



刚果(金)卢阿拉巴省康隆卡铜钴矿床地质特征及找矿前景

张 银¹, 胡登攀¹, 余 璨², 翟建军¹

1. 云南铜业矿产资源勘查开发有限公司, 云南 昆明 650051;

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051

摘 要: 刚果卢阿拉巴省隶属于非洲板块克拉通, 该区发育了世界著名的加丹加弧形铜成矿带, 康隆卡铜矿即产于该成矿带上。在资料系统收集和二次分析的基础上, 结合大量的野外勘探工作, 系统厘定康隆卡铜矿矿体特征、矿石类型、围岩蚀变特征, 分析地层、构造对成矿的控制, 结合物探工作, 总结铜矿成矿规律。研究表明: 1) 矿床中矿石矿物以孔雀石、蓝铜矿、黑铜矿等次生氧化矿物为主, 矿石结构以自形-他形粒状结构为主, 矿石构造主要为多孔构造、角砾状构造、浸染状构造; 2) 罗安群木瓦夏组层状白云质砂岩(RSF)及蜂窝状硅质白云岩(RSC)为康隆卡铜矿重要的赋矿层位, 矿(化)体层控性质显著; 3) 构造在空间上与成矿显示出密切联系, 坎苏祁(Kansuki)断裂、次级断裂及褶皱构造共同控制着含矿层位, 为矿质运移、沉淀、叠加提供场所, 初步认为康隆卡铜矿为沉积-热液改造型铜钴矿床; 4) 结合物探工作成果及找矿标志, NE 向次级构造所对应的矿致异常深部具有矿(化)体富集、膨大趋势, 找矿潜力良好, 矿区内民采遗迹、南部矿点均为找矿工作重点。

关键词: 刚果(金); 铜钴矿床; 矿床成因; 找矿标志; 找矿方向

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND PROSPECTING POTENTIAL OF KANUNKA COPPER-COBALT DEPOSIT IN LUALABA, DEMOCRATIC REPUBLIC OF CONGO

ZHANG Yin¹, HU Deng-pan¹, YU Can², ZHAI Jian-jun¹

1. Yunnan Copper Mineral Resources Exploration Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan;

2. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan

Abstract: Lualaba Province in the Democratic Republic of Congo is part of African Craton, where the world-famous Katanga copper metallogenic arc belt is developed, and the Kanunka copper deposit is occurred in the belt. Based on systematic data collection and secondary analysis, with extensive field work, the paper discusses the orebody characters, ore types and wall rock alteration of Kanunka copper deposit, analyzes the control of stratum and structure on mineralization, and summarizes the metallogenic regularity of copper deposit combined with geophysical prospecting. The results show that the ore minerals in the deposit are mainly secondary oxidized minerals such as malachite, azurite and tenorite, with the idiomorphic-xenomorphic granular ore texture and porous, brecciated and disseminated ore structures. The lamellar dolomitic sandstone (RSF) and honeycomb siliceous dolomite (RSC) are important ore-bearing

收稿日期:2020-07-28;修回日期:2021-09-28. 编辑:张哲.

基金项目:中国铜业有限公司重点科技项目“西南三江成矿带典型斑岩矿床成矿模式及找矿方向研究”(20190101),“普朗铜矿首采区与东部矿体结合部成矿规律及增储研究”(20200103),“普朗铜矿 I 号斑岩体接触带找矿综合研究”(2019 迪庆有色科研合字第 1 号项目).

作者简介:张银(1985—),男,工程师,主要从事固体矿产勘查及区域地质调查工作,通信地址 云南省昆明市盘龙区联盟路华云路 1 号时代之窗 23 楼,E-mail//465842725@qq.com

通信作者:余璨(1992—),女,硕士,工程师,主要从事数字矿山及矿床学研究,通信地址 云南省昆明市东风东路东风巷 1 号昆勘院 1 号楼,E-mail//1258463536@qq.com

horizons, with obvious stratabound ore/mineralized bodies. Structures are closely related to mineralization in space. The Kansuki fault with secondary faults and folds jointly control ore-bearing horizons, providing place for mineral migration, precipitation and stacking. It is preliminarily considered that Kanunka copper deposit is of sedimentary-hydrothermal reformation Cu-Co type. Combined with the geophysical exploration results and prospecting indicators, there is a tendency of enrichment and expansion of ore/mineralized bodies with good prospecting potential under the mineralized anomaly by the NE-trending secondary structure.

Key words: Democratic Republic of Congo; copper-cobalt deposit; deposit genesis; prospecting indicator; prospecting direction

0 前言

康隆卡(Kanunka)矿区地处刚果(金)南部卢阿拉巴(Lualaba)省科卢韦齐(Kolwezi)东南,距科卢韦齐市约18 km。刚果(金)总体位于中非-刚果盆地,大地构造位置位于刚果克拉通西南部,经历了非洲大陆的绝大部分地质发展史,其沉积地层经历了太古代褶皱、基底杂岩褶皱、基巴拉褶皱、孔德龙古褶皱等一系列大规模构造运动,伴随着不同规模的变质作用和岩浆作用^[1-5]。前人研究提出,刚果盆地的古老基底自早石炭世已形成,至中石炭世发生大陆侵蚀和堆积,直至新近纪造山运动,刚果河周围地壳的隆起形成如今的刚果盆地。高地的侵蚀和中央盆地的堆积,致使刚果(金)两大地层分层明显,地势低凹的中央盆地受古老基底构成的边缘高地所围限,新生代盖层覆于其上。复杂的地质构造背景为成矿提供了优越的成矿条件,其所属的卢菲立安铜钴矿带为全世界规模最大、铜品位最高、钴资源储量最大的沉积层控型铜矿带,康隆卡矿区即是刚果(金)加丹加成矿亚带西北缘的典型矿床^[6-7]。自20世纪50年代发现矿床以来,前人在矿区开展过一系列的地质工作,初步查明矿区地层、构造、岩浆岩等地质概况,但勘查区研究程度整体较低,对矿床成因、控矿因素认识依据仍显不足,兼之地表植被覆盖较厚,故而全区构造、赋矿层位的研究尚不清晰^[8-12]。本次研究在详实野外地质工作及室内研究的基础上,结合区域地质成矿规律的对比,系统厘定成矿地质条件,详细探讨矿床成矿条件,以期对矿床下步开发提供科学依据。

1 区域地质背景

矿区所处的加丹加地区地层主要由基底与盖层组成,其中基底由太古宙基底杂岩与元古宙加丹加超群

组成,杂岩岩性主要为片岩、片麻岩、花岗岩、石英岩及砾岩等变质岩系。加丹加超群自上而下分别为罗安群(R)、恩古巴群(Ng)和孔德隆古群(Ku)。罗安群矿山组(R2)是主要的赋矿岩层,总体为加丹加弧形构造带的重要组成部分。盖层则由古近系-新近系和冲积层、残积层、坡积层组成,出露于矿带西部、东北部及科卢韦齐、利卡西一带。

区内构造主要由加丹加褶皱-推覆构造带组成,为非洲中部卢菲利(Lufilian)弧形构造带的组成部分,总体呈NW走向。约550~560 Ma,刚果-坦桑尼亚板块相对于安哥拉-Kalahari板块位移、碰撞引起卢菲利造山运动,导致安哥拉板块(上叠板块)和刚果板块(底部板块)叠置形成卢菲利弧形构造带,初始沉积地层亦随之发生大规模韧性剪切变形、褶皱、逆冲推覆和滑动,发育形成两个推覆层,层间夹着被褶皱、位移的主要含矿层(R2),上、下推覆层面分别为木瓦夏(R4)层间破碎岩和RAT(R1)底部-基底接触带^[5,13]。此外,区内经历了复杂的地质构造演化,新元古代造山带上地壳岩层序列演化便持续了约500 Ma。泛非运动期为卢菲利弧经历的主要构造演化阶段:D1的科卢韦齐阶段发生于750~600 Ma间,形成卢菲利弧的外部褶皱推覆带和穹隆区;D2的Monwezi阶段(600~512 Ma)表现为大规模左旋平移断层,自北向南相继发育NNE向坎苏祁(Kansuki)断裂带、E-W向Monwezi-Menda-Shinkolobwe断裂带、NW向Lupoto断裂带及NE向Mwembeshi断裂带;D3的Chilatembo阶段则主要生成垂直卢菲利弧走向的横向(160~170°和70~80°)断裂及褶皱构造。

多期次的构造岩浆活动为区域提供了丰硕的成矿资源。在刚果(金)形成卡莫阿(Kamoa)、科卢韦齐、腾凯-丰古鲁梅(Tenke-Fungurume)、姆丹达(Mutanda)和

迪兹瓦(Deziwa)等超大型矿区。自西北科卢韦齐至东南的卢本巴西延伸约 300 km,在加丹加一带形成加丹加拗拉槽(V)、外部褶皱推覆带(I)、穹隆区(II)、复向斜带(III)和加丹加高原(IV),其中外部褶皱推覆带为卢阿拉巴省著名的弧形铜钴矿(化)带^[14-16]。

2 矿区地质

矿区基岩出露较差,地层以罗安群(R)、恩古巴群(Ng)、孔德龙古群(Ku)及第四系为主(图 1)。罗安群作为区内的主要地层,由一套浅海相的细碎屑岩和化学岩组成,自上而下划分为 RAT (R1)、矿山组(R2)、迪佩特组(R3)和木瓦夏组(R4)。其中矿山组为区内重要的赋矿层位,自上而下可将岩性进一步细分为 4 类: 1)上部的 RSF 主要出露于矿区北部的首采区,岩性为层状白云质砂岩、弱硅化白云岩和条纹-条带状硅质岩夹薄层状泥质粉砂岩,岩石整体强风化,局部较破碎,发育褐铁矿化; 2)RSC 岩性主要为蜂窝状硅化白云岩,局部发育角砾状岩石,经地下水侵蚀、风化形成蜂窝状构造,常见岩溶裂隙、溶洞,与 RSF 一并组成含矿地层; 3)SD 的灰色泥质砂岩、页岩夹白云质砂岩、长石石英砂岩主要揭露于北区东部,局部地段出露白云质粉砂岩、白云质页岩(CMN)。孔德龙古群的紫红色、深灰色、青灰色粉砂岩大面积出露于矿区北部、南部,沿层理面发育微弱铁锰染和孔雀石化,而恩古巴群则主要出露于矿区北部、中部,由紫红色砂岩、泥质砂岩等组成,矿化微弱。

从区域上看,矿区横跨 Kansuki 和 Deziwa-Mutanda 两条平行的成矿断裂带,康隆卡矿区总体位于非洲中部卢菲利弧形构造带西延的加丹加褶皱-推覆构造带。主要构造线呈 NW 向,总体位于次一级科卢韦齐-坎苏祁构造带内,NW—NNW 向、NE—NEE 向断裂发育。F1 为矿区主要控矿构造,位于矿区中部,纵向上可划分为两段,西南段在 I 区略呈南凸的弧带状,中间段位 F4、F5 所错断,在地形地貌上表现为线性沟谷负地形; F2、F3 分别位于矿区中部、东部,北部均为第四系地层所覆盖; F4 总体呈近 S—N 向纵贯全区,总体受 F1 作用影响显著,穿切首采区罗安群地层。

3 矿床特征

矿床内共圈定矿体 8 个,其中北区分布 I-1、I-2、

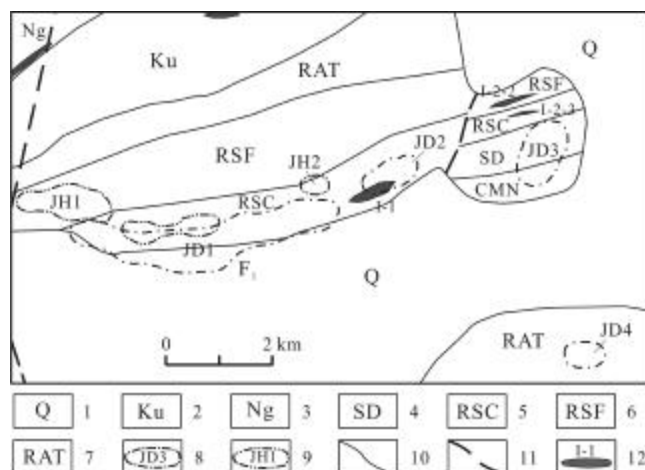


图 1 康隆卡矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Kanunka orefield

1—残坡积物 (deluvium); 2—紫红色泥质粉砂岩、白云质砂岩 (mauve argillaceous siltstone and dolomitic sandstone); 3—紫红色砂岩、砖红色含砾砂岩、泥质砂岩、灰白色长石石英砂岩 (mauve sandstone, brickred pebbly sandstone, argillaceous sandstone and incanus feldspar quartz sandstone); 4—紫红色白云质粉砂岩、白云质页岩、砖红色泥质粉砂岩 (mauve dolomitic siltstone, dolomitic shale and brickred argillaceous siltstone); 5—蜂窝状硅化白云岩 (honeycomb silicified dolomite); 6—灰黑色条纹条带状硅质岩夹泥质粉砂岩、页岩 (dark grey striped-banded silicalite with argillaceous siltstone and shale); 7—紫灰色泥质砂岩、砖红色含砾长石石英砂岩、灰白色含砾白云质砂岩 (mauve argillaceous sandstone, brickred pebbly feldspar quartz sandstone and incanus pebbly dolomitic sandstone); 8—极化率异常范围及编号 (polarizability anomaly and number); 9—电阻率异常范围及编号 (resistivity anomaly and number); 10—地质界线 (geological boundary); 11—断裂 (fault); 12—矿体及编号 (orebody and number)

I-3、I-4、I-5 矿体,II 区发育 II-1、II-2 矿体,其中 I-1、I-2、II-1 矿体规模较大。矿(化)体呈层状、板状及薄膜状产出,主要赋存于罗安群矿山组 RSF 段层状白云质砂岩及孔德龙古群青灰色泥质粉砂岩中,部分赋存于近东西向坎苏祁构造带的次生构造破碎带内(图 2、3)。矿化以铁-锰染、孔雀石化为主,多沿层及层间裂隙发育,偶见蓝矾、黑铁矿化、水钴矿化等(表 1)。

矿床内矿石类型主要为氧化矿。矿石矿物主要为孔雀石、蓝铜矿、黑铜矿、水钴矿、软锰矿、褐铁矿等次生氧化矿物。矿物结构以自形—他形粒状结构、隐晶结构、包含结构为主,局部见少量交代假象结构、纤柱状结构、粒状结构、隐晶纤维状结构。矿石构造则以多孔构造、角砾状构造、浸染状构造、块状构造为主,其次为条带状、细脉状及角砾状结构,偶见皮壳状、鲕状

表 1 矿体特征表
Table 1 Features of orebodies

矿体	赋存层位	形态	产状	规模/m	品位/%	矿化
I-1	西山 RSF 成矿带	层状、板状	170°∠30°	长 40,宽 5~6	0.306	强铁锰染、弱钴土矿化、孔雀石化
I-3	孔德龙古群泥质粉砂岩	薄膜状、层状	170°∠30°	长 72,厚 1~2	0.734	孔雀石化、铁锰染
I-4	矿区西北部	薄膜状、层状	170°∠31°	长 30,宽 1~2		孔雀石化、铁锰染
II-1	II 区	层状、板状	170°∠72°	长 100~150,宽 8~10	2.27	孔雀石化、硅孔雀石化、蓝矾
II-2	II 区	层状、板状	170°∠72°	长 60~80,宽 2~5		孔雀石化、硅孔雀石化

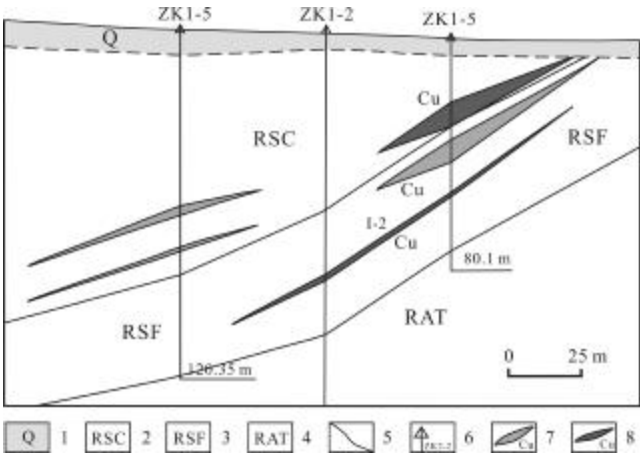


图 2 康隆卡矿区 1 号地质剖面图

Fig. 2 No. 1 geological profile of Kanunka orefield

1—残积物 (eluvium); 2—蜂窝状硅化白云岩 (honeycomb silicified dolomite); 3—灰黑色条纹条带状硅质岩夹泥质粉砂岩、页岩 (dark grey striped-banded silicalite with argillaceous siltstone and shale); 4—紫灰色泥质砂岩、砖红色含砾长石英砂岩、灰白色含砾白云质砂岩 (mauve argillaceous sandstone, brickred pebbly feldspar quartz sandstone and incanus pebbly dolomitic sandstone); 5—地质界线 (geological boundary); 6—钻孔及编号 (borehole and number); 7—低品位铜矿 (low-grade copper ore); 8—工业铜矿 (commercial copper ore)

构造, 局部保留原岩层理构造或残余构造. 脉石矿物主要为石英、方解石、白云石、绢云母、白云母、绿泥石及黏土.

矿床中矿体均赋存于罗安群矿山组地层中, 矿体围岩为泥质粉砂岩、灰色砂岩等. 矿(化)体层控性质显著, 矿石自然类型以氧化矿为主, 反映出矿床形成于氧化环境中, 淋滤富集作用显著. 前已述及, 矿区位于坎苏祁 NE 向断裂中, 横跨 Kansuki 和 Deziwa-Mutanda 两条平行断裂带, 周边次级断裂发育, 与褶皱构造一同控制着含矿岩层的空间展布, 同时为矿质的沉淀、叠

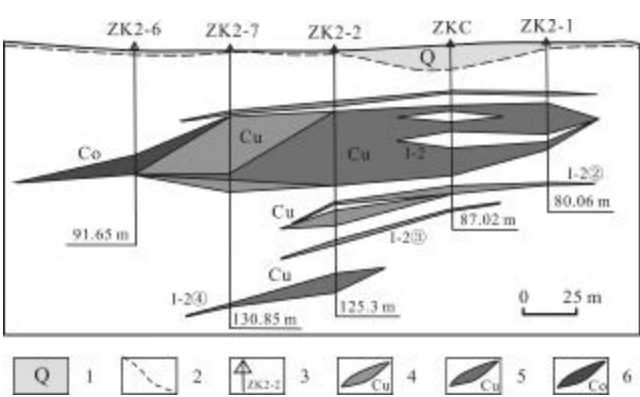


图 3 康隆卡矿区 2 号地质剖面图

Fig. 3 No. 2 geological profile of Kanunka orefield

1—残积物 (eluvium); 2—地质界线 (geological boundary); 3—钻孔及编号 (borehole and number); 4—低品位铜矿 (low-grade copper ore); 5—工业铜矿 (commercial copper ore); 6—钴矿体 (cobalt orebody)

加提供有利场所, 后期的次级断裂为含矿热液提供运移通道和容矿空间. 结合矿石质量特征, 矿床内矿石以强风化、孔雀石等角砾 (砾石) 成分及土状泥砂碎屑物为主, 矿体及围岩中节理裂隙发育, 表明矿体成矿前后构造迹象显著. 此外, 矿区围岩蚀变较为发育, 以硅化、绢云母化、硅酸盐化、白云岩化为主.

根据成矿作用的先后, 康隆卡铜钴矿床划分为沉积阶段、热液改造阶段和表生富集阶段, 成矿作用以热液充填为主. 罗安群作为矿床的初始矿源层, 形成年代距今 880~750 Ma, 后期卢菲利运动的构造变质作用对矿床进行了热液改造, 形成铜钴矿化的叠加富化. 此外, 区内降水充沛, 断层、破碎带良好的透水性为矿质运移提供了有利通道, 兼之适宜的温度及巨大的时间跨度, 致使矿床次生氧化作用强烈. 矿床总体为受控于地层、断层的沉积-热液改造型铜钴矿床^[17-19].

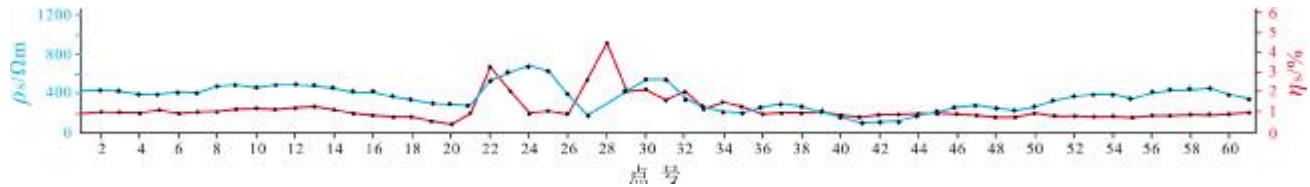


图 4 康隆卡矿区 E 线激电中梯剖面图

Fig. 4 IP intermediate gradient profile along exploratory line E in Kanunka orefield

4 找矿前景

本次研究在矿区内开展了线距 100 m、点距 10 m 的中梯剖面测量,分别于 I 区、II 区完成 10.1、10.2 km 的测量,共圈定激电异常 10 处(图 4、5)。其中,JD1 (JH1)~JD5 推测为矿致异常:JD1 总体呈近 E-W 向长轴状展布近 480 m,面积约 0.03 km²,为高阻异常,视电阻率为 350~450 Ωm,与区域主要含矿层 RSF、RSC 吻合良好,推断为深部矿化(体)异常,具很大找矿价值;JD2 位于西山东部,呈椭圆状展布,异常整体长约 200 m,异常区内出露含矿层位 RSF、RSC,西南侧发现孔雀石化发育的老民采坑,找矿潜力较大;JD3 为椭圆状高阻异常,异常区内存在多处孔雀石化发育的老民采坑,为矿区重点矿致异常区;JD5 呈双囊状位于 II 区老民采坑,为高阻异常,推测其东延具一定找矿潜力。

结合前述激电中梯异常区分布情况,优选出 JH1、JD1 两个中梯异常区开展激电测深工作,E 线、G 线分别布设测深点 15 个(20~34)、12 个(17~28)。由图 5 看出,E 测线视极化率显示明显,左、右两个异常中心呈椭圆状“双肾”展布:22~26 测点下方发育南倾的似椭圆状高视极化率($\eta_s=3\%\sim5\%$)、中高阻($\rho_s=600\sim2700\ \Omega\text{m}$)异常区;27~30 号测点镜像对称发育似椭圆状高视极化率($\eta_s=3\%\sim5\%$)、中高阻($\rho_s=600\sim5000\ \Omega\text{m}$)异常区。总体上,E 线深部极化率明显且集中,深部更为发育,对应中低电阻率岩性,故而推测为深部岩层硫化物富集所致,具有良好找矿潜力。G 测线 19~28 号测点发育面状“倒鸡冠”状高视极化率($\eta_s=3\%\sim9.82\%$)、中高阻($\rho_s=600\sim2600\ \Omega\text{m}$)异常区,同样对应中低阻岩性区,为深部岩层硫化物富集所致,找矿潜力良好。总体上,矿区磁法物探异常为控矿构造所致,NE 向的次级构造为成矿提供导矿通道和容矿空间,兼之电阻异常与矿化点位置高度吻合,故推测圈定的 6 个矿致甲 I 类异常深部具有成矿物质富集膨大的趋势。

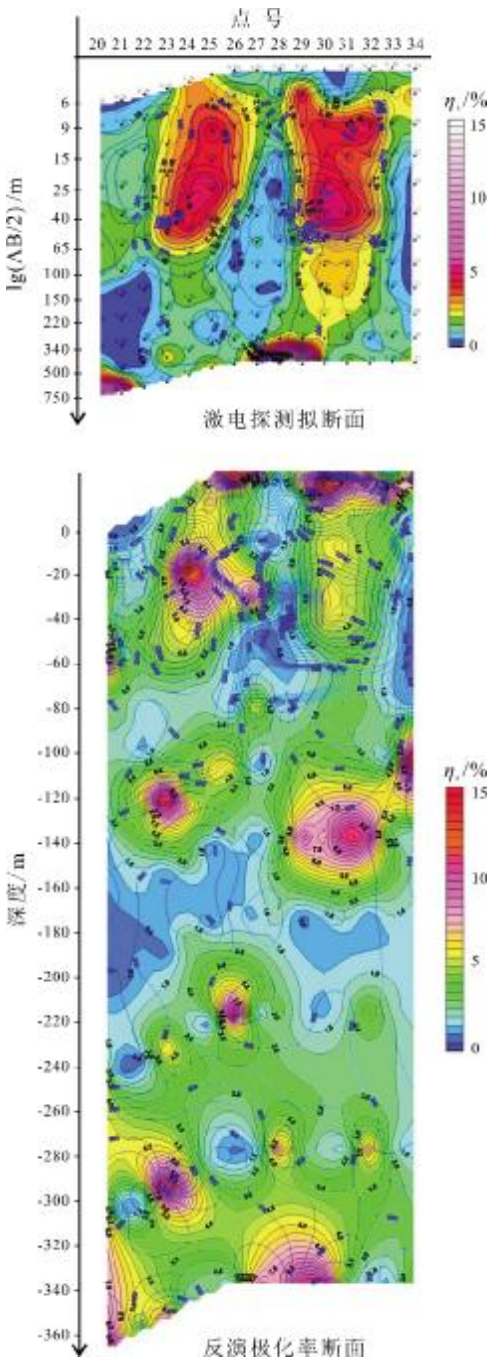


图 5 康隆卡矿区 E 线激电测量综合剖面图

Fig. 5 Comprehensive IP anomaly profile along exploratory line E in Kanunka orefield

此外,矿床内孔雀石作为矿区最为直接的找矿标志,其富集地段即为矿(化)体发育富集地段,故前人已开采过的民采遗迹亦可作为矿区重要的找矿标志,而矿(化)体的层控性则反映出赋矿层位(罗安群矿山层)可作为寻找富矿(化)体的重要标志,孔德龙古地层亦可作为次要的找矿标志。本次研究在钴草集中部位布设的探槽点发现孔雀石化的RSF含矿层位,孔德龙古地层中亦发现3处铜矿点,RAT地层中亦揭露到较高品位的孔雀石化角砾岩,可作为下步的勘查工作重点。而研究北区南部发现的多处矿化良好的民采点大致呈NEE向展布,与F1断裂、西山矿带走向一致,认为西山矿带整体属褶皱的一翼,推测其南部新发现的矿点具有矿体规模扩大的演变趋势。

5 结论

本次研究详细剖析了康隆卡矿成矿地质背景、矿床地质特征,认为矿床区域成矿条件优越,构造背景明显,找矿潜力巨大。根据已有地质工作及本研究成果,结合层位成矿和“多级异常”的关系进行成矿远景评价,并对找矿方向进行探讨。为该区后续找矿勘探工作提供参考。

参考文献(References):

- [1]李泳泉,李杏春,曾建业.刚果民主共和国金矿类型及主要地质特征[J].世界地质,2014,33(4):822-836.
Li Y Q, Li X C, Zeng J Y. Gold deposit types and its main geological characteristics in Democratic Republic of Congo[J]. Global Geology, 2014, 33(4): 822-836.
- [2]Haest M, Muchez P. Stratiform and vein-type deposits in the Pan-African Orogen in Central and Southern Africa: Evidence for multiphase mineralisation[J]. Geologica Belgica, 2011, 14(1/2): 23-44.
- [3]Rainaud C, Mawera S, Armstrong R A, et al. Geochronology and nature of the Palaeoproterozoic basement in the Central African Copperbelt (Zambia and the Democratic Republic of Congo), with regional implications[J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 42(1/5): 1-31.
- [4]杜菊民,赵学章.刚果(金)铜-钴矿床地质特征及分布规律[J].地质与勘探,2010,46(1):165-174.
Du J M, Zhao X Z. Geologic features and spatial distribution regularities of Cu-Co deposits in Democratic Republic of Congo[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(1): 165-174.
- [5]李向前,毛景文,闫艳玲,等.中非刚果(金)加丹加铜钴矿带主要矿化类型及特征[J].矿床地质,2009,28(3):366-380.
Li X Q, Mao J W, Yan Y L, et al. Regional geology and characteristics of ore deposits in Katangan copper-cobalt belt within Congo (Kinshasa), Central Africa[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 366-380.
- [6]何胜飞,刘晓阳,许康康,等.中东部非洲地质构造单元与成矿区带划分[J].地质与勘探,2018,54(6):1153-1170.
He S F, Liu X Y, Xu K K, et al. Subdivision of geological units and metallogenic belts in Central-Eastern Africa[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(6): 1153-1170.
- [7]吴兴源,刘晓阳,王杰,等.南非主要成矿区带的划分及成矿特征[J].地质找矿论丛,2015,30(S1):27-45.
Wu X Y, Liu X Y, Wang J, et al. Subdivision of main metallogenic provinces (belts) in South Africa and their metallogenic characteristics [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2015, 30(S1): 27-45.
- [8]赵英福.刚果(金)科卢韦齐铜矿地质特征及成矿机理浅析[J].矿产与地质,2011,25(3):203-207.
Zhao Y F. Geological characteristics and mineralization mechanism of the Kolwezi copper deposit, Congo[J]. Mineral Resources and Geology, 2011, 25(3): 203-207.
- [9]童海奎,杨自安,张普斌,等.刚果(金)东南部加丹加成矿带遥感找矿前景分析[J].矿产与地质,2008,22(6):547-550.
Tong H K, Yang Z A, Zhang P B, et al. Analysis of remote sensing prospecting perspective in the Katanga metallogenic belt, Southeastern Congo-Kinshasa[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(6): 547-550.
- [10]王志刚,陈玉华,付小锦,等.刚果(金)加丹加省堪苏祁铜钴矿床地质特征及找矿方向[J].地质找矿论丛,2012,27(2):206-213.
Wang Z G, Chen Y H, Fu X J, et al. Geological characteristics and ore-searching directions of copper-cobalt deposit KS in Katanga Province of Congo (King)[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2012, 27(2): 206-213.
- [11]孙武国,廉涛,刘冰.中非共和国Bambari绿岩带地质特征及找矿意义[J].地质与资源,2016,25(2):208-212.
Sun W G, Lian T, Liu B. Geological characteristics and prospecting significance of the Bambari greenstone belt in the Central African Republic[J]. Geology and Resources, 2016, 25(2): 208-212.
- [12]孙宏伟,王杰,任军平,等.中非加丹加-赞比亚多金属成矿带成矿演化及找矿潜力分析[J].地质科技情报,2019,38(1):121-131.
Sun H W, Wang J, Ren J P, et al. Metallogenic evolution and prospecting potential of Katanga-Zambia polymetallic metallogenic belt in central Africa [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(1): 121-131.

(下转第413页/Continued on Page 413)

- [24]Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Liu J L. The identification of a Late Pan-African granulite facies event in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon dating of the Mashan Group at Liuniao, Heilongjiang Province, China[C]. Proceedings of the 30th IGC: Precambrian Geol Metamorphic Petrol, Amsterdam: VSP International Science Publishers, 1997, 17: 59-74.
- [25]Wilde S A, Dorsett-Bain H L, Lennon R G. Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralization within the Jiamusi massif: An exotic fragment of Gondwanaland located in North-Eastern China? [J]. Gondwana Research, 1999, 2(1): 21-46.
- [26]吴福元, Wilde S A, 孙德有. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 443-452.
- Wu F Y, Wilde S A, Sun D Y. Zircon SHRIMP U-Pb ages of gneissic granites in Jiamusi massif, northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 443-452.
- [27]周建波, 韩杰, 张兴洲, 等. 牡丹江地区蓝片岩的地球化学特征及其大地构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 93-103.
- Zhou J B, Han J, Zhang X Z, et al. Geochemical Characteristics of the Mudangjiang blueschists in the NE China and its tectonic implications[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(1): 93-103.
- [28]Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 2003, 200(1/2): 155-170.
- [29]Liu X M, Gao S, Diwu C R, et al. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 1257-1264.
- [30]Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [31]Ludwig K R. User's manual for IsoPlot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley, USA: Berkeley Geochronology Center, 2003: 71.
- [32]吕长禄, 肖庆辉, 冯俊岭, 等. 黑龙江依兰地区变玄武岩及变堆晶辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2016, 35(7): 1081-1094.
- Lv C L, Xiao Q H, Feng J L, et al. LA-ICP-MS U-Pb ages of zircons from metamorphic basalt and metamorphic accumulated gabbro in Yilan area, Heilongjiang Province, and their geological implications [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(7): 1081-1094.
- [33]Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 89-113.
- [34]Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. The nature of basement beneath the Songliao Basin in NE China: Geochemical and isotopic constraints [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(9/10): 793-803.
- [35]孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(2): 174-181.
- Sun D Y, Wu F Y, Zhang Y B, et al. The final closing time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(2): 174-181.

(上接第 455 页/Continued from Page 455)

- [13]童勤龙, 刘德长. 刚果(金)加丹加省遥感地质解译与矿产勘查战略选区[J]. 世界地质, 2015, 34(2): 531-542.
- Tong Q L, Liu D C. Remote sensing geological interpretation and target area delimitation of mineral exploration in Katanga Province, Congo (DRC) [J]. Global Geology, 2015, 34(2): 531-542.
- [14]陶则熙. 刚果(金)加丹加铜矿带地质特征及成矿前景[J]. 地质与勘探, 2016, 52(2): 392-398.
- Tao Z X. Geological characteristics and metallogenic prospect of the copper mineralization belt in the Kadanga area of the Democratic Republic of Congo [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(2): 392-398.
- [15]王洪亮. 刚果(金)加丹加省科卢韦齐铜矿床地质特征及矿床成因[J]. 地质学刊, 2015, 39(1): 143-148.
- Wang H L. Geological characteristics and genesis of the Kolwezi copper deposit in Katanga Province, Congo (COD) [J]. Journal of Geology, 2015, 39(1): 143-148.
- [16]刘焕然. 非洲刚果(金)加丹加铜矿成矿带地质构造特征[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(2): 137-140.
- Liu H R. Characteristics of geological structure of Katanga copper-cobalt metallogenic belt in Congo (DRC) [J]. Resources Environment & Engineering, 2010, 24(2): 137-140.
- [17]李向前, 闫艳玲, 徐宪立. 刚果(金)加丹加省堪苏祁铜钴矿床铜钴矿物赋存状态研究[J]. 矿产与地质, 2009, 23(3): 253-257.
- Li X Q, Yan Y L, Xu X L. Occurrence of Cu-Co minerals of the Kansuki copper-cobalt deposit in the Katanga Province, D.R. Congo [J]. Mineral Resources and Geology, 2009, 23(3): 253-257.
- [18]付俊或, 李伟, 张志斌, 等. 大兴安岭成矿带某地铜多金属矿床的发现及远景分析[J]. 地质与资源, 2010, 19(2): 99-104.
- Fu J Y, Li W, Zhang Z B, et al. The discovery and prospects of a copper-polymetallic deposit in Daxinganling metallogenic province [J]. Geology and Resources, 2010, 19(2): 99-104.
- [19]杜玉龙, 方维萱, 鲁佳. 玻利维亚 Tupiza 铜矿床碱性火山岩的岩相地球化学特征及找矿预测[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 315-333.
- Du Y L, Fang W X, Lu J. Lithofacies geochemistry characteristics of alkali volcanic rocks and prospecting in Tupiza copper deposit, Bolivia [J]. Geology in China, 2020, 47(2): 315-333.