

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2018.01.001

滇西北衙金多金属矿床成矿作用特征标志

周云满¹, 张长青², 和中华¹, 刘博³, 王利东¹

(1. 云南黄金矿业集团股份有限公司, 昆明 650299;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 核工业北京地质研究院, 遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室, 北京 100029)

摘要: 文章通过对北衙金多金属矿床成矿作用特征标志的系统总结, 认为从岩体内部到外接触带, 矿化样式以“脉-块体-层-脉”的内外多元结构模式产出: 岩体内部 Au-Fe(Cu) 矿体呈透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出; 岩体接触带附近的矽卡岩带围绕岩体呈环状分布, Au-Fe-Cu 矿体以大透镜状、块体状在矽卡岩带中断续产出; 外带 Au-Fe、Pb-Ag 矿体呈似层状、透镜状, 沿层间破碎带产出; 远程带 Au-Fe 矿体呈小透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出。矿体对应的矿物组合、成矿元素和蚀变分带具有自高温到低温的分布规律和矽卡岩型矿床的特征。矿床的热液成矿作用阶段可划分为早矽卡岩、晚矽卡岩、磁铁矿、石英硫化物以及碳酸盐五个热液阶段, 各阶段流体包裹体划分为富液相包裹体、富气相包裹体、含子晶矿物包裹体、富含 CO₂ 三相包裹体等四类。成矿年龄为 36.46 Ma—39.44 Ma, 与石英正长斑岩的成岩年龄 35.00 Ma—36.72 Ma 基本一致。矿床成矿深度范围为 0.7~2.2 km。矿床类型为斑岩-矽卡岩型金多金属矿床。北衙组碳酸盐岩(T₂b)+多期断裂构造系统(接触带构造、岩性界面及层间破碎带、断裂裂隙、不整合面构造)+喜马拉雅期富碱斑岩侵位构成了“三位一体”的成矿系统和成矿模式。

关键词: 北衙金多金属矿; 斑岩-矽卡岩型矿床; 成矿作用特征标志; 滇西北地区

中图分类号: P618.51; P613 **文献标识码:** A

0 引言

成矿作用特征标志的研究是勘查区“三位一体”找矿预测研究的核心内容之一, 也是矿体定位预测的主要依据; 成矿作用的总体产物统称为成矿作用标志, 而其中能够直接指示矿体赋存位置的和对找矿预测具有特殊意义的标志, 即为成矿作用特征标志^[1]。

北衙超大型金多金属矿床是云南黄金集团通过十余年来的持续勘查探明的云南第一个世界级超大型斑岩-矽卡岩型金多金属矿床, 这期间有许多学者对北衙金矿田斑岩的岩石类型与成岩成矿年龄、矿床地质特征与矿床成因、矿床模型及找矿模型、找矿

技术方法与找矿预测等方面进行了大量的讨论与研究, 取得了丰富的成果^[2-22]。近年来云南黄金集团组织科研团队开展了北衙整装勘查区“三位一体”找矿预测研究, 取得了较多新的进展^[23-42]。本文将针对北衙金多金属矿成矿作用产物及其特征, 在野外地质现象仔细观察、室内样品鉴定分析测试和对前人勘查及科研成果总结基础上, 系统总结和梳理对直接指导找矿具有现实意义的矿床成矿作用特征标志, 以期今后进一步的勘查工作提供参考。

1 成矿背景及矿床地质概述

北衙金多金属矿区地处西南三江复合造山带南段东侧的扬子地块、中咱地块与思茅地块三个 I 级

收稿日期: 2016-12-21; 改回日期: 2017-04-21; 责任编辑: 王传泰

作者简介: 周云满(1965—), 男, 正高级工程师, 博士, 2008年毕业于中国地质大学(北京), 长期从事地质矿产勘查、矿床地质及找矿预测研究工作。通信地址: 云南省昆明市官渡区福德路别样幸福城云南黄金大厦 1205 室, 云南黄金矿业集团股份有限公司; 邮政编码: 650299; E-mail: 1965yunman@sina.com

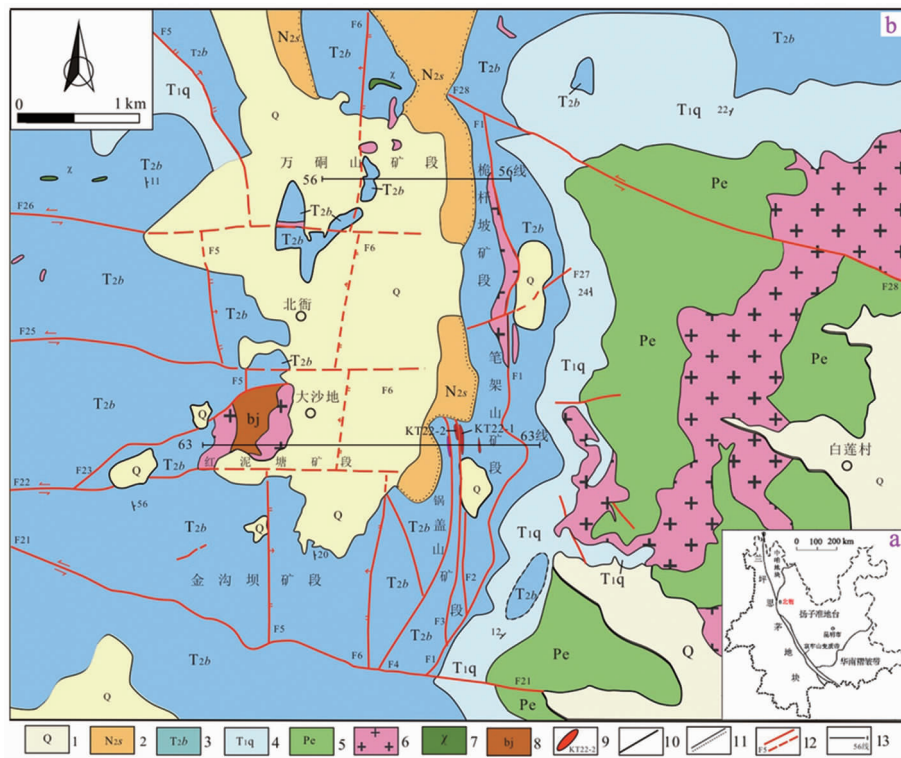


图 1 北衙金多金属矿区地质简图(据文献[44]修编)

Fig. 1 Simplified Geological map of the Beiya gold-polymetallic deposit

1. 第四系残坡积层; 2. 新近系上新统三营组; 3. 三叠系中统北衙组; 4. 三叠系下统青天堡组;
5. 二叠系上统峨眉山玄武岩组; 6. 石英正长斑岩; 7. 煌斑岩脉; 8. 隐爆角砾岩; 9. 矿体及编号;
10. 地质界线; 11. 不整合地质界线; 12. 实测、推测断层及编号; 13. 勘探线及编号

构造单元结合部之扬子地块西缘的丽江陆缘褶-断带西南缘鹤庆陆缘坳陷(图 1a)中,被夹持在 NNW 向哀牢山—金沙江断裂带、SN 向宾川—程海断裂和 NE 向丽江—木里断裂之间。成矿区划上属于特提斯成矿域与滨太平洋成矿域交汇过渡区域之上扬子陆块成矿省丽江—大理—金平 Au-Cu-Ni-Pd-Pt-Mo-Mn-Fe-Pb-Zn 成矿带(古生代—新生代)丽江亚带^[43],发育与斑岩有关的金、铜、钼等多金属矿;区域内的成岩成矿作用属于喜马拉雅期印-亚陆陆碰撞造山带在其东南缘构造转换带的远程效应^[19]。

区域内上震旦统一寒武系地层分布零星,为镁质碳酸盐岩和砂泥质岩建造;奥陶系一中三叠统为滨浅海相碳酸盐岩和砂泥质岩建造;印支期—燕山期全区处于隆起状态;新生代古近纪始新世—新近纪在山间盆地中堆积了河-湖相砂泥岩含煤建造。区域构造总体为近南北向的鹤庆—松桂—北衙宽缓复式向斜及马鞍山断裂,北衙向斜为复向斜的次级向斜。沿哀牢山—金沙江断裂带及其两侧分布有新生代富碱斑岩体,北衙金多金属矿就产出在此岩浆带中段的鹤庆—祥云富碱斑岩区的北端。

北衙金多金属矿区出露的地层有二叠系玄武岩组($P_2\beta$)、三叠系下统青天堡组(T_1q)、三叠系中统北衙组(T_2b)、新近系上新统三营组(N_2s)、第四系全新统(Q_4)。北衙组是矿区主要赋矿地层。矿区构造为 NNE 向宽缓短轴向斜,西翼出露地层 T_2b^{1-5} ,东翼出露地层 T_2b^{1-5} 、 T_2q 及 $P_2\beta$,核部地层产状平缓,地貌上形成 NS 向山间盆地。区内发育 SN、EW、NW、NE 向断裂(图 1b)。岩浆岩主要为喜马拉雅期碱性斑岩,分布有 8 个岩体,除大沙地岩体为隐伏岩体外,其它 7 个岩体出露地表,总面积 0.34 km^2 ,岩体规模一般较小。岩石类型以石英正长斑岩和石英二长斑岩为主,其次有黑云母石英正长斑岩、煌斑岩脉。

斑岩体分布于北衙向斜核部及其附近,沿近 SN、NE、NW 及 EW 向四组断层带侵入,其中万洞山半隐伏岩体、大沙地隐伏岩体、红泥塘岩体呈规模较大的岩株状。

矿床主矿体产于富碱斑岩与 T_2b 碳酸盐岩接触矽卡岩带的内、外接触带中,其次有表生作用形成的产于 N_2s 与 T_2b 及斑岩体不整合面上的风化-堆积

型矿体。根据矿体的空间分布、石英正长斑岩体与地层及构造的关系,划分为4个矿化带,10个矿体群^[44]。矿区共圈定金多金属矿体186个,其中主要矿体KT4、KT10、KT11、KT52、KT54、KT63单个矿体金资源量均在中型矿床规模以上。矿体呈似层状、透镜状、脉状赋存于富碱斑岩岩体与 T_2b 碳酸盐岩外接触带、层间破碎带、 T_2b 碳酸盐岩和岩体内部裂隙带中,围绕岩体呈大透镜状、不规则状分布,接触带矿体产状随岩体接触带产状同步变化(图2,图3)。矿体长400~1 680 m,宽570~1 420 m,平均厚4.27~13.27 m,平均品位 $w(\text{Au})=1.65\times 10^{-6}\sim 2.83\times 10^{-6}$, $w(\text{TFe})=25.06\%\sim 37.55\%$, $w(\text{mFe})=18.47\%\sim 28.11\%$, $w(\text{Cu})=0.63\%\sim 0.65\%$, $w(\text{Pb})=0.91\sim 4.04\%$, $w(\text{Zn})=0.28\%\sim 1.00\%$, $w(\text{Ag})=24.52\times 10^{-6}\sim 67.29\times 10^{-6}$ 。风化-堆积型矿体呈似层状赋存于 T_2b 与 N_2s 不整合接触面上,走向长1 840 m,宽420~500 m,厚0.90~35.32 m; $w(\text{Au})=0.90\times 10^{-6}\sim 20.24\times 10^{-6}$, w

(TFe)=25.06%~63.63%, $w(\text{Cu})=0.10\%\sim 1.29\%$, $w(\text{Pb})=1.21\%\sim 2.04\%$, $w(\text{Zn})=0.23\%\sim 0.70\%$, $w(\text{Ag})=15.36\times 10^{-6}\sim 23.33\times 10^{-6}$ 。

北衙金多金属矿典型矿体主要特征,详见表1所述。

2 成矿作用特征标志

2.1 矿体宏观地质特征标志

从北衙金多金属矿矿体赋存的空间部位、矿化样式、形态、产状、厚度、品位及其分布变化规律特征等方面研究表明:矿床矿体为以Au为主,共伴生Fe-Cu-Pb-Ag的多金属矿化类型;Au-Fe-Cu主矿体围绕石英正长斑岩体分布,以大透镜状、块体状、不规则状产于斑岩与 T_2b 碳酸盐岩接触砂卡岩带以及内接触带中,平面上分布于岩体周边100~500 m范围内;Au-Fe(Cu)、Pb-Ag矿体以似层状、脉状、透镜

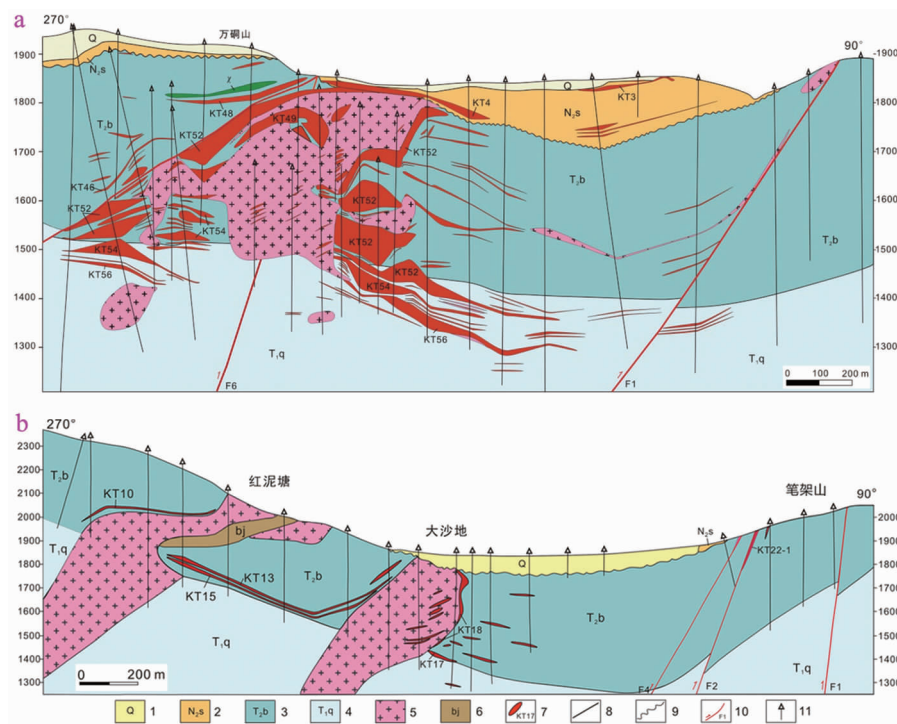


图2 北衙金多金属矿56、63勘探线剖面
(据文献[44]修编)

Fig. 2 Geological section along No. 56 and 63 exploration lines
in the Beiya gold-polymetallic deposit

a. 万嗣山矿段56勘探线剖面图;b. 红泥塘矿段63勘探线剖面图

1. 第四系沉积物;2. 上新统三营组砂砾岩、含砂砾黏土岩;
3. 三叠系中统北衙组碳酸盐岩;4. 三叠系下统青天堡组砂岩;5. 石英正长斑岩;6. 煌斑岩;
7. 金多金属矿体及编号;8. 地质界线;9. 不整合接触地质界线;10. 断层及编号;11. 钻孔

表 1 北衙金多金属矿床矿化类型及主要矿体地质特征

Table 1 Geological features of main ore bodys and mineralization typs of the Beiya gold-polymetallic deposit

矿化类型	与喜马拉雅中期富碱斑岩有关 斑岩-砂卡岩型金多金属矿床				表生作用形成 风化-堆积型金矿床
	斑岩接触带砂卡岩型	层间破碎带热液脉型	硅钙型型	斑岩内热液脉型	残坡积型
矿化元素	Au-Fe-Cu	Au-Fe-Cu	Au-Fe(Cu)、Pb-Ag	Au-Fe(Cu)	Au-Fe
典型矿体	KT52 矿体	KT63 矿体	KT54 矿体	KT49 矿体	KT4B 矿体
基本特征	矿体产于万洞山矿段,呈似层状赋存于富碱斑岩体与 T_2b 碳酸盐岩外接触带,围绕岩体环状分布,产状随岩体接触带产状同步变化,南北走向长近 1680 m,东西宽 113~1420 m,厚 0.8~115.26 m $w(\text{Au})=0.86 \times 10^{-6} \sim 239 \times 10^{-6}$, $w(\text{TFe})=22.37\% \sim 66.94\%$, $w(\text{mFe})=16.04\% \sim 52.46\%$, $w(\text{Cu})=0.20\% \sim 25.72\%$, $w(\text{Ag})=29.75 \times 10^{-6} \sim 44.60 \times 10^{-6}$ 金资源储量 > 200 t, 铜 > 30×10^4 t, 全铁矿石 > 1100×10^4 t, 银 > 4000 t	矿体产于万洞山矿段,呈透镜状-似层状、脉状赋存于 T_2b 碳酸盐岩层间破碎带中,走向 174~540 m,宽 100~810 m,厚 1.0~36.88 m $w(\text{Au})=1.67 \times 10^{-6} \sim 3.12 \times 10^{-6}$, $w(\text{TFe})=31.44\% \sim 38.63\%$, $w(\text{mFe})=18.15\% \sim 52.19\%$, $w(\text{Cu})=0.34\% \sim 7.72\%$, $w(\text{Ag})=29.75 \times 10^{-6} \sim 44.60 \times 10^{-6}$ 金资源储量 > 10 t, 铜 > 2×10^4 t, 全铁矿石 > 600×10^4 t, 银 360 t	矿体产于万洞山矿段,呈透镜状-似层状赋存于 T_2b 碳酸盐岩及 T_{1q} 碎屑岩接触面附近,走向长 450~1600 m,宽 110~1100 m,厚 0.77~44.86 m $w(\text{Au})=1.50 \times 10^{-6} \sim 45.98 \times 10^{-6}$, $w(\text{mFe})=16.01\% \sim 48.24\%$, $w(\text{Cu})=0.3\% \sim 10.62\%$, $w(\text{Pb})=0.01\% \sim 2.58\%$, $w(\text{Ag})=2.20 \times 10^{-6} \sim 164 \times 10^{-6}$ 金资源储量 > 20 t, 铜 > 8×10^4 t, 全铁矿石 1300×10^4 t, 银 400 t	矿体产于万洞山矿段,呈透镜状赋存于岩体内部裂隙带中,走向长 105 m,宽一般数十 m,厚 12.63~62.72 m $w(\text{Au})=1.08 \times 10^{-6} \sim 2.06 \times 10^{-6}$, $w(\text{TFe})=21.04\% \sim 45.52\%$, $w(\text{Cu})=0.37\% \sim 1.25\%$, $w(\text{Ag})=29.75 \times 10^{-6} \sim 44.60 \times 10^{-6}$ 金资源储量 < 2 t, 铜 0.40×10^4 t, 铁矿 100×10^4 t, 银 > 40 t	矿体产于万洞山-红泥塘矿段,呈似层状赋存 T_2b 与 N_2s 不整合接触面上。走向长 1840 m,宽 420~500 m,厚 0.90~35.32 m $w(\text{Au})=0.90 \times 10^{-6} \sim 20.24 \times 10^{-6}$, $w(\text{TFe})=25.06\% \sim 63.63\%$, $w(\text{Cu})=0.10\% \sim 1.29\%$, $w(\text{Ag})=15.36 \times 10^{-6} \sim 23.33 \times 10^{-6}$ 金资源储量 > 8 t, 铜 7×10^4 t, 全铁矿 > 400×10^4 t, 银 80 t
金属矿物	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、菱铁矿、赤铁矿、方铅矿、磁黄铁矿、闪锌矿	褐铁矿、磁铁矿、孔雀石、方铅矿、闪锌矿、褐铁矿、白铅矿	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿	磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、褐铁矿、白铅矿	褐铁矿、白铅矿、磁铁矿
脉石矿物	石榴子石、透辉石、绿泥石、绿帘石、方解石、白云石、石英	方解石、白云石、石英、高岭土	方解石、白云石、石英、长石、石榴石、绿帘石	石英、长石、透辉石、绿泥石、绿帘石、高岭土	黏土、砂砾石
矿石结构构造	包含结构、它形粒状结构、自形晶结构、交代残余结构、块状构造、星点状构造等	它形粒状结构、交代残余结构、蜂巢状构造、土状构造、粉末状构造	粒状结构、包含结构、自形晶结构、交代残余结构、块状构造、星点状构造等	粒状结构、包含结构、交代残余结构、块状构造、星点状构造等	胶状结构、假象结构、蜂巢状构造、土状构造、粉末状构造、块状构造
蚀变类型	砂卡岩化、硅化、大理岩化、绿泥石化、碳酸盐化、磁铁矿化、黄铁矿化、黄铜矿化、辉钼矿化	黏土化、褐铁矿化、碳酸盐化、磁铁矿化、黄铁矿化、黄铜矿化	硅化、碳酸盐化、角闪岩化、黄铁矿化、黄铜矿化、方铅矿化、闪锌矿化	黏土化、褐铁矿化、硅化、砂卡岩化、磁铁矿化、黄铁矿化、黄铜矿化、辉钼矿化	褐铁矿化、方解石化
控矿因素	岩体接触蚀变带控矿,岩体分支分叉,突出及转折部位为成矿有利部位	层间破碎带、裂隙带、虚脱带	层位及岩性界面	节理裂隙带	不整合接触面
矿体规模	金矿超大型,共伴生矿铅、银、铜、铁矿中大型	金矿小-中型,共伴生铁、铅、银小-中型	金矿小-大型,共伴生铅、银小-中型	金小型,共伴生铅、银、铁、铜小型	金小-中型,共伴生铁、银小-中型
同类矿体	KT10、KT11、KT17、KT18、KT52 等	KT43、KT46、KT57、KT63、KT22 等	KT20、KT31、KT32、KT54、KT55、KT56 等	KT49、KT50 等	KT1、KT3、KT4A-KT4E、KT5 等

状产于外接触带 T_2b 碳酸盐岩的层间破碎带和断层破碎带中,平面上分布于岩体周边 100~500 m 范围以外至几 km; Au-Fe(Cu) 矿体以脉状、囊状小富矿脉发育于石英正长斑岩体内部和远程带陡立裂隙中(图 2、图 3)。矿体垂向上分布标高 2 150 m—1 240 m,矿体分布最大垂深 910 m。矿体宏观地质特征标志可归纳为:矿化样式以“脉-块体-层-脉”的内外多元结构模式产出——岩体内部 Au-Fe(Cu) 矿体呈透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出,岩体接触带附近砂卡岩型 Au-Fe-Cu 矿体呈大透镜状、

块体状、不规则状产出,外带 Au-Fe 和 Pb-Ag 矿体以似层状、透镜状沿层间破碎带产出,远程带 Au-Fe 矿体呈小透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出。

表生作用形成的产于 N_2s 与 T_2b 及斑岩体不整合面上的风化-堆积型似层状 Fe-Au 氧化矿体,空间上分布于北衙盆地核部附近低凹负地形中,是又一个重要的特征标志。该类矿体在盆地低凹处形成厚大矿体,过渡地段逐渐变薄,凸起处矿体基本尖灭,厚度变化大,品位相对较低。矿体的垂向上分布

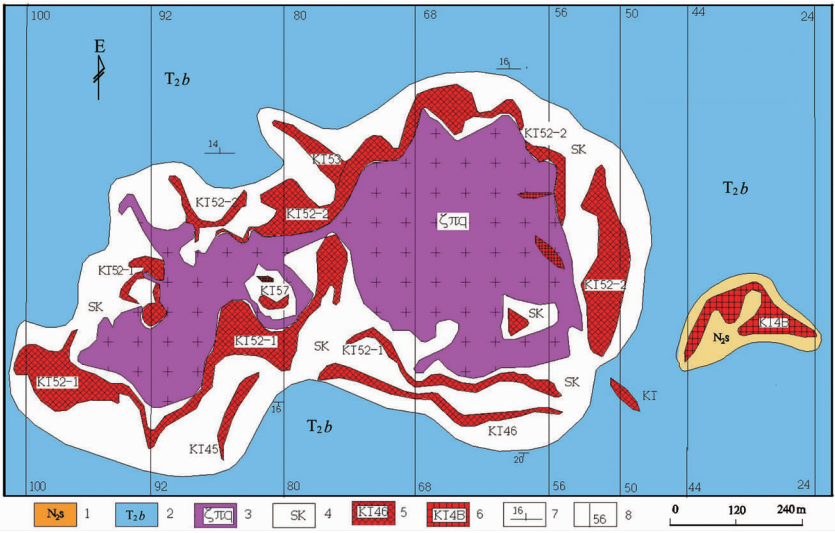


图 3 北衙金多金属矿万洞山矿段 1654 m 中段地质图
(据文献[46]修编)

Fig. 3 Geological sketch of the level 1654 of the Wandongshan domain of the Beiya gold-polymetallic deposit

1. 上新统三营组砂砾岩、含砂砾黏土岩;2. 三叠系中统北衙组碳酸盐岩;
3. 石英正长斑岩;4. 矽卡岩(带);5. 金多金属矿体及编号;6. “古红土”型金矿体及编号;
7. 地层产状;8. 勘探线及编号

标高为 1 860 m—1 740 m,分布最大垂深 120 m,矿体规模为大型。类似矿体有 KT1、KT3、KT4A—KT4E、KT5 等,规模一般为小型。该类型矿体的存在,预示着周边和深部可能找到原生的成矿系统及其矿体。

2.2 矿石矿物特征标志

(1) 矿石矿物组成

北衙金多金属矿矿石类型主要有氧化矿石和原生矿石,混合矿石较少。原生矿石金属矿物主要有磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、菱铁矿、赤铁矿、方铅矿、磁黄铁矿、闪锌矿等,氧化矿石金属矿物主要有褐铁矿、孔雀石、方铅矿、白铅矿、菱锌矿、角银矿。脉石矿物主要有石榴子石、透辉石、硅灰石、方柱石、绿泥石、绿帘石、方解石、白云石、石英、高岭土。原生矿石具包含结构、它形粒状结构、自形晶结构、交代残余结构、块状构造、星点状构造等;氧化矿具假象结构、胶状结构、蜂巢状构造、土状构造、粉末状构造等。矿石主要矿物特征及嵌布关系,详见表 2 所述。

归纳北衙金多金属矿矿物共生组合关系,有 8 种组合方式:①磁铁矿—赤铁矿—自然金—石英—泥质组合,②自然金—石英—泥质组合,③黄铁矿—磁铁矿—石英—泥质组合,④黄铜矿—黄铁矿—自然金—白云石、透辉石—石英组合,⑤黄铁矿—黄铜矿—石榴子石、透辉石组合,⑥黄铁矿—黄铜矿—石英—泥质组合,⑦磁

铁矿—黄铁矿—黄铜矿—自然金—白云石、透辉石组合,⑧黄铁矿—黄铜矿—方铅矿—自然金—白云石组合。

(2) 矿物生成顺序和成矿阶段

北衙金多金属矿成矿过程具有明显的多期、多阶段特点,可划分为两期(内生成矿期、表生氧化期)五个成矿阶段(矽卡岩阶段、磁铁矿阶段、石英硫化物阶段、碳酸盐阶段^[36]、表生氧化阶段)。成矿过程中的矿物生成序列,见表 3 所述。

内生成矿期(热液成矿期)。①矽卡岩阶段可分为早、晚两期:矽卡岩阶段早期,岩体侵位使围岩中的矿物在接触热变质过程中发生重结晶,使灰岩变为大理岩,砂岩、泥质灰岩等变质为角岩。早期在岩浆流体交代作用下,碳酸盐岩围岩发生矽卡岩化作用,形成石榴石透辉石矽卡岩;岩体内发生广泛的钾化,从岩浆晚期的自变质作用开始一直延续到主成矿期,以钾长石的大量出现为特征;钾化阶段的晚期伴随有金属沉淀。矽卡岩化阶段晚期,岩浆热液大量范围的交代北衙组灰岩,形成大量的石榴石透辉石矽卡岩。②磁铁矿阶段为退化蚀变阶段,退化蚀变作用对石榴石透辉石矽卡岩进行交代,形成大量的磁铁矿与含水硅酸盐矿物,如绿泥石、绿帘石、透闪石等,并有少量石英、黄铁矿形成。③石英—硫化物阶段,该阶段为主要成矿阶段,以大量富集金属矿物为特征。

表 2 北衙金多金属矿床矿石主要矿物特征

Table 2 Characteristics of the ore minerals in the Beiya gold-polymetallic deposit

矿物类别	主要矿物	矿物特征及嵌布关系
金 属 矿 物	金矿物	自然金(Ag 含量 $<20\%$),其次为银金矿(Ag 含量 $20\%\sim 50\%$)。嵌布于褐铁矿中的金矿物绝大部分为裂隙金,少量的包裹金,微量的粒间金,部分嵌布在黄铁矿裂隙或黄铁矿与其它硫化物粒间,偶尔以微粒形式嵌布在石英等脉石矿物裂隙或包裹在其中。金矿物粒度整体较细,大部分在 0.020 mm 以下,占 77.65%
	银矿物	独立银矿物为辉银矿,少量的自然银,微量的辉铜银矿、硫铜银矿、硫银铋矿,少量铜蓝中含银。银矿物常呈微粒嵌布在褐铁矿裂隙中或褐铁矿与白铅矿、脉石矿物粒间,部分银矿物呈微粒状包裹在褐铁矿、白铅矿、石英等脉石矿物中,也有呈微粒状嵌布在脉石矿物粒间或脉石矿物与黄铁矿等其它金属矿物粒间,偶尔呈单体形式产出。粒度均分布在 0.020 mm 以下, 0.010 mm 以下的分布率高达 76.89%
	褐铁矿	为针铁矿、纤铁矿、水针铁矿与黏土矿物的混合物。褐铁矿与黑云母、高岭石等脉石矿物或锰铅矿、硬锰矿以不同形态紧密嵌生,褐铁矿中常分散微粒锰铅矿或硬锰矿;少部分褐铁矿与赤铁矿、磁铁矿等铁矿物共生,常呈复杂的穿插关系,接触界面不平整;褐铁矿具菱铁矿假象状,二者常呈集合体形式产出;褐铁矿中包裹黄铁矿、自然铜等矿物
	赤铁矿	呈不规则状与褐铁矿交代连生,其接触界面不平整;部分赤铁矿呈不规则状形式产出;赤铁矿呈板状与磁铁矿、褐铁矿交代连生或沿磁铁矿裂隙交代产出,赤铁矿沿菱铁矿边缘交代,形成网状脉;偶尔可见赤铁矿呈鲕状或胶状嵌布于脉石矿物中
	菱铁矿	呈中粗粒不规则单体形式产出;其次,菱铁矿与黄铁矿紧密连生或呈脉状充填在黄铁矿裂隙中,菱铁矿呈细粒不规则状与脉石矿物连生产出,菱铁矿与褐铁矿呈复杂的穿插关系连生;部分粗粒菱铁矿中可见包裹有微细粒方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿及黄铁矿等金属硫化物
	磁铁矿	磁铁矿呈自形-半自形晶体,粒状、放射状集合体产出,常见八面体晶形,粒度一般较细,粒度主要集中在 $0.038\sim 0.150\text{ mm}$ 之间,个别粒度较粗,可达 0.300 mm 。磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿共生。氧化矿石的磁铁矿被赤铁矿、褐铁矿不同程度交代
	黄铜矿	呈不规则粒状及粒状集合体产出,少量呈微细粒浸染状分布于菱铁矿以及石英等脉石矿物中;黄铜矿常与方铅矿连生或包裹在粗粒方铅矿中;黄铜矿与黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿等硫化物共生;可见黄铜矿被斑铜矿、辉铜矿、铜蓝等铜矿物交代产出。黄铜矿嵌布粒度相对较细,主要集中在 $0.010\sim 0.043\text{ mm}$ 之间
	黄铁矿	呈不规则状嵌布在菱铁矿中或与菱铁矿紧密连生;黄铁矿与方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿等硫化物紧密共生;黄铁矿被褐铁矿交代连生或呈微细粒残余包裹在褐铁矿中;偶尔见黄铁矿中包裹细粒方铅矿。黄铁矿嵌布粒度主要集中在 $0.043\sim 0.104\text{ mm}$ 之间,个别黄铁矿粒度较粗,可达 0.3 mm
	磁黄铁矿	属单斜磁黄铁矿,在矿石中多与黄铜矿连生,呈微细粒包含于黄铜矿中,并可见白铁矿交代磁黄铁矿,形成指纹胶状白铁矿。具低铁富硫特点,具有易磁悬浮特点
	辉钼矿	在矿区分布不普遍,只局部见产于岩体与围岩接触带附近的矽卡岩及斑岩中,呈片状、鳞片状或细小分散粒状
脉 石 矿 物	闪锌矿	呈粗细不均的不规则状分布在脉石矿物中,闪锌矿与方铅矿、黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿共生,闪锌矿中包裹细粒黄铜矿、磁黄铁矿;闪锌矿嵌布粒度主要集中在 $0.020\sim 0.074\text{ mm}$ 之间
	方铅矿	多呈自形-半自形产出,少量呈它形晶粒状嵌布在脉石矿物中;方铅矿常呈交代残余浸染于白铅矿中,部分方铅矿的边缘或裂隙处被白铅矿不同程度地交代;方铅矿与黄铁矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿紧密连生或包裹在其中,方铅矿嵌布粒度粗细不均匀
	石榴子石	有钙铝榴石、钙铁榴石,呈它形-半自形粒状集合体,钙铁榴石发育环带结构,具双晶,粒径最大大于 2 mm ,最小 $<0.1\text{ mm}$,一般 $0.2\sim 1\text{ mm}$ 。石榴子石内分布浸染状、细脉状辉钼矿-磁铁矿-黄铜矿-黄铁矿,或被其充填交代。石榴子石被晚期方解石-石英脉穿插
	透辉石	呈它形-半自形柱状集合体,粒径最大大于 1 mm ,最小 $<0.1\text{ mm}$,一般 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$,被晚期方解石-石英脉穿插
	绿泥石	浅黄绿色至绿色,自形-半自形细粒状结构,蠕虫状、细小的鳞片状集合体,部分呈细小的放射状或片状,交代矽卡岩在裂隙和表面呈薄膜状,粒径最小 $<0.1\text{ mm}$,一般 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$
	方解石	它形粒状,粒径 $0.02\sim 0.1\text{ mm}$,次生方解石粒径较大,约 0.2 mm 左右,铁质沿方解石颗粒间分布呈胶结物状
	绿帘石	浅黄绿色或绿色,自形-半自形细粒状、蠕虫状、放射状集合体,玻璃光泽,硬度较绿泥石大,充填于矽卡岩裂隙和表面呈薄膜状,粒径最小 $<0.1\text{ mm}$,一般 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$
	白云石	有铁白云石、白云石,多为它形粒状,极少自形晶,粒径最大 0.4 mm 左右,最小 $<0.04\text{ mm}$,一般 $0.04\sim 0.1\text{ mm}$
	石英	矿石中主要脉石矿物,多为它形粒状,极少自形晶,粒径最大 0.6 mm 左右,最小 $<0.01\text{ mm}$,一般 $0.02\sim 0.4\text{ mm}$,自然金与其连生,或分布于颗粒间及细脉中
	正长石	肉红色、灰白色或无色,以前者为主,具卡式双晶,斑晶多自形,部分已高岭石化,仍保留其假象,其粒径最大 5 mm ,最小 $<0.01\text{ mm}$,一般 $0.4\sim 2\text{ mm}$
	云母	有黑云母、白云母、绢云母,片状集合体,粒径最大 1 mm 以上,最小 $<0.04\text{ mm}$,一般 $0.02\sim 1\text{ mm}$

在流体温度降低时,流体中的 Cu、Au、Pb、Zn 等元素进入体系,产生金属矿物,也可选择性填隙交代早期形成的石榴石透辉石矽卡岩与磁铁矿,形成磁黄铁矿、黄铁矿及黄铜矿等。该阶段早期硫化物以磁黄铁矿、黄铁矿及黄铜矿为主,伴有辉钼矿、自然金

及银金矿;晚期以方铅矿、闪锌矿为主,含少量黄铁矿。④碳酸盐阶段,以方解石的大量出现为特征,伴有菱铁矿、黄铁矿等,方解石常充填于早期形成的磁铁矿、黄铁矿等颗粒间隙,或呈脉状穿插早期形成的矽卡岩和矿石等,大量较纯方解石的出现标志着岩

表 3 北衙金多金属矿床矿物生成序列

Table 3 Mineral formation succession of the Beiya gold-polymetallic deposit

矿物	内生成矿期				后生氧化期
	矽卡岩阶段	退化蚀变阶段			
		磁铁矿阶段	石英-硫化物阶段	碳酸盐阶段	
黑云母	_____				
石榴子石	_____				
辉石	_____				
硅灰石	_____				
钾长石	_____				
磁铁矿		_____			
绿帘石		_____			
绿泥石		_____			
金云母		_____			
石英	_____				
绢云母		_____			
菱铁矿		_____			
方解石		_____			
萤石			_____		
磁黄铁矿		_____			
黄铁矿		_____			
黄铜矿		_____			
自然金			_____		
辉钼矿			_____		
闪锌矿			_____		
方铅矿			_____		
辉铜矿			_____		
铜蓝					_____
孔雀石					_____
褐铁矿					_____
白铅矿					_____
菱锌矿					_____
高岭石					_____

浆热液作用结束。

表生氧化期:由于后期构造运动,原生矿体被抬升出露地表,遭受氧化淋滤,使原生矿体中的黄铁矿被氧为褐铁矿、黄钾铁矾,黄铜矿被分解为硫酸铜、碳酸铜,磁铁矿被氧化为赤铁矿、褐铁矿;矿石多为砂土状、蜂窝状;岩体发生高岭土化。

(3)矿化及矿物空间分带标志

矿区矿化及矿物空间分带,具有矽卡岩型矿床的特征标志。以原生矿体为例,在平面上和剖面上宏观矿物分带标志是:岩体内部脉状 Au-Fe(Cu)矿体矿物组合以磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿-石英(大沙地有辉钼矿)为主;接触带块状 Au-Fe-Cu 矿体矿物组合以磁铁矿-磁黄铁矿-黄铁矿-黄铜矿-石榴子石、透辉石-石英(大沙地有辉钼矿)为主,反映了中高温矽卡岩矿物组合和中温矿物组合特征;外带似层状、透镜状 Au-Fe 和 Pb-Ag 矿体矿物组合以磁铁矿-磁黄铁矿-黄铁矿-方铅矿-石英为主;远程带的脉状 Au-Fe 矿体矿物组合以黄铁矿-方铅矿-石英-方解石为主,显示中、低温金属矿物的组合特征。围岩中出现绿泥石、绿帘石、透闪石、方解石等矿物组合是重要的近矿围岩矿物组合标志。垂向上矿物分带不

明显,主要与距离岩体的远近有关。

(4)蚀变分带特征

自斑岩体内部至北衙组(T₂b)碳酸盐岩,蚀变分带依次为:钾化、硅化石英正长斑岩→透辉石石榴石矽卡岩带→硅灰石透辉石矽卡岩带→透辉石透闪石矽卡岩带→磁铁矿硫化物带→大理岩化灰岩带→碳酸盐岩(图 4);而在不同的部位,蚀变类型发育程度有差异。

按蚀变矿物组合特征及分布规律,一般可划分为:

硅钾化带:斑岩体内发育大量钾长石为特征,呈粉色—浅红色,风化后呈褐、黄等杂色。

矽卡岩带:空间位置上分布于岩体与围岩之间接触带中,围绕岩体呈环状分布(见图 3),靠近斑岩一侧以发育透辉石石榴石矽卡岩带为特征,围岩一侧发育硅灰石透辉石矽卡岩带→透辉石透闪石矽卡岩带,形态及厚度变化极大。

磁铁矿硫化物带:发育大量的磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿及透闪石、绿泥石矽卡岩矿物,叠加有各种大量的蚀变矿物,是主要的金多金属矿化带。

大理岩化带:以发育大理岩化为特征,此外,在岩体内部裂隙带和外带大理岩化灰岩层间破碎带中,发



图 4 万铜山岩体西侧接触带矽卡岩分带图

Fig. 4 Photos showing zones of the skarn between stock and wall rock on Western Wandongshan stock

①钾化硅化石英正长斑岩;②透辉石石榴石矽卡岩带;③透辉石透闪石矽卡岩带;
④含金磁铁矿硫化物带;⑤新近系上新统三营组(N₂s)底部铁金矿体

育大量石英细脉和团块及大量细脉状黄铁矿、黄铜矿。

2.3 成矿元素化学成分标志

(1) 矿石化学成分

氧化矿石主要成分为 Fe_2O_3 和 SiO_2 , 平均含量 $w(\text{TFe})=23.79\%\sim 46.11\%$, $w(\text{SiO}_2)=11.8\%\sim 22.1\%$; 次为 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO , 平均含量 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.82\%\sim 22.1\%$, $w(\text{MgO})=0.51\%\sim 1.08\%$, $w(\text{CaO})=0.16\%\sim 2.56\%$; 尚有少量 MnO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 等。

原生矿石主要成分为 FeO 、 FeS 和 SiO_2 , 平均含量 $w(\text{TFe})=27.12\%\sim 34.61\%$, $w(\text{SiO}_2)=14.92\%\sim 25.44\%$; 次为 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 S , 平均含量 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=1.76\%\sim 3.95\%$, $w(\text{MgO})=1.53\%\sim 1.53\%$, $w(\text{CaO})=1.24\%\sim 4.19\%$, $w(\text{S})=5.63\%\sim 14.76\%$; 尚有少量 MnO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 等。

北衙金多金属矿区矿石化学成分特征, 详见表 4 所述。

(2) 成矿元素分带特征

成矿元素从岩体内部向外接触带到远程带元素组合依次为: $\text{Fe-Au}(\text{Cu})\rightarrow\text{Au-Cu-Fe}$ 、 Au-Fe 、 $\text{Au-Fe-Pb-Ag}\rightarrow\text{Pb-Ag}(\text{Au})$; 从深部到地表元素组合依次为: $\text{Cu-Au}(\text{Mo})\rightarrow\text{Cu-Au}\rightarrow\text{Au-Cu-Fe}\rightarrow\text{Au-Fe-Pb-Ag}$ 分带, 反映了从高温到低温元素组合的变化规律^[24]。万铜山岩体内部陡立的裂隙中形成充填型脉状铁金矿体, 万铜山和红泥塘岩体接触带矽卡岩中形成交代型规模较大形态复杂的不规则状金铜铁矿体, 大沙地岩体接触带矽卡岩中以铁铜矿体为主, 外带—远程带的笔架山、芹河、金钩坝、陈家院等矿段的层间破碎

带、陡立断裂中形成脉状铅锌银矿体、金铁矿体。

2.4 成矿物理化学条件标志

(1) 流体包裹体成分

北衙金多金属矿成矿流体包裹体研究表明, 矿床各成矿阶段流体包裹体划分为富液相包裹体、富气相包裹体、含子矿物包裹体、富含 CO_2 三相包裹体等 4 类。流体包裹体气相成分主要是 H_2O , 其次为 CO_2 、 N_2 、 CH_4 , 液相成分主要富含 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 等阴、阳离子。流体包裹体主要属 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系。与斑岩型矿化有关的成矿流体为中—高温 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系热液, 与矽卡岩矿化相关成矿流体为一种高温的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 及 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系热液, 而与外围似层状铅锌银矿化相关的成矿流体则为中温的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系热液。流体包裹体的 $w(\text{Na}^+)/w(\text{K}^+)$ 值, 早期石英中流体包裹体的较低 ($0.55\sim 1.06$), 晚期方解石、白云石中流体包裹体的较高 ($3.12\sim 11.08$), 表明成矿流体早期以岩浆热液为主, 较晚期可能混合了大气降水。

在万铜山矿段与红泥塘矿段的流体包裹体成分有差异: 在气相成分中, 万铜山矿段 CH_4 、 C_2H_6 、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 值较高, 而 H_2S 值较低, 斑岩中的石英细脉具有非常高的 CO_2 值; 液相成分中, 红泥塘矿段的 F^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 成分普遍较高, 红泥塘矿段 $w(\text{F}^-)/w(\text{Cl}^-)$ 、 $w(\text{SO}_4^{2-})/w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{K}^+)/w(\text{Na}^+)$ 值分别为 $0.99\sim 2.87$ 、 $3.52\sim 41.5$ 和 $0.94\sim 1.82$ ^[34,36], 而万铜山矿段的 $w(\text{F}^-)/w(\text{Cl}^-)$ 、 $w(\text{SO}_4^{2-})/w(\text{Cl}^-)$ 和 $w(\text{K}^+)/w(\text{Na}^+)$ 值分别为 $0.08\sim 0.40$ 、 $0.81\sim 2.2$ 和 $0.25\sim 0.32$ 。

表 4 北衙金多金属矿区矿石化学成分分析结果

Table 4 Ore chemical composition of the Beiya gold-polymetallic deposit

成分	矿石类型	残坡积型		氧化物	原生矿				
		金铁矿石	金矿石	金铁矿石	铁铜矿石		金铁铜矿石		金铁矿石
		平均含量	平均含量	平均含量	含量区间	平均值	含量区间	平均值	含量区间 平均值
SiO ₂		22.1	11.8	18.37	24.32~26.56	25.44	15.36~42.25	23.18	3.02~26.82 14.92
K ₂ O		0.46	0.28	0.27	0.18~0.43	0.31	0.16~0.67	0.39	0.07~0.34 0.21
Na ₂ O		0.05	0.04	0.13	0.11~0.17	0.14	0.06~0.13	0.1	0.04~0.05 0.05
CaO		0.16	2.56	1.57	3.38~5	4.19	0.24~2.42	1.24	1.08~2.44 1.76
MgO		0.69	1.08	0.51	1.27~1.87	1.57	1.25~2	1.53	1.94~2.54 2.24
Al ₂ O ₃		9.33	2.37	0.82	1.71~3.26	2.49	0.75~3.30	1.76	3.32~4.57 3.95
S		0.05	0.86	0.18	10.66~17.32	13.99	5.54~21.16	14.76	4.32~6.94 5.63
P		0.18	0.03	0.033	0.003~0.023	0.013	0.007~0.04	0.024	0.01~0.05 0.03
As		0.06	0.94	0.12	0.037~0.14	0.089	0.015~0.11	0.066	0.21~1.22 0.72
Co		0	0	0.004	0.011~0.012	0.012	0.003~0.01	0.006	0 0
Cu		0.12	0.03	0.28	0.61~0.81	0.71	0.44~2.07	1.188	0.04~0.12 0.08
Pb		1.92	1.69	0.35	0.032~0.13	0.081	0.055~1	0.288	0.08~5.90 2.99
Zn		0.2	2.94	0.28	0.039~0.065	0.052	0.026~2.02	0.486	0.13~1.08 0.61
V		0.04	0.04	0.001	0.001~0.004	0.003	0.001~0.01	0.003	0.01~0.07 0.04
TiO ₂		0.5	0.19	0.007	0.024~0.027	0.026	0.015~0.31	0.082	0.04~0.50 0.27
TFe		32.25	23.79	46.11	30.04~32.32	31.18	25.81~40.34	34.61	23.91~30.32 27.12
MnO		3.34	12.2	0.77	0.11~0.19	0.15	0.02~0.93	0.422	3.51~6.02 4.77
Ni		0	0	0.004	0.003~0.004	0.004	0.00~0.003	0.002	0 0
Au		1.52	1.05	5.38	0.18~0.36	0.27	1.75~9.91	4.958	1.05~8.06 4.56
Ag		4.2	96.4	63.6	15.1~108	61.55	30.6~104	62.9	32.10~78.40 55.25
Sn		0	0	0.026	0.018~0.026	0.022	0.00~0.028	0.016	0 0
W		0.01	0	0.05	0.056~0.061	0.059	0.01~0.063	0.035	0.00~0.02 0.01
Mo		0	0	0.004	0.001~0.001	0.001	0.00~0.014	0.006	0 0
Bi		0	0	0.13	0.006~0.025	0.016	0.01~0.034	0.02	0.00~0.01 0
Hg		0.1	0.49	2.69	0.13~0.57	0.35	0.14~4.3	1.394	0.08~1.02 0.55
Sb		50.51	666	58.1	6.9~14.4	10.65	9.7~112	49.68	30.40~138.00 84.2

量单位: $w_B/\%$, $w(Au, Ag, Sb)/10^{-6}$ 。

(2) 流体包裹体温度、盐度

北衙金多金属矿成矿流体包裹体均一温度(T_h)变化范围较宽,从 180°C — 580°C ,主要集中在 250°C — 500°C 范围内;盐度($w(\text{NaCl}, \text{eq})$)变化范围也较大,在 1.2% — 61.1% 之间。

矿床流体包裹体盐度、温度可分为 3 个区间段:高温高盐度阶段流体包裹体($w(\text{NaCl}, \text{eq}) > 38\%$, $T_h = 500 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 以上),中高温高盐度阶段流体包裹体($w(\text{NaCl}, \text{eq}) > 38\%$, $T_h = 300 \sim 450^{\circ}\text{C}$),中低温低盐度阶段流体包裹体($w(\text{NaCl}, \text{eq}) > 2.2\% \sim 21.4\%$, $T_h = 150 \sim 450^{\circ}\text{C}$)。因此,矿床成矿作用可分为 3 个阶段:高温热液阶段($T_h = 400 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 以上),中温热液阶段($T_h = 400 \sim 250^{\circ}\text{C}$),低温热液阶段($T_h = 250 \sim 150^{\circ}\text{C}$),其中的中温热液阶段($T_h = 400 \sim 250^{\circ}\text{C}$)为矿床的主要成矿阶段。矿床的成矿期次可划分为斑岩成矿期($T_h = 250 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 以上)、矽卡岩成矿期($T_h = 150 \sim 400^{\circ}\text{C}$)、热液成矿期($T_h = 150 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 以上)^[34,36]。

2.5 物质和流体来源

北衙金多金属矿矿石中的黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿和方铅矿等硫化矿物的硫同位素 $\delta(^{34}\text{S})$ 值为 $-3 \times 10^{-3} \sim +3.7 \times 10^{-3}$,多集中在 $-3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$ 和 $-1 \times 10^{-3} \sim 0 \times 10^{-3}$ 之间^[34],变化范围较窄,具塔式分布特征,说明成矿流体的硫同位素较均一,属岩浆来源的硫同位素特征; $\delta(^{34}\text{S})$ 较集中的峰值($-1 \times 10^{-3} \sim 0 \times 10^{-3}$),与陨石硫同位素($\delta(^{34}\text{S}) \approx 0 \times 10^{-3}$)组成特征基本一致。辉钼矿中 $w(\text{Re}) = 20.27 \times 10^{-6} \sim 43.15 \times 10^{-6}$,指示成矿作用与岩浆壳幔混合作用有关^[23,30]。以上同位素组成等特征表明,北衙金多金属矿成矿物质可能来源于上地幔和下地壳,为壳幔混合源,成矿流体与富碱岩浆有密切关系。

矿石 Pb 同位素组成特征值: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 $38.256 \sim 39.039$ 、 $15.457 \sim 15.703$ 和 $18.380 \sim 18.673$,均值分别为 38.796 、 15.616 和 18.587 ^[12,14,18,34],具有以幔源铅

为主的壳幔混合源特征,成矿过程中可能有壳源物质加入;且 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 之间具有正相关关系,与富碱斑岩 Pb 同位素组成相似,指示成矿物质直接来源与富碱源区。矿区方解石脉和石英脉及磁铁矿中的 C、O 同位素组成特征研究^[12,22,33]表明,成矿早期流体为岩浆流体,成矿晚期流体部分地加入了大气降水;流体成因属于岩浆或深部地壳流体来源。

通过对矿区内的斑岩体石英斑晶、斑岩型矿化、矽卡岩矿化中的矽卡岩及外围似层状热液型铅锌银矿化的岩(矿)石中的流体包裹体研究表明,成矿流体具有高温(大于 400℃)、高压(2 400 bar)、高盐度 40%~50%、富含 CO₂ 的深源岩浆流体性质,流体包裹体气液成分中的 $w(\text{Na}^+)/w(\text{K}^+)$ 值也表明成矿流体在成矿作用早期阶段以岩浆流体为主^[12,28,34]。矽卡岩矿化中的矽卡岩矿物(以绿帘石类矿物为主)形成较早,发育富气相的流体包裹体,推断岩浆侵位后先分异出富水蒸气的流体,然后 CO₂ 才从成矿流体中大量分异;从内带矽卡岩化到外带热液脉型铅锌银矿化体中发育的流体包裹体与石英正长斑岩中石英斑晶内发育的流体包裹体组合类型基本一致,均富含 SO₄²⁻ 及 Cu、Fe 成矿元素,成矿流体主要来自斑岩浆结晶分异出的岩浆热液^[28]。

2.6 成矿时代

对北衙金多金属矿床含辉钼矿接触交代型的硫化物矿石及脉状矿石样品,采用 Re-Os 同位素定年方法获得成矿年龄。样品中,辉钼矿呈团斑状、浸染状、细脉状产于石榴子石矽卡岩内,与石英细脉、黄铁矿、黄铜矿等硫化物矿物紧密共生,该特征指示辉钼矿与区内金属硫化物成矿同期。

本次采集和测得 7 件辉钼矿样品的模式年龄为 36.46 Ma~38.20 Ma,加权平均年龄 37.47 Ma±0.51 Ma,等时线年龄 38.12 Ma±0.82 Ma^[34,36]。

另外,和言文等^[23]通过对红泥塘 23 号勘探线钻孔 235 m 处所采矽卡岩型矿体中的辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素定年,获得成矿年龄为 36.87 Ma±0.76 Ma;刘博等^[34,41]对 84ZK10 钻孔 1 件辉钼矿样品行了分析测试,获得 Re-Os 模式年龄为 36.46 Ma±0.59 Ma;牛浩斌等^[30]采集 2 件万洞山矿段及 3 件红泥塘矿段的含辉钼矿接触交代型的硫化物矿石及脉状矿石样品,获得 5 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素的模式年龄为 37.46 Ma~39.44 Ma,其加权平均年龄 38.48 Ma±0.54 Ma,等时线年龄 37.9 Ma±

2.5 Ma,两者在误差范围内一致。

以上测试结果显示,成矿年龄 36.46 Ma~39.44 Ma 与成岩年龄 35.00 Ma~36.72 Ma 基本一致,两者均指示成矿作用与新生代古近纪始新世晚期—渐新世早期具幔壳混合源性质的富碱岩浆浅成侵入关系密切。

2.7 成矿深度

北衙金多金属矿区红泥塘岩体石英斑晶中发现富气相包裹体和含子矿物包裹体共存的现象,两类包裹体均一温度多在 300℃ 以上,部分达 550℃。采用刘斌^[45]估算包裹体形成压力的公式,获得成矿压力平均在 141×10^{-5} Pa 左右,该压力相当于静岩压力,进一步利用相关公式,将成矿压力平均值换算为成矿深度,大约在 1.4 km 左右。

北衙金多金属矿床为新生代矿床,使用地质重建法估算成矿深度是确定成矿深度的最佳方法^[1],即岩体侵入及矿床形成时上覆围岩厚度可代表成矿深度。矿区内矿体及岩体分布于中三叠统北衙组(T₂b)地层中,上覆地层基本被剥蚀,但矿床及岩体被剥蚀程度较低,矿床分布特征反映出仅岩体顶部矿体被剥蚀。根据矿区周边中三叠统北衙组(T₂b)之上发育上三叠统中窝组(T₃z)和松桂组(T₃sg),且中窝组(T₃z)岩性为深灰色中—厚层状灰岩,局部夹有泥灰岩、页岩及砂岩层,地层厚度 172.84~230 m,松桂组(T₃sg)为厚层状砾岩、砂岩与中薄层状粉砂质页岩互层,地层厚度大于 520~1 069 m。晚三叠世之后该区隆升为陆,缺失侏罗—白垩系地层。推断岩体侵入及矿床形成时上覆围岩为中窝组(T₃z)和松桂组(T₃sg)地层总厚度 690~1 300 m。矿区控制矿体分布于 T₂b 地层中,最低层位赋存于 T₂b 底部,北衙组厚 560~680 m,控制矿体最高标高 2 150 m(红泥塘矿段),最低标高 1 240 m(万洞山矿段),矿体分布最大垂深 910 m,推断成矿深度为 0.7~2.2 km。

结合采用包裹体形成压力换算的成矿深度,推断北衙金多金属矿床成矿总深度范围为 0.7~2.2 km。

3 成矿规律

北衙金多金属矿床矿体空间分布规律、矿化样式以“脉—块体—层—脉”的内外多元结构模式产出的

特征标志,是矿床成矿规律的表现形式,反映了构造-岩浆岩-流体与成矿的密切关系及控制性作用。

(1) 构造-岩浆岩控矿规律

矿床受控于多级构造-岩浆岩带。区域哀牢山—金沙江大型走滑剪切带控制了规模巨大的哀牢山—金沙江富碱斑岩带,从而控制了金沙江—哀牢山金多金属矿带的展布。其北部的 NE 向宾川—程海断裂和近 SN 向丽江—木里断裂及其间的松桂—北衙富碱斑岩区控制了北衙金多金属矿田分布;矿田内近 SN 向的马鞍山断裂、近 EW 向隐伏断裂等三级构造控制了斑岩体、岩株和隐伏岩体的产出,从而控制了北衙金多金属矿床及周边金、铅、银、铜、锌、银矿床的分布;矿区更次级的各类构造,包括岩体接触带构造、内带节理与裂隙构造带、外带向斜的核部虚脱部位及两翼的层间破碎带、节理与裂隙带中以及岩性差异界面附近的有利空间部位,控制了各种矿化类型、规模不等矿体的就位^[24-27]。

新近纪上新世构造抬升及北衙山间盆地的形成、风化剥蚀、岩溶堆积作用等表生作用使先期形成的金多金属矿体遭受强烈的改造,在第四系上新统三营组(N_2s)与三叠系上统北衙组(T_2b)或斑岩体的不整合接触面附近,形成了“古红土”型重要的金矿类型。

(2) 斑岩体的控矿规律

矿区石英正长斑岩体控制了矿床各种矿化类型具有内外带状分布的结构特征,即岩体内部裂隙型 Au-Fe 矿体呈透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出;岩体接触带附近矽卡岩型 Au-Fe-Cu 矿体呈大透镜状、块体状、不规则状产出(见图 3);外带 Au-Fe 和 Pb-Ag 矿体以似层状、透镜状沿层间破碎带产出;远程带 Au-Fe 矿体呈小透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出。

岩体接触带形态、产状变化控制了矿体的分布、产状、形态及规模。在产状急剧变化的凹陷部位矿化较强,形成厚富矿体,在产状平缓或凸出的部位矿化弱,矿体厚度小品位低,甚至尖灭(见图 2 和图 3)。

与成矿密切相关的是 36.46 Ma—39.44 Ma 侵入的石英正长斑岩,以其小岩株与岩枝发育地段对成矿最为有利。

斑岩体控制了矿床成矿元素分带。①在万铜山和红泥塘西矿段,从岩体内部向外元素组合依次为 Fe-Au(Cu) → Au-Cu-Fe、Au-Fe、Au-Fe-Pb-Ag →

Pb-Ag(Au);从深部到浅部元素组合依次为 Cu-Au(Mo) → Cu-Au → Au-Cu-Fe → Au-Fe-Pb-Ag 分带。

②红泥塘东矿段,从大沙地石英二长斑岩体内部向外元素组合依次为 Cu-Fe-Mo → Cu-Fe → Au-Fe-Pb-Ag → Pb-Ag(Au) → Au-Fe;从深部到浅部元素组合依次为 Cu-Fe-Mo → Cu-Fe(Au) → Fe-Pb-Ag(Au)。

(3) 岩性及其界面控矿规律

矿区主矿体围岩主要为 T_2b 碳酸盐岩,在其与斑岩接触带形成矽卡岩型金多金属矿体;远离斑岩体,沿层间破碎带、构造裂隙、破碎带贯入,形成脉状、似层状金多金属矿体。在 T_2b 碳酸盐岩与 T_1q 碎屑岩岩性差异界面附近形成扁透镜状、似层状 Fe-Cu(Au) 矿体; T_1q 碎屑岩与 $P_2\beta$ 接触面附近局部形成 Cu-Au 矿化体。 N_2s 与 T_2b 或斑岩体的不整合接触面附近,形成了“古红土”型似层状 Au-Fe 矿体。

深部 T_1q 碎屑岩与岩体接触带发育角岩化,但没有形成明显矿化。

(4) 矿石类型分布规律

在岩体接触带的矽卡岩矿体内以金铜铁、金铜或铁铜矿石为主,外带围岩内以金铁矿石、金矿石、铅银矿石为主,反映了岩体接触带向外金矿化普遍但不均匀,铜矿化减弱而铅银矿化增强的变化规律。

(5) 矿床成因及矿床类型

对矿区矿体中各成矿阶段的流体包裹体岩相学特征、温度-盐度特征、成分、C-H-O 同位素特征以及矿石硫化物 Pb-S 同位素特征研究表明,成矿物质来源于上地幔和下地壳,为壳幔混合源^[37-42]。矿区斑岩内外带的矽卡岩型铜金(钼)矿体和金铜铁矿体、外围碳酸盐岩等地层中的似层状、脉状热液型铅锌银矿体及远端脉状热液型金矿体等矿床系列为与富碱斑岩体侵位活动有关的,由岩浆分异热液并逐渐演化形成的矽卡岩-热液型金铁-铁铜-铅锌银-金多金属成矿系统^[47-49]。矿床类型为与喜马拉雅早期新生代古近纪始新世晚期—渐新世早期富碱岩浆浅成侵入有关的矽卡岩-热液型金多金属矿床。

综上所述,北衙金多金属矿床明显受控于斑岩体,石英正长斑岩体是主要成矿地质体,而岩体的侵入又受区域构造和矿区构造的控制,矿体空间分布规律明显受到成矿前、成矿期构造的控制,构成了矿区北衙组碳酸盐岩(T_2b) + 多期断裂构造系统(接触带构造、岩性界面及层间破碎带、断裂裂隙、不整合面构造) + 喜马拉雅期富碱斑岩浆侵位“三位一体”的成矿系统和成矿模式。

4 结语

综合北衙金多金属矿床成矿作用特征标志如下:

(1)矿体受控于石英正长斑岩,矿体为以 Au 为主,共伴生 Fe-Cu-Pb-Ag 的多金属矿化类型;矿化样式以“脉-块体-层-脉”的内外多元结构模式产出,即岩体内部 Au-Fe(Cu)矿体呈透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出,岩体接触带附近的 Au-Fe-Cu 矿体呈大透镜状、块体状沿接触带矽卡岩中产出,外带 Au-Fe 和 Pb-Ag 矿体以似层状、透镜状沿层间破碎带产出,远程带 Au-Fe 矿体呈小透镜状脉、平行脉沿断层破碎带陡倾斜产出。

(2)岩体内部脉状 Au-Fe(Cu)矿体矿物组合以磁铁矿-黄铁矿-黄铜矿-石英为主,接触带块状 Au-Fe-Cu 矿体矿物组合以磁铁矿-磁黄铁矿-黄铁矿-黄铜矿-石榴子石、透辉石-石英(垂向上深部有辉钼矿)为主,外带似层状、透镜状 Au-Fe 和 Pb-Ag 矿体矿物组合以磁铁矿-磁黄铁矿-黄铁矿-方铅矿-石英为主,远程带的脉状 Au-Fe 矿体矿物组合以黄铁矿-方铅矿-石英-方解石为主。

(3)成矿元素从岩体内部向外接触带到远程带元素组合依次为:Fe-Au(Cu)→Au-Cu-Fe、Au-Fe、Au-Fe-Pb-Ag→Pb-Ag(Au);从深部到地表元素组合依次为 Cu-Au(Mo)→Cu-Au→Au-Cu-Fe→Au-Fe-Pb-Ag 分带,反映了从高温→低温元素组合的演化规律。岩体至围岩具有从钾化硅化带→矽卡岩带→磁铁矿硫化物带→大理岩化带的环状蚀变分带特征。

(4)矿床热液成矿期从早到晚依次划分为早矽卡岩、晚矽卡岩、磁铁矿、石英硫化物以及碳酸盐五个阶段。各成矿阶段流体包裹体发育富液相、富气相、含子矿物、富含 CO₂ 三相的包裹体等四类。成矿作用可分为高温高盐度、中高温高盐度、中低温低盐度三个热液阶段。

(5)成矿年龄为 36.46 Ma—39.44 Ma,与石英正长斑岩的成岩年龄 35.00 Ma—36.72 Ma 基本一致。成矿物质来源于上地幔和下地壳,为壳幔混合源。矿床成矿深度范围为 0.7~2.2 km,属浅-中等深度。

(6)矿床类型为与喜马拉雅早期新生代古近纪始新世晚期—渐新世早期富碱岩浆浅成侵入有关的

矽卡岩-热液型金铁-铁铜-铅锌银-金多金属成矿系统。矿区北衙组碳酸盐岩(T₂b)+多期断裂构造系统(接触带构造、岩性界面及层间破碎带、断裂裂隙、不整合面构造)+喜马拉雅期富碱斑岩侵位构成了“三位一体”的成矿系统和成矿模式。

(7)表生作用形成的产于 N₂s 与 T₂b 及斑岩体不整合面上的风化-堆积型似层状 Fe-Au 氧化矿体,空间上分布于北衙盆地核部附近低凹负地形中,是寻找岩金矿重要的特征标志。

致谢:衷心感谢编辑部专家的热心帮助和对本文提出的宝贵修改意见!

参考文献:

- [1] 叶天竺,吕志成,庞振山,等. 勘查区找矿预测理论与方法(总论)[M]. 北京:地质出版社,2014:1-703.
- [2] 蔡新平. 滇西北衙金矿床特征、成因及找矿远景预测[C]//中国金矿地质地球化学研究,北京:科学出版社,1993,134-151.
- [3] 葛良胜,郭晓东,邹依林,等. 云南北衙金矿床地质特征及成因研究[J]. 地质找矿论丛,2002,17(1):32-46.
- [4] 甫为民,胡朝平. 鹤庆北衙富碱斑岩侵入体的岩石学特征及其构造环境[J]. 云南地质,1994,13(1):33-41.
- [5] 李景虹,李如良,邵伟年. 云南鹤庆北衙金矿地质特征及成矿机制探讨[J]. 西南矿产地质,1991,5(2):50-55.
- [6] 钟昆明,杨世瑜. 云南北衙金矿构造地球化学成矿预测标志[J]. 矿物岩石地球化学通报,2000,19(4):393-394.
- [7] 崔银亮,晏建国,陈贤胜. 滇西北衙金矿床找矿标志和找矿模式研究[J]. 黄金,2003,24(7):7-10.
- [8] 马德云,韩润生. 北衙金矿床构造地球化学特征及靶区优选[J]. 地质与勘探,2001,37(2):64-68.
- [9] 宋焕斌,何明勤. 滇西北衙金矿床的二次成矿作用[J]. 昆明工学院学报,1994,19(4):15-20.
- [10] 任治机,罗荣生,李连举,等. 云南北衙红土型金矿地质特征及成矿规律[J]. 中国地质,2001,28(8):17-22.
- [11] 陆世才,李峰,吴静,等. 滇西喜马拉雅期斑岩型矿床硫、铅同位素特征及地质意义[J]. 地质找矿论丛,2014,29(4):552-557.
- [12] 吴开兴,胡瑞忠,毕献武,等. 滇西北衙金矿蚀变斑岩中的流体包裹体研究[J]. 矿物岩石,2005,25(2):20-26.
- [13] 肖骑彬,蔡新平,徐兴旺. 云南北衙表生金矿形成与保存探讨[J]. 矿床地质,2003,22(4):401-407.
- [14] 肖晓牛,喻学惠,莫宣学,等. 滇西北衙金多金属矿床流体包裹体研究[J]. 地学前缘,2009,16(2):250-261.
- [15] 肖晓牛,喻学惠,莫宣学,等. 滇西北衙金多金属矿床成矿地球化学特征[J]. 地质与勘探,2011,47(2):170-179.
- [16] 徐兴旺,蔡新平,宋保昌,等. 滇西北衙金矿区碱性斑岩岩石学、年代学和地球化学特征及其成因机制[J]. 岩石学报,2006,22(3):631-642.

- [17] 徐兴旺, 蔡新平, 张宝林, 等. 滇西北衙金矿矿床类型与结构模型[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 249-264.
- [18] 徐受民, 莫宣学, 曾普胜, 等. 滇西北衙富碱斑岩的特征及成因[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 527-535.
- [19] 薛传东, 侯增谦, 刘星, 等. 滇西北衙金多金属矿田的成岩成矿作用: 对印-亚碰撞造山过程的响应[J]. 岩石学报, 2008, 24(3): 459-471.
- [20] 应汉龙, 蔡新平. 云南北衙矿区富碱斑岩正长石和白云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 107-110.
- [21] 邓军, 李文昌, 符德贵, 等. 西南三江南段新生代金成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-314.
- [22] 胡瑞忠, 吴开兴, 毕献武, 等. 滇西北衙金矿方解石的碳氧同位素特征及其成因[J]. 矿物学报, 2010, 30(4): 463-469.
- [23] 和文言, 莫宣学, 喻学惠, 等. 滇西北衙金多金属矿田矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(4): 1302-1310.
- [24] 和中华, 周云满, 和文言, 等. 滇西北衙超大型金多金属矿床成因类型及成矿规律[J]. 矿床地质, 2013, 32(2): 244-258.
- [25] 周云满, 符德贵, 和中华, 等. 滇西鹤庆县北衙金多金属矿勘查突破[C]//云南省国土资源厅, 云南省地质学会. 云南省3年地质找矿行动计划成果及论文集, 2013: 72-82.
- [26] 和中华, 符德贵, 周云满, 等. 云南北衙超大型金多金属矿床整装勘查新认识[J]. 云南地质, 2014, 33(增刊): 119-131.
- [27] 周云满, 王利东, 梅文周, 等. 实现整装勘查找矿突破的问题与举措[J]. 西南地质经济, 2015, 189(2): 1-12.
- [28] 王建华, 李文昌, 王可勇, 等. 滇西北衙斑岩型金多金属矿床成矿流体特征及其演化[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3269-3280.
- [29] 杨剑, 唐发伟, 王桥, 等. 云南北衙地区成矿地球化学特征及找矿方向[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1989-1999.
- [30] 牛浩斌, 胡文懿, 丁俊, 等. 滇西北衙金多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2015, 51(1): 1-12.
- [31] 王明志, 韩润生, 王雷, 等. 滇西北衙金矿床万洞山一笔架山矿段构造地球化学特征[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 238-248.
- [32] 和文言, 喻学惠, 莫宣学, 等. 滇西北衙金多金属矿田矿床成因类型及其与富碱斑岩关系初探[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1401-1412.
- [33] 李俊, 丁俊, 牛浩斌, 等. 滇西北衙金多金属矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 矿床地质, 2016, 35(2): 395-413.
- [34] 刘博. 滇西北衙金多金属矿床成矿地质特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [35] 和中华, 官德任, 和文言, 等. 滇西北衙超大型金多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质, 2016, 35(2): 261-282.
- [36] 周云满, 毛景文, 符德贵, 等. 滇西地区金铜铅锌矿典型矿床及成矿规律研究[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 394-439.
- [37] Deng J, Fu Y, Sun X M, et al. Geochronology of the giant Beiya gold-polymetallic deposit in Yunnan Province, Southwest China and its relationship with the petrogenesis of alkaline porphyry[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 71: 138-149.
- [38] Fu Y, Sun X M, Zhou H Y, et al. In-situ LA-ICP-MS U-Pb geochronology and trace elements analysis of polygenetic titanite from the giant Beiya gold-polymetallic deposit in Yunnan province, Southwest China [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 77: 43-56.
- [39] He W Y, Mo X X, He Z H, et al. The geology a mineralology of the Beiya skarn gold deposit in Yunnan, Southwest China [J]. Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology, 2015, 110: 1625-1641.
- [40] Li W C, Wang J H, He Z H, et al. Formation of Au-polymetallic ore deposits in alkaline porphyries at Beiya, Yunnan, Southwest China [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 73: 241-252.
- [41] Liu B, Liu H, Zhang C Q, et al. Geochemistry and geochronology of porphyries from the Beiya gold-polymetallic ore-field, western Yunnan, China [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 69: 360-379.
- [42] Mao J W, Zhou Y M, Liu H, et al. Metallogenic setting and ore genetic model for the Beiya porphyry-skarn polymetallic Au orefield, western Yunnan, China [J]. Ore Geology Reviews, 2017, 86: 21-34.
- [43] 徐志刚, 陈毓川, 王登红, 等. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-138.
- [44] 云南黄金矿业集团股份有限公司. 云南省鹤庆县北衙铁金矿资源储量核实报告(五期)[R]. 昆明: 云南黄金矿业集团股份有限公司, 2014.
- [45] 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 207-249.
- [46] 云南黄金矿业集团股份有限公司. 云南省鹤庆县北衙铁金矿万洞山矿段2013年生产勘探报告[R]. 昆明: 云南黄金矿业集团股份有限公司, 2014: 1-212.
- [47] 丁星好, 杨广全, 普志坤, 等. 云南省巍山县扎村金矿区成矿系统及找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(1): 60-67.
- [48] 周云满, 张家良, 董文伟, 等. 哀牢山南段长安金矿深部找矿新进展[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(2): 185-191.
- [49] 葛良胜, 邓军, 杨立强, 等. 中国金矿床: 基于成矿时空的分类探讨[J]. 地质找矿论丛, 2009, 24(2): 91-100.

The characteristics marks of metallogenesis of Beiya gold-polymetallic deposit in the Northwest Yunnan province

ZHOU Yunman¹, ZHANG Changqing², HE Zhonghua¹, LIU Bo³, WANG Lidong¹

(1. Yunnan Gold & Mining Group Co Ltd, Kunming 650299, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of
Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper systematically summarizes the characteristic marks of metallogenesis in Beiya gold-polymetallic deposit. From interior to the outer contact of a porphy occur lenticular veins and parallel steep veins in fractural zone of fault. At the contact Skarn rings the porphyry and Au-Fe-Cu bodies here occur continuously as big lenticular and tabular body in the skarn. In outer contact Au-Fe, Pb-Ag ore bodies occur in layeroid, lenticular bodies along interformatioanal fractural zone. In the distal zone Au-Fe ore bodies occur in small lenticular veins and steep parallel veins in the fractural zone of fault. Mineral assemblage, ore elements and alteration zoning are characterized by distribution from high temperature mineral and element to the low and the skarn ore deposit. Mineralization can be divided into early skarn-late skarn-magnetite-quartz+sulfides-carbonate stages. Fluid inclusion of all the stages are divided into fluid rich inclusion, gas rich inclusion, sub-crystal-bearing inclusion and fluid-gas-sub-crystal phased inclusion riched in CO₂. The mineralization is dated at 36.46 Ma—39.44 Ma which is basically coincided with that of quartz syenite porphyry(35.00 Ma—36.72 Ma). The metallogenic depth is 0.7~2.2 km. This is a porphyry-skarn Au polymetallic deposit. The carbonatite of the Beiya Formation + multi-period faulting tectonic system(contact zone tectonic, interstratified crushed zones, fault fracture zone, unconformity interface) + emplacement of the rich-alkaline magma constituted metallogenic system and metallogenic model of trinity in the Beiya gold-polymetallic deposit.

Key Words: Beiya gold-polymetallic deposit. porphyry-skarn type deposit; the characteristic mark of metallogenesis; northwestern Yunnan province