

西藏雄村斑岩铜金矿床金的赋存状态及其意义

黄 勇¹, 唐菊兴², 张 丽¹

(1. 成都地质调查中心, 四川 成都 610082; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 西藏雄村斑岩铜金矿床是冈底斯成矿带上新发现的超大型斑岩铜金矿床, 矿床由3个串珠状分布的矿体组成, I号矿体和II号矿体勘探程度最高, 两个矿体中金的资源量总和可达246吨, 其中以I号矿体中金的品位最高。本文采用显微镜观察、扫描电镜、电子探针、模拟计算等测试分析方法详细研究了I号矿体中金的赋存状态、迁移特征及其意义。结果表明, I号矿体中金以银金矿为主, 并见少量或微量的金银矿、硫铋金矿、碲铋银金矿。金主要以微细粒金包裹于黄铜矿中或分布在黄铜矿边缘, 磁黄铁矿、黄铁矿以及闪锌矿中含少量的金矿物, 金主要来源于金属硫化物的出溶, 而次生氧化带中可见微细粒金分布在硅酸盐矿物中, 分布在硅酸盐矿物中的金矿物与次生氧化富集作用有关。金的矿物颗粒粒径变化较大, 以分布在黄铜矿中或边缘的金矿物粒度最大, 而分布在次生氧化带中的金粒度最小, 大部分小于1 μm。上述赋存特征指示雄村I号矿体中金主要分布在黄铜矿边缘, 同时依据Simon的实验数据拟合得出, 高温环境下金可无限混溶在铜-铁熔体中, 随着温度的降低, 金属熔体中金的含量呈数量级下降, 因此随着温度的降低金发生出溶而向外迁移。磁黄铁矿、黄铁矿以及闪锌矿中金可能形成于此过程, 同时位于矿区西北侧的浅成低温热液型洞嘎金矿中金也可能形成于上述过程。

关键词: 金的赋存状态, 斑岩铜金矿床, 雄村, 西藏

中图分类号: P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0551-10

Gold in the Xiongcu porphyry copper-gold deposit, Tibet: Its distribution and significance

HUANG Yong¹, TANG Ju-xing² and ZHANG Li¹

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China)

Abstract: The Xiongcu porphyry copper-gold deposit consisting of three orebodies is a newly discovered deposit in southern Tibet. The total gold resources of No. 1 and No.2 orebody amount to 246 tons, which have higher exploration extent than No. 3 orebody, with the Au concentration of No. 1 ore body being the richest. Microscope, electron microprobe analysis and simulated analysis were used to study the gold distribution and its significance. The results show that the main gold-bearing mineral is electrum. Minor or trace kustelite, sulfur-bismuth gold mineral, and gold volynskite were also been found. Gold minerals are mainly distributed inside or along the margin of chalcopyrite, and pyrrhotite, pyrite and sphalerite also contain minor gold minerals, suggesting that gold was formed at the exsolution of sulfide. Some micro-fine gold minerals are distributed within silicate minerals in the oxidized zone due to secondary enrichment process. The sizes of gold minerals are plentifully variable.

收稿日期: 2013-12-18; 修订日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(41172077); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB403103); 西藏大型矿床成矿专属性研究(1212011221073)

作者简介: 黄 勇(1982-), 男, 汉族, 博士, 工程师, 主要从事矿床学研究, E-mail: yong.huang@hotmail.com。

The biggest gold minerals are distributed within or along the margin of chalcopyrite while the smallest ones which are mostly less than $1\mu\text{m}$ occur near silicate minerals. The modes of occurrence of gold minerals indicate that most of gold minerals are distributed along the margin of chalcopyrite. According to the experiments of Simon, gold could be infinitely miscible in metal melt at high temperature and decreased with decreasing temperature, which implies that gold could migrate outward with decreasing temperature. The existence of gold minerals in pyrrhotite, pyrite, sphalerite and gold in northwest Dongga epithermal gold deposit may be also related to the above process.

Key words: mode of occurrence of gold; porphyry copper-gold deposit; Xiongcu; Tibet

雄村斑岩铜金矿位于西藏冈底斯斑岩成矿带中西段南缘,是近年来新发现的超大型斑岩铜金矿床,矿集区由 3 个主矿体以及数个矿化体组成,其中以 I 号矿体和 II 矿体勘探程度最高。雄村斑岩铜金矿床 I 号矿体中 Au 的平均品位可达 0.62×10^{-6} ,截止到 2012 年,雄村 I 号 + II 矿体中伴生金资源量为 246 吨,伴生银的资源量为 1 327 吨。

全世界大型超大型斑岩矿床的分布特征显示斑岩型铜金矿床主要分布在环太平洋西海岸的岛弧带中,如巴布亚新几内亚、斐济、所罗门群岛等岛弧(Sillitoe, 1979)。大多数斑岩铜金矿床主要围绕长英质侵入体及其接触带分布,与斑岩有关的长英质侵入体通常具一期或多期次性,围绕斑岩体发育有广泛分布的岩浆-热液蚀变体系。

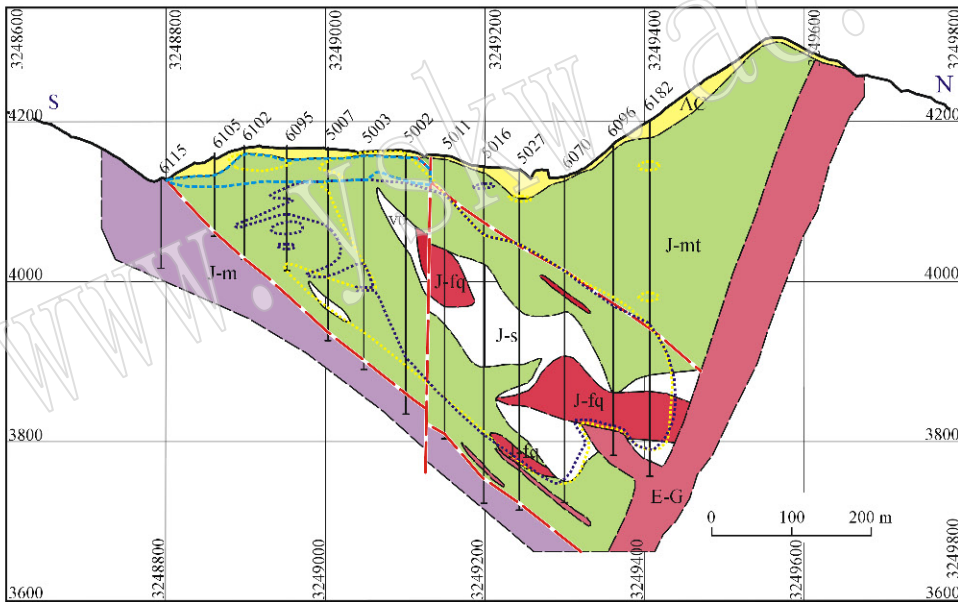
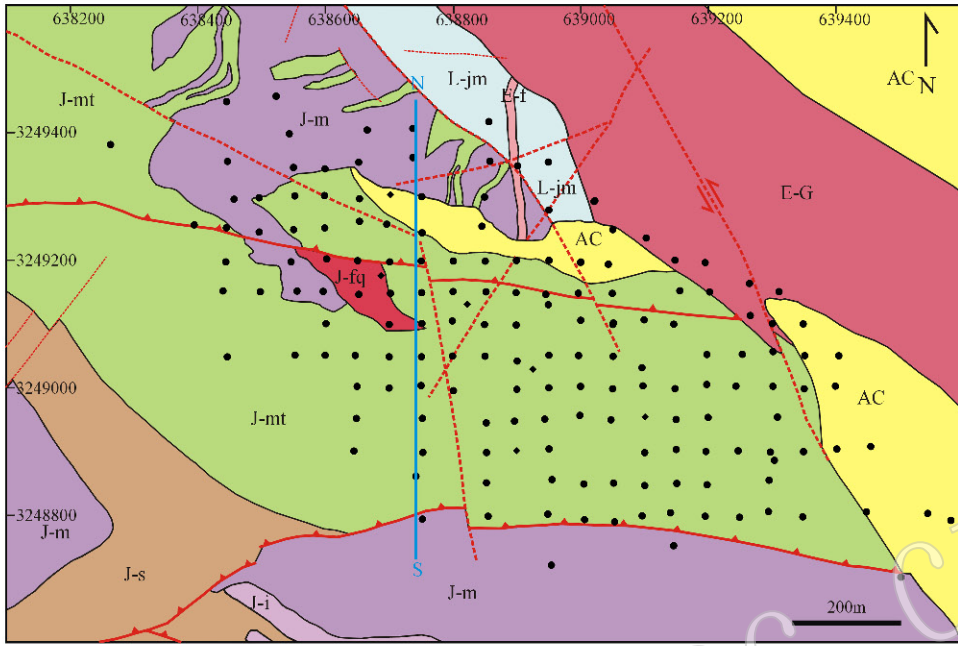
斑岩铜金矿床中金主要与铜矿物有关,如斑铜矿、黄铜矿、铜蓝等,雄村斑岩铜金矿床中金与铜之间的高度相关性也印证了这一观点(黄勇等, 2012)。普遍认为斑岩铜金矿床中金主要形成于高温阶段,并易伴随高温气相或相对低温的热液流体向外迁移(Simon *et al.*, 2000),与斑岩铜矿有关的浅成低温热液矿床中的金均形成于上述过程中(Jones *et al.*, 1992)。金易在早期高温热液蚀变阶段进入含铜矿物中,例如在 Grasberg、Bingham、Granisle、Panguna 和 Santo Tomas 斑岩铜金矿床中,金主要以 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ 粒径大小的银金矿赋存于早期钾化带中的铜矿物中(Baldwin *et al.*, 1978; Cuddy and Kesler, 1982; Kesler *et al.*, 2002)。在以斑铜矿为主的斑岩铜矿中,如 Grasberg 和 Batu Hijau 矿床,金主要分布在斑铜矿中(Rubin and Kyle, 1997; Arif and Baker, 2004)。通常这类以斑铜矿为主的矿床中矿体主要产于早期钾化带内。但在斑铜矿较少或缺失的斑岩铜矿中,如 Bingham, 金主要赋存于黄铜矿中。Kesler 等(2002)研究指出斑铜矿中金的含量通常要高出黄铜矿 1 个数量级(分别为 1×10^{-6}

和 $< 0.1 \times 10^{-6}$)。斑岩铜矿中以斑铜矿中金含量最高,但绝大多数斑岩铜矿中铜矿物以黄铜矿为主,因此金主要赋存于黄铜矿中。Kesler 等(2002)提出将 Cu/Au 原子比值小于 40 000 的斑岩铜矿定义为富金型斑岩铜矿。斑岩铜金矿床中主要的金矿物以银金矿为主,自然金较为少见,另外也见有碲、铋金矿物的报道,但这类金矿物含量极少。金矿物可以微粒包体或显微包体分布在硫化物中,但常见的金矿物主要分布在硫化物颗粒边缘。依据提取金的工艺复杂程度,可将金的赋存状态分为“可见金”和“不可见金”两类。“可见金”主要指借助光学显微镜等工具可肉眼观察辨识的金矿物,而“不可见金”是指借助光学显微镜肉眼也无法辨认的金,包括晶隙金、包裹金、晶格金、裂隙金,其中晶格金被认为是固溶体出溶的产物。

国外对于斑岩铜矿中金的分布、赋存、化学性质已做过大量研究(Rubin and Kyle, 1997; Kesler *et al.*, 2002; Arif and Baker, 2004),但国内斑岩铜矿中金的赋存、分布研究较为薄弱。本文采用扫描电镜分析(SEM)及背散射电子成像分析、面扫描、特征 X 射线扫描、能谱仪(EDS)、电子探针分析(EPMA)等测试分析手段,详细研究雄村铜金矿床 I 号矿体中金矿物的种类、粒度、成分以及载金矿物等特征,并结合实验数据模拟计算,深入探讨雄村 I 号矿体中金矿物的赋存与分布特征,以为矿床成因研究以及选矿工艺奠定基础。

1 矿区地质概况

区内出露的地层有中下侏罗统安山质凝灰岩和全新统冲积物-崩积物(图 1)。中下侏罗统雄村组安山质凝灰岩是 I 号矿体的主要含矿围岩,约 2/3 的资源量赋存于安山质凝灰岩中(锆石 U-Pb 法年龄为 $176 \pm 5.0 \text{ Ma}$)。区内出露多期岩浆岩,最早一期为角



- | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <p>地层</p> <ul style="list-style-type: none"> AC 更新统-冲积物/扇积物
Pleistocene-Alluvium/Colluvium J-s 侏罗系-双峰火山岩及火山碎屑岩
Jurassic-Bimodal Volcanic and Volcaniclastic J-mt 侏罗系-强蚀变质铁质凝灰岩
Jurassic-Strongly Altered Mafic Tuff and/or Intrusions <p>..... 断层/Normal fault
 平移断层
 逆冲断层/Reverse fault
 地质界限/Geological contact
 钻孔位置/Hole location</p> | <p>岩浆岩</p> <ul style="list-style-type: none"> E-G 始新世-黑云母花岗岩长岩
Eocene-Gangdese Batholith E-f 始新世-长英质侵入岩
Eocene-Felsic Intrusions J-fq 侏罗世-石英闪长斑岩
Jurassic-Felsic Intrusions(quartz phytic) J-i 侏罗世-角闪石英闪长斑岩
Jurassic-intermediate intrusions(plagioclase and quartz phytic) J-m 侏罗世-角闪闪长斑岩
Jurassic-Mafic Intrusions(Plagioclase and hornblende phytic) J-jm 晚侏罗世-角闪闪长斑岩
Late Jurassic-Mafic intrusions(Plagioclase and hornblende phytic) J-s 侏罗世-强硅化(原岩可能为斑岩或围岩)
Jurassic-Strong silicification(quartz phytic or wallrock) | <p> 矿化 >0.5% Au
 矿化 >0.5% Cu
 氧化带
 Oxidized zone</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|

图 1 雄村矿区地质简图(据 Oliver, 2005^①, 2006^②; Tafti, 2011)

Fig. 1 Geological map of the Xiongcu deposit (after Oliver, 2005^①, 2006^② and Tafti, 2011)

① Oliver J. 2005. Geological mapping of the Xietongmen property and contiguous areas, Tibet, People's Republic of China. Private report to Continental Minerals Corporation, 25.

② Oliver J. 2006. Structural, alteration and semi-regional lithotectonic features of the Xietongmen porphyry Cu-Au district, Tibet, China. Internal Report to Continental Minerals Corporation, 42.

闪石英闪长玢岩,分布于 I 号矿体底板和 II 号、III 号矿体之中。含溶蚀状石英斑晶的石英闪长斑岩是 I 号矿体的成矿斑岩,该岩体出露面积较小(锆石 U-Pb 法年龄为 173 ± 3.0 Ma)(唐菊兴等,2009,2010)。出露在矿区东侧的始新世的黑云母花岗岩闪长岩代表区内最大的一期岩浆活动,沿 I 号矿体北东侧吞噬矿体,与侏罗纪火山-沉积岩接触带上见有宽度约数百米的角岩化带。角岩化接触变质晕宽度约为 350 m,由黑云母-斜黝帘石-钙铁榴石组成,矿物组合指示角岩化接触变质晕形成温度约为 $500 \sim 650^\circ\text{C}$ (Spear, 1993)。角岩化外围的蚀变晕(>500 m)出露有斑点状角岩化,矿物组合为钠长石-绿泥石 \pm 黑云母,矿物组合特征指示斑状角岩化蚀变晕形成温度在 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 之间,深度在数公里范围内(Spear, 1993, Oliver, 2006^①)。此外矿区内还出露有成矿期后的安山岩脉、煌斑岩脉、闪长岩脉。

区内主要见有两类断层,一类为形成较早的逆断层,由北向南分别为 SBF、Adit-1、Contact/TSF1 和 TSF2(图 1)。这类断层近于平行排列,呈东西轴线分布,倾向北,倾角为 $40 \sim 50^\circ$,地表断层宽度大于 10 m(Lang *et al.*, 2007),并见有断层角砾岩。第 2 类为形成稍晚的脆性正断层。区内广泛分布的脆性正断层表明矿区经历过不均匀抬升或松弛阶段。Taft(2011)测试的被 TSF2 断层切断的岩脉年龄为 ~ 178 Ma,而另一条穿插 TSF2 岩脉的 U-Pb 年龄为 ~ 174 Ma,因此限定了这套逆断层形成于早侏罗世晚期。雄村 I 号矿体夹持于 Contact 以及 Adit-1 逆冲断层之间,Contact 与 Adit-1 之间的安山质凝灰岩及石英闪长斑岩全岩矿化。Cu 品位向断层方向逐渐降低,并在断层角砾中见有金属硫化物化,因此 Contact 与 Adit-1 逆冲断层形成时限应晚于成矿年龄,上述近于平行展布的逆冲断层均未穿插黑云母花岗岩闪长岩基。

雄村铜金矿矿化与围岩蚀变围绕石英闪长斑岩呈环带状分布,由斑岩体内向外,蚀变可以划分为以下 4 类:① 早期钾硅酸盐化,这类蚀变分布在斑岩体内,以钾长石-黑云母-磁铁矿-红柱石蚀变组合为主,外接触带上含有大量的矿化石英脉,基质基本被大量石英和少量白云母交代,红柱石在石英网脉带中分布较少;② 黑云母-绢云母蚀变,这类蚀变分布

在钾硅酸盐化带外围,主要蚀变矿物组合为黑云母、绢云母、红柱石、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿,铜/铁比较高,是主要的含矿蚀变之一;③ 黄铁绢英岩化,以黄铁矿-绢云母/白云母-石英-黄铜矿-磁黄铁矿组合为主,主要分布在矿体外接触带,该蚀变带类含有大量的黄铁矿,铜/铁比最低,并发育有大量的成矿期后张性石英脉;④ 青磐岩化,青磐岩化主要分布在矿区外围,以绿泥石-绿帘石-方解石蚀变组合为特征。此外在 II 号矿体还见有以阳起石-钠长石-绿泥石-绿泥石-少量电气石为主的钠质-钙质蚀变(黄勇,2013)。

3 样品情况及分析结果

样品均取自 I 号矿体钻孔中,其中 5 件样品采自原生带(样品号:12-284.2、20-126.3、20-189.2、20-287.8、32-249.8),1 件样品采自次生氧化富集带(样品号:82-66.6),样品采样位置及矿物组合特征见表 1。将采取的岩心磨制成光片后,首先开展显微镜镜下观察,显微镜型号为 LEICA-4500,电子探针以及扫描电镜由成都地质调查中心分析测试中心完成,电子探针仪器型号 EPMA-1600,工作电压 20 kV,工作电流 $10 \mu\text{A}$,扫描电镜仪器型号 S-4800,工作电压 20 kV,工作电流 $10 \mu\text{A}$ 。

3.1 矿石矿物的 SEM/EDS 分析

SEM/EDS、特征 X 射线扫描结果显示,雄村斑岩铜金矿 I 号矿体中独立金矿物以银金矿为主,偶见金银矿、硫铋金矿、碲铋银金矿。金矿物形态不规则,主要呈以下 3 种赋存状态:① 呈包裹金分布在硫化物之中,载金矿物包括黄铜矿和磁黄铁矿;② 以微粒金或显微粒金分布在硫化物边缘或与硫化物构成连晶结构,载金矿物包括黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿;③ 以显微粒金分布在硅酸盐矿物中。其中以第 1 和第 2 类分布最为广泛,第 3 类只在次生氧化矿中见有少量密集分布的银金矿(图 2a、2b、2c)。本次研究共统计了 48 颗独立金矿物,其中 4% 的金矿物与黄铜矿、磁黄铁矿构成连晶结构,25% 的金矿物分布在黄铜矿边缘,4% 的金矿物分布在铁闪锌矿边缘,4% 的金矿物包裹于磁黄铁矿中,2% 的金矿物包裹于黄铜矿中,61% 的金矿物以独立金矿物的形式分

① Oliver J. 2006. Structural, alteration and semi-regional lithotectonic features of the Xietongmen porphyry Cu-Au district, Tibet, China. Internal Report to Continental Minerals Corporation, 42.

表 1 采样位置及矿物组合特征
Table 1 Sampling location and mineral components

样品编号	采样位置	描述
12-284.2	钻孔 ZK5012, 孔深 284.2 m	细脉-浸染状构造,以磁铁矿为主(约 80%),磁黄铁矿约占金属矿物总量 75%,黄铜矿约占 20%,闪锌矿 5%±。黄铁矿 该片中见有它形、半自形及自形晶,但以半自形晶为主。产于岩石细裂隙、脉石矿物晶间或其中。黄铜矿:有的与黄铁矿一道产于岩石细裂隙中,有的产于脉石矿物中。有的黄铜矿中见两种色体:①为带粉紫色矿物(外表特征像磁黄铁矿,但色更深些),②为呈浑圆状灰色色体(外表特征近于磁铁矿,但硬度较低)
20-126.3	钻孔 ZK5020, 孔深 126.3 m	该片金属矿物约占总矿物的 30%,呈中粗浸染状构造。金属矿物见有黄铜矿(约占金属矿物总量的 45%左右)、磁黄铁矿约占 30%左右,黄铁矿约占 20%,闪锌矿约占 5%
20-189.2	钻孔 ZK5020, 孔深 189.2 m	脉状-细脉浸染状构造。金属矿物有黄铁矿(占金属矿物总量的 40%左右)、磁铁矿(20%左右)、磁黄铁矿(15%左右)、黄铜矿(20%左右)、闪锌矿(5%左右)。黄铁矿自形-半自形不规则粒状和连晶,脉状-浸染状分布。黄铜矿呈它形不规则粒状、片状,常与磁黄铁矿组成细脉
20-287.8	钻孔 ZK5020, 孔深 287.8 m	细脉-细脉浸染状构造,金属矿物为黄铜矿(占金属矿物总量的 40%左右)、磁黄铁矿(40%左右)、闪锌矿(10%左右)、黄铁矿(10%左右),矿物相对生成顺序:FeCuS ₂ -FeS-ZnS-FeS ₂
32-249.8	钻孔 ZK5032, 孔深 249.8 m	以黄铁矿为主形成脉,脉外是浸染状分布。金属矿物为黄铁矿(占金属矿物总量的 65%)、黄铜矿(30%左右)、闪锌矿(5%)。黄铜矿它形晶不规则粒状及其连晶,星散分布或间杂在黄铁矿脉石中,有闪锌矿共生
82-66.6	钻孔 8082, 孔深 66.6 m	该片金属矿物含量较多,约占矿物总量的 60%左右,局部富集成团斑状,大小粒度悬殊大,构成斑杂状构造。镜下可见金属矿物以闪锌矿为主,约占金属矿物总量的 70%左右,次为磁黄铁矿(约占 15%)和黄铁矿(约占 13%,具褐铁矿化)及少量黄铜矿(约占 2%)

布在硅酸盐矿物中。

3.2 金的成分

金的成分分析采用 S-4800 型能谱分析仪完成,共计测定 36 颗金矿物,金矿物成分分析见表 2。分析结果显示,金银矿、银金矿、硫铋金矿、硫铋银金矿均含有不定量的铁和铜。分布在黄铜矿边缘的金矿物中含有 1.06%~6.47%(质量分数,下同)的铜,平均含铜量为 2.8%。与黄铜矿、磁黄铁矿够成连晶或分布于磁黄铁矿边缘、包裹于内部的金矿物不含铜,只含少量的铁(0.69%~7.97%),平均为 2.63%。分布在次生氧化富集带硅酸盐中的独立金矿物含有少量的铅,含量介于 3.58%~6.18%,平均为 4.77%。

金矿物以银金矿为主,含少量的金银矿及微量碲、铋银金矿物。银金矿中金的含量介于 55%~73.7%之间,平均为 66%;银的含量介于 25.3%~40.8%之间,平均为 30%。金银矿中金的含量介于 41.5%~45.9%之间,平均为 44%;银的含量介于 50.3%~52.3%,平均为 51%。硫铋金矿中金的含量为 18.2%,银的含量为 7.08%,并含有 Te、Se、Cu、Fe。碲铋银金矿中金的含量为 47%,银的含量为 20.9%,并含有 Cu、Fe、Sd(表 2)。

3.3 金矿物的粒度

因绝大部分金矿物以银金矿为主,因此进行了银金矿的扫描电镜测量和含量统计($n=37$)结果显

示银金矿粒径集中在 0.245~20.179 μm 之间,粒径小于 1 μm 的占 42.11%,粒径在 1~5 μm 的占 39.47%,粒径在 5~10 μm 的占 10.53%,粒径大于 10 μm 的占 5.26%,表明银金矿以微细粒为主。其中分布在黄铜矿边缘的银金矿粒径介于 1.741~9.331 μm 之间,占 36.84%;与磁黄铁矿构成连晶的独立金矿物粒径介于 16.959~20.179 μm 之间,占 5.26%;闪锌矿中粒径为 3.381 μm ,占 2.63%;分布在硅酸盐中的银金矿粒径变化较大,从 0.245 μm 到 5.111 μm 不等,绝大多数小于 1 μm ,占总数的 52.63%。前述分析表明,分布在硅酸盐中的银金矿粒径变化较大,粒度较小,而分布在黄铜矿-磁黄铁矿连晶中的粒径最大。

3.4 矿石矿物的 EPMA 分析

电子探针分析由成都地质调查中心实验室完成,束斑直径为 1 μm ,检出限为 10^{-4} 。测试结果显示黄铜矿中 Au 的含量为 0~520 $\times 10^{-6}$,平均为 78.333 $\times 10^{-6}$,Ag 的含量为 0~2 880 $\times 10^{-6}$,平均为 330.6 $\times 10^{-6}$ ($n=36$);黄铁矿中 Au 的含量为 0~1 300 $\times 10^{-6}$,平均 164.3 $\times 10^{-6}$,Ag 的含量为 0~370 $\times 10^{-6}$,平均为 35.7($n=28$);磁黄铁矿中 Au 的含量为 0~630 $\times 10^{-6}$,平均为 135 $\times 10^{-6}$,Ag 的含量为 0~250 $\times 10^{-6}$,平均 73.6 $\times 10^{-6}$ ($n=14$);闪锌矿中未检测出 Au,Ag 的含量为 0~420 $\times 10^{-6}$,平均 110 $\times 10^{-6}$ ($n=4$)。上述分析结果显示黄铜矿、黄

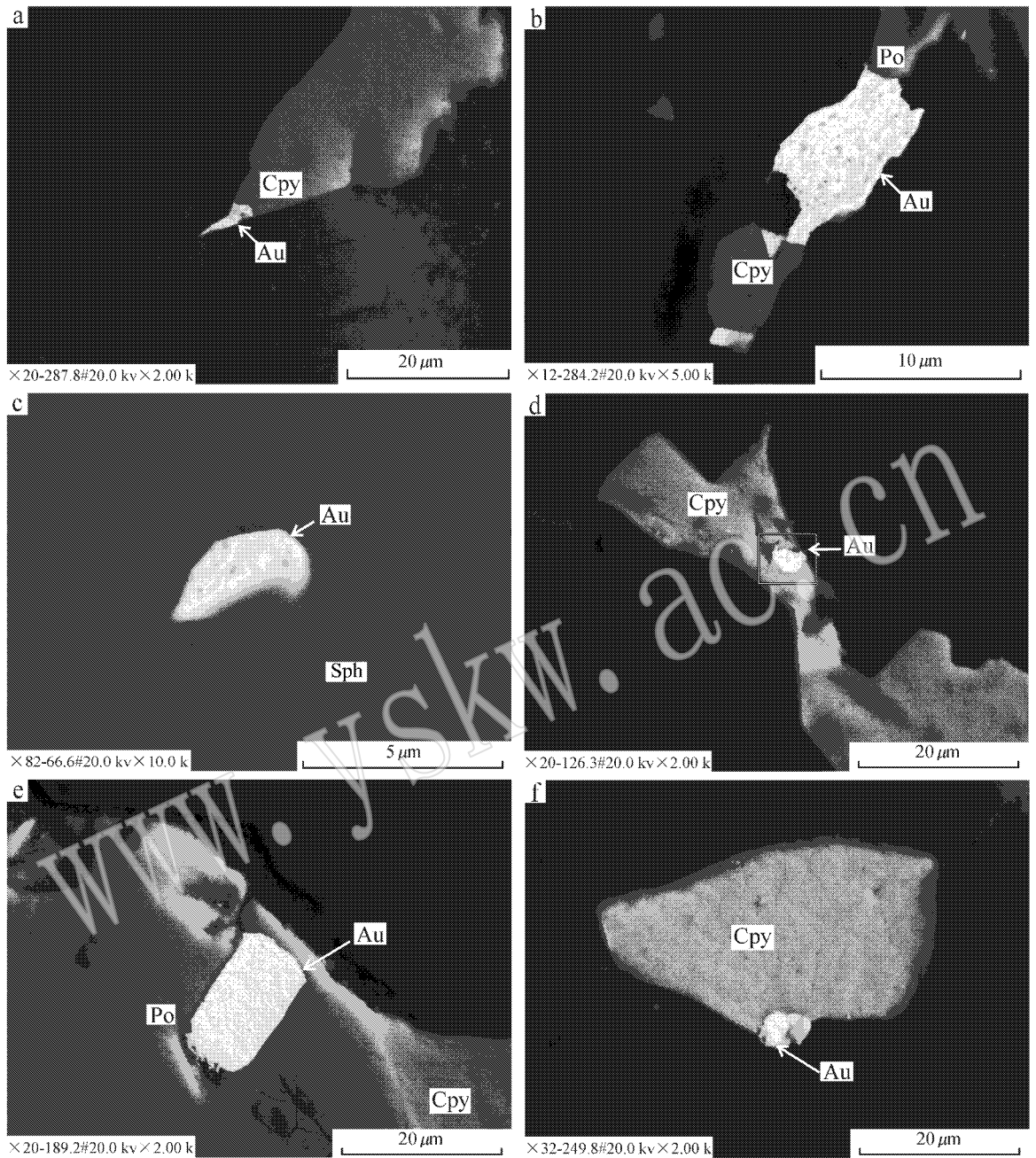


图 2 金的分布特征

Fig. 2 Gold grains within or around sulfide margins based on SEM images

Au—银金矿; Cpy—黄铜矿; Po—磁黄铁矿; Sph—闪锌矿

Au—electrum; Cpy—chalcopyrite; Po—pyrrhotite; Sph—marmatite

铁矿、磁黄铁矿中均含有 Au,除黄铁矿中有 1 个测点的 Au 高达 $1\ 300 \times 10^{-6}$ 外,其余黄铁矿、磁黄铁矿中金的含量与黄铜矿中 Au 含量相当(图 3)。光学显微镜下观察以及 SEM 测试结果均显示黄铁矿、磁黄铁矿中包裹有黄铜矿,而闪锌矿中见有黄铜矿的固溶体出溶,因此黄铁矿、磁黄铁矿、铁闪锌矿中高含量的 Au 不能排除有黄铜矿的干扰。

4 讨论

4.1 金的赋存状态

矿石矿物的 EPMA 测试分析结果表明,矿区主要的金属矿物黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿中均含有金矿物,但考虑到 EPMA 测试斑束较大,精度比 SIMS

表 2 金矿物电镜能谱分析结果表

 $w_B/\%$

Table 2 Analytical results of EDS

样号	矿物类别	$w_B/\%$									
		S	Cu	Fe	Pb	Zn	Bi	Te	Au	Ag	Se
12-284. 2-21	银金矿			1.55					70.2	28.2	
12-284. 2-22	银金矿			2.04					68.8	29.2	
12-284. 2-23	银金矿								69.4	30.6	
12-284. 2-24	银金矿			2.76					67	30.2	
12-284. 2-25	银金矿			6.09					62.3	31.6	
12-284. 2-26	银金矿			4.65					62.2	33.2	
12-284. 2-27	银金矿			1.24					69.7	29	
12-284. 2-29	银金矿			1.98					67.7	30.4	
12-284. 2-30	银金矿			2.65					68	29.4	
12-284. 2-34	银金矿			3.3					69.2	27.5	
12-284. 2-35	银金矿			7.04					64.7	28.3	
12-284. 2-36	银金矿			2.92					63.2	33.8	
20-126. 3-31	银金矿		2.26	3.08					69.4	25.3	
20-126. 3-35	银金矿		2.29	2.21					69.3	26.2	
20-189. 2-13	银金矿			1.19					72.5	26.3	
20-189. 2-14	银金矿								71.5	28.5	
20-189. 2-15	银金矿			0.86					73.5	25.6	
20-287. 8-1	银金矿		2.39	7.05					49.8	40.8	
20-287. 8-4	银金矿		1.06	4.36					55	39.6	
20-287. 8-5	银金矿			3.84					55.2	41	
82-66. 6-1	银金矿			1.34		5.98			64.8	27.9	
82-66. 6-2	银金矿			0.91		6.18			63.9	29	
82-66. 6-3	银金矿			1.34		6.09			63	29.6	
82-66. 6-6	银金矿			1.09		3.62			68.4	26.9	
82-66. 6-7	银金矿			1.85		4.03			62.8	31.3	
82-66. 6-8	银金矿			1.13		3.98			65.5	29.4	
82-66. 6-9	银金矿			1.59		3.58			69.9	24.9	
82-66. 6-11	银金矿			0.69		5.95			63.8	29.5	
82-66. 6-12	银金矿			0.92		4.83			63.3	31	
82-66. 6-13	银金矿			1.14		4.28			68.1	26.5	
82-66. 6-14	银金矿			1.04		3.95			67.9	27.1	
32-249. 8-10	金银矿		1.9	1.93					44.8	51.4	
32-249. 8-12	金银矿		3.37	2.8					41.5	52.3	
32-249. 8-13	金银矿		2.25	1.56					45.9	50.3	
20-126. 3-34	硫铋金矿	10.2	6.47	7.96			37.2	7.53	18.2	7.08	5.31
20-126. 3-33	碲铋银金矿		3.22	3.37			19.1	3.93	47	20.9	2.55

低,同时黄铁矿与磁黄铁矿中 Au 的含量变化很大,因此不能排除黄铁矿与磁黄铁矿中包裹微细粒黄铜矿而影响 Au 含量测试结果的可能性。Cu、Au、Ag、Fe 相互间 Spearman 相关性分析结果表明,Cu 与 Au、Ag 的相关系数分别为 0.860、0.792(置信度 99%, $n = 17\ 694$),Fe 与 Au、Ag 的相关系数分别为 0.485、0.480(置信度 99%, $n = 17\ 694$) (黄勇等, 2012)。矿区主要的含铁矿物为黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿,因此 Fe 与 Au、Ag 的相关性可代表 3 种矿物与 Au 的相关关系。上述分析结果暗示矿区主要的

载 Au 矿物仍然以黄铜矿为主。

电子探针分析结果显示金属矿物中金的含量可高达 $n \times 10^{-3}$,但黄铜矿中的 Cu/Au 原子比值为 13 532,远远高于整个矿体中的 Cu/Au 原子比值(3 210),并且同一颗黄铜矿颗粒中不同测点的 Au 含量相差很大($0 \sim 100 \times 10^{-6}$),因此金不是以均匀分布的晶格金、晶隙金形式分布在金属硫化物中,而主要以独立金矿物分布在金属硫化物边缘或分布在硅酸盐中。虽然据 48 颗金矿物统计结果显示,高达 61% 的金矿物产于硅酸盐中,但这类金矿物主要集

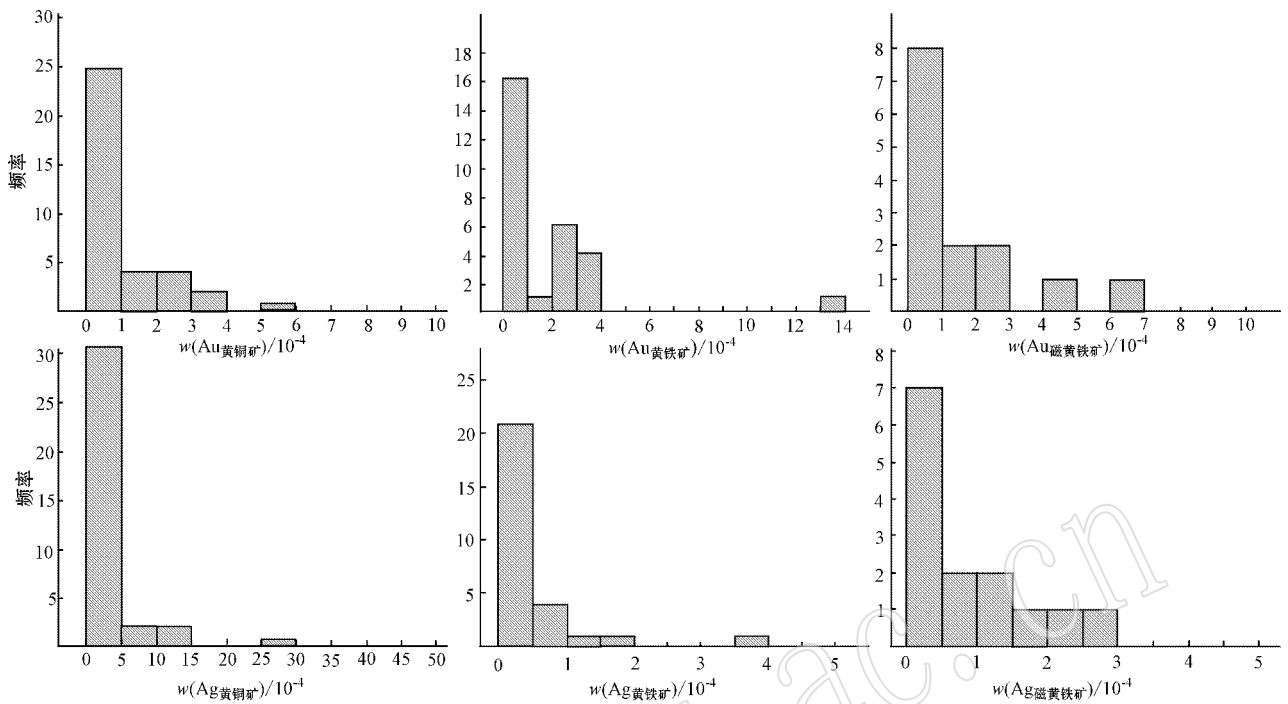


图 3 矿石矿物中 Au 和 Ag 的含量图解

Fig. 3 Au and Ag grades in sulfide

中分布在编号为 6082-66.6 号光片中(样品采自钻孔 ZK6082, 孔深 66.6 m 处),且主要分布在黄铜矿周围的硅酸盐矿物中,同时金矿物的粒径较小,大部分小于 $1\ \mu\text{m}$,因而不能排除氧化淋滤作用造成铜的迁移与金的次生富集。除此之外,大部分金均分布在金属硫化物边缘,与黄铜矿关系密切的金矿物中均含有少量的铜,同时金与铜具有极高的相关系数以及相似的空间分布特征,均表明金是直接来源于黄铜矿的出溶,因此雄村斑岩铜金矿床不存在叠加之上的浅成低温热液型金矿的金矿化组成特征。

4.2 金的品位限制

实验数据表明在 Cu-Fe-S-Au 系统中的斑铜矿固溶体中,斑铜矿比中等固溶体(ISS, intermediate solid solution)中的 Au 含量高出一个数量级, Au 的含量与铜矿物组成有关, Au 含量随铜矿物的 Cu/Fe 变化而变化,斑铜矿中 Cu/Fe 比值约为 4~6,而中等固溶体(黄铜矿)的 Cu/Fe 比值约为 2~4 (Simon *et al.*, 2000)。但上述成分的斑铜矿不能与中等固溶体共存,而斑岩铜矿中与黄铜矿共存的斑铜矿 Cu/Fe 比多为 2~4 (Kesler *et al.*, 2002)。依据 Simon (2000) 中表格 4 的实验数据拟合的最佳曲线(图 4)显示,每增加 200°C , ISS 与斑铜矿中的 Au 含量增加一个数量级。上述结果反映出高温阶段 Au 的活动

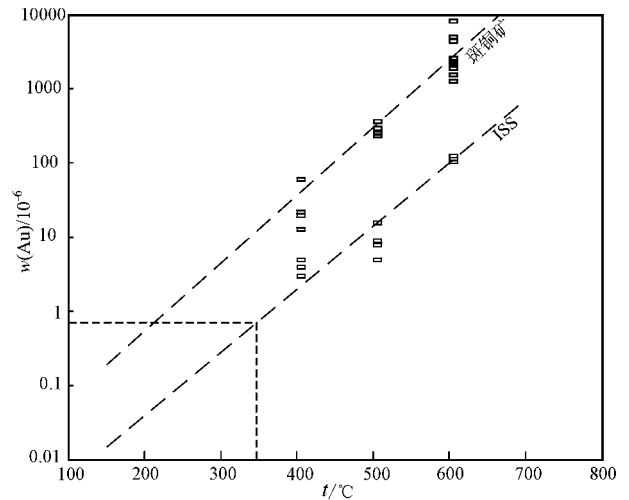


图 4 Cu-Fe-S 系统中温度与 Au 含量拟合图解

Fig. 4 Au grade versus temperature in the Cu-Fe-S system

性较低,因此 Au 易于高温阶段进入铜矿物中。同时拟合曲线表明在高温阶段($600\sim 700^\circ\text{C}$),黄铜矿中的 Au 含量可达 $n \times 10^{-4}$ 。

假设 I 号矿体中金全部存在于黄铜矿中(这里需要假设黄铜矿等同于 ISS),由拟合曲线计算 I 号矿体中黄铜矿中 Au 的饱和温度为 334°C ,在扣除部分黄铁矿与磁黄铁矿中的 Au 含量后,实际拟合的黄

铜矿 Au 饱和温度应该比上述计算的饱和温度低 $50 \sim 100^\circ C$, 这一温度远远低于斑岩铜矿中金属矿物的沉淀温度 ($350 \sim 450^\circ C$)。上述温度差进一步证明, Au 是在高温阶段铜-铁硫化物中, 随着温度的降低以及后期的热液蚀变作用, 从铜-铁硫化物中出溶, 而这也是磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿中含有少量金矿物的主要原因之一。

上述分析表明, 斑岩铜矿早期高温阶段, 金可无限混溶到铜-铁硫化物中, 因此 Au 在高温下不会达到饱和状态, 有可能全部进入到固溶体中, 而不会形成独立相矿物。同时由于高温状态下 Au 的溶解度很高, 因此斑岩铜矿中可能不存在有其他外来金的加入。而金发生出溶作用或重新分配只可能与温度的降低以及后期蚀变作用有关。

4.3 金的迁移特征

Kelser 等 (2002) 通过研究认为随着温度的降低或蚀变的影响, 金会发生出溶以及迁移作用。按照图 4 的拟合结果, 假设斑岩铜矿金属矿物在 $700^\circ C$ 开始沉淀, 此时的铜铁硫化物中 Au 的饱和载荷为 727

$\times 10^{-6}$; 当温度降低到 $600^\circ C$, 铜铁硫化物中 Au 的含量为 102×10^{-6} ; 当温度降低到 $400^\circ C$, 铜铁硫化物中 Au 含量为 2.03×10^{-6} 。上述温度梯度变化显示温度每降低 $100^\circ C$, 铜铁硫化物中 Au 含量降低约 1 个数量级。如果 ISS 在 $600^\circ C$ 开始沉淀, 当温度降低到 $400^\circ C$ 左右, 斑岩铜矿系统释放的金为 100×10^{-6} 。上述温度变化表明随着温度降低, 金易发生向外迁移, 与斑岩系统有关的浅成低温热液型金矿可能形成于上述过程 (Brimhall and Ghiorso, 1983; Hedenquist, 1995)。雄村斑岩铜矿地表岩石地球化学测量结果显示, Au 异常范围达 10 km , 沿北西向分布, I 号矿体与 II 号矿体均与 Au 的异常浓集中心重合 (图 5), 同时 I 号矿体北西西侧 1 km 处发现有洞嘎金矿, 该矿床普遍认为是浅成低温热液型金矿, 上述 Au 异常与洞嘎金矿的成矿物质很有可能起源于雄村斑岩铜矿系统。上述 Au 的迁移特征表明, 在冈底斯斑岩铜矿成矿带上应注重 Au 异常对于寻找相似矿床的指示作用。

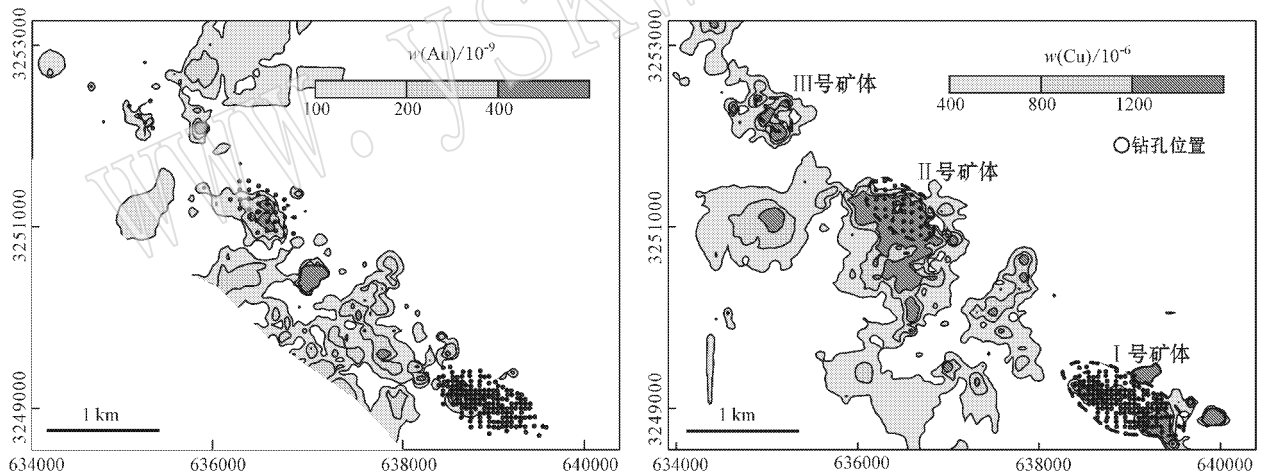


图 5 Au 与 Cu 的岩石地球化学异常图

Fig. 5 Geochemical anomaly map of Au and Cu

5 结论

(1) 雄村斑岩铜金矿 I 号矿体中金矿物以银金矿为主, 含少量或微量的金银矿、硫铋金矿、碲铋金矿。金矿物主要有以下 3 种赋存状态: ① 呈包裹金包裹于硫化物中, 载金矿物为黄铜矿和磁黄铁矿; ② 与硫化物边缘或与硫化物构成连晶结构, 载金矿物包括黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿; ③ 以显微粒金分

布于硅酸盐矿物中。

(2) 黄铜矿中的 Cu/Au 原子比值为 $13\ 532$, 远远高于整个矿体中的 Cu/Au 原子比值 ($3\ 210$), 同时同一颗黄铜矿颗粒中不同测点的 Au 含量相差很大 ($0 \sim 100 \times 10^{-6}$), 因此金不是以均匀分布的晶格金、晶隙金形成分布在金属硫化物中, 统计分析显示原生矿化中金主要赋存在黄铜矿边缘, 表明金来源于金属硫化物的出溶。

(3) 斑岩系统中早期高温阶段, 金可无限混溶

到铜-铁硫化物中,因此 Au 在高温下不会达到饱和状态,并可能全部进入到固溶体中,而不会形成独立相矿物。同时由于高温状态下 Au 的溶解度很高,因而斑岩铜矿中金可能不存在有其他外来金的加入。而金发生出溶作用或重新分配只可能与温度的降低以及后期蚀变作用有关。

(4) 随着温度的降低,斑岩系统金属熔融体中金溶解度呈数量级下降,金易发生向外迁移,雄村外围 10 km 范围内的金异常以及北西侧 1 km 处的洞嘎浅成低温热液型金矿中金可能形成于上述过程。

致谢 成都地质调查中心分析测试中心徐金沙老师在分析测试过程中给予作者极大的帮助,同时匿名审稿人对本文提出的许多宝贵的意见,在此一并表示感谢。

References

Arif J and Baker T. 2004. Gold paragenesis and chemistry at Batu Hijau, Indonesia: implications for gold-rich porphyry copper deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 39: 523~535.

Baldwin J T, Swain H D and Clark G H. 1978. Geology and grade distribution at the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea [J]. *Economic Geology*, 67: 1 019~1 033.

Brimhall G H and Ghiorso M S. 1983. Origin and ore-forming consequences of the advanced argillic alteration process in hypogene environments by magmatic gas contamination of meteoric fluids [J]. *Economic Geology*, 78: 73~90.

Cuddy A S and Kesler S E. 1982. Gold in the Granisle and Bell porphyry deposits [A]. Levinson A. Precious metals in the Northern Cordillera [C]. Association of Exploration Geochemists, Special Volume, 2: 139~155.

Hedenquist J W. 1995. High-sulfidation epithermal systems [J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 23: 263~289.

Huang Yong. 2013. Geology and Metallogeny of Xiongcu Porphyry Copper and Gold Deposit, Xietongmen Country, Tibet [D]. PhD Thesis of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).

Huang Yong, Tang Juxing, Ding Jun, et al. 2012. Element geochemical characteristics of No. II ore body of the Xiongcu porphyry copper-gold deposit in Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31 (3): 361~370 (in Chinese with English abstract).

Jones B K. 1992. Application of metal zoning to gold exploration in porphyry copper systems [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 43:

127~155.

Kesler S E, Chryssoulis S L and Simon G. 2002. Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate [J]. *Ore Geology Reviews*, 21: 103~124.

Lang J R, Rebagliati C M, Tafti R, et al. 2007. Discovery and geology of the Xietongmen porphyry Cu-Au-Ag deposit, Tibet Autonomous Region, Peoples Republic of China [A]. Case Histories of Discovery: Conference Proceedings, NewGenGold 2007, Perth, November, 2007, Conference Proceedings [C], 7~19.

Rubin J N and Kyle J R. 1997. Precious metal distribution in porphyry, skarn and replacement-type ore deposits of the Ertsberg (Gunung Bijih) district, Irian Jaya, Indonesia [J]. *Economic Geology*, 92: 535~551.

Sillitoe R H. 1979. Some thoughts on gold-rich porphyry copper deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 14: 161~174.

Simon G, Kesler S E and Essene E J. 2000. Gold in Porphyry copper deposits: Experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400° to 700 °C [J]. *Economic Geology*, 95: 259~269.

Spear F S. 1993. Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths [M]. Mineralogical Society of America Monograph, 799.

Tafti R. 2011. Metallogeny, geochronology and tectonic setting of the Gangdese belt, Southern Tibet, China [D]. Phd's Thesis, UBC.

Tang Juxing, Li Zhijun, Zhang Li, et al. 2010. Time limit for formation of main geological bodies in Xiongcu copper-gold deposit, Xietongmen County, Tibet: Evidence from zircon U-Pb ages and Re-Os age of molybdenite [J]. *Mineral Deposit*, 29(3): 461~475 (in Chinese with English abstract).

Tang Juxing, Zhang Li, Huang Yong, et al. 2009b. ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotope ages of main geological bodies in Xiongcu copper-gold deposit, Xietongmen County, Tibet, and their geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 759~769 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

黄勇. 2013. 西藏谢通门县雄村斑岩铜金矿床地质特征及成因研究 [D]. 成都理工大学博士论文.

黄勇,唐菊兴,丁俊,等. 2012. 西藏雄村斑岩铜金矿床 II 号矿体元素地球化学特征及其指示意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 31 (3): 361~370.

唐菊兴,李志军,张丽,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): 161~475.

唐菊兴,张丽,黄勇,等. 2009. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及地质意义 [J]. *矿床地质*, 28(6): 759~769.