

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.08.009

赞比亚西北省典型铜-钴矿床地质特征与找矿方向

何胜飞^{1,2,3}, 张航^{1,2,3}, 左立波^{1,2,3}, 孙凯^{1,2,3}, 卢宜冠^{1,2,3}, 许康康^{1,2,3}, 王杰^{1,2,3}HE Shengfei^{1,2,3}, ZHANG Hang^{1,2,3}, ZUO Libo^{1,2,3}, SUN Kai^{1,2,3}, LU Yiguan^{1,2,3},XU Kangkang^{1,2,3}, WANG Jie^{1,2,3}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 中国地质调查局华北科技创新中心, 天津 300170;

3. 中国地质调查局南部非洲矿业研究所, 天津 300170

1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. North China Center of Geoscience Innovation, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. Southern African Mining Research Institute, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

摘要: 卢菲利安弧是全球极为重要的铜钴成矿带, 赞比亚西北省铜-金-钴-镍-铀成矿亚带为该成矿带的重要组成部分, 但其基础地质工作薄弱, 缺乏系统的成矿机制研究。通过水系沉积物地球化学、土壤地球化学、地球物理特征和典型矿床研究, 总结梳理了赞比亚西北省的成矿地质演化和成矿规律, 提出区域找矿方向, 以期在该地区实现找矿新突破。卢菲利安弧穹窿区主要分布于赞比亚西北省内, 产有铜、金、钴、铀、镍等重要金属矿种, 含矿岩层为罗安群炭质页岩、千枚岩, 成矿类型主要为变质热液脉型, 矿床成因为在泛非期 NW—SE 向挤压作用下, 成矿物质活化, 含矿热液沿断裂迁移, 因物理化学条件改变沉淀、富集成矿; 复向斜带南缘希富玛 IOCG 型铜-金-钴矿赋存于 NE 向的含铜碳酸岩中, 矿床成因为初始地幔物质沿深大断裂上升至地壳浅部过程中, 由于温度和压力下降, 初始岩浆不断演化并最终成矿。通过研究赞比亚西北省典型矿床的成因和成矿模式, 提出未来找矿方向应注重在穹窿区基底周缘推覆带内寻找受构造和地层双重控矿的铜-金-铀矿, 在复向斜带内的构造岩带内应充分利用航磁异常、化探异常来寻找 NW 向深断裂与 NE 向断裂交会部位的(碳酸岩型)IOCG 型铜-金-钴-银-铁矿。

关键词: 地质特征; 找矿方向; 典型矿床; 铜-钴; 赞比亚

中图分类号: P618.41; P618.62 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)08-1365-12

He S F, Zhang H, Zuo L B, Sun K, Lu Y G, Xu K K, Wang J. Geological characteristics and prospecting direction of typical Cu-Co deposits in Northwestern Province, Zambia. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(8): 1365-1376

Abstract: The Lufilian Arc is an extremely important Cu-Co mineralization belt in world, and the Cu-Au-Co-Ni-U mineralization subzone in the Northwestern province of Zambia is an important component of Lufilian Arc. However, its basic geological work is fewer and is lack of systematic research on mineralization mechanisms. Based on the research on the geochemical characteristics of river sediments, soil geochemical characteristics, geophysical characteristics and typical Cu-Co deposits, this paper summarizes the metallogenic geological evolution and metallogenic of Northwestern province of Zambia, and proposes the regional prospecting direction, to achieving in more Cu-Co deposits in this area. The Dome area of Lufilian Arc is mainly distributed in Northwestern province of Zambia, producing copper, gold, cobalt, uranium, nickel and other important metal minerals. The ore bearing strata are carbonaceous shale and phyllite of the Roan Group, and the mineralization type is mainly metamorphic hydrothermal vein type. The ore deposit is formed because of the activation of ore-forming materials and the migration of ore bearing hydrothermal fluid along the fault under the Pan African NW-SE compression, and the precipitation and enrichment of ore-forming due to the change of physical and chemical conditions; The Shivuma IOCG type Cu-Au-Co deposit in the southern margin of the syncline belt occurs in the NE trending copper

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-12-18

资助项目: 中国地质调查局项目《非洲中东部大型铜-钴资源基地评价》(编号: DD20190439) 和《海上丝绸之路非洲中东部 7 国矿产资源潜力评价》(编号: DD20160108)

作者简介: 何胜飞(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事中南部非洲基础地质调查工作。E-mail: hesan496112@163.com

bearing carbonatite. The deposit is formed because the initial mantle rises along the deep fault to the shallow crust. Due to the temperature and pressure drop, the initial magma continues to evolve and mineralize eventually. By researching the genesis and metallogenic model of the typical deposits in northwest Zambia, it is proposed that the future prospecting direction should find the Cu-Au-Co deposits controlled by both structure and strata in the nappe belt around the basement of the Dome area, and utilizing aeromagnetic anomalies and geochemical anomalies in the tectono magmatic belt in the syncline zone to find IOCG type Cu-Au-Co-Ag-Fe deposits at the intersection of NW trending deep faults and NE trending faults.

Key words: geological characteristics; prospecting direction; typical deposit; Cu-Co; Zambia

卢菲利安弧 (Lufilian Arc) 又称中非铜钴成矿带 (Center Africa Copper-Cobalt Belt) (图 1), 横跨刚果(金)与赞比亚两国, 为一东西长 700 km、南北宽 150 km、向北凸起的弧形构造带 (Steven et al., 2003; Cailteux et al., 2005; 胡鹏等, 2022; 邱瑞照等, 2022), 也是世界级的沉积-改造型铜钴成矿带。根据区域地质背景、铜-钴矿床成矿地质特征和地理分布, 可将该带划分为 3 个成矿亚带 (Selley et al.,

2005; 张东红等, 2013a, b; 刘国平等, 2018; Cailteux et al., 2019; 朱海宾等, 2019): 刚果(金)加丹加铜-钴成矿亚带、赞比亚铜带省铜-钴成矿亚带和赞比亚西北省铜-金-钴-镍-铀成矿亚带 (或称西赞比亚铜成矿带)。相比而言, 赞比亚西北省铜-金-钴-镍-铀成矿亚带的矿床数量、成矿类型和含矿层位均与其余 2 个成矿亚带差异较明显。目前, 在赞比亚西北省铜金钴镍铀成矿亚带 (西赞比亚铜成矿带) 运

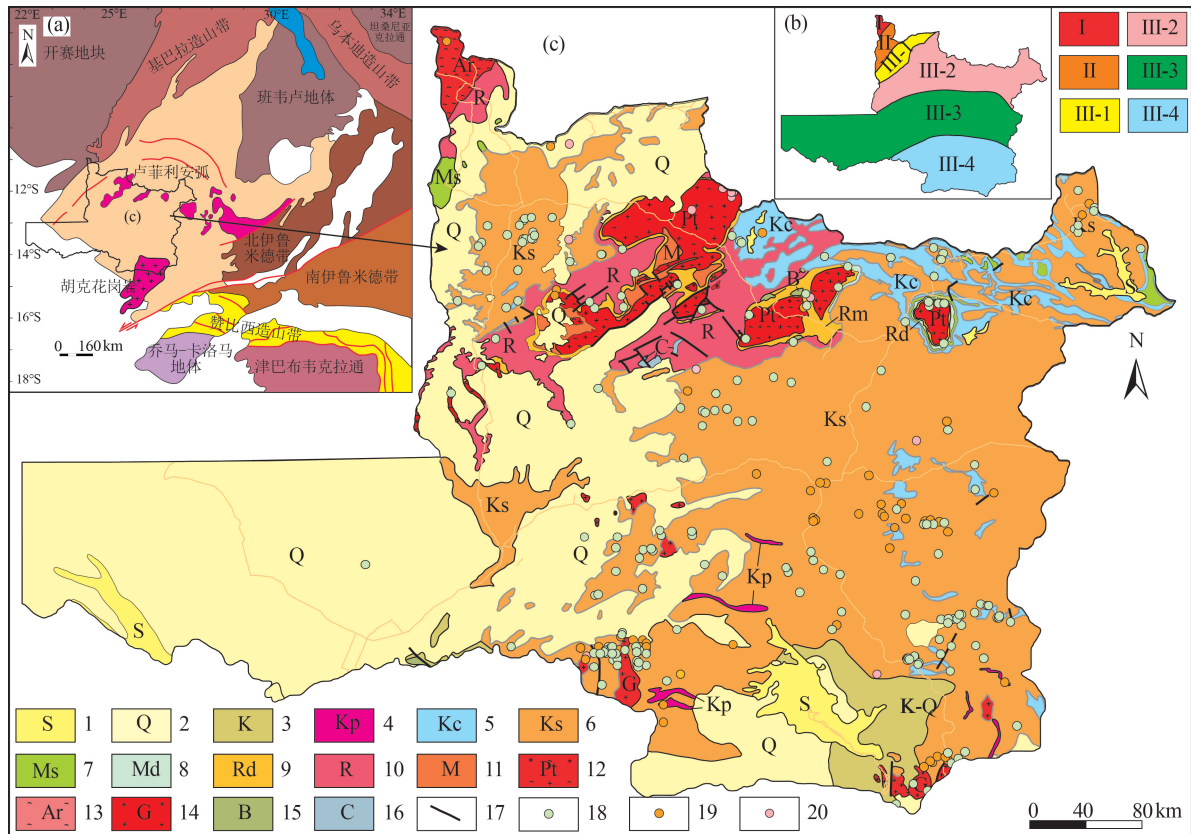


图 1 赞比亚西北省区域地质与主要矿床分布简图 (据 Sikatali et al., 1994)

Fig. 1 Regional geological and occurrence distribution sketch map of Northwestern province, Zambia

a—卢菲利安弧大地构造位置图 (Eglinger et al., 2013); b—赞比亚西北省构造区划图 (Key et al., 2001); I—开赛地块; II—姆维尼伦加前陆; III-1—外部褶皱推覆带; III-2—穹窿区; III-3—复向斜带; III-4—加丹加高原; 1—沼泽; 2—第四系表层沉积; 3—卡鲁系; 4—昆德隆古群砂页岩; 5—昆德隆古群碳酸盐岩; 6—昆德隆古群砂页岩; 7—穆瓦夏群; 8—上罗安群白云岩; 9—下罗安群含铜页岩、白云岩、砾岩、石英岩; 10—下罗安群砂页岩; 11—古元古代穆瓦片岩; 12—古元古代基底; 13—太古宙-古元古代混合岩; 14—花岗岩; 15—基性岩; 16—变质碳酸盐岩; 17—断层; 18—铜-钴-铀矿(化)点; 19—金矿(化)点; 20—宝石矿点

营的大—中型铜矿有坎桑希(Kansanshi)铜-金矿,已产铜 $220 \times 10^4 \text{ t}$,保有铜矿石量 $15 \times 10^8 \text{ t} @ 0.67\%$ (Torrealdy et al., 2000; Broughton et al., 2002);卢穆瓦纳(Lumwana)铜-钴矿,铜矿石量为 $5.37 \times 10^8 \text{ t} @ 0.56\%$ (Bernau et al., 2013; Turlin et al., 2016);卡伦比拉(Kalumbila)铜-镍-钴矿的铜矿石量为 $11 \times 10^8 \text{ t} @ 0.51\%$ (Steven, 2000; Capistrant et al., 2015)和希富玛(Shivuma)IOCG型铜矿,铜矿石量 $0.3 \times 10^8 \text{ t} @ 0.73\%$ (盖寿山等, 2015; 边千韬等, 2017),显示赞比亚西北省具有良好的铜多金属成矿环境和找矿前景。

赞比亚西北省仅少数地区完成了1:10万岩性地质填图,只能与区域上的地层单元简单类比。在姆维尼伦加(Mwinilunga)和索罗韦兹(Solwezi)地区分别完成了面积不等的1:25万区域地球化学调查;其他基础性地质研究工作相对欠缺。西北省已发现的铜矿较少,坎桑希、卢穆瓦纳、卡伦比拉等铜多金属矿床的成因也不同,说明该地区经历了复杂的地质作用,需开展进一步的地质工作。本文在总结赞比亚西北省地质特征的基础上,综合区域航磁、地球化学特征,分析区域内构造、地层与成矿的关系,以期对未来开展地质找矿提供参考。

1 区域地质特征

赞比亚西北省铜-金-钴-镍-铀成矿亚带绝大部分分布于赞比亚西北省内,与卢菲利安弧在西北省的分布范围重叠度较高(Porada et al., 2000)。依据出露地层的岩性、时代和区域构造特征,大致可划分为4个构造区(图1-b):太古宙开赛地块(Kaisai block)、新元古代姆维尼伦加前陆(Mwinilunga Foreland)、卢菲利安弧和西部显生宙沉积盆地。

区域上,卢菲利安弧的地层沉积缘于罗迪尼亚超大陆裂解,沉积时限大致为880~550 Ma,主要的含矿地层为底部下罗安群的矿山亚群,其他地层如穆瓦夏亚群、恩古巴群底部砾岩等也赋存有少量铜矿(刘国平等, 2018)。

泛非运动期间,卢菲利安弧沉积地层经历了3个(750~600 Ma, 600~512 Ma, 512 Ma之后)不同的构造变形阶段(Kampunzu et al., 1999; 2009)。第一阶段(D1)形成了由南向北的强烈褶皱及逆冲推覆构造,褶皱轴面及断层面面向南倾斜。D1的构造作用使罗安群的含矿地层抬升、逆冲至恩古巴群、

昆德隆古群之上,为层状铜钴矿床的表生氧化创造了条件。第二阶段(D2)构造作用主要与北部刚果克拉通与东南方向的卡拉哈里克拉通碰撞挤压有关,表现为大规模的左旋走滑断裂,普遍经历了区域变质作用,构造及变质热液使地层中的成矿物质活化、迁移,在滑石片岩、蚀变碎裂岩中沉淀、富集,部分含矿热液沿构造裂隙运移、沉积,富集成矿。第三阶段(D3)形成走向为近SN向($160^\circ \sim 170^\circ$)和近EW向($70^\circ \sim 80^\circ$)的断裂和大型直立褶皱(Kampunzu et al., 1999; 2009)。D3期断裂切割了早期的恩古巴群和昆德隆古群,使地层中的矿化再活化、运移,并在断裂带中沉积、富集,形成基普希代表的铅锌铜银铀矿床(张东红等, 2013b)。

区域上的岩浆作用多集中在765~735 Ma、566~544 Ma、544~519 Ma(Key et al., 2001; 边千韬等, 2017; 古阿雷等, 2020)等时代。566~544 Ma、544~519 Ma 2期岩浆作用对应了卢菲利安造山带南部边缘的胡克(Hook)2期花岗岩就位事件,与希富玛铜矿和坎桑希铜矿的成矿时代相符(肖波等, 2014; 盖寿山等, 2015; 边千韬等, 2017)。

区域上,罗安群普遍经历了浅变质作用,多为绿片岩相;在穹窿区的基底杂岩中发现代表角闪岩相变质作用的含蓝晶石片岩。

2 地球化学特征

赞比亚西北省的地球化学资料较少,小比例尺(1:25万)的水系沉积物测量工作仅在姆维尼伦加地区曾经开展过(Key et al., 2001)。此外,部分企业在其矿权区也开展了少量的中等比例尺(1:1万)土壤地球化学测量工作(盖寿山等, 2015; 龚玉爽等, 2016; 蒋永臻, 2017)。

2.1 水系沉积物测量

姆维尼伦加地区1:25万水系沉积物测量工作共圈定了12个铜找矿靶区(图2),绝大多数位于外部褶皱推覆带内。铜的异常与罗安群的分布有很强的正相关性,暗示姆维尼伦加地区的罗安群找矿潜力良好。姆维尼伦加地区的水系沉积物化探分析结果表明,其Cu元素最高值(1619.49×10^{-6})远低于铜带省Cu元素化探分析最高值(11400×10^{-6} , 未公开数据),可能与该地区罗安群被大规模覆盖有关。穹窿区的罗安群中铜地球化学值较低,表现为较弱的成矿性。

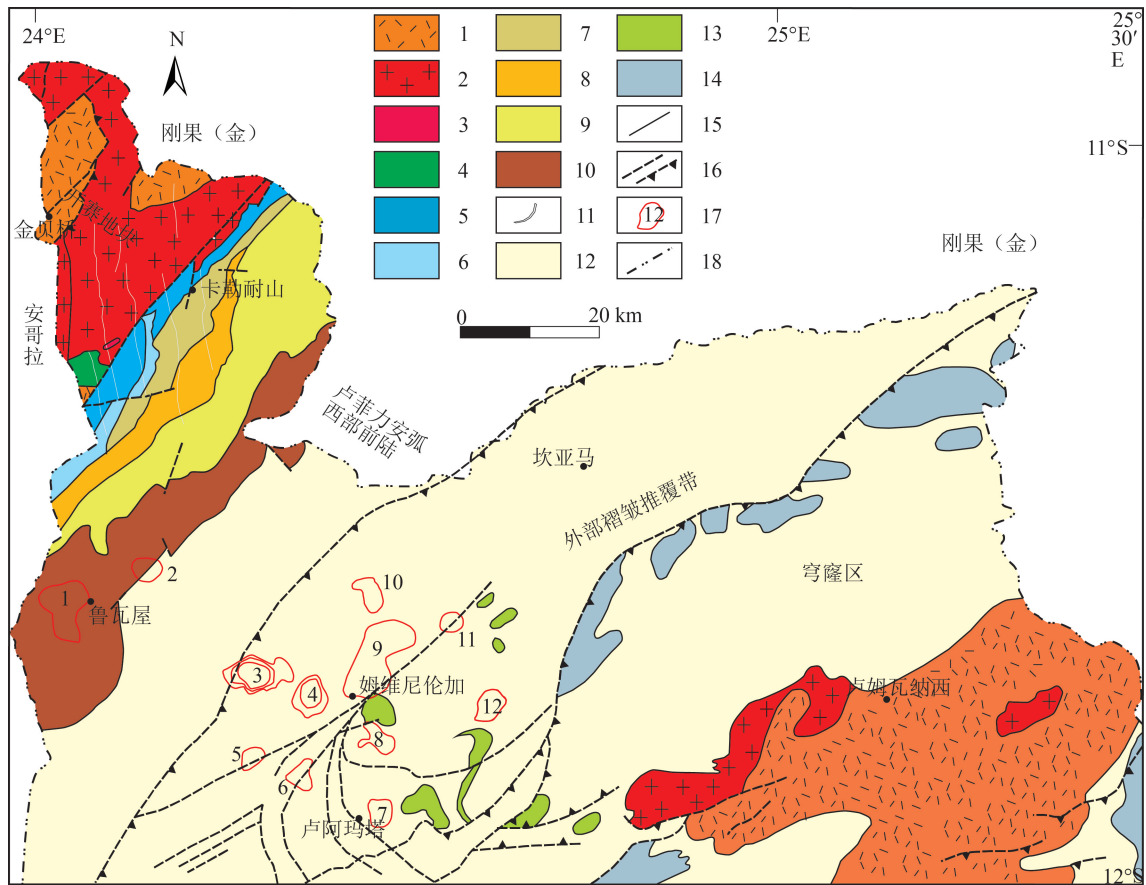


图2 赞比亚姆维尼伦加地区地质图和铜地球化学异常图(据 Key et al., 2001)

Fig. 2 Geological map and copper anomalies distribution sketch map of Mwini Lunga Sheet, Zambia

1—新太古代火成岩和变质岩;2—古元古代花岗岩;3—时代不明花岗岩墙;4—闪长岩;5—罗安群下部石英岩;6—罗安群下部粉砂岩;7—罗安群铁质石英岩;8—罗安群上部粉砂岩;9—罗安群上部石英岩;10—约 765 Ma 安山岩;11—765 Ma 安山岩墙;12—未分加丹加超群;13—约 735 Ma 火山岩;14—大理岩;15—地质界线;16—断层;17—铜地球化学异常及编号;18—国界

姆维尼伦加地区 1:25 万水系沉积物测量的 12 个 Cu 异常可分为两大类:第一类为反映安山岩和玄武质熔岩地质背景的铜化探 1、2 号异常,位于靠近安哥拉边境的 Lwawu 地区。20 世纪 90 年代,英美资源公司在该地区开展过贱金属的勘查工作,未发现具有经济意义的矿点。第二类为位于姆维尼伦加镇附近的 3~12 号铜化探异常,异常区内出露加丹加超群沉积岩,岩性主要为碎屑沉积岩、白云岩、砾岩。3~12 号铜化探异常整体呈 N—NNE 向分布,与地层走向一致。3~12 号铜化探异常还可分为 4 个 NW—SE 向分布的亚组:3、4、8 号铜化探异常组;5、6、7 号铜化探异常组(卢阿玛塔, Luamata);9、12 号铜化探异常组和 10、11 号铜化探异常组;铜矿化总体受地层控制,但 NW—SE 向的

构造可能更有利于矿床的形成(Key et al., 2001)。

5~12 号则主要分布在已发现的铜矿化点范围内,说明地球化学勘查在姆维尼伦加地区是有效圈定找矿靶区的工作手段。3、4 号铜化探异常位于姆维尼伦加西侧,是 Cu 异常值最高的 2 个化探异常,暗示二者将是未来铜矿勘查的重要靶区,但是其附近未见铜矿化现象,可能需要开展中等比例尺的土壤地球化学测量工作,进一步圈定找矿靶区。

2.2 土壤地球化学

在复向斜带南缘的希富玛矿区的土壤地球化学测量结果表明,Cu—Au—Co 组合化探异常是较好的找矿标志(盖寿山等, 2015)。然而,希富玛 A 矿区的土壤地球化学测量数据分析表明,最佳找矿指

示元素组合为 Cu-Ni-As-Co-Zn (龚玉爽等, 2016)。

赞比亚 Mwombezhi 穹窿中土壤地球化学异常结合地球物理、地质特征等并经槽探、钻探验证,圈定了一处含矿层位为基底斜长角闪片岩的矿(化)体(蒋永臻, 2017)。

复向斜带和穹窿区内的土壤地球化学测量工作表明,土壤铜-钴化探异常可以有效地反映铜钴矿化体的存在,可在该地区内推广使用。

3 地球物理特征

3.1 岩石矿石物探电性参数

曾高福等(2014)研究了赞比亚铜带省各种岩石的物探电性参数:基底片麻岩、片岩的电阻率值($10049 \sim 33476 \Omega \cdot m$)比铜矿石的电阻率值($382 \sim 1265 \Omega \cdot m$)高 2 个数量级,而其他的沉积岩介于二者之间,其中石英岩的电阻率值和砾岩的电阻率值(平均值分布为 $9138 \Omega \cdot m$ 、 $661 \Omega \cdot m$)相对其他沉积岩($2532 \sim 6597 \Omega \cdot m$)高。

双频激电法计算所得的视幅频率可以表征激发极化效应的强弱。铜带省基底片麻岩、片岩的幅

频率值(2.4%~20.9%,平均分别为 3.4%、7.8%),而铜矿石的幅频率值为 2.2%~8.9%,平均 5.4%,高于其他岩性的平均值 1.05%~2.3%。

因此,含铜矿石具有中低阻、中高幅频率的特征,而砾岩、石英岩等不含矿沉积岩则具有中高阻、中低幅频率的特征,基底片麻岩则具备高阻、高幅频率的特征。利用不同岩石、矿石物理电性参数的差别,可较好地绘制基底岩层、加丹加超群和含矿层的空间分布界面,指导矿区找矿工作。

3.2 区域航磁

充分考虑测线间距、测线的完整性,兼顾图面完整性的要求,对收集的赞比亚西北省航磁数据按照全覆盖原则和等线距原则挑选了 80244 条数据(总数据量超 240 万条)。利用中国地质调查局发展研究中心开发的软件 GeoExpl 2020 (<http://www.drc.cgs.gov.cn/GeoExplGeoMDIS/>)将上述数据采用指数距离加权法进行网格化,采用累频法分为 2.5、5、10、15、20、25、30、40、50、60、70、75、80、85、90、95、97.5 共 18 级,获得其航磁 ΔT 等值线图(图 3)。

赞比亚西北省的航磁 ΔT 等值线图(图 3)具有

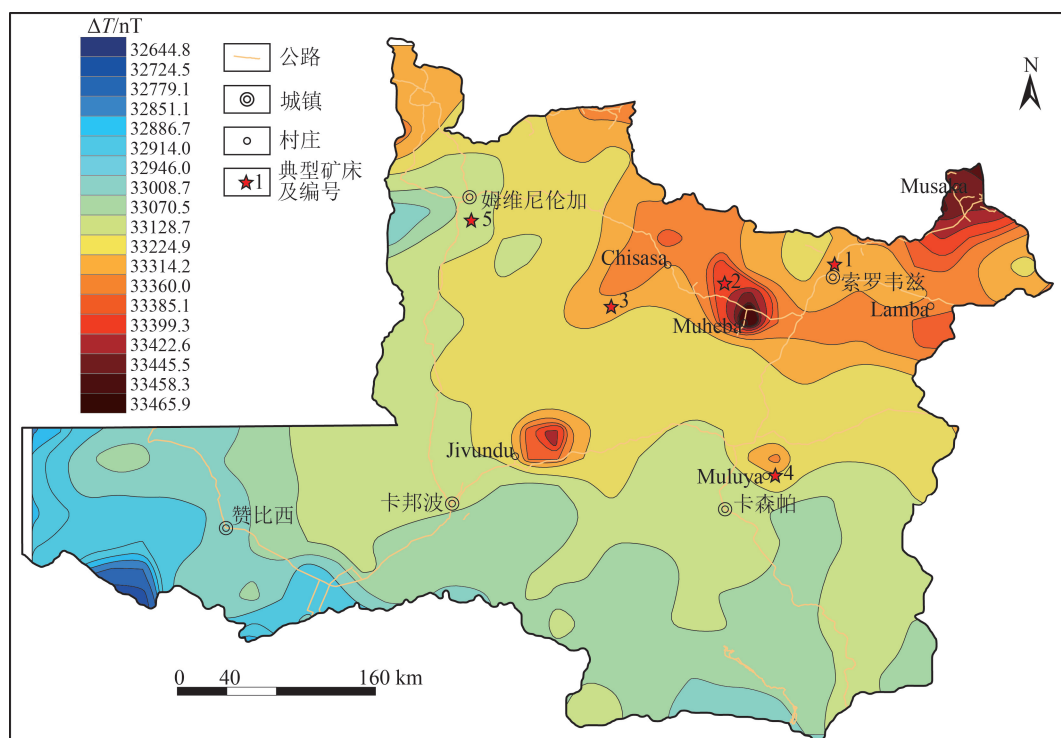


图 3 赞比亚西北省航磁 ΔT 等值线图(数据据赞比亚地质调查局)

Fig. 3 Aeromagnetic contour map of Northwestern Province, Zambia

1—坎桑希;2—卢姆瓦纳;3—卡伦比拉;4—希富玛;5—卢阿玛塔

4 个高值区:东北端邻近基普希(Kipushi) Cu-Pb-Zn 矿的 Musaka 高值区、中部的 Maheba 高值区、南部卡森帕东部的 Muluya 高值区、卡森帕西部的 Jivundu 高值区。已有中资企业在 Muluya 高值区发现卡富玛 IOCG 型铜矿,而 Jivundu 高值区北部也曾经发现过卡愣瓜铜矿和数个铁-铜矿点,表明西北省境内可以利用航磁异常筛选找矿靶区,主要勘探方向为 IOCG 型铜多金属矿。此外,在索罗韦兹东部的 Lamba 和 Mwombeszi 穹窿中北部的 Chisasa 地区有较弱的航磁异常。

4 赞比亚西北省典型矿床

西北省的铜(钴)矿床在卢菲利安弧的穹窿区和复向斜带均有发现,在外部褶皱推覆带内也有铜矿化点分布。本文以穹窿区内的坎桑希铜-金矿、卡伦比拉铜-镍-钴矿床和复向斜带内的希富玛 IOCG 型铜矿床为典型矿床,分析矿床(体)的地质特征、成矿时代、控矿因素,揭示西北省铜多金属矿的矿床成因和成矿模式。

4.1 坎桑希铜-金矿床

位于索罗韦兹(Solwezi)穹窿东北,可分为北西矿体、主矿体和东南矿体(图4),赋矿层位为加丹加超群穆瓦夏群的坎桑希矿山组(Kansanshi Mines)(Steven et al., 2003),总的铜矿石资源量约 10.9×10^8 t,全铜边界品位 0.3%,平均品位 0.81%,伴生金的金属量约 40.18 t,平均品位 0.11%(Steven et al., 2003;张东红等, 2013a)。

(1) 矿区地质

坎桑希矿区地层可划分为 4 个岩性组:上白云岩组、上碎屑片岩组、坎桑希矿山组和下碎屑片岩组,矿化的坎桑希矿山组岩性主要为千枚岩、片岩(钙质)及大理岩,见于坎桑希背斜轴部。在矿体的北部有暗绿色的辉长岩侵入,可视为矿体的北部边界。

(2) 矿体地质

坎桑希铜金矿含矿矿体有两大类。第一类为 SN 走向、陡倾斜、大规模的石英-碳酸盐岩脉、网脉状矿体(Torrealdy et al., 2000;张东红等, 2013a, b;刘国平等, 2018;朱海宾等, 2019),其沿 NW—SE 走向展布约 7 km。根据矿脉切穿关系可划分出 3 期近平行矿脉:第一期为石英-碳酸盐-硫化物脉,宽度变化较大,由小于 1 cm 到大于 5 m,南北长可达

400 m,延深可达 50 m,是坎桑希矿床最重要的资源量。主要硫化物包括黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿,少量的辉钼矿和少见的斑铜矿;脉石矿物则多见石英、铁白云石、铁方解石;常见副矿物有金红石、黑云母。第二期为富集 U-Th 的碳酸盐-硫化物脉,通常仅有几厘米宽,可见微量到少量的钛铀矿、独居石、沥青铀矿、方铀矿。第三期主要为硫化物,并含较多的辉钼矿,为细脉状和网脉状,长度几厘米到数米。

第二类为呈水平产出(倾角小于 25°)的变质地层,含矿岩石为钠长石-碳酸盐化的千枚岩,发育丰富的蓝绿色氧化铜矿化,因而又被称为“绿色围岩”(Torrealdy et al., 2000)。“绿色围岩”厚度变化较大,从几米到 60 m 不等,平均厚度约 30 m,靠近含铜石英-碳酸盐岩脉处 Cu 品位一般较高。含铜石英-碳酸盐岩脉切穿了含矿变质地层(Torrealdy et al., 2000)。

总体上坎桑希铜金矿体强烈风化,由地表到深部,可分为氧化带、混合带和硫化物带。浅部氧化带和混合带的主要含铜矿物为孔雀石、辉铜矿;硫化物带为原生矿体,主要含铜矿物为黄铜矿和斑铜矿(Torrealdy et al., 2000)。氧化带的上部界面位于大理岩岩层顶部以下,底部则以风化的大理岩与新鲜大理岩岩层的接触边界为界。坎桑希铜金矿的金属资源量主要赋存于混合带和深部硫化物中,铜矿石的品位较低,氧化矿石金属资源相对较少,但是 Cu 品位较高(Torrealdy et al., 2000;张东红等, 2013a, b;刘国平等, 2018;朱海宾等, 2019)。

(3) 成矿时代

对直立矿脉中的辉钼矿用 Re-Os 法测定其成矿年龄为 512.4 ± 1.2 Ma 和 502.4 ± 1.2 Ma,指示其可能经历了 10 Ma 的矿化作用,或经历了 2 期矿化作用(Torrealdy et al., 2000),表明其成矿时代明显晚于铜带省和刚果(金)加丹加的沉积型铜-钴矿。

(4) 控矿因素

坎桑希铜金矿就位于坎桑希背斜褶皱轴部,以其北部的辉长岩为北部边界,而陡倾斜的 SN 向矿脉切穿其围岩,以第一期的石英-碳酸盐-硫化物脉体为主要金属资源载体,其他第二期、第三期脉体和变质水平地层为辅,且地层中靠近脉体的铜品位偏高,说明坎桑希铜金矿为构造控矿,而非沉积地层控矿。

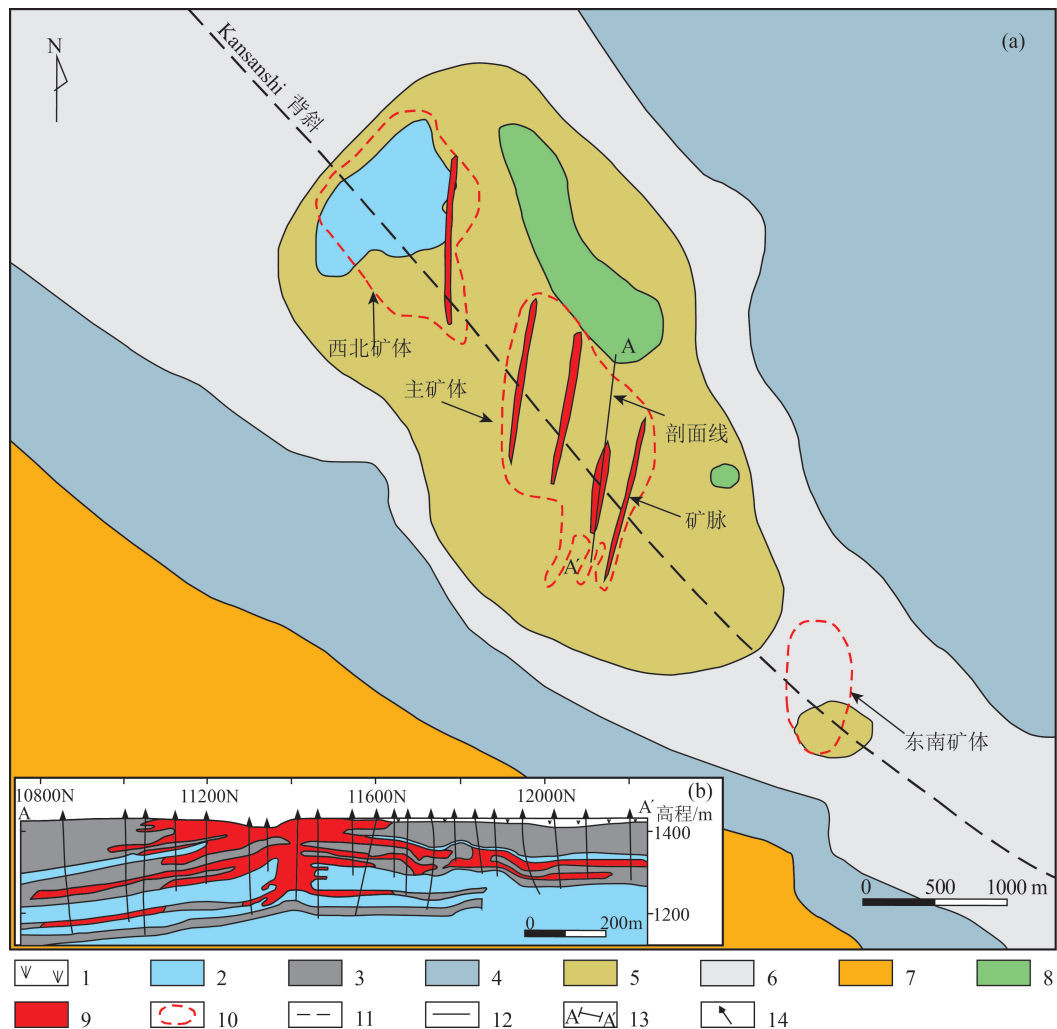


图 4 赞比亚坎桑希铜-金矿地质简图(a)和剖面(b) (据张东红等,2013a;肖波等,2014)

Fig. 4 The geological sketch map(a) and the section map(b) of the Kansanshi Cu-Au deposit

1—浮土层;2—大理岩;3—钙质泥岩/页岩;4—白云岩;5—千枚岩/片岩;6—含砾片岩;7—黑云母-石英岩;
8—辉长岩;9—铜矿脉(>0.5% TCu);10—矿体范围;11—背斜轴;12—地质界线;13—剖面位置;14—钻孔

(5) 矿床成因与成矿模式

坎桑希铜金矿为区域造山变质事件期间形成的变质热液型矿床(张东红等,2013a)。其成矿模式推测为:褶皱轴部在 D2 阶段晚期区域性的 NW—SE 挤压作用下,产生近 SN 向构造裂隙(断裂),含矿热液迁移其中后,因物理化学条件改变沉淀、富集成矿,而早期的辉长岩因裂隙度低,不透水等原因成为矿化的北部边界。而“绿色围岩”则是成矿热液在沉积岩颗粒裂隙中扩散、沉淀,形成的邻近直立矿脉、Cu 品位偏高的矿层。

4.2 卡伦比拉铜-镍-钴矿床

卡伦比拉矿床(图 5)位于 Kabompo 基底穹窿的东南缘,距索罗韦兹市约 150 km,由赛庭耐

(Sentinel) 铜矿、恩特普赖斯(Enterprise)镍矿和 Intrepid 铜矿 3 个重要矿点组成。赛庭耐矿点的铜资源量约 10.27×10^8 t, Cu 平均品位 0.51%, 含铜金属量约 5.2×10^6 t。恩特普赖斯项目镍矿石资源量为 0.4×10^8 t, 品位为 1.07%, 另外还包括 7×10^6 t、Ni 品位为 0.7% 的推测资源量。

(1) 矿区地质

出露地层由老至新依次为基底杂岩、加丹加超群和零星分布的加丹加期后年轻地层。基底杂岩主要为细粒—粗粒的黑云母花岗片麻岩,其次可见少量的角闪岩、片麻岩和云母-蓝晶石片岩。加丹加超群由下至上分别为砂岩、硅质岩、角砾岩、硅质碎屑岩、碳酸盐岩和蒸发岩。基底杂岩和沉积盖层

普遍发育强烈的构造变形,变质作用最高可达角闪岩相,局部为绿片岩相变质。矿区内断层发育,赛庭耐矿床的矿体东、西两侧均被断层截断。

(2) 矿体地质

赛庭耐矿床的赋矿层位为加丹加超群,是一个沉积岩容矿的铜-钴-镍矿,但具体层位是下罗安亚群或穆瓦夏亚群尚有争议(Torrealdy et al., 2000; 张东红等, 2013a, b; 刘国平等, 2018; 朱海宾等, 2019)。铜矿化主要产于炭质千枚岩中,但是矿体的上、下盘片岩中未见矿化。矿体呈层状,走向 SE—NW, 长 4 km, 厚几米至超过 200 m, 向北倾斜, 倾角在西部近水平, 往东北方向, 倾角逐渐变大, 可达 45°。矿体氧化矿资源较少, 矿石以硫化物为主, 主要为黄铜矿。黄铜矿沿细脉或层理、片理产出, 前者多见与蓝晶石、黑云母-金云母变晶在空间上伴生。

(3) 成矿时代

卡伦比拉矿床的独居石和金红石的 SHRIMP U—Pb 年龄分别为 548.6 ± 7.6 Ma 和 531 ± 21 Ma (Steven et al., 2003), 表明控矿地层在晚泛非造山期经历了区域变质作用。辉钼矿的 Re—Os 年龄为 540 ± 2 Ma (Steven et al., 2003), 暗示卡伦比拉铜-镍-钴矿的富集成矿时间为晚泛非造山期。

(4) 控矿因素

赛庭耐矿点的炭质千枚岩层内平卧褶皱发育, 与矿区千米尺度的平卧向斜协调一致 (Steven et al., 2003; 肖波等, 2014)。铜矿化主要发育在炭质千枚岩层的中上部, 而其上、下盘片岩仅在接触面附近可见少量低品位铜矿化。炭质千枚岩内受变质作用形成的石英-碳酸盐细脉发育, 有利于成矿流体的迁移, 富含炭质的流体为矿质沉淀提供了有利的化学条件。

构造也是赛庭耐矿点铜矿化的主要控制因素, 矿体东西两端分别被 NW—SE 向的卡伦比拉断层和走向 NE—SW 向的 2 个断层截断。矿体中高品位铜矿条带呈透镜状产于平卧褶皱的转折部。

(5) 矿床成因与成矿模式

赛庭耐矿点的铜矿化沿走向延伸达 11 km, 但其矿体仅长 4 km, 矿化集中于地层的中上部。据此, 结合前文所述, 赛庭耐铜矿(化)可能是区域变质作用下, 含铜炭质变质泥岩变质形成炭质千枚岩的过程中, 地层中的铜被萃取, 形成的成矿流体沿石英-碳酸盐细脉形成的通道向上部迁移, 因物理

化学条件的变化沉淀、富集成矿。

4.3 希富玛 IOCG 型铜矿床

希富玛 IOCG 型铜矿床位于卢菲利安弧复向斜带中部南缘 ($26^{\circ}09'08''\text{E}$ 、 $13^{\circ}22'56''\text{S}$), 距西北省卡森帕市 (Kasempa) 约 45 km。希富玛铜矿金属储量约 22.3×10^4 t (铜矿石量 0.3×10^8 t @ 0.73%, 332+333 级), 铁矿石资源量 3.48×10^8 t, TFe 平均品位为 46.38%; 伴生金为 6.7 t, 伴生银为 97.2 t, 伴生钴为 0.73×10^4 t, 伴生锌为 11.27×10^4 t (333 级)。

(1) 矿区地质

希富玛铜矿区被第四系大面积覆盖 (图 6), 主要地层有昆德隆古变质砂岩, 穆瓦夏组炭质砂岩、泥质白云岩, 上罗安砂质板岩、白云岩, 下罗安长石英砂岩、白云岩; 岩浆岩主要有花岗岩、二长岩、辉长岩。矿区内 NW 向和 NEE—EW 向断裂发育, 矿体主要位于二者交会处。

(2) 矿体地质

矿体主要赋存于侵入昆德隆古群的灰白色块状含铜碳酸岩内, 表现为全岩铜矿化。含铜碳酸岩脉厚度不等, 从小于 1 mm 到数十米均有发现, 脉体产状变化大, 绝大多数陡倾。碳酸岩常见气孔构造、流动构造; 具镶嵌结构和包含结构; 主要含铜矿物为黄铜矿, 常见磁铁矿、黄铁矿, 磁黄铁矿、闪锌矿、赤铁矿、辉钼矿、斑铜矿等金属矿物也有发现; 主要非金属矿物为方解石和白云石。

(3) 控矿因素

希富玛铜矿床的含铜碳酸岩脉的产出受构造岩浆带控制。沿构造岩浆带有已发现 12 个岩浆晚期铁矿床, 希富玛铜矿床邻近其中的 9 号铁矿床 (龚玉爽等, 2016; 边千韬等, 2017)。

(4) 成矿时代

希富玛铜矿区 NE 向构造岩浆带内的辉石二长岩和石英钠长岩的锆石 U—Pb 年龄 (LA—ICP—MS) 分别为 537.2 ± 1.4 Ma 和 529 ± 16 Ma (边千韬等, 2017), 指示了其矿体形成年龄, 相当于泛非造山运动后的造山伸展阶段。

(5) 矿床成因与成矿模式

含铜碳酸岩脉中金、钴、锌、银等金属矿物和稀土含量高, 铁氧化物含量高达 20% 以上, 具有明显的 IOCG 矿床的特征, 说明该碳酸岩的成因是岩浆-热流体成因 (盖寿山等, 2015; 边千韬等, 2017)。碳酸岩的地球化学特征和同位素示踪结果显示其可能来

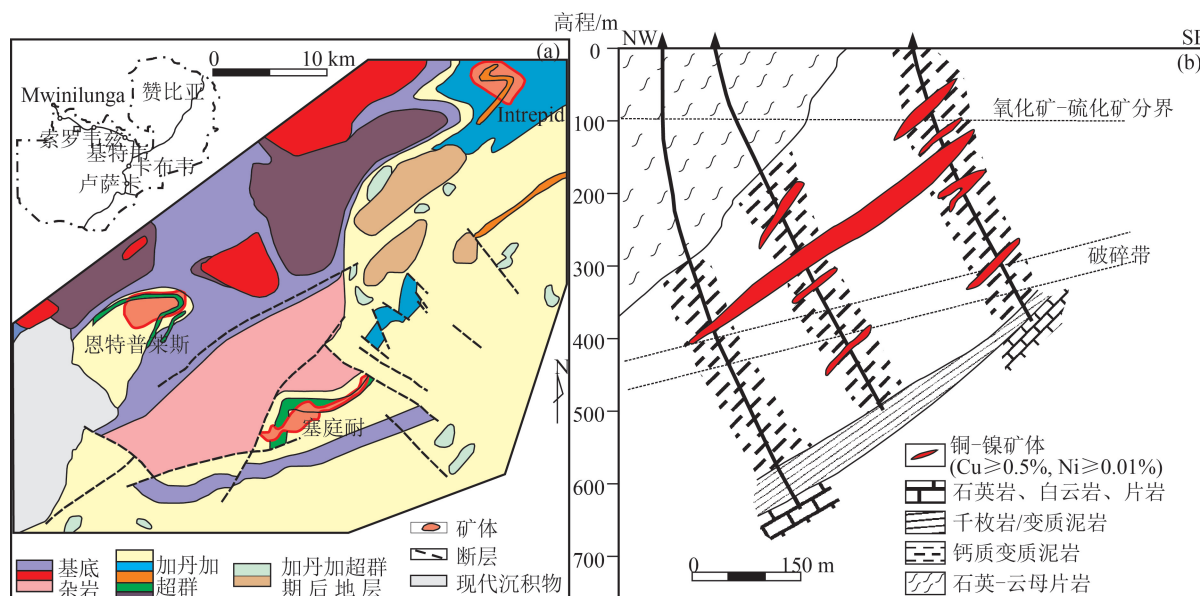


图 5 卡伦比拉矿区地质简图(a,据张东红等,2013a)和卡伦比拉项目典型剖面(b,据 Steven et al.,2003)

Fig. 5 The geological sketch map(a)and the section map of Kalumbilia Cu deposit(b)

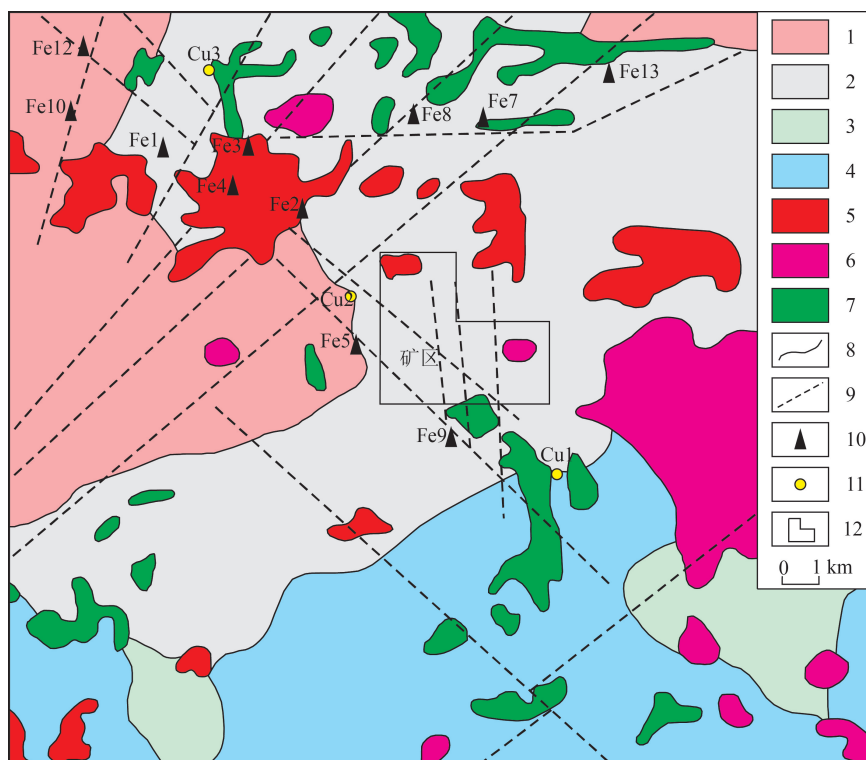


图 6 赞比亚希富玛铜矿区地质图

Fig. 6 Geological map of the Shivuma copper deposit

1—昆德隆古变质砂岩;2—穆瓦夏组炭质砂岩、泥质白云岩;3—上罗安砂质板岩、白云岩;
4—下罗安长石石英砂岩、白云岩;5—花岗岩;6—二长岩;7—辉长岩;8—地质界线;
9—断层;10—铁矿点;11—铜矿点;12—矿权区

自 I 型富集地幔端元(边千韬等,2017)。其成矿模式为初始地幔物质沿深大断裂上升至地壳浅部过程中,温度和压力下降,导致初始岩浆不断演化并最终成矿。岩浆演化早期主要为液态不混溶作用,熔离出碱性硅酸盐岩浆和碳酸盐+硫酸盐岩浆;之后岩浆持续上升,碳酸盐及硫酸盐矿物和磁铁矿开始结晶;随着结晶分异作用的持续进行,氧逸度和氧化性降低,硫逸度增高、还原性增强,还原硫产生并快速增加,与 Cu、Fe、Zn、Co、Mo 等金属离子化合形成金属硫化物而成矿(边千韬等,2017)。

赞比亚西北部卡伦比拉铜-镍-钴矿,坎桑希铜-金矿和希富玛 IOCG 型铜矿的形成年龄均在 550~500 Ma,晚于区域上罗安群的沉积时间(Cailteux et al., 2005),相当于晚泛非造山期—造山后伸展阶段。当东

南方向的卡拉哈里克拉通向北与北部刚果克拉通碰撞挤压,构造及变质热液首先使沉积地层中的成矿物质活化,含矿热液沿构造裂隙运移、沉积,最终富集形成典型的卡伦比拉铜-镍-钴-铀矿。造山晚期,含矿热液在压力作用下,向形成的 SN 向断裂带迁移,最终在断裂带中沉淀、富集成矿,形成坎桑希铜金矿。造山后的伸展阶段,与胡克岩基同时期的深部岩浆沿断裂构造向浅部运移,压力逐渐释放,Cu 元素逐渐富集,并最终形成 IOCG 型含铜碳酸岩的希富玛铜矿。

5 区域地质构造演化与西北省铜钴矿成矿过程

5.1 区域地质构造演化

新元古代卢菲利安弧在古元古代基底(刘晓阳等,2017;Cailteux et al.,2019;左立波等,2020)形成后,经历了加丹加海从孕育→发展→消亡→造山的演化过程,可分为6个阶段(刘国平等,2018;朱海宾等,2019):①罗迪尼亚大陆裂解期间,裂谷形成初期,一系列裂谷盆地中主要为一套陆源碎屑沉积,典型地层有 R.A.T.组和敏多拉组(Cailteux et al.,2019);②裂谷演化为加丹加海洋形成阶段(初期),主要为边缘海砂泥岩页岩地层,典型地层有下罗安亚群;③加丹加海洋阶段,主要为碳酸盐岩和细粒碎屑岩沉积,同时发育大量生物礁台地,典型地层有基特韦组中-上部、下罗安亚群、上罗安亚群;④765~735 Ma,区域性伸展构造阶段,形成浅海相—半

深海相的碳酸盐岩和碎屑岩,典型地层为穆瓦夏亚群;⑤盆地倒转,形成一套陆源碎屑-碳酸盐岩沉积地层;⑥600~500 Ma,泛非期造山作用形成卢菲利安造山带。

5.2 西北省铜钴矿成矿过程

西北省铜多金属矿床主要的成矿时代有2期(表1):第一期为沉积-改造型卢阿玛塔铜钴矿,其赋矿地层为未变质的罗安群矿山组白云质泥质沉积岩,成矿时代为750~710 Ma(Steven et al.,2003),与铜带省沉积-改造型的谦比西主矿体成矿时代一致(Steven et al.,2003)。第二期的成矿时代集中在550~510 Ma(Torrealday et al.,2000;Steven et al.,2003;边千韬等,2017),对应泛非造山作用末期(朱海宾等,2019),暗示西北省的重要铜钴矿床形成与卢菲利安弧其他2个成矿亚带有着明显的区别。

5.3 西北省构造演化与铜钴成矿

卢菲利安弧古元古代基底形成后,约820 Ma开始裂解,接受沉积,并逐步发展为加丹加洋。约600 Ma,随着构造应力转变,东南方向卡拉哈里克拉通向西北挤压刚果克拉通,导致处于锥形的加丹加洋逐渐消亡,并最终形成卢菲利安造山带。卢菲利安弧构造演化过程中形成的加丹加超群底部地层提供了区域内的主要成矿物质来源。

泛非造山运动期间,位于东南方向的卡拉哈里克拉通与位于西北方向的刚果克拉通碰撞、挤压,同时受NE方向刚性班韦卢地块制约,最终形成向

表 1 赞比亚西北省铜钴矿床成矿时代
Table 1 Geochronology of Cu-Co deposits in Northwestern Province, Zambia

矿床名称	矿床类型	测试方法	测试对象	测试结果	资料来源
卢阿玛塔(Luamata)	沉积-改造型铜钴矿			750~710 Ma	Steven,2000;Schmandt et al.,2013
卡伦比拉(Kalumbila)	变质热液铜镍矿	SHRIMP U-Pb	独居石 金红石	548.6±7.6 Ma 531±21 Ma	Steven et al.,2003
坎桑希(Kansanshi)	变质热液脉型铜金矿	Re-OS SHRIMP U-Pb	辉钼矿 独居石	512.4±1.2 Ma 502.4±1.2 Ma 511±11 Ma	Torrealday et al.,2000
希富玛(Shivuma)	铁氧化物型(IOCG)铜矿	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	537.2±7.6 Ma 529±16 Ma	边千韬等,2017
胡克(hook) 花岗岩	岩体	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	566~519 Ma	古阿雷等,2020

北凸起的弧形构造。卡伦比拉矿床与坎桑希矿床均为变质热液型铜金矿。卡伦比拉矿床由于地理位置偏西,受碰撞造山、逆冲推覆作用影响更早,可能先形成受地层、构造控制的变质热液型铜钴镍矿。坎桑希铜金矿则为造山后的伸展构造过程中,在背斜轴部形成一系列断裂带,含矿地层中的 Cu、Au 等元素被萃取后运移,矿区北部的辉长岩则作为屏障,阻止了含矿热液向北继续迁移,含矿热液在背斜轴部的断裂带中沉淀、富集。希富玛含铜碳酸岩则是在碰撞造山后,岩石圈处于伸展过程中,富含铜、铁的幔源岩浆沿 NW 向深断裂上升,逐步分异结晶,并最终在 NEE 向断裂交会处沉淀、富集。

6 找矿方向

综上所述,大地构造位置不同,成矿类型则具有差异性,找矿方向也不相同。

(1) 沉积-改造型铜矿的找矿方向主要集中在姆维尼伦加前陆和卡邦波穹窿西部的外部褶皱推覆带内,以下罗安群矿山组赋矿地层为主要目标,结合区域上沉积-改造型铜矿的地质特征,利用前人地球化学测量成果,开展航磁、重力等地球物理勘探工作,勘查发现铜钴矿。

(2) 卡伦比拉变质热液型铜-钴-金-镍-铀矿形成于晚泛非造山期,主控矿因素是地层与断裂构造。因此,穹窿区以断裂和褶皱同时发育的区域为重点,在褶皱转折端,背斜轴部等有利于成矿的构造部位,以炭质页岩、千枚岩等岩性单元为研究对象,以 Cu、Co 为主要组合元素的地球化学异常圈定靶区,开展地质找矿工作。

(3) 希富玛 IOCG 型铜矿实质是一个与构造岩浆事件密切相关的铜矿类型,利用 IOCG 型矿产具有一定磁性的特点,对航磁数据进行解析,在卢菲利安弧的穹窿区、复向斜带和加丹加高原三者的接触带内开展工作,重点关注 NW 向断裂与其他断裂交会处,以 Cu-Ni-As-Co-Zn 组合异常作为地球化学指标开展找矿工作。建议以卡森帕西部的奇文度(Jivundu)航磁高值区为重点工作区。

7 结 论

(1) 赞比亚西北省在罗迪尼亚大陆裂解期间持续接受沉积,提供了铜、金、镍、钴、铀等矿产的物质来源。泛非造山期,地层中的成矿物质活化、运移,

并在物理化学条件发生变化时沉淀、富集成矿。希富玛含铜碳酸岩可能为初始地幔物质沿深大断裂上升至地壳浅部过程中,由于温度和压力下降,导致初始岩浆不断演化并最终成矿。

(2) 在总结分析地质、地球化学、地球物理特征的基础上,结合典型矿床对比研究,提出在赞比亚西北省外部褶皱推覆带和姆维尼伦加前陆等罗安群保存较好的地区以铜-钴沉积-改造型矿床为找矿目标;在穹窿区以变质热液型铜-钴-金-镍-铀矿床为找矿目标;在复向斜带和加丹加高原的找矿目标为 IOCG 型铜矿;未来应利用遥感、航空物探等工作手段,快捷确定区域 NE 向的深断裂分布情况,查明其与次级断裂区域交会情况,研究出露的地层、岩浆岩特征,在总结成矿规律的基础上,圈定找矿靶区。

参考文献

- Bernau R, Roberts S, Richards M, et al. The geology and geochemistry of the Lumwana Cu (- Co - U) deposits, NW Zambia [J]. Mineral Deposita, 2013, 48: 137-153.
- Broughton D W, Hitzman M, Stephens A. Exploration history and geology of the Kansanshi Cu (- Au) deposit, Zambia [J]. Society of Economic Geologists Special Publication, 2002, 9: 141-153.
- Cailteux J L H, De Putter T. The Neoproterozoic Katanga Supergroup (D. R. Congo): State-of-the-art and revisions of the lithostratigraphy, sedimentary basin and geodynamic evolution [J]. Journal of African Earth Sciences, 2019, 150: 522-531.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African Copperbelt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2005, 42(1/5): 134-158.
- Capistrant P L, Hitzman M W, Wood D, et al. Geology of the enterprise hydrothermal nickel deposit, North-Western Province, Zambia [J]. Economic Geology, 2015, 110: 9-38.
- Eglinger A, André - Mayer A, Vanderhaeghe O, et al. Geochemical signatures of uranium oxides in the Lufilian belt: From unconformity-related to syn-metamorphic uranium deposits during the Pan-African orogenic cycle [J]. Ore Geology Reviews, 2013, 54: 197-213.
- Kampunzu A B, Cailteux J L H, Kamona A F, et al. Sediment-hosted Zn-Pb-Cu deposits in the Central African Copper belt [J]. Ore Geology Reviews, 2009, 35(3/4): 263-297.
- Kampunzu A B, Cailteux J. Tectonic evolution of the Lufilian arc (Central Africa Copper belt) during the Neoproterozoic Pan-African orogenesis [J]. Gondwana Research, 1999, 2: 401-421.
- Key R M, Liyungu A K, Njamu F M, et al. The western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization [J]. Journal of African Earth Sciences, 2001, 33(3): 503-528.
- Porada H, Berhorst V. Towards a new understanding of the

- Neoproterozoic-early Palaeozoic Lufilian and northern Zambezi belts in Zambia and the Democratic Republic of Congo [J]. Journal of African Earth Sciences, 2000, 30(3): 727-771.
- Schmandt D, Broughton D, Hitzman M W, et al. The Kamao copper deposit, Democratic Republic of Congo: Stratigraphy, diagenetic and hydrothermal alteration, and mineralization [J]. Economic Geology, 2013, 108(6): 1301-1324.
- Selley D, Broughton D, Scott R, et al. A new look at the geology of the Zambian Copperbelt [C] // Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, et al. Economic Geology 100th Anniversary Volume. Littleton: Society of Economic Geologists, Inc., 2005: 965-1000.
- Sikatali C, Legg C A, Bwalya J J, et al. Republic of Zambia: Geological and mineral occurrence map (scale 1 : 2000 000) [M]. Lusaka. Zambia Geological Department, 1994.
- Steven N M. A Shaba-type Cu-Co(-Ni) deposit at Luamata, West of the Kapompo Dome, northwestern Zambia [J]. Exploration Mining Geology, 2000, 9: 277-287.
- Steven N, Armstrong R. A metamorphosed Proterozoic carbonaceous shale hosted Co-Ni-Cu deposit at Kalumbila, Kabompo Dome: the Copper belt ore shale in northwestern Zambia [J]. Economic Geology, 2003, 98: 893-909.
- Torrealdy H I, Hitzman M W, Stein H J, et al. Re-Os and U-Pb dating of the vein-hosted mineralization at the Kansanshi copper deposit, Northern Zambia [J]. Economic Geology, 2000, 95: 1165-1170.
- Turlin F, Eglinger A, Vanderhaeghe O, et al. Synmetamorphic Cu remobilization during the Pan-African orogeny: Microstructural, petrological and geochronological data on the kyanite-micaschists hosting the Cu(-U) Lumwana deposit in the Western Zambian Copperbelt of the Lufilian belt [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 75: 52-75.
- 边千韬, 盖寿山, 刘绍友, 等. 赞比亚希富玛铜矿床含铜碳酸岩岩石学和地球化学及其成岩成矿意义 [J]. 岩石学报, 2017, 33(6): 1805-1826.
- 盖寿山, 边千韬, 刘绍友, 等. 赞比亚西北省发现 IOCG 碳酸岩型铜矿床 [J]. 地质论评, 2015, 61(3): 644-650.
- 龚玉爽, 侯海静, 孙成杰, 等. 赞比亚西北省卡森帕 A 矿区土壤地球化学测量及找矿效果 [J]. 物探与化探, 2016, 40(3): 482-487.
- 古阿雷, 王杰, 任军平, 等. 赞比亚中部泛非期 Hook 岩基地质特征及成矿潜力分析 [J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 63-71, 80.
- 胡鹏, 任军平, 向鹏, 等. 非洲大陆构造单元划分 [J]. 地质通报, 2022, 41(1): 1-18.
- 蒋永臻. 土壤地球化学测量在赞比亚 Mwombeshi 地区铜钴矿预查中的应用 [J]. 物探与化探, 2017, 41(5): 821-825.
- 刘国平, 肖波, 孙希文, 等. 非洲卢富里安成矿带铜-钴多金属矿成矿演化与找矿 [M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1-221.
- 刘晓阳, 王杰, 任军平, 等. 赞比亚谦比西铜矿花岗岩年龄及其指示意义 [J]. 中国地质, 2017, 44(4): 755-765.
- 邱瑞照, 赵国春, 邱磊, 等. 非洲大陆岩石圈演化与成矿关系 [J]. 地质通报, 2022, 41(1): 19-33.
- 肖波, 秦克章, 张东红. 赞比亚西北省铜-钴矿地质及找矿潜力 [J]. 地质与勘探, 2014, 50(1): 182-191.
- 曾高福, 敬荣中, 邓贵安, 等. 赞比亚铜带省层控型铜矿物探电性异常特征研究 [C] // 中国有色金属学会. 中西部第七届有色金属工业发展论坛. 郑州: 河南科学技术出版社, 2014: 480-486.
- 张东红, 肖波, 张臻. 赞比亚沉积型铜(-钴)矿地质及未来矿业展望 [J]. 地质与勘探, 2013a, 49(3): 577-588.
- 张东红, 肖波. 中部非洲沉积型铜-钴矿地质及找矿潜力 [M]. 北京: 地质出版社, 2013b: 1-112.
- 朱海宾, 肖波, 刘国平. 中南部非洲卢富里安铜钴矿带多期次成矿作用演化 [J]. 矿产勘查, 2019, 10(4): 949-956.
- 左立波, 任军平, 王杰, 等. 赞比亚班韦乌卢地块花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素组成 [J]. 地质调查与研究, 2020, 43(1): 30-41.