

青海省卡尔却卡铜多金属矿床流体包裹体 特征及成矿流体

宋文彬^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 黄敏^{1,2}, 杨自安³, 张普斌³, 欧阳华平^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 中国有色地质调查中心, 北京 100012)

摘要: 卡尔却卡多金属矿床位于祁漫塔格成矿带, 矿区主要有斑岩型和矽卡岩型两种矿化类型, 均与印支期花岗岩闪长岩关系密切。流体包裹体研究表明, 矽卡岩矿石中可见水溶液包裹体(I型); 斑岩型矿化岩体中发育有水溶液包裹体(I型)和含子矿物的包裹体(II型)。斑岩型矿化岩体中的流体包裹体气液均一温度在 274~495 °C, 盐度介于 5.9%~59.1%(质量分数, NaCl equiv, 下同)之间; 矽卡岩矿石样品的气液均一温度集中在 137~322 °C, 盐度介于 0.7%~12.7%之间。研究显示矿区成矿流体来源于富 Na⁺及成矿物质的高温(达 500 °C)、高盐度(达 60%)的岩浆流体, 具有超高压特征。流体演化至 290~320 °C时由于围岩碎裂减压而发生沸腾现象, 并和外来流体混合, 改变流体的成分和物理化学性质, 有利于成矿物质沉淀富集。

关键词: 斑岩型矿化; 矽卡岩型矿化; 流体包裹体; 成矿流体; 卡尔却卡; 青海省

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

Characteristics of fluid inclusions and origin of Kaerqueka copper polymetallic deposit, Qinghai Province

SONG Wen-bin^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2}, HUANG Min^{1,2}, YANG Zi-an³, ZHANG Pu-bin³, OUYANG Hua-ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. China Nonferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China)

Abstract: There are two mineralization types in Kaerqueka copper polymetallic deposit in Qimantage area, Qinghai Province, which are skarn-type mineralization and porphyry-type mineralization. Both of the two mineralization types are closely related to Indosinian granodiorite. Fluid inclusions (FI) host in porphyry-type mineralization granodiorite and skarn-type ore, and the fluid inclusions in skarn-type ore typically are aqueous FI (type I) while those in porphyry-type mineralization granodiorite are usually aqueous FI (type I) or daughter mineral-bearing FI (type II) as well. The homogenization temperatures of the fluid inclusions in the skarn-type ore and the porphyry-type mineralized granodiorite vary from 137 °C to 322 °C and 274 °C to 495 °C, respectively. The salinities of skarn-type ore range from 0.7% to 12.7% (mass fraction, NaCl_{equiv}); and those in porphyry-type mineralized granodiorite range from 5.9% to 59.1%. The study demonstrates that the ore-forming fluids originate from magma which is high-temperature (up to 500 °C), hypersaline (up to 60%), rich in Na⁺ and metallogenic material, with the characteristics of ultrahigh pressure. Fluid-boiling occurs when the ore-forming temperatures are between 290 °C and 320 °C because of breaking of wall rocks. Then the composition and physicochemical properties of ore-forming fluids are changed by mixed extraneous fluids, leading to the precipitation and enrichment of metallogenic material.

Key words: skarn-type; porphyry-type; fluid inclusion; ore-forming fluid; Kaerqueka; Qinghai Province

矿物包裹体是成岩成矿流体(含气液流体或硅酸盐熔融体)在矿物结晶生长过程中,被包裹在矿物晶格缺陷或窝穴中的、至今尚在主矿物中封存并与主矿物有着相的界限的那一部分物质^[1]。流体包裹体作为唯一的保留在矿物里的古成矿流体,是成矿流体的成分、温度和压力的最直接证据,因此,对流体包裹体的研究也就自然成为研究矿床成因的重要手段之一,也是找矿勘探的重要手段之一^[2]。卡尔却卡矿区位于青海省格尔木市乌图美仁乡境内,海拔标高在4 000 m以上,自青海省地质调查院2003年发现该矿以来,国内多家单位先后开展了基础地质和矿床地质研究工作。该矿区成矿元素组合复杂,以铜钼为主,共伴生有磁铁、铅锌、金银等,主要包含斑岩型和矽卡岩型两种矿化类型,正在开展的矿产勘查工作显示其进一步的找矿潜力巨大^[3-5]。李世金等^[3]对该矿区西北部铜矿体中的流体包裹体已经做了相应的研究工作,但对于该矿区的矽卡岩型矿化未作研究。本文作者通过对卡尔却卡矿区的斑岩型矿化岩体及矽卡岩型矿体中的流体包裹进行岩相学研究和包裹体显微测温,查明该矿区流体包裹体的基本类型,并结合前人的研究,对该区成矿流体的来源、性质及演化和矿床的成因作出简要的探讨。

1 地质背景

卡尔却卡矿区位于青海和新疆的交界处,大地构造位置位于青海祁漫塔格成矿带。该矿带属昆仑地洼区,与青甘地洼区、巴彦喀拉地洼区、塔里木地洼区以及藏北地洼区相邻。昆仑地洼区在晚元古代前为前地槽阶段,寒武纪进入地槽阶段,在海西期形成褶皱带经短暂地台阶段后,于侏罗纪转化为地洼区,目前正处于地洼激烈期^[6]。

区域地层主要有元古宇金水口群片岩、片麻岩夹少量大理岩,其次为中上奥陶统-志留系滩间山群浅变质火山沉积岩以及上三叠统海相碎屑碳酸盐沉积岩系,形成NWW向的褶皱组合构造带^[7]。岩浆岩以海西-印支期中酸性岩体为主,其中晚印支期的侵入岩最为发育,并以岩基、岩株及少量岩脉等产出,常构成多期次叠合的侵入杂岩体^[3,8]。

矿区出露地层为滩间山群大理岩和基性火山岩,以剥蚀残留体形式零星分布于侵入岩体中;第四系主要为河谷冲积砂、砾和粘土,分布于河谷和山前地区(见图1)。

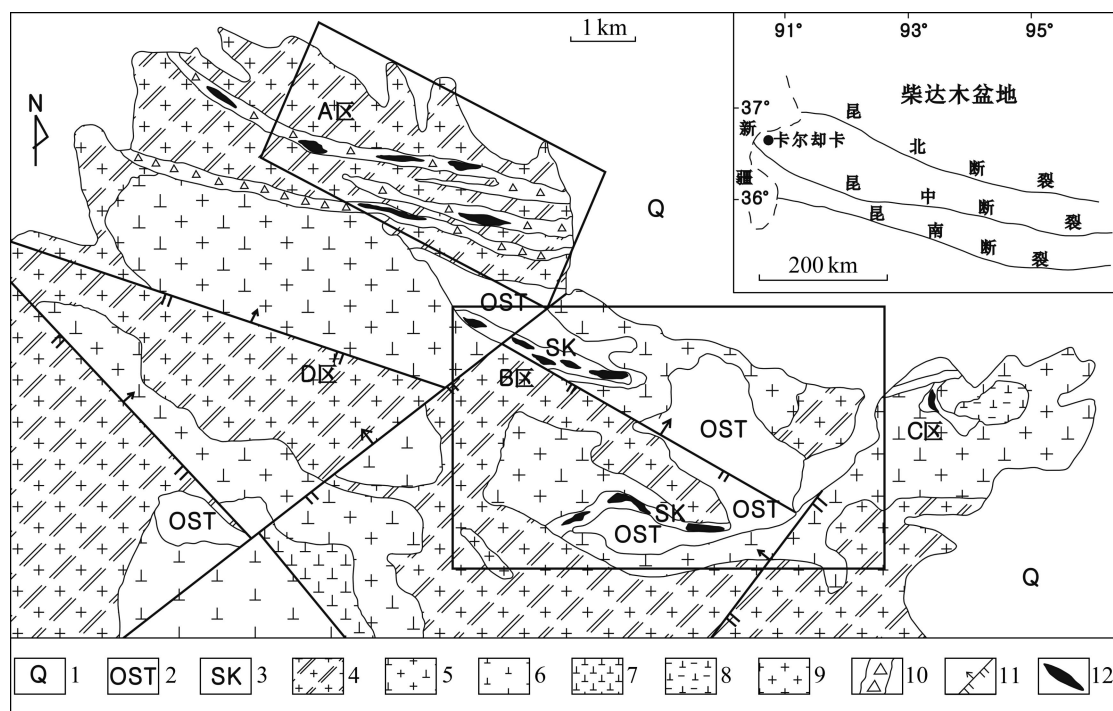


图1 卡尔却卡铜多金属矿床地质简图(据文献[7]): 1—第四系; 2—滩间山群; 3—矽卡岩; 4—似斑状黑云母二长花岗岩; 5—花岗闪长岩; 6—石英闪长岩; 7—闪长岩; 8—闪长玢岩; 9—花岗岩; 10—破碎蚀变带; 11—断层; 12—矿体

Fig. 1 Geologic sketch map of Kaerqueka copper polymetallic deposit (From Ref. [7]): 1—Quaternary Period; 2—Tanjianshan group; 3—Skarn; 4—Porphyroid biotite adamellite; 5—Granodiorite; 6—Quartz diorite; 7—Diorite; 8—Dioritic porphyrite; 9—Granite; 10—Cataclastic alteration zone; 11—Fault; 12—Orebody

矿区构造多为 NWW 向和 NE 向两组断层，前者为矿区的主要控矿构造。NWW 向断裂集中分布于野拉赛以西，挤压强烈，断裂破碎带一般宽 50~300 m 不等，长度一般大于 10 km，是重要控岩和控矿构造。NE 向断裂分布于野拉赛，显示走滑特征，构造带宽 50~350 m 不等，长度大于 15 km，该组断裂切穿 NWW 向断裂和花岗岩类岩体。

矿区侵入岩主要有似斑状黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩，似斑状黑云母二长花岗岩呈岩基状产出，整体呈 NWW 向展布，与区域构造线基本一致。花岗闪长岩呈岩株状侵入于前者，形态为较规则的长条形，亦呈受构造控制明显的 NWW 向展布。此外，尚有一些闪长岩、闪长玢岩和花岗岩等呈小岩枝或岩脉产出，与晚三叠世花岗闪长岩时空关系密切，推测为同源岩浆演化的产物。另据钻孔资料，于矿区深部揭露出花岗闪长斑岩和黑云母花岗斑岩等矿化小岩体^[3-5]。

按照矿化类型的不同，将矿区划分为 A、B、C、D 4 个分区(见图 1)。其中以 A 区斑岩矿化和 B 区矽卡岩矿化最为重要，也是本文的重点研究对象。

斑岩矿化主要产于 A 区近于平行的 3 条蚀变破碎

带内，呈北西西向展布，蚀变破碎带内岩性主要为似斑状黑云母二长花岗岩，并伴有后期细晶花岗岩脉、石英脉充填。李东生等^[7]研究认为，沿矿化带有强的似千枚岩化、硅化、黄铁矿化蚀变。向深部断裂迹象不明显，并逐步转化为斑岩型矿化。含矿花岗闪长斑岩发育钾化和硅化，含有细脉浸染状低品位黄铜矿化，其南部外围发育似千枚岩化、泥化蚀变^[8]。

矽卡岩矿化带主要产自花岗闪长岩与滩间山群地层接触部位。部分地段晚二叠世似斑状花岗岩接触带亦有矿化，呈带状分布，带内由透辉石矽卡岩、透闪石矽卡岩、透辉石石榴子石矽卡岩及大理岩、安山岩组成。带内蚀变主要为矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化和硅化等。主要矿石矿物为黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、辉钼矿、磁铁矿、镜铁矿等。

2 研究方法

本次包裹体研究的样品采自于卡尔却卡矿区地表、坑道及钻孔的岩体和矿体。样品特征见表 1。

表 1 样品采样位置及特征
Table 1 Location and characteristics of samples

样号	样品类型	采样位置	样品描述	主矿物	研究方法
RA-2	岩体	A 区	蚀变岩体，蚀变主要为绢云母化为主，可见明显绿泥石细脉	石英	测温
RA-4	岩体	A 区	构造带岩石，可见颗粒达厘米级的石英，同时可见黄铁矿脉、孔雀石和蓝铜矿化	石英	群体包裹体成分测试
RA-6	岩体	A 区	灰色花岗闪长岩体，略有蚀变，可见长石斑晶	石英	测温
RA-7	岩体	A 区	细粒灰色花岗闪长岩，可见黑云母组成的斑点状团块，同时可见长石斑晶	石英	测温
RZ-1	岩体(钻孔)	A 区	花岗闪长岩，可见斑晶，主要矿物为斜长石、石英、呈团块状的黑云母等。可见稀疏浸染状黄铁矿化	石英	测温
RZ-2	岩体(钻孔)	A 区	岩性与 RZ-1 基本相同，有蚀变，可见明显细脉状黄铁矿化	石英	测温
RZ-3	岩体(钻孔)	A 区	岩性与 RZ-1 基本相同，但矿化有所加强，可见浸染状和团块状黄铁矿化和黄铜矿化	石英	测温
RZ-5	岩体(钻孔)	A 区	花岗闪长岩，可见细脉黄铁矿，可见边部有细蚀变带，呈灰绿色，可能为绿泥石化	石英	测温
RZ-6	岩体(钻孔)	A 区	样品可见粗大角砾，成分推测为石英，还可见细脉状和浸染状黄铜矿化	石英	测温
RM-3	矿石	B 区	矽卡岩，主要矽卡岩矿物为石榴子石、透辉石、硅灰石等	方解石	测温/群体包裹体成分测试
RM-5	矿石	B 区	含矿矽卡岩，矽卡岩矿物同上，主要矿化为斑铜矿化、黄铜矿化等，可见大理岩夹层	方解石	测温
RM-11	矿石	B 区	矿化矽卡岩，主要矽卡岩矿物为绿泥石，主要矿化为团块状黄铁矿化和斑铜矿化，可见紫色萤石	萤石	测温
RM-14	矿石	B 区	含矿矽卡岩，可见明显蓝灰色金属矿物呈团块状分布，推测为辉铜矿	石英	测温
RM-15	矿石	B 区	矽卡岩化大理岩，可见条带状大理岩条带和脉状铜矿化	石英	测温

研究时将样品磨制成厚度 0.06~0.1 mm 的双面抛光薄片,然后在透-反射显微镜下观察样品的岩相、矿相及包裹体特征,在野外观察的基础上,进一步划分成矿期次,确定显微冷热台测温的对象。

流体包裹体显微测温研究在中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室完成,研究采用英国产 Linkam THMSG600 型地质用冷-热台。测温时,仪器的使用温度为-196~600 °C。在 30~600 °C 温度范围内精度为±1 °C,在-196~30 °C 范围内时,精度为±0.1 °C。设置的温度变化速率一般为 10 °C/min,在相变点温度附近,温度变化速率根据需要设置为 0.1~1 °C/min。

通过显微冷热台测定了水溶液包裹体的冻结温度 T_f 、冰的初始熔化温度 $T_i(\text{ice})$ 、冰的最终熔化温度 $T_m(\text{ice})$ 、气液均一温度 T_h 。利用 BROWN^[9] 的 FLINCOR 计算机程序计算出流体包裹体的盐度和压力等参数。

矿物群体包裹体成分分析样品分别选择矽卡岩型矿体中的石榴子石和岩体中的石英单矿物。利用双目镜挑选单矿物,纯度达到 98% 以上,交中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室通过专用仪器测定其中离子组分和气相组分的含量。液相成分测试仪器为美国 Dionen 公司出产的 DX-120 Ion Chromatograph 型离子色谱,气相成分测试仪器为美国 Varian 公司出产的 Varian-3400 型气相色谱仪。

3 包裹体特征及测试结果

3.1 包裹体岩相学特征

包裹体岩相学研究表明,A 区斑岩型矿化样品的石英中和 B 区矽卡岩矿化样品石英、方解石、萤石中均发育丰富的流体包裹体(见图 2)。依据室温下的相态特征,将这些原生包裹体分为 I 型(气液两相水溶液包裹体)、II 型(含盐类子矿物三相水溶液包裹体)。其中,矿石中大量发育 I 型包裹体,而岩体中 I 型和 II 型都较发育。

I 型包裹体由盐水溶液和气泡两相构成,形态多为不规则状,以及圆形、椭圆形和长条形等,大小在 4~30 μm ,占整个包裹体总数的 70%。按照其中的气泡所占体积的比例又可分为两个亚类:I a 型(富液相水溶液包裹体)(见图 2(a)、2(d)和 2(e))和 I b 型(富气相水溶液包裹体)(见图 2(b))。I a 型包裹体的气相体积分数在 10%~65% 之间,大部分为 25%~40%,加热后均一到水溶液相;I b 型的气相体积分数>68%,加热后均一到气相。

II 型包裹体由盐水溶液、气泡和子矿物 3 相组成,气相体积分数介于 10%~45% 之间。大部分的包裹体中子矿物为无色透明的立方体晶形(见图 2(c)),与石盐子晶特点吻合。根据子矿物和气泡升温过程中消失的先后顺序,可将该类型包裹体分为两个亚类型(II a、II b)。II a 型包裹体升温过程中子矿物先消失,II b 型包裹体加温时为气泡先消失。II 型包裹体形态主要为多不规则,分布无规律,大部分呈孤立状分布,大小 5~26 μm 左右。这类包裹体约占包裹体总数的 30%,绝大多数出现在岩体样品的包裹体中。

3.2 群体包裹体成分分析

通过测试,获得群体包裹体成分分析测量值,如表 2 所列。由表 2 可看出,卡尔却卡矿区流体包裹体液相成分中主要含有 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等,并含有痕量 F^- 、 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 等,总体上看,阳离子按含量多少排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$;阴离子按含量多少排序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$ 。流体包裹体中气相以 H_2O 为主,其次含有 CO_2 和极少量 H_2 等组分,并含有 CH_4 、 C_2H_2 和 C_2H_6 等有机气体。

从表 2 中阳离子含量的变化可以看出,流体中的 F^- 、 Ca^{2+} 的含量从岩体到矽卡岩矿物降低较明显,而 Na^+ 、 K^+ 略有减少,变化不大。这可能反映出流体中的 Ca^{2+} 经过与围岩的交代作用,形成矽卡岩矿物(石榴子石、萤石等)沉淀下来, F^- 、 Ca^{2+} 逐渐降低的过程。

3.3 流体包裹体显微测温结果

本次研究对象为斑岩型矿化岩体样品 8 件和矽卡岩型矿化矿体样品 5 件,共测试了 129 个流体包裹体,主矿物分别为石英、方解石和萤石,其中 92 个为水溶液包裹体,37 个为含子矿物包裹体。显微冷热台测温结果及计算得参数见表 3。按照不同成矿阶段统计的均一温度及盐度直方图见图 3,均一温度与盐度关系散点图见图 4。

3.3.1 均一温度

包裹体测温结果表明,斑岩样品中 I 型包裹体的气液均一温度范围在 274~495 °C 之间,集中于 270~440 °C 间分布,平均值为 385 °C;斑岩样品中 II 型包裹体的气液均一温度范围在 216~420 °C 之间,集中于 270~350 °C 间分布,平均值为 340 °C;矽卡岩样品中只见 I 型包裹体,气液均一温度范围在 137~322 °C 之间(少量升温至 400 °C 未见明显变化),平均为 217 °C。I 型包裹体中大多为 I a 型包裹体,I b 型包裹体很少,气液均一温度在 340 °C 左右,均一为气相。另还有少量包裹体的气相体积分数在 70% 左右,加热升温

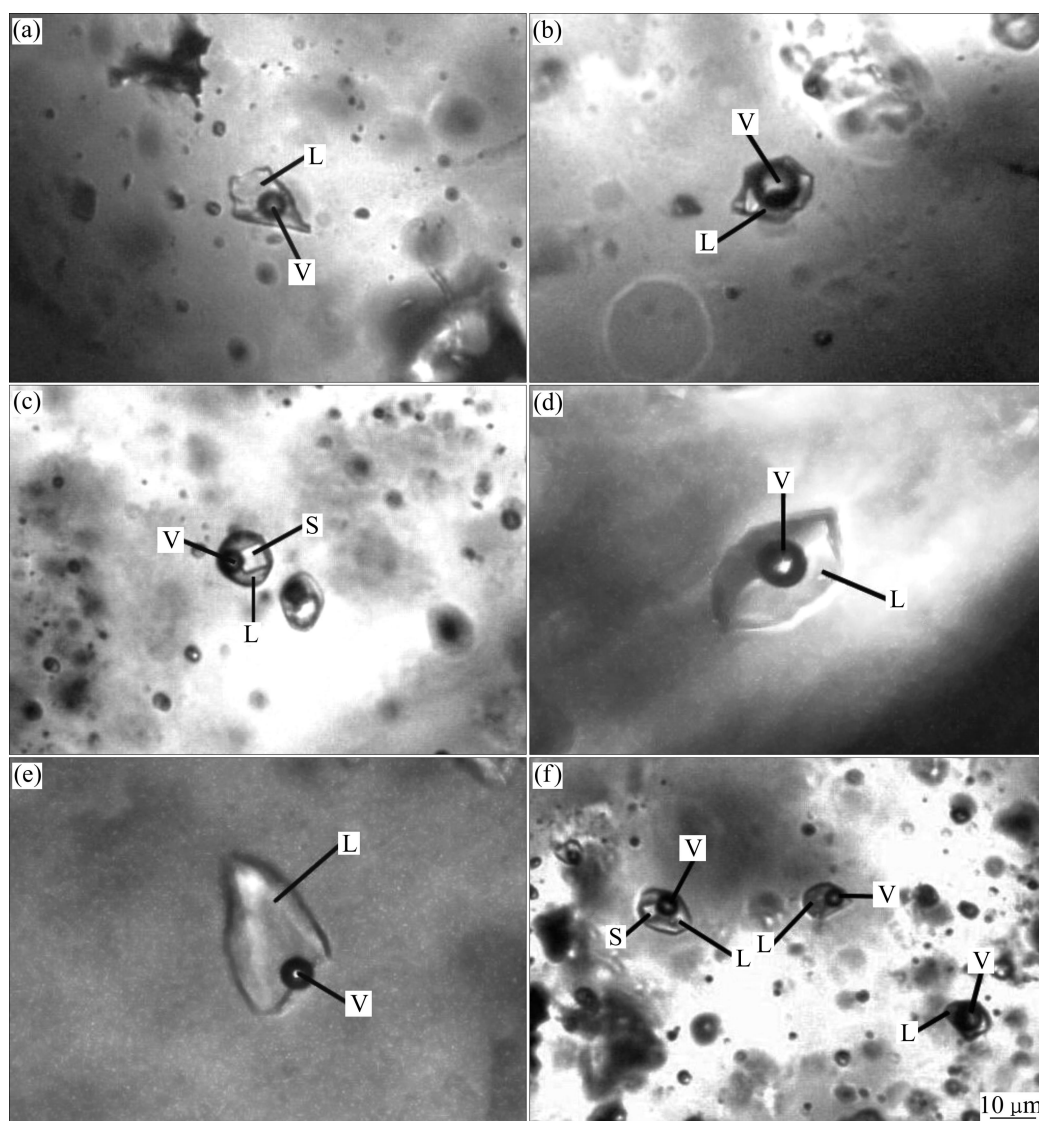


图 2 矿物流体包裹体特征: (a) 斑岩样品的石英中富液相两相水溶液包裹体; (b) 斑岩样品的石英中富气相两相水溶液包裹体; (c) 斑岩样品的石英中含子矿物的三相包裹体; (d) 矽卡岩样品中的方解石中富液相两相水溶液包裹体; (e) 矽卡岩样品中的萤石中富液相两相水溶液包裹体; (f) 斑岩样品中富气相包裹体、富液相包裹体与含子矿物包裹体共生; L—水溶液相; V—蒸汽相; S—子矿物

Fig. 2 Microphotographs of varied fluid inclusions in Kaerqueka copper polymetallic deposit: (a) Liquid-rich two-phased aqueous inclusions in quartz of porphyry-type sample; (b) Vapor-rich two-phased aqueous inclusions in quartz of porphyry-type sample; (c) Aqueous inclusions with daughter mineral in quartz of porphyry-type sample; (d) Liquid-rich two-phased aqueous inclusions in calcite of skarn-type sample; (e) Liquid-rich two-phased aqueous inclusions in fluorite of skarn-type sample; (f) Liquid-rich, vapor-rich and aqueous inclusions with daughter mineral coexist in porphyry-type sample; L—Liquid phase; V—Gas phase; S—Daughter mineral

过程中有向气相均一的趋势, 最后爆裂, 爆裂温度介于 410~430 °C 之间。

总体来看, 矽卡岩样品的气液均一温度集中在 170~260 °C, 而斑岩样品的气液均一温度集中在 290~380 °C。

3.3.2 盐度

包裹体测温结果表明, 斑岩样品中 I 型包裹体的冰点温度在 -3.7~-20.8 °C 之间, 根据经验公式换算成对应的盐度(质量分数, NaCl equiv, 下同)介于 5.9%~22.9% 之间, 平均盐度 14.6%; 斑岩样品中 II 型包裹体的子矿物熔化温度介于 177~495 °C 之间, 根据经验公式换算成对应的盐度介于 30.8%~59.1% 之间, 平均盐

表 2 卡尔却卡铜多金属矿床流体包裹体气液相成分分析结果

Table 2		Analysis results of colony composition for fluid inclusion in Kaerqueka copper polymetallic deposit										
样号	测试对象	包裹体液相成份/ 10^{-6}										
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Li ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
RM-3	石榴子石	痕	3.967	0.028	无	4.247	无	2.163	无	1.921	痕	2.213
RA-4	石英	2.309	5.924	0.192	痕	6.375	痕	3.644	无	2.113	痕	6.789

样号	测试对象	包裹体气相成份/ 10^{-6}								
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	CO ₂	H ₂ O
RM-3	石榴子石	6.371	无	无	12.334	无	痕	痕	516.377	1795
RA-4	石英	10.473	无	痕	7.394	无	1.392	痕	760.971	1349

测试单位：中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室。

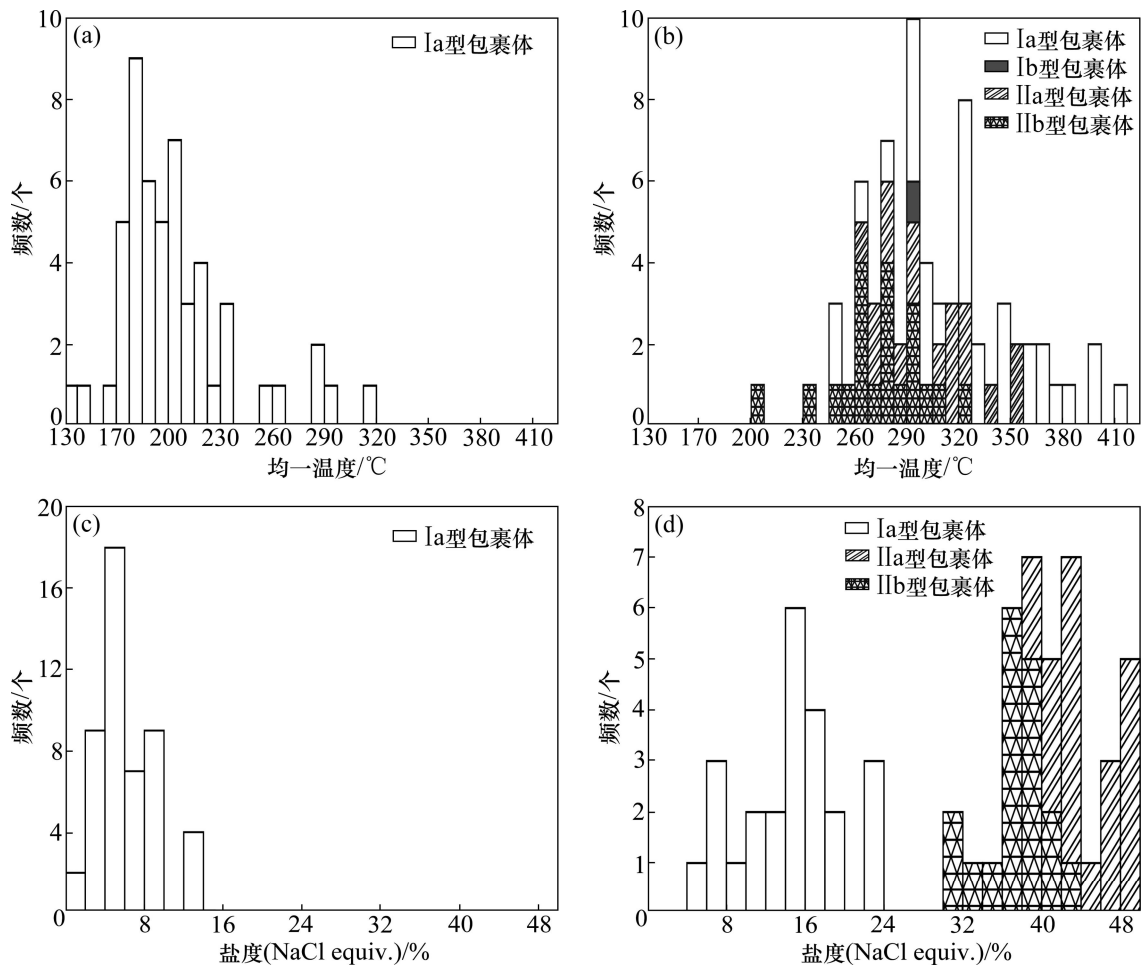


图 3 流体包裹体气液均一温度及盐度统计直方图：(a) 矽卡岩样品均一温度直方图；(b) 斑岩样品均一温度直方图；(c) 矽卡岩样品盐度直方图；(d) 斑岩样品盐度直方图

Fig. 3 Histograms of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions: (a) Histograms of homogenization temperature of skarn-type sample; (b) Histograms of homogenization temperature of porphyry-type sample; (c) Histograms of salinity of skarn-type sample; (d) Histograms of salinity of porphyry-type sample

度 41.9%。斑岩型矿化样品中的包裹体盐度整体呈一个连续的降低趋势，表现出其成矿流体的演化过程。矽卡岩样品中 I a 型包裹体的冰点温度介于-0.4~

-8.9℃之间，根据经验公式换算成对应的盐度介于 0.7%~12.7%之间，平均盐度 5.7%；矽卡岩样品中未见 I b 型和 II 型包裹体。

表 3 卡尔却卡铜多金属矿床流体包裹体显微测温结果统计表

Table 3 Microthermometric data of fluid inclusions in Kaerqueka copper polymetallic deposit

样号	包裹体类型	气液比/%	冰点温度/℃	子矿物熔化温度/℃	气液均一温度/℃	盐度(NaCl equiv)/%
RA-2	I a	20-55	-3.7 - -11.5(7)		297->500(8)	5.9-15.5(7)
	II a	20-35		177-305(7)	307-366(7)	30.8-38.6(7)
	II b	20		329-418(3)	277-320(3)	40.3-49.5(3)
RA-6	I a	20-40	-13 - -20.8(2)		274-333(2)	16.9-22.9(2)
	II a	18-33		296-323(3)	338-377(3)	37.9-40.0(3)
	II b	20-25		321-365(3)	304-351(3)	39.9-43.8(3)
RA-7	I a	15-40			371(1)	
	II a	25		294-316(2)	395-420(2)	37.7-39.4(2)
	II b	20-30		360-403(2)	320-374(3)	43.4-47.8(2)
RZ-1	I a	12-45	-16.5 - -20.8(3)		371-495(3)	19.8-22.9(2)
	II b	15-20		335-346(2)	283-321(2)	41.1-42.0(2)
RZ-2	I a	5-45			479(1)	
	I b	50			340(1)	
	II a	25-28		285-325(4)	310-418(4)	37.0-40.2(4)
	II b	15-30		338-410(3)	300-346(3)	41.3-48.6(3)
RZ-3	I a	8-55	-4.7 - -19.8(4)		331->500(4)	7.4-22.2(4)
	II a	25		458(1)	>500(1)	54.3(1)
RZ-5	I a	20-55	-3.8 -16.0(7)		331-439(8)	6.08-19.4(7)
	II a	25		357(1)	371(1)	43.1(1)
	II b	25		392(1)	393(1)	46.6(1)
RZ-6	I a	12-50	-12 - -13.4(2)		443(1)	16.0-17.3(1)
	I b	70				
	II a	20-45		288-495(2)	293 (1)	37.3-59.1(2)
	II b	10-15		320-420(4)	216-333(4)	39.8-49.7(4)
RM-3	I a	12-38	-2.5 - -6.1(7)		147-322(8)	4.2-9.3(7)
RM-5	I a	10-45	-1.3 - -6.1(15)		174-239(14)	2.2-9.3(15)
RM-11	I a	8-30	-2.2 - -6.3(9)		137-229(9)	3.7-9.6(9)
RM-14	I a	11-35	-0.4 - -2.8(4)		195-260(5)	0.7-4.7(4)
RM-15	I a	10-37	-1.8 - -8.9(14)		167-242(14)	3.1-12.7(14)

注: 括号中的数字为样品个数。

4 讨论

4.1 成矿温度

4.1.1 斑岩型矿化

斑岩型矿化作用的包裹体类型主要为 I a、II a 和 II b 型为主, 与 I b 型包裹体共存(见图 2(f))。这种特征表明包裹体为不均一捕获, 是流体沸腾的表现^[10]。

由盐度—均一温度关系图(见图 4)可以看出, II b 型包裹体所带代表的流体沿着 NaCl 饱和曲线分布, 代表饱和成矿流体降温的过程。当流体演化至较低温时(见图 4 所示区域), 捕获的包裹体的均一温度弥散, 反映流体沸腾。由图 4 和实验所测数据可知, 沸腾温度约在 290~320 ℃左右。由 II b 型包裹体测得数据可知最高的子矿物熔化温度为 495 ℃, 该温度值反映早期流体捕获时的最高温度的下限值。可见, 斑岩型矿化的成矿温度范围较宽, 从接近 500 ℃开始, 一直演化到

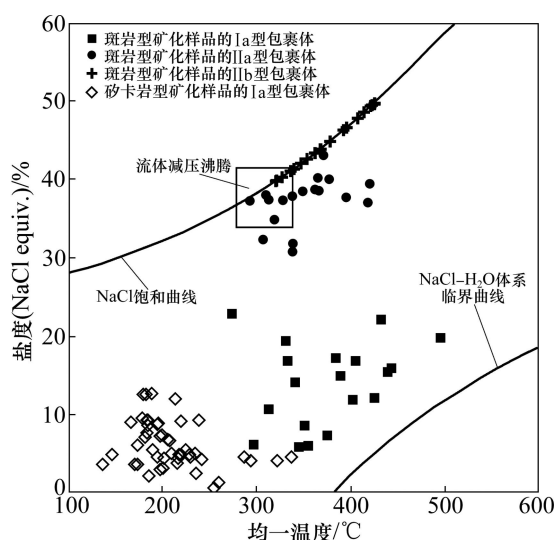


图4 卡尔却卡铜多金属矿包裹体盐度—均一温度关系图

Fig. 4 Relationship of homogenized temperatures—salinities of fluid inclusions from Kaerqueka copper polymetallic deposit

290~320 °C时发生沸腾作用。该温度反映包裹体的主矿物石英的形成温度,而硫化物的形成温度略低于石英,与世界上大多数斑岩铜矿硫化物沉淀的温度(250~350 °C)^[11]是一致的。

4.1.2 矽卡岩型矿化

矽卡岩矿石中的包裹体则较为简单,只见I a型包裹体,均一温度集中于170~260 °C之间,平均为217 °C。在矽卡岩矿物中未见有沸腾或者不均一捕获现象,故应对所测数据进行校正。考虑到该区的矿化都与印支期侵入的花岗闪长岩密切相关,为同一期岩浆活动的产物,成矿深度应大致相近,因此,可用斑岩型矿化样品算出的压力对矽卡岩型矿化的成矿温度进行校正。校正后的成矿温度约比实际所测温度高5~6 °C。

矽卡岩型矿石中的包裹体主要赋存于方解石、萤石和石英中,为矽卡岩型矿床中的氧化物阶段,细分可划分至石英—硫化物期,为较晚期的阶段,主要是在中—低温条件下形成的,与实测的温度较为接近。

4.2 成矿流体成分和盐度

斑岩型样品主矿物石英中的包裹体以富液相水溶液包裹体(I型)和含子矿物的三相包裹体(II型)为主。群体包裹体成分分析表明成矿流体阳离子以 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主,经实验测得研究区包裹体冰的初熔温度多数在-21~-39 °C之间,少部分在-50 °C左右,说明水溶液中电解质以NaCl为主,并混有 K^+ 、 Ca^{2+} 或者更为复杂的水盐体系,这与群体包裹体成分分析的结果吻合。

斑岩样品中I型包裹体盐度介于5.9%~22.9%之间,平均盐度14.6%;II型包裹体盐度介于30.8%~59.1%之间,平均盐度41.9%;矽卡岩样品中I a型包裹体盐度介于0.7%~12.7%之间,平均盐度5.7%;矽卡岩样品中未见I b型和II型包裹体。由此可见,斑岩型矿化的流体盐度整体高于矽卡岩型矿化的流体盐度,这可能是由于矽卡岩型矿化混入了围岩中地下水的缘故。

4.3 成矿压力和成矿深度

根据所测出的冰点温度、子矿物熔化温度和均一温度,用BROWN^[9]的FLINCOR软件估算了各类型包裹体的均一压力。岩体中的I a型包裹体均一压力估算值介于5.4~61.8 MPa之间,平均24.6 MPa;II a型包裹体均一压力估算值介于7.4~32.9 MPa之间,平均16.8 MPa;II b型包裹体均一压力估算值波动较大,介于36.8~371.7 MPa之间,平均142.2 MPa;矿石中的I a型包裹体均一压力估算值介于0.5~13.5 MPa之间,平均2.2 MPa。

II a型包裹体的气液均一温度较低,而子矿物熔化温度高,完全均一温度应该是子矿物的熔化温度。按照气液均一温度和完全均一温度估算的均一压力介于36.8~371.7 MPa之间,无法用静岩压力或静水压力来解释,代表超高压的环境。但随着温度降低至290~320 °C时,流体发生沸腾,说明流体压力突然降低,可能反映围岩发生碎裂降压过程。根据流体发生沸腾时的温度和对应的盐度,可计算得流体压力在7.0~10.8 MPa之间。考虑到碎裂构造与沸腾流体代表的环境开放性,按照静水压力计算的成矿深度约为0.7~1.1 km。

4.4 成矿作用分析

一般研究均认为,高温、高盐度流体包裹体均有很强的携带成矿金属元素能力,Cu、Fe、Pb、Zn、Au含量可以达到十分之几到千分之几^[12]。卡尔却卡A区的斑岩型铜矿的成矿流体以高温、高盐度流体为主,其他来源流体所占比例较少,主矿体主要产于斑岩体内部及仅靠近斑岩体周围蚀变岩中,显示成矿物质应主要来自于岩浆。对斑岩铜矿中铜赋存状态的研究表明,铜在流体中主要以氯化物 $CuCl_{(aq)}$ 或 $CuCl$ 的形式存在,且Cu的溶解度与氯离子成正比关系。成矿物质随着流体进行迁移,随着岩浆的分异结晶、外来流体的不断混入,成矿流体的温度、盐度和压力条件都不断发生变化。随着温度下降,压力减小,pH值升高和盐度降低等条件都有利于黄铜矿的沉淀^[13-14]。

卡尔却卡矿区的斑岩型矿化岩体的石英中 IIa 型流体表明捕获的为 NaCl 不饱和均匀流体,而 IIb 型包裹体则是捕获的饱和或过饱和的 NaCl 流体^[1]。岩体中的 I 型包裹体则反映的是均一温度与 II 型相当甚至稍高,密度较低,中低盐度的流体。IIb 型包裹体代表的流体均一压力最高达近 371.7 MPa,表明其捕获时可能处于一种超高压环境,其后经历一个较大幅度的降压过程,且温度也不断下降。IIa 型包裹体相对于 IIb 型包裹体的压力有一个突降的过程,而流体的温度和盐度演化为一个连续的过程。据此可推断,成矿流体源于岩浆,由于流体与熔体分离,造成整个体系的体积增大,此时的流体处于一种超高压的环境。随后由于围岩的破碎,造成流体的减压沸腾。该过程伴随着外来流体的混入,造成流体温度和盐度逐步降低。矽卡岩型矿石中包裹体的主矿物为方解石、萤石和石英,代表矽卡岩型矿床较晚期的石英硫化物阶段和碳酸盐阶段。该类包裹体的特点是密度较低、中低盐度,均一温度集中于 170~260 °C 之间,反映晚期成矿流体是岩浆热液与大比例的地下水的混合物^[15]。

综上所述,卡尔却卡矿区花岗闪长岩岩浆期后热液成矿作用经历了较长的演化阶段,在岩体中形成斑岩型矿化,在与滩间山群碳酸盐岩接触带附近形成矽卡岩型矿化,构成矽卡岩-斑岩复合型矿床。成矿流体的演化从高温(近 500 °C)、高盐度(近 60%)开始,具有超高压的特征。由于围岩碎裂降压,引起了流体的沸腾,并引起外来流体的混合,改变了成矿流体的成份和物理化学性质,温度降至中温,盐度降为 10% 以下,有利于成矿物质的沉淀富集。

5 结论

1) 卡尔却卡矿区花岗闪长岩岩体及矿体的石英中可见富液相水溶液包裹体(I a 型)、富气相水溶液包裹体(I b 型)、含子矿物水溶液包裹体(II 型)。岩体中的矿物流体包裹体特征反映不均一捕获特征,代表流体的沸腾作用。

2) 包裹体显微测温表明,岩体中 I a 型包裹体的均一温度范围在 274~495 °C 之间,盐度介于 5.9%~22.9% 之间;II 型包裹体的均一温度范围在 216~420 °C 之间,平均值为 340 °C;盐度为 30.8%~59.1% 之间。矽卡岩型矿石中只见 I a 型包裹体,均一温度范围在 137~322 °C 之间,盐度介于 0.7%~12.7% 之间。估算成矿压力在 7.0~10.8 MPa 之间,对应成矿深度约为 0.7~1.1 km,为浅成环境。

3) 矿区成矿流体来源于富含 Na⁺ 及成矿物质的高温(达 500 °C)、高盐度(达 60%)的岩浆流体,在岩体中形成斑岩型矿化,在与滩间山群碳酸盐岩接触带附近形成矽卡岩型矿化,构成矽卡岩-斑岩复合型矿床。

4) 岩浆期后热液成矿作用经历了较长的演化阶段。高温高盐度流体具有超高压的特征,造成围岩碎裂减压,引起了流体的沸腾和外来流体的混合,改变了成矿流体的成分和物理化学性质,有利于成矿物质的沉淀富集。

致谢:

野外工作得到青海省第三地质矿产勘查院和胜华矿业有限公司的大力支持和帮助;论文撰写期间,曹勇华和宋泽友等提供了有益的讨论,在此一并致谢。

REFERENCES

- [1] 卢焕章,范宏瑞,倪培,欧光习,沈昆,张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-492.
LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Guang-xi, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. Fluid inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-497.
- [2] 池国祥,赖健清. 流体包裹体在矿床研究中的作用[J]. 矿床地质, 2009, 28(6): 850-855.
CHI Guo-xiang, LAI Jian-qing. Roles of fluid inclusions in study of mineral deposits [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(6): 850-866.
- [3] 李世金,孙丰月,王力,李玉春,刘振宏,苏生顺,王松. 青海东昆仑卡尔却卡多金属矿区斑岩型铜矿的流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 399-406.
LI Shi-jin, SUN Feng-yue, WANG Li, LI Yu-chun, LIU Zhen-hong, SU Sheng-shun, WANG Song. Fluid inclusion studies of porphyry copper mineralization in Kaerqueka polymetallic ore district, East Kunlun Mountains, Qinghai Province [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(3): 399-406.
- [4] 王松,丰成友,柏红喜,江军华. 青海祁漫塔格地区卡尔却卡矽卡岩型铜多金属矿床矿物组合特征及成因[J]. 矿物学报, 2009(S1): 483-484.
WANG Song, FENG Cheng-you, BAI Hong-xi, JIANG Jun-hua. Mineral assemblage characteristics and genesis of Kaerqueka skarn copper deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009(S1): 483-484.
- [5] 王松,丰成友,李世金,江军华,李东生,苏生顺. 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): 74-83.
WANG Song, FENG Cheng-you, LI Shi-jin, JIANG Jun-hua, LI Dong-sheng, SU Sheng-shun. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications [J].

- Geology in China, 2009, 36(3): 74–83.
- [6] 陈国达. 地洼学说—活化构造及成矿理论体系概论[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996: 340–387.
- CHEN Guo-da. Diwa theory—Outline on activated tectonics and metallogenic theoretic system [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996: 340–387.
- [7] 李东生, 张占玉, 苏生顺, 郭世珍, 张海兰, 奎明娟. 青海卡儿却卡铜钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 239–244.
- LI Dong-sheng, ZHANG Zhan-yu, SU Sheng-shun, GUO Shi-zhen, ZHANG Hai-lan, KUI Ming-juan. Geological Characteristics and genesis of Kaerqueka copper molybdenum deposit in Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 239–244.
- [8] 何书跃, 祁兰英, 舒树兰, 尹和珍, 何寿福, 景向阳. 青海祁漫塔格地区斑岩铜矿的成矿条件和远景[J]. 地质与勘探, 2008, 44(2): 14–15.
- HE Shu-yue, QI Lan-ying, SHU Shu-lan, YIN He-zhen, HE Shou-fu, JING Xiang-yang. Metallogenic environment and potential in the Qimantage porphyry copper deposit, Qinghai [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(2): 14–15.
- [9] BROWN P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data [J]. American Mineralogist, 1989, 74: 1390–1393.
- [10] 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 西藏冈底斯三处斑岩铜矿床流体包裹体及成矿作用研究[J]. 矿床地质, 2005, 24(4): 398–408.
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, LI Zhen-qing. Fluid inclusions and ore-forming processes of three porphyry copper deposits in Gangdese belt, Tibet [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(4): 398–408.
- [11] 曹勇华, 赖健清, 康亚龙, 范俊昌. 青海德合龙洼铜(金)矿流体包裹体特征及成矿作用分析 [J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 147–158.
- CAO Yong-hua, LAI Jian-qing, KANG Ya-long, FAN Jun-chang. Characteristics of fluid inclusions and mineralization of Dehelongwa copper(gold) deposit, Qinghai Province [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 147–158.
- [12] 余宏全, 李进文, 丰成友, 马东方, 潘桂堂, 李光明. 西藏多不杂斑岩铜矿床高温高盐度流体包裹体及其成因意义[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1434–1447.
- SHE Hong-quan, LI Jin-wen, FENG Cheng-you, MA Dong-fang, PAN Gui-tang, LI Guang-ming. The high-temperature and hypersaline fluid inclusions and its implications to the metallogenesis in Duobuza porphyry copper Deposit, Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9): 1434–1447.
- [13] CANDELA P A, HOLLAND H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry-type ore deposits [J]. Econ Geol, 1986, 81(1): 1–19.
- [14] 王守旭, 张兴春, 秦朝建, 石少华, 冷成彪, 陈衍景. 滇西北中甸普朗斑岩铜矿流体包裹体初步研究[J]. 地球化学, 2007, 36(5): 467–478.
- WANG Shou-xu, ZHANG Xing-chun, QIN Chao-jian, SHI Shao-hua, LENG Cheng-biao, CHEN Yan-jing. Fluid inclusions in quartz veins of Pulang porphyry copper deposit, Zhongdian, Northwestern Yunnan, China [J]. Geochimica, 2007, 36(5): 467–478.
- [15] LAI J, CHI G, PENG S, SHAO Y, YANG B. Fluid evolution in the formation of the Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, Anhui, China [J]. Economic Geology, 2007, 102: 949–970.

(编辑 何学锋)