

DOI: 10.12401/j.nwg.2022009

准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿成矿特征

张照伟¹, 张江伟¹, 王亚磊¹, 彭素霞¹, 谭文娟¹, 朱伯鹏², 张汉清²

- (1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
2. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队, 新疆 阿勒泰 836500)

摘要: 钴是全球战略性关键矿产, 对国民经济、国家安全和新兴产业发展具有关键作用。钴资源的国内供应基本来源于岩浆铜镍硫化物矿床冶炼铜镍的副产品, 尚未发现独立钴矿床。准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿, 是除岩浆硫化物矿床类型之外的新发现。笔者通过蕴都卡拉钴矿成矿特征研究, 初步认为钴矿聚集于闪长岩与玄武岩接触带的构造破碎带内, 沿北西向断裂两侧分布, 表现了钴、铜、金的典型组合, 属于岩浆热液型矿床。在蕴都卡拉外围沿北西向断裂两侧发育多处闪长岩与玄武岩的接触部位, 钴矿成矿条件优越, 表现出较大的钴矿找矿潜力。笔者通过蕴都卡拉钴矿富集规律和成矿特征研究, 旨在揭示钴矿成矿潜力和找矿新靶区, 支撑服务战略性矿产找矿行动, 缓解中国钴矿成矿安全供应压力, 降低安全风险。

关键词: 钴矿; 成矿特征; 富集规律; 岩浆热液; 蕴都卡拉

中图分类号: P618.62; P612

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)01-0001-10

Metallogenic Characteristics of Yundukala Co Deposit in Northern Margin of Junggar Metallogenic Belt, Northwest China

ZHANG Zhaowei¹, ZHANG Jiangwei¹, WANG Yalei¹, PENG Suxia¹, TAN Wenjuan¹, ZHU Bopeng², ZHANG Hanqing²

- (1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Altay 836500, Xinjiang, China)

Abstract: Cobalt is global strategic critical minerals, which is of great strategic significance to the national economy, national security, and technological development. Therefore, it is urgent to strengthen the study of cobalt mineralization regularity, to develop efficient exploration technology, and to search the new continuous resources. The cobalt resources stemmed mainly from by-product smelt Cu and Ni from magmatic sulfide deposits in China, independent cobalt deposit not found. The Yundukala cobalt deposit from northern margin of Junggar metallogenic belt is newly discovered in China. The paper preliminary think that cobalt accumulation on the contact zone between diorite and basalt, at the same time, structural broken belt, the distribution of cobalt mineralization is made along both sides of the NW-SE fracture, it shows a typical combination of cobalt, copper

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-07-11; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“东昆仑夏日哈木铜镍矿床硫化物不混溶作用研究”(41873053), 第二次青藏高原综合科学考察研究“稀贵金属(金、镍、钴、铬铁矿、铂族元素)科学考察与远景评估”(2019QZKK0801), 陕西省创新能力强支撑计划-创新人才推进计划-岩浆作用成矿与找矿创新团队(2020TD-030)及中国地质调查局地质调查项目“西北地区铜镍稀有金属等矿产地质调查”(DD20221691)联合资助。

作者简介: 张照伟(1976-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论与矿产资源调查评价工作。E-mail: zhaoweiz@126.com。

and gold, and belongs to magmatic hydrothermal type deposit. Moreover, there developing many contact parts diorite and basalt along both sides of NW-SE fracture in Yundukala peripheral area, they have advantageous metallogenic conditions of cobalt deposits, and showing great prospecting potential. The paper intends to research metallogenic regularity and mineralization characteristics by Yundukala cobalt. This work could reveal the metallogenic potential of cobalt mineral resources, determine new prospecting targets, support the strategic mineral prospecting operations, and enhance the ability to ensure the safe supply of cobalt mineral resources in China.

Keywords: cobalt deposit; metallogenic characteristics; enrichment regularity; magmatic hydrothermal; Yundukala

钴因广泛应用于新能源汽车、电子通讯、航空航天、原子能、高端装备制造等高精尖科技领域,被视为全球战略性关键金属,倍受世界各国强烈关注(侯增谦等, 2020; 张照伟等, 2021)。随着新兴产业的高速发展与低碳经济时代的来临,全球对钴金属的需求增长迅猛且前景广阔(赵俊兴等, 2019; 王焰等, 2020; 李文渊等, 2020; 张照伟等, 2020; Wang et al., 2021)。目前,能源电池用掉 49% 的钴,预计 2030 年达到 80%; 2017 年全球消耗钴金属约 11 万 t, 预计 2027 年将达到 30 万 t, 全球探明约 700 万 t(Williams-Jones et al., 2022)。钴金属主要赋存于 4 种矿床类型, 岩浆型是中国最主要的钴来源, 占比超过 90%(李文渊, 2018; 莫宣学, 2019; 王辉等, 2019; 王武名等, 2021)。中国目前是全球第一大钴金属消费国, 然而超过 97% 的钴资源依赖进口, 钴的供应主要来源于开发岩浆铜镍硫化物矿床加工铜、镍等金属矿产回收的副产品, 后备资源严重不足(李立兴等, 2018; 李文渊等, 2019; 张洪瑞等, 2020; 张照伟等, 2022)。最近, 新疆地矿局第四地质大队在富蕴县发现了蕴都卡拉钴矿, 与铜、金共生, 且沿构造线北西走向向两端伸展, 表现了较好的钴矿成矿条件和找矿潜力。笔者通过分析蕴都卡拉钴矿成矿特征, 了解钴矿物赋存状态, 探索分析矿物岩石组成和结构对钴元素富集的制约。基于成矿背景、成矿过程、元素富集机制及钴赋存状态的认识, 深入探讨地质过程中元素的地球化学行为以及钴元素活化、迁移和沉淀的机制, 揭示其成矿背景、矿体特征与钴矿化程度的对应关系, 进而了解区域构造背景与钴成矿作用过程, 可为拓展和支撑区域钴矿找矿和新发现提供借鉴。

1 区域地质构造背景

新疆蕴都卡拉钴矿位于准噶尔盆地北缘的塔尔

巴哈台-阿尔曼太沟弧带与萨吾尔-二台岛弧带接合部位(图 1)。该区出露地层由老到新为下泥盆统托让格库都克组及中泥盆统北塔山组、下石炭统姜巴斯套组、下二叠统哈尔加乌组、中二叠统卡拉岗组、上二叠统扎河坝组。铜钴矿化主要发育在中泥盆统北塔山组, 主要为一套基性火山岩、火山碎屑岩、硅质岩建造。岩性主要为沉凝灰岩、玄武岩、含角砾岩屑晶屑凝灰岩、含角砾晶屑凝灰岩、晶屑凝灰岩、凝灰岩、硅质岩等。区内构造活动强烈, 断裂发育, 晚古生代地层多呈断块状产出, 岩浆活动强烈, 火山岩及侵入岩从超基性岩到酸性岩均有分布(张照伟等, 2014; 秦克章等, 2021; 陈隽璐等, 2021)。侵入岩主要为蛇纹石化橄榄岩、闪长岩、辉长岩、花岗斑岩、碳酸岩。蛇纹石化橄榄岩体呈岩枝状、不规则状分布于断裂附近, 由于受到构造影响, 岩石多呈碎块状。闪长岩体呈岩株状分布研究区西部。地表受脆韧性构造变形影响, 劈理、节理发育, 岩石多呈岩枝状、岩脉状产出。区内已发现喀拉通克铜镍矿、索尔库都克铜钼矿、希勒库都克铜钼矿等矿点, 成矿地质条件优越(图 1)。

蕴都卡拉矿区目前由北区、中区、一区和二区等 4 个区组成。中区内侵入岩较为发育, 中性-基性-超基性侵入岩均有出露, 主要岩性为闪长岩、辉长岩、蛇纹石化橄榄岩(朱伯鹏等, 2020)。蛇纹石化橄榄岩: 沿构造线呈带状、不规则断块、断片状集中分布于中北部, 出露面积约 3 km²。地表受脆韧性构造变形影响, 片理、劈理发育, 多呈碎片状、片状分布(张铭杰等, 2020)。岩石蛇纹石化发育, 普遍具有弱磁性, 磁铁矿含量为 2%~6%, 未见其他矿化信息。辉长岩: 主要呈岩脉分布于中部、北东部, 出露面积约为 0.5 km², 地表受劈理发育影响多呈碎块分布(图 1b)。北东部辉长岩多具片理和劈理化, 整体具有弱磁性。闪长岩: 呈岩株、岩枝状分布于中部、北西部, 出露面积约

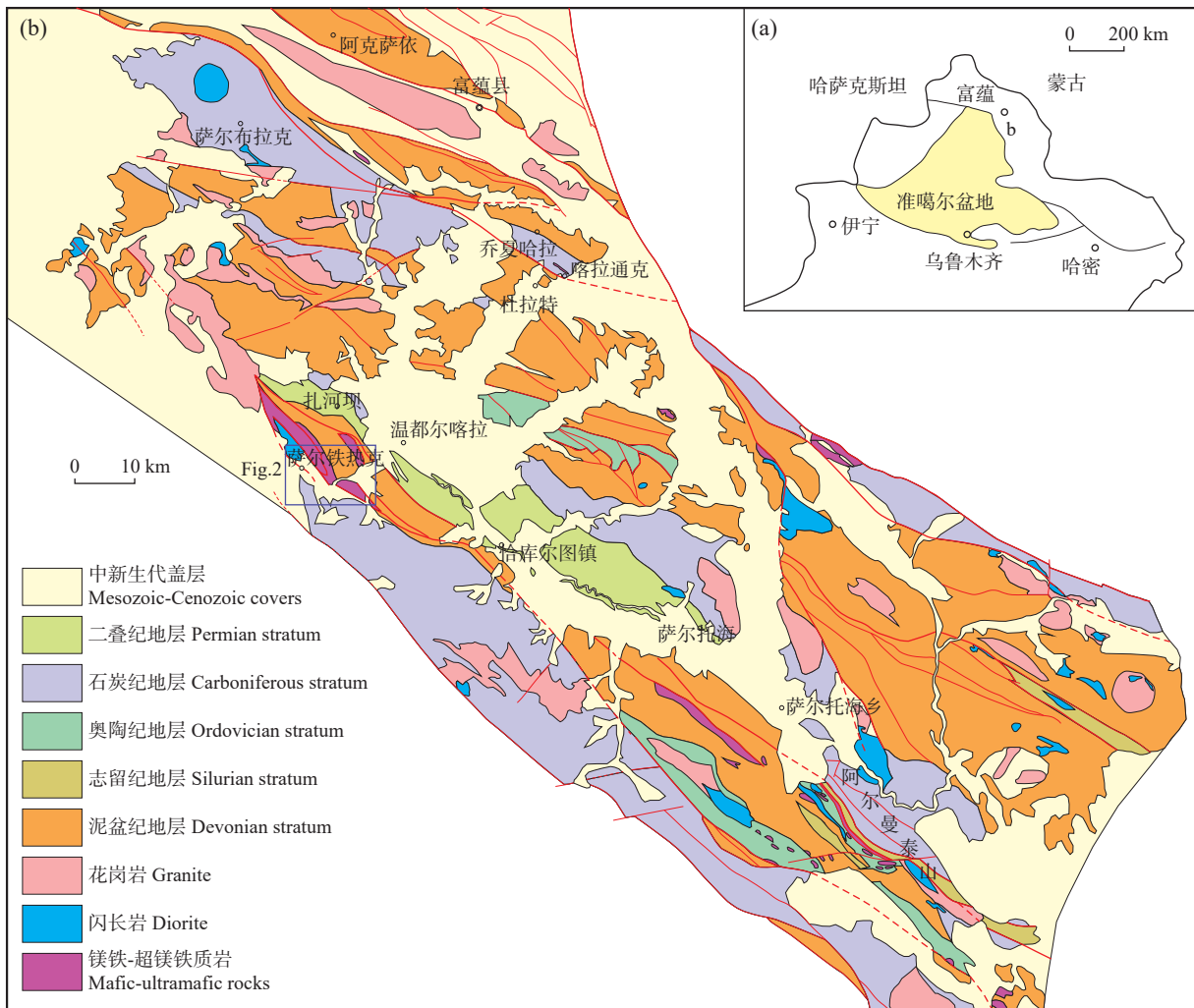


图 1 准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿区域地质简图(底图据陈隽璐等, 2021)

Fig. 1 The sketched regional geological map of Yundukala cobalt deposit in northern margin of Junggar metallogenic belt

4 km²(图 1b), 与成矿关系密切, 具有弱磁性, 目估磁铁矿含量为 1%~3%。受构造应力影响, 闪长岩多具劈理、片理, 劈理发育区岩石矿化蚀变为孔雀石化、褐铁矿化、碳酸盐化。片理发育区矿化蚀变为褐铁矿化、碳酸盐化、硅化(石英细脉)、绢云母化、星点状孔雀石化(严加永等, 2021)。脉岩较发育, 呈北西向脉状展布, 主要为碳酸岩脉、石英脉, 普遍具褐铁矿化, 是该区热液活动的标志, 对指导找矿具一定指示意义。中区出露地层为中泥盆统北塔山组, 为一套火山熔岩、火山碎屑沉积岩建造, 主要岩性为凝灰质砂岩、玄武岩。其中玄武岩为工区重要赋矿地质体。区内断裂构造活动为矿液、热液运移提供动力、部分热源, 次级构造-劈理-节理为矿液运输、存储富集提供了通道和空间, 这与地表观测到孔雀石化主要沿节理-裂隙

呈浸染状、薄膜状、斑点状分布是一致的。赋矿地质体出露岩性主要为闪长岩、橄辉岩(图 1b)。

2 矿体特征

2.1 总体特征

已有研究表明, 蕴都卡拉矿区成矿元素从西北向东南有从 Cu(Au)-Mo、Cu-Au、Cu、Cr、Ni、Co 渐变的趋势(朱伯鹏等, 2020)。矿体对应地球化学综合异常区, 整体位于闪长岩-玄武岩接触部位, 该区域热液活动强烈, 破碎蚀变发育。矿区出露地层为中泥盆统北塔山组, 岩性为玄武岩, 脉状、岩枝状闪长岩发育。勘查发现, 矿体多分布于闪长岩-玄武岩接触部位, 已圈出 I 号矿化蚀变带, 长约为 2 000 m, 宽为 200~

600 m, 带内孔雀石化、辉铜矿化、黄铜矿化、褐铁矿化、绿帘石化较发育。带内共圈出铜金矿(化)体3条(编号2、4、5)、铜金钴矿体2条(编号3、8)、金矿体1条(编号7), 单矿体长为200~1 600 m, 视厚度为4~80 m, Cu品位为0.2%~16%, Au品位为0.1~21.68 g/t, Co品位为0.01%~0.78%。走向、倾向均未控制, 进一步找矿潜力巨大(朱伯鹏等, 2020)。

I号矿化蚀变带北西向分布于研究区中部, 走向约为315°, 长约为2 000 m, 宽为200~600 m, 北西向带状展布, 出露岩性为闪长岩、玄武岩, 发育强片理、劈理化。岩石具有星点状绿帘石化蚀变, 矿化主要为黄铜矿化、辉铜矿化、辉砷钴矿化、孔雀石化、褐铁矿化。黄铜矿呈星点状、浸染状、块状, 辉铜矿呈块状、团斑状, 辉砷钴矿呈斑点状、细粒状、细脉状, 孔雀石薄膜状, 褐铁矿呈薄膜状、粉末状(朱伯鹏等, 2020)。矿化蚀变带与Ht-3、Ht-7综合异常中带对应, 已圈出1号金矿体、2号铜金矿(化)体、3号铜金钴矿体、8号铜金钴矿体、4号铜金(钴)矿(化)体及5号铜金矿化体, 矿体规模大、走向和倾向均未完全控制, 找矿潜力和增储潜力巨大。

矿体围岩主要为玄武岩、闪长岩及部分橄榄岩, 与矿体接触部位较破碎, 随着远离矿体围岩也更完整, 表现了构造控矿的主要特征。矿体围岩蚀变主要表现为硅化、绿帘石化、褐铁矿化、黄铁矿化、碳酸盐化。硅化局部发育, 石英细脉、网脉状和团块状充填于围岩裂隙中。绿帘石化一般发育, 主要分布于近矿玄武岩、闪长岩内。黄铁矿化矿区内分布较广, 黄铁矿多呈半自形-他形粒状结构, 主要见于碳酸岩、玄武岩中, 呈稀疏浸染状、条带状分布。褐铁矿化呈褐红色, 多由微细粒黄铁矿蚀变形成, 分布于岩石裂隙面, 一般近矿围岩中较为发育。

2.2 主矿体特征

3号铜金钴矿体为矿区主矿体, 主要分布于矿区中偏南部15、48勘查线间, 矿体呈层状、似层状, 具分支复合分布, 走向为302°~322°, 地表由槽探工程控制, 控制长度达到1 600 m, 视厚为2~48.65 m, 地表11线、0线、4线、24线膨大(视厚度为12~70 m), 15线、16线相对缩小(视厚度为6.4~15 m); 深部0线(ZK0004)、4线(ZK0401)、24线(ZK2401、ZK2402、ZK2403、ZK2404)、32线(ZK3201)、40(ZK4001)线膨大(视厚度为38~150 m), 11线、16线相对缩小(视厚度为13~15 m)。目前, 3号矿体地表走向及倾向均未

完全控制(图2a)。控制矿体最大斜深为800 m, 倾向为22°~42°, 倾角为65°~85°, 矿体沿走向和倾向延伸稳定(图2b)(朱伯鹏等, 2020)。3号矿体地表施工钻孔位置可见典型的孔雀石化及辉铜矿化(图2c), 就目前钻孔施工情况来看, 矿体倾向仍未完全控制。

Cu平均品位为0.4%~2.73%, Co平均品位为0.033%~0.122%, Au平均品位为0.54~3.46 g/t; 11线、4线、6线、16线、24线的矿体品位较高; 15线、0线相对较低, 但整体稳定。通过对3号矿体品位变化系数和厚度变化系数统计计算可知, 矿体品位变化系数为98%, 属较均匀矿体; 厚度变化系数为85%, 属不稳定矿体。

赋矿岩性主要为玄武岩及闪长岩。蚀变较发育, 主要为鳞片状、粒状绿帘石化、绿帘石化及细脉状、粉末状碳酸盐化较发育(朱伯鹏等, 2020)。矿化表现为斑点状、细脉状、稀疏浸染状、稠密浸染状黄铜矿、黄铁矿、辉砷钴矿(图3)。

2.3 矿石结构构造

矿石构造主要以细脉状、网脉状、浸染状、细脉-浸染状构造为主, 其次是薄膜状、团斑(块)状、稠密浸染状、块状、致密块状。细脉、网脉状、浸染状构造为黄铁-黄铜矿-(石英)、黄铁矿-辉砷钴矿-黄铁矿-(石英)呈细脉状、网脉状(脉宽为1~5 mm)、浸染状分布。稠密浸染状和块状构造在局部出现, 为黄铁矿-黄铜矿-辉砷钴矿-石英组合、黄铁矿-黄铜矿-石英组合等, 在4线3号矿体局部出现了致密块状矿石, 脉宽为0.2~100 cm(图3b)(朱伯鹏等, 2020; 张照伟等, 2022)。

矿石结构主要为结晶结构、交代结构、碎裂结构, 并以结晶结构中的他形晶粒结构、半自形粒状结构和交代结构最发育。结晶结构和半自形结构主要为黄铁矿、黄铜矿等金属矿物常呈他形粒状、半自形状产出。交代结构为晚期黄铜矿交代碎裂的黄铁矿或其他碎裂矿物。碎裂结构表现为早期矿物(黄铁矿)常呈碎斑状。

黄铜矿呈他形粒状(不规则状), 与磁铁矿、辉铜矿、黄铁矿辉砷钴矿共伴生, 大小为0.02~2.8 mm, 呈细脉状、斑状及块状, 含量不等(图4)。辉砷钴矿呈他形粒状, 结晶粒度一般, 大小为0.05~1.2 mm(图4), 呈不规则细脉状、粒状不均匀分布于黄铜矿、黄铁矿及毒砂中。在辉砷钴矿边部有微量银的碲化物分布。闪锌矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿均呈他形粒状分布于黄铁矿、黄铜矿之间, 含量极少, 大小为0.04~0.1 mm

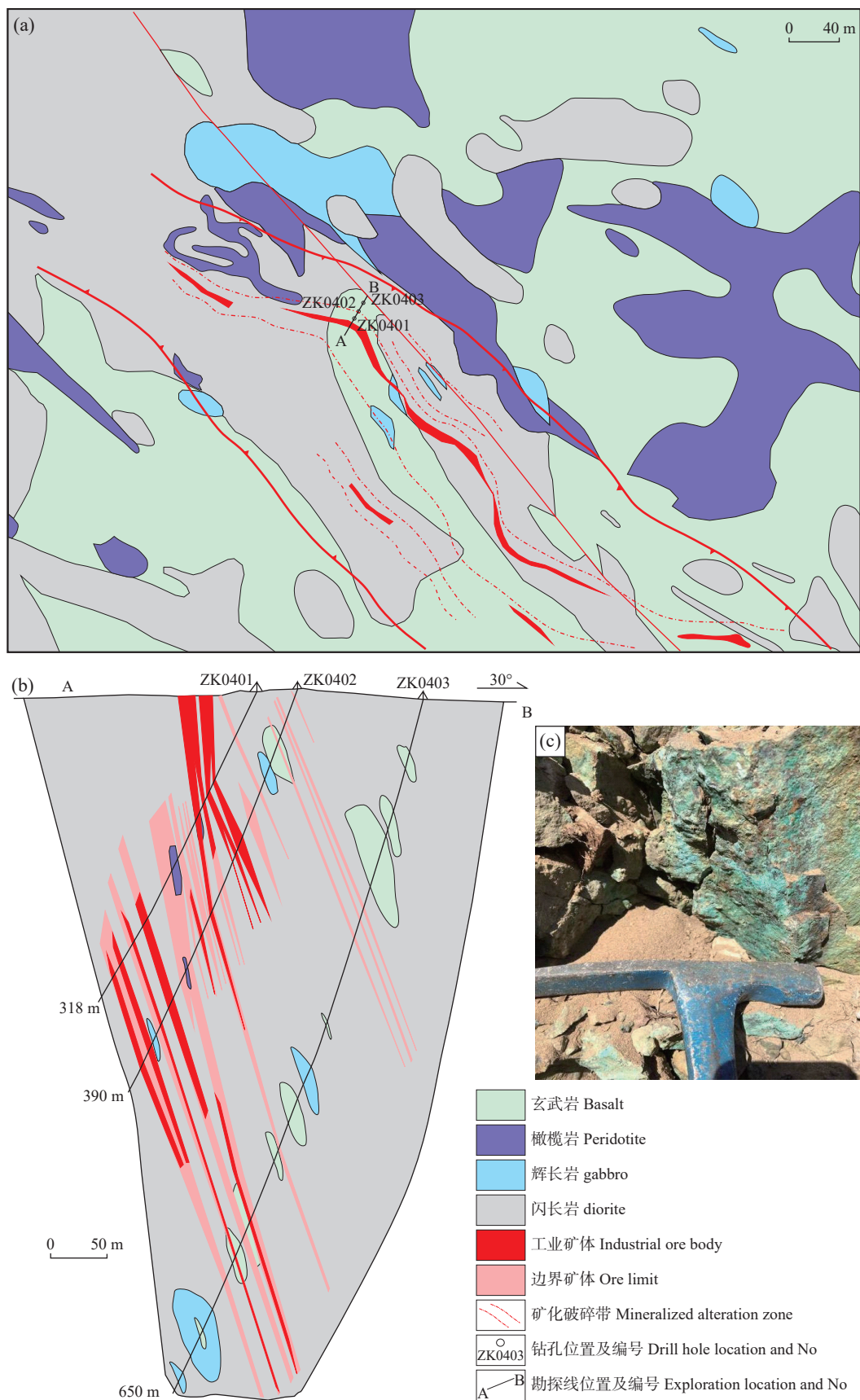
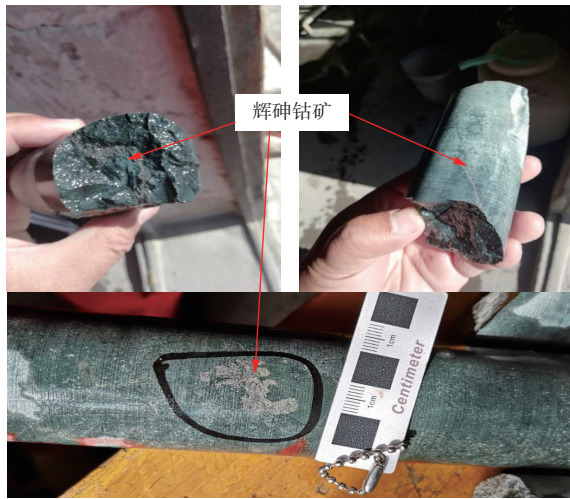


图 2 蕴都卡拉钴矿床 3 号矿体平面图(a)和剖面图(b)

Fig. 2 (a) The plane graph and (b) section graph of No.3 ore body in Yundukala cobalt deposit.



(a) 3号矿体32线细脉状、团斑状辉砷钴矿分布特征



(b) 4线3号矿体稠密浸染状、块状黄铜矿共伴生辉砷钴矿

图3 蕴都卡拉钴矿主要矿石类型

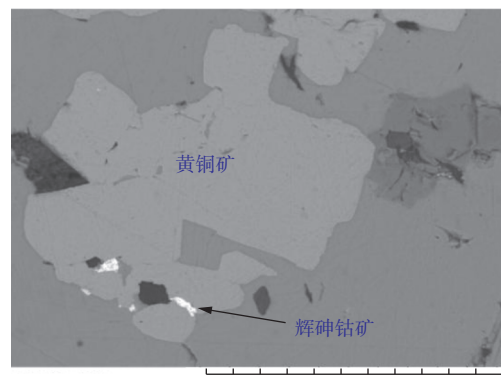
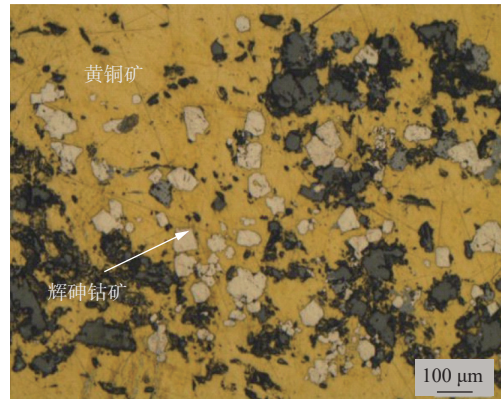
Fig. 3 Main ore types from the Yundukala cobalt deposit.

(张照伟等, 2021)。金多以自然金形态分布于黄铁矿、黄铜矿、毒砂及少量辉砷钴矿内, 少量呈银金矿形态存在。

3 成矿过程探讨

目前取得初步成果来看, 矿体主要沿破碎带呈舒缓的“S”型波状北西-南东向展布, 矿化严格受破碎带控制, 形成金矿为主共伴生铜矿的组合类型; 在矿带中部构造破碎相对较弱段, 矿化构造叠加的闪长岩-玄武岩内外接触带控制, 形成铜矿为主共伴生金钴矿的现象, 但矿化整体仍在破碎带内。

钴矿物质来源为超镁铁质和镁铁质岩浆或岩石, Co元素富集到一定经济价值便成了矿床(Zhang et al., 2014, 2018; 张照伟等, 2018; Vasyukova et al., 2022; Chen et al., 2022)。依据蕴都卡拉矿体展布特征和时空关系, 初步推断成矿时代晚于矿体围岩时代。即在中泥盆世之后, 成矿期次划分为岩浆侵位、构造热液叠加改造、后期热液脉体(破碎带内)侵位叠加富集



TM3000_2673 2019/01/03 11:49 HL ×1.0 k 100 μm

图4 蕴都卡拉矿区矿石显微特征

Fig. 4 The microscopic characteristics of ore from Yundukala cobalt deposit.

(Chen et al., 2017; Liu et al., 2018)。基性岩浆侵位造成围岩蚀变, 使泥盆系中基性火山岩(Cu、Co高背景)元素金属离子活化并部分迁移, 石炭纪构造活动热液叠加并将部分Au元素活化, 为Cu、Au、Co金属离子迁移提供动力、通道和储存空间, 后期沿次级构造侵位的热液进一步活化并萃取Cu、Au、Co金属离子最终富集成矿(图5)(Li et al., 2013, 2015; Su et al., 2020)。研究认为, 蕴都卡拉矿床类似于前人研究的相关特征, 即深部来源的基性-超基性岩浆, 在氧逸度由氧化环境向还原环境转化的过程中, 熔离出早期的硫化物, 这些硫化物富集了Co等亲硫元素(图5a)(Li et al., 2019; Qiu et al., 2021a); 随着岩浆体系中Ph值的改变, 在酸性条件下早期熔离的硫化物发生溶解, 进一步释放出Co等亲硫元素进入流体内, 该流体沿着构造裂隙充填, 形成富Co的脉状矿体(图5b)(Qiu et al., 2021b; Smith et al., 2022)。

中国Co地球化学异常主要受镁铁-超镁铁质岩控制, 形成的异常数量多、面积大, 相关Co异常面积占全国的88%(部分可能叠加了钴矿化作用)(刘东盛

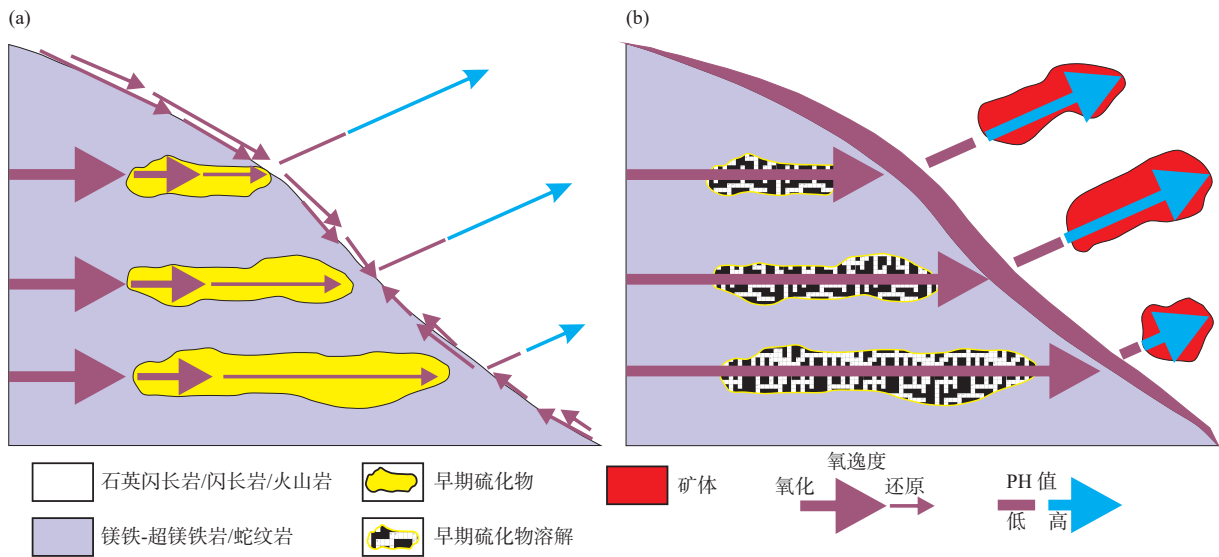


图 5 蕴都卡拉钴矿成矿过程示意图(据 Vasyukova et al., 2022 修改)

Fig. 5 The diagrammatic sketch of mineralization process in Yundukala cobalt deposit

等, 2021)。准噶尔北缘成矿带钴矿主要控矿地质作用表现在蕴都卡拉矿体产出、分布主要受构造叠加的闪长岩-玄武岩接触带控制, 处于 Co 地球化学异常区内的浓集中心, 表现了较好的对应关系, 具有与构造破碎带较为一致的舒缓“S”型带状分布特征, 矿化分布受构造破碎、构造裂隙(节理、劈理)控制, 同时构造裂隙也是含矿热液运移、储存的必要条件, 受后期热液叠加作用明显。

4 成矿前景分析

蕴都卡拉矿区位于萨吾尔-二台铜、钼、金、镍成矿带与塔尔巴哈台-阿尔曼太金、铜、铁、铬成矿带内, 构造、侵入岩发育, 在构造交汇及侵入岩发育地段具有较好的成矿条件。已圈定矿化体、矿体呈层状、似层状分布于构造破碎带叠加改造的中闪长岩接触带, 走向近东西向、北西向, 倾向主要为南西、北东, 倾角为 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$ (朱伯鹏等, 2020)。

地球化学异常是蕴都卡拉钴矿发现最有效的找矿方法。各元素高、低背景总体展布方向与区内总体构造线方向一致, 呈北西-南东向。各元素具明显的时空分布特征: Cu、Au、Ag、Pb、Zn、Mo、Cr、Ni、Co、As、Sb 元素高背景和异常主要分布森塔斯-加勒帕克断裂和乌伦古河断裂两侧, 在乌伦古河断裂南西侧(下盘)早泥盆统托让格库都克组、中泥盆统北塔山组、蕴都卡拉组出露区和断裂交汇部位 Cu、Au、As、Sb、

Cr、Ni、Co 元素异常更明显, 而 W、Sn、Bi、Mo 元素高背景主要分布于乌伦古河断裂南侧, 在森塔斯-加勒帕克断裂北东侧蕴都卡拉组与岩体接触部位 Cu、Au、As、Sb、Cr、Ni、Co 元素异常更明显。Au 元素异常在区东北部的下石炭统那林卡拉组出露区有几处呈高强度、孤岛状出现。总体而言, 区内成矿元素从西北向东南呈现 Cu(Au)-Mo、Cu-Au、Cu、Cr、Ni、Co 渐变的趋势(Zhang et al., 2017)。1:20 万化探圈出以 Au、Cu、Ni 为主的多元素综合异常, 呈不规则带状北西-南东向分布, 蕴都卡拉位于综合异常中部, 异常面积大、多浓集中心、多级分带特征明显。其中 Cu 异常高值为 65×10^{-6} ; Ni 极大值为 303×10^{-6} ; Au 极大值为 6.28×10^{-9} ; As 极大值为 158×10^{-6} ; Co 极大值为 60.5×10^{-6} 。异常区出露地层有中泥盆统北塔山组中基性火山岩, 下泥盆统托让格库都克组火山碎屑岩及二叠系、石炭系陆源碎屑沉积岩建造, 构造、热液活动强烈, 矿化蚀变较发育, 具有寻找岩浆热液型钴铜金矿床的潜力(朱伯鹏等, 2020)。

刘东盛等(2021)研究认为, 中国基准值计划获得的汇水域沉积物 Co 异常, 大多均与镁铁-超镁铁岩(主要为玄武岩、镁铁质岩体、蛇绿岩)有关, 异常数量多且面积巨大, 镁铁-超镁铁质岩是中国 Co 异常形成的最主要控制因素。在准噶尔北缘成矿带存在 Co 地球化学异常(Zhang et al., 2019), 受镁铁-超镁铁质岩出露和次生富集制约, 区内广泛出露的基性岩及玄武岩提供了赋矿空间, 显示出较好的钴矿成矿地质条件

(刘东盛等, 2020)。沿北西-南东向构造线的方向, 由蕴都卡拉向两端延伸, 钴矿化断续出露, 表现了较好的成矿条件和找矿潜力, 是进一步找矿勘查的重点方向。

5 结论

(1) 准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿发育于闪长岩与玄武岩的接触部位, 矿体呈脉状、薄层状与铜、金共生。

(2) 钴矿主要赋存于辉砷钴矿中, 深部镁铁-超镁铁质岩浆提供了钴矿的物质来源, 接触部位的构造破碎带为钴的迁移和富集创造了条件。

(3) 沿北西-南东向构造线两侧分布的闪长岩与镁铁-超镁铁质岩或基性火山岩, 均表现了较好的钴矿成矿条件, 进一步找矿潜力巨大。

致谢: 本文是在全国战略性矿产找矿行动实施方案编制过程中形成的, 得到新疆维吾尔自治区地质勘查基金项目管理中心尚海军教授级高级工程师、新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队秦纪华教授级高级工程师框架构建及研究思路的启发; 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室的技术人员共同参与编写及插图绘制; 论文评审专家及《西北地质》编辑部吕鹏瑞高级工程师给予了很好的建议和具体修改意见; 在此一致深表感谢。

参考文献(References):

陈隽璐, 白建科. 中国阿尔泰-准噶尔地质图[M]. 北京: 地质出版社, 2021.

侯增谦, 陈骏, 翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3651-3652.

HOU Zengqian, CHEN Jun, ZHAI Mingguo. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3651-3652.

李立兴, 李厚民, 丁建华, 等. 东天山维权银铜矿床中钴矿化发现及成因意义[J]. 矿床地质, 2018, 37(4): 778-796.

LI Lixing, LI Houmin, DING Jianhua, et al. The discovery of cobaltite mineralization in Weiquan Ag-Cu deposit, eastern Tianshan Mountains, and its significance[J]. Mineral Deposits, 2018, 37(4): 778-796.

李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 2018,

34(8): 2201-2210.

LI Wenyuan. The primary discussion on the relationship between Paleozoic-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2201-2210.

李文渊, 张照伟, 张江伟, 等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019, 1-324.

LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. A study on the coupling relationship between large-scale magmatism and mineralization of late Paleozoic in northern Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 2019, 1-324.

李文渊, 王亚磊, 钱兵, 等. 塔里木陆块周缘岩浆 Cu-Ni-Co 硫化物矿床形成的探讨[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 276-293.

LI Wenyuan, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Discussion on the formation of magmatic Cu-Ni-Co sulfide deposits in margin of Tarim Block[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 276-293.

刘东盛, 王学求, 周建, 等. 中国钴地球化学基准值特征及影响因素[J]. 地球学报, 2020, 41(6): 807-817.

LIU Dongsheng, WANG Xueqiu, ZHOU Jian, et al. Characteristics of China's Cobalt Geochemical Baselines and Their Influence Factors[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6): 807-817.

刘东盛, 王学求, 聂兰仕, 等. 中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测[J/OL]. 地球科学, 网络首发时间: 2021-08-30.

LIU Dongsheng, WANG Xueqiu, NIE Lanshi, et al. Geochemical abnormal characteristics, origin and prospecting prospect prediction of cobalt in China[J/OL]. Earth Science, online, 2021-08-30.

莫宣学. 岩浆作用与地球深部过程[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1487-1493.

MO Xuanxue. Magmatism and Deep Geological Process[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1487-1493.

秦克章, 赵俊兴, 范宏瑞, 等. 试论主要类型矿床的形成深度与最大延深垂幅[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 271-294.

QIN Kezhang, ZHAO Junxing, FAN Hongrui, et al. On the ore-forming depth and possible maximum vertical extension of the major type ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 271-294.

王辉, 丰成友, 张明玉. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 739-750.

WANG Hui, FENG Chengyou, ZHANG Mingyu. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 739-750.

- 王武名, 盛涛, 王丽娟, 等. 刚果(金)加丹加鲁苏西铜钴矿床 S、C、O、Sr 同位素特征及矿床成因[J]. 地学前缘, 2021, 28(6): 318–330.
- WANG Wuming, SHENG Tao, WANG Lijuan, et al. Characteristics of S, C, O and Sr isotopes and genesis of the Luiswishi Cu-Co deposit in Katanga, Democratic Republic of Congo[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(6): 318–330.
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 等. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制[J]. 科学通报, 2020, 65: 3825–3838.
- WANG Yan, ZHONG Hong, CAO Yonghua, et al. Genetic classification, distribution and ore genesis of major PGE, Co and Cr deposits in China: A critical review[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65: 3825–3838.
- 严加永, 孟贵祥, 吕庆田, 等. 综合地球物理在荒漠覆盖区隐伏矿床预测与定位中的应用: 以新疆拉克勒克铜多金属矿床为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 4117–4133.
- YAN Jiayong, MENG Guixiang, LÜ Qingtian, et al. Prediction and location of concealed deposits in desertgobi coverage areas using integrated geophysics: An example of the Layikeleke copper polymetallic deposit in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 4117–4133.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(3): 501–510.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(3): 501–510.
- 张铭杰, 班舒悦, 李思奥, 等. 新疆图拉尔根镁铁-超镁铁质杂岩体镍铜钴成矿岩浆作用过程: 流体化学与碳同位素组成制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(12): 3673–3682.
- ZHANG Mingjie, BAN Shuyue, LI Siao, et al. The magmatic process of Cu-Ni-Co sulfide ore-forming in the Tulaergen mafic-ultramafic complex, Xinjiang, northwestern China: Constrains from chemical and carbon isotopic compositions of volatiles[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(12): 3673–3682.
- 张照伟, 李文渊, 张江伟, 等. 新疆天山石炭—二叠纪大规模岩浆成矿事件与形成机制探讨[J]. 西北地质, 2014, 47(1): 36–51.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, et al. Mineralization and Formation Mechanism of Carboniferous-Permian Large-scale Magmatic Ore Deposits in Tianshan Orogenic Belt and Adjacent Area, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(1): 36–51.
- 张照伟, 王驰源, 钱兵, 等. 东昆仑志留纪辉长岩地球化学特征及与铜镍成矿关系探讨[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2262–2274.
- ZHANG Zhaowei, WANG Chiyuan, QIAN Bing, et al. The geochemistry characteristics of Silurian gabbro in eastern Kunlun orogenic belt and its mineralization relationship with magmatic Ni-Cu sulfide deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2262–2274.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 中国西北地区岩浆铜镍矿床地质特点与找矿潜力[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 82–99.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Geological characteristics and prospecting potential of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 82–99.
- 张照伟, 李文渊, 丰成友, 等. 中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 14–34.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, FENG Chengyou, et al. Study on metallogenic regularity of Co-Ni deposits in China and its efficient exploration techniques[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 14–34.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. 科学通报, 2019, 64: 2484–2500.
- ZHAO Junxing, LI Guangming, QIN Kezhang, et al. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits (in Chinese)[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64: 2484–2500.
- 朱伯鹏, 张汉清, 秦纪华, 等. 新疆准噶尔东北缘蕴都卡拉金铜钴矿床地质特征及前景分析[J]. 地质论评, 2020, 66(1): 157–168.
- ZHU Bopeng, ZHANG Hanqing, QIN Jihua, et al. Geological characteristics and prospect analysis of the Yundukala Au—Cu—Co deposit in the northeastern margin of Junggar, Xinjiang[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 157–168.
- Chen C, Yao Z S, Wang C Y. Partitioning behaviors of cobalt and manganese along diverse melting paths of peridotitic and MORB-like pyroxenitic mantle[J]. Journal of Petrology, 2022, 63(4): egac021.
- Chen R X, Li H Y, Zheng Y F, et al. Crust–Mantle Interaction in a Continental Subduction Channel: Evidence from Orogenic Peridotites in North Qaidam, Northern Tibet[J]. Journal of Petrology, 2017, 58(2): 191–226.
- Li C S, Ripley E M, Thakurta J, et al. Variations of olivine Fo-Ni contents and highly chalcophile element abundances in arc ultramafic cumulates, southern Alaska[J]. Chemical Geology, 2013, 351: 15–28.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, et al. Geochronology, petrology and Hf-

- S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China[J]. *Lithos*, 2015, 216–217: 224–240.
- Li C S, Ripley E M, Tao Y. Magmatic Ni-Cu and Pt-Pd Sulfide Deposits in China[J]. Society of Economic Geologists, Inc. SEG Special Publications, 2019, 22: 483–508.
- Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, et al. The Dynamic Sulfide Saturation Process and a Possible Slab Break-off Model for the Giant Xiarihamu Magmatic Nickel Ore Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(6): 1383–1417.
- Qiu Zhengjie, Fan Hongrui, Goldfarb R, et al. Cobalt concentration in a sulfidic sea and mobilization during orogenesis: Implications for targeting epigenetic sediment-hosted Cu-Co deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021a, 305: 1–18.
- Qiu Zhengjie, Fan Hongrui, Tomkins G A, et al. Insights into salty metamorphic fluid evolution from scapolite in the Trans-North China Orogen: Implication for ore genesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021b, 293: 256–276.
- Smith J M, Ripley E M, Li C, et al. Cu and Ni Isotope Variations of Country Rock-Hosted Massive Sulfides Located Near Midcontinent Rift Intrusions[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(1): 195–211.
- Su Benxun, Robinson Paul T, Chen Chen, et al. The occurrence, origin, and fate of water in chromitites in ophiolites[J]. *American Mineralogist*, 2020, 105: 894–903.
- Vasyukova O V, Williams-Jones A E. Constraints on the Genesis of Cobalt Deposits: Part II. Applications to Natural Systems[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(3): 529–544.
- Wang C Y, Zhang Z W, Zhang C J, et al. Constraints on sulfide saturation by crustal contamination in the Shitoukengde Cu-Ni deposit, East Kunlun orogenic belt, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Geosciences Journal*, 2021, 25(3): 401–415.
- Williams-Jones A E, Vasyukova O V. Constraints on the Genesis of Cobalt Deposits: Part I. Theoretical Considerations[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(3): 513–528.
- Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions[J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49(2): 279–292.
- Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, et al. Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, China[J]. *Miner Deposita*, 2017, 52: 51–68.
- Zhang Z W, Wang Y L, Qian B, et al. Metallogeny and tectonomagmatic setting of Ni-Cu magmatic sulfide mineralization, number 1 Shitoukengde mafic-ultramafic complex, East Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 96: 236–246.
- Zhang Z W, Wang Y L, Wang C Y, et al. Mafic-ultramafic magma activity and copper-nickel sulfide metallogeny during Paleozoic in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 2019, 2(4): 467–477.

《西北地质》关于刊期、定价变更的说明

为了更好地展现地球科学领域最新科研成果,满足学科研究成果传播时效性要求和广大学者专家学术交流需要,经本刊申请,陕西新闻出版局和中国地质调查局批复同意,《西北地质》从2023年第1期(第56卷第1期)开始,刊期由季刊变更为双月刊。

同时,本刊在综合考虑期刊运营成本以及读者经济承受能力等因素的基础上,决定适度提高期刊定价,以保持较高水准的印刷质量和编校水平。自2023年第1期开始,本刊每期定价由25.00元调整为50.00元,全年定价为300.00元。

刊期变更后,本刊将继续坚持“促进地质学科发展、加强学术交流”的办刊宗旨,将更优质的地学论文呈现给广大地质工作者,为促进地质科学的发展做出更大的贡献。