

西藏雄村斑岩型铜(金)矿床 I、II号矿体热液黑云母特征及地质意义

肖鸿天, 谢富伟, 郎兴海, 冉凤琴

(成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 雄村铜(金)矿区位于西藏冈底斯成矿带中段南缘,由 I、II、III号矿体和多个矿化体组成。本文以 I、II号矿体钾硅酸盐化蚀变带内的热液黑云母为研究对象,采用光薄片镜下鉴定、电子探针等分析方法,系统研究了热液黑云母的产状和成分特征。结果显示,雄村矿区 I号矿体黑云母类型主要为金云母和镁质黑云母;II号矿体黑云母类型为镁质黑云母。两个矿体黑云母都具有低 Ti($\text{TiO}_2 < 3\%$)、高 Al($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$)的特点,且具有较高的 MgO 含量, $\text{Mg}/\text{Fe} > 0.5$, $\text{K}/\text{Na} > 10$, 显示了与矿化良好的相关性。I号矿体热液黑云母平均结晶温度 470°C , 氧逸度位于镍-氧化镍缓冲剂与磁铁矿-钛铁矿缓冲剂之间(NNO—HM); II号矿体热液黑云母平均结晶温度 234°C , 氧逸度位于镍-氧化镍缓冲剂与铁橄榄石-石英-磁铁矿缓冲剂之间(NNO—FQM), 说明 I号矿体形成于较高温、高氧逸度的热液系统, II号矿体形成于相对较低温、低氧逸度的热液系统。此外, I号矿体热液黑云母IV(F)值介于 $0.61 \sim 2.72$ 之间, 平均值 1.26 , IV(Cl)值介于 $-5.49 \sim -4.53$ 之间, 平均值 -5.03 , IV(F/Cl)值介于 $5.63 \sim 7.89$ 之间, 平均值 6.29 ; II号矿体热液黑云母IV(F)值介于 $1.83 \sim 3.32$ 之间, 平均值 2.66 , IV(Cl)值介于 $-5.64 \sim -4.89$ 之间, 平均值 -5.31 , IV(F/Cl)值介于 $7.14 \sim 8.68$ 之间, 平均值 7.97 , 说明 I、II号矿体都形成于富 Cl 的热液系统, 且 II号矿体热液较 I号矿体更富 Cl, 贫 F。富 Cl 流体易萃取流体中的 Cu 和 Au 等金属元素并以 Cl 的络合物形式运移, 在沿构造裂隙向上运移的过程中, 物理化学条件发生改变, 使得流体中金属元素络合物溶解度降低, 促使硫化物沉淀成矿。

关键词: 热液黑云母; 雄村铜(金)矿床; 结晶温度; 氧逸度; 冈底斯成矿带

中图分类号: P578.959; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)04-0469-12

Hydrothermal biotite characteristics and geological significance of No. I and No. II orebodies of the Xiongcu porphyry copper (gold) deposit in Tibet

XIAO Hong-tian, XIE Fu-wei, LANG Xing-hai and RAN Feng-qin

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Xiongcu copper (gold) ore district in Tibet is located on the southern margin of the middle Gangdise metallogenic belt, mainly composed of No. I, No. II, and No. III orebodies and several mineralized bodies. In this paper, the modes of occurrence and composition of hydrothermal biotite in the potassium silicate alteration zone of No. I and No. II orebodies were systematically studied by means of microscopic identification and electron microprobe analysis. Biotite of No. I orebody in the Xiongcu ore district is mainly phlogopite and magnesium biotite while biotite of No. II orebody is mainly magnesium biotite. Biotite of both orebodies is characterized by low Ti ($\text{TiO}_2 < 3\%$) and high Al ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$), with high MgO content, Mg/Fe value > 0.5 , and K/Na value greater than 10, which shows a good correlation with mineralization. The average crystallization temperature of hydrothermal

收稿日期: 2019-10-20; 接受日期: 2020-05-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0604105); 国家自然科学基金项目(41772075, 41502079)

作者简介: 肖鸿天(1995-), 男, 硕士研究生, 从事岩石学、矿物学和矿床学研究, E-mail: danielxiaohongtian@126.com; 通讯作者: 谢富伟(1990-), 男, 讲师, 从事矿床学研究, E-mail: xiefuwei@hotmail.com。

biotite in No. I orebody is 470°C, and the oxygen fugacity is between NNO and HM. The average crystallization temperature of hydrothermal biotite of No. II orebody is 234°C, and the oxygen fugacity is between NNO and FQM, indicating that No. I orebody was formed in a hydrothermal system with high temperature and oxygen fugacity, while No. II orebody was formed in a hydrothermal system with relatively low temperature and oxygen fugacity. The IV (F) value of hydrothermal biotite in No. I orebody ranges from 0.61 to 2.72, with an average value of 1.26. The IV (Cl) value is from -5.49 to -4.53, with an average value of -5.03. The IV (F/Cl) value is from 5.63 to 7.89, with an average value of 6.29. The IV (F) value of hydrothermal biotite in No. II orebody ranges from 1.83 and 3.32, with an average value of 2.66. The IV (Cl) value is from -5.64 to -4.89, with an average value of -5.31. The IV (F/Cl) value is between 7.14 and 8.68, with an average value of 7.97. These data indicate that No. I and No. II orebodies were formed in the Cl-rich hydrothermal system, and that the hydrothermal solution of No. II orebody was richer in Cl and poorer in F than that of No. I orebody. Metallic elements such as Cu and Au were easily extracted and moved in the form of metal complex by Cl-rich fluid. In the process of fluid migration, changing physicochemical conditions would reduce the solubility of metal complex and led to sulfide precipitation.

Key words: hydrothermal biotite; Xiongcu copper (gold) deposit; crystallization temperature; oxygen fugacity; Gangdise metallogenic belt

Fund support: State Key Research and Development Project(2018YFC0604105); National Natural Science Foundation of China(41772075, 41502079)

作为斑岩型矿床钾硅酸盐化中最重要的一种蚀变矿物,黑云母的结构和化学成分对于岩浆或者岩浆热液的物理化学环境极其敏感(Jacobs and Parry, 1979),因此黑云母的化学成分能够有效地揭示与其形成有关的岩浆-热液系统的成分和物理、化学条件。前人对于黑云母已做了大量的研究工作。Robert(1976)和Patino(1993)认为温度和氧逸度是黑云母中钛含量的控制因素;Wones和Eugster(1965)提出黑云母中 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 的含量能有效指示岩浆热液的氧逸度;黑云母对于制约岩浆热液系统中金属元素络合物的形成以及矿床矿化类型等起着重要的作用(Ayati *et al.*, 2008; Bath *et al.*, 2013)。斑岩型矿床中钾硅酸盐蚀变带内早期成矿流体的温度、氧逸度等物理化学条件,对于斑岩型矿床成矿元素的萃取、运移和沉淀有着重要的研究意义(Beane, 1974; Parsapoor *et al.*, 2015)。

青藏高原经历了特提斯洋的俯冲消亡、拉萨地体与羌塘地体的碰撞、亚欧大陆与印度大陆的碰撞及碰撞后伸展等一系列地质历史事件。其中,冈底斯成矿带发育大量的斑岩-矽卡岩型矿床,使得该成矿带成为西藏重要的成矿带之一(侯增谦等, 2003; 唐菊兴等, 2012)。位于日喀则市谢通门县的雄村铜(金)矿床,是冈底斯成矿带南缘重要的斑岩型铜(金)矿床,曾引起广泛关注,前人围绕它已开展了大

量研究工作(曲晓明等, 2001; 徐文艺等, 2005; 郎兴海, 2012; 郎兴海等, 2012a; 唐菊兴等, 2014)。目前,在雄村矿区内已发现 I、II、III号斑岩型铜(金)矿体以及多个矿化体,仅勘查评价的 I、II号矿体铜金属资源量达到 238 万吨,伴生金金属资源量超过 219 吨,伴生银金属资源量超过 1 094 吨(郎兴海, 2012; 郎兴海等, 2012a)。前人对于雄村矿区的研究主要集中于成矿地质背景(黄勇等, 2011; 郎兴海, 2012; 郎兴海等, 2010, 2012a)、矿床地质特征(郎兴海等, 2010; 黄勇等, 2012)、成矿物质来源和流体演化(唐菊兴等, 2009, 2010; 郎兴海, 2012; 周云等, 2017),仅有部分学者对矿区黑云母进行了 Ar-Ar 同位素年龄分析(邹银桥等, 2015)。本文通过对雄村矿区 I、II号矿体热液黑云母详细的显微镜下观察和电子探针测试,对热液黑云母的化学特征、物理化学环境进行了研究,探讨了热液黑云母对于雄村斑岩型铜(金)矿床热液流体演化及矿化的指示意义。

1 矿床地质特征

雄村矿区位于雅鲁藏布江缝合带北侧、冈底斯成矿带中段南缘,南侧紧邻日喀则弧前盆地(唐菊兴等, 2012)^①。雄村矿区出露地层主要为下侏罗统雄

① 唐菊兴,李志军,郎兴海,等. 2012. 西藏自治区谢通门县雄村矿区铜矿勘探报告. 西藏:天圆矿业资源开发有限公司.

村组(J_1x) (图 1), 岩性主要为凝灰岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、泥质板岩和少量的灰岩。矿区内岩浆岩主要形成于侏罗纪和古近纪。侏罗纪侵入岩为早中侏罗世角闪石英闪长玢岩、中晚侏罗世含粗粒石英斑晶的角闪石英闪长斑岩、晚侏罗世石英闪长斑岩和侏罗纪辉绿岩脉。古近纪侵入岩主要为始新世石英闪长岩和始新世黑云母花岗闪长岩(郎兴海等, 2010; 郎兴海, 2012; 谢富伟等, 2015)。矿区内断裂构造发育, 主要以脆-韧性断裂带及其相关的裂隙带为主, 呈 NW、NWW 和 NE 向展布(郎兴海等, 2012a, 2012b)。雄村 I 号矿体主要产于石英闪长斑岩及接触带的雄村组安山质凝灰岩中, 剖面上呈筒状、层状和似层状, 矿石以脉状、浸染状和细脉浸染状产出, 主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿, 次要金属矿物为辉铜矿、闪锌矿、方铅矿、辉钼

矿、毒砂、辉砷铜矿和蓝辉铜矿等, 主要非金属矿物有石英、红柱石和绢云母, 次要非金属矿物有长石、黑云母、绿泥石、绿帘石、粘土矿物等(郎兴海等, 2010, 2014; 谢富伟等, 2014)。II 号矿体主要发育在角闪石英闪长斑岩和接触带的雄村组安山质凝灰岩中, 矿体受含矿斑岩及围岩接触带控制, 剖面上呈似层状、厚板状(丁枫等, 2012), 矿石以细脉浸染状产出为主, 主要金属矿物为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿等, 次要金属矿物有磁黄铁矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝、斑铜矿、赤铁矿、钛铁矿等, 主要非金属矿物为石英、长石、黑云母, 次要非金属矿物有红柱石、白云母、绢云母、绿泥石、绿帘石等(谢富伟等, 2015)。雄村 I 号矿体主要发育钾硅酸盐化、绢英岩化和青磐岩化, II 号矿体主要发育钾硅酸盐化、钠化-钙化、黄铁绢英岩化和青磐岩化。

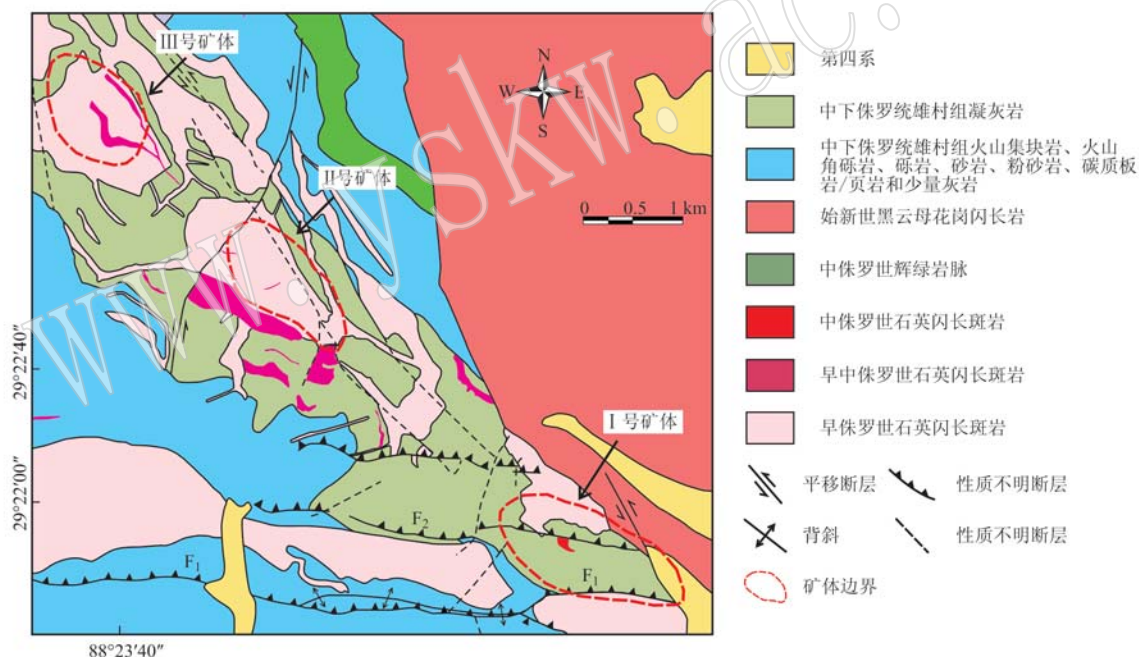


图 1 雄村矿区地质简图(Lang *et al.*, 2019)

Fig. 1 Geological map of the Xiongcu deposit (after Lang *et al.*, 2019)

2 样品采集、描述和分析

2.1 样品采集

本次研究的样品主要采自雄村矿区石英闪长斑岩(I号矿体: ZK5024、ZK5032、ZK6066, II号矿体 ZK7226), 其中 ZK5024 采样深度分别为 202 m 和 213 m, ZK5032 为 182 m, ZK6066 为 332 m, ZK7226 为 398 m。石英闪长斑岩呈斑状结构, 石英斑晶含量

为 5% ~ 15%, 具有强烈钾化蚀变。经系统的岩心编录, 选取样品磨制成标准的电子探针片, 利用莱卡 DM2500P 偏光显微镜进行镜下观察和照相。

I 号矿体内有多条脉体, 黑云母主要分布于石英硫化物脉、黑云母硫化物脉中, 形成于成矿早期或主成矿期, 脉体产状不规则, 多呈弯曲状, 黑云母主要产出状态为: ① 黑云母-红柱石-硫化物-石英组合, 呈团斑状或脉状产出, 自形程度较高, 多为自形-半自形粒状, 粒度为 0.5 ~ 1.5 mm, 部分被红柱石交

代; ② 石英-硫化物脉边部富集, 呈细粒片状; ③ 黑云母-白云母-硫化物组合, 黑云母和白云母与硫化物伴生产出, 与硫化物富集呈正相关关系(图 2a~2d)。

II号矿体仅发育在钻孔深部, 以磁铁矿-黑云母-硫化物脉形式产出, 形成于成矿早期或主成矿期, 脉体弯曲, 呈不规则不连续状, 黑云母主要呈片状、鳞片状与黄铁矿伴生, 或呈脉状与石膏等伴生(图

2e、2f)。

值得注意的是, I号矿体热液黑云母的自形程度较高, 这与 Jacobs 和 Parry(1979)所认为斑岩铜矿床原生黑云母多呈自形-半自形的斑晶或显微斑晶, 热液黑云母呈细粒鳞片状、脉状的结果不同, 这可能是因为 I号矿体的热液黑云母形成于钾硅酸盐化变带的早期, 结晶温度较高(Popp and Franitz, 1980)。

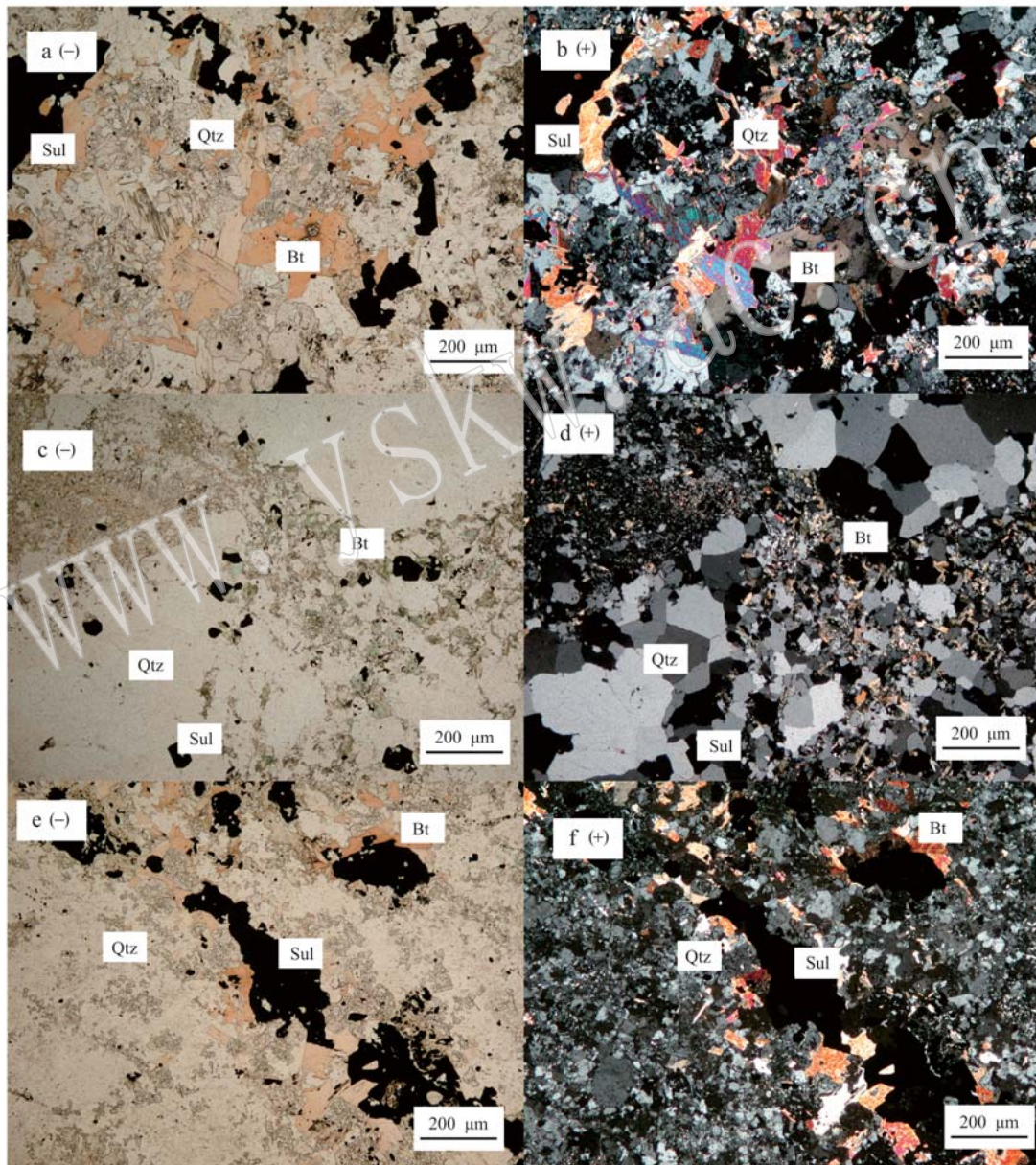


图2 雄村矿区热液黑云母

Fig. 2 Hydrothermal biotite in the Xiongcu deposit

a, b— I号矿体 ZK5024-213 半自形-自形片状热液黑云母; c, d— I号矿体 ZK6066-332 浅绿色热液黑云母; e, f— II号矿体 ZK7226-398 半自形-自形片状热液黑云母; Qtz— 石英; Bt— 黑云母; Sul— 金属硫化物

a, b— ZK5024-213 hypidiomorphic to idiomorphic hydrothermal biotite from No. I orebody; c, d— ZK6066-332 light greenish hydrothermal biotite from No. I orebody; e, f— ZK7226-398 hypidiomorphic to idiomorphic hydrothermal biotite from No. II orebody; Qtz— quartz; Bt— biotite; Sul— sulphide

2.2 样品分析测试

按照成因,黑云母又可分为岩浆黑云母和热液黑云母。岩浆黑云母形成于岩浆结晶过程中,热液黑云母形成于热液蚀变过程中,又可分为热液蚀变黑云母和热液新生黑云母。岩浆黑云母和热液黑云母在矿物学特征上存在较大的差异(Jacobs and Parry, 1979; 傅金宝, 1981; 唐攀, 2018)。I号矿体黑云母主要以脉状热液黑云母和团斑状热液黑云母为主,原生岩浆黑云母受热液蚀变作用,形成热液蚀变黑云母,主要呈交代残余、交代假像结构,热液新生黑云母主要为半自形-它形片状或极细的片状集合体,常与闪锌矿、黄铜矿、白云母等伴生产出。II号

矿体黑云母主要以热液交代黑云母和团斑状热液新生黑云母为主,镜下未见岩浆黑云母,热液交代黑云母主要交代角闪石和石英,呈角闪石假像,半自形-它形片状。选择两个矿体典型的热液黑云母在天津地质调查中心实验室进行了电子探针分析,仪器为日本岛津公司生产的EPMA-1600型电子探针分析仪,加速电压为15 kV,束流20 nA,束斑直径10 μm ,检出限为0.002%,所采用的标样为钠长石(Na)、透长石(Si, Al, K)、透辉石(Ca, Mg)、石榴石(Fe)、金红石(Ti)、氟磷灰石(P)和蔷薇辉石(Mn)。Fe³⁺和Fe²⁺采用林文蔚等(1994)等的计算方法进行调整。雄村矿区热液黑云母的电子探针数据列于表1、2。

表1 雄村I号矿体热液黑云母电子探针数据

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of hydrothermal biotite of No. I orebody in the Xiongcu deposit

| 样品 | 5024-202-2 | 5024-202-3 | 5024-202-5 | 5024-213-3 | 5024-213-4 | 5032-182-2 | 5032-182-3 | 6066-332-3 | 6066-332-4 |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| SiO ₂ | 39.47 | 40.87 | 39.79 | 40.72 | 41.44 | 40.42 | 38.98 | 40.90 | 36.30 |
| TiO ₂ | 0.56 | 0.69 | 0.69 | 0.63 | 0.63 | 0.55 | 0.80 | 0.68 | 0.63 |
| Al ₂ O ₃ | 15.16 | 15.47 | 16.45 | 15.88 | 14.99 | 16.10 | 17.09 | 14.30 | 17.87 |
| FeO ^T | 7.98 | 8.27 | 9.28 | 4.30 | 4.13 | 9.33 | 10.15 | 4.97 | 12.09 |
| MnO | 0.40 | 0.47 | 0.38 | 0.41 | 0.36 | 0.17 | 0.13 | 0.46 | 0.85 |
| MgO | 18.72 | 19.38 | 18.76 | 22.54 | 21.39 | 18.36 | 17.76 | 21.57 | 19.34 |
| CaO | 0.06 | 0.01 | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.16 | 0.18 |
| Na ₂ O | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.17 | 0.14 | 0.13 | 0.09 |
| K ₂ O | 9.40 | 8.65 | 8.91 | 9.72 | 9.72 | 9.37 | 8.52 | 9.16 | 3.13 |
| F | 2.61 | 2.99 | 2.48 | 3.37 | 3.33 | 2.55 | 2.10 | 8.87 | 1.86 |
| Cl | 0.08 | 0.07 | 0.08 | 0.03 | 0.03 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.03 |
| Si | 2.94 | 2.96 | 2.89 | 2.90 | 2.99 | 2.93 | 2.86 | 2.98 | 2.72 |
| Al ^{IV} | 1.06 | 1.04 | 1.11 | 1.10 | 1.01 | 1.07 | 1.14 | 1.02 | 1.29 |
| Al ^{VI} | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.24 | 0.27 | 0.31 | 0.34 | 0.21 | 0.29 |
| Ti | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| Fe ³⁺ | 0.18 | 0.25 | 0.21 | 0.15 | 0.21 | 0.21 | 0.23 | 0.20 | 0.38 |
| Fe ²⁺ | 0.31 | 0.25 | 0.36 | 0.10 | 0.04 | 0.36 | 0.39 | 0.11 | 0.37 |
| Mn | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.05 |
| Mg | 2.08 | 2.09 | 2.03 | 2.40 | 2.30 | 1.99 | 1.94 | 2.34 | 2.16 |
| Ca | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 |
| Na | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| K | 0.89 | 0.80 | 0.83 | 0.88 | 0.90 | 0.87 | 0.80 | 0.85 | 0.30 |
| Total | 7.82 | 7.75 | 7.79 | 7.85 | 7.79 | 7.80 | 7.77 | 7.80 | 7.62 |
| OH ⁻ | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| MF | 0.80 | 0.80 | 0.78 | 0.90 | 0.90 | 0.78 | 0.76 | 0.88 | 0.73 |
| Al ^{VI} + Fe ³⁺ + Ti | 0.49 | 0.57 | 0.54 | 0.42 | 0.52 | 0.54 | 0.61 | 0.44 | 0.71 |
| Fe ²⁺ + Mn | 0.34 | 0.28 | 0.38 | 0.13 | 0.06 | 0.37 | 0.40 | 0.14 | 0.43 |
| Ti/(Mg + Fe + Ti + Mn) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Al/(Al + Mg + Fe + Ti + Mn + Si) | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.18 | 0.22 |
| IV(F) | 1.04 | 0.97 | 1.02 | 1.04 | 1.03 | 1.00 | 1.05 | 0.61 | 1.09 |
| IV(Cl) | -5.15 | -5.14 | -5.12 | -4.92 | -4.87 | -4.95 | -4.95 | -5.11 | -4.54 |
| IV(F/Cl) | 6.19 | 6.11 | 6.14 | 5.95 | 5.89 | 5.96 | 6.00 | 5.72 | 5.63 |

表2 雄村Ⅱ号矿床热液黑云母电子探针数据

 $w_B/\%$

Table 2 Electron microprobe analyses of hydrothermal biotite of No. II orebody in the Xionggun deposit

| 样品 | 7226-398-1 | 7226-398-2 | 7226-398-3 | 7223-324-1* | 7223-324-3* | 7223-416-1* | 7223-416-2* | 7223-449-1* | 7223-449-3* |
|--|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| SiO ₂ | 35.19 | 34.85 | 35.40 | 30.68 | 37.58 | 32.67 | 33.58 | 33.13 | 34.21 |
| TiO ₂ | 1.41 | 2.15 | 1.07 | 1.82 | 2.26 | 2.72 | 1.54 | 2.11 | 3.12 |
| Al ₂ O ₃ | 15.51 | 16.02 | 14.96 | 17.51 | 14.80 | 19.03 | 17.80 | 14.92 | 15.46 |
| FeO ^T | 17.23 | 17.06 | 16.69 | 18.43 | 17.48 | 16.47 | 16.29 | 18.73 | 18.73 |
| MnO | 0.12 | 0.16 | 0.12 | 0.21 | 0.15 | 0.20 | 0.28 | 0.34 | 0.29 |
| MgO | 12.76 | 12.00 | 13.41 | 12.37 | 14.66 | 10.75 | 12.82 | 13.43 | 12.89 |
| CaO | 0.01 | 0.23 | 0.12 | 0.25 | 0.88 | 0.04 | 0.01 | 0.06 | 0.07 |
| Na ₂ O | 0.03 | 0.05 | 0.09 | 0.05 | 0.10 | 0.08 | 0.01 | 0.03 | 0.05 |
| K ₂ O | 8.89 | 8.92 | 8.74 | 7.47 | 9.12 | 9.24 | 9.49 | 8.04 | 9.32 |
| F | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Cl | 0.27 | 0.25 | 0.29 | 0.24 | 0.60 | 0.24 | 0.37 | 0.51 | 0.45 |
| Si | 2.78 | 2.75 | 2.81 | 2.52 | 2.79 | 2.58 | 2.64 | 2.66 | 2.66 |
| Al ^{IV} | 1.22 | 1.25 | 1.19 | 1.49 | 1.21 | 1.42 | 1.36 | 1.34 | 1.34 |
| Al ^{VI} | 0.23 | 0.24 | 0.21 | 0.21 | 0.09 | 0.36 | 0.29 | 0.07 | 0.07 |
| Ti | 0.08 | 0.13 | 0.06 | 0.11 | 0.13 | 0.16 | 0.09 | 0.13 | 0.18 |
| Fe ³⁺ | 0.14 | 0.17 | 0.12 | 0.08 | 0.12 | 0.16 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| Fe ²⁺ | 1.00 | 0.96 | 0.99 | 1.19 | 0.96 | 0.93 | 0.99 | 1.18 | 1.14 |
| Mn | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Mg | 1.50 | 1.41 | 1.59 | 1.51 | 1.62 | 1.27 | 1.50 | 1.61 | 1.49 |
| Ca | 35.19 | 34.85 | 35.40 | 30.68 | 37.58 | 32.67 | 33.58 | 33.13 | 34.21 |
| Na | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| K | 0.90 | 0.90 | 0.89 | 0.78 | 0.86 | 0.93 | 0.95 | 0.82 | 0.92 |
| Total | 7.86 | 7.83 | 7.88 | 7.92 | 7.88 | 7.84 | 7.92 | 7.92 | 7.92 |
| OH ⁻ | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| MF | 0.57 | 0.55 | 0.59 | 0.54 | 0.60 | 0.54 | 0.58 | 0.56 | 0.55 |
| Al ^{VI} + Fe ³⁺ + Ti | 0.45 | 0.53 | 0.39 | 0.40 | 0.34 | 0.68 | 0.46 | 0.28 | 0.34 |
| Fe ²⁺ + Mn | 1.01 | 0.97 | 0.99 | 1.20 | 0.97 | 0.94 | 1.01 | 1.20 | 1.15 |
| Ti/(Mg + Fe + Ti + Mn) | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.03 | 0.04 | 0.06 |
| Al/(Al + Mg + Fe + Ti + Mn + Si) | 0.21 | 0.22 | 0.20 | 0.24 | 0.19 | 0.26 | 0.24 | 0.20 | 0.20 |
| IV(F) | | | 2.57 | | 2.97 | | | | |
| IV(Cl) | -5.23 | -5.18 | -5.31 | -5.14 | -5.64 | -5.13 | -5.40 | -5.50 | -5.43 |
| IV(F/Cl) | | | 7.88 | | 8.61 | | | | |

* 数据引自唐攀(2018)。

3 讨论

3.1 雄村热液黑云母化学组分特征研究

I号矿体黑云母的SiO₂含量为36.30%~41.44%，平均为39.88%；TiO₂含量为0.55%~0.80%，平均为0.65%；Al₂O₃含量为14.30%~17.87%，平均为15.92%；FeO^T含量为4.13%~12.09%，平均为7.83%；MgO含量为17.76%~22.54%，平均为19.76%；K₂O含量为3.13%~9.72%，平均为8.51%。II号矿体的SiO₂含量为30.68%~37.58%，平均为34.14%；TiO₂含量为1.07%~3.12%，平均为2.02%；Al₂O₃含量为

14.80%~19.03%，平均为16.22%；FeO^T含量为16.29%~18.73%，平均为17.46%；MgO含量为10.75%~14.66%，平均为12.79%；K₂O含量为7.47%~9.49%，平均为8.80%。两个矿体的热液黑云母具有低Ti(TiO₂<3%)、高Al(Al₂O₃>15%)、高K、低Na、贫Ca的特点，且具有较高的MgO含量，指示了较好的矿化(秦克章等, 2009)。在Mg²⁺-(Al^{VI}+Fe³⁺+Ti)-(Fe²⁺+Mn)图解中，雄村I号矿体的热液黑云母落入金云母区域，部分点位落入镁质黑云母区域中；II号矿体中的热液黑云母全部落入镁质黑云母区域(图3)。

黑云母的Mg/Fe、K/Na值是判定斑岩型矿床成矿与否的重要标志，与矿化有关的黑云母具有高

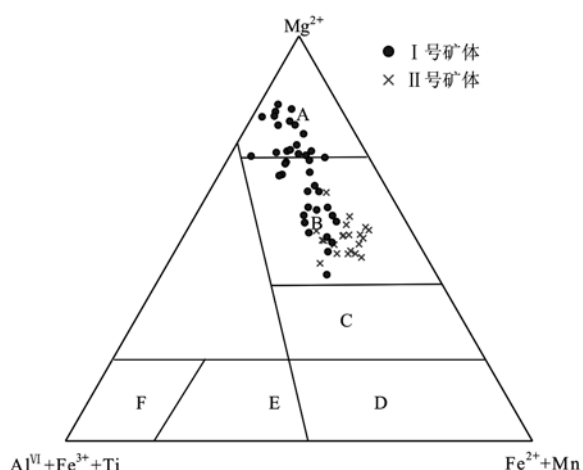


图3 $Mg^{2+}-(Al^{VI} + Fe^{3+} + Ti)-(Fe^{2+} + Mn)$ 分类图解
(据 Foster, 1960)

Fig. 3 $Mg^{2+}-(Al^{VI} + Fe^{3+} + Ti)-(Fe^{2+} + Mn)$
classification diagram (after Foster, 1960)

A—金云母；B—镁质黑云母；C—铁质黑云母；D—铁叶云母；
E—铁白云母；F—白云母

A—phlogopite; B—magnesiabiotite; C—iron biotite; D—ferriphyllite;
E—iron muscovite; F—muscovite

镁低铁、高钛低铝、高钾低钠的特点，其 Mg/Fe 值一般大于 0.5, K/Na 值一般大于 10; 热液黑云母相较于岩浆黑云母，具有低钛高镁的特点(傅金宝, 1981; 秦克章等, 2009; 王勇等, 2016; 唐攀等, 2017)。通过对国内外典型斑岩型矿床钾硅酸盐化蚀变有关的热液黑云母的化学成分 (Ayati *et al.*, 2008; Siahcheshm *et al.*, 2012; Afshooni *et al.*, 2013; 王勇等, 2016) 进行对比(表3), 发现雄村 I、II号矿体热液黑云母的 $Mg/Fe > 0.5$, $K/Na > 10$, 显示了其良好的成矿相关性。Al/Fe 和 Al_2O_3/TiO_2 值均较高, 且雄村 I、II号矿体具有低钛高铝的特点,

这可能与后期热液黑云母遭受蚀变形形成金红石等蚀变矿物有关(谢富伟等, 2015)。

3.2 热液黑云母对岩浆热液系统物理化学条件的指示

3.2.1 黑云母对岩浆热液系统温度的指示

Wones 和 Eugster (1965) 研究表明, 对于高温高压条件下的岩浆黑云母, 其成分可以估算出其结晶温度, 并提出了 $\log fO_2 - T$ 地质温度计, 但该地质温度计对于近大气压和 100 ~ 300°C 的硅酸盐-硫化物热液系统中形成的热液黑云母不适用。本文采用 Richard (1974) 和 Fuat (2003) 等提出的热液黑云母 $t - X_{Pbl}$ 地质温度计计算了热液黑云母的结晶温度, 发现雄村矿区 I、II号矿体的热液黑云母形成温度相差较大(图4): I号矿体的热液黑云母形成温度较高, 主要在 400 ~ 600°C 之间, 温度变化范围较大, 平均温度 470°C, 这与谢富伟等 (2015) 利用金红石 Ti 温度计的计算结果相同, 而 II号矿体的热液黑云母形成温度较低, 主要集中于 200 ~ 300°C 之间, 温度变化范围较小, 平均温度 234°C。上述结果表明 I号矿体形成于温度较高的热液系统, II号矿体形成于温度较低的热液系统。

3.2.2 黑云母对岩浆热液系统氧逸度的指示

作为斑岩型矿床热液蚀变的重要钾硅酸盐化矿物, 热液黑云母的化学成分在一定程度上能够反映热液系统氧逸度等物理化学环境。岩浆热液系统中 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值越大, Fe^{2+} 越少, Mg^{2+} 越容易进入镁铁质矿物的晶格中, 因此, 黑云母的 $X_{Mg} [Mg/(Mg + Fe)]$ 与氧逸度呈正相关, 通过 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量可以反映黑云母结晶时的氧逸度, 包括磁铁矿-钛铁矿缓冲剂(HM)、镍-氧化镍缓冲剂(NNO)和铁橄榄石-石英-磁铁矿缓冲剂(FQM)(Wones and Eugster,

表3 典型斑岩型矿床热液黑云母成分对比表

Table 3 Comparison of hydrothermal biotite compositions in typical porphyry deposits

| 矿床名称 | 国别 | 矿床规模 | 矿化类型 | 含矿斑岩 | 云母类型 | 元素含量比值 | | | | | 文献来源 |
|------------|----|------|----------|-----------|-----------|--------|-------|--------|-----------------|-------|----------------------|
| | | | | | | Mg/Fe | Al/Fe | K/Na | Al_2O_3/TiO_2 | Si/Al | |
| Dalli | 伊朗 | 大型 | Cu-Mo-Au | 英安玢岩 | 镁质黑云母 | 2.17 | 1.56 | 19.37 | 2.82 | 2.16 | Ayati 等(2008) |
| Kahang | 伊朗 | 大型 | Cu-Mo | 花岗闪长斑岩 | 镁质黑云母 | 2.20 | 1.42 | 18.85 | 2.92 | 5.01 | Afshooni 等(2013) |
| Maher Abad | 伊朗 | 大型 | Cu-Au | 花岗闪长岩 | 镁质黑云母 | 2.49 | 1.68 | 25.30 | 5.44 | 2.06 | Siahcheshm 等(2012) |
| Santa Rita | 美国 | 大型 | Cu | 黑云母花岗闪长斑岩 | 镁质黑云母 | 1.93 | 1.37 | 29.67 | 4.56 | 2.34 | Jacobs 和 Parry(1979) |
| 邦铺 | 中国 | 大型 | Cu-Mo | 闪长玢岩 | 镁质黑云母 | 2.13 | 1.38 | 82.52 | 10.29 | 2.44 | 王勇等(2016) |
| 多宝山 | 中国 | 大型 | Cu-Mo | 花岗闪长岩 | 镁质黑云母 | 0.52 | 0.70 | - | 7.50 | 2.08 | 王勇等(2016) |
| 雄村 I 号矿体 | 中国 | 大型 | Cu-Au | 角闪石英闪长斑岩 | 金云母-镁质黑云母 | 3.67 | 2.28 | 62.48 | 14.28 | 2.26 | 本文 |
| 雄村 II 号矿体 | 中国 | 大型 | Cu-Au | 角闪石英闪长斑岩 | 镁质黑云母 | 1.31 | 1.33 | 151.72 | 11.76 | 1.79 | 本文 |

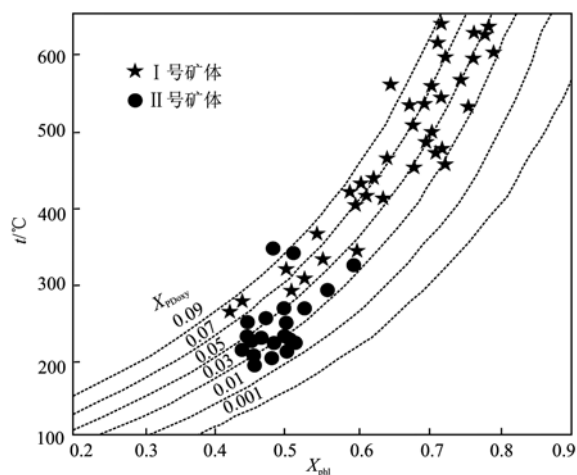


图4 $t-X_{\text{phl}}$ 图解(据 Fuat, 2003)

Fig. 4 Diagram of $t-X_{\text{phl}}$ (after Fuat, 2003)

1965; Albuquerque, 1973)。将雄村 I 号矿体和 II 号矿体的热液黑云母相应的化学组分投影至 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 三角图解(图 5)上, 可以发现 I 号矿体黑云母样品点多数位于 NNO(Ni-NiO)缓冲线和 HM 缓冲线之间; II 号矿体热液黑云母样品多数点位于 NNO(Ni-NiO)缓冲线和 FMQ($\text{Fe}_2\text{SiO}_4-\text{SiO}_2-\text{Fe}_3\text{O}_4$)缓冲线之间。另外, 黑云母中低含量(小于 0.245)的 Al^{VI} 也指示其形成的环境具有较高的氧逸度(Albuquerque, 1973)。通过计算, 雄村矿区 I 号矿体热液黑云母的 Al^{VI} 含量为 0.049 ~ 0.360, 平均 0.209, II 号矿体热液黑云母的 Al^{VI} 含量为 0.072 ~

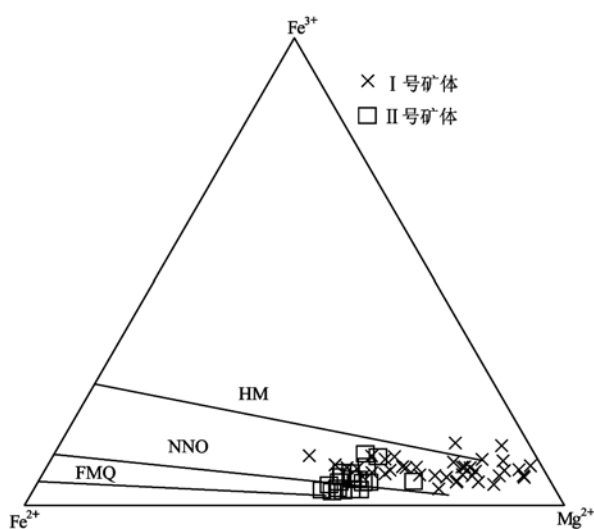


图5 $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 三角图解(据 Wones 和 Eugster, 1965)

Fig. 5 Triangular diagram of $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ (after Wones and Eugster, 1965)

0.360, 平均 0.215。上述结果表明雄村矿区 I、II 号矿体都形成于较高氧逸度的热液系统, I 号矿体热液系统氧逸度相对 II 号矿体热液系统氧逸度更高。

3.2.3 斑岩型矿床岩浆热液系统卤素化学特征

岩浆热液系统中卤素的化学特征, 对于完善斑岩型铜(钼、金)矿床的成矿理论具有重要的意义, 其中, 黑云母的 $\text{IV}(\text{F})$ 、 $\text{IV}(\text{Cl})$ 和 $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值指示了 F、Cl 在岩浆热液系统中的相对富集程度。 $\text{IV}(\text{F})$ 、 $\text{IV}(\text{Cl})$ 和 $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值通过黑云母的 X_{phl} 、 X_{sid} 、 X_{ann} 、 $\log(X_{\text{F}}/X_{\text{OH}})$ 和 $\log(X_{\text{Cl}}/X_{\text{OH}})$ 计算获得(Munoz, 1984), 其中, $X_{\text{phl}} = \text{Mg}/(\text{八面体阳离子总数})$; X_{sid} 为黑云母中的铁叶云母摩尔分数, $X_{\text{sid}} = [(3 - \text{Si}/\text{Al})/1.75](1 - X_{\text{Mg}})$; X_{ann} 为黑云母中的铁云母摩尔分数, $X_{\text{ann}} = 1 - X_{\text{Mg}} - X_{\text{sid}}$ (Fuat, 2003)。黑云母的 $\text{IV}(\text{F})$ 值越小表示岩浆热液系统中 F 富集程度越高; $\text{IV}(\text{Cl})$ 基本都为负值, 值越小, 表示系统中 Cl 富集程度越高; $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值越小, 系统中 F/Cl 值越大(Munoz, 1984; Fuat, 2003)。

计算得到的雄村矿区热液黑云母的 $\text{IV}(\text{F})$ 、 $\text{IV}(\text{Cl})$ 和 $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值见表 1、2。雄村矿床 I 号矿体热液黑云母 $\text{IV}(\text{F})$ 值介于 0.61 ~ 1.09 之间, 平均值 0.98; $\text{IV}(\text{Cl})$ 值介于 -5.15 ~ -4.54 之间, 平均值 -4.97; $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值介于 5.63 ~ 6.19 之间, 平均值 5.95, 说明 I 号矿体热液黑云母具有较低的 $\text{IV}(\text{F})$ 、 $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值和较高的 $\text{IV}(\text{Cl})$ 值, 且变化范围较为集中。雄村矿床 II 号矿体热液黑云母 $\text{IV}(\text{F})$ 值介于 2.57 ~ 2.97 之间, 平均值 2.77; $\text{IV}(\text{Cl})$ 值介于 -5.64 ~ -5.13 之间, 平均值 -5.33; $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值介于 7.88 ~ 8.61 之间, 平均值 8.25, 说明 II 号矿体热液黑云母具有较高的 $\text{IV}(\text{F})$ 、 $\text{IV}(\text{F/Cl})$ 值和较低的 $\text{IV}(\text{Cl})$ 值, 且变化范围较为分散。

已有学者认为雄村矿床为斑岩型矿化和浅成热液型矿化叠加成矿的产物, 结合该矿床成矿年代学(徐文艺等, 2006; 郎兴海等, 2010)和本文的黑云母矿物化学研究特征, 可以认为雄村矿床 I、II 号矿体都形成于富 Cl 的岩浆热液系统, 但分属于两套不同的岩浆热液系统, 且 II 号矿体热液较 I 号矿体热液更富 Cl, 贫 F。前人研究表明, 富 F 的岩浆热液成矿系统有利于形成钼矿化, 富 Cl 的岩浆热液成矿系统有利于形成铜、金矿化(Candela and Holland, 1984; Keppler and Wyllie, 1991; Bai and van Groos, 1999)。

3.3 热液流体特征对成矿的指示意义

斑岩型矿床岩浆热液演化过程中,在高氧逸度的条件下,成矿热液中的硫元素主要以 SO_2 、 SO_3 、 H_2SO_4 等氧化态形式出现,其溶解度大,不易饱和,使得 Cu、Au 等金属元素在残余相中富集,最终进入流体相富集成矿。因此普遍认为,与斑岩型矿床铜矿化相关的岩浆热液具有较高的氧逸度(NNO-HM 氧逸度缓冲剂之间)。雄村矿区 I 号矿体与 II 号矿体热液黑云母的化学特征都显示了成矿热液具有高氧逸度、富 Cl 的特征,似乎指示了两个矿体形成于相似的物理化学条件。然而,从矿物组合来看, I 号矿体不同于 II 号矿体广泛发育的磁铁矿、石膏等高氧逸度矿物, I 号矿体主要发育磁黄铁矿、黄铜矿等低氧逸度矿物(Xie *et al.*, 2018)。Takagi 和 Tsukimura (1997)认为,还原性斑岩型铜矿床中富含 CO_2 和 CH_4 的成矿流体对岩浆氧逸度起到缓冲的作用,阻止磁铁矿结晶并生成还原性矿物组合。雄村 I 号矿体矿石矿物中发育大量磁黄铁矿、黄铜矿等低氧逸度矿物,缺乏磁铁矿和石膏等高氧逸度矿物,周云等(2017)通过对雄村矿床流体包裹体的研究发现,雄村矿床的成矿流体富含 CO_2 、 CH_4 和 N_2 ,且成矿物质来源于岩浆。Lang 等(2019)发现,雄村矿床的成矿流体来源于与大气降水混合的岩浆源,并且与成矿相关的石英闪长斑岩侵入含碳围岩,通过热分解生成了大量甲烷(CH_4),使得斑岩铜体系的氧化还原状态从氧化态转为了还原态。因此笔者认为,雄村矿床 I 号矿体富含 CO_2 、 CH_4 和 N_2 的成矿流体,阻止了高氧逸度矿物的生成而生成还原性矿物组合。因此, I 号矿体与 II 号矿体的矿床成因的差异,并不是本身岩浆的差异,而是后期热液流体演化的过程中导致的氧逸度的变化从而形成了不同的矿物组合(Xie *et al.*, 2018; Lang *et al.*, 2019)。

研究发现, F、Cl 等元素以通过与金属元素形成金属络合物的形式在成矿流体中运移,富 Cl 流体易萃取熔体中的 Cu、Au 元素,以 CuCl^{2-} 和 AuCl^{2-} 形式在流体中运移(Candela and Holland, 1984)。Baker (2002)、Philips 和 Evans (2004)发现,流体中富含的 CO_2 对岩浆流体的出溶和演化过程有重要的影响。雄村矿床 I、II号矿体都形成于富 Cl 的岩浆热液系统,且流体中富含 CO_2 和 CH_4 等成分,成矿流体能大量萃取 Ag、Cu 等成矿元素,并以 CuCl^{2-} 和 AuCl^{2-} 等络合物形式在流体中运移。

温度降低、压力降低、pH 值升高、氧逸度变化是

造成成矿元素沉淀的重要因素(Henry and Guidotti, 2002; Yavuz, 2003)。由前文可知,雄村矿床 I 号矿体热液黑云母平均结晶温度 470°C , II 号矿体热液黑云母平均结晶温度 234°C ,这与周云等(2017)流体包裹体显微测温得到的数据相似,可以认为热液黑云母的结晶温度代表了成矿流体的温度,说明在岩浆热液演化过程中,流体温度迅速降低。雄村斑岩型矿床中,岩浆的侵位形成大量裂隙系统,富含成矿物质和大量挥发分的流体,在沿构造裂隙向上运移的过程中,温度和压力骤然降低,使得热液中金属元素络合物溶解度降低,释放出大量 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Au^{3+} ,而 S^{2-} 浓度增高,有利于硫化物沉淀成矿。

4 结论

(1) 雄村热液黑云母化学组分具有低钛高铝高镁、高钾低钠贫钙的特征,其中 I 号矿体的热液黑云母多为金云母,少数为镁质黑云母; II 号矿体的热液黑云母皆为镁质黑云母。

(2) I 号矿体热液黑云母自形程度较高,结晶温度较高(平均 470°C); II 号矿体热液黑云母自形程度较低,结晶温度较低(平均温度 234°C),表明雄村 I 号矿体形成于较高温度的热液系统, II 号矿体形成于相对较低温度的热液系统。

(3) I、II号矿体形成于较高氧逸度流体环境,且 I 号矿体流体氧逸度高于 II 号矿体流体氧逸度。I 号矿体发育的低氧逸度矿物组合(磁黄铁矿、黄铜矿)是由于热分解作用产生的甲烷改变了斑岩型铜体系的氧化还原态,从而生成大量还原性矿物组合。

(4) I、II号矿体都形成于富 Cl 的两套岩浆热液系统,但 II 号矿体热液系统较 I 号矿体热液系统更富 Cl、贫 F。

(5) 雄村矿区金属元素以 Cl 的络合物形式在流体中运移,沿构造裂隙向上运移过程中,物理化学条件发生改变,热液中络合物溶解度降低,促使硫化物沉淀成矿。

References

- Afshooni S Z, Mirnejad H, Esmaily D, *et al.* 2013. Mineral chemistry of hydrothermal biotite from the Kahang porphyry copper deposit (NE Isfahan), Central Province of Iran[J]. *Ore Geology Reviews*, 54 (32): 214 ~ 232.

- Albuquerque A C. 1973. Geochemistry of Biotites from Granitic Rocks, Northern Portugal[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(7): 1 779 ~1 802.
- Ayati F, Yavuz F, Noghreyan M, *et al.* 2008. Chemical Characteristics and Composition of Hydrothermal Biotite from the Dalli Porphyry Copper Prospect, Arak, Central Province of Iran [J]. *Mineralogy Petrology*, 94(1) : 107 ~122.
- Bai T B and van Groos A F K. 1999. The distribution of Na, K, Rb, Sr, Al, Ge, Cu, W, Mo, La, and Ce between granitic melts and coexisting aqueous fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 1 117 ~1 131.
- Baker T. 2002. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits[J]. *Econ. Geol.*, 97(5): 1 111 ~1 118.
- Bath A, Walshe J L, Cloutier J, *et al.* 2013. Biotite and apatite as tools for tracking pathways of oxidized fluids in the Archean East Repulse Gold Deposit, Australia[J]. *Economic Geology*, 108(4): 667 ~ 690.
- Beane R E. 1974. Biotite stability in the porphyry copper environment [J]. *Economic Geology*, 69(2) : 241 ~256.
- Bernard A, Symonds R B and Rose W I. 1990. Volatile transport and deposition of Mo, W and Re in high temperature magmatic fluids[J]. *Applied Geochemistry*, 5: 317 ~326.
- Candela P A and Holland H D. 1984. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 373 ~380.
- Ding Feng, Lang Xinghai, Hu Zhenghua, *et al.* 2012. Petrogeochemical characteristics and genesis of tuff from ore body I, xiongcu copper and gold mine, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 546 ~ 558 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *Geological Survey Professional Paper*, 354: 11 ~49.
- Fu Jinbao. 1981. Chemical composition characteristics of biotite in porphyry copper deposits[J]. *Geology and Exploration*, 9: 16 ~19 (in Chinese).
- Fuat Y. 2003. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: I -definitions and structure of the computer program MICA + [J]. *Computers & Geosciences*, 29: 1 203 ~1 213.
- Henry D J and Guidotti C V. 2002. Titanium in biotite from metapelitic rocks: Temperature effects, crystal-chemical controls, and petrologic applications[J]. *American Mineralogist*, 87(4): 375 ~382.
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Wang Shuxian, *et al.* 2003. Re-Os age of molybdenite deposits in the gangdise porphyry copper belt in the plateau of Tibet: Metallogenic time limit and dynamic background applications[J]. *Science in China (series D)*, 33(7): 509 ~ 618 (in Chinese).
- Huang Yong, Ding Jun, Tang Juxing, *et al.* 2012. Genetic mineralogical characteristics of andalusite in xiongcu porphyry copper-gold deposit, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 510 ~ 518 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yong, Tang Juxing, Lang Xinghai, *et al.* 2011. Geochemical characteristics of volcanic rocks in the II ore body of the Xiongcu copper and gold deposit: Constraints on petrogenesis and tectonic setting[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 361 ~373 (in Chinese with English abstract).
- Jacobs D C and Parry W T. 1979. Geochemistry of biotite in the Santa Rita porphyry copper deposit, New Mexico[J]. *Economic Geology*, 74(4): 860 ~887.
- Keppler H and Wyllie P J. 1991. Partitioning of Cu, Sn, Mo, W, U, and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite-H₂O-HCl and haplogranite-H₂O-HF[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 109: 139 ~150.
- Lang Xinghai. 2012. Mineralization and Metallogenic Prediction of Porphyry Copper-gold Deposits in Xiongcu, Tibet (Doctoral Dissertation) [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1 ~189 (in Chinese).
- Lang X H, Deng L Y, Wang X H, *et al.* 2019. Reduced fluids in porphyry copper-gold systems reflect the occurrence of the wall-rock thermogenic process: An example from the No. 1 deposit in the Xiongcu district, Tibet, China [J/OL]. *Ore Geology Reviews*, DOI: 10. 1016/j. oregeorev. 2019. 103212.
- Lang Xinghai, Tang Juxing, Chen Yuchuan, *et al.* 2010. Re-os chronology and geological significance of molybdenite in ore body II, Xiongcu porphyry copper-gold deposit, xietongmen county, Tibet[J]. *Mineral rocks*, 30(4): 55 ~61 (in Chinese).
- Lang Xinghai, Tang Juxing, Chen Yuchuan, *et al.* 2012a. Re-Os isotope age evidence of the neotethys ocean subduction in the southern margin of the gangdi mineralization belt in Tibet[J]. *Journal of China University of geosciences*, 37(3): 515 ~525 (in Chinese).
- Lang Xinghai, Tang Juxing, Li Zhijun, *et al.* 2012b. Sulfur and lead isotope characteristics of ore body I in Xiongcu porphyry copper-gold deposit area in Tibet and its indication for the source of ore-forming materials[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 459 ~470 (in Chinese with English abstract).
- Lang Xinghai, Tang Juxing, Xie Fuwei, *et al.* 2014. Geochronology, petrogeochemistry and geological significance of porphyrite in the

- southern xiongcu mining area of Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 609 ~ 620 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei and Peng Lijun. 1994. Estimation of Fe^{3+} and Fe^{2+} in amphibolite biotite by electron probe analysis[J]. *Journal of Changchun Institute of Earth Science*, (2): 155 ~ 162 (in Chinese).
- Munoz J L. 1984. F-OH and Cl-OH exchange in micas with applications to hydrothermal ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 13(1): 469 ~ 493.
- Patino D A E. 1993. Titanium substitution in biotite: An empirical model with applications to thermometry, O_2 and H_2O barometers, and consequence for biotite stability[J]. *Chemical Geology*, (108): 132 ~ 162.
- Parsapour A, Khalili M, Tepley F, *et al.* 2015. Mineral chemistry and isotopic composition of magmatic, re-equilibrated and hydrothermal biotites from Darreh-Zar Porphyry Copper Deposit, Kerman (Southeast of Iran)[J]. *Ore Geology Reviews*, 66: 200 ~ 218.
- Phillips G N and Evans K A. 2004. Role of CO_2 in the formation of gold deposits[J]. *Nature*, 429(6994): 860 ~ 863.
- Popp R K and Frantz J D. 1980. Mineral-solution equilibria-III. The system $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-HCl$ [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44(7): 1 029 ~ 1 037.
- Qin Kezhang, Zhang Lianchang, Ding Kuishou, *et al.* 2009. Host rock genesis and mineralogical characteristics of Sanchaokou copper deposit in east tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4: 845 ~ 861 (in Chinese).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Huang Wei. 2001. Gangdi porphyry copper (chemical) belt: The second Yulong copper belt in Tibet? [J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 355 ~ 366 (in Chinese).
- Richard E B. 1974. Biotite stability in the porphyry copper environment [J]. *Economic Geology*, 69: 241 ~ 256.
- Robert J L. 1976. Titanium solubility in synthetic phlogopite solid solutions[J]. *Chemical Geology*, 3(17): 213 ~ 227.
- Siahcheshm K, Calagari A A, Abedini A, *et al.* 2012. Halogen signatures of biotites from the Maher-Abad Porphyry Copper Deposit, Iran: Characterization of volatiles in syn- to post-magmatic hydrothermal fluids[J]. *International Geology Review*, 54(12): 1 353 ~ 1 368.
- Takagi T and Tsukimura K. 1997. Genesis of oxidized-and reduced-type granites[J]. *Economic Geology*, 92(1): 81 ~ 86.
- Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2012. Study on mineralization series and key issues of ore-prospecting breakthrough in the eastern section of the Gangdi metallogenic belt[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 393 ~ 410 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Huang Yong, Li Zhijun, *et al.* 2009. Elemental geochemical characteristics of Xiongcu copper and gold deposit in xietongmen county, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 28(1): 15 ~ 28 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Li Fengji, Li Zhijun, *et al.* 2010. Time frame for the formation of major geological bodies in Xiongcu copper and gold mine, xietongmen county, Tibet: Evidence of the Re-Os age of zircon U-Pb molybdenum deposit[J]. *Mineral Deposits*, 29(3): 461 ~ 475 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Wang Qin, Yang Chao, *et al.* 2014. Metallogenic subseries of two porphyry: Epithermal deposits in the Qinghai-Tibet Plateau and the practice of their absence prospecting [J]. *Mineral Deposits*, 33(6): 1 151 ~ 1 170 (in Chinese with English abstract).
- Tang Pan. 2018. Indication of Biotite Mineralogical Characteristics on Metallogenic Environment of Porphyry Copper Polymetallic Deposit in Gangdese Metallogenic Belt, Tibet[D]. Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Wang Yong, Tang Juxing and Wang Liqiang. 2016. Electron probe analysis of hydrothermal biotite silicate and characteristics of early ore-forming fluids in Bangpu porphyry molybdenum (copper) deposit, Tibet[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 35(4): 440 ~ 447 (in Chinese).
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite: Experiment, theory, and application[J]. *Am. Mineral.*, 50: 1 228 ~ 1 272.
- Xie F W, Tang J X, Chen Y C, *et al.* 2008. Apatite and zircon geochemistry of Jurassic porphyries in the Xiongcu district, southern Gangdese porphyry copper belt: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 98 ~ 114.
- Xie Fuwei, Tang Juxing and Lang Xinghai. 2015. Study on porphyry minerality of ore body I in Xiongcu mining area, Tibet: Evidence from hydrothermal alteration minerals and accessory minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(1): 51 ~ 64 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenyi, Qu Xiaoming, Hou Zengqian, *et al.* 2005. Fluid inclusions in xiongcu copper and gold deposit, gangdi middle section, Tibet[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(4): 301 ~ 310 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenyi, Qu Xiaoming, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Characteristics, genesis and dynamic background of large copper-gold deposit in xiongcu, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 80(9): 1 392 ~ 1 406 (in Chinese).
- Yavuz F. 2003. Evaluating micas in petrologic and metallogenic aspect: I -definitions and structure of the computer program MICA + [J]. *Computers & Geosciences*, 29(10): 1 203 ~ 1 213.
- Zhou Yun, Tang Junxing, Huang Yong, *et al.* 2017. Microthermometry

of fluid inclusion and determination of characteristic elements in xiong-cun copper and gold deposit, Tibet[J]. Mineral Deposits, 36(5): 1 039 ~ 1 056 (in Chinese with English abstract).

Zou Yinqiao, Huang Wenting, Liang Huaying, et al. 2015. Identification of porphyry genetically associated with mineralization and its zircon U-Pb and biotite Ar-Ar age of the Xiong-cun Cu-Au deposit, southern Gangdese, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(7): 2 053 ~ 2 062 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁 枫, 郎兴海, 胡正华, 等. 2012. 西藏雄村铜金矿 I 号矿体赋矿凝灰岩的岩石地球化学特征及成因探讨[J]. 地球学报, 33(4): 546 ~ 558.
- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. 地质与勘探, 9: 16 ~ 19.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 等. 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用[J]. 中国科学(D 辑), 33(7): 509 ~ 618.
- 黄 勇, 丁 俊, 唐菊兴, 等. 2012. 西藏雄村斑岩型铜金矿红柱石成因矿物学特征[J]. 地球学报, 33(4): 510 ~ 518.
- 黄 勇, 唐菊兴, 郎兴海, 等. 2011. 雄村铜金矿床 II 号矿体侵入岩-火山岩的地球化学特征: 对岩石成因及构造背景的约束[J]. 矿床地质, 30(2): 361 ~ 373.
- 郎兴海. 2012. 西藏雄村斑岩型铜金矿集区成矿作用与成矿预测(博士学位论文)[D]. 成都: 成都理工大学, 1 ~ 189.
- 郎兴海, 唐菊兴, 陈毓川, 等. 2010. 西藏谢通门县雄村斑岩型铜金矿集区 II 号矿体中辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义[J]. 矿物岩石, 30(4): 55 ~ 61.
- 郎兴海, 唐菊兴, 陈毓川, 等. 2012a. 西藏冈底斯成矿带南缘新特提斯洋俯冲期成矿作用——来自雄村矿集区 I 号矿体的 Re-Os 同位素年龄证据[J]. 地球科学, 37(3): 515 ~ 525.
- 郎兴海, 唐菊兴, 李志军, 等. 2012b. 西藏雄村斑岩型铜金矿集区 I 号矿体的硫、铅同位素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. 地球学报, 33(4): 459 ~ 470.
- 郎兴海, 唐菊兴, 谢富伟, 等. 2014. 西藏雄村矿区南部玢岩的地质年代学、岩石地球化学及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 38(3): 609 ~ 620.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. 长春地质学院学报, (2): 155 ~ 162.
- 秦克章, 张连昌, 丁奎首, 等. 2009. 东天山三岔口铜矿床类型、赋矿岩石成因与矿床矿物学特征[J]. 岩石学报, 4: 845 ~ 861.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄 卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J]. 矿床地质, 20(4): 355 ~ 366.
- 唐菊兴, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393 ~ 410.
- 唐菊兴, 黄 勇, 李志军, 等. 2009. 西藏谢通门县雄村铜金矿床元素地球化学特征[J]. 矿床地质, 28(1): 15 ~ 28.
- 唐菊兴, 黎风估, 李志军, 等. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据[J]. 矿床地质, 29(3): 461 ~ 475.
- 唐菊兴, 王 勤, 杨 超, 等. 2014. 青藏高原两个斑岩-浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践[J]. 矿床地质, 33(6): 1 151 ~ 1 170.
- 唐 攀. 2018. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜多金属矿床黑云母矿物学特征——对成矿环境的指示[D]. 成都理工大学.
- 唐 攀, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 2017. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床黑云母矿物学特征[J]. 地学前缘, 24(5): 265 ~ 282.
- 王 勇, 唐菊兴, 王立强. 2016. 西藏邦铺斑岩钼(铜)矿床钾硅酸盐化热液黑云母电子探针分析及早期成矿流体特征[J]. 岩矿测试, 35(4): 440 ~ 447.
- 谢富伟, 唐菊兴, 郎兴海. 2015. 西藏雄村矿区 I 号矿体斑岩含矿性研究: 来自热液蚀变矿物和副矿物的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 34(1): 51 ~ 64.
- 谢富伟, 唐菊兴, 郎兴海, 等. 2014. 西藏雄村矿集区矿床成因类型差异性探讨[J]. 矿床地质, 33(S1): 49 ~ 50.
- 徐文艺, 曲晓明, 侯增谦, 等. 2005. 西藏冈底斯中段雄村铜金矿床流体包裹体研究[J]. 岩石矿物学杂志, 24(4): 301 ~ 310.
- 徐文艺, 曲晓明, 侯增谦, 等. 2006. 西藏雄村大型铜金矿床的特征、成因和动力学背景[J]. 地质学报, 80(9): 1 392 ~ 1 406.
- 周 云, 唐菊兴, 黄 勇, 等. 2017. 西藏雄村铜金矿床流体包裹体显微测温与特征元素测定[J]. 矿床地质, 36(5): 1 039 ~ 1 056.
- 邹银桥, 黄文婷, 梁华英, 等. 2015. 西藏冈底斯南缘雄村铜金矿床成矿斑岩厘定及其锆石 U-Pb 和黑云母 Ar-Ar 年龄分析[J]. 岩石学报, 31(7): 2 053 ~ 2 062.