

院士专栏

文章编号: 1004-4051(2024)06-0001-13

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241146

西藏多龙斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿集区 地质特征及找矿潜力分析

唐菊兴¹, 杨欢欢¹, 李宏伟², 王 勤³, 李彦波², 李 社⁴, 林 彬¹,
李发桥¹, 翟建军⁴, 唐晓倩^{3,5}, 杨 超³, 董玉杰², 李建力², 付雪莲³,
陈守关², 袁盛朝⁴, 王梦蝶¹, 张 琪⁶, 张荣坤¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,
北京 100037;

2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海 格尔木 816000;

3. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059;

4. 中铝西藏金龙矿业股份有限公司, 西藏 拉萨 850000;

5. 北京中矿联咨询中心, 北京 100029;

6. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘 要: 本文在总结多龙矿集区地质特征的基础上, 开展了矿山深边部的潜力分析, 以期为进一步的找矿预测提供勘查思路。多龙斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿集区位于西藏班公湖-怒江成矿带的北西侧, 主要由铁格隆南超大型斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床, 拿若大型斑岩-隐爆角砾岩筒型铜(金)矿床, 多不杂、波龙、多不杂西大型斑岩型铜(金)矿床, 尕尔勤、地堡那木岗高硫化浅成低温热液型铜(金)矿点组成, 共探获铜资源量超过 1 500 万 t, 伴生金超 250 t, 伴生银 3 900 t。多龙矿集区形成于早白垩世(120 Ma)班公湖-怒江洋盆北向俯冲的陆缘弧环境, 物质源区为壳幔混合源, 成矿岩浆岩主要为中酸性的闪长玢岩-花岗闪长斑岩-花岗斑岩系列, 具有弧岩浆特征。俯冲板片的折返是多龙矿集区深部岩浆形成和侵位的主要动力学机制, 成矿后安山质火山岩(110 Ma)的覆盖对矿床起到重要的保存作用。多不杂矿区 F2 逆断层将矿体分割成上、下两部分, 下部分矿体是找矿的重点方向。铁格隆南矿区深钻揭露了由南向北的逆冲断层, 该逆冲断层将矿体错断并推覆到“红层”沉积之上, 其下盘是寻找另一半隐伏矿体的方向。尕尔勤矿区大面积发育指示浅成低温热液成矿系统的“硅帽”, 明显富集 Au、Ag、As、Sb、Bi、Cu 等元素, Au、As、Sb、Hg 等呈现较好的元素组合异常, 具有寻找浅成低温热液型矿床的潜力。地堡那木岗矿区发育高硫化浅成低温热液型蚀变(高岭石化、地开石化、明矾石化等)和矿物组合(铜蓝、蓝辉铜矿、斑铜矿等), 且物探、化探、遥感异常套合良好, 是未来矿产勘查的重点。区内逆冲断层对矿床的改造作用是未来研究的重点, 对进一步的勘查评价具有重要的指导意义。

关键词: 西藏; 多龙矿集区; 斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床; 地质特征; 成矿潜力评价
中图分类号: P618.41; P619.51; TD167 **文献标识码:** A

收稿日期: 2024-05-30 责任编辑: 赵奎涛

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“大宗紧缺战略性矿产重点调查区块优选(重要矿山深边部预测及外围勘查区块优选)”资助(编号: DD20230362); 国家重点研发计划项目“西藏大型铜等战略性矿产资源基地绿色勘查与开发示范”资助(编号: 2022YFC2905000)

第一作者简介: 唐菊兴(1964—), 男, 一级研究员, 从事矿床学和固体矿产勘查与评价研究工作, E-mail: tangjuxing@126.com。

通讯作者简介: 杨欢欢(1988—), 女, 副研究员, 从事斑岩型铜(金)矿床改造-保存机制研究以及成矿潜力评价, E-mail: zggyhh@outlook.com。

李宏伟(1986—), 男, 地质矿产工程师, 主要从事矿产勘查与评价工作, E-mail: 609281317@qq.com。

引用格式: 唐菊兴, 杨欢欢, 李宏伟, 等. 西藏多龙斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿集区地质特征及找矿潜力分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(6): 1-13.
TANG Juxing, YANG Huanhuan, LI Hongwei, et al. Geological characteristics and prospecting potential analysis of Duolong porphyry-epithermal copper (gold) ore district in Tibet[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(6): 1-13.

Geological characteristics and prospecting potential analysis of Duolong porphyry-epithermal copper (gold) ore district in Tibet

TANG Juxing¹, YANG Huanhuan¹, LI Hongwei², WANG Qin³, LI Yanbo², LI She⁴,
LIN Bin¹, LI Faqiao¹, ZHAI Jianjun⁴, TANG Xiaoqian^{3,5}, YANG Chao³,
DONG Yujie², LI Jianli², FU Xuelian³, CHEN Shouguan², YUAN Shengchao⁴,
WANG Mengdie¹, ZHANG Qi⁶, ZHANG Rongkun¹

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China;

2. No. 5 Geological Brigade of the Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud 816000, China;

3. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

4. Chinalco Tibet Jinlong Mining Co., Ltd., Lhasa 850000, China;

5. Beijing CMA Consulting Center, Beijing 100029, China;

6. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: On the basis of summarizing the geological characteristics of the Duolong ore district, this paper conducts a potential analysis of the depth and margin areas of the mine, in order to provide ideas for ore exploration prediction. Duolong porphyry-epithermal copper (gold) ore district is located in the northwest of the Bangongco-Nujiang Metallogenic Belt in Tibet. It is mainly composed of Tiegelongnan giant porphyry-epithermal copper (gold) deposit; Naruo large porphyry-cryptoexplosive breccia copper (gold) deposit; Duobuza, Bolong, and Duobuzaxi large porphyry copper (gold) deposits, and Gaerqin, Dibaonamugang high sulfidation-epithermal copper (gold) ore occurrences. A total of over 15 million tons of copper have been discovered in the Duolong ore district, with over 250 tons of associated gold and 3 900 tons of associated silver. Duolong ore district was formed in a continental margin arc environment of the northward subducting of Bangongco-Nujiang Ocean Basin in the early Cretaceous (120 Ma). The material source is a mixed of crust and mantle, and the ore-forming magmatic rocks are mainly the moderately acidic diorite porphyry-granodiorite porphyry-granite porphyry series, with arc magmatic characteristics. The rollback of subducting plates is the main dynamic mechanism for the formation and emplacement of deep magma in the Duolong ore district. The coverage of andesitic volcanic rocks (110 Ma) after mineralization plays an important role in the preservation of the deposit. The F2 reverse fault in Duobuza ore area divides the ore body into upper and lower parts, and the lower part of the ore body is the key direction for prospecting. The deep drilling in the Tiegelongnan ore area exposes a reverse fault, the ore body on the hanging wall overlies the “red layer”, the foot wall is the direction for the missing half of ore body. The extensive development of “lithocaps” indicating epithermal mineralization system, the enrichment of elements such as Au, Ag, As, Sb, Bi, Cu, etc. and the good combined anomalies of Au, As, Sb, Hg, etc. in the Gaerqin ore area show the potential for epithermal deposits. The development of high sulfidation epithermal alteration (kaolinite, dickite, alunite, etc.) and mineral assemblages (covelite, digenite, bornite, etc.) in Dibaonamugang ore area and well integrated geophysical, geochemical, and remote sensing anomalies make it a focus of future mineral exploration. The transformation effect of thrust faults on deposits in the area is a key focus of future research and has important guiding significance for further exploration and evaluation.

Keywords: Tibet; Duolong ore district; porphyry-epithermal copper (gold) deposit; geological characteristic; metallogenic potential evaluation

0 引言

铜是我国重要的大宗紧缺战略性矿产资源之一, 在有色金属矿产中消费量仅次于铝。近年来, 我国铜消费量逐年增加, 已连续 16 年作为全球最大铜消

费国。斑岩型铜矿床提供全球约 75% 的铜、50% 的钼、20% 的金、大部分的铼, 以及少量银、碲、硒、铋、铅、锌^[1-3], 是铜的重要来源。西藏多龙斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿集区位于西藏班公湖-怒江成矿带

(以下简称“班-怒带”)北西侧,南羌塘地块南缘,主要由铁格隆南超大型斑岩-高硫化浅成低温热液型铜(金银)矿床,拿若大型斑岩-隐爆角砾岩筒型铜(金)矿床,多不杂、波龙、多不杂西等大型斑岩型铜(金)矿床,拿顿、色那等隐爆角砾岩筒型金(铜)矿床(点),地堡那木岗、尕尔勤高硫化浅成低温热液型铜(金)矿点,以及赛角、色那东等斑岩型铜金矿(化)点和中小型砂金矿床(点)组成(图1),成矿成岩时间为120 Ma^[4-11]。截至目前,区内探获铜资源量超2 500万t,伴生金超520 t,伴生银3 900 t,提交铁格隆南超大型斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床1处,多不杂、拿若、波龙、多不杂西大型斑岩型铜金矿床4处,斑岩型铜(金)矿化点6处。

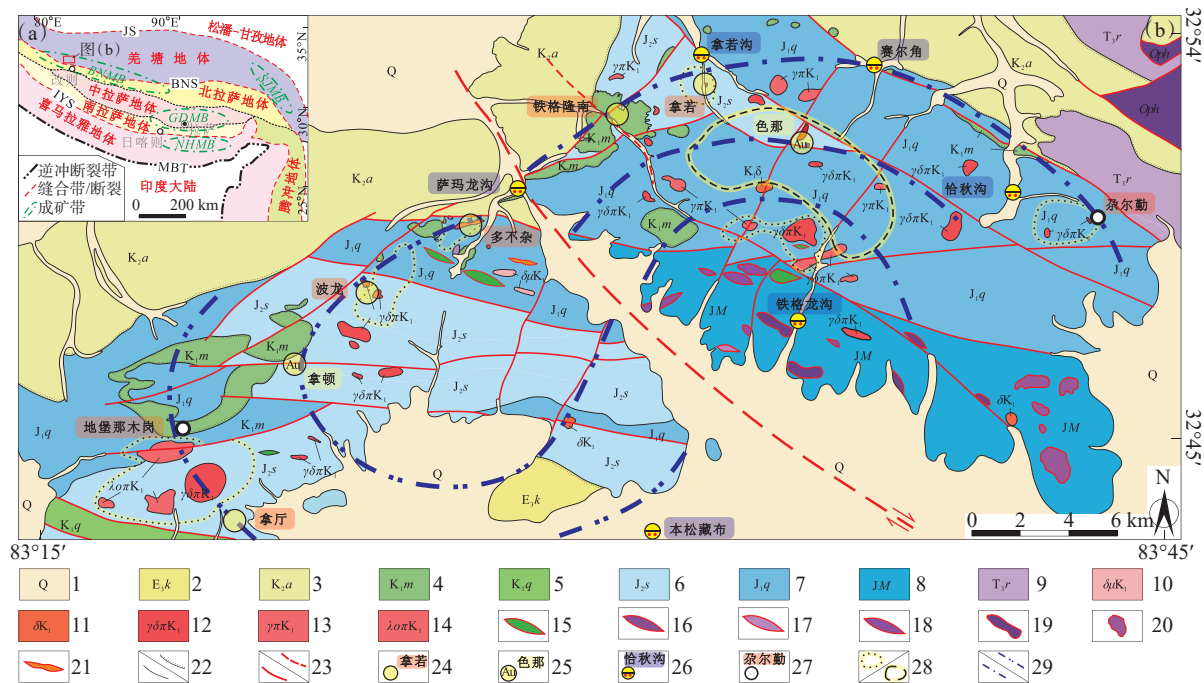
近年来,多龙矿集区的成矿系统研究及矿产勘查工作均取得重大进展,使其成为班-怒带乃至青藏高原斑岩-浅成低温热液成矿系统的典型代表。然而,前期对矿集区的研究及勘查工作显示多龙矿集区的深边部仍存在较大的成矿潜力,因此,本文基于前期的研究和勘查工作,评价多龙矿集区深边部的成矿

潜力,以期为进一步的找矿预测提供勘查思路。

1 矿区地质概况

多龙斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿集区的地层以中生界为主,包括出露在东北部的上三叠统日干配错组(T_3r)浅海碳酸盐岩夹碎屑沉积岩,侏罗系木嘎岗日组(JM)类复理石沉积建造,下侏罗统曲色组(J_1q)和中侏罗统色哇组(J_2s)长石石英砂岩、石英砂岩、泥质板岩,下白垩统美日切错组(K_1m)玄武岩、玄武质安山岩、安山岩、流纹岩等火山岩,上白垩统阿布山组(K_2a)磨拉石沉积建造,渐新统康托组(E_3k)及第四系(Q)冲(洪)积沉积物等(图1)。

区内构造以断裂构造为主,受地表第四系沉积物覆盖率高、地层岩石露头较少等因素的影响,目前区内的构造地质特征研究较为薄弱。根据主要断裂构造线走向,矿集区内构造可分为北东-南西向断裂、北西-南东向断裂、东-西向断裂,以及由南向北的逆冲推覆构造^[13],最早发育的为东西向断裂,先后被北东向断裂和北西向断裂切割,形成“菱块状”构造格架,大部分矿床产出于构造断裂交汇处。



(a)大地构造位置图;(b)矿区地质图;1-第四系;2-渐新统康托组;3-上白垩统阿布山组;4-下白垩统美日切错组;5-下白垩统去申拉组;6-中侏罗统色哇组;7-下侏罗统曲色组;8-侏罗系木嘎岗日组;9-上三叠统日干配错组;10-早白垩统闪长玢岩;11-早白垩统闪长岩;12-早白垩统花岗闪长斑岩;13-早白垩统花岗斑岩;14-早白垩统石英斑岩;15-辉长岩脉(块体);16-辉绿岩脉(块体);17-辉长岩脉(块体);18-玄武岩(脉);19-蛇绿混杂岩;20-构造岩块(晚三叠世);21-构造岩(灰岩夹层);22-地质界线(整合/不整合界线);23-实测断层/推测断层;24-斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床及名称;25-岩金矿床(点)及名称;26-砂金矿床(外生矿床)及名称;27-具成矿远景的矿点及名称;28-遥感影像提取的泥化/角岩化蚀变范围;29-遥感影像/高精度磁测反映的环形构造;JS-金沙江缝合带;BNS-班公湖-怒江缝合带;IYS-印度-雅鲁藏布缝合带;MBT-主边界逆冲断裂带;SJMB-三江成矿带;BNMB-班-怒带;GDMB-冈底斯成矿带;NHMB-北喜马拉雅成矿带

图1 多龙矿集区大地构造位置图及矿区地质图

Fig. 1 Tectonic location map of Duolong ore district and geological map of the ore area

(资料来源:文献[12])

区内出露的岩体以规模小、类型多为特征,其中,基性、中酸性岩株,岩脉,岩瘤呈带状、串珠状展布,主要包括:①蛇绿混杂岩残片,由枕状、团块状玄武岩组成,常与硅质岩或辉长岩岩墙共同产出于侏罗系地层中;②早白垩世基性岩,主要为辉长岩,以岩脉或岩墙形式呈近东西向不连续展布,该类型岩脉多侵位于侏罗系地层中;③早白垩世中酸性-酸性侵入岩(闪长玢岩、石英二长闪长岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩等),蚀变发育,部分发育明显的铜矿化,是矿集区主要的成矿岩体;④基性-中酸性陆相火山岩,由玄武质安山岩、安山岩、英安岩等喷出岩组成,沿北东向或北西向断续分布,是成矿后火山活动的产物,覆盖于铁格隆南等矿床之上,起到了保护作用。

2 主要矿床地质特征

2.1 拿若斑岩-隐爆角砾岩筒型铜(金)矿床

拿若矿床发育斑岩型矿体和隐爆角砾岩筒型矿体(图2),以广泛发育富集Cu、Au的青磐岩化蚀变为特征^[14],地层以中侏罗统色哇组(J_2s)为主。

斑岩和隐爆角砾岩筒型铜(金)矿体主要赋存于花岗闪长斑岩和下侏罗统色哇组长石石英砂岩中,少量赋存于闪长玢岩中,其中,以花岗闪长斑岩为主要的成矿斑岩体。斑岩型矿化系统位于矿区北东部,发育3期花岗闪长斑岩体,其中前两期与矿化密切相关,闪长玢岩主要分布在斑岩系统的西侧远端,矿化较弱,蚀变包括钾化、绢云母化、青磐岩化蚀变,矿石矿物以黄铜矿为主,呈脉状、团斑状产出。隐爆

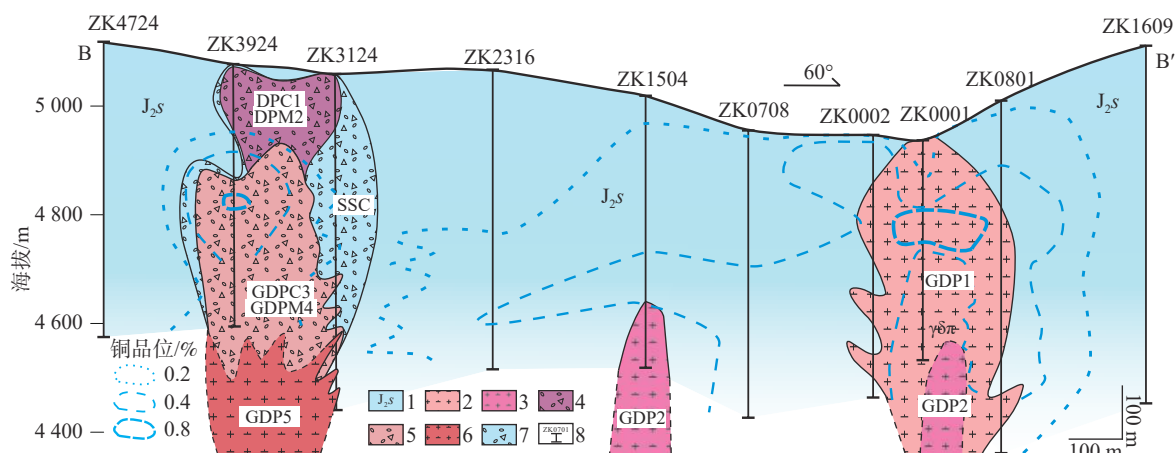
角砾岩筒型矿化系统位于矿区西南侧,角砾成分主要为长石石英砂岩、闪长玢岩、花岗闪长斑岩,热液胶结和岩粉胶结(图3)。发育的深部钾化蚀变带和浅部硅化蚀变带均遭受后期绿泥石化的强烈叠加作用,Cu矿化主要以浸染状、团斑状发育在胶结物和隐爆角砾岩与围岩接触带附近。

拿若矿床成矿岩浆具有高氧逸度特征^[15],斑岩成矿系统成矿流体可分为早、中、晚3阶段,其中,早阶段、中阶段流体均一温度为200~500℃,具有高温-高盐度特征,此阶段为主成矿阶段;晚阶段流体均一温度为200~300℃,具有低温-低盐度特征^[16]。隐爆角砾岩成矿系统可分为早、晚两阶段,早阶段流体形成于208~368℃,属高温-中低盐度流体;晚阶段流体形成于232~588℃,属中高温-中低盐度流体,成矿作用与隐爆作用后的含矿热液流入和金属元素的沉淀有关^[17]。

2.2 铁格隆南斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床

铁格隆南矿床是多龙矿集区内品位最高、规模最大的铜矿床,是班-怒带首个达到勘探程度的世界级超千万吨级铜矿床。矿区出露地层主要包括第四系(Q)冲洪积及残坡积松散堆积物、上白垩统阿布山组(K_2a)、下白垩统美日切组(K_1m)及中侏罗统色哇组(J_2s)。

矿床浅部发育以明矾石-高岭石-地开石-叶蜡石化蚀变和硫铜矿-蓝辉铜矿-铜蓝等Cu-S二元体系矿物为主的浅成低温热液成矿系统,深部发育以绢云母化-黑云母化-钾长石化蚀变和辉钼矿、黄铜矿-

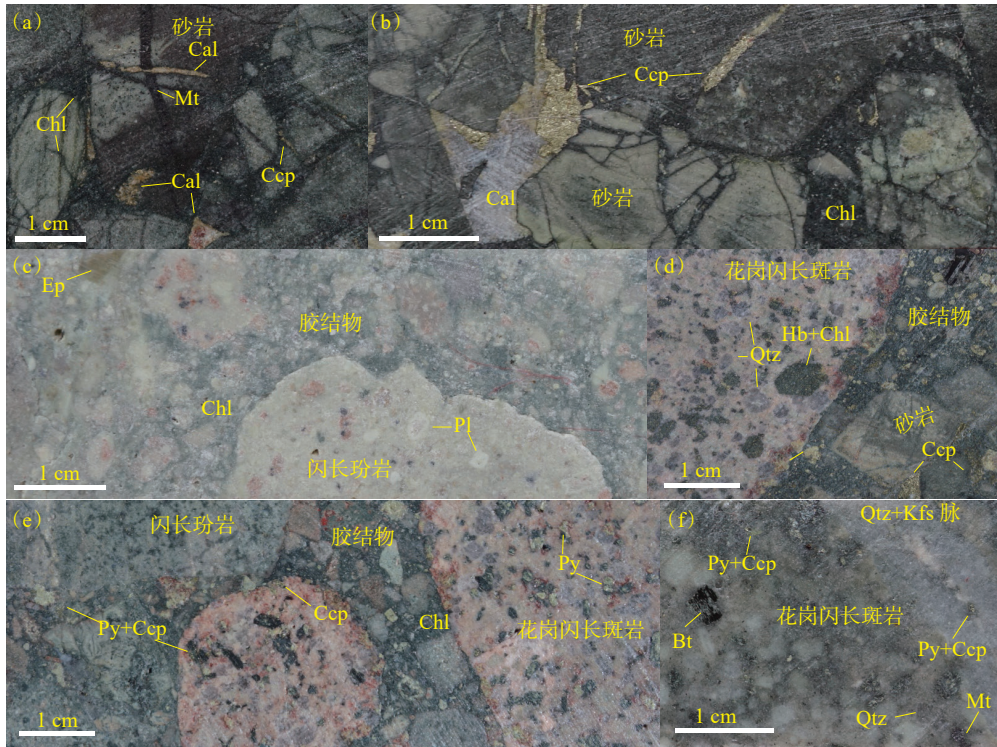


1-中侏罗统色哇组变长石石英砂岩; 2-斑岩成矿系统早期含矿花岗闪长斑岩; 3-斑岩成矿系统晚期含矿花岗闪长斑岩; 4-隐爆角砾岩系统闪长质和砂岩角砾岩; 5-隐爆角砾岩系统花岗闪长质和砂岩角砾岩; 6-隐爆角砾岩系统角砾岩底部花岗闪长斑岩; 7-砂岩角砾岩; 8-钻孔及钻孔编号; GDP1-早期含矿花岗闪长斑岩; GDP2-晚期含矿花岗闪长斑岩; SSC-砂岩(围岩)角砾; DPC1-第1期角砾中闪长玢岩岩浆作用; DPM2-第2期胶结物中闪长玢岩岩浆作用; GPC3-第3期角砾中花岗闪长斑岩岩浆作用; GDP4-第4期胶结物中花岗闪长斑岩岩浆作用; GDP5-花岗闪长斑岩

图2 拿若矿床北东-南西向剖面地质特征及Cu品位分布

Fig. 2 Geological characteristics and Cu grade distribution of the northeast-southwest profile of Naruo deposit

(资料来源:文献[14])



(a) ZK3124-301 m, 角砾以砂岩为主, 发育大量绿泥石、多期次磁铁矿脉以及方解石脉切穿砂岩角砾, 黄铜矿主要发育在胶结物中; (b) ZK3124-332.1 m, 角砾岩成分为砂岩、角岩, 发育绿泥石化, 绿泥石脉切穿角砾, 并可见方解石填充砂岩角砾空隙, 可判断方解石晚于绿泥石形成, 黄铜矿呈团斑状沿方解石边缘发育或呈脉状切穿早期角砾; (c) ZK3124-39.2 m, 角砾以闪长玢岩为主, 发生绢云母-泥化蚀变, 胶结物以绿泥石化为主, 绢云母-泥化蚀变次之, 矿化不明显; (d) ZK3924-337.4 m, 角砾成分为花岗闪长玢岩和砂岩, 胶结物为岩屑和岩粉, 角砾中发育绿泥石、绿帘石、绢云母化蚀变, 胶结物以绿泥石化为主, 黄铜矿、黄铁矿以团斑状和浸染状产出; (e) ZK3924-327 m, 地质现象同图(d); (f) ZK3124-592 m, 隐爆作用期后花岗闪长玢岩(GDP5), 发育Qtz+Kfs脉, 蚀变以绿泥石化、钾长石化、黑云母化为主; Qtz-石英; Cal-方解石; Chl-绿泥石; Ep-绿帘石; Kfs-钾长石; Bt-黑云母; Py-黄铁矿; Ccp-黄铜矿; Mt-磁铁矿; Pl-斜长石; Hb-角闪石

图3 拿若矿床隐爆角砾岩典型微观照片

Fig. 3 Typical microscopic photos of cryptoexplosive breccia in Naruo deposit

(资料来源: 文献[14])

斑铜矿等 Cu-Fe-S 三元体系矿物为主的斑岩矿化系统^[4-6,18-19](图4)。

矿床高级泥化蚀变大面积叠加在深部绢英岩化蚀变之上, 且常见代表斑岩型矿化的黄铜矿被代表浅成低温热液型矿化的蓝辉铜矿、硫砷铜矿交代的特征^[6,10,18,20-21]。年代学研究显示, 铁格隆南斑岩型矿化形成时间为 123.0~118.7 Ma^[10,18], 浅成低温热液型矿化形成时间约为 117.9 Ma^[18]。钻孔岩芯揭示 110 Ma 的安山质火山岩呈角度不整合覆盖在铁格隆南的成矿岩体之上, 说明铁格隆南矿床在形成之时(120 Ma)至 110 Ma 之间经历了抬升剥蚀过程, 该剥蚀作用导致古潜水面下降, 进而导致浅成低温热液型矿化叠加在斑岩型矿化之上。

铁格隆南矿床与斑岩型矿化有关的成矿流体为高氧化性、高温、高盐度的岩浆流体, 从斑岩矿化阶段到浅成低温热液矿化阶段的演化过程中, 成矿流体为由高温高盐度向低温低盐度过渡的以大气水为

主, 并混合有深部岩浆流体的强酸性、中-低温、低盐度流体^[16,22-24]。温度的降低和不同流体的混合可能是铁格隆南浅部高品位铜矿化形成的关键^[25]。

2.3 多不杂斑岩型铜(金)矿床

多不杂斑岩型铜(金)矿床是多龙矿集区内最早发现的矿床之一, 以铜为主, 伴生金, 已达大型规模。矿区出露地层较为简单, 主要为第四系(Q)、上白垩统阿布山组(K₂a)、下侏罗统曲色组(J₁q)及木嘎岗日岩组(JM)。

含矿岩体为花岗闪长斑岩, 富钾贫钠, 出露面积小, 主要分布在东西向与北东向断层交汇部位^[26-29]。成矿岩体的锆石 U-Pb 年龄为 119.32±0.74~127.8±2.6 Ma, 集中在 120 Ma^[8,30-33]。辉钼矿 Re-Os 年龄为 118.0±1.5 Ma^[32]。成矿斑岩体具有高氧化状态^[34]。

金属矿物以黄铜矿、黄铁矿为主, 其次为斑铜矿、黝铜矿、辉钼矿、闪锌矿、磁铁矿等, 非金属矿物主要包括石英、钾长石、斜长石、高岭石、多水高岭石、绢云母等(图5), 发育4类磁铁矿, 高 Mn、低 V 的磁

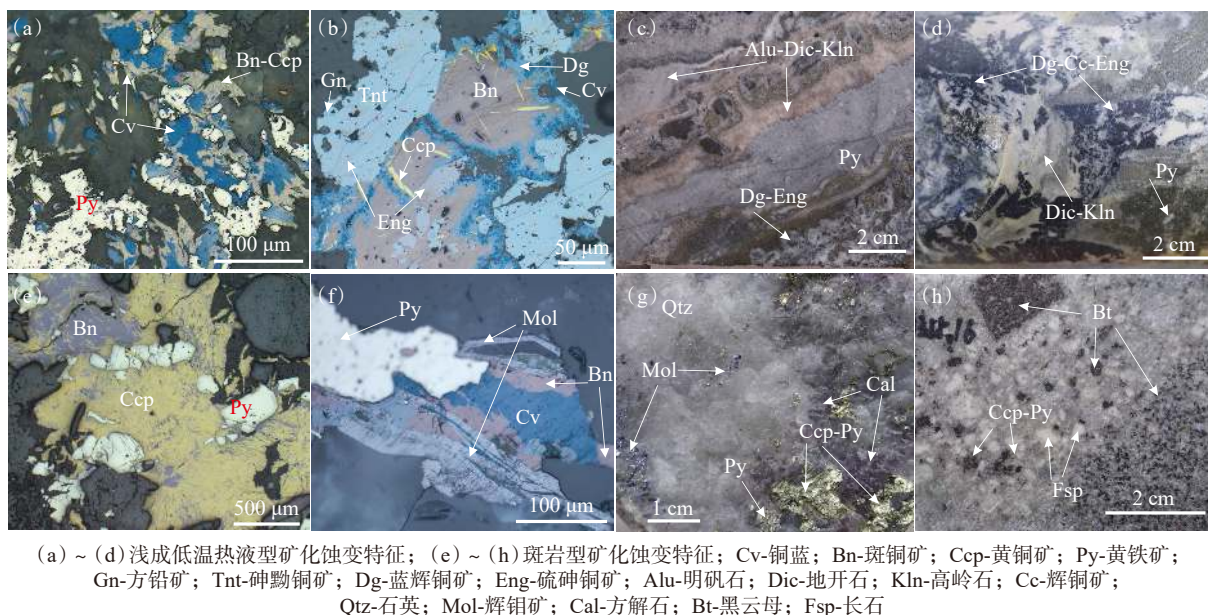


图4 铁格隆南矿床典型矿物镜下及手标本照片

Fig. 4 Typical mineral microscopic and hand specimen of Tiegelongnan deposit

铁矿与多不杂矿床铜矿化关系密切^[35]。矿床从斑岩体中心向外依次发育钾硅酸盐化带→绢英岩化带→青磐岩化带蚀变,蚀变分带符合斑岩型铜矿典型蚀变分带模式,矿化主要发育在钾硅酸盐化带及绢英岩化带中^[35-41]。矿区北部发育逆断层F2,该断层为典型的成矿后断层,将多不杂含斑岩体逆冲推覆于上白垩统阿布山组之上。

多不杂矿床成矿流体以高温、高盐度、高氧化的富含成矿元素的岩浆流体为主,大气降水循环参与成矿的成分较少,但随着成矿过程的进行,大气降水的比例逐渐增加^[36,42-43]。

2.4 波龙斑岩型铜(金)矿床

波龙铜(金)矿床是继多不杂矿床之后,在班-怒带西段发现的又一大型矿床。矿区出露地层包括渐新统康托组、第四系(Q)冲洪积物、中侏罗统色哇组(J_{2s})以及下侏罗统曲色组(J_{1q})。矿区内发育两条北东向断裂构造。岩浆岩包括花岗闪长斑岩和美日切组中的安山岩、玄武质安山岩,其中,花岗闪长斑岩具有多期次侵入特征,与矿化关系密切。

金属矿物以黄铜矿为主,其次为黄铁矿、斑铜矿、辉钼矿、磁铁矿、镜铁矿等,其中,黄铜矿和黄铁矿常呈脉状、浸染状产出。发育钾长石化、硅化、黑云母化、绢云母化、泥化、石膏化、碳酸盐化、绿帘石化和绿泥石化等。与多不杂矿区相比,波龙矿区地表以发育强烈的绢云母化和泥化、硅化为特点。蚀变在地表表现为中心式面型分布,自深部至浅部分别为钾硅酸盐化带-黄铁绢英岩化带-泥化叠加黄铁绢英岩化带-青磐岩化带^[44],以发育强烈的绢英岩化

带和外围的青磐岩化带为特征。

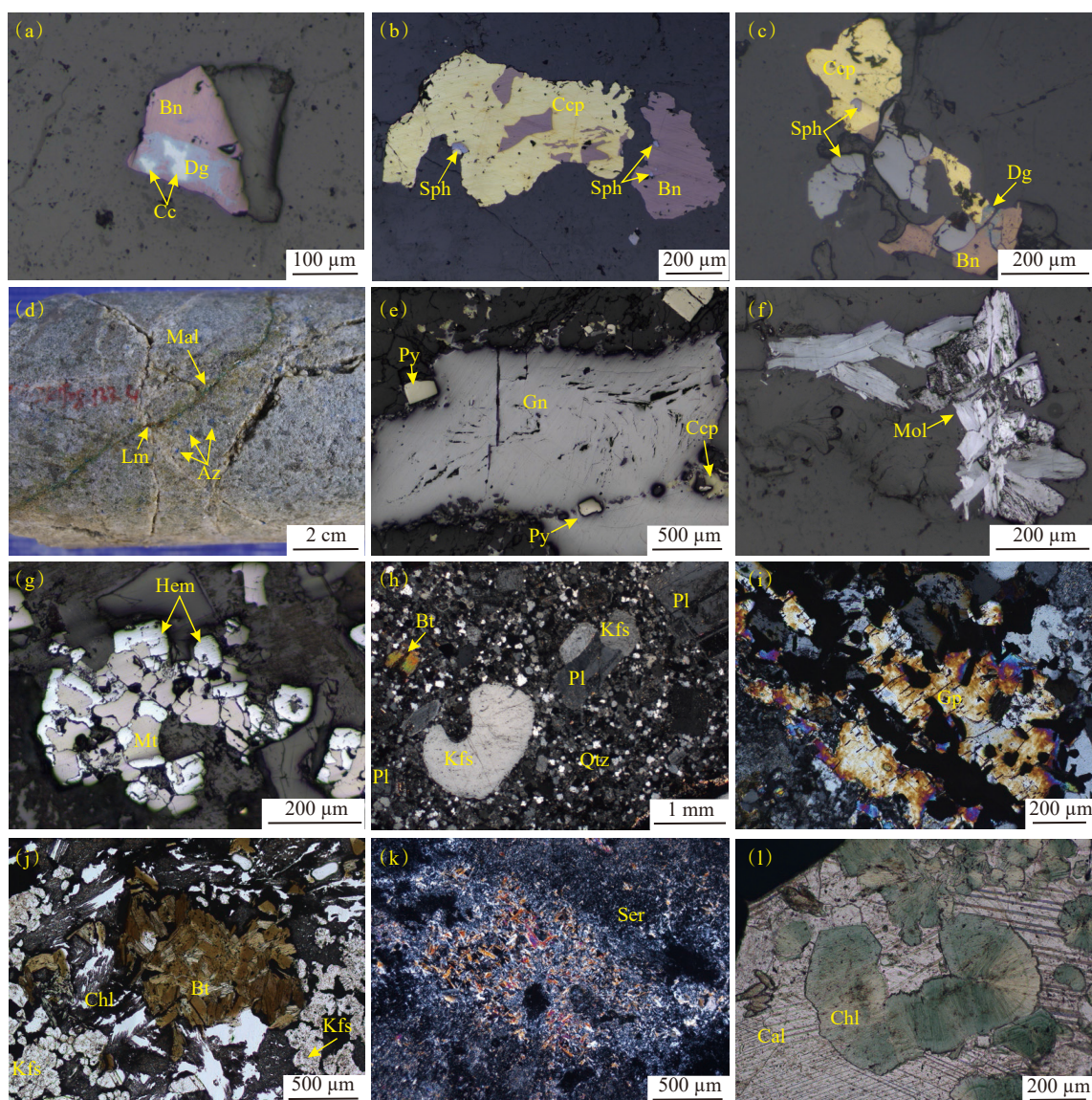
矿区发育3期花岗闪长斑岩,锆石 U-Pb 年龄为 119~120 Ma^[45],辉钼矿 Re-Os、钾长石和绢云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 的年龄均为 118~119 Ma,波龙矿床的岩浆-热液活动时限为 120~118 Ma^[46-47]。成矿花岗闪长斑岩的氧逸度高^[34],成矿流体演化的晚期具有大气降水的加入^[48-49]。

3 矿床成因

前人对多龙矿集区内铁格隆南、拿若、多不杂、波龙等矿床和矿化点开展了大量的成岩成矿年代学研究(图6)。矿集区内含斑岩体的锆石 U-Pb 年龄分布在 127.8±2.6~116.6±1.3 Ma 之间^[7,16,20,22,30,32,46-47,50-53],但集中于 120 Ma,表明了矿集区内与成矿有关的岩浆作用主要形成于早白垩世^[14]。辉钼矿、黄铁矿、热液黑云母、钾长石、绢云母等矿物的年代学研究结果表明(图6),多龙矿集区斑岩型矿化蚀变的年龄为 122.0~115.0 Ma^[7,10,16,24,26,32,46-47,54],铁格隆南矿床代表浅成低温热液型矿化的高级泥化带明矾石 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 116.3~111.7 Ma^[18]。

矿区不含矿的闪长玢岩、花岗闪长斑岩主要分布在多不杂、拿若、赛角、拿顿等矿区,锆石 U-Pb 年龄为 121.6~113.1 Ma^[22,55-58]。成矿后的火山岩多集中发育于 111.9~105.7 Ma^[20,22,53-54,59],对矿床形成后的保存起到了非常重要的作用^[4-6,19,29,59]。

多龙矿集区成矿岩浆岩主要为中酸性的闪长玢岩-花岗闪长斑岩-花岗斑岩系列,属于高钾-钙碱性或钾玄岩系列,富集轻稀土和大离子亲石元素(Rb、Ba、U),亏损重稀土及高场强元素(Nb、Ta、Ti),具



(a) 斑铜矿被蓝辉铜矿、辉铜矿交代; (b) 黄铜矿、斑铜矿被闪锌矿交代; (c) 闪锌矿交代黄铜矿、斑铜矿, 蓝辉铜矿沿斑铜矿边部交代; (d) 蓝铜矿呈团斑状产出, 褐铁矿、孔雀石沿裂隙交代; (e) 方铅矿交代黄铁矿、黄铜矿; (f) 辉钼矿; (g) 赤铁矿沿磁铁矿边部交代; (h) 花岗闪长斑岩的钾长石、斜长石、黑云母斑晶; (i) 石膏; (j) 热液黑云母; (k) 绢云母; (l) 绿泥石、方解石; Dg-蓝辉铜矿; Cc-辉铜矿; Mal-孔雀石; Lm-褐铁矿; Ccp-黄铜矿; Py-黄铁矿; Bn-斑铜矿; Sph-闪锌矿; Gn-方铅矿; Mol-辉钼矿; Mt-磁铁矿; Hem-赤铁矿; Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Qtz-石英; Bt-黑云母; Chl-绿泥石; Ser-绢云母; Cal-方解石; Gp-石膏; Az-蓝铜矿

图5 多不杂斑岩铜(金)矿床典型矿物组合

Fig. 5 Typical mineral assemblage of Duobuza porphyry copper (gold) deposits

(资料来源: 文献 [35])

有典型的弧岩特征^[20,51,60]。

多龙矿集区形成于早白垩世班公湖-怒江洋盆北向俯冲的陆缘弧环境, 其物质源区具有明显的幔源组分特征, 为壳幔混合源区, 可能与俯冲板片流体交代的富集岩石圈地幔部分熔融有关^[16,20,31,54]。俯冲板片的折返可能是多龙矿集区早白垩世铜金成矿作用的深部岩浆形成和侵位的主要动力学机制^[20]。

4 找矿潜力

4.1 多不杂矿区

勘查及综合研究成果显示, 多不杂矿区 23-15-07-

00-08-16 号勘探线 05 排钻孔、00 排钻孔揭露 F2 断层, 呈近东西走向, 倾向南, 倾角 70°±, 破碎带宽 10~30 m, 该断层将多不杂含矿斑岩体和矿体分割为上、下两部分, 逆断层上盘的矿体被逆冲推覆于上白垩统阿布山组之上(图 7), 地表可见较强的孔雀石化和部分花岗闪长斑岩露头。目前揭露的多不杂矿床均位于断层上盘, 多不杂矿床下部被断层错断, 向南运移, 尚未被揭露^[26]。宋扬等^[29]通过对多不杂矿区部署的 AMT“十字”测深剖面解译不仅发现了 F2 断层为一条上陡下缓的逆冲断层, 而且在断层下盘 4 400~

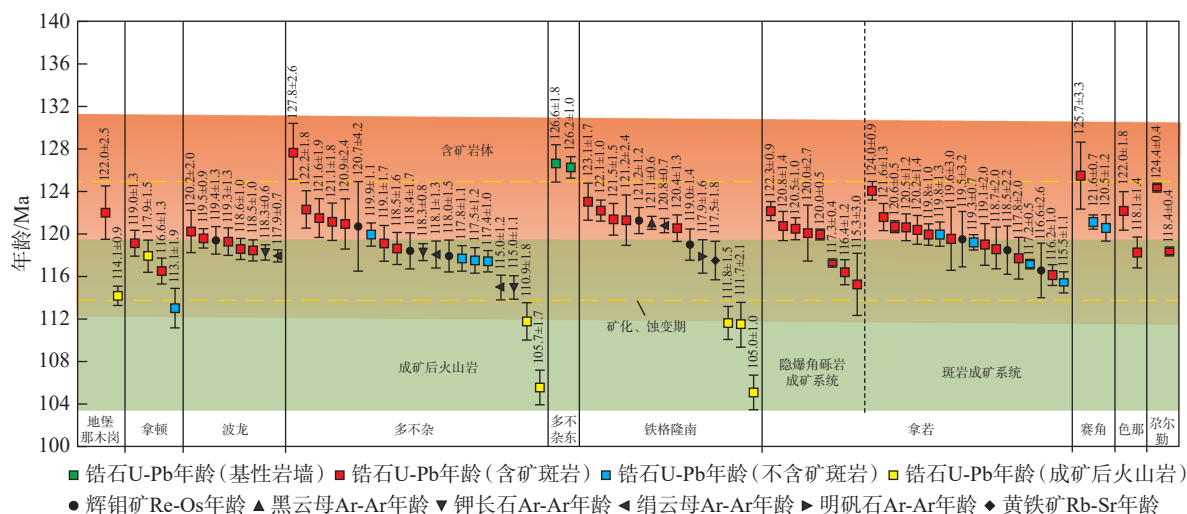


图 6 多龙矿集区成岩成矿作用年代学格架

Fig. 6 Chronological framework of diagenesis and mineralization in Duolong ore district

(资料来源: 文献 [14])

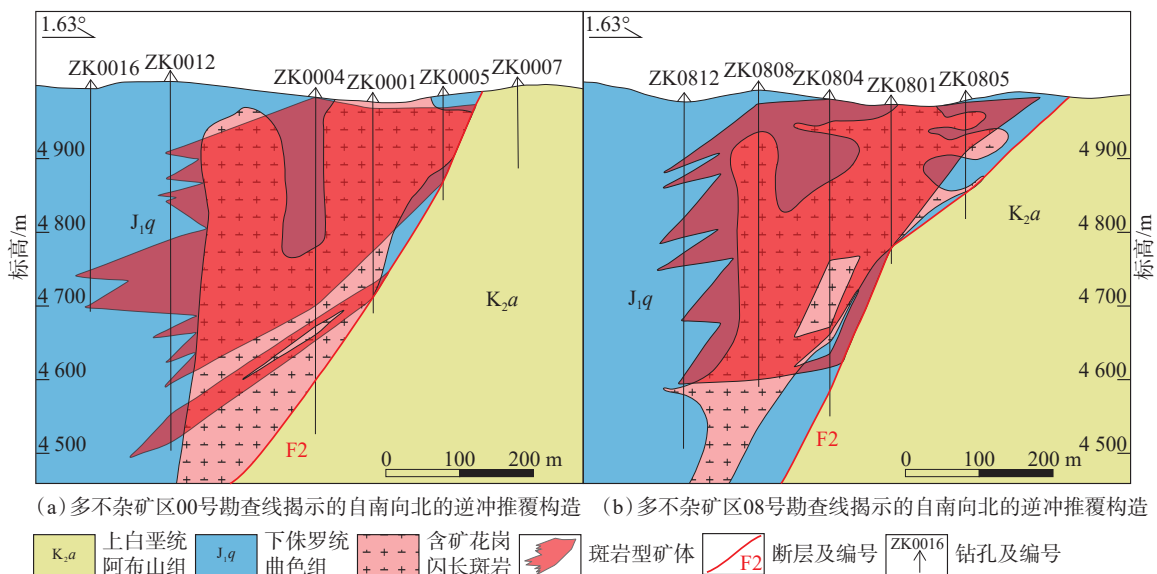


图 7 多不杂矿区 00 线和 08 线控制的 F2 推覆构造特征

Fig. 7 The characteristics of F2 nappe structure controlled on the 00 and 08 lines of Duobuza ore area

4 000 m 的深度发现了疑似矿致异常,可能是被断层分割的另一半矿体。

这条成矿后构造可能类似于美国亚利桑那州圣玛纽埃-克拉玛祖矿床成矿后的构造,是造成矿体被错失的主要原因。目前,断层下盘的矿体仍未探获,是深部寻找被错失的另一半矿体以及开展深部矿产勘查工作的理论基础。

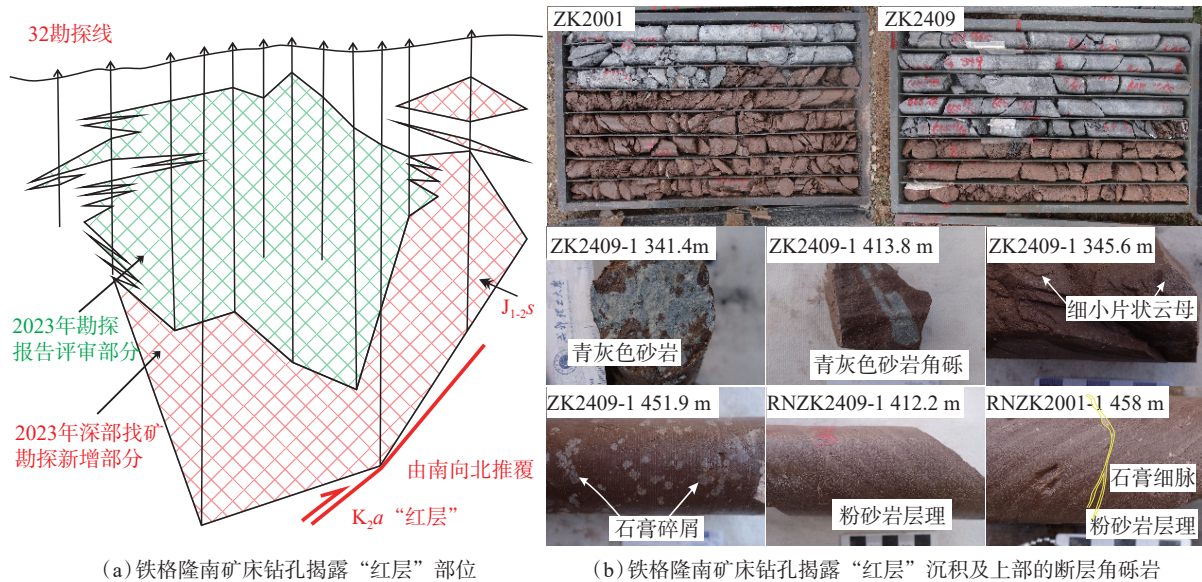
4.2 铁格隆南矿床

2023 年在铁格隆南矿床施工的超 1 400 m 钻孔中发现了以往未曾发现的新地层,岩性为红棕色粉砂岩与粉砂质泥岩互层(“红层”),与上部的长石石英砂岩呈断层接触,断裂带由外到内主要由正常岩石→碎裂岩→构造角砾岩→断层泥组成,该断层使早

白垩世矿体位于该“红层”沉积之上,为逆断层(图 8)。该断层将原深埋的矿体逆冲推覆至浅部,并被发现和勘查评价,其下盘矿体尚未发现。矿床蚀变系统和矿化系统结构解剖显示,铁格隆南矿床可能还有一半的矿化系统尚未揭露,进一步找矿潜力巨大。该断层与多不杂矿区的 F2 断层是否属于同一构造体系,该构造体系对矿区的改造作用是未来研究的重点,对矿区进一步的勘查评价具有重要的指导意义。

4.3 尔尔勤矿区

尔尔勤矿区位于多龙矿集区东侧,其北东侧地表大面积分布指示浅成低温热液型矿床的“硅帽”^[60](图 9)。发育以岩体为中心的近似环带状蚀变分带,



(a) 铁格隆南矿床钻孔揭露“红层”部位

(b) 铁格隆南矿床钻孔揭露“红层”沉积及上部的断层角砾岩

图8 铁格隆南矿床钻孔揭露“红层”沉积以及上部的断层角砾岩

Fig. 8 The “red layer” and the upper fault breccia revealed by drilling core of the Tiegelongnan deposit

岩体附近以硅化、强褐铁矿化、黄铁矿化、绢云母化为主;远离岩体的蚀变以绿泥石化、硅化、弱褐铁矿化为主。蚀变范围受岩体规模、产状、形态控制,蚀变类型、强弱则与岩体的距离有关。蚀变带在平面上呈近椭圆形,岩体及其附近蚀变强烈,远离岩体蚀变逐渐减弱或消失。

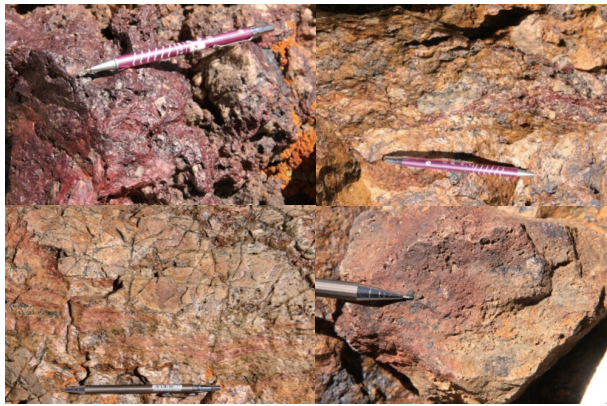


图9 尕尔勤矿区北东侧出露的“硅帽”

Fig. 9 The exposed “lithocaps” on the northeast side of the Gaerqin ore area

尕尔勤矿区浅成低温热液型矿床顶部的“硅帽”,地表露头规模约250 m×160 m,呈近椭圆状,岩石多呈紫红色、红色、灰红色,主要岩性为碧玉岩、燧石岩、多孔状石英及硅质(铁质)胶结角砾岩,“硅帽”内部岩石具块状、条带状、多孔状及角砾状构造。尕尔勤地区富集 Au、Ag、As、Sb、Bi、Cu、Pb、Hg、Mo、Tl、Se 等元素,Au、As、Sb、Hg 等元素均出现了明显异常,“硅帽”处拣块样的 Au 含量可达 0.3 g/t 以

上。尕尔勤矿区成矿条件有利,控矿构造、岩浆作用等因素基本清楚,具有较大的找矿潜力。

4.4 地堡那木岗矿区

地堡那木岗矿区位于多龙矿集区西部,区内中酸性岩浆活动强烈,蚀变发育,地表大量发育高岭石、叶腊石、绢云母、白云母等蚀变矿物。矿化以脉状、网脉状、浸染状铜矿化为主,发现了与高硫化浅成低温热液型矿床有关的铜蓝、蓝辉铜矿、斑铜矿等铜矿物,岩体与围岩接触带铜品位较高。

前期土壤地球化学测量圈定 6 处 Au、Cu 元素异常(图 10)。地面高精度磁测显示地堡那木岗矿区北侧的“环状”异常可能为古火山机构,土壤地球化学测量显示,该地区 Au 具有三级浓度分带,峰值高达 132 ppb,元素异常组合为 Au-As-Pb-W-Mo-Ag,显示出斑岩成矿系统中内带元素的组合特征,异常与物探异常的套合情况良好。该区域具有较完整的铁染和羟基三级分带特征,铁染及羟基套合情况良好,羟基蚀变类型以镁羟基蚀变为主。地面高光谱蚀变矿物填图也表明,其主要蚀变矿物为明矾石+高岭石+石膏±地开石等,符合浅成低温热液型矿化的蚀变矿物组合特征。围绕该火山口的区域是下一步找矿勘查的重点地区。

5 结论

1) 矿集区形成于早白垩世(120 Ma)班公湖-怒江洋盆北向俯冲的陆缘弧环境,物质源区为壳幔混合源区,成矿岩浆岩主要为中酸性的闪长玢岩-花岗闪长斑岩-花岗斑岩系列,典型的弧岩浆特征。俯冲板片的折返是多龙矿集区形成的主要动力学机制,成

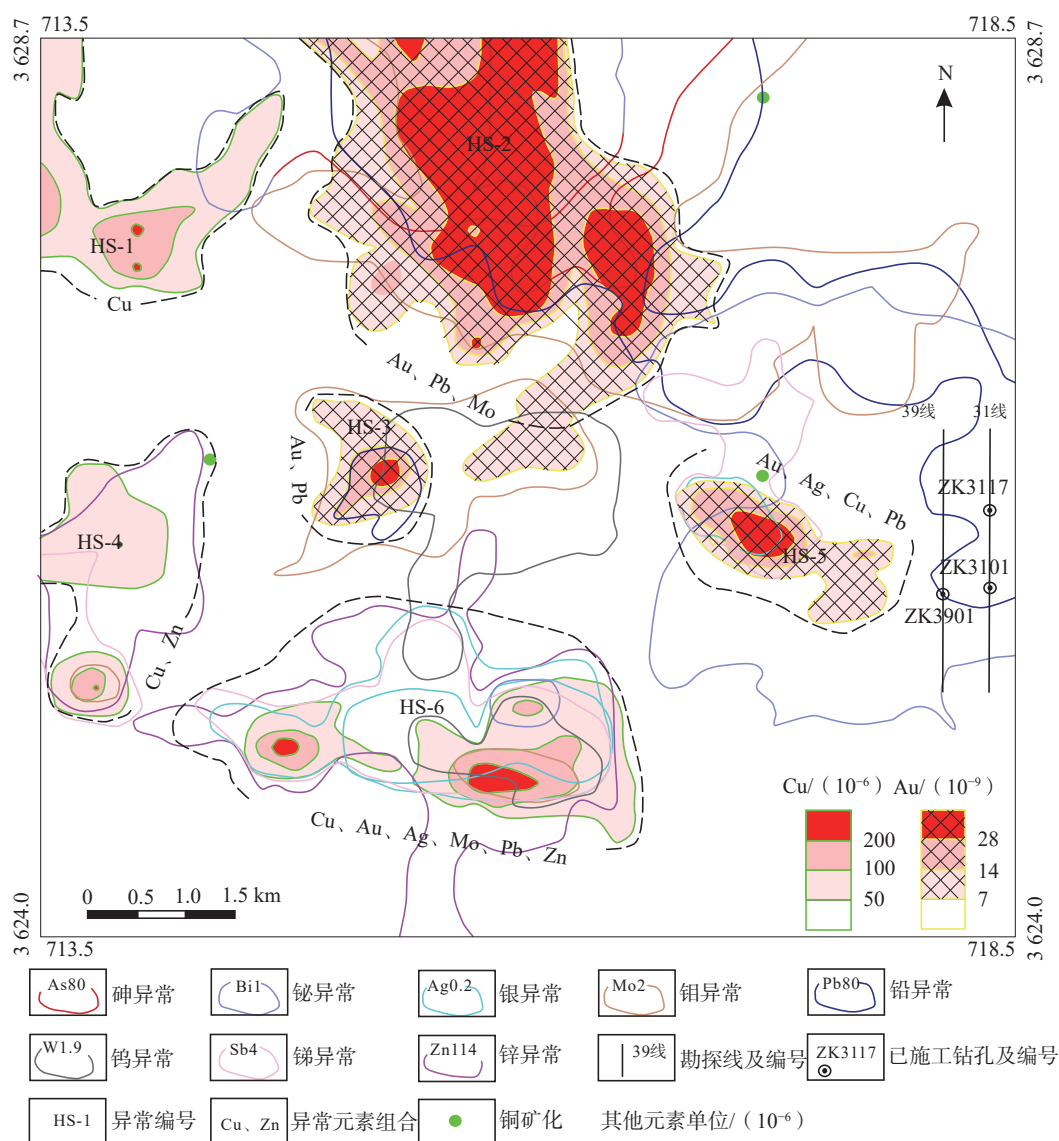


图10 地堡那木岗矿区南部1:2.5万土壤地球化学测量综合异常图

Fig. 10 Comprehensive anomaly map of 1:25 000 soil geochemical measurements in the south of the Dibaonamugang ore area

矿后 110 Ma 的安山质火山岩的覆盖对矿床的保存起到重要作用。

2) 多不杂矿区 F2 逆断层将矿体分割成上、下两部分,下部分矿体是找矿重点;铁格隆南深钻揭露了由南向北的逆冲断层,该逆冲断层将矿体推覆到“红层”沉积之上,其下盘是寻找另一半隐伏矿体的方向。区内逆冲断层对矿床的改造作用是未来研究的重点,对进一步的勘查评价具有重要的指导意义。

3) 尕尔勤矿区大面积发育指示浅成低温热液型矿化的“硅帽”,明显富集 Au、Ag、As、Sb、Bi、Cu 等元素, Au、As、Sb、Hg 等呈现较好的元素组合异常,具有寻找浅成低温热液型矿床的潜力;地堡那木岗矿区大量发育高岭石、叶蜡石、绢云母、白云母等蚀变矿物,铜矿物以铜蓝、蓝辉铜矿、斑铜矿等为主,具有高硫化浅成低温热液型矿床的特征,区内物探、

化探、遥感异常套合良好,具有良好的找矿潜力。

参考文献 (References):

- [1] 毕献武,李鸿莉,双燕,等. 骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征:对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 539-548.
BI Xianwu, LI Hongli, SHUANG Yan, et al. Geochemical characteristics of fluid inclusions from Qitianling A-type granite, Hunan Province, China: tracing the source of ore forming fluid of the Furong superlarge tin deposit[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 539-548.
- [2] SILLITOE R H. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 3-41.
- [3] 毛景文,谢桂青,袁顺达,等. 环太平洋成矿带斑岩-矽卡岩型铜矿和与花岗岩有关的锡多金属矿研究现状与展望[J]. 岩石学报, 2018, 34(9): 2501-2517.
MAO Jingwen, XIE Guiqing, YUAN Shunda, et al. Current research

- progress and future trends of porphyry-skarn copper and granite-related tin polymetallic deposits in the Circum Pacific metallogenic belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(9): 2501-2517.
- [4] 唐菊兴,孙兴国,丁帅,等.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*, 2014, 35(1): 6-10.
TANG Juxing, SUN Xingguo, DING Shuai, et al. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au-Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(1): 6-10.
- [5] 唐菊兴,王勤,杨超,等.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*, 2014, 33(6): 1151-1170.
TANG Juxing, WANG Qin, YANG Chao, et al. Two porphyry-epithermal deposit metallogenic subseries in Tibetan Plateau: practice of “absence prospecting” deposit metallogenic series[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(6): 1151-1170.
- [6] 唐菊兴,宋扬,王勤,等.西藏铁格隆南铜(金银)矿床地质特征及勘查模型:西藏首例千万吨级斑岩-浅成低温热液型矿床[J].*地球学报*, 2016, 37(6): 663-690.
TANG Juxing, SONG Yang, WANG Qin, et al. Geological characteristics and exploration model of the Tiegelongnan Cu(Au-Ag) deposit: the first ten million tons metal resources of a porphyry-epithermal deposit in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(6): 663-690.
- [7] 方向,唐菊兴,宋杨,等.西藏铁格隆南超大型浅成低温热液铜(金、银)矿床的形成时代及其地质意义[J].*地球学报*, 2015, 36(2): 168-176.
FANG Xiang, TANG Juxing, SONG Yang, et al. Formation epoch of the South Tiegelong supelarge epithermal Cu (Au-Ag) deposit in Tibet and its geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(2): 168-176.
- [8] 祝向平,陈华安,刘鸿飞,等.西藏拿若斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J].*地质学报*, 2015, 89(1): 109-128.
ZHU Xiangping, CHEN Huaan, LIU Hongfei, et al. Geochronology and geochemistry of porphyries from the Naruo Porphyry Copper Deposit, Tibet and their metallogenic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(1): 109-128.
- [9] ZHU D C, LI S M, CAWOOD P A, et al. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 2015, 245: 7-17.
- [10] LIN B, CHEN Y C, TANG J X, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr ages of the Tiegelongnan porphyry Cu-(Au) deposit in the Bangong Co-Nujiang metallogenic belt of Tibet, China: implication for generation of super-large deposit[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(2): 602-616.
- [11] LIN B, TANG J X, CHEN Y C, et al. Geology and geochronology of Naruo large porphyry-breccia Cu deposit in the Duolong district, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2018, doi:10.1016/j.gr.2018.07.009.
- [12] 王勤,唐菊兴,陈毓川,等.西藏多龙超大型铜(金)矿集区成矿模式与找矿方向[J].*岩石学报*, 2019, 35(3): 879-896.
WANG Qin, TANG Juxing, CHEN Yuchuan, et al. The metallogenic model and prospecting direction for the Duolong super large copper (gold) district, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(3): 879-896.
- [13] LIU Y M, WANG M, LI C, et al. Cretaceous structures in the Duolong region of central Tibet: evidence for an accretionary wedge and closure of the Bangong-Nujiang Neo-Tethys Ocean[J]. *Gondwana Research*, 2017, 48: 110-123.
- [14] 李发桥.西藏拿若大型斑岩铜(金)矿床成矿作用机制:来自矿物学的证据[D].北京:中国地质大学(北京), 2022.
- [15] ZHU X P, JI D, LI G M, et al. High oxidation magmatic evolution in the Naruo porphyry Cu deposit, Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 2019, 76: 26-43.
- [16] 孙嘉.西藏多龙矿集区岩浆成因与成矿作用研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2015.
- [17] 高轲,多吉,唐菊兴,等.西藏多龙矿集区拿若铜(金)矿床蚀变特征[J].*矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(6): 1226-1237.
GAO Ke, DUO Ji, TANG Juxing, et al. Alteration of Naruo porphyry Cu(Au) deposit in the Duolong ore-concentration area, Tibet[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(6): 1226-1237.
- [18] YANG C, TANG J X, BEAUDOIN G, et al. Geology and geochronology of the Tiegelongnan porphyry-epithermal Cu (Au) deposit, Tibet, China: formation, exhumation and preservation history[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020: 103575.
- [19] YANG C, BEAUDOIN G, TANG J X, et al. Cu-sulfide mineralogy, texture, and geochemistry in the Tiegelongnan porphyry-epithermal copper system, Tibet, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2022, 57: 759-779.
- [20] 林彬.西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿床蚀变与成矿[D].北京:中国地质科学院, 2018.
- [21] ZHANG X N, LI G M, QIN K Z, et al. Porphyry to epithermal transition at the Rongna Cu-(Au) deposit, Tibet: insights from H-O isotopes and fluid inclusion analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020: 103585.
- [22] LI J X, QIN K Z, LI G M, et al. Magmatic-hydrothermal evolution of the cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: evidence from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 525-536.
- [23] 杨超,唐菊兴,王艺云,等.西藏铁格隆南浅成低温热液型_斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J].*矿床地质*, 2014, 33(6): 1287-1305.
YANG Chao, TANG Juxing, WANG Yiyun, et al. Fluid and geological characteristics researches of Southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(6): 1287-1305.
- [24] 杨超.西藏铁格隆南浅成低温热液-斑岩型 Cu (Au) 矿床矿石、蚀变、流体特征研究[D].北京:中国地质科学院, 2015.
- [25] 贺文,林彬,杨欢欢,等.西藏铁格隆南 Cu-Au 矿床成矿流体特征及与矿化蚀变的内在联系[J].*地球学报*, 2017, 38(5): 638-650.
HE Wen, LIN Bin, YANG Huanhuan, et al. Fluid inclusion feature and its internal relationship with mineralization and epithermal alteration of the Tiegelongnan Cu-Au deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(5): 638-650.
- [26] 祝向平,陈华安,马东方,等.西藏多不杂斑岩铜金矿床地质与

- 蚀变[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2): 199-206.
- ZHU Xiangping, CHEN Huaan, MA Dongfang, et al. Geology and alteration of the Duobuza porphyry copper-gold deposit in Tibet[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(2): 199-206.
- [27] 杨欢欢, 李玉彬, 王勤. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床的控矿构造特征[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2): 360-361.
- YANG Huanhuan, LI Yubin, WANG Qin. Geological controls and structural characteristics of the Duobuza porphyry-type copper-gold deposit in Gaize County, Tibet[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(S2): 360-361.
- [28] 黄德晶. 西藏多不杂-波龙矿集区铜矿床地质特征及找矿预测模型[J]. 金属矿山, 2017(11): 127-131.
- HUANG Dejing. Prospecting prediction model and geological characteristics of the copper deposit in Duobuza-Bolong ore concentrating area in Tibet[J]. Metal Mine, 2017(11): 127-131.
- [29] 宋扬, 唐菊兴, 刘治博, 等. 西藏铁格隆南-多不杂矿床对冲储矿机制: 地球物理勘查的证据[J]. 矿床地质, 2019, 38(6): 1263-1277.
- SONG Yang, TANG Juxing, LIU Zhibo, et al. Mechanism of Tiegelongnan-Duobuza ramp style ore-controlling structure, Tibet: evidence from geophysical exploration[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(6): 1263-1277.
- [30] 曲晓明, 辛洪波. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 2006(7): 792-799.
- QU Xiaoming, XIN Hongbo. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006(7): 792-799.
- [31] 李金祥, 李光明, 秦克章, 等. 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, 2008, 24(3): 531-543.
- LI Jinxiang, LI Guangming, QIN Kezhang, et al. Geochemistry of porphyries and volcanic rocks and ore-forming geochronology of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangonghu belt, Tibet: constraints on metallogenic tectonic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(3): 531-543.
- [32] 余宏全, 李进文, 马东方, 等. 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, 2009, 28(6): 737-746.
- SHE Hongquan, LI Jinwen, MA Dongfang, et al. Molybdenite Re-Os and SHRIMP zircon U-Pb dating of Duobuza porphyry copper deposit in Tibet and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(6): 737-746.
- [33] 朱松华, 徐璐, 王程, 等. 西藏多不杂铜矿区成矿岩体锆石年代学及地质意义[J]. 资源信息与工程, 2019, 34(3): 48-50, 53.
- ZHU Songhua, XU Lu, WANG Cheng, et al. Geochronological characteristics of zircon from ore-forming rock bodies and their geological significance in the Duobuza copper mining area, Tibet[J]. Resource Information and Engineering, 2019, 34(3): 48-50, 53.
- [34] 李云强, 费光春, 温春齐, 等. 西藏多龙矿集区波龙、多不杂斑岩铜矿床岩体锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值及氧逸度特征[J]. 矿物岩石, 2020, 40(2): 59-70.
- LI Yunqiang, FEI Guangchun, WEN Chunqi, et al. Characteristics of Ce^{4+}/Ce^{3+} ratio and oxygen fugacity of zircon in porphyry from Bolong and Duobuza porphyry Cu-Au deposits in Duolong ore district, Tibet[J]. Mineralogy and Petrology, 2020, 40(2): 59-70.
- [35] 付雪莲, 唐菊兴, 杨欢欢, 等. 西藏多不杂斑岩铜(金)矿床磁铁矿元素地球化学特征及其对成矿过程的指示[J]. 地球学报, 2023, 44(3): 498-510.
- FU Xuelian, TANG Juxing, YANG Huanhuan, et al. Elemental geochemical characteristics of magnetite and its indication of mineralization process in the Duobuza porphyry copper (gold) deposit, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(3): 498-510.
- [36] 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 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, 2007(5): 935-952.
- LI Guangming, LI Jinxiang, QIN Kezhang, et al. 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, 2007(5): 935-952.
- [37] 李玉彬, 多吉, 钟婉婷, 等. 西藏改则县多不杂斑岩型铜金矿床勘查模型[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2): 274-287.
- LI Yubin, DUO Ji, ZHONG Wanting, et al. An exploration model of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Gaize County, northern Tibet[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(2): 274-287.
- [38] 代晶晶, 王瑞江, 曲晓明, 等. TerraSpec 波谱仪在西藏多不杂斑岩铜矿区蚀变信息研究中的应用[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 105-110.
- DAI Jingjing, WANG Ruijiang, QU Xiaoming, et al. Application of TerraSpec spectrometer to the study of alteration information in the Duobuza porphyry copper deposit of Tibet[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 105-110.
- [39] 张志, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 西藏多不杂富金斑岩铜矿床蚀变与脉体系统[J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1268-1286.
- ZHANG Zhi, CHEN Yuchuan, TANG Juxing, et al. Alteration and vein systems of Duobuza gold-rich porphyry copper deposit, Tibet[J]. Mineral Deposit, 2014, 33(6): 1268-1286.
- [40] 陈红旗, 曲晓明, 范淑芳. 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[J]. 矿床地质, 2015, 34(2): 321-332.
- CHEN Hongqi, QU Xiaoming, FAN Shufang. Geological characteristics and metallogenic-prospecting model of Duolong porphyry copper-gold ore concentrating area in Gerze County, Tibet[J]. Mineral Deposit, 2015, 34(2): 321-332.
- [41] 成嘉伟, 刘新星, 张娟, 等. 基于红外光谱技术的西藏多不杂斑岩型 Cu-Au 矿床蚀变及矿化特征研究: 以钻孔 ZK3112 为例[J]. 地质与勘探, 2023, 59(2): 259-270.
- CHENG Jiawei, LIU Xinxing, ZHANG Juan, et al. Alteration and mineralization characteristics of the Duobuza porphyry Cu-Au deposit in Tibet based on infrared spectroscopy technology: an example of the drill hole ZK3112[J]. Geology and Exploration, 2023, 59(2): 259-270.
- [42] 余宏全, 李进文, 丰成友, 等. 西藏多不杂斑岩铜矿床高温高盐度流体包裹体及其成因意义[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1434-1447, 1491.
- SHE Hongquan, LI Jinwen, FENG Chengyou, et al. The high-temper-

- ature and hypersaline fluid inclusions and its implications to the metallogenesis in Duobuza porphyry copper deposit, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(9): 1434-1447, 1491.
- [43] 何阳阳,温春齐,刘显凡,等.西藏多不杂铜矿床成矿流体来源探讨:来自氦氩碳氢氧同位素的证据[J]. *矿物学报*, 2017, 37(S1): 114-120.
- HE Yangyang, WEN Chunqi, LIU Xianfan, et al. Discussion on the source of ore-forming fluids in Duobuza deposit, Tibet, China: from helium-argon and carbon-hydrogen-oxygen isotope evidence[J]. *Acta Mineral Alogica Sinica*, 2017, 37(S1): 114-120.
- [44] 杨毅,张志,唐菊兴,等.西藏多龙矿集区波龙斑岩铜矿床蚀变与脉体系统[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 759-776.
- YANG Yi, ZHANG Zhi, TANG Juxing, et al. Mineralization, alteration and vein systems of the Bolong porphyry copper deposit in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 759-776.
- [45] 陈华安,祝向平,马东方,等.西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、岩石化学特征及其成矿意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(10): 1593-1611.
- CHEN Huaan, ZHU Xiangping, MA Dongfang, et al. Geochronology and geochemistry of the Bolong porphyry Cu-Au deposit, Tibet and its mineralizing significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(10): 1593-1611.
- [46] 祝向平,陈华安,马东方,等.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*, 2011, 27(7): 2159-2164.
- ZHU Xiangping, CHEN Huaan, MA Dongfang, et al. Re-Os dating for the molybdenite from Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet, China and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 2159-2164.
- [47] 祝向平,陈华安,马东方,等.西藏波龙斑岩铜金矿床钾长石和绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, 32(5): 954-962.
- ZHU Xiangping, CHEN Huaan, MA Dongfang, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of hydrothermal K-feldspar and hydrothermal sericite from Bolong porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. *Mineral Deposit*, 2013, 32(5): 954-962.
- [48] 李丹.西藏波龙铜矿床流体包裹体研究[D].成都:成都理工大学,2012.
- [49] 周玉.西藏波龙铜矿床成矿作用研究[D].成都:成都理工大学,2015.
- [50] 吕丽娜.西藏班-怒成矿带西段富铁与铜(金)矿床模型[D].北京:中国地质科学院,2012.
- [51] 丁帅.西藏改则县拿若铜(金)矿地质特征研究[D].成都:成都理工大学,2014.
- [52] 林彬,方向,王艺云,等.西藏铁格隆南超大型铜(金、银)矿含矿斑岩岩石成因及其对多龙地区早白垩世成矿动力学机制的启示[J]. *岩石学报*, 2019, 35(3): 642-664.
- LIN Bin, FANG Xiang, WANG Yiyun, et al. Petrologic genesis of ore-bearing porphyries in Tiegelongnan giant Cu (Au, Ag) deposit, Tibet and its implications for the dynamic of Cretaceous mineralization, Duolong[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(3): 642-664.
- [53] 杨欢欢.西藏铁格隆南超大型Cu(Au)矿床形成-保存机制及其对矿产勘查的指示意义[D].北京:中国地质科学院,2019.
- [54] LIN B, TANG J X, CHEN Y C, et al. Geochronology and genesis of the Tiegelongnan porphyry Cu(Au) deposit in Tibet: evidence from U-Pb, Re-Os dating and Hf, S, and H-O isotopes[J]. *Resource Geology*, 2016, 67(1): 1-21.
- [55] LI J X, QIN K Z, LI G M, et al. Petrogenesis of cretaceous igneous rocks from the Duolong porphyry Cu-Au deposit, central Tibet: evidence from zircon U-Pb geochronology, petrochemistry and Sr-Nd Pb-Hf isotope characteristics[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(2): 285-307.
- [56] 韦少港,唐菊兴,宋扬,等.西藏班公湖-怒江缝合带美日切错组中酸性火山岩锆石U-Pb年龄、Sr-Nd-Hf同位素、岩石成因及其构造意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(1): 132-150.
- WEI Shaogang, TANG Juxing, SONG Yang, et al. Petrogenesis, zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes of the intermediate-felsic volcanic rocks from the Duolong deposit in the Bangonghu-Nujiang suture zone, Tibet, and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(1): 132-150.
- [57] DING S, CHEN Y C, TANG J X, et al. Petrogenesis and tectonics of the Naruo Porphyry Cu(Au) deposit related intrusion in the Duolong Area, Central Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(2): 581-601.
- [58] LIN B, TANG J X, CHEN Y C, et al. Geology and geochronology of Naruo large porphyry-breccia Cu deposit in the Duolong district, Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2019, 66: 168-182.
- [59] 王勤.西藏多龙矿集区美日切错组火山岩成因及与铁格隆南铜(金)矿床成矿的关系[D].成都:成都理工大学,2015.
- [60] 张志,方向,唐菊兴,等.西藏多龙矿集区尕尔勤斑岩铜矿床年代学及地球化学:兼论硅帽的识别与可能的浅成低温热液矿床[J]. *岩石学报*, 2017, 33(2): 476-494.
- ZHANG Zhi, FANG Xiang, TANG Juxing, et al. Chronology, geochemical characteristics of the Gaerqin porphyry copper deposit in the Duolong ore concentrating area in Tibet and discussion about the identification of the lithoscaps and the possible epithermal deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(2): 476-494.