

西藏改则县多龙矿集区斑岩型铜金矿床的地质特征与成矿-找矿模型^{*}

陈红旗¹, 曲晓明^{2* * *}, 范淑芳²

(1 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 西藏 格尔木 816000; 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 多龙矿集区位于班公湖-怒江成矿带西段、羌塘地块南缘的岩浆弧中。过去十多年来, 西藏地勘局第五地质大队在多龙矿集区内已发现和评价了多不杂、波龙、地堡那木岗、拿若、荣那等 5 处大型、超大型铜金多金属矿床, 目前已探明的铜资源量近 1000 万吨, 金 300 余吨。区内以斑岩型铜金矿床为主, 兼有斑岩-浅成低温热液型和斑岩-角砾岩型矿化组合。研究发现, 矿区黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -2.2‰ ~ 2.3‰ 之间, 平均为 0.2‰ , 峰值在 -1‰ ~ 1‰ 之间, 塔式效应明显, 接近幔源硫, 显示成矿物质来源于深部岩浆; 成矿温度介于 $250\sim 420\text{℃}$ 之间, 成矿深度 $1\sim 5\text{ km}$, 成矿流体为残余岩浆流体, 大气降水在成矿过程中的作用不明显。作者根据多年的勘查实践, 总结出多龙矿集区斑岩型铜金矿最有效的找矿勘查方法技术组合是: 地质 + 化探(水系沉积物) + 物探(高精度磁测、激电中梯) + 钻探。

关键词 地质学; 斑岩型铜金矿; 多龙矿集区; 矿床成因模型; 综合找矿模型; 班公湖-怒江成矿带; 西藏

中图分类号: P618.41; P618.51

文献标志码: A

Geological characteristics and metallogenic-prospecting model of Duolong porphyry copper-gold ore concentration area in Gerze County, Tibet

CHEN HongQi¹, QU XiaoMing^{2* * *} and FAN ShuFang²

(1 No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Exploration, Golmud 816000, Qinghai, China;

2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Duolong copper ore concentration area occurs in the western segment of Bangong Co-Nujiang suture zone and is located in the magmatic arc on the southern margin of Qiangtang block. In the past more than ten years, No. 5 Geological Party from the Tibet Bureau of Geology and Exploration found and evaluated five large and superlarge gold-copper polymetallic deposits in the ore concentration area, namely Duobuza, Bolong, Dibaonamugang, Naruo and Rongna. The proved copper and gold reserves have reached nearly 10 million tons and more than 300 tons, respectively. The ore deposits are mainly porphyry-type copper-gold deposits, with some epithermal and breccia type deposits. The investigation indicates that the $\delta^{34}\text{S}$ values of the rocks in the orefield vary from -2.2‰ to 2.3‰ with an average of 0.2‰ , and the peak value ranges from -1‰ to 1‰ , exhibiting tower distribution in the sulfur isotopic histogram of $\delta^{34}\text{S}$, which is similar to the mantle-sourced sulfur isotope. These phenomena indicate that the ore-forming materials were mainly derived from deep magma.

^{*} 本文得到中国地质调查局青藏专项“西藏班公湖-怒江成矿带中段铜矿评价调查”(编号: 12120113037300)项目资助

第一作者简介 陈红旗, 男, 1966 年生, 工程硕士, 主要从事有色金属和贵金属矿产勘查。Email: 363074722@qq.com

^{**} 通讯作者 曲晓明, 男, 1960 年生, 博士, 研究员, 主要从事造山带成矿学研究。Email: xiaominqu@163.com

收稿日期 2014-04-19; 改回日期 2014-12-03。张绮玲编辑。

The ore-forming temperature ranges from 250°C to 420°C and the depth changes from 1 km to 5 km. The ore-forming fluid mainly originated from residual magmatic fluid, whereas the role of the meteoric water was insignificant. Based on years of exploration practice, the authors finally established the most effective prospecting-exploration technical combination for the Duolong ore concentration area, that is, geology + geochemical exploration (stream-sediments) + geophysical exploration (high-precision magnetic + IP intermediate gradient) + drilling.

Key words: geology, porphyry copper-gold deposit, Duolong copper ore concentration area, genetic model, comprehensive prospecting model, Bangong Co-Nujiang metallogenic belt, Tibetan Plateau

班公湖-怒江成矿带夹持于羌塘地块和拉萨地块之间,沿班公湖-怒江缝合带分布。带内广泛分布着蛇绿混杂岩,次级断裂和褶皱构造发育,燕山期—喜马拉雅期岩浆活动强烈,沿着该缝合带有一大批金、铜、铁、铬、铅等金属矿床(点)产出,且具有成带成群分布的特点,从而构成了班公湖-怒江金铜多金属成矿带。自国土资源部新一轮大调查工作开展以来,西藏地勘局第五地质大队在班公湖-怒江成矿带西段的多龙矿集区已发现并初步评价了多不杂、波龙、地堡那木岗、拿若、荣那等多处大型、超大型铜金矿床,这些矿床成因的类型以斑岩型为主,有时伴生浅成低温热液型和角砾岩型矿化。从目前调查结果看,多龙矿集区及其外围铜(金)多金属矿找矿远景可达 2000 万吨以上,已成为中国最具潜力的铜矿战略资源储备开发基地。本文在系统总结多龙矿集区矿床地质特征的基础上,深入分析了成矿物质来源和成矿流体性质,阐明了成矿地质条件和控矿因素,建立起了矿集区的矿床成因模式和综合找矿模型,以期能对班公湖-怒江成矿带乃至整个青藏高原的铜矿找矿勘查提供一些借鉴。

1 成矿地质背景

班公湖-怒江缝合带主要由规模巨大的蛇绿岩套及混杂岩带构成,东西向横贯青藏高原,延伸长达 2000 余公里,南北向展布范围一般在 50~150 km 之间,宽处达 200 余公里。因此,人们一般认为该缝合带是由多条洋内俯冲带复合而成(Srimal, 1986; Matte et al., 1996)。近年来的研究表明,班公湖-怒江中特提洋不是一个统一的大洋,很可能包含了多个东西向展布的局限性洋盆(曲晓明等, 2009)。洋盆的打开时间发生在晚三叠世—早侏罗世(曲晓明等, 2009),中侏罗世晚期洋盆开始沿多条俯冲带分别向羌塘地块和拉萨地块之下双向俯冲(曲晓明等,

2010; 杜德道等, 2011)。洋盆的闭合时间发生在早白垩世早期约 140 Ma 左右(曲晓明等, 2012; Qu et al., 2012),之后造山带进入碰撞后地壳大规模剪切走滑阶段。

多龙矿集区位于班公湖-怒江缝合带西段,羌塘地块南缘,大地构造上处于羌塘-三江复合板片南缘超覆地层单元之色哇陆缘拗陷中。地层分区属于羌南-保山地层区羌南地层分区,主要出露地层有上三叠统日干配错群(T_3r)、下侏罗统曲色组(J_1q)和中侏罗统色哇组(J_2s)、下白垩统美日切组(K_1m)、新近系康托组(N_1k)及第四系(Q)(图 1)。由于受区域上班公湖-康托-兹格当错超壳断裂的影响,矿集区内形成大量的次级断层。这些次级断层具长期、多期次活动的特点,总体上有近东西向、北东向、北西向 3 组断裂。按照与斑岩铜矿的先后关系,可分为成矿期的控岩、控矿断裂构造和成矿后的破矿断裂构造(祝向平等, 2012)。北东向和北西向断裂构造为成矿期的控岩、控矿断裂。近东西向断裂形成时间较晚,为成矿后断裂。

矿集区岩浆活动以喷发、喷溢及浅成侵入岩为主,形成时代为燕山中-晚期。其中火山岩主要有产于曲色组(J_1q)中的玄武岩、粗面玄武岩和产于美日切组(K_1m)中的流纹岩、英安岩、安山岩等。侵入岩主要为基性、中酸性侵入岩,呈脉状、瘤状成群成带分布,侵入时代以早白垩世为主。其中,早白垩世花岗闪长斑岩是矿集区铜金矿的主要赋矿岩体。

2 矿床地质特征

多龙矿集区铜金矿产于改则县西北萨玛隆一带,目前主要评价了多不杂、波龙、地堡那木岗、荣那(铁格隆南)和拿若等大型斑岩型铜金矿床。区内断裂构造发育,对含矿斑岩和铜矿床显示出明显的控制作用(图 1)。鉴于多不杂和波龙两个铜金矿床是

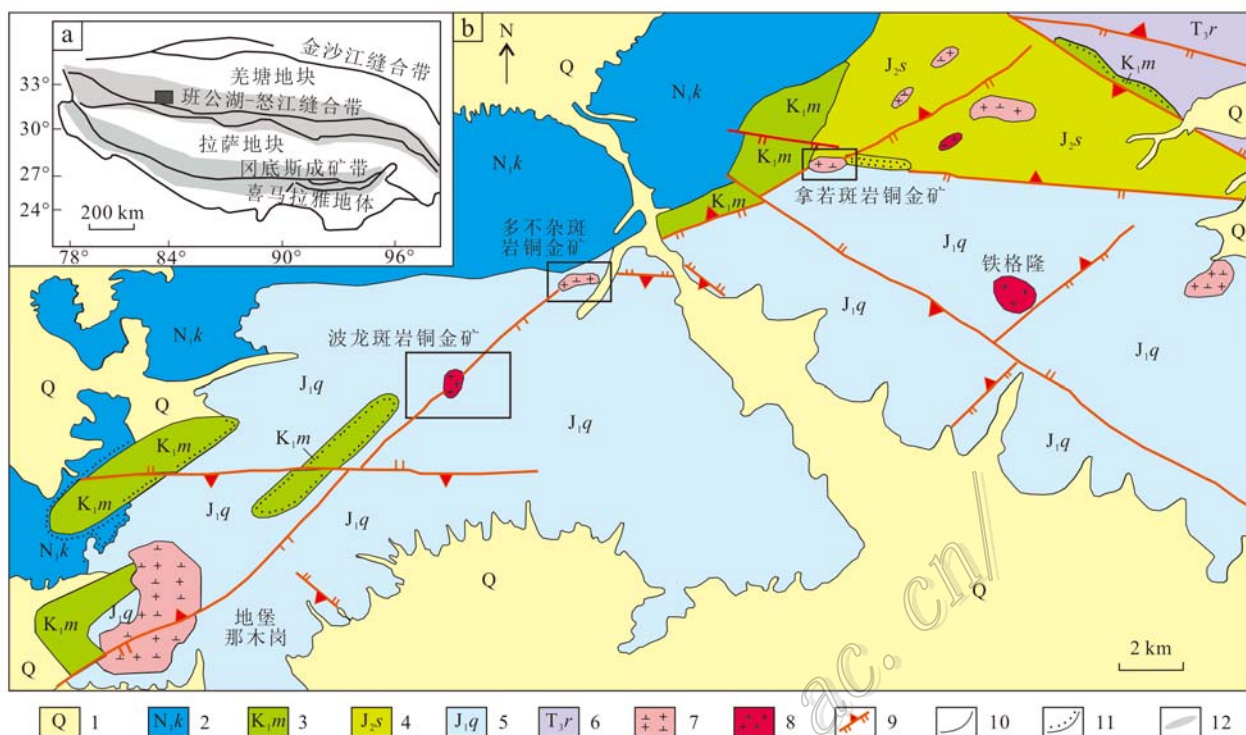


图1 多龙矿集区地质图(据祝向平等, 2012 修改)

1—第四系沉积物; 2—中新统康托组; 3—下白垩统美日切组; 4—中侏罗统色哇组; 5—下侏罗统曲色组; 6—上三叠统日干配错组;
7—花岗闪长斑岩; 8—花岗斑岩; 9—逆断层; 10—地质界线; 11—不整合界线; 12—成矿带

Fig. 1 Geological map of the Duolong copper ore concentration area(modified after Zhu et al., 2012)

1—Quaternary sediments; 2—Miocene Kangtuo Formation; 3—Lower Cretaceous Meiriquie Formation; 4—Middle Jurassic Segui Formation;
5—Lower Jurassic Quse Formation; 6—Upper Triassic Riganpeicuo Formation; 7—Granodiorite; 8—Granodiorite porphyry; 9—Thrust fault;
10—Geological boundary; 11—Unconformity; 12—Metallogenic zone

矿集区内最早发现且勘查评价程度最高的矿区, 因此本文在对矿集区一般矿床地质特征的阐述和总结时以这两个矿床为主, 并补充了其他矿床中的一些特有的矿化现象。

2.1 含矿斑岩特征

多不杂矿区含矿斑岩体出露面积为 0.39 km^2 , 平面上呈不规则的葫芦状(图2)。而波龙矿区位于多不杂矿区西南约 5 km 处, 含矿斑岩体为半隐伏花岗闪长斑岩体。两个矿区成矿斑岩均形成于燕山中-晚期, 锆石 U-Pb 年龄分别为 118.8 Ma 和 119.4 Ma (祝向平等, 2011)。

矿集区的含矿岩体为花岗闪长斑岩, 具斑状结构, 块状构造, 主要呈岩株、岩脉、岩墙产出。由于蚀变较强, 表现为浅灰色、灰色。岩体中斑晶成分为斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母, 粒径约 $0.5 \sim 5 \text{ mm}$, 体积分数约占岩石总量的 $25\% \sim 40\%$ 。石英斑晶具溶蚀现象。基质成分为石英、斜长石、黑云母及副矿物磷灰石、锆石、金红石、磁铁矿、黄铁矿等, 呈

显微半自形粒状结构, 粒径一般为 $0.05 \sim 0.2 \text{ mm}$ 。总体矿物组成石英约 $20\% \sim 25\%$, 斜长石 $50\% \sim 55\%$, 钾长石 $15\% \sim 20\%$, 黑云母 $2\% \sim 5\%$ 。由于蚀变强烈, 长石斑晶一般全部被绢云母、石英交代。

2.2 矿体形态及产状

多不杂矿区为斑岩型铜金矿, 矿体在空间上呈蘑菇状, 垂向上呈厚板状(图3), 矿体向 200° 方向陡倾, 倾角 $60 \sim 80^\circ$ 。矿体长度约 1500 m , 厚度 $200 \sim 500 \text{ m}$, 延深为 $200 \sim 600 \text{ m}$, 钻孔控制的矿体最大深度为 601.31 m , 矿体 Cu 品位为 $0.27\% \sim 0.73\%$, 平均品位为 0.52% , 伴生金的平均品位为 0.28 g/t 。

波龙矿区矿体为半隐伏, 主矿体空间形态总体上呈筒状(图4), 长 $700 \sim 900 \text{ m}$, 宽 $500 \sim 900 \text{ m}$, 厚 $52 \sim 650 \text{ m}$, 钻孔控制的矿体最大深度为 1003 m , 矿体 Cu 的平均品位为 0.65% , 金的平均品位为 0.25 g/t 。

2.3 蚀变分带

从多不杂和波龙两个矿区的蚀变分带情况看,

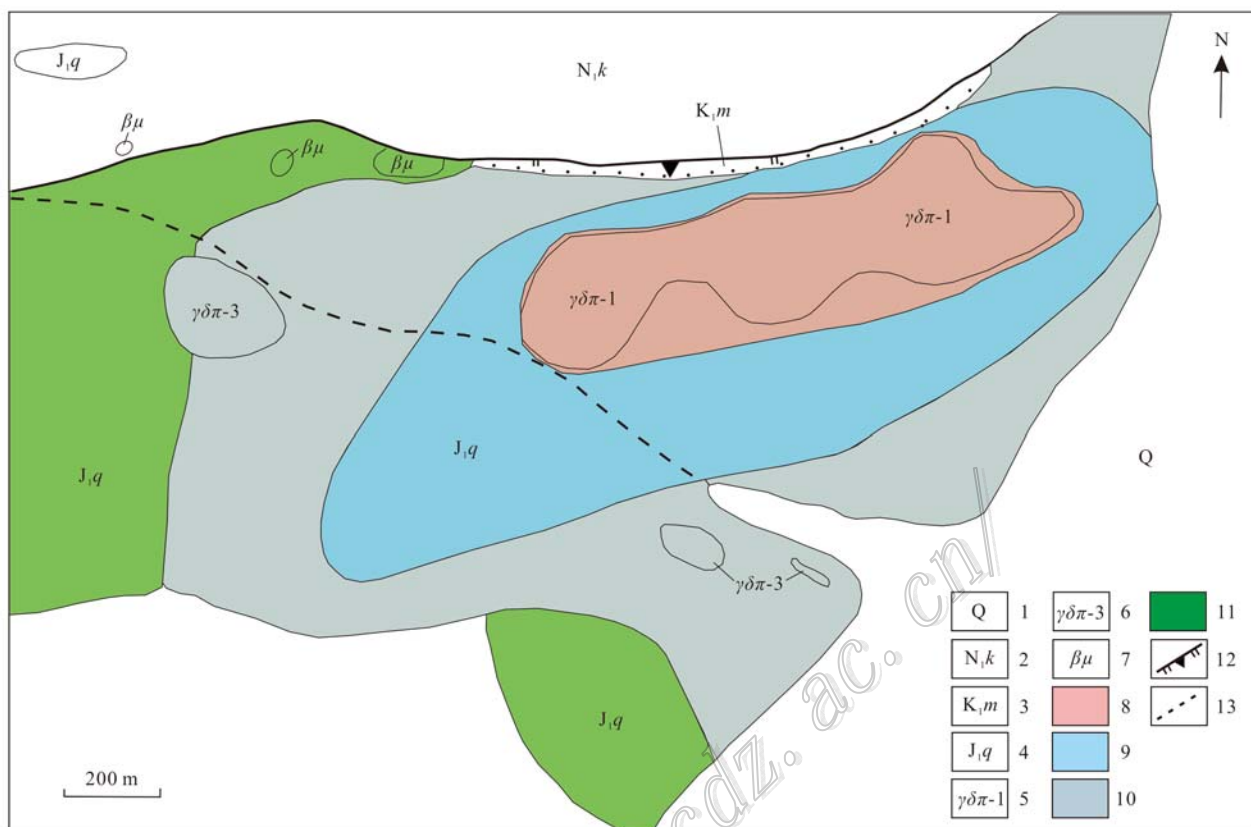


图 2 多不杂铜金矿区地质图(据祝向平等,2012 修改)

1—第四系沉积物; 2—中新统康托组; 3—下白垩统美日切组杂色安山岩; 4—下侏罗统曲色组石英砂岩; 5—第一期花岗闪长斑岩; 6—第三期花岗闪长斑岩; 7—辉绿岩; 8—钾化带; 9—强绢英岩化带; 10—弱绢英岩化带; 11—青磐岩化带; 12—逆断层; 13—推测断层

Fig. 2 Geological map of the Duobuza copper-gold deposit(modified after Zhu et al., 2012)

1—Quaternary sediments; 2—Miocene Kangtuo Formation; 3—Lower Cretaceous Meirique Formation andesite; 4—Lower Jurassic Quse Formation quartz sandstone; 5—First stage granodiorite porphyry; 6—Third stage granodiorite porphyry; 7—Diabase; 8—Potassic alteration zone; 9—Strong phyllic zone; 10—Weak phyllic zone; 11—Propylitized zone; 12—Thrust fault; 13—Inferred fault

围岩蚀变往往以花岗闪长斑岩为中心, 形成不完全的面型环状蚀变分带。在平面上, 由含矿斑岩中心向外可划分出: 钾硅化带→硅化-伊利石-绢云母化带→青磐岩化带(图 2)。在剖面上, 从深部到浅部, 蚀变可分为钾硅化带→绢英岩化带+钾化带→青磐岩化带→黏土化带(图 3、4)。早期钾化以热液黑云母蚀变为特征, 并伴有大量的热液磁铁矿(含量最高可达 15%), 晚期钾化以钾长石化为特征; 主要形成钾长石、黑云母, 在岩体中心部位发育, 部分地段形成钾长石脉。绢英岩化蚀变环绕钾化带发育, 主要交代长石, 由细粒石英、绢云母、黄铁矿(褐铁矿)等组成, 主要呈石英-黄铜矿-黄铁矿网脉在岩石中穿插交代。高级泥化带发育于富金斑岩型铜矿床的顶部, 在荣那矿区黏土蚀变化带中出现高硫化物型浅成低温 Cu-Au 矿化(唐菊兴等, 2014), 其矿物组合主要为

蛋白石、石英、明矾石、叶蜡石、水铝石、地开石和高岭石。青磐岩化带分布于多不杂斑岩铜矿的最外侧, 发育于围岩中, 主要矿物组合是绿泥石、绿帘石和碳酸盐, 并见少量黄铁矿矿化, 青磐岩化带在矿床中呈团块状发育, 未能形成连续环带。

2.4 矿化阶段及矿物共生组合

从多不杂和波龙两个矿区的情况看, 矿集区矿石结构可分为晶粒状结构、交代结构、固溶体分离结构和表生结构。矿石构造主要以热液成矿作用形成的脉状构造为主, 兼有稀疏-稠密浸染状构造。矿集区铜矿石的自然类型主要有细脉浸染状、网脉状、脉状矿石, 符合斑岩型铜矿的基本特征。

根据矿脉的穿插关系以及矿物组合特征, 矿集区成矿过程可分为 3 个成矿期、6 个成矿阶段, 其中 ① 岩浆成矿期金属矿物以磁铁矿为主, 伴生少量黄

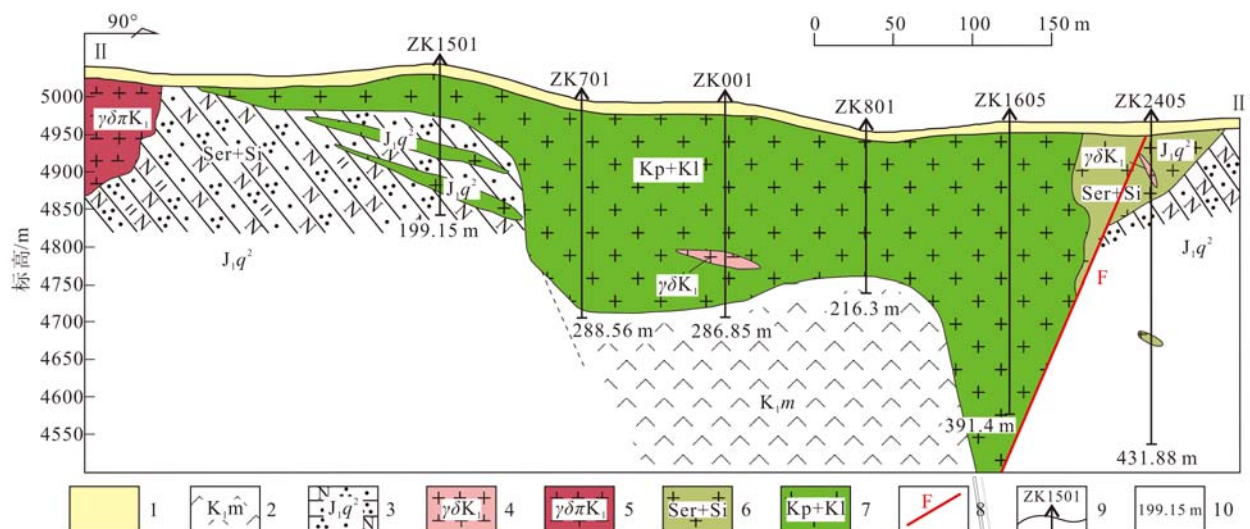


图3 多不杂铜金矿床纵剖面图

1—第四系沉积物；2—下白垩统美日切组橄辉岩；3—下侏罗统曲色组二段长石石英砂岩；4—早白垩世花岗岩闪长岩；5—早白垩世花岗岩闪长斑岩；6—绢云母化+硅化带；7—钾长石化+高岭土化带；8—断层；9—钻孔及编号；10—钻孔深度

Fig. 3 Longitudinal geological section of the Duobuza copper-gold deposit

1—Quaternary sediments; 2—Peridotite of Lower Cretaceous Meirique Formation; 3—Feldspar-quartz sandstone of the 2nd member of Lower Jurassic Quse Formation; 4—Early Cretaceous granodiorite; 5—Early Cretaceous granodiorite-porphyry Lower Cretaceous Meirique Formation; 6—Sericitization + silicification; 7—K-feldspar + kaolinitization; 8—Fault; 9—Drill hole and its serial number; 10—Drill hole depth

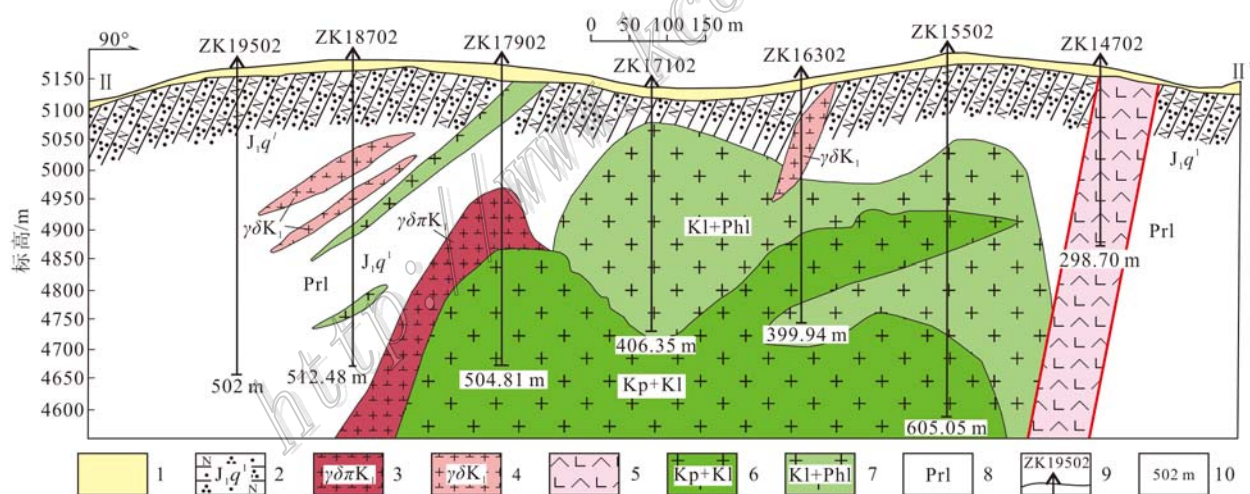


图4 波龙铜金矿床纵剖面图

1—第四系沉积物；2—下侏罗统曲色组一段长石石英砂岩；3—白垩世花岗岩闪长斑岩；4—白垩世花岗岩闪长岩；5—安山岩；6—钾长石化+高岭土化带；7—高岭土化+绢英岩化带；8—青磐岩化带；9—钻孔及编号；10—钻孔深度

Fig. 4 Longitudinal geological section of the Bolong copper-gold deposit

1—Quaternary sediments; 2—Feldspar-quartz sandstone of 1st member of Lower Jurassic Quse Formation; 3—Early Cretaceous granodiorite-porphyry; 4—Early Cretaceous granodiorite; 5—Basaltic andesite; 6—K-feldspar + kaolinitization; 7—Kaolinitization + phlogopite; 8—Propylitization; 9—Drill hole and its serial number; 10—Drill hole depth

铁矿；热液成矿期包括4个成矿阶段，从早到晚依次是：② 钾化阶段，伴随着钾长石化和黑云母化，有较多的粗粒黄铁矿生成，伴生少量黄铜矿；③ 绢英岩化阶段，是铜矿床的主要成矿阶段，除了生成较多的

黄铜矿外，其他矿石矿物还包括黄铁矿、斑铜矿、方黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿等；④ 青磐岩化阶段，以广泛发育绿泥石为标志，伴生的矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铜矿；⑤ 石英碳酸盐阶段，

表 1 波龙矿区 ZK16701 钻孔黄铁矿硫同位素组成
Table 1 Sulfur isotopic composition of pyrite from drill hole ZK16701 of the Bolong ore district

序号	样品编号	采样位置	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{‰}$
1	BL-3	189 m	0.6
2	BL-5	205.4 m	-2.2
3	BL-7	235.7 m	2.3
4	BL-8	258.4 m	-0.6
5	BL-10	273 m	0.9
6	BL-13	313 m	1.3
7	BL-15	340 m	-0.9
8	BL-16	357.3 m	0.4
9	BL-17	367.39 m	0.3
10	BL-19	382 m	-0.2

注：表中数据引自吕立娜等(2011)。

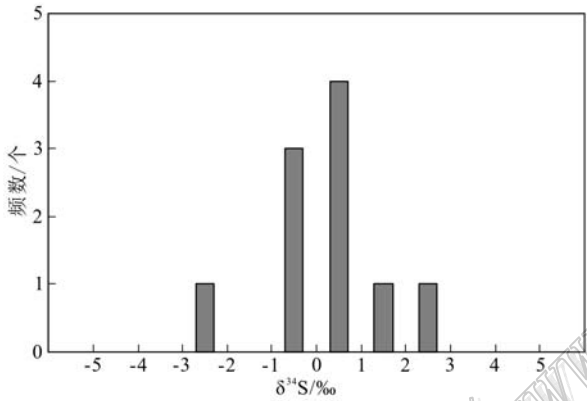


图 5 波龙矿区黄铁矿硫同位素组成直方图
Fig. 5 Sulfur isotopic composition histogram of pyrites from the Bolong ore district

可见晚期的石英碳酸盐脉穿插早期各阶段矿脉，有时可见硬石膏与之伴生；⑥ 表生期氧化阶段，多不杂矿区氧化矿厚度大体在 100~150 m 之间，氧化矿物有孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿等。

3 讨论

3.1 矿石硫同位素组成

波龙矿区 ZK16701 钻孔岩芯中黄铁矿的硫同位素分析结果列于表 1，结果表明波龙矿区黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 -2.2‰~2.3‰ 之间，平均为 0.2‰，在 S 同位素直方图(图 5)中， $\delta^{34}\text{S}$ 呈明显的塔式分布，峰值在 -1‰~1‰ 之间，接近幔源 S，表明成矿物质来源于深部岩浆，与周玉等(2013)得出的结论一致。

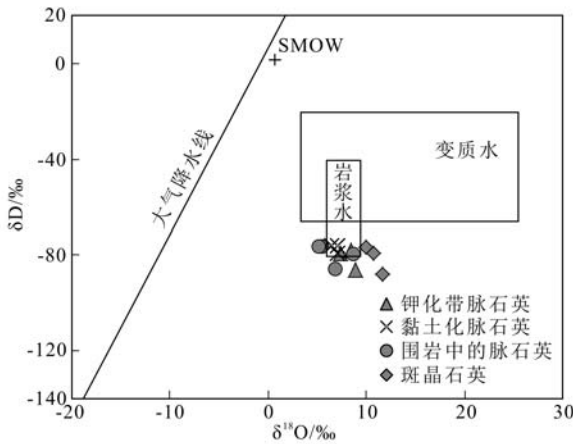


图 6 多不杂铜矿床成矿流体的 δD - δO 图解
(数据引自李金祥,2008,个人交流)

Fig. 6 δD - δO diagram of ore-forming fluid in Duobuzamine area (data from Li, 2008, personal communication)

3.2 成矿流体性质及来源

李光明等(2007)对多不杂矿区开展了比较深入的流体包裹体研究，结果表明斑晶石英和脉石英中都发育液相、气相及含有多种子矿物的多相包裹体。流体包裹体的均一温度介于 250~420℃ 之间，盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.71%~74.34%。多相包裹体的均一温度和盐度都很高，如石英斑晶中多相包裹体均一温度在 616~935℃ 之间，对应的盐度在 40%~72% 之间。包裹体中富含金属硫化物、赤铁矿、石盐、钾盐、黄钾铁矾、石膏等多种子矿物，表明成矿流体中富含 Na、K、Fe、Cu、Ca 等元素，成矿流体以高温、高盐度、高氧化性的岩浆热液为主，应属复杂的 $\text{NaCl} + \text{KCl} \pm \text{FeCl}_2 \pm \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 体系。在富气相包裹体中出现硫化物子晶，为成矿金属以气相迁移提供了直接证据。同样，在矿床范围内所有样品中都含有高盐度多相包裹体，划不出高盐度包裹体与液相包裹体的界线，说明本矿区成矿流体基本全部为岩浆流体，大气降水参与成矿的比例很小。李金祥等(2008, 个人交流)在本矿区用钻孔岩芯中的斑晶石英和矿化石英脉进行了氢、氧同位素分析，结果表明含矿斑岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 6.31‰~6.89‰， δD 为 -80.8‰~-69‰；矿化石英脉的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 6.07‰~10.55‰， δD 为 -79‰~-69‰，二者差别不大。在 δO - δD 图(图 6)中，样品落在岩浆水下部，反应残余岩浆流体特征，说明本矿区成矿流体主要是岩浆演化晚期分异出来的残余岩浆流体，大气降水在成矿过程中的作用不明显。

3.3 成矿构造环境

多不杂矿区成矿岩体为花岗闪长斑岩, 余宏全等(2009)用锆石 SHRIMP U-Pb 法得出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 一致线年龄为 (120.9 ± 2.4) Ma, 说明岩体形成于早白垩世。同时, 由该矿床辉钼矿测得的 Re-Os 等时线年龄为 (118.0 ± 1.5) Ma(余宏全等, 2009)。祝向平等(2013)用蚀变钾长石测得的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (118.3 ± 0.6) Ma, 反映出成岩成矿蚀变过程是一致的。除了多不杂矿区之外, 多龙矿集区其他几个铜金矿床的形成时代也都集中在 120 Ma 左右, 如李金祥等(2008)测得波龙矿区锆石 U-Pb 一致线年龄为 (121.6 ± 1.9) Ma, 祝向平等(2011)用辉钼矿测得 Re-Os 等时线年龄为 (119.4 ± 1.3) Ma, 反映了矿集区成矿事件的同一性。

在多龙矿集区的成岩成矿时代已经明确的情况下, 矿集区的斑岩型铜金矿床是形成于洋壳俯冲阶段(岛弧型)还是形成于陆-陆碰撞阶段(碰撞型)就决定于班公湖-怒江缝合带中特提斯洋盆的闭合时间。Kapp 等(2003)根据沉积地层的掩盖关系, 把班公湖-怒江洋盆的闭合时间限定在侏罗纪末—白垩纪初, 即 145 Ma 前后。陈玉禄等(2002)用 Rb-Sr 等时线法测定了缝合带中段去申拉组火山岩的年龄为早白垩世(126 Ma), 并认为它们是碰撞造山的产物。虽然鲍佩声等(2007)根据缝合带中蛇绿岩的锆石 U-Pb 年龄(132~110 Ma), 认为班公湖-怒江洋盆在早白垩世还没有闭合, 但 Harris 等(1990)的研究认为拉萨地块北缘 130~120 Ma 的花岗岩和 110~80 Ma 的火山岩都是碰撞后岩浆作用的产物。近年来取得的最新研究成果, 也倾向于班公湖-怒江缝合带中特提斯洋盆闭合时间偏早。如 Sui 等(2013)对拉萨地块北缘 110 Ma 的火山-侵入岩研究后, 指出这些火山岩形成于碰撞后地壳增厚环境, 并认为班公湖-怒江缝合带中段 140~110 Ma 期间为陆-陆碰撞阶段。Zhu 等(2013)则认为班公湖-怒江缝合带中特提斯洋盆闭合时间发生在早白垩世初 140 Ma 前后。曲晓明等(2012)在班公湖-怒江缝合带中段首次发现了一套 A-型花岗岩, 通过系统的锆石 U-Pb 年龄测定和岩石地球化学分析, 得出了班公湖-怒江缝合带中特提斯洋盆应该在早白垩世初(140~130 Ma 之间)闭合的结论。

虽然目前多数人倾向于多龙斑岩型铜金矿床属于岛弧型(余宏全等, 2009; 李金祥等, 2010; 李光明等, 2011; 祝向平等, 2011; 耿全如等, 2011), 但上述

资料说明多龙矿集区的铜金矿床应形成于碰撞后造山阶段。Liegeois 等(1998)研究指出, 在碰撞后阶段, 造山带内的构造体制以大型剪切带的大规模水平运动为特征, 应力体制由剪压向剪张转换。在这种构造环境下, 造山带中各种源区特别容易活化, 原因是在这一时期: ① 剪切带活动强烈; ② 岩石圈地幔在这一时期受到了交代改造; ③ 岩石圈结构在壳幔两个层次上均有剧烈变化; ④ 温度回升速度快。这些条件决定了碰撞后阶段对于铜矿床的成矿过程是十分有利的, 比岛弧阶段具有更大的优势。

3.4 矿床找矿标志

过去十几年来, 西藏地勘局第五地质大队在改则县北部多龙地区采用多种手段开展了卓有成效的地质找矿和矿区勘查工作, 积累了丰富的找矿经验。现从地质、遥感、物化探等方面梳理总结出以下有效的找矿标志。

3.4.1 地质找矿标志

(1) 大地构造-成矿区带标志: 多龙矿集区位于羌塘地块南缘(紧邻班公湖-怒江缝合带)的铁格龙构造岩浆带中, 所属成矿区带为喀喇昆仑-南羌塘-左贡成矿区带(南羌塘-左贡段)(Ⅲ级)之羌多-多龙-色哇成矿带(Ⅳ级)(斑岩 Cu-Au 矿等), 多龙斑岩型 Cu、Au 矿集区(Ⅴ级)。

(2) 区域构造-岩浆岩标志: 斑岩型铜-金多金属矿床发育于中生代构造岩浆弧中, 矿体分布明显受北东向和北西向走滑剪切断层的控制, 成矿岩体主要为早白垩世中酸性浅成-超浅成小型岩株, 岩性主要为花岗闪长斑岩和二长花岗斑岩。

(3) 蚀变带标志: 矿体产于斑岩体的内、外接触带中, 蚀变带类型包括钾化-绿泥石化带、绢英岩化带及青磐岩化带。

(4) 地貌及露头标志: 含矿斑岩体呈串珠状、红色与灰白色相间的浑园形山包。辉铜矿等硫化物和孔雀石化、蓝铜矿化等氧化物露头处是直接的找矿标志, 地表褐红色的强褐铁矿化及“火烧皮”也是地表露头的找矿标志。

3.4.2 遥感异常标志

多龙地区遥感解译的线性构造和环形构造是该区总体构造特征的反映。在遥感影像图上, 线性复合交切、环形交切、线性环形复合交切, 是控矿构造的具体表现形式, 深达基底, 火山岩体呈线状或串珠状展布, 说明是裂隙式侵入、喷发或喷溢, 同时为含矿热液提供了有利的通道和空间。

表 2 西藏多龙铜金矿集区成矿要素汇总表
Table 2 Metallogenic factors of the Duolong Cu-Au ore concentration area

成矿要素	特征	
稳定同位素组成	硫同位素	矿体中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为稍微偏离陨硫石的负值,表明硫来自地壳深部
	氢氧同位素	多龙斑岩型铜矿床的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化于 6.07‰~10.55‰之间, δD 为 -94.5‰~-69‰,说明多不杂富金斑岩铜矿床成矿热液以岩浆水为主,支持正岩浆成因模式
成矿时代	测年结果	多不杂矿区花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 法年龄为 $(119.32 \pm 0.74) \sim (121.6 \pm 1.9)$ Ma; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $(115.2 \pm 1.1) \sim (119.2 \pm 1.1)$ Ma 之间;辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄为 (118.0 ± 2.0) Ma
成矿物理化学条件	成矿流体温度	多不杂矿区流体包裹体均一温度介于 250~420℃ 之间,平均为 395℃。气液两相包裹体和含钾盐、石盐包裹体的平均均一温度接近,分别为 400℃ 和 432.2℃。熔融包裹体均一温度 620~960℃
	成矿流体盐度	多不杂矿区流体包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.71%~74.34%,平均为 49.3%,最高达 76%,最小捕获压力为 12~22 MPa。气液两相包裹体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 47.5%~74.3%。熔融包裹体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 范围 34%~82%
	成矿深度	多不杂铜矿高温高盐度的流体可能是在压力大于 $1.6 \times 10^8 \text{Pa}$ 的条件下捕获的,成矿深度在 1~5 km 之间
成矿构造环境	成矿背景	矿集区位于羌塘地块南缘,形成于班公湖-怒江中特提斯洋盆闭合后的陆-陆碰撞环境
	成矿地质条件	含矿斑岩体主要侵位于侏罗统曲色组二岩段(J_2q^2)和下白垩统美日切组(K_1m),围岩为变长石石英砂岩、安山岩和英安岩等,铜金元素风度较高。由于砂岩相对较脆硬,易形成大量的次级裂隙,成矿较好地段含矿裂隙率高达 200 条/m 以上,为热液流通和金属硫化物沉淀提供了通道和场所
成矿物质来源	成矿金属	成矿金属来源于地壳深部
	成矿流体	残余岩浆流体成矿,大气降水在成矿过程中的作用不明显
成矿阶段	依据矿物生成的先后顺序及矿物组合,可划分为岩浆、热液、表生 3 个成矿期、6 个成矿阶段	
成因类型	斑岩型铜金矿床	

3.4.3 化探异常标志

矿区主要矿种为铜(Cu),1:5 万水系沉积物测量发现多不杂铜、金异常浓度分带完整,分布面积最大,其次在尕尔勤、赛角、拿若沟、地保那木岗及铁格龙沟等 6 处分布有较大的异常区,说明本区具有巨大的找矿潜力。

3.4.4 物探异常标志

矿区具有明显的重力梯度带和磁异常带;低视电阻率、中高视极化率,中-强磁性等相互叠合的异常体存在,是斑岩型 Cu-Au 多金属矿床存在的地球物理标志。

4 矿床模型

4.1 矿床成因模型

位于青藏高原北部班公湖-怒江成矿带西段的多龙铜金矿集区形成于班公湖-怒江缝合带中特提斯洋盆闭合之后的碰撞造山环境,成矿物质来源于地壳深部,由残余岩浆流体形成,成矿流体具有高温(250~420℃)、高盐度($w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 40%~72%)特征。矿床由早白垩世(120 Ma±)花岗闪长斑岩形成,成矿深度在 1~5 km 之间。成矿过程包括岩浆、热液、表生 3 个成矿期、6 个成矿阶段。各项成矿要素汇总于表 2,成矿模式见图 7。

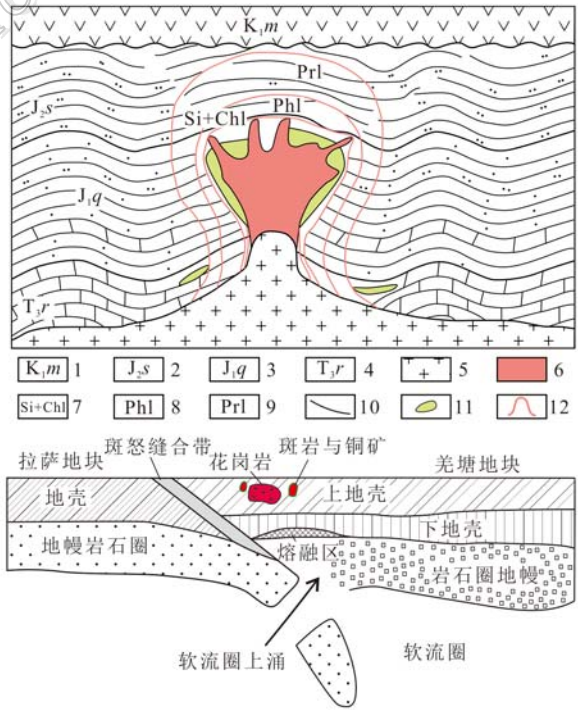


图 7 多不杂矿区(上)和多龙矿集区(下)斑岩型铜金矿床成因模式图

1—下白垩统美日切组杂色安山岩; 2—中侏罗统色哇组粉砂岩与泥岩互层; 3—下侏罗统曲色组长石石英砂岩夹粉砂岩; 4—上三叠统日干配群灰岩; 5—花岗岩; 6—早白垩世花岗闪长斑岩;

7—硅化+绿泥石化带; 8—绢英岩化带; 9—青磐岩化带; 10—地质界线; 11—矽卡岩型矿床; 12—蚀变分带界线

Fig. 7 Porphyry copper-gold deposit genetic model of the Duobuza ore district (upper) and the Duolongore ore concentration area (lower)

1—Lower Cretaceous Meirique Formation andesite; 2—Middle Jurassic Segui Formation siltstone intercalated with mudstone; 3—Lower Jurassic Quse Formation quartz sandstone; 4—Upper Triassic Riganpeicuo Formation limestone; 5—Granite; 6—Early Cretaceous granodiorite porphyry; 7—Silicification-chloritization zone; 8—Phyllic zone; 9—Propylitized zone; 10—Geological boundary; 11—Skarn-type ore; 12—Alteration zonation boundary

4.2 综合找矿模型

西藏地勘局第五地质大队从地质找矿到矿区勘探, 经过十几年的艰苦努力, 终于在多龙地区取得了斑岩型铜金矿床的重大找矿突破。回顾整个找矿历程, 多种找矿方法的综合运用和有机结合是取得找矿成功的有力保证。从最初发现化探异常开始, 1:50 000水系沉积物测量和1:10 000土壤测量是本地区发现矿化异常的有效方法(图 8a)。

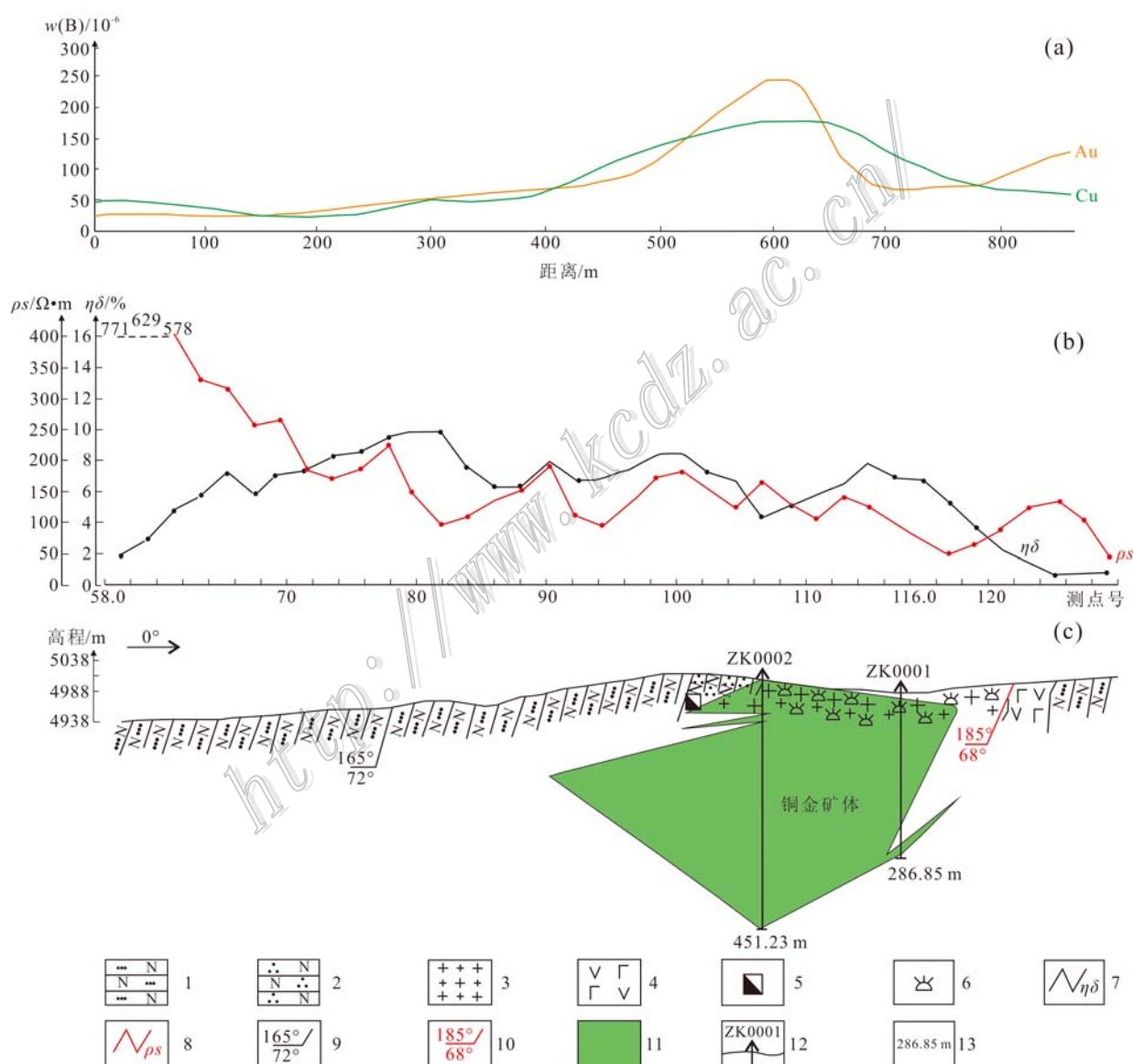


图 8 多不杂矿区综合找矿方法效果对比

a. 1:50 000 万水系沉积物测量剖面图; b. 1:10 000 高精度磁法测量和和激电测量剖面图; c. 多不杂矿区 0 号勘探线剖面图
1—长石石英砂岩; 2—长英质角岩; 3—花岗斑岩; 4—玄武安山岩; 5—褐铁矿化; 6—孔雀石化; 7—视极化率曲线; 8—电阻率曲线;
9—岩层产状(倾向/倾角); 10—断层产状(倾向/倾角); 11—铜金矿体; 12—钻孔及编号; 13—钻孔深度

Fig. 8 Composite profile for the effective prospecting methods of the Duobuza ore district

a. 1:50 000 stream sediment survey section; b. 1:10 000 section of magnetic and induced polarization survey; c. Geological section along No. 0 exploration line in the Duobuza ore district

- 1—Feldspar quartz sandstone; 2—Felsic hornfels; 3—Granite porphyry; 4—Basalt-andesite; 5—Limonitization; 6—Malachitization;
7—Apparent chargeability curve; 8—Apparent resistivity; 9—Bed attitude (dip/dip angle); 10—Fault attitude (dip and dip angle);
11—Copper-gold ore body; 12—Drill hole and its serial number; 13—Drill hole depth

1:50 000水系沉积物测量异常元素有 Au、Cu、Cr、Pb、Ni、Mo、Ag、Sb、Hg、As、Zn、Bi、W、Sn, 主成矿元素主要为 Au、Cu、Mo, 伴生元素为 Pb、Ag、Zn 等元素。异常特点是:① 成矿元素异常规模大, 浓度高, 具明显浓集中心和浓度分带;② 成矿和伴生元素沿成矿构造带分布;③ 异常外带为矿带范围, 中带显示矿田, 内带与赋矿部位和容矿构造有关;④ 间接成矿指示元素异常与成矿元素异常套合, 分布在近矿部位(后缘);⑤ 成矿环境指示元素异常组合与成矿中酸性岩体关系密切, 是含矿斑岩的指示元素。1:10 000土壤测量异常元素有 Au、Ag、Cu、Mo, 且强度高。物探方法的有效组合是将1:10 000高精度磁法测量和1:10 000激电测量相结合, 异常特征是视电阻率低, 视极化率中等偏高, 与中-高强度磁性异常相互叠合(图 8b)。矿集区布格重力异常全为负值, 在 $-550 \sim -480 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 之间。矿体多出现在布格重力异常等值线密集的重力梯度带上(图略)。这些物化探异常特征在多不杂矿区的深部钻孔中都得到了验证(图 8c)。

5 结 论

(1) 在班公湖-怒江成矿带西段的多龙矿集区, 至今已发现并评价了多不杂、波龙、地堡那木岗、拿若、荣那等多处大型、超大型铜金矿床。从目前的工程控制情况看, 矿集区及其外围铜(金)多金属矿找矿远景可达 2000 万吨以上。矿集区矿床成因类型以斑岩型铜金矿床为主, 个别矿床出现斑岩-浅成低温热液型(荣那矿区)或斑岩-角砾岩型矿化组合(拿若矿区)。

(2) 从目前勘查程度最高的两个矿区(多不杂和波龙)来看, 多龙矿集区围岩蚀变往往以花岗闪长斑岩为中心形成不完全的面型环状蚀变分带。在平面上, 由含矿斑岩中心向外, 可划分出钾硅化带→绢英岩化+伊利石+水白云母化带→青磐岩化带。在剖面上, 从深部到浅部, 蚀变可分为钾硅化带→绢英岩化带+钾化带→黏土化+青磐岩化带→黏土化带。

(3) 波龙矿区黄铁矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于

$-2.2\text{‰} \sim -2.3\text{‰}$ 之间, 平均为 0.2‰ , 峰值在 $-1\text{‰} \sim 1\text{‰}$ 之间, 塔式效应明显, 接近幔源 S, 表明成矿物质来源于深部岩浆。

(4) 研究表明, 多龙矿集区形成于早白垩世班公湖-怒江缝合带中特提斯洋盆闭合后的碰撞造山环境, 成矿物质来源于深部地壳, 成矿温度介于 $250 \sim 420^\circ\text{C}$ 之间, 成矿深度 $1 \sim 5 \text{ km}$, 成矿流体为残余岩浆流体, 大气降水在成矿过程中的作用不明显。

(5) 从多年的矿区勘查总结出多龙矿集区斑岩型铜金矿最有效找矿勘查方法技术组合是: 地质+化探(水系沉积物)+物探(高精度磁测、激电中梯)+钻探。

志 谢 文章的资料来源于西藏地勘局第五地质队勘查地质项目, 资料的整理得到西藏地勘局第五地质队李玉昌、张天平、刘朝强、李彦波、李玉彬及中国地质大学(武汉)魏启荣等同志的大力支持和帮助, 在此深表感谢!

References

- Bao P S, Xiao X C, Su L and Wang J. 2007. Petrologic, geochemical and chronological constraints to the tectonic environment of Dongcuo ophiolites in Tibet[J]. Science in China(Series D), 37(3): 298-307(in Chinese).
- Chen Y L and Jiang Y S. 2002. Age and significance of volcanic rock of early Cretaceous in the Bange-Qielicuo area in Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 1(8): 43-49(in Chinese).
- Du D D, Qu X M, Wang G H, Xin H B and Liu Z B. 2011. Bidirectional subduction of the middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu-Nujiang suture, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LAICPMS dating and petrogeochemistry of arc granites[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(7): 1993-2002(in Chinese with English abstract).
- Geng Q R, Pan G T, Wang L Q, Peng Z M and Zhang Z. 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co-Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 30(8): 1261-1274(in Chinese with English abstract).

- Harris N B W, Inger S and Ronghua X. 1990. Cretaceous plutonism in central Tibet: an example of post-collision magmatism[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(1): 21-32.
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, Harrison T M, Ding L and Guo J. 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 22(4).
- Li G M, Li J X, Qin K Z, Zhang T P and Xiao B. 2007. High temperature, salinity and strong oxidation ore-forming fluid at Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in the Bangonghu tectonic belt, Tibet: Evidence from fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 935-952(in Chinese with English abstract).
- Li G M, Duan Z M, Liu B, Zhang H, Dong S L and Zhang L. 2011. The discovery of Jurassic accretionary complexes in Duolong area, northern Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet, and its geologic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1256-1260(in Chinese with English abstract).
- Li J X, Li G M, Qin K Z and Xiao B. 2008. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghubelt, Tibet: Constraints on metallogenic tectonic settings[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 531-543(in Chinese with English abstract).
- Li J X, Qin K Z, Li G M, Zhang T P, Xiao B, Zhao J X and Chen L. 2010. The magmatic-hydrothermal system at at Duolong gold-rich porphyry copper deposits in the Bangonghu tectonic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and Ar-Argonochronology[J]. *Mineral Deposits*, 31: 460-461(in Chinese).
- Liegeois J P, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization[J]. *Lithos*, 45(1): 1-28.
- Lü L N, Zhao Y Y, Song L, Tian Y and Xin H B. 2011. Characteristics of C, Si, O, S and Pb isotopes of the Fe-rich and Cu (Au) deposits in the Western Bangong-Nujiang metallogenic belt, Tibet, and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, (8): 1291-1304(in Chinese).
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, Bourjot L, Avouac J P, Vidal P and Yi W. 1996. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(3): 311-330.
- Qu X M, Wang R J, Xin H B, Zhao Y Y and Fan X T. 2009. Geochronology and geochemistry of igneous rocks related to the subduction of Tethys oceanic plate along the Bangong Lake arc zone, the western Tibetan Plateau[J]. *Geochimica*, 38(6): 523-535(in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Xin H B, Zhao Y Y, Wang R J and Fan X T. 2010. Opening time of Bangong Lake Middle Tethys oceanic basin of the Tibet Plateau: Constraints from petro-geochemistry and zircon U-Pb LAICPMS dating of mafic ophiolites[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 53-63(in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Wang R J, Xin H B, Jiang J H and Chen H. 2012. Age and petrogenesis of A-type granites in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 146: 264-275.
- Qu X M, Xin H B, Du D D and Chen H. 2012. Ages of post-collisional A-type granite and constraints on the closure of the oceanic basin in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, the Tibetan plateau[J]. *Geochimica*, 41(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- She H Q, Li J W, Ma D F, Li G M, Zhang D Q, Feng C Y, Qu W J and Pan G T. 2009. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 28(6): 737-746(in Chinese with English abstract).
- Srinial N. 1986. India-Asia collision: Implications from the geology of the eastern Karakoram[J]. *Geology*, 14(6): 523-527.
- Sui Q L, Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, Chen Y, Santosh M and Mo X X. 2013. Compositional diversity of ca. 110 Ma magmatism in the northern Lhasa terrane, Tibet: Implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent-continent collision zone[J]. *Lithos*, 168: 144-159.
- Tang J X, Sun X G, Ding S, Wang Q, Wang Y Y, Yang C, Chen H Q, Li Y B, Li Y B, Wei L J, Zhang Z, Song J L, Yang H H, Duan J L, Gao K and Tan J Y. 2014. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore cluster area, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 35(1): 6-10(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y, Duo J, Wen C Q, Fei G C and Zhang Y. 2013. Geochemical characteristics of sulfur and lead isotopes from the Bolong copper deposit, Tibet[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (2): 43-49(in Chinese).
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Hou Z Q and Mo X X. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1429-1454.
- Zhu X P, Chen H A, Ma D F, Huang H X, Li G M, Li Y B and Li Y C. 2011. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry cop-

- per-gold deposit in Tibet, China and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2159-2164(in Chinese with English abstract).
- Zhu X P, Chen H A, Ma D F, Huang H X, Li G M, Wei L J and Liu C Q. 2012. Geology and alteration of the Duobuza porphyry copper-gold deposit in Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 48(2): 199-206 (in Chinese).
- Zhu X P, Chen H A, Ma D F, Huang H X, Li G M, Li Y B, Li Y C, Wei L J and Liu C Q. 2013. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hydrothermal K-feldspar and hydrothermal sericite from Bolong porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 32(5): 954-962(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍佩声, 肖序常, 苏犁, 王军. 2007. 西藏洞错蛇绿岩的构造环境: 岩石学、地球化学和年代学制约[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 37(3): 298-307.
- 陈玉禄, 江元生. 2002. 西藏班戈-切里错地区早白垩世火山岩的时代确定及意义[J]. *地质力学学报*, (8): 43-49.
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 辛洪波, 刘治博. 2011. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据[J]. *岩石学报*, 27(7): 1993-2002.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 彭智敏, 张璋. 2011. 班公湖-怒江带-羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. *地质通报*, 31(8): 1261-1274.
- 李光明, 李金祥, 秦克章, 张天平, 肖波. 2007. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体: 流体包裹体证据[J]. *岩石学报*, 23(5): 935-952.
- 李光明, 段志明, 刘波, 张晖, 董随亮, 张丽. 2011. 西藏班公湖-怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的特征及意义[J]. *地质通报*, 31(8): 1256-1260.
- 李金祥, 李光明, 秦克章, 肖波. 2008. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩-火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约[J]. *岩石学报*, 24(3): 531-543.
- 李金祥, 秦克章, 李光明, 张天平, 肖波, 赵俊兴, 陈雷. 2010. 西藏班公湖带多龙超大型富金斑岩铜矿床的岩浆-热液演化: U-Pb 和 Ar-Ar 年代学的证据[J]. *矿床地质*, 31(增刊): 460-461.
- 吕立娜, 赵元艺, 宋亮, 田毅, 辛洪波. 2011. 西藏班公湖-怒江成矿带西段富铁矿与铜(金)矿 C、Si、O、S 和 Pb 同位素特征及地质意义[J]. *地质学报*, (8): 1291-1304.
- 曲晓明, 王瑞江, 辛洪波, 赵元义, 樊兴涛. 2009. 西藏西部与班公湖特提斯洋盆俯冲相关的火成岩年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 38(6): 523-535.
- 曲晓明, 辛洪波, 赵元艺, 王瑞江, 樊兴涛. 2010. 西藏班公湖中特提斯洋盆的打开时间: 镁铁质蛇绿岩地球化学与锆石 U-Pb LAICPMS 定年结果[J]. *地学前缘*, 17(3): 53-63.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 陈华. 2012. 西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. *地球化学*, 41(1): 1-14.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义[J]. *矿床地质*, 28(6): 737-746.
- 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 王勤, 王艺云, 杨超, 陈红旗, 李彦波, 李玉彬, 卫鲁杰, 张志, 宋俊龙, 杨欢欢, 段吉琳, 高轲, 谭江云. 2014. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. *地球学报*, 35(1): 6-10.
- 周玉, 多吉, 温春齐, 费光春, 张贻. 2013. 西藏波龙铜矿床 S、Pb 同位素地球化学特征[J]. *矿物岩石*, (2): 43-49.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌. 2011. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 27(7): 2159-2164.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 卫鲁杰, 刘朝强. 2012. 西藏多不杂斑岩铜金矿床地质与蚀变[J]. *地质与勘探*, 48(2): 199-206.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌, 卫鲁杰, 刘朝强. 2013. 西藏波龙斑岩铜金矿床钾长石和绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 32(5): 954-962.