

DOI: 10.12401/j.nwg.2023121

夏日哈木岩浆硫化物矿床中钴和镍关键金属的 赋存状态及分布规律

赵达成¹, 王美乐¹, 李章志贤¹, 魏雅洁¹, 李华², 王金宏³, 张晓琪^{1,*}

(1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 青海省地质调查局, 自然资源部高原荒漠区战略性矿产勘查开发技术创新中心, 青海 西宁 810000; 3. 青海黄河矿业有限责任公司, 青海 西宁 810008)

摘要: 东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床的工业价值, 不仅取决于矿石中 Co、Ni 的含量, 还取决于钴和镍关键金属的赋存状态和分布规律。笔者利用全自动矿物分析系统钻孔样品分析, 确定 Co 和 Ni 在样品中有 2 种赋存状态: 独立钴、镍矿物和含 Co、Ni 矿物。对钴、镍金属矿物进行原位主、微量元素分析发现, Co 在钴、镍金属矿物中含量由高到低为: 辉砷钴矿 > 砷镍矿、方硫铁镍矿、镍黄铁矿 > 红砷镍矿、磁铁矿 > 磁黄铁矿、黄铜矿; Ni 在钴、镍金属矿物中含量由高到低为: 砷镍矿、红砷镍矿 > 硫砷镍矿、方硫铁镍矿、镍黄铁矿 > 辉砷钴矿 > 磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿。选择钻孔中体积分数占比最高的磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿, 进行原位核-边微量元素及面扫描分析发现, Co、Ni 在镍黄铁矿和黄铜矿单颗粒尺度上是均一分布的, 两种矿物的 Co/Ni 值变化不大, 表明矿物没有受到热液作用影响。然而, Ni 在磁黄铁矿中分布不均一, 并且矿物的 Co/Ni 值变化较大, 表明磁黄铁矿对热液作用更为敏感。矿物原位主、微量元素分析结果显示, 镍黄铁矿中的 Co、Ni 含量与镍、钴独立矿物接近, 远超岩体中其他含钴、镍金属硫化物。因此, 含 Ni 黄铁矿的矿石应作为选冶重点关注对象。

关键词: 赋存状态; Co-Ni; 夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床; 东昆仑造山带

中图分类号: P575.1; P618.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0017-24

The Occurrence and Distribution of Cobalt and Nickel Key Metals in the Xiarihamu Magmatic Sulfide Deposit

ZHAO Dacheng¹, WANG Meile¹, LI Zhangzhixian¹, WEI Yajie¹, LI Hua², WANG Jinhong³, ZHANG Xiaoqi^{1,*}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Qinghai Provincial Survey Bureau, MNR Technology Innovation Center for Exploration and Exploitation of Strategic Mineral Resources in Plateau Desert Region, Xining 810000, Qinghai, China; 3. Qinghai Yellow River Mining Co., Ltd., Xining 810008, Qinghai, China)

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-07-20; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 国家自然科学基金项目“中国西部典型岩浆铂族元素和钴金属超常富集成矿动力学”(91962212), 西北大学 2023 年度大学生创新创业训练计划项目“东昆仑造山带夏日哈木 Ni-Co-(PGE)金属分布和赋存状态”(S202210697247), 西北大学地质学系国家基础科学人才培养基金“青海夏日哈木 Ni-Co-PGE 岩浆矿床关键金属分布和赋存状态研究”(XDCX2021-03), 陕西省教育厅项目“北秦岭松树沟铬铁矿矿床成矿机制研究”(15JK1760)联合资助成果。

作者简介: 赵达成(1998-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: zhaodacheng1998@163.com。

* **通讯作者:** 张晓琪(1984-), 女, 讲师, 从事幔源岩浆起源演化及成矿作用方面的研究。E-mail: zxq@nwu.edu.cn。

Abstract: The industrial value of the Xiarihamu giant Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, is not only depends on the content of Co and Ni elements in the minerals, but also on the occurrence state and spatial distribution pattern of Co and Ni elements. In this study, Borehole samples were analyzed by TESCAN Integrated Mineral Analyzer. It was determined that Co and Ni elements occur as isolated minerals and sulfur-arsenic mineral compositions. In-situ analysis of major and trace element analysis of the metal minerals in the Xiarihamu Ni-Co deposit have been carried out. The contents of Co in the minerals from high to low are as follows: cobaltine > maucherite, bravoite, pentlandite > niccolite, magnetite > pyrrhotite, chalcopyrite; the contents of Ni in the minerals from high to low are as follows: maucherite, niccolite > bismuthite, bravoite, pentlandite > cobaltine > magnetite, pyrrhotite and chalcopyrite. Pyrrhotite, pentlandite and chalcopyrite were chosen for LA-ICP-MS trace elements and elements mapping analysis, the Co and Ni were uniform in pentlandite and chalcopyrite in the single particle mineral scales, and there are no obvious changes observed in Co/Ni ratios, these indicating that hydrothermal process did not affect the Co and Ni contents of pentlandites and chalcopyrites. However, Ni is heterogeneous in pyrrhotite, and the Co/Ni ratios varies from 0.01 to 0.63, indicating that the pyrrhotite is more sensitive to hydrothermal processes. In situ major and trace element analysis show that the contents of Co and Ni in pentlandite are close to that of isolated Co-Ni minerals, and far exceeds that of pyrrhotites and chalcopyrites. Therefore, the ore containing pentlandite has the most potential for Co and Ni resource exploration.

Keywords: occurrence state; cobalt and nickel; Xiarihamu Ni-Co magmatic sulfide deposit; East Kunlun orogenic belt

镍、钴关键金属矿床成因多样, 产出形式复杂。张洪瑞等(2020)根据元素富集方式和成矿过程将全球镍钴矿床划分出4种主要的矿床类型: 沉积-变沉积型镍钴矿床、岩浆型镍钴矿床、风化红土型镍钴矿床和热液型镍钴矿床(王亚磊等, 2023)。其中, 红土型镍钴矿床是全球镍的主要来源, 提供了占全球60%的镍资源(USGS, 2019)。沉积-变沉积型镍钴矿床是全球钴的主要来源, 提供了占全球50%的钴资源(张连昌等, 2023)。岩浆型镍钴矿床的镍、钴储量介于红土型和沉积型镍钴矿床之间, 镍资源量为40%, 钴资源量为15%(张照伟等, 2022)。然而, 由于岩浆型镍钴矿床开采冶炼技术成熟, 综合利用价值高, 该类矿床是中国Ni、Co的重要来源(王焰等, 2020; 苏本勋等, 2023)。

东昆仑造山带是中国镍钴矿床主要成矿带。这里不仅发育有多个与沉积作用有关的钴矿床, 如肯德可克和督冷沟等钴多金属矿床(潘彤等, 2001, 2006); 还发育有若干岩浆型镍钴硫化物矿床, 如夏日哈木、石头坑德、浪木日等(王冠等, 2014; 姜常义等, 2015; 杜玮, 2018; Zhang et al., 2023)。夏日哈木镍钴矿床是东昆仑造山带中最大的岩浆镍钴硫化物矿床, 已探明镍金属储量为118万t, 品位为0.23%~3.48%, 平均

品位为0.68%; 钴金属储量为4.29万t, 品位为0.012%~0.079%, 平均品位为0.028%; 铜金属储量为23.83万t, 平均品位为0.166%(包亚文等, 2023; 李华等, 2023)。前人对夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床的成矿时代、岩浆起源、地质背景、成矿机制进行了大量研究(Li et al., 2015; 姜常义等, 2015; Song et al., 2016; Zhang et al., 2016; Peng et al., 2016; 张志炳等, 2016; 张照伟等, 2017; 汤庆艳等, 2017; 杜玮, 2018; Liu et al., 2018; 段雪鹏等, 2019; Song et al., 2020; Li et al., 2020; 刘超等, 2020; Han et al., 2020; Chen et al., 2021; 包亚文等, 2023; 李华等, 2023), 但缺乏对Ni、Co赋存状态和空间分布的系统研究。

岩浆矿床中Ni、Co的赋存状态和分布特征是研究Ni、Co富集机理的基础, 并有可能为提高镍钴关键金属开采和选冶提供重要理论基础。因此, 笔者利用TIMA、电子探针和激光探针等方法, 对青海夏日哈木镍钴矿床中的金属矿物(磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、方硫铁镍矿、砷镍矿、硫铋镍矿、硫铁镍矿、红砷镍矿和辉砷钴矿)进行系统的主、微量元素分析以及元素面扫描, 旨在查明钴和镍关键金属的赋存状态和分布规律, 为优化钴镍资源选矿和冶炼方案提供参考。

1 区域地质特征

东昆仑造山带位于青藏高原东北部,北邻柴达木盆地,南接松潘甘孜地块,西部以阿尔金断裂为界与

西昆仑造山带相连,东部以温泉断裂与北秦岭造山带相接(殷鸿福等, 1997)。区内发育4条近东西向的区域性大断裂,由北向南分别为昆北断裂带、黑山-那陵格勒断裂、昆中断裂带和昆南断裂带。夏日哈木镍钴硫化物矿床位于昆中断裂带(图1a)。

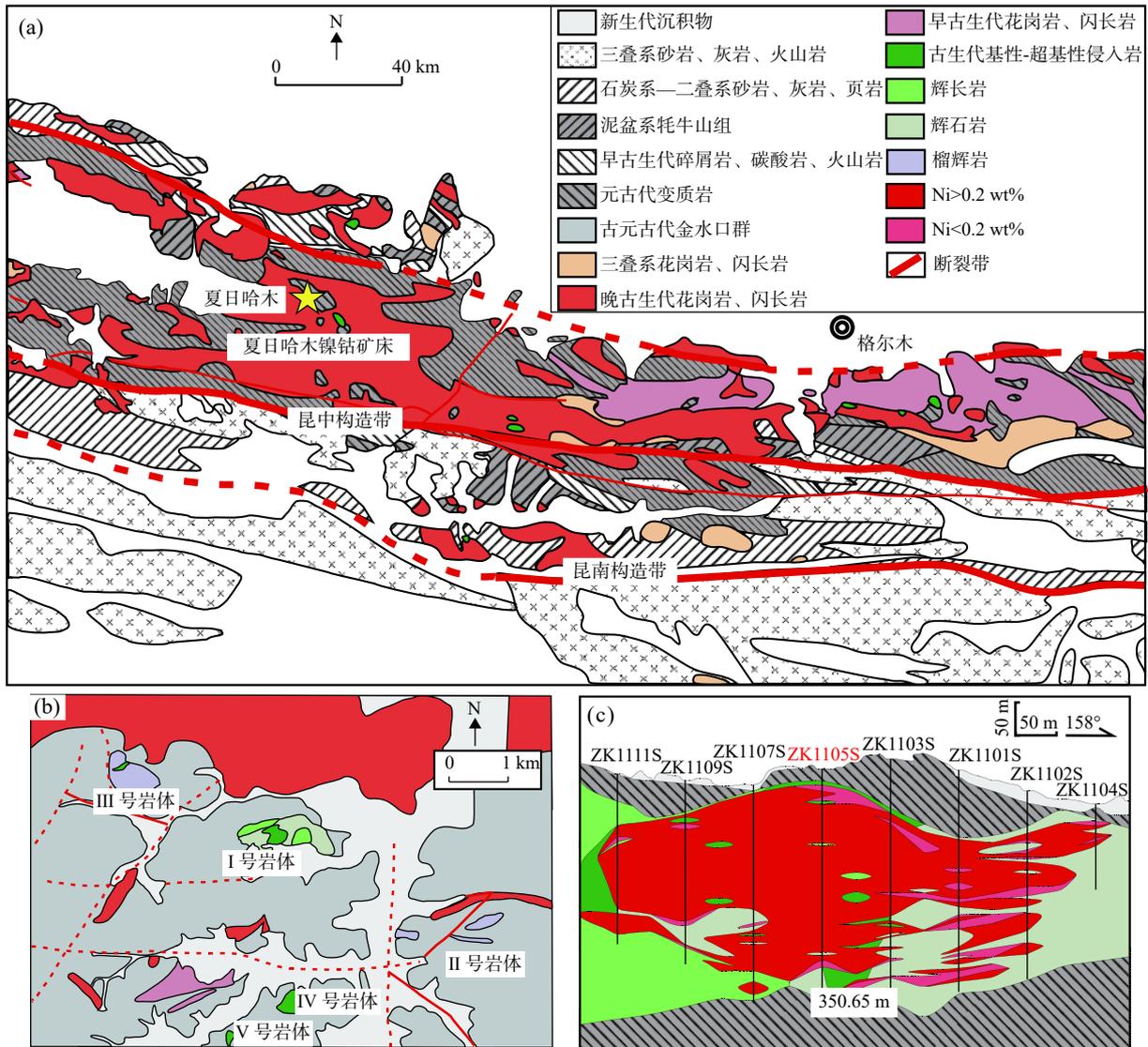


图1 东昆仑造山带地质简图(a)(据 Song et al., 2016 修改)、夏日哈木镍钴矿床地质图(b)(据张照伟等, 2015 修改)和夏日哈木 I 号岩体 11 号勘探线剖面图(c)(据王治安等, 2014 修改)

Fig. 1 (a) Geological sketch of East Kunlun orogenic belt, (b) geological map of Xiarhamu Ni-Co deposit and (c) section of exploration line 11 of Xiarhamu I mafic-ultramafic complex

昆中带出露的岩石地层主要有古元古界金水口岩群白沙河岩组,中奥陶世—志留纪滩间山群,晚泥盆世牦牛山组,早石炭世石拐子组、大干沟组,晚三叠世鄂拉山组及广泛发育的第四纪地层。因受到晚古生代至早中生代古特提斯洋演化影响,在夏日哈木、石头坑德、浪木日等地发育了大量含镍钴硫化物的镁

铁-超镁铁质侵入岩(Li et al., 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018; Zhang et al., 2023)。

2 矿床地质特征

夏日哈木矿区内出露5个镁铁-超镁铁质侵入体

(图 1b), 岩体呈北西向带状展布, 呈岩盆状或岩墙状侵位于古元古界金水口群片麻岩、斜长角闪岩和大理岩中。I 号岩体和 II 号岩体是夏日哈木镍钴硫化物矿床的主要赋矿岩体。I 号岩体出露面积约 0.70 km², 呈长条状近东西向展布, 由橄榄岩、辉石岩、辉长岩组成。II 号岩体在地表有两个露头, 出露面积分别为 0.10 km² 和 0.15 km², 主要的岩石类型包括辉长岩, 含有少量辉石岩。III、IV、V 号岩体均为镁质橄榄岩, 主要由蛇纹岩、糜棱岩化辉长岩、榴闪岩和榴辉岩组成(杜玮, 2015; 王小东等, 2018; 张照伟等, 2019; 刘超等, 2020)。

根据岩石穿切关系和锆石年代学分析, 前人在夏日哈木 I 号岩体中识别出 4 期岩浆活动(Liu et al., 2018), 分别是 430 Ma 左右侵位的早期辉长岩(Li et al., 2015); 410 Ma 左右侵位的中期纯橄岩、方辉橄岩

和单辉橄岩(Li et al., 2015); 410 Ma 左右侵位的中后期二辉岩(Li et al., 2015)和 405 Ma 左右侵位的辉长岩(Liu et al., 2018)。其中, 镍钴硫化物矿床主要赋存于中期和中后期岩相中。

夏日哈木 I 号岩体镍钴硫化物矿体多以似层状和不规则状产出于岩体的中上部(图 1b)。矿体产状与岩体基本一致, 呈 NEE 向展布, 走向约为 70°, 倾角为 0~35°。深部沿走向具有向南西侧伏的趋势, 侧伏角约为 20°(王冠, 2014)。矿石矿物主要有磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿, 此外还有少量的方硫铁镍矿、砷镍矿、硫铋镍矿、硫铁镍矿、红砷镍矿和辉砷钴矿等(表 1)。脉石矿物主要为橄榄石、阳起石, 少量钙闪石、黑云母和斜长石。矿石结构主要有自形一半自形粒状结构, 包含结构。矿石构造主要有浸染状、海绵陨铁结状, 团块状, 局部可见致密块状。

表 1 夏日哈木镍钴硫化物矿床中含钴、镍金属矿物特征统计表

Tab. 1 Characteristics of Co and Ni metal minerals in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

| 赋矿矿石 | 化学式 | 矿石产状 | 反射色 | 共生矿物 | 赋存状态 | 粒径 | 体积分数 |
|-------|--|-----------|----------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------|
| 镍黄铁矿 | (Fe,Ni) ₉ S ₈ | 浸染状、海绵陨铁状 | 淡黄色 | 磁黄铁矿、黄铜矿 | 独立粒状; 被磁黄铁矿包裹或他形粒状充填于硅酸盐矿物空隙中 | 0.01~5.96 mm | 0.03%~3.84% |
| 磁黄铁矿 | Fe _{1-x} S | 浸染状、海绵陨铁状 | 乳黄色略带粉褐色 | 镍黄铁矿、黄铜矿 | 一般呈浑圆状, 熔滴状和他形粒状充填于硅酸盐矿物的空隙中 | 0.01~4.17 mm | 0.14%~4.83% |
| 黄铜矿 | CuFeS | 浸染状、海绵陨铁状 | 铜黄色 | 镍黄铁矿、磁黄铁矿 | 分布在金属硫化物边缘, 或以包裹体的形式出现在金属矿物中 | 0.01~1.46 mm | 0.01%~0.63% |
| 磁铁矿 | Fe ₃ O ₄ | 浸染状 | 铜黄色 | - | 沿着金属硫化物边缘分布 | 0.01~1.76 mm | 0.01%~5.07% |
| 方硫铁镍矿 | FeNiS ₂ | 浸染状、星点状 | - | 镍黄铁矿 | 不规则粒状或被镍黄铁矿包裹 | 3.84~12.89 μm | 0.01%~0.28% |
| 砷镍矿 | Ni ₁₁ As ₈ | 浸染状 | - | 磁黄铁矿、镍黄铁矿、磁铁矿 | 被磁黄铁矿、镍黄铁矿和磁铁矿包裹 | 5.18~20.42 μm | <0.01% |
| 辉砷钴矿 | CoAsS | 浸染状 | - | 磁黄铁矿、镍黄铁矿 | 不规则粒状镶嵌在磁黄铁矿、镍黄铁矿的边缘 | 3.35~11.40 μm | <0.01% |
| 硫铋镍矿 | Ni ₃ Bi ₂ S ₂ | 浸染状 | - | 磁黄铁矿、镍黄铁矿 | 主要呈不规则粒状镶嵌在磁黄铁矿、镍黄铁矿的边缘 | 4.04~20.42 μm | <0.01% |
| 红砷镍矿 | NiAs | 浸染状 | - | 磁黄铁矿 | 独立矿物或与磁黄铁矿共生 | 3.82~5.10 μm | 0.01%~0.28% |

3 样品特征与分析方法

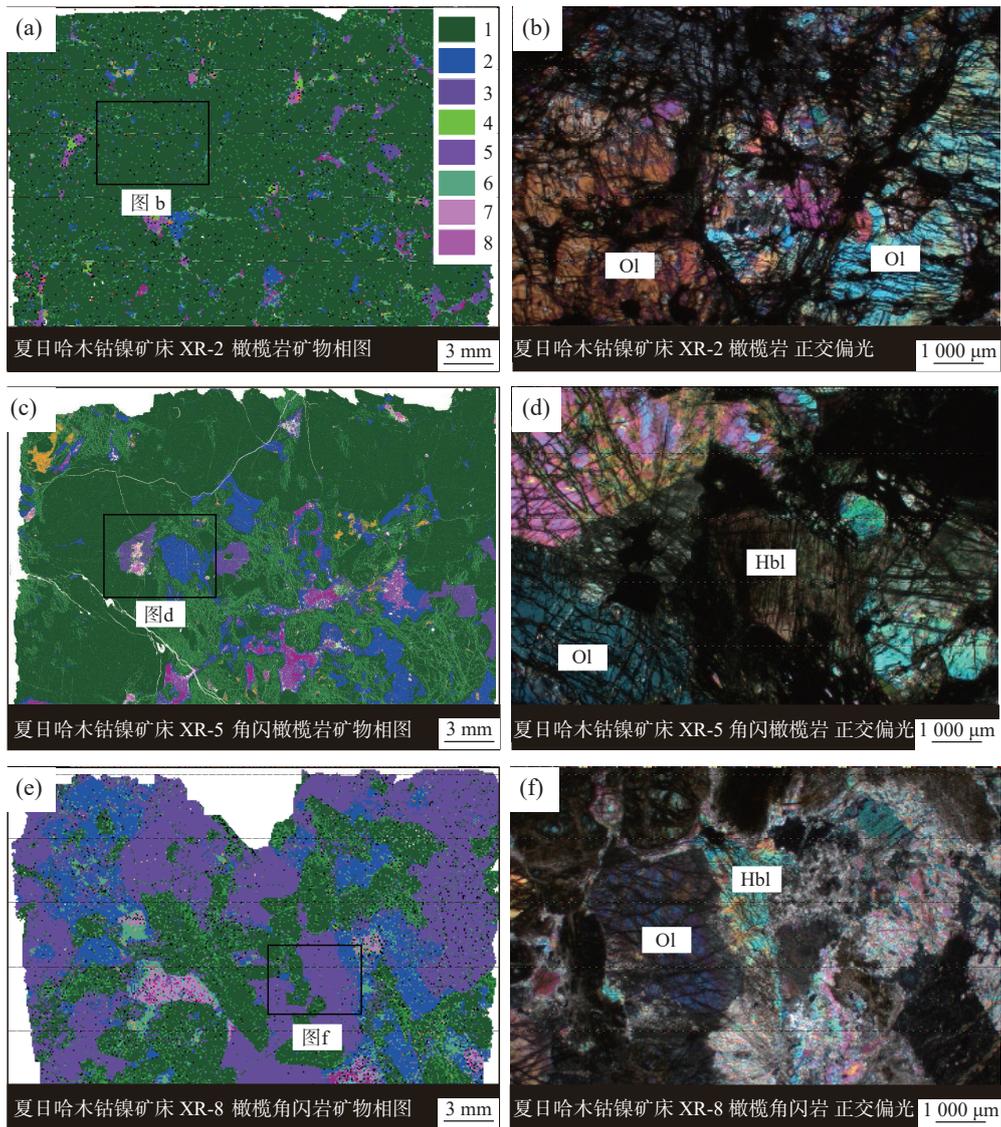
3.1 样品特征

本研究样品采集于夏日哈木 I 号岩体 11 号勘探线 1105s 钻孔(图 1c), 样品岩石类型包括: 橄榄岩、角闪橄岩和橄角闪岩。岩相学特征与矿相学特征如下:

橄榄岩(图 2a、图 2b)主要呈半自形粒状结构、包含结构和星稀浸染状结构。主要由橄榄石

(84%~94%), 少量的蚀变矿物(钙闪石、阳起石、绿泥石和高岭石)以及金属矿物(磁黄铁矿、镍黄铁矿、磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、钛铁矿和方硫铁镍矿)(0.5%~9.9%)组成, 随着钻孔深度增加, 橄岩中蚀变矿物的含量不断增加, 金属矿物含量则不断减少, 岩体在钻孔中的厚度约为 107.5 m(图 3)。

角闪橄岩(图 2c、图 2d)主要呈半自形粒状结构、粒状镶嵌结构、包含结构和星稀浸染状结构。由橄榄石(82%~93%)、角闪石(5.2%~17.2%)和金属矿物(0.3%~7.4%)组成。蚀变矿物含量自下而上不断



a、b. 橄榄岩；c、d. 角闪橄榄岩；e、f. 橄榄角闪岩；Ol. 橄榄石；Hbl. 角闪石

图 2 夏日哈木镍钴矿床 1105s 钻孔不同岩石类型镜下照片

Fig. 2 Electron microscope photos of different rock types of the 1105s borehole in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

增加。岩体在钻孔中的厚度约为 66.5 m(图 3)。

橄榄角闪岩(图 2e、图 2f)主要呈半自形细粒结构。由橄榄石(36%), 阳起石(40%), 钙闪石(14%), 以及少量蚀变矿物(云母、绿泥石以及高岭石)和金属矿物组成, 橄榄角闪岩在钻孔中厚度最小, 约为 6 m(图 3)。

3.2 分析方法

薄片样品的综合矿物分析测试是在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用配备有 4 个能谱探头(EDAX Element 30)的 TESCAN MIRA-3 扫描电镜完成。仪器工作条件: 加速电压为 25 kV, 电流为 9 nA,

工作距离(WD)为 15 mm, 电子束强度(BI)和 BSE 信号强度使用 Pt 法拉第杯自动程序进行校准, 电子束强度(BI)一般为 18~20, 而 EDS 信号则是使用 Mn 标样进行校准。采用点阵扫描的数据采集模式, 对所有类型矿石样品进行解离分析(Liberation Analysis mode), 以快速得到矿物类别、矿物丰度、矿物共生关系、元素赋存状态等方面信息。

金属矿物的原位主量成分分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室和西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室利用型号为的 JEOL JXA-8230 电子探针共同完成。西北大学大

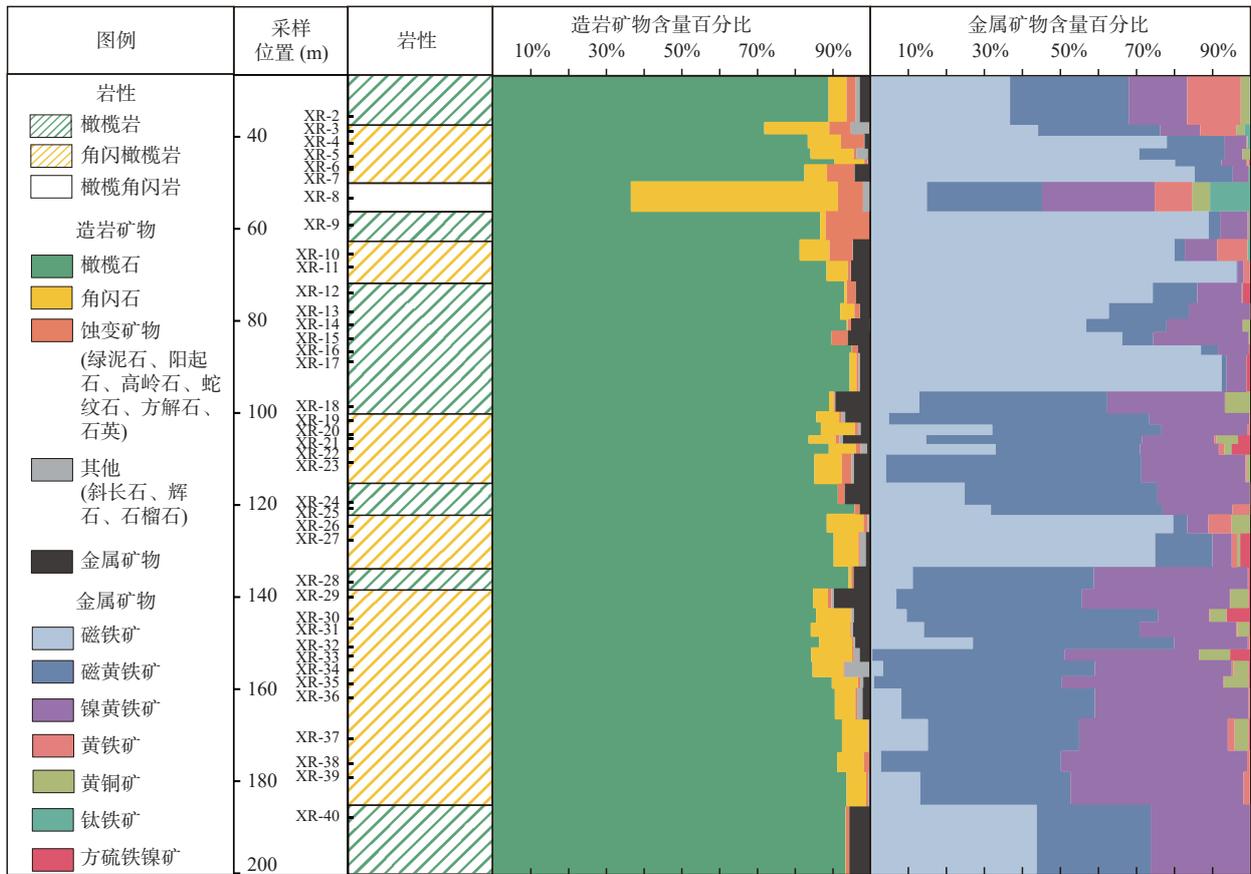


图3 夏日哈木1号岩体1105s钻孔岩性、造岩矿物含量百分比和金属矿物含量百分比随深度变化图

Fig. 3 Stratigraphic column of the 1105s Borehole in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit, showing the rock types and proportions of minerals.

陆动力学国家重点实验室仪器工作条件为:加速电压为15 kV,加速电流为100 nA,束斑直径为2 μm 。西安地质调查中心自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室进行磁铁矿分析的仪器工作条件为:加速电压为15 kV,加速电流为100 nA,束斑直径为1 μm ;所有测试数据均进行了ZAF校正处理,检测精度优于0.1%。

金属矿物原位微量元素地球化学分析和微量元素面扫描分析在合肥工业大学资源与环境工程学院成矿成因与勘查技术研究中心矿物微区分析实验室利用LA-ICP-MS完成。ICP-MS型号为美国安捷伦公司生产的Agilent 7900四极杆质谱,激光剥蚀系统为Photon Machines Analyte HE。原位激光剥蚀点分析采用激光束斑直径为40 μm ,剥蚀频率为5 Hz,激光能量为4~5 J/cm^2 ,分辨分析数据包括空白信号20 s和样品信号40 s。检出限为 1×10^{-6} ,对数据离线处理采用ICPMSDataCal软件。激光面扫描的剥蚀束斑为15~40 μm ,每条线平行且与激光剥蚀束斑大小一致,

剥蚀频率为10 Hz,激光能量为2~3 J/cm^2 。标样选择多外标玻璃,包括SRM610、SRM612、BCR-2G和MASS-1。待测样品分析前和结束后采集约20秒的背景信号,分析待测样品前和结束时对外标样进行约40秒的点剥蚀,激光参数与待测样品一致,绝大多数元素的分析精度优于10%。数据分析与成图利用软件LIMS进行(Xiao et al., 2018),详细的仪器操作流程和数据处理方法参考汪方跃等(2017)和李艳广等(2023)。

4 分析结果

4.1 TIMA 分析结果

TIMA 分析结果见表1。样品中矿物体积分数结果见表2。夏日哈木镍钴硫化物矿床中主要钴、镍金属矿物为砷镍矿、辉砷钴矿、硫铋镍矿、方硫铁镍矿、红砷镍矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和磁铁矿;主要铅锌矿物为闪锌矿和方铅矿;其他金属矿物有黄铁

表2 夏日哈木镍钴矿床 1105s 钻孔岩石矿物含量体积百分比表

Tab. 2 Volume percentage of rock mineral content of 1105s borehole in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

| 岩石类型 | 深度(m) | 样品号 | 橄榄石 (%) | 角闪石 (%) | 金属矿物 | | | | | | | 其他(%) |
|-------|--------|--------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-------|
| | | | | | 磁黄铁 矿(%) | 镍黄铁 矿(%) | 黄铁矿 (%) | 黄铜矿 (%) | 磁铁矿 (%) | 钛铁矿 (%) | 方硫铁镍 矿(%) | |
| 纯橄岩 | 35.65 | XR-2J | 88.76 | 4.71 | 0.93 | 0.46 | 0.34 | 0.07 | 1.09 | 0.00 | - | 1.50 |
| 角闪橄橄岩 | 39 | XR-3J | 71.72 | 17.20 | 0.14 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.19 | 0.00 | - | 0.23 |
| 角闪橄橄岩 | 44.35 | XR-4J | 83.08 | 8.76 | 0.26 | 0.10 | 0.00 | 0.01 | 1.34 | 0.00 | - | 1.35 |
| 角闪橄橄岩 | 41.45 | XR-5J | 83.94 | 11.39 | 0.19 | 0.04 | 0.00 | 0.02 | 0.60 | 0.00 | - | 0.61 |
| 角闪橄橄岩 | 47.05 | XR-6J | 90.23 | 7.97 | 0.09 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.00 | 0.00 | 0.61 |
| 角闪橄橄岩 | 46.65 | XR-7J | 82.13 | 5.96 | 0.43 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 3.66 | 0.00 | - | 3.66 |
| 橄橄角闪岩 | 53.35 | XR-8J | 36.43 | 54.79 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | - | 0.03 |
| 纯橄岩 | 59.35 | XR-9J | 84.82 | 1.43 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.45 | 0.00 | - | 0.45 |
| 角闪橄橄岩 | 68.45 | XR-10J | 81.04 | 7.95 | 0.13 | 0.41 | 0.02 | 0.01 | 3.85 | 0.00 | - | 3.88 |
| 角闪橄橄岩 | 65.65 | XR-11J | 88.19 | 5.67 | 0.02 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 5.07 | 0.00 | - | 5.07 |
| 纯橄岩 | 74 | XR-12J | 92.76 | 0.69 | 0.47 | 0.46 | 0.00 | 0.00 | 2.97 | 0.08 | 0.08 | 3.13 |
| 纯橄岩 | 81 | XR-13J | 91.80 | 3.75 | 0.61 | 0.47 | 0.00 | 0.00 | 1.81 | 0.00 | - | 1.81 |
| 纯橄岩 | 78 | XR-14J | 93.54 | 0.25 | 1.03 | 0.97 | 0.00 | 0.10 | 2.75 | 0.00 | - | 2.85 |
| 纯橄岩 | 84 | XR-15J | 89.41 | 0.00 | 0.51 | 1.54 | 0.00 | 0.02 | 4.07 | 0.00 | - | 4.10 |
| 纯橄岩 | 89 | XR-16J | 94.68 | 0.07 | 0.15 | 0.28 | 0.00 | 0.00 | 3.00 | 0.01 | 0.01 | 3.02 |
| 纯橄岩 | 86.65 | XR-17J | 94.33 | 1.80 | 0.03 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 2.71 | 0.03 | 0.03 | 2.76 |
| 纯橄岩 | 98.65 | XR-18J | 88.73 | 1.21 | 4.66 | 2.91 | 0.00 | 0.63 | 1.19 | 0.00 | - | 1.82 |
| 角闪橄橄岩 | 101.65 | XR-19J | 85.50 | 6.01 | 4.69 | 1.80 | 0.00 | 0.00 | 0.32 | 0.00 | - | 0.32 |
| 角闪橄橄岩 | 104.65 | XR-20J | 86.66 | 9.05 | 1.22 | 0.62 | 0.00 | 0.00 | 0.87 | 0.00 | - | 0.87 |
| 角闪橄橄岩 | 105.65 | XR-21J | 83.36 | 7.15 | 4.20 | 1.41 | 0.00 | 0.42 | 1.07 | 0.23 | 0.23 | 1.96 |
| 角闪橄橄岩 | 110.65 | XR-22J | 88.79 | 7.09 | 0.40 | 0.22 | 0.00 | 0.02 | 0.35 | 0.05 | 0.05 | 0.47 |
| 角闪橄橄岩 | 107.65 | XR-23J | 84.95 | 7.27 | 3.05 | 1.24 | 0.00 | 0.04 | 0.18 | 0.00 | - | 0.22 |
| 纯橄岩 | 119.5 | XR-24J | 91.09 | 0.00 | 3.51 | 1.69 | 0.00 | 0.00 | 1.70 | 0.00 | - | 1.70 |
| 纯橄岩 | 120.65 | XR-25J | 95.60 | 0.11 | 1.35 | 0.55 | 0.00 | 0.00 | 0.94 | 0.00 | - | 0.94 |
| 角闪橄橄岩 | 124.65 | XR-26J | 88.25 | 9.74 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.26 | 0.00 | - | 0.28 |
| 角闪橄橄岩 | 127.65 | XR27J | 90.11 | 6.56 | 0.21 | 0.07 | 0.00 | 0.01 | 1.04 | 0.04 | 0.04 | 1.13 |
| 纯橄岩 | 136.65 | XR-28J | 94.05 | 0.71 | 2.19 | 1.86 | 0.00 | 0.01 | 0.50 | 0.02 | 0.02 | 0.55 |
| 纯橄岩 | 140 | XR-29J | 84.63 | 3.94 | 4.83 | 3.84 | 0.00 | 0.48 | 0.65 | 0.04 | 0.04 | 1.21 |
| 角闪橄橄岩 | 144.65 | XR-30J | 85.41 | 9.20 | 3.00 | 0.61 | 0.00 | 0.20 | 0.42 | 0.28 | 0.28 | 1.18 |
| 角闪橄橄岩 | 146.65 | XR-31J | 84.04 | 10.50 | 2.68 | 1.20 | 0.00 | 0.15 | 0.66 | 0.01 | 0.01 | 0.83 |
| 角闪橄橄岩 | 150.65 | XR-32J | 86.24 | 8.75 | 2.21 | 0.81 | 0.00 | 0.00 | 1.12 | 0.00 | - | 1.12 |
| 角闪橄橄岩 | 155.65 | XR-33J | 84.20 | 10.79 | 1.50 | 1.05 | 0.00 | 0.24 | 0.01 | 0.15 | 0.15 | 0.56 |
| 角闪橄橄岩 | 152.65 | XR-34J | 84.40 | 8.21 | 0.29 | 0.19 | 0.00 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.04 |
| 角闪橄橄岩 | 158.65 | XR-35J | 89.60 | 6.93 | 1.02 | 0.87 | 0.00 | 0.13 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.16 |
| 角闪橄橄岩 | 161.65 | XR-36J | 90.33 | 5.39 | 1.15 | 0.91 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.00 | - | 0.18 |
| 角闪橄橄岩 | 170.65 | XR-37J | 92.31 | 6.86 | 0.15 | 0.15 | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.07 |
| 角闪橄橄岩 | 176 | XR-38J | 91.02 | 7.04 | 0.17 | 0.17 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | - | 0.01 |
| 角闪橄橄岩 | 179 | XR-39J | 93.50 | 5.17 | 0.14 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | - | 0.05 |
| 纯橄岩 | 187.65 | XR-40J | 93.20 | 0.13 | 1.73 | 1.51 | 0.00 | 0.00 | 2.52 | 0.00 | - | 2.52 |

矿、斑铜矿、钛铁矿和蓝铜矿。

4.2 金属矿物电子探针分析结果

对表1中辉钴矿、方硫铁镍矿、砷镍矿、红砷镍矿、硫铋镍矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿进行电子探针元素分析,结果见图4和表3。磁黄铁矿中Co含量为BDL~0.18%,Ni含量为BDL~0.16%。镍黄铁矿中Ni含量为4.01%~32.8%,Co含量为0.26%~1.13%。黄铜矿中Co含量为BDL~0.10%,Ni含量为BDL~0.08%。磁铁矿的Co含量为0.12%~0.26%,Ni含量为BDL~0.22%。砷镍矿的Ni含量为

42.2%~52.2%,As含量为47.4%~54.5%,Co含量为0.19%~1.37%。辉砷钴矿的As含量为44.1%~44.3%,Co含量为18.6%~21.3%,Ni含量为9.14%~12.5%,Fe含量为5.55%~5.85%。硫铋镍矿的S含量为9.29%,Ni含量为25.5%,Cr含量为0.32%。方硫铁镍矿的S含量为32.3%~34.6%,Ni含量为29.3%~31.9%,Co含量为0.77%~0.86%,Cr含量为0.01%~0.18%。红砷镍矿的As含量为47.6%~48.3%,S含量为0.10%~0.13%,Ni含量为38.2%~42.3%,Co含量为0.11%~0.21%。

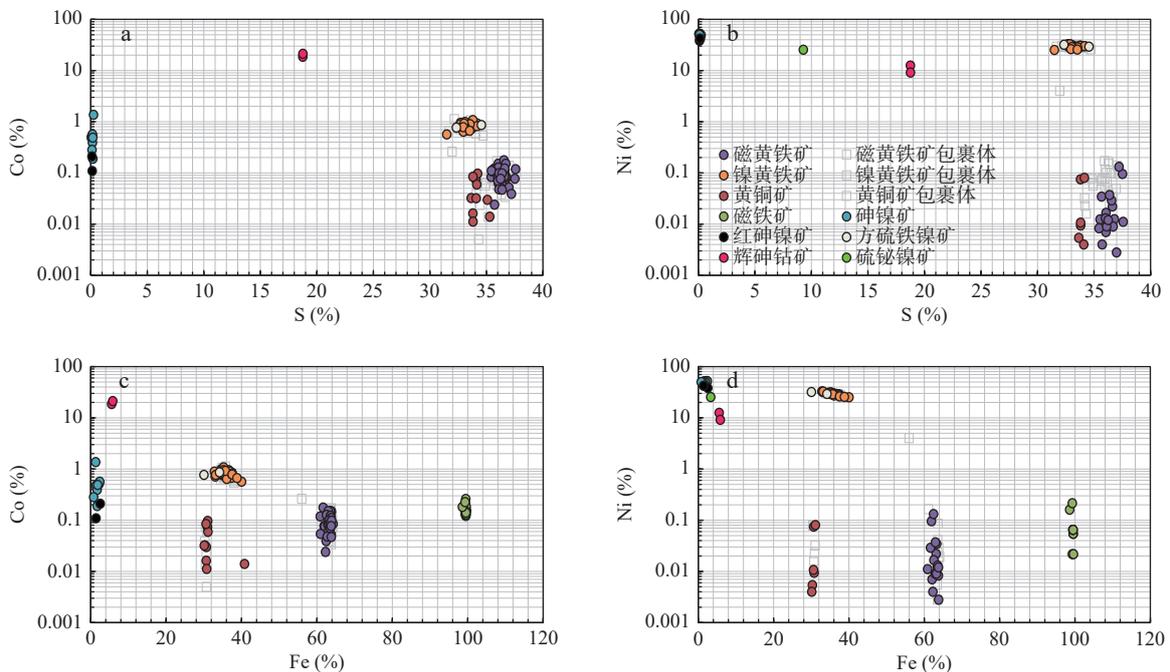


图4 夏日哈木镍钴硫化物矿床不同类型硫化物Co、Ni、S、Fe含量变化图

Fig. 4 Plots of Co and Ni vs. S and Fe contents in different types of sulfide minerals in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

4.3 金属矿物微量元素分析结果

磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿的原位微量元素分析结果见图5和表4。磁黄铁矿中Co的平均含量为 125×10^{-6} ,Ni的平均含量为 8493×10^{-6} 。被包含的磁黄铁矿中Co、Ni含量总体较独立磁黄铁矿高。镍黄铁矿中Co的平均含量为 5231×10^{-6} ,Ni的平均含量为 247896×10^{-6} 。除部分样品外,被包含镍黄铁矿的Co、Ni含量与独立镍黄铁矿含量无明显差别。黄铜矿中Co的平均含量为 690×10^{-6} ,Ni的平均含量为 32528×10^{-6} 。被包含黄铜矿的Co、Ni含量与独立黄铜矿含量无明显差别。磁铁矿Co的平均含量为 494×10^{-6} ,Ni的平均含量为 28079×10^{-6} 。

5 钴、镍的赋存状态

如前所述,利用TIMA全矿物扫描分析在岩体中识别出9种钴、镍金属矿物(表1):辉钴矿、方硫铁镍矿、砷镍矿、红砷镍矿、硫铋镍矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿。

钴的独立矿物为辉钴矿,钴含量为18.6%~21.3%(表3)。辉钴矿主要呈自形粒状(图6a),粒径大小为 $3.35 \sim 11.40 \mu\text{m}$ (表1)。在钻孔1105s中的体积百分数小于0.01%。

镍的独立矿物包括方硫铁镍矿、砷镍矿、红砷镍

表3 夏日哈木镍钴矿床1105s钻孔中金属矿物S、Fe、Ni、Co、As、Cr含量表

Tab. 3 Measured S, Fe, Ni, Co, As and Cr contents in different minerals in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | 含量(%) | | | | | |
|--------------|--------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| | | | | S | Fe | Ni | Co | As | Cr |
| 18-Po-1-in | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.12 | 63.17 | - | 0.10 | 0.06 | 0.03 |
| 18-Po-2-in | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.92 | 63.78 | - | 0.17 | - | / |
| 18-Po-3 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.36 | 63.85 | - | 0.15 | 0.04 | - |
| 18-Po-4-in | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.67 | 64.19 | - | 0.07 | - | 0.01 |
| 18-Po-5 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.83 | 63.54 | - | 0.09 | 0.00 | - |
| 18-Po-6 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.80 | 63.48 | 0.01 | 0.08 | 0.05 | - |
| 18-Po-7 core | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 34.93 | 63.46 | 0.01 | 0.06 | - | - |
| 18-Po-7 rim1 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.26 | 63.17 | - | 0.07 | - | - |
| 18-Po-7 rim2 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.66 | 63.28 | 0.03 | 0.12 | - | 0.01 |
| 18-Po-7 rim3 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.94 | 63.50 | 0.01 | 0.12 | 0.06 | 0.03 |
| 19-Po-1-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.54 | 64.08 | - | 0.10 | - | 0.05 |
| 19-Po-2-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.33 | 63.62 | 0.09 | 0.15 | 0.03 | 0.01 |
| 19-Po-3 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.04 | 63.56 | - | 0.15 | - | 0.03 |
| 19-Po-4-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.99 | 64.07 | 0.02 | 0.12 | - | 0.02 |
| 19-Po-5 core | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 37.16 | 61.11 | 0.16 | 0.10 | - | 0.05 |
| 19-Po-5 rim1 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.14 | 62.99 | - | 0.07 | - | 0.01 |
| 19-Po-5 rim2 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.63 | 63.12 | 0.02 | 0.10 | 0.03 | - |
| 19-Po-5 rim3 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.78 | 62.88 | - | 0.12 | 0.03 | - |
| 19-Po-6-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.73 | 63.95 | - | 0.08 | 0.02 | 0.04 |
| 19-Po-7 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 37.52 | 61.90 | 0.10 | 0.08 | - | 0.00 |
| 19-Po-8 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.77 | 63.07 | - | 0.06 | - | - |
| 24-Po-1 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 37.58 | 60.88 | 0.01 | 0.12 | - | - |
| 24-Po-2 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.81 | 63.28 | - | 0.12 | - | - |
| 24-Po-3 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.72 | 62.99 | - | 0.15 | - | 0.01 |
| 24-Po-4 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.95 | 63.38 | - | 0.12 | 0.03 | 0.02 |
| 24-Po-5 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.55 | 61.65 | 0.03 | 0.18 | - | 0.03 |
| 24-Po-6 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.42 | 63.72 | - | 0.08 | - | - |
| 25-Po-1-core | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 34.90 | 62.58 | - | 0.06 | - | 0.01 |
| 25-Po-1-rim | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.24 | 63.48 | - | 0.08 | - | 0.00 |
| 25-Po-2-core | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.96 | 63.55 | - | 0.08 | - | - |
| 25-Po-2-rim | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.05 | 62.06 | 0.01 | 0.08 | 0.08 | - |
| 25-Po-2-rim2 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.54 | 60.94 | - | 0.05 | 0.09 | - |
| 25-Po-3 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.01 | 63.62 | - | 0.08 | - | - |
| 25-Po-4core | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.95 | 62.15 | - | 0.05 | - | 0.02 |
| 25-Po-4rim1 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.37 | 62.97 | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 0.00 |
| 25-Po-4rim2 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.69 | 62.92 | 0.01 | 0.08 | - | 0.03 |
| 25-Po-4rim3 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.04 | 63.06 | - | 0.08 | - | 0.00 |
| 28-Po-1-in | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.14 | 63.81 | - | 0.07 | - | - |
| 28-Po-2 core | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 37.20 | 63.85 | 0.03 | 0.12 | - | - |
| 28-Po-2 rim1 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.44 | 63.74 | 0.01 | 0.11 | - | - |
| 28-Po-2 rim2 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.53 | 63.44 | 0.01 | 0.11 | 0.03 | 0.02 |
| 28-Po-2 rim3 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.62 | 63.59 | - | 0.12 | - | - |
| 28-Po-3 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.62 | 63.66 | - | 0.12 | 0.03 | 0.02 |

续表3

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | 含量(%) | | | | | |
|--------------|--------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | | | | S | Fe | Ni | Co | As | Cr |
| 28-Po-4-in | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.32 | 63.35 | - | 0.04 | 0.07 | - |
| 28-Po-5 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.99 | 63.80 | 0.00 | 0.05 | - | 0.02 |
| 28-Po-6 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.06 | 62.54 | 0.02 | 0.13 | 0.02 | - |
| 28-Po-7-in | 136.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.26 | 63.47 | 0.02 | 0.17 | 0.00 | 0.01 |
| 29-Po-1core | 140 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.67 | 63.81 | 0.02 | 0.03 | - | - |
| 29-Po-1rim1 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.12 | 63.23 | 0.01 | 0.10 | - | 0.00 |
| 29-Po-1rim2 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.59 | 63.47 | - | 0.09 | - | 0.03 |
| 29-Po-1rim3 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.39 | 63.90 | - | 0.10 | - | 0.04 |
| 29-po-2 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 37.21 | 62.46 | 0.13 | 0.04 | 0.06 | 0.04 |
| 29-Po-3 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.07 | 63.07 | - | 0.06 | - | - |
| 29-Po-4 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.02 | 63.53 | 0.01 | 0.07 | - | 0.02 |
| 29-Po-5-in | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 37.03 | 63.51 | 0.00 | 0.14 | - | 0.07 |
| 29-Po-6 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.29 | 64.29 | - | 0.09 | 0.01 | - |
| 40-Po-1 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.11 | 62.73 | - | 0.05 | 0.05 | - |
| 40-Po-2 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.72 | 62.28 | 0.00 | 0.02 | - | 0.03 |
| 40-Po-3 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.39 | 63.82 | - | 0.05 | - | 0.01 |
| 40-Po-4 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.08 | 62.86 | - | - | - | - |
| 40-Po-5-core | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 35.95 | 63.55 | 0.04 | 0.06 | - | 0.02 |
| 40-Po-5-rim | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 36.25 | 63.76 | 0.01 | 0.08 | - | 0.02 |
| 18-Pn-1-in | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 32.86 | 34.09 | 30.48 | 0.82 | 0.03 | - |
| 18-Pn-2-in | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 34.71 | 38.01 | 25.92 | 0.54 | - | 0.06 |
| 18-Pn-3 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.86 | 36.63 | 29.09 | 0.95 | 0.02 | - |
| 18-Pn-4-in | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 32.16 | 35.76 | 29.82 | 1.13 | 0.00 | 0.02 |
| 18-Pn-5 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 31.49 | 40.02 | 25.23 | 0.57 | - | - |
| 18-Pn-6 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.13 | 36.89 | 28.70 | 0.82 | 0.00 | 0.02 |
| 18-Pn-7 core | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.48 | 34.50 | 31.05 | 0.96 | 0.01 | 0.00 |
| 18-Pn-7 rim1 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 32.89 | 35.91 | 29.73 | 0.91 | - | - |
| 18-Pn-7 rim2 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.12 | 34.97 | 29.93 | 0.75 | - | - |
| 18-Pn-7 rim3 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 34.18 | 35.98 | 29.93 | 0.93 | 0.05 | - |
| 19-Pn-1-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.43 | 34.74 | 31.34 | 0.95 | - | 0.00 |
| 19-Pn-2-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.29 | 34.53 | 30.81 | 0.62 | - | - |
| 19-Pn-3 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.80 | 35.26 | 30.68 | 1.08 | 0.06 | - |
| 19-Pn-4-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 34.06 | 37.81 | 27.57 | 0.58 | - | 0.05 |
| 19-Pn-5 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.10 | 34.68 | 30.94 | 0.99 | - | - |
| 19-Pn-6-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 32.51 | 34.96 | 31.18 | 0.77 | 0.00 | 0.03 |
| 19-Pn-7 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 32.72 | 35.23 | 31.37 | 0.95 | - | 0.03 |
| 19-Pn-8-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.59 | 34.90 | 30.50 | 1.06 | 0.02 | 0.03 |
| 24-Pn-1 | 119.5 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.09 | 37.51 | 28.12 | 0.85 | 0.02 | 0.07 |
| 24-Pn-2 | 119.5 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 33.08 | 36.51 | 28.66 | 0.73 | 0.00 | 0.05 |

续表3

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | 含量(%) | | | | | |
|--------------|--------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| | | | | S | Fe | Ni | Co | As | Cr |
| 24-Pn-3-in | 119.5 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.45 | 37.29 | 28.83 | 0.79 | 0.08 | - |
| 24-Pn-4 | 119.5 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.11 | 37.18 | 28.89 | 0.83 | 0.01 | 0.01 |
| 25-Pn-1-core | 120.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.28 | 33.85 | 30.02 | 0.73 | - | 0.02 |
| 25-Pn-2 | 120.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.87 | 34.56 | 30.15 | 0.85 | 0.05 | - |
| 25-Pn-3 | 120.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.32 | 36.73 | 28.33 | 0.80 | - | - |
| 25-Pn-4 | 120.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.73 | 36.01 | 29.17 | 0.83 | 0.07 | 0.01 |
| 28-Pn-1-in | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 31.96 | 55.97 | 4.01 | 0.26 | 0.02 | 0.16 |
| 28-Pn-2 | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 34.16 | 35.23 | 29.98 | 0.82 | - | 0.03 |
| 28-Pn-3 | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.75 | 35.53 | 30.31 | 0.75 | 0.01 | 0.01 |
| 28-Pn-4-in | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.09 | 35.20 | 30.17 | 0.67 | 0.01 | 0.02 |
| 28-Pn-5 | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.28 | 37.29 | 28.60 | 0.67 | - | 0.08 |
| 28-Pn-6 | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.42 | 35.13 | 29.20 | 0.83 | - | 0.07 |
| 28-Pn-7-in | 136.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 31.67 | 37.07 | 29.23 | 0.65 | 0.04 | 0.07 |
| 29-Pn-1core | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.88 | 34.01 | 31.61 | 0.81 | 0.01 | - |
| 29-Pn-1rim | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.07 | 35.04 | 30.67 | 0.80 | - | - |
| 29-Pn-1rim2 | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.94 | 35.13 | 29.99 | 0.82 | 0.01 | - |
| 29-Pn-2 | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.93 | 33.03 | 32.29 | 0.71 | 0.08 | 0.02 |
| 29-Pn-3 | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.55 | 36.81 | 28.40 | 0.90 | - | - |
| 29-Pn-5 | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.85 | 33.14 | 32.64 | 0.77 | - | 0.04 |
| 29-Pn-6-in | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.61 | 35.01 | 30.53 | 0.75 | - | 0.04 |
| 29-Pn-7 | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.69 | 32.81 | 32.84 | 0.89 | - | 0.02 |
| 29-Pn-8-in | 140 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.99 | 34.75 | 31.23 | 0.83 | - | - |
| 40-Pn-1 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.96 | 36.07 | 27.27 | 0.64 | - | 0.01 |
| 40-Pn-2 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.11 | 37.40 | 27.34 | 0.80 | - | - |
| 40-Pn-3 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.02 | 35.73 | 28.76 | 0.92 | - | - |
| 40-Pn-4-core | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.76 | 36.09 | 28.44 | 0.92 | 0.01 | - |
| 40-Pn-4-rim | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.95 | 37.51 | 26.19 | 0.78 | 0.04 | 0.05 |
| 40-Pn-6-core | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 32.66 | 35.36 | 29.26 | 0.71 | - | - |
| 40-Pn-6-rim | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 33.52 | 38.80 | 25.63 | 0.67 | - | 0.04 |
| 18-Ccp-1 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.48 | 30.49 | - | - | - | - |
| 18-Ccp-2-in | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.19 | 30.85 | 0.02 | 0.06 | - | - |
| 18-Ccp-3 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 33.65 | 30.29 | 0.01 | 0.03 | - | - |
| 18-Ccp-3-in | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.17 | 31.02 | 0.03 | 0.09 | - | 0.06 |
| 18-Ccp-4 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.07 | 30.98 | - | 0.07 | - | 0.02 |
| 18-Ccp-5 in | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.31 | 30.70 | 0.02 | 0.01 | 0.04 | - |
| 18-Ccp-6 in | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.43 | 30.62 | - | 0.02 | - | - |
| 18-Ccp-7 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.22 | 31.02 | - | 0.10 | - | - |
| 19-Ccp-1-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 35.18 | 30.43 | - | 0.01 | 0.01 | - |
| 19-Ccp-2 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 35.09 | 30.67 | - | 0.03 | - | - |
| 19-Ccp-3-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.10 | 30.29 | - | 0.04 | - | - |
| 19-Ccp-4-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.78 | 30.42 | 0.08 | 0.07 | - | - |
| 19-Ccp-5 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 34.52 | 30.59 | - | - | 0.02 | 0.02 |
| 28-Ccp-1 | 136.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 33.80 | 30.65 | 0.08 | 0.02 | - | 0.07 |

续表3

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | 含量(%) | | | | | |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | | | S | Fe | Ni | Co | As | Cr |
| 28-Ccp-2 | 136.65 | 橄欖岩 | 黄铜矿 | 34.15 | 31.10 | 0.08 | 0.06 | - | 0.04 |
| 29-Ccp-1 | 140 | 角闪橄欖岩 | 黄铜矿 | 34.06 | 30.41 | - | - | - | - |
| 29-Ccp-2 | 140 | 角闪橄欖岩 | 黄铜矿 | 34.09 | 30.13 | 0.00 | 0.03 | - | - |
| 40-Ccp-1 | 187.65 | 橄欖岩 | 黄铜矿 | 33.82 | 30.76 | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.00 |
| 40-Ccp-2 | 187.65 | 橄欖岩 | 黄铜矿 | 33.81 | 30.60 | 0.01 | 0.08 | 0.03 | - |
| 40-Ccp-3 | 187.65 | 橄欖岩 | 黄铜矿 | 35.29 | 40.79 | - | 0.01 | 0.04 | 0.02 |
| 18-Mag-1 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.43 | - | 0.20 | - | 0.03 |
| 18-Mag-2 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.32 | - | 0.20 | - | 0.15 |
| 18-Mag-3 | 98.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.49 | - | 0.12 | - | 0.10 |
| 19-Mag-1 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.70 | - | 0.15 | - | 0.04 |
| 24-Mag-1 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.43 | - | 0.15 | - | 0.03 |
| 24-Mag-2 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.35 | - | 0.13 | - | 0.03 |
| 24-Mag-3 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.25 | - | 0.21 | - | 0.09 |
| 24-Mag-4 | 119.5 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.31 | - | 0.21 | - | - |
| 25-Mag-1 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.30 | 0.02 | 0.15 | - | 0.09 |
| 25-Mag-2 | 120.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.29 | - | 0.22 | - | 0.04 |
| 28-Mag-1 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.54 | 0.05 | 0.13 | - | 0.08 |
| 28-Mag-2 | 136.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.59 | 0.02 | 0.19 | - | 0.08 |
| 29-Mag-1 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.53 | 0.05 | 0.13 | - | 0.00 |
| 29-Mag-2 | 140 | 角闪橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.42 | 0.07 | 0.15 | - | 0.01 |
| 40-Mag-1 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.51 | 0.06 | 0.14 | - | 0.05 |
| 40-Mag-2 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.47 | 0.07 | 0.26 | - | 0.07 |
| 40-Mag-3 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 98.58 | 0.16 | 0.18 | - | 0.05 |
| 40-Mag-4 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁铁矿 | - | 99.29 | 0.22 | 0.23 | - | - |
| 18-Mec | 98.65 | 橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.12 | 2.23 | 52.14 | 0.54 | 48.80 | - |
| 18-Mec re | 98.65 | 橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.05 | 2.20 | 52.19 | 0.51 | 48.61 | 0.03 |
| 19-Mec-1 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.15 | 1.70 | 51.75 | 0.39 | 48.87 | 0.06 |
| 19-Mec-2 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.18 | 1.86 | 50.29 | 0.49 | 47.95 | 0.01 |
| 19-Mec-3 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.07 | 1.40 | 51.03 | 0.48 | 48.68 | - |
| 19-Mec-5 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.15 | 2.40 | 51.94 | 0.57 | 49.17 | 0.01 |
| 24-Mec | 119.5 | 橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.24 | 1.31 | 49.28 | 1.37 | 47.39 | 0.95 |
| 25-Mec-1 | 120.65 | 橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.18 | 1.71 | 42.19 | 0.19 | 54.49 | - |
| 40-Mec-1 | 187.65 | 橄欖岩 | 砷镍矿 | 0.11 | 0.77 | 49.98 | 0.28 | 48.66 | 0.04 |
| 28-Nc2 | 136.65 | 橄欖岩 | 红砷镍矿 | 0.10 | 2.53 | 38.21 | 0.21 | 48.25 | 0.10 |
| 28-Nc3 | 136.65 | 橄欖岩 | 红砷镍矿 | 0.13 | 1.41 | 42.33 | 0.11 | 47.59 | 0.01 |
| 28-Va 8 | 136.65 | 橄欖岩 | 方硫铁镍矿 | 34.56 | 34.16 | 29.29 | 0.86 | - | 0.18 |
| 28-Va 9 | 136.65 | 橄欖岩 | 方硫铁镍矿 | 32.34 | 30.04 | 31.92 | 0.77 | - | - |
| 40-Cbt-1 | 187.65 | 橄欖岩 | 辉砷钴矿 | 18.76 | 5.55 | 12.53 | 18.60 | 44.08 | - |
| 40-Cbt-2 | 187.65 | 橄欖岩 | 辉砷钴矿 | 18.77 | 5.85 | 9.14 | 21.27 | 44.29 | 0.32 |
| 29-Prk | 140 | 角闪橄欖岩 | 硫铋镍矿 | 9.29 | 3.30 | 25.47 | - | 0.06 | 0.03 |

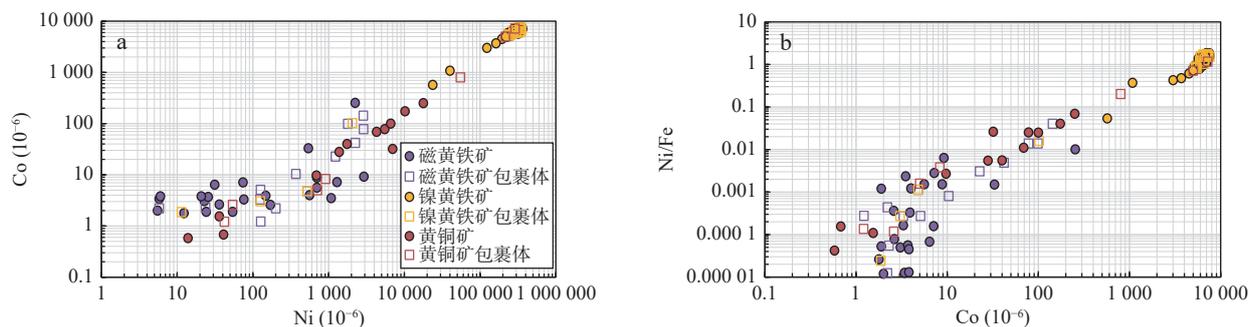


图 5 夏日哈木镍钴硫化物矿床镍和钴(a)及钴和 Ni/Fe(b)相关图

Fig. 5 (a) Ni vs. Co and (b) Co vs. Ni/Fe plots in sulfide minerals in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

表 4 夏日哈木镍钴矿床 1105s 钴孔中金属矿物 Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ge、As、Se、Ag 含量表

Tab. 4 Measured Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se and Ag contents in different minerals in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | Fe (10^{-6}) | Co(10^{-6}) | Ni (10^{-6}) | Cu (10^{-6}) | Zn (10^{-6}) | Ge (10^{-6}) | As (10^{-6}) | Se (10^{-6}) | Ag (10^{-6}) |
|--------------|--------|-------|------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 18-Po-1-in | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 0.95 | | | | 3.80 | | 33 | 0.69 |
| 18-Po-4-in | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 2.21 | 5.80 | | | | | 42 | 0.20 |
| 18-Po-5 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 2.41 | | | | | | 35 | 0.20 |
| 18-Po-3 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 1.78 | | | | | | 38 | 0.38 |
| 18-Po-2-in | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 129 000 | 99 | 1 790 | | 85 | 4.50 | | | |
| 18-Po-6 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 2.26 | | | | 4.10 | 6.90 | 53 | 0.51 |
| 18-Po-7-rim1 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 8.80 | 700 | 1 360 | 3.50 | 3.90 | | 41 | 1.92 |
| 18-Po-7-core | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 400 000 | 22.7 | 1 230 | 18 700 | 6.20 | 3.90 | | 34 | 12.6 |
| 18-Po-7-rim2 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 1.89 | 24.2 | 10 800 | | | | 35 | 0.40 |
| 18-Po-7-rim3 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 1.82 | | | | | | 53 | 0.62 |
| 19-Po-1-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 209 000 | 78 | 2 890 | 52 000 | 127 | | | 45 | 3.40 |
| 19-Po-3 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.63 | 36 | | | 7.00 | 7.70 | 82 | 1.22 |
| 19-Po-4-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 246 000 | 7 100 | 291 000 | | 7.20 | 12.7 | 107 | 197 | 9.90 |
| 19-Po-5-rim2 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 2.59 | 170 | | | | | 62 | 0.52 |
| 19-Po-5-rim3 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.00 | 560 | | | | | 49 | 0.69 |
| 19-Po-5-core | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.30 | 124 | | | 4.40 | | 67 | 0.67 |
| 19-Po-5-rim1 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 1.78 | 12.3 | | | 4.70 | | 63 | 0.87 |
| 19-Po-6-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.21 | 201 | | | | | 57 | 1.35 |
| 19-Po-7 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 7.20 | 1 290 | | | 4.00 | 9.60 | 73 | 0.33 |
| 19-Po-8 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 5.60 | 700 | | 3.40 | | | 58 | 0.37 |
| 19-Pn-8-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.80 | 520 | | | | | 75 | 0.32 |
| 24-Po-1 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 45 000 | 1.89 | 54 | 80 | 4.20 | 8.40 | 21.4 | 48 | |
| 24-Po-2 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.06 | 22.9 | 132 | | | | 52 | 2.36 |
| 24-Po-3 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470 000 | 2.50 | | | | | | | 0.88 |
| 24-Po-4 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 470000 | 7.10 | 74 | | | 3.90 | | 36 | 0.71 |
| 24-Po-5 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 450000 | 3.90 | 148 | 50 | 5.00 | 6.20 | 7.20 | 83 | 1.82 |
| 24-Po-6 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460000 | 3.80 | | | 3.40 | 6.20 | | 60 | 0.77 |

续表4

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | Fe (10^{-6}) | Co (10^{-6}) | Ni (10^{-6}) | Cu (10^{-6}) | Zn (10^{-6}) | Ge (10^{-6}) | As (10^{-6}) | Se (10^{-6}) | Ag (10^{-6}) |
|--------------|--------|-------|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 25-Po-6-rim3 | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.40 | 5.80 | | 3.70 | 7.60 | | 50 | 1.67 |
| 25-Po-6-core | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 5.00 | | | 5.20 | 4.50 | | 58 | 1.40 |
| 25-Po-6-rim2 | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.80 | 6.00 | | 5.50 | | 7.40 | 55 | 1.26 |
| 25-Po-6-rim1 | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.00 | 5.50 | | 3.40 | 5.40 | 7.00 | 61 | 1.29 |
| 25-Po-5 | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.30 | 76 | 81 | | | | 50 | 1.17 |
| 25-Po-3-vein | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 360 000 | 33 | 540 | 32 | | 5.00 | | 38 | 1.55 |
| 25-Po-1-core | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 5.10 | 126 | | 4.30 | 5.40 | 42 | 50 | 0.69 |
| 25-Po-1-rim | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.42 | | | 5.20 | 4.70 | | 45 | 1.33 |
| 25-Po-2-rim2 | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 222 000 | 254 | 2 240 | 670 | 2 950 | 5.40 | | | 1.49 |
| 25-Po-2-rim1 | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.25 | | | | 5.70 | | 60 | 0.95 |
| 25-Po-2-core | 120.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.56 | | | | 6.00 | | 47 | 0.65 |
| 28-Po-1-in | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 71 000 | 143 | 2 870 | | 58 | | | | |
| 28-Po-2-rim1 | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.20 | | | 4.50 | 13.4 | 9.90 | 117 | 2.18 |
| 28-Po-2-rim2 | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.80 | | | 3.80 | 13.1 | 8.10 | 149 | 2.35 |
| 28-Po-2-rim3 | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.20 | | | 5.40 | 14.7 | 11.5 | 95 | 2.30 |
| 28-Po-2core | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 5.70 | | | 4.10 | 9.20 | 15.0 | 128 | 1.86 |
| 28-Po-3 | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 6.40 | 31.3 | 213 | 11.9 | 12.4 | 13.6 | 123 | 3.90 |
| 28-Po-7-in | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 42 | 2 250 | 4.10 | 3.70 | 10.1 | 12.3 | 99 | 11.3 |
| 28-Po-4-in | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.12 | | | | 9.30 | | 80 | 3.90 |
| 28-Po-5 | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.69 | | | | 7.40 | | 72 | 1.29 |
| 28-Po-6 | 136.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 5.10 | | | 3.30 | | 7.80 | 71 | 1.44 |
| 29-Po-7 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 9.20 | 2 920 | 3.50 | 3.06 | | | 87 | 0.21 |
| 29-Po-6-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 430 000 | 2.30 | 23.7 | | 4.40 | 9.20 | 12.6 | 116 | 1.54 |
| 29-Po-3-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 10.4 | 370 | | 2.97 | | | 75 | 2.97 |
| 29-po-2 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.50 | 1 080 | | | 6.50 | | 72 | 1.34 |
| 29-Po-1-rim1 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.70 | 25.7 | 3 500 | 3.60 | 8.70 | 9.50 | 83 | 0.70 |
| 29-Po-1-rim2 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.80 | 20.8 | 2 610 | 4.30 | 9.20 | 11.00 | 112 | 1.11 |
| 29-Po-1-rim3 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.20 | | | | 10.5 | 9.00 | 94 | 1.60 |
| 29-Po-1-core | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.40 | | | 3.80 | 10.3 | 11.5 | 94 | 1.15 |
| 29-Po-4 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 4.00 | | 2.39 | 5.30 | 9.60 | 12.2 | 105 | 1.73 |
| 29-po-5-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.70 | | | 6.70 | 7.10 | 16.5 | 142 | 0.25 |
| 40-po-3 | 187.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 3.70 | | | 7.80 | 11.9 | 8.30 | 107 | 0.67 |
| 40-po-4 | 187.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.91 | | | 3.50 | 7.10 | 7.80 | 132 | 1.32 |
| 40-po-5-core | 187.65 | 橄榄岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 1.22 | 127 | 7.90 | 4.00 | 8.50 | 13.7 | 133 | 6.80 |

续表4

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | Fe (10^{-6}) | Co (10^{-6}) | Ni (10^{-6}) | Cu (10^{-6}) | Zn (10^{-6}) | Ge (10^{-6}) | As (10^{-6}) | Se (10^{-6}) | Ag (10^{-6}) |
|--------------|--------|-------|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 40-po-5-rim1 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 1.35 | | | 4.90 | | | 105 | 1.73 |
| 40-po-1 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 2.82 | | | 6.80 | 8.90 | 13.4 | 75 | 1.51 |
| 40-po-6 | 187.65 | 橄欖岩 | 磁黄铁矿 | 460 000 | 1.71 | | | 5.40 | 10.5 | 10.6 | 110 | 1.50 |
| 18-Pn-1-in | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 279 000 | 5 300 | 248 000 | 5.00 | 6.20 | 4.90 | 133 | 104 | 1.33 |
| 18-Pn-4-in | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 470 000 | 2.74 | | | | | | 34 | 0.26 |
| 18-Pn-5 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 300 000 | 4 900 | 221 000 | 2 690 | 4.40 | 3.80 | 34 | 56 | 5.80 |
| 18-Pn-2-in | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 129 000 | 102 | 2 060 | | 88 | | | | |
| 18-Pn-6 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 288 000 | 3 010 | 123 000 | 58 000 | 16.2 | 5.70 | 75 | 71 | 5.30 |
| 18-Pn-7-rim1 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 292 000 | 5 900 | 234 000 | | | | 173 | 83 | 4.70 |
| 18-Pn-7-core | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 263 000 | 6 600 | 273 000 | | 4.70 | | 135 | 65 | 6.10 |
| 18-Pn-7-rim3 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 274 000 | 6 400 | 258 000 | 32 | 4.50 | | 147 | 68 | 4.00 |
| 18-Pn-7-rim2 | 98.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 108 000 | 1 080 | 40 000 | 2 490 | 960 | 1 040 | 2 530 | 8 000 | 8.70 |
| 19-Pn-1-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 470 000 | 1.87 | 11.4 | | 3.50 | 4.20 | | 69 | 1.10 |
| 19-Pn-4-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 460 000 | 3.04 | 125 | | 7.40 | 12.5 | 8.60 | 112 | 1.35 |
| 19-Pn-5 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 254 000 | 6 600 | 273 000 | 4.40 | | 5.40 | | 74 | 6.30 |
| 19-Pn-7 | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 250 000 | 7 000 | 281 000 | | 3.40 | 5.00 | 7.70 | 81 | 6.70 |
| 19-Pn-8-in | 101.65 | 角闪橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 460 000 | 4.80 | 520 | | | | | 75 | 0.32 |
| 24-Pn-1 | 119.50 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 271 000 | 5 200 | 255 000 | 90 | | 5.10 | 62 | 83 | 7.60 |
| 24-Pn-2 | 119.50 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 282 000 | 5 300 | 248 000 | 22.2 | | 4.00 | 13.4 | 62 | 6.00 |
| 24-Pn-3-in | 119.50 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 286 000 | 5 300 | 241 000 | 10.6 | | | 31.2 | 39 | 8.60 |
| 24-Pn-4 | 119.50 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 283 000 | 5 600 | 246 000 | | | 4.30 | 9.10 | 70 | 4.70 |
| 25-Pn-5 | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 316 000 | 4 500 | 194 000 | 95 | 9.20 | 8.90 | 133 | 59 | 9.80 |
| 25-Pn-4-rim3 | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 440 000 | 570 | 23 700 | 45 | 5.20 | 6.30 | 7.10 | 41 | 2.72 |
| 25-Pn-4-rim1 | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 340 000 | 3 700 | 162 000 | 28.2 | 4.20 | 7.10 | 9.30 | 56 | 6.00 |
| 25-Pn-4-core | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 288 000 | 5 500 | 239 000 | 19.6 | 4.20 | 7.90 | 26.7 | 68 | 13.3 |
| 25-Pn-4-rim2 | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 293 000 | 5 400 | 231 000 | 8.00 | 4.90 | 7.30 | 50 | 111 | 9.90 |
| 25-Pn-1 | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 288 000 | 5 600 | 239 000 | 10.5 | 5.50 | 4.40 | 7.60 | 59 | 8.10 |
| 25-Pn-2 | 120.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 300 000 | 5 000 | 217 000 | 74 | 4.10 | 4.40 | | 46 | 5.50 |
| 28-Pn-2 | 136.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 195 000 | 7 000 | 360 000 | 50 | 3.30 | 9.90 | 68 | 138 | 8.00 |
| 28-Pn-3 | 136.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 202 000 | 6 800 | 360 000 | 130 | 3.20 | 8.10 | 81 | 120 | 13.7 |
| 28-Pn-7-in | 136.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 204 000 | 6 400 | 350 000 | 490 | | 6.40 | 303 | 168 | 13.4 |
| 28-Pn-4-in | 136.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 238 000 | 5 900 | 280 000 | 1 260 | 30.9 | 7.50 | 59 | 88 | 8.20 |
| 28-Pn-5 | 136.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 231 000 | 5 700 | 320 000 | 6.60 | 3.80 | 7.00 | 8.60 | 76 | 13.7 |
| 28-Pn-6 | 136.65 | 橄欖岩 | 镍黄铁矿 | 223 000 | 6 800 | 305 000 | 590 | 3.05 | | 52 | 98 | 6.10 |

续表4

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | Fe (10^{-6}) | Co (10^{-6}) | Ni (10^{-6}) | Cu (10^{-6}) | Zn (10^{-6}) | Ge (10^{-6}) | As (10^{-6}) | Se (10^{-6}) | Ag (10^{-6}) |
|-----------------|--------|-------|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 29-Pn-5-rim1-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 210 000 | 7 100 | 340 000 | | 2.81 | 7.40 | 17.3 | 92 | 9.40 |
| 29-Pn-5-rim2-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 210 000 | 7 300 | 340 000 | | 4.10 | 7.40 | 19.8 | 85 | 10.9 |
| 29-Pn-5-rim3-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 202 000 | 7 100 | 350 000 | | 5.20 | | 10.2 | 87 | 16.6 |
| 29-Pn-5-core-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 200 000 | 7 000 | 350 000 | 2.44 | 3.90 | 8.50 | 23.8 | 87 | 12.6 |
| 29-Pn-8-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 198 000 | 6 000 | 303 000 | 2.95 | 5.20 | | | 80 | 6.00 |
| 29-Pn-2 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 212 000 | 6 400 | 330 000 | 2.82 | 4.30 | | | | 7.80 |
| 29-Pn-1 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 196 000 | 7 500 | 360 000 | | | 6.90 | | 87 | 8.60 |
| 29-Pn-6-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 215 000 | 6 000 | 330 000 | 1 180 | 5.50 | 7.70 | 9.60 | | 3.30 |
| 40-Pn-2 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 226 000 | 7 000 | 320 000 | 15.9 | 4.10 | | 67 | 114 | 2.32 |
| 40-Pn-3 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 213 000 | 7 600 | 340 000 | 4.60 | 3.30 | | 173 | 122 | 1.92 |
| 40-Pn-4-rim1 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 221 000 | 7 500 | 330 000 | | 2.65 | | 460 | 132 | 2.44 |
| 40-Pn-4-core | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 218 000 | 7 600 | 330 000 | | 2.82 | 6.40 | 169 | 128 | 1.57 |
| 40-Pn-4-rim2 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 219 000 | 7 200 | 330 000 | | 4.00 | 6.70 | 320 | 148 | 2.05 |
| 40-Pn-5 | 187.65 | 橄榄岩 | 镍黄铁矿 | 223 000 | 6 900 | 330 000 | 3.05 | 4.50 | 7.60 | 390 | 110 | 1.94 |
| 18-Cps-3 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 218 000 | 78 | 5 500 | 237 000 | 550 | | | 36 | 20.3 |
| 18-Ccp-1 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 252 000 | 174 | 10 200 | 292 000 | 1 200 | | | 38 | 18.4 |
| 18-Ccp-3-in | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 302 000 | 5 000 | 216 000 | 4 400 | 5.60 | 4.90 | | 56 | 6.90 |
| 18-Ccp-4 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 264 000 | 0.68 | 41 | 286 000 | 390 | | | 58 | 2.80 |
| 18-Ccp-7-rim1 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 315 000 | 40 | 1 750 | 189 000 | 3 200 | 4.70 | | 46 | 6.40 |
| 18-Ccp-8-core | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 309 000 | 1.21 | 42 | 222 000 | 670 | 3.80 | | 48 | 3.30 |
| 18-Ccp-8-rim2 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 330 000 | 0.58 | 13.9 | 198 000 | 215 | | | 63 | 3.60 |
| 18-Ccp-5in | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 259 000 | | | 294 000 | 460 | | | | 0.28 |
| 18-Ccp-7 | 98.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 315 000 | 100 | 6 600 | 280 000 | 430 | | | 50 | 15.3 |
| 19-Ccp-1-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 460 000 | 2.59 | 54 | | 4.20 | 6.80 | 8.00 | 97 | 1.81 |
| 19-Ccp-2 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 390 000 | 69 | 4 300 | 107 000 | 670 | 4.20 | | 78 | 6.30 |
| 19-Ccp-3 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 252 000 | 28 | 1 380 | 301 000 | 520 | 4.20 | | 79 | 1.00 |
| 19-Ccp-3-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 450 000 | 5.00 | 710 | 24 700 | 83 | | | 90 | 1.44 |
| 19-Ccp-5 | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 253 000 | | | 303 000 | 370 | 4.00 | | 71 | 1.12 |
| 19-Ccp-4-in | 101.65 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 248 000 | 7 200 | 290 000 | | 4.50 | 5.10 | 21 | 81 | 4.30 |
| 28-Ccp-1 | 136.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 257 000 | 251 | 17 800 | 264 000 | 750 | | 27.9 | 84 | 67.0 |
| 28-Ccp-2 | 136.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 264 000 | | | 287 000 | 157 | | | 99 | 0.80 |
| 29-Ccp-1-in | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 239 000 | 8.30 | 910 | 282 000 | 1 000 | | | 82 | 14.3 |
| 29-Ccp-2 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 256 000 | 9.70 | 690 | 295 000 | 530 | | | 90 | 3.07 |
| 29-Ccp-3 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 黄铜矿 | 254 000 | | | 300 000 | 360 | 6.30 | | 96 | 2.86 |
| 40-Ccp-3 | 187.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 330 000 | 1.54 | 36 | 187 000 | 450 | 7.60 | | 91 | 18.7 |
| 40-Ccp-2 | 187.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 267 000 | 32 | 7 000 | 274 000 | 470 | 6.70 | | 100 | 39 |
| 40-Ccp-1 | 187.65 | 橄榄岩 | 黄铜矿 | 330 000 | 1.46 | | 189 000 | 610 | | | 98 | 5.60 |

续表 4

| 样品号 | 深度(m) | 岩性 | 矿物 | Fe (10^{-6}) | Co (10^{-6}) | Ni (10^{-6}) | Cu (10^{-6}) | Zn (10^{-6}) | Ge (10^{-6}) | As (10^{-6}) | Se (10^{-6}) | Ag (10^{-6}) |
|----------|--------|-------|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 18-Mag-1 | 98.65 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 600 000 | 560 | 22 700 | 41 000 | 76 | 7.20 | 22.7 | 53 | 4.20 |
| 18-Mag-2 | 99.65 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 740 000 | 17.6 | 580 | 27 500 | 110 | 7.40 | 8.10 | 57 | 1.34 |
| 18-Mag-3 | 100.65 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 540 000 | 3 400 | 209 000 | 20 400 | 6.20 | 6.50 | | 50 | 11.1 |
| 24-Mag-1 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 740 000 | 164 | 6 700 | 810 | 12 | 5.10 | 22.7 | | 0.25 |
| 24-Mag-2 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 710 000 | 16.1 | 650 | 3 100 | 12.7 | 4.10 | 9.80 | | 0.20 |
| 24-Mag-3 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 760 000 | 93 | 3 300 | 44 | 10.9 | 4.80 | 13.3 | | 0.56 |
| 24-Mag-4 | 119.50 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 460 000 | 16.9 | 630 | 14.8 | 234 | | | | 0.11 |
| 29-Mag-1 | 140.00 | 角闪橄榄岩 | 磁铁矿 | 760 000 | 169 | 8 900 | 1 060 | 10.5 | 16.3 | 17 | | 0.34 |
| 40-Mag-2 | 187.65 | 橄榄岩 | 磁铁矿 | 760 000 | 11.9 | 247 | | 7.40 | 10.2 | 8.50 | | 1.29 |

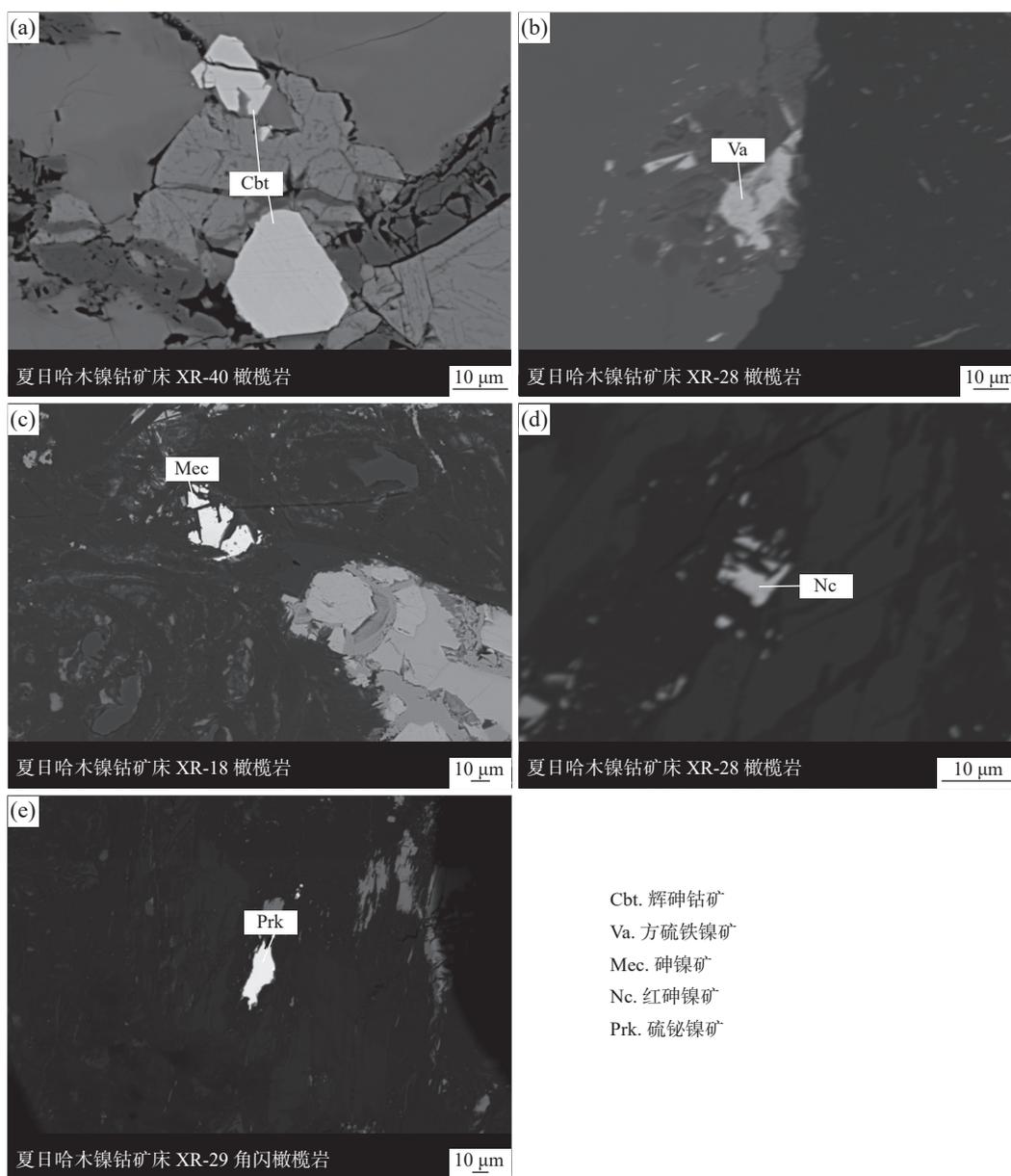


图 6 夏日哈木镍钴矿床镍、钴独立矿物背散射图像

Fig. 6 Backscatter image of independent minerals of Ni and Co in the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

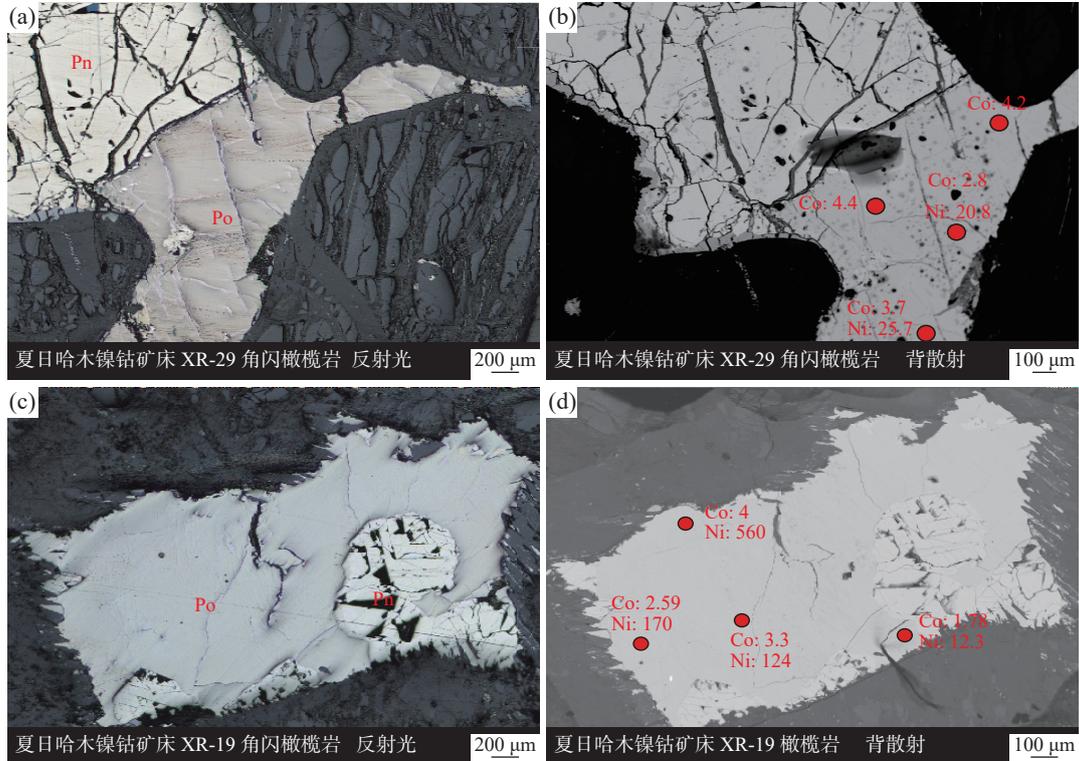
矿、硫铋镍矿。方硫铁镍矿呈不规则粒状,与镍黄铁矿中共生(图 6b)。粒径为 3.84~12.89 μm (表 1)。方硫铁镍矿为夏日哈木镍钴矿床中主要发育 Ni 的单矿物, Ni 含量为 29.3%~31.9%(表 3)。TIMA 扫描发现方硫铁镍矿少则几到十几颗,多则上千颗,在岩体中体积百分数为 0.01%~0.28%。砷镍矿呈自形-半自形粒状结构,被磁黄铁矿、镍黄铁矿和磁铁矿包裹(图 6c),粒径为 5.18~20.42 μm (表 1),镍含量为 42.2%~52.2%(表 3),在岩体中体积百分数小于 0.01%。红砷镍矿呈自形粒状结构,以独立矿物或与磁黄铁矿共生的形式产出(图 6d),粒径集中在 3.82~5.10 μm (表 1),Ni 含量为 38.2%~42.3%(表 3),在岩体中体积百分数为 0.01%~0.28%(表 1)。硫铋镍矿主要呈不规则粒状镶嵌在镍黄铁矿、磁黄铁矿的边缘(图 6e),粒径为 4.04~20.42 μm (表 1),Ni 含量为 25.5%(表 3),在岩体中体积百分数小于 0.01%。

夏日哈木 I 号岩体中常见的含钴、镍金属矿物为磁黄铁矿(矿物体积百分数为 0.14%~4.83%,平均为

1.27%)、镍黄铁矿(矿物体积百分数为 0.03%~3.84%,平均为 0.75%)、黄铜矿(矿物体积百分数小于 0.01%~0.63%,平均为 0.07%)和磁铁矿(矿物体积百分数小于 0.01%~5.07%,平均为 1.24%)。

磁黄铁矿是夏日哈木 I 号岩体 1105 s 钻孔中含量最多的矿石矿物。镜下多呈乳黄色略带粉褐色的反射色,粒度为 0.01~4.17 mm,一般与镍黄铁矿和黄铜矿共生(图 7)。其边部常分布磁铁矿,应该是后期被氧化的结果。原位 LA-ICP-MS 分析结果显示,不同磁黄铁矿颗粒中 Co、Ni 含量均较大,Co 含量为 $0.95 \times 10^{-6} \sim 7100 \times 10^{-6}$; Ni 含量为 $5.8 \times 10^{-6} \sim 29000 \times 10^{-6}$ (表 3)。磁黄铁矿中 Ni 与 Co 正相关,两者均表现出与铁的正相关关系(图 5),表明钴和镍离子可能以类质同象替换二价铁离子进入晶格。

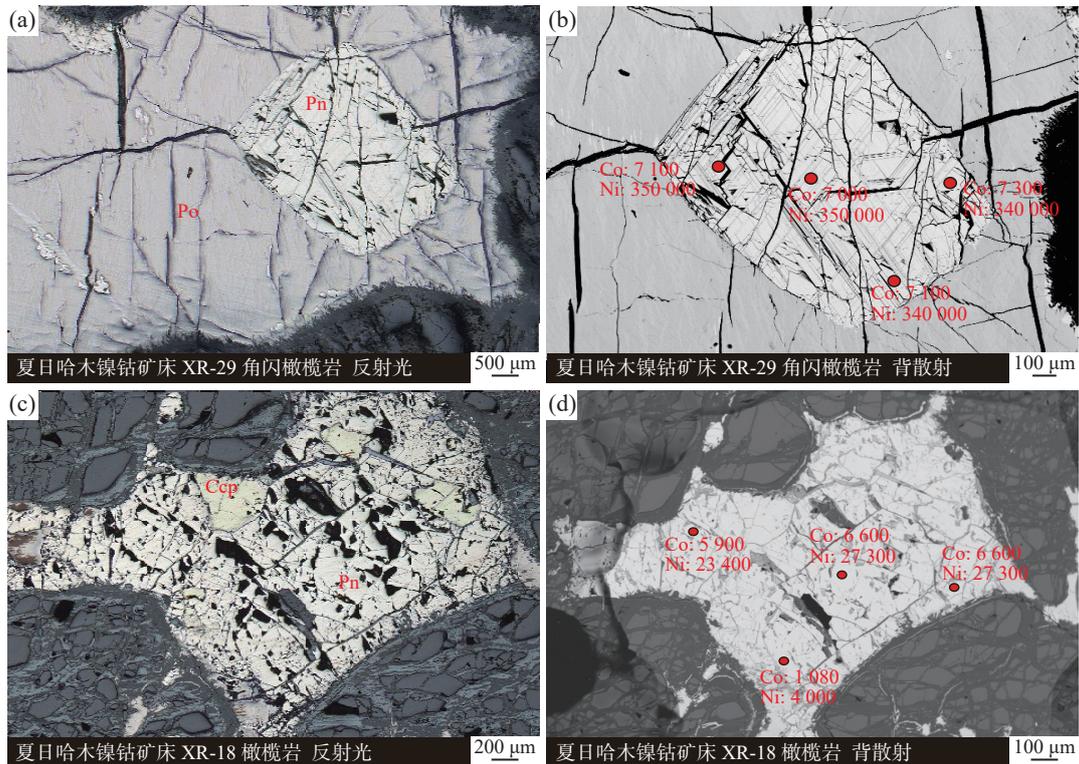
镍黄铁矿在镜下多呈淡黄色的反射色,具有特征的三角形裂理(图 8),粒度为 0.01~5.96 mm。矿物体积百分数在纵向上含量与磁黄铁矿呈正相关,一般与磁黄铁矿和黄铜矿共生。黄铜矿在镜下多呈铜黄色,粒度为 0.01~1.46 mm(表 1)。磁铁矿,镜下多呈灰白色,



a. XR-29 角闪橄榄岩中磁黄铁矿的反射光照片; b. XR-29 角闪橄榄岩中磁黄铁矿的背散射图及核边钴、镍成分分析(1×10^{-6}); c. XR-19 角闪橄榄岩中磁黄铁矿的反射光照片; d. XR-19 角闪橄榄岩中磁黄铁矿的背散射图及核边钴、镍成分分析(1×10^{-6}); Po. 磁黄铁矿; Pn. 镍黄铁矿

图 7 夏日哈木镍钴矿床 1105s 钻孔磁黄铁矿反射光和背散射照片

Fig. 7 Reflected light and backscattered photo of pyrrhotite of 1105s borehole in Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit



a. XR-29角闪橄榄岩中镍黄铁矿的反射光照片; b. XR-29角闪橄榄岩中镍黄铁矿的背散射图及核边钴、镍成分分析(1×10^{-6}); c. XR-18橄榄岩中镍黄铁矿的反射光照片; d. XR-18橄榄岩中镍黄铁矿的背散射图及核边钴、镍成分分析(1×10^{-6}); Po. 磁黄铁矿; Pn. 镍黄铁矿

图8 夏日哈木镍钴矿床1105s钻孔镍黄铁矿反射光和背散射照片

Fig. 8 Reflected light and backscattered photo of pentlandite of 1105s borehole in Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

粒度为0.01~1.76 mm(表1)。镍黄铁矿原位LA-ICP-MS分析结果显示,不同镍黄铁矿颗粒中Co、Ni含量均较大,Co含量为 $1.87 \times 10^{-6} \sim 7.600 \times 10^{-6}$; Ni含量为 $11.4 \times 10^{-6} \sim 360.000 \times 10^{-6}$ (表4)。Co、Ni在镍黄铁矿表现出良好的正相关关系(图5a),表明两种元素在镍黄铁矿中具有一致的地球化学行为。两者均与Fe和Cu负相关,表明Co和Ni在镍黄铁矿中可能以类质同象的形式替代晶格中的二价铁离子和二价铜离子。

综上所述,岩体中Co和Ni在金属矿物中主要有两种赋存状态:钴、镍独立矿物和含钴、镍矿物。Co主要富集在砷化物中,而Ni在砷化物、硫化物和硫砷化物中均有富集。Co在金属矿物中含量由高到低为:辉砷钴矿>砷镍矿、方硫铁镍矿、镍黄铁矿>红砷镍矿、磁铁矿>磁黄铁矿、黄铜矿。Ni在金属矿物中的含量由高到低为:砷镍矿、红砷镍矿>硫砷镍矿、方硫铁镍矿、镍黄铁矿>辉砷钴矿>磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿。

6 钴、镍的分布规律

文中利用矿物原位微量元素分析和面扫描分析,重点分析了磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿中Co、Ni的分布。

对磁黄铁矿核-边Co、Ni定量(图7)和mapping分析(图9)发现,在同一磁黄铁矿颗粒中,Co是均匀分布的,核部到边部含量变化不明显;而Ni则表现出不均一的特征,在裂缝处含量明显偏高。对单颗粒镍黄铁矿(图8、图10)和单颗粒黄铜矿(图11)核-边Co、Ni分析和mapping分析显示,钴和镍两种元素在两种矿物中均为均一分布。以上观察与前人在夏日哈木I号岩体11、15、19号勘探线的观察一致,表明矿物结晶时物理化学条件稳定,热液作用对镍黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿中的Co影响较小(汤庆艳等,2017;包亚文等,2023)。Ni在单颗粒磁黄铁矿中分布不均一,在单颗粒镍黄铁矿和黄铜矿中均一分布,表

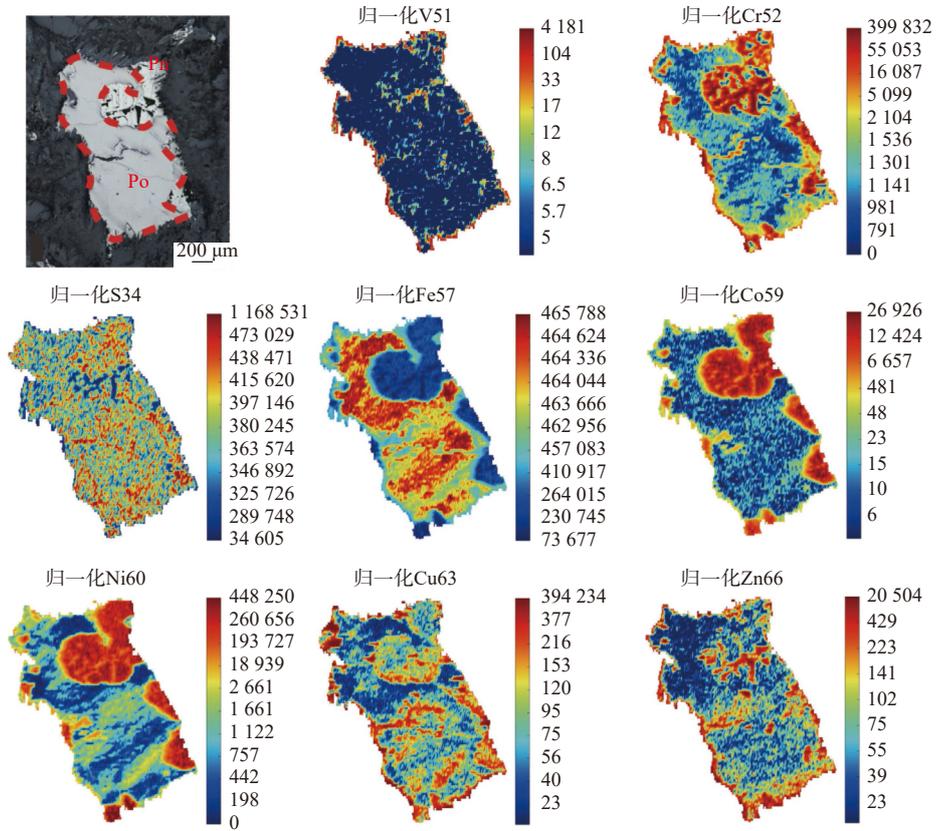


图9 夏日哈木镍钴矿床 XR-19 样品磁黄铁矿部分元素含量分布图 (10^{-6})

Fig. 9 Partial element content (10^{-6}) images of pyrrhotite (XR-19) from Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

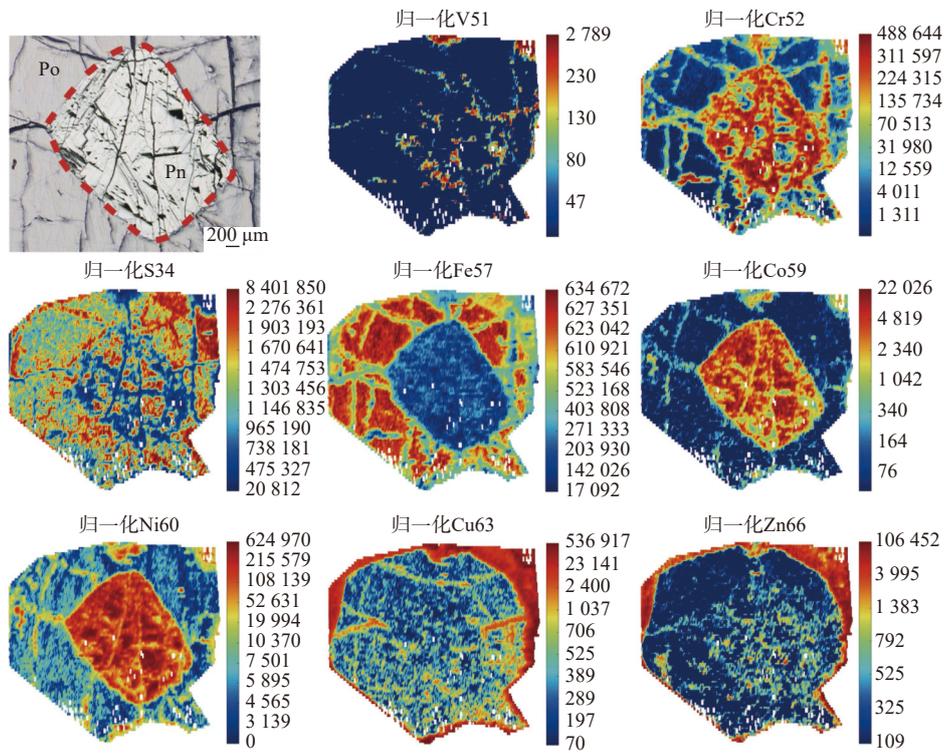


图10 夏日哈木镍钴矿床 XR-29 样品镍黄铁矿部分元素含量分布图 (10^{-6})

Fig. 10 Partial element content (10^{-6}) images of pentlandite (XR-29) from Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

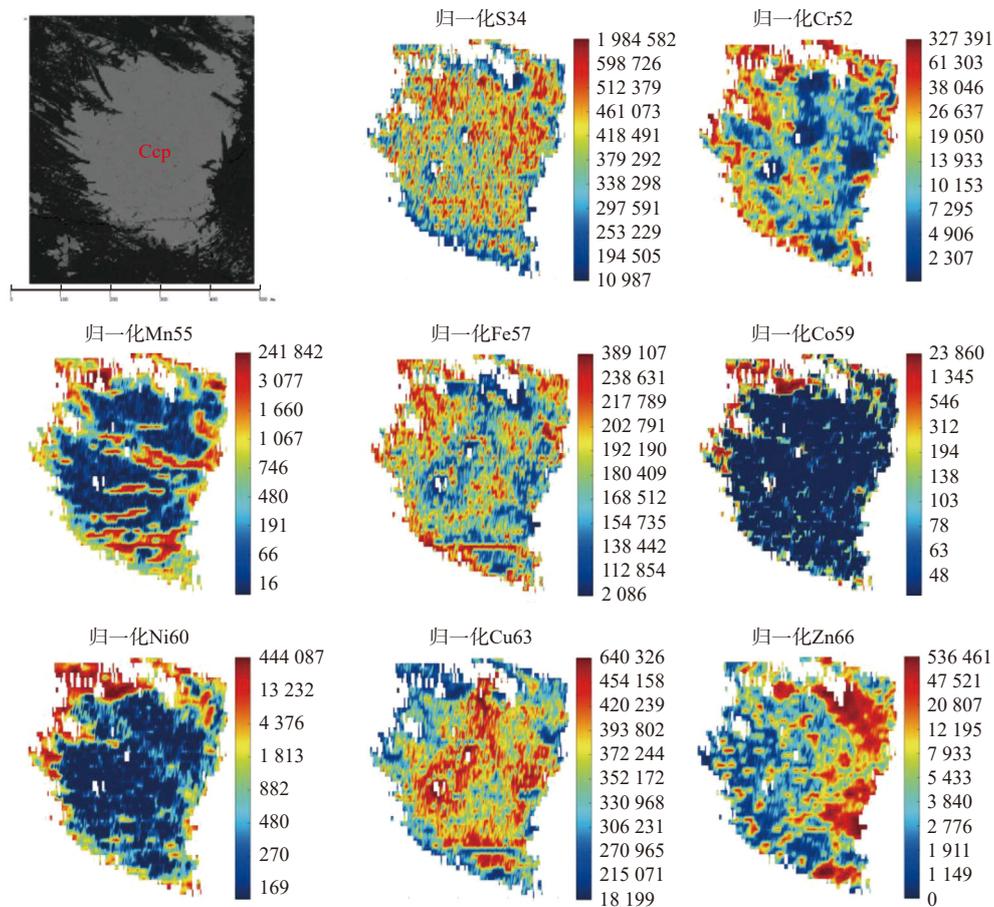


图 11 夏日哈木镍钴矿床 XR-18 样品中黄铜矿部分元素含量分布图 (10^{-6})

Fig. 11 Partial element content (10^{-6}) images of pyrite (XR-18) from Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit

明磁黄铁矿中的 Ni 可能受到后期热液富集作用影响。磁黄铁矿 Co/Ni 值变化最大,为 0.01~0.63;镍黄铁矿和黄铜矿的 Co/Ni 值分别为 0.01~0.16 和 0.01~0.05,同样说明磁黄铁矿对热液作用更敏感。

进一步对呈包裹体相和呈独立矿物相的磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿进行原位主、微量元素分析发现(图 4、图 5),被包裹磁黄铁矿的 Ni 和 Co 含量总是高于或与独立磁黄铁矿的 Ni 和 Co 含量相近,暗示磁黄铁矿受到过热液流体影响。在镍黄铁矿结果中,除少部分被包裹的镍黄铁矿具有较低的 Ni、Co 含量,大部分独立镍黄铁矿和包裹状镍黄铁矿均具有比磁黄铁矿和黄铜矿高得多的 Ni、Co 含量。并且,镍黄铁矿中的 Co、Ni 含量与 Ni、Co 独立矿物接近,远超岩体中其他含钴、镍金属硫化物(图 4、图 5),说明镍黄铁矿是最重要的含镍钴矿物,含镍黄铁矿的矿石最具镍钴资源开发潜力。

7 结论

(1)夏日哈木 1105s 钻孔中钴的独立矿物相主要为辉钴矿,在岩体中的体积分数 $<0.01\%$ 。镍的独立矿物相主要为方硫铁镍矿、砷镍矿、硫铋镍矿和红砷镍矿,几种矿物在岩体中体积分数分别为 0.01%~0.28%、 $<0.01\%$ 、 $<0.01\%$ 和 0.01%~0.28%。载钴、镍矿物为磁黄铁矿(矿物体积百分数为 0.14%~4.83%,平均为 1.27%)、镍黄铁矿(矿物体积百分数为 0.03%~3.84%,平均为 0.75%)、黄铜矿(矿物体积百分数为 0.01%~0.63%,平均为 0.07%)和磁铁矿(矿物体积百分数为 0.01%~5.07%,平均为 1.24%)。

(2)Co 在金属矿物中含量由高到低为:辉砷钴矿>砷镍矿、方硫铁镍矿、镍黄铁矿>红砷镍矿、磁铁矿>磁黄铁矿、黄铜矿。Ni 在金属矿物中的含量由高到低为:砷镍矿、红砷镍矿>硫铋镍矿、方硫铁

镍矿、镍黄铁矿>辉砷钴矿>磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿。

(3)Co、Ni在镍黄铁矿和黄铜矿单颗粒尺度上是均一分布的,两种矿物的Co/Ni值变化不大,表明矿物没有受到热液作用影响。然而,Ni在磁黄铁矿中分布不均一,并且矿物的Co/Ni值变化较大,表明磁黄铁矿对热液作用更为敏感。

(4)镍黄铁矿中的Ni、Co含量与镍、钴独立矿物接近,远超岩体中其他含钴、镍金属硫化物。因此,含镍黄铁矿的矿石应作为选冶重点关注对象。

致谢:本文写作过程中张宏福教授和张铭杰教授给予了全面指导;野外工作得到了西安地质调查中心张江伟、孔会磊等,黄河矿业有限公司乔玉财及其他相关人员的大力支持;室内分析测试工作得到了西北大学国家重点实验室王建其、西安地质调查中心周宁超、合肥工业大学汪方跃的指导和帮助。匿名审稿专家对本文提供了建设性意见和建议,在此一并感谢!

参考文献(References):

- 包亚文,张铭杰,闫继雄,等.夏日哈木镍钴硫化物矿床镍钴赋存状态及其地质意义[J].*岩石学报*,2023,39(4):1061-1074.
- BAO Yawen, ZHANG Mingjie, YAN Jixiong, et al. The Ni-Co occurrence modes and geological significance of the Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit, western China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 1061-1074.
- 杜玮.东昆仑夏日哈木镍矿区镁铁-超镁铁质岩石研究[D].西安:长安大学,2015.
- DU Wei. Study on the mafic-ultramafic rocks of Xiarihamu Nickel Mining Area in East Kunlun[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- 杜玮.东昆中岛弧带两类镁铁质—超镁铁质岩石与镍矿床研究[D].西安:长安大学,2018.
- DU Wei. Study on Two kinds of mafic ultramafic rocks and Nickel sulfide deposit in East Kunlun island arc zone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- 段雪鹏,孟繁聪,范亚洲.东昆仑夏日哈木镁铁-超镁铁岩中的钛闪石-韭闪石对成矿过程的约束[J].*岩石学报*,2019,35(6):1819-1832.
- DUAN Xuepeng, MENG Fancong, FAN Yazhou. The constraints of kaersutite and pargasite on metallogeny in Xiarihamu mafic-ultramafic intrusion, East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(6): 1819-1832.
- 姜常义,凌锦兰,周伟,等.东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景[J].*岩石学报*,2015,31(4):1117-1136.
- JIANG Changyi, LING Jinglan, ZHOU Wei, et al. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni-bearing layered mafic-ultramafic intrusion, East Kunlun: Implications for its extensional island arc environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(4): 1117-1136.
- 李华,蒋少涌,李世金,等.东昆仑造山带岩浆型镍钴矿床地质特征、成因机制与找矿标志分析[J].*岩石学报*,2023,39(04):1041-1060.
- LI Hua, JIANG Shaoyong, LI Shijin, et al. Geological characteristic-gene genetic mechanism and exploration indicators of magmatic nickel-cobalt deposits in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(04): 1041-1060.
- 李艳广,靳梦琪,汪双双,等.LA-ICP-MS U-Pb定年技术相关问题探讨[J].*西北地质*,2023,56(4):274-282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274-282.
- 刘超,王亚磊,张照伟,等.东昆仑夏日哈木矿床镍黄铁矿、磁黄铁矿成因认识及钴赋存特征[J].*西北地质*,2020,53(02):183-199.
- LIU Chao, WANG Yalei, ZHANG Zhaowei, et al. The Genetic Significance of Pentlandite and Pyrrhotite and the Characteristics of Cobalt Occurrence in Xiarihamu Cobalt-Nickel Deposit of Eastern Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(02): 183-199.
- 潘彤,陈克强,李月隆.青海省都兰县督冷沟铜-钴矿的发现过程与启示[J].*矿产与地质*,2006,20(4-5):434-436.
- PAN Tong, CHEN Keqiang, LI Yuelong. Discovery of Dulenggou copper and cobalt deposit in Dulan county, Qinghai province and its inspiration[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(4-5): 434-436.
- 潘彤,马梅生,康祥瑞.东昆仑肯德可克及外围钴多金属矿找矿突破的启示[J].*中国地质*,2001,28(2):17-20.
- PAN Tong, MA Meisheng, KANG Xiangrui. Enlightenments of prospecting breakthrough in and around Kendekeke cobalt polymetallic deposit of east Kunlun region[J]. *Chinese Geology*, 2001, 28(2): 17-20.
- 苏本勋,蒋少涌,崔梦萌,等.钴镍成矿规律与勘查技术研究进展:前言[J].*岩石学报*,2023,39(4):963-967.
- SU Benxun, JIANG Shaoyong, CUI Mengmeng, et al. Progress in mineralization and prospecting technology of cobalt and nickel: Preface[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 963-967.
- 汤庆艳,李建平,张铭杰,等.东昆仑夏日哈木镍铜硫化物矿床

- 成矿岩浆条件: 流体挥发份化学组成与碳同位素组成制约[J]. 岩石学报, 2017, 33(01): 104–114.
- TANG Qingyan, LI Jianpin, ZHANG Mingjie, et al. The volatile conditions of ore-forming magma for the Xiarihamu Ni-Cu sulfide deposit in East Kunlun orogenic belt, western China: Constraints from chemical and carbon isotopic compositions of volatiles[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(01): 104–114.
- 汪方跃, 葛黎, 宁思远, 等. 一个新的矿物面扫描分析方法开发和地质学应用[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3422–3436.
- WANG Fangyue, GE Can, NING Siyuan, et al. A new approach to LA-ICP-MS mapping and application in geology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(11): 3422–3436.
- 王冠. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- WANG Guan. Metallogensis of Nickel deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质-超镁铁质岩体岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地学前缘, 2014, 21(06): 381–401.
- WANG Guan, SUN Fengyue, LI Bile, et al. Petrography, zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mafic-ultramafic intrusion in Xiarihamu Cu-Ni deposit from East Kunlun, with implications for geodynamic setting[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(06): 381–401.
- 王小东, 张铭杰, 伏珏蓉, 等. 稀有气体同位素对岩浆侵入方向的制约: 以夏日哈木铜镍硫化物矿床为例[J]. 岩石学报, 2018, 234(11): 3433–3444.
- WANG Xiaodong, ZHANG Mingjie, FU Yurong, et al. The magmatic intrusive direction constrains from noble gas isotopic compositions: A case study of the Xiarihamu Ni-Cu sulfide deposit in East Kunlun orogenic belt, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 234(11): 3433–3444.
- 王亚磊, 李文渊, 林艳海, 等. 金川超大型铜镍矿床钴的赋存状态与富集过程研究[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 133–150.
- WANG Yalei, LI Wenyuan, LIN Yanhai, et al. Study on the Occurrence State and Enrichment Process of Cobalt in Jinchuan Giant Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 133–150.
- 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.
- 王治安, 王彬, 杨启安, 等. 青海省第五地质矿产勘查院. 夏日哈木铜镍矿 HS26 号异常区 11 勘探线剖面图[R]. 西宁: 青海省第五地质矿产勘查院, 2014.
- 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学, 1997, (04): 3–6.
- YIN Hongfu, ZHANG Kexin. Characteristics of the Eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 1997, (04): 3–6.
- 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.
- 张连昌, 张爱奎, 刘永乐, 等. 沉积岩-变沉积岩型钴矿研究进展与问题[J]. 岩石学报, 2023, 39(4): 981–997.
- ZHANG Lianchang, ZHANG Aikui, LIU Yongle, et al. Research progresses and problems of sedimentary-metasedimentary rock-hosted cobalt deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 981–997.
- ZHANG Lianchang, ZHANG Aikui, LIU Yongle, et al. Research progresses and problems of sedimentary-metasedimentary rock-hosted cobalt deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 981–997.
- 张照伟, 李文渊, 钱兵, 等. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床成矿时代的厘定及其找矿意义[J]. 中国地质, 2015, 42(03): 438–451.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, QIAN Bin, et al. Metallogenic epoch of the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt and its prospecting significance[J]. *Geology in China*, 2015, 42(03): 438–451.
- 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 东昆仑石头坑德镁铁-超镁铁质岩体矿物学特征及成矿指示[J]. 地质与勘探, 2017, 53(05): 825–837.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, QIAN Bin, et al. Mineralogical Characteristics of the Shitoukengde Mafic-Ultramafic Intrusions in East Kunlun Orogenic Belt and the Ore-Forming Indication[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(05): 825–837.
- 张照伟, 王驰源, 刘超, 等. 东昆仑夏日哈木矿区岩体含矿性特点与形成机理探讨[J]. 西北地质, 2019, 52(03): 35–45.
- ZHANG Zhaowei, WANG Chiyuan, LIU Chao, et al. Mineralization Characteristics and Formation Mechanism of the Intrusions in Xiarihamu Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit East Kunlun Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(03): 35–45.
- 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.

- 张志炳, 李文渊, 张照伟, 等. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床铬尖晶石特征及其指示意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(05): 966–975.
- ZHANG Zhibin, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, et al. Characteristics of Chromian Spinel from the Xiarihamu Magmatic Ni-Cu Sulfide Ore Deposit in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Northwest China and Their Implication[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(05): 966–975.
- Chen L M, Song X Y, Hu R Z, et al. Mg-Sr-Nd Isotopic Insights into Petrogenesis of the Xiarihamu Mafic-Ultramafic Intrusion, Northern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Petrology*, 2021, 62(2): 1–25.
- Han Y X, Liu Y H, Li W Y. Mineralogy of Nickel and Cobalt Minerals in Xiarihamu Nickel-Cobalt Deposit, East Kunlun Orogen, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 597–469.
- Li H R, Qian Y, Sun F Y, et al. Zircon U-Pb dating and sulfide Re-Os isotopes of the Xiarihamu Cu-Ni sulfide deposit in Qinghai Province, NW China[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2020, 57(8): 885–902.
- 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 Qinhai-Tibet plateau, western China[J]. *Lithos*, 2015, 216-217: 224–240.
- 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.
- Peng B, Sun F Y, Li B L, et al. The geochemistry and geochronology of the Xiarihamu II mafic-ultramafic complex, Eastern Kunlun, Qinghai Province, China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 73: 13–28.
- Song G Y, Gong Q S, Pang H. High-precision sequence stratigraphy and sand - body architecture of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 188–200.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, et al. The Giant Xiarihamu Ni-Co Sulfide Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 29–55.
- USGS, Mineral commodity summaries[R]. U. S. Geological Survey, 2019.
- Xiao X, Zhou T F, White N C. The formation and trace elements of garnet in the skarn zone from the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, Tongling ore district, Anhui Province, eastern China[J]. *Lithos*, 2018, 302: 467–479.
- Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, et al. Sr-Nd-Os-S isotope and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2016, 52(1): 51–68.
- Zhang M J, Liu Y G, Chen A P, et al. The tectonic links between Palaeozoic eclogites and mafic magmatic Cu-Ni-Co mineralization in East Kunlun orogenic belt, western China[J]. *International Geology Review*, 2023, 65: 1158–1178.