗讲斑岩 Cu-Mo 矿床地质特征初步研究[J]. 四川地质学报, 2010, 30(4): 416-419.
- [17] 冷成彪, 张兴春, 周维德. 西藏尼木地区岗讲斑岩铜-钼矿床地质特征及锆石 U-Pb 年龄[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 185-197.
- [18] 坚润堂, 张裴培, 韩艳伟, 王岩梅. 西藏冈底斯带中段尼木地区岗讲斑岩铜钼矿地质特征浅析[J]. 矿床地质, 2012, 31(增刊): 1031-1032.
- [19] 坚润堂, 赵献昆, 姜华. 西藏尼木斑岩铜多金属矿区岩浆岩地球化学特征及成因探讨[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(4): 141-147.
- [20] 朱小三, 卢民杰, 程文景, 宋玉财, 张超. 安第斯与冈底斯成矿带斑岩铜矿床矿物学和成矿斑岩地球化学特征对比[J]. 地质通报, 2017, 36(2): 2143-2153.
- [21] 杜光伟, 程力军, 赵咸明. 冈底斯东段地球化学特征及其找矿意义[J]. 西藏地质, 2001, 19: 74-79.
- [22] 程力军, 李志, 刘鸿飞, 杜光伟, 郭建慈. 冈底斯东段铜多金属成矿带的基本特征[J]. 西藏地质, 2001, 19(1): 43-53.
- [23] 王光旺, 曾红坤. 西藏尼木县岗讲铜钼矿找矿方向研究[J]. 矿产与地质, 2014, 28(5): 583-589.
- [24] 徐德章. 西藏尼木县厅宫、白容铜矿区矿床地质的几个问题[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(增刊): 15-19.
- [25] 卢焕章, 范宏章, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-487.
- [26] Bodnar, R.J. (1993) Revised Equation and Table for Determining the Freezing Point Depression of $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ Solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**, 683-684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-A)
- [27] Bodnar, R.J. and Vityk, M.O. (1994) Interpretation of Microthermometric Data for $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ Fluid Inclusions. In: De Vivo, B. and Frezzotti, M.L., Eds., *Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications*, Virginia Tech., Blacksburg, 117-130.
- [28] Hall, D.L., Sternner, S.M. and Bodnar, R.J. (1988) Freezing Point Depression of $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ Solutions. *Economic Geology*, **83**, 197-202. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.197>
- [29] Bodnar, R.J. (1983) A Method of Calculating Fluid Inclusion Volumes Based on Vapor Bubble Diameters and PVTX Properties of Inclusion Fluids. *Economic Geology*, **78**, 535-542. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.3.535>
- [30] Bischoff, J.L. (1991) Densities of Liquids and Vapors in Boiling $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ Solutions: A PVTX Summary from 300 °C to 500 °C. *American Journal of Science*, **291**, 309-338. <https://doi.org/10.2475/ajs.291.4.309>
- [31] 胡芳芳, 范宏瑞, 于虎, 刘振豪, 宋林夫, 金成伟. 胶东三甲金矿床流体包裹体特征[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 2037-2044.
- [32] Nash, J.T. and Theodore, T.G. (1971) Ore Fluids in the Porphyry Copper Deposit at Copper Canyon, Nevada. *Economic Geology*, **66**, 385-399. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.3.385>
- [33] Cline, J.S. and Bodnar, R.J. (1991) Can Economic Porphyry Copper Mineralization be Generated by a Typical Calc-Alkaline Melt? *Journal of Geophysical Research*, **96**, 8113-8126. <https://doi.org/10.1029/91JB00053>
- [34] Yang, K. and Bodnar, R.J. (2004) Orthomagmatic Origin for the Ilkwang Cu-W Breccia-Pipe Deposit, Southeastern Kyongsang Basin, South Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, **24**, 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.12.001>
- [35] Frezzotti, M.L. (1992) Magmatic Immiscibility and Fluid Phase Evolution in the Mount Genis Granite (Southeastern Sardinia, Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 21-33. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90114-X)
- [36] Cline, J.S. and Vanko, D.A. (1995) Magmatically Generated Saline Brines Related to Molybdenum at Questa, New Mexico, USA. In: Thompson, J.F.H., Ed., *Magmas, Fluids, and Ore Deposits*, Mineralogical Association of Canada Short Course Series, Mineralogical Association of Canada, Québec, 153-174.
- [37] Bouzari, F. and Clark, A.H. (2006) Prograde Evolution and Geothermal Affinities of a Major Porphyry Copper Deposit: The Cerro Colorado Hypogene Protore, I Refión, Northern Chile. *Economic Geology*, **101**, 95-134.

- <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.1.95>
- [38] Cline, J.S. (2003) How to Concentrate Copper. *Science*, **303**, 2075-2076. <https://doi.org/10.1126/science.1093202>
 - [39] Heinrich, C.A. (2007) Fluid-Fluid Interactions in Magmatic-Hydrothermal Ore Formation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **65**, 363-387. <https://doi.org/10.2138/rmg.2007.65.11>
 - [40] Beane, R.E. and Titley, S.R. (1981) Porphyry Copper Deposit Part II. Hydrothermal Alteration and Mineralization. *Economic Geology*, **75**, 214-269. <https://doi.org/10.5382/AV75.09>
 - [41] Beane, R.E. and Bodnar, R.J. (1995) Hydrothermal Fluids and Hydrothermal Alteration in Porphyry Copper Deposits. *Porphyry Copper Deposits of the American Cordillera. Arizona Geological Society Digest*, **20**, 83-93.
 - [42] Landtwing, M.R., Pettke, T., Halter, W.E., Heinrich, C.A., Redmond, P.B., Einaudi, M.T. and Kunze, K. (2005) Copper Deposition during Quartz Dissolution by Cooling Magmatic-Hydrothermal Fluids: The Bingham Porphyry. *Earth and Planetary Science Letters*, **235**, 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.046>
 - [43] Klemm, L.M., Pettke, T., Heinrich, C.A. and Campos, E. (2007) Hydrothermal Evolution of the El Teniente Deposit, Chile: Porphyry Cu-Mo Ore Deposition from Low-Salinity Magmatic Fluids. *Economic Geology*, **102**, 1021-1045. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.6.1021>
 - [44] 张绮玲, 曲晓明, 徐文艺, 侯增谦, 陈伟十. 西藏南木斑岩铜钼矿床的流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 251-259.