



引文格式: 艾启兴, 张照伟, 谭文娟, 等. 青海省东昆仑岩浆镍钴矿床成矿差异性分析: 以夏日哈木和石头坑德矿床为例[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 41-55. DOI: 10.12401/j.nwg.2025035

Citation: AI Qixing, ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, et al. Analysis of Metallogenic Differences in Magmatic Ni-Co Deposits in the East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: A Case Study of the Xiarihamu and Shitoukengde Deposits[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 41-55. DOI: 10.12401/j.nwg.2025035

青海省东昆仑岩浆镍钴矿床成矿差异性分析: 以夏日哈木和石头坑德矿床为例

艾启兴¹, 张照伟², 谭文娟², 王亚磊², 邵继^{3,*}, 申大利³, 张晨博⁴

(1. 青海金川矿业有限责任公司, 青海 格尔木 816000; 2. 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 710119; 3. 青海省核工业地质局, 青海 西宁 810016; 4. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059)

摘要: 镍钴属于国民经济、科技发展等方面不可或缺的关键矿产。随着新能源汽车的快速发展, 中国对镍钴资源的需求持续飙升, 超过 92% 的镍原材料和 98% 的钴原材料依赖进口, 给关键矿产资源供应带来重大安全隐患。因此, 立足国内, 加强镍钴矿成矿规律认识、寻找新的资源接续区已迫在眉睫。中国镍钴资源的有限来源与世界存在显著不同, 93% 的镍资源和 45% 的钴资源来自岩浆镍钴硫化物矿床。可见, 岩浆镍钴矿床是中国找矿勘查实现增储的最重要矿床类型。青海省东昆仑造山带发育大量镁铁-超镁铁质岩体, 拥有较好成矿地质条件和资源潜力, 展示了巨大的找矿前景。但同属同一成矿背景及相似成矿特征的夏日哈木和石头坑德矿床, 在矿石质量、矿体规模等方面存在截然不同, 一个超大型且品位较高 (118 万 tNi@0.68%), 另一个大型且品位较低 (12 万 tNi@0.44%)。这极大地制约了镍钴资源的找矿勘查和新突破。笔者立足两个矿床的成矿特征、控矿条件、成矿过程、找矿潜力的系统梳理, 发现同化混染作用是导致硫化物熔离进而形成镍钴矿床的关键方式。同化混染程度不同及围岩条件 S 含量的差异, 是造成两个矿床成矿显著差异的直接原因。进一步指出, 围岩条件是古老片麻岩的镁铁-超镁铁质侵入岩是实现镍钴找矿新发现的关键方向和空间。可支撑服务找矿工作, 提升镍钴矿资源保障能力。

关键词: 镁铁-超镁铁质岩; 镍钴硫化物; 成矿特征; 差异分析; 东昆仑

中图分类号: P588.1; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0041-15

Analysis of Metallogenic Differences in Magmatic Ni-Co Deposits in the East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province: A Case Study of the Xiarihamu and Shitoukengde Deposits

AI Qixing¹, ZHANG Zhaowei², TAN Wenjuan², WANG Yalei², SHAO Ji^{3,*}, SHEN Dali³, ZHANG Chenbo⁴

(1. Qinghai Jinchuan Mining Co., Ltd, Geermu 816000, Qinghai, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-03-17; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目“昆仑成矿带及西延镍钴锂矿产境内外对比与跨境成矿规律研究”(U2244204), 第二次青藏高原综合科学考察研究专题“稀贵金属(金、镍、钴、铬铁矿、铂族元素)科学考察与远景评估”(2019QZKK0801)及中国地质调查局项目“全国镍钴矿战略性矿产调查”(DD20240128)联合资助。

作者简介: 艾启兴(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事岩浆镍钴硫化物矿床资源调查评价工作。E-mail: aiqixing@jnm.com。

* 通讯作者: 邵继(1988-), 男, 高级工程师, 从事岩浆镍钴硫化物矿床资源勘查与潜力评价。E-mail: 873415318@qq.com。

Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geology Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Uranium Geological Bureau of Qinghai Province, Xining 810016, Qinghai, China; 4. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Nickel and cobalt are essential minerals for the national economy, and technological development. With the rapid development of new energy vehicles, China's demand for nickel and cobalt resources has surged, with over 92% of nickel raw materials and 98% of cobalt raw materials relying on imports. This dependency poses significant security risks to the supply of mineral resources, directly threatening national security. Therefore, it is urgent to enhance the understanding of the metallogenic regularity of nickel and cobalt deposits domestically and to find new resource continuation areas. China's limited sources of nickel and cobalt differ significantly from the rest of the world, with 93% of nickel resources and 45% of cobalt resources coming from magmatic nickel-cobalt sulfide deposits. Thus, magmatic nickel-cobalt deposits are the most important type of deposits for achieving resource exploration and reserve increase in China. The East Kunlun orogenic belt in Qinghai Province hosts numerous mafic-ultramafic intrusions, offering favorable metallogenic geological conditions and resource potential, indicating great prospects for exploration. However, despite sharing the same metallogenic background and similar metallogenic characteristics, the Xiarihamu and Shitoukengde deposits exhibit significant differences in ore quality and orebody scale. One is a super-large deposit with high grade (1 180 thousand tons Ni@0.68%), while the other is a large deposit with lower grade (120 thousand tons Ni@0.44%). This disparity greatly restricts the exploration and new breakthroughs in nickel and cobalt resources. This paper systematically reviews the metallogenic characteristics, ore-controlling conditions, metallogenic processes, and exploration potential of the two deposits, revealing that assimilation is the key process leading to sulfide segregation and the formation of nickel-cobalt deposits. The differences in the degree of assimilation and the sulfur content of the surrounding rocks are the direct causes of the significant metallogenic differences between the two deposits. Furthermore, it is pointed out that the mafic-ultramafic intrusions in the ancient gneiss surrounding rocks are the key direction and space for achieving new discoveries in nickel-cobalt exploration. This can support and serve the new round of strategic actions for exploration breakthroughs, enhancing the capability to secure nickel and cobalt resources.

Keywords: mafic-ultramafic rocks; nickel-cobalt sulfides; metallogenic characteristics; differential analysis; East Kunlun

随着世界各国的发展,包括发达国家的持续高位需求、发展中国家工业化的不断推进和全球化程度的不断提高,预计未来数十年,全球对矿产资源的需求将继续高速增长,如何应对和满足可持续发展的重大资源需求,一直是全球关注的焦点之一(Slack et al., 2017; 翟明国, 2024)。在绿色低碳能源转型的背景下,清洁能源技术的快速发展推动关键矿产市场实现前所未有的增长,镍、钴等能源转型矿物已经成为全球关注的焦点(郝洪昌等, 2024)。俄罗斯的诺里尔斯克(Noril'sk)发育了全球规模最大的岩浆镍钴硫化物矿床,与西伯利亚大火成岩省密切相关。局部地区的紧张局势对全球产业链和供应链造成了极大的冲击,加剧了新能源相关关键矿产(如钴、镍)的竞争,推动了全球能源和矿产资源格局的重塑。随着新兴产业的

高速发展与低碳经济时代的到来,全球对镍钴资源需求增长迅猛,镍钴资源的安全供给已引起高度关注(张照伟等, 2024)。中国镍矿资源相对贫乏,仅占世界总量的2.1%,镍资源主要来自岩浆镍钴硫化物矿床,占比高达93%(张照伟等, 2023, 2025)。与全球对比,中国镍钴矿床多数发育在造山带中,东昆仑夏日哈木是造山带背景岩浆镍钴矿床的典型代表。中国是全球的镍消费中心,2021年镍消费量165万t,占全球总消费量的61%(吴琪等, 2024)。然而,国内镍的供需矛盾突出,需要大量进口海外资源满足国内需求,对外依存度已超92%(张照伟等, 2023)。全球在大陆钴矿资源中,沉积型铜钴矿床Co约占60%、铜镍硫化物矿床中的Co约占23%、红土型镍钴矿中的Co约占15%、其他热液含钴矿床仅占2%(Schulz et al., 2018;

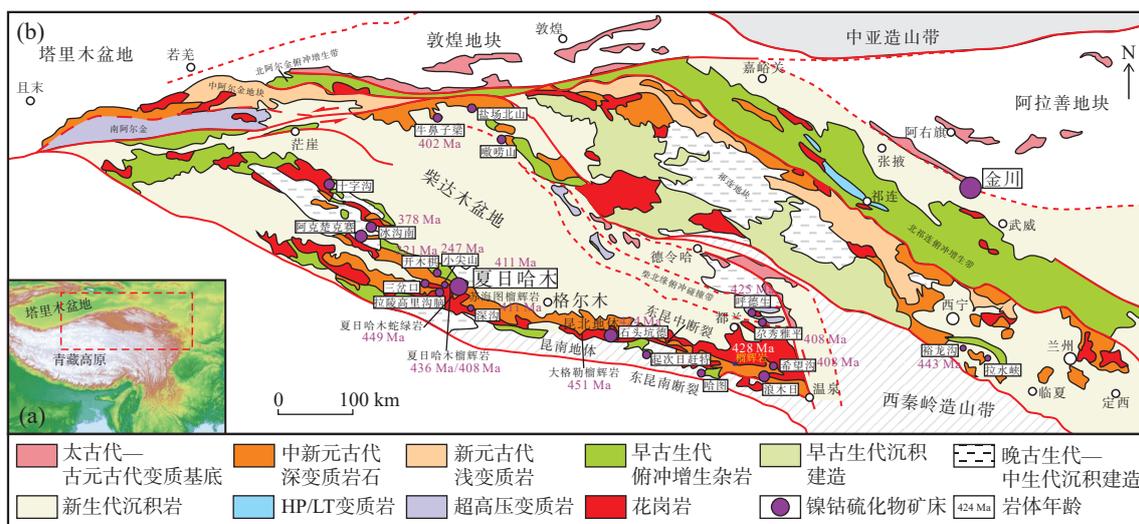
张伟波等, 2018; 王辉等, 2019; 赵俊兴等, 2019; Smith et al., 2021; Qiu et al., 2021; Williams-Jones et al., 2022; Vasyukova et al., 2022; 韩见等, 2023; 宋谢炎等, 2024)。中国钴资源的有限来源与世界存在显著不同, 约 45% 钴资源来源于岩浆镍钴硫化物矿床, 约 40% 钴资源蕴藏在热液矿床中(王焰等, 2020; 张洪瑞等, 2020; 苏本勋等, 2023), 但目前能开发利用的只有岩浆镍钴硫化物矿床, 且回收率极低, 只有不足 20%(王亚磊等, 2023)。中国虽然凭借技术和成本优势成为钴资源加工(精炼钴)的最大生产国, 但国内钴资源禀赋极低, 钴矿石的获取高度依赖进口或布局海外资源(袁小晶等, 2024)。同时, 中国又是全球最大钴资源消费国, 对外依存度已达 98%(张照伟等, 2023)。可见, 镍钴矿既是中国极度短缺的矿产。

为缓解中国镍钴资源供需矛盾, 除做好全球镍钴资源的配置外, 要加速镍钴矿有效供给, 加大国内找矿勘查力度, 提高资源利用效率。岩浆镍钴硫化物矿床是最主要的找矿勘查类型。青海省东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴矿床的找矿突破, 一举带动了东昆仑造山带镁铁-超镁铁质岩体及镍钴含矿性评价工作的热潮, 相继发现了一系列大中型岩浆镍钴硫化物矿床, 规模最大的当属石头坑德矿床, 已达大型规模。然而, 夏日哈木和石头坑德矿床具有相同的构造背景和成矿环境, 在成矿特征上存在很大的差异, 对东昆仑造山带岩浆镍钴硫化物矿床成矿差异分析及成

矿认识水平, 直接制约了区域找矿实践及新突破, 亟待解决。为此, 笔者从青海省东昆仑造山带镁铁-超镁铁质岩体及镍钴矿床成矿特征着眼, 分析成矿过程和导致成矿差异性的关键因素, 探讨东昆仑镍钴矿资源找矿潜力和重点勘查空间, 推动区域镍钴矿找矿突破。

1 区域构造背景

东昆仑造山带位于青藏高原北部(图 1a), 整体经历 5 个阶段构造演化阶段, 分别是太古宙—古元古代古陆核形成阶段、中新元古代古大陆裂解与超大陆汇聚阶段、南华纪—早古生代洋陆转换阶段、晚古生代—早古生代洋陆转换阶段以及中生代陆内造山阶段(校培喜等, 2014)。东昆仑造山带依据区域性大断裂划分了几个大的次级构造单元, 昆北断裂带、黑山-那陵格勒断裂、昆中断裂带以及昆南断裂带将东昆仑自北而南分为祁漫塔格早古生代岩浆弧、中昆仑微陆块以及昆南增生楔杂岩带 3 部分(图 1b)。东昆仑造山带以北依次是柴达木地块、柴北缘高压超高压变质带、祁连地块、北祁连造山带、阿拉善地块(图 1b)。在阿拉善地块, 发育有世界第三大金川巨型岩浆镍钴硫化物矿床, 也是中国境内最大的岩浆镍钴矿床。在祁连地块, 或南祁连造山带, 产出了拉水峡、裕龙沟、亚曲等 441 ~ 443 Ma 的小型岩浆镍钴硫化物矿床(图 1b)



a. 青藏高原; b. 东昆仑及邻区位置

图1 青海省东昆仑岩浆镍钴硫化物矿床地质分布略图(据 Zhang et al., 2019 修改)

Fig. 1 The sketched geological distribution map of magmatic Ni-Co sulfide deposits in eastern Kunlun, Qinghai Province of China

(Zhang et al., 2014), 在柴北缘高压超高压变质带及北祁连缝合带内, 发现了 441 ~ 464 Ma 的成岩年龄信息 (Song et al., 2016), 上述几个小型矿床的岩浆成矿作用可能与俯冲、碰撞及地块边缘的成矿作用关系密切, 但岩体规模小, 赋存金属有限而未被足够重视 (张照伟等, 2019)。在昆北造山带的东部, 发现有榴辉岩约 428 Ma (Meng et al., 2013)。其他几处蛇绿混杂岩的年龄变化在 467 ~ 518 Ma, 并且这些蛇绿混杂岩的玄武质岩石表现出了典型的 MORB 特征。由此推测, 昆北造山带地体大约于 428 Ma 拼贴到柴达木克拉通的南部边缘。在东昆仑造山带内, 新发现了夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床, 该矿床的发现, 一举改变了中国岩浆镍钴矿床的分布格局, 发育在柴达木地块南缘的东昆仑造山带中, 是地块边缘岩浆成矿作用的结果 (张照伟等, 2015; 潘彤, 2019; 张照伟等, 2020; 李文渊等, 2023)。石头坑德是继夏日哈木之后新发现的大型岩浆镍钴硫化物矿床 (Zhang et al., 2018; Wang et al., 2021)。随后又相继发现了冰沟南、开木琪、小尖

山、希望沟、拉陵高里等镁铁-超镁铁质岩体 (王亚磊等, 2017; 张照伟等, 2017a; Liu et al., 2018)。东昆仑造山带以昆北断裂、昆中断裂及昆南断裂为界划分为昆北造山带、昆中地块及昆南增生楔 (校培喜等, 2014)。夏日哈木、石头坑德岩浆镍钴硫化物矿床均位于昆北地体的边界位置 (钟世华等, 2025), 其北部邻近昆北断裂, 其南部邻近昆中断裂 (图 1b)。东昆仑岩浆镍钴矿床的产出位置, 区域性大断裂及其次级断裂的发育, 为深部岩浆上涌及成矿作用提供了条件。

2 岩(矿)体地质特征

2.1 夏日哈木镁铁-超镁铁质岩体

夏日哈木镍钴矿床的主矿体主要赋存于夏日哈木辉石岩及橄榄岩中, 夏日哈木岩体长约为 1.5 km, 宽约为 0.8 km, 长轴方向近 EW 向, 西段略向南偏转 (图 2a), 岩体顶界面东高西低, 东段出露于地表, 西段隐伏于地下, 且越向西埋深越深 (图 2b), 总体形态为

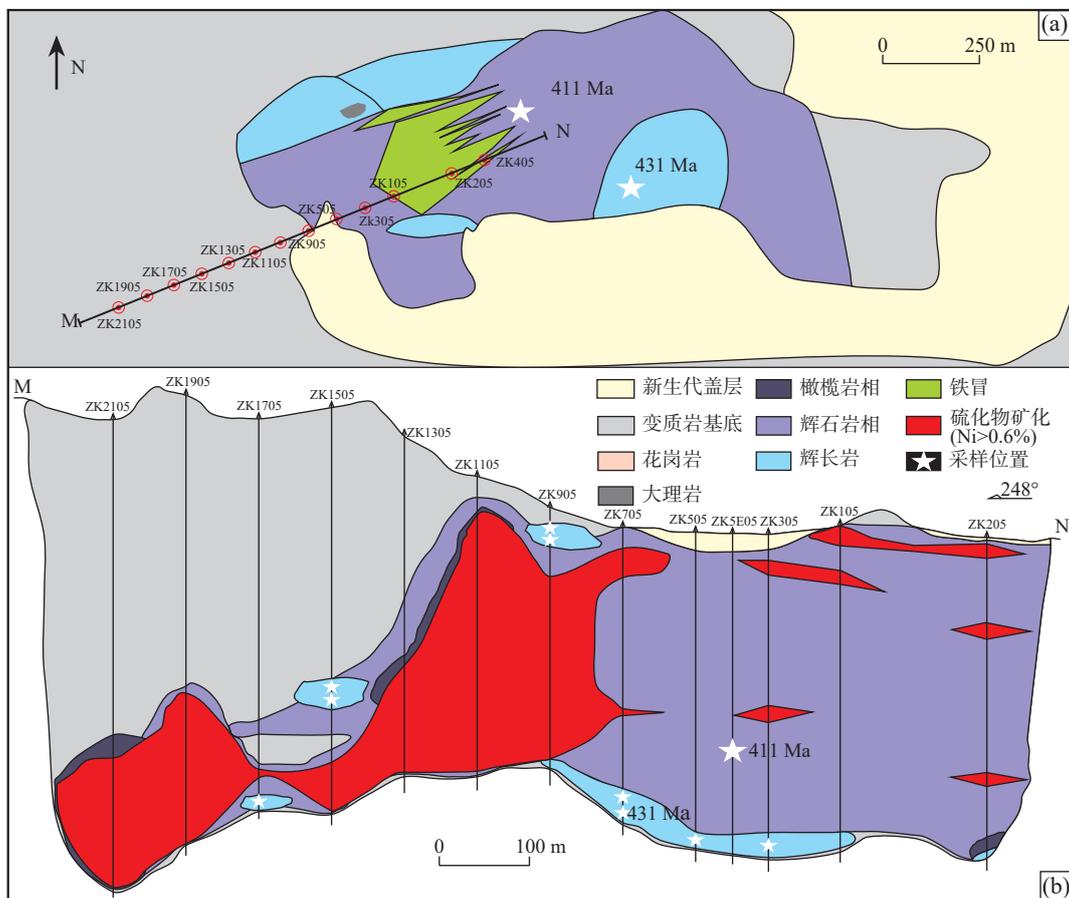
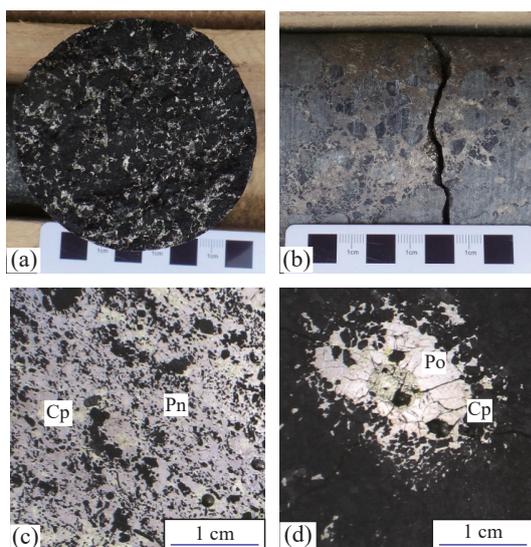


图2 东昆仑夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床平面图(a)及剖面图(b) (张照伟等, 2021a)

Fig. 2 (a) Plan view and (b) cross section of the Xiarihamu magmatic Ni-Co sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt

向西倾伏的岩床(图2)。夏日哈木岩体在地表有氧化蚀变带及铁帽出露,主要集中在0号勘探线东西两侧(图2a)。从勘探线钻孔纵剖面图(图2b)来看,岩体岩性主要是辉石岩、橄榄岩、辉长岩及少量的花岗岩脉,并且橄榄岩相越向西橄榄石含量逐渐增多,同时埋深加大,围岩地层厚度增厚。在钻孔横剖面图上上述情况则更加明显直观,沿着NM线248°方向,岩石基性程度变深、岩体埋深增大、橄榄石含量增多、矿体增厚变富(图2b)。

夏日哈木矿区镍钴矿体主要赋存于辉石岩与橄榄岩中,基本不含矿的辉长岩与含矿的辉石岩及橄榄岩明显不是同期的产物,岩体形成时代也说明了这一点,无矿辉长岩形成时代为431 Ma,含矿辉石岩形成时代为411 Ma(Li et al., 2015a; 张照伟等, 2015; Song et al., 2016; 张照伟等, 2016; Zhang et al., 2017)。镍钴矿体主要赋存于夏日哈木岩体的辉石岩及橄榄岩中,主矿体位于2号勘探线以西地表以下的空间,在9号勘探线、11号勘探线的位置区域,镍钴矿体达到了最厚(超过300 m),随着勘探线号的变大(向西),岩体变薄、埋深增厚、橄榄石增多、镍矿体变富(图2b)(Li et al., 2015a; 张照伟等, 2015; Zhang et al., 2017)。矿石类型以稠密浸染状(图3a)和团块状(图3b)为主,矿石矿物主要是镍黄铁矿、磁黄铁矿及少量的黄铜矿,结构构造中可见明显的橄榄石被辉石包裹的典型包橄结构(图3c、图3d)。



a. 稠密浸染状矿石; b. 团块状矿石; c、d. 矿石显微照片;
Cp. 黄铜矿; Po. 磁黄铁矿; Pn. 镍黄铁矿; Ol. 橄榄石

图3 夏日哈木镍钴矿床矿石及显微照片

Fig. 3 Ore and microphotographs of Xiarhamu Ni-Co deposit

2.2 石头坑德镁铁-超镁铁质岩体

石头坑德镁铁-超镁铁质岩体主要由I号、II号及南部的III号岩体组成,岩性为辉石岩、橄辉岩、橄榄岩、辉长岩等,岩体整体侵位于金水口群白沙河岩组及万保沟大理岩凝灰岩中(图4a)。区域内岩浆构造活动发育,闪长岩、花岗岩及后期脉岩均有不同程度出露。岩浆镍钴矿体基本赋存于I号岩体的辉石岩及橄榄岩中。I号岩体出露面积约为5.8 km²,超镁铁岩体呈不规则形状侵位于早期辉长岩内,出露面积不等,其中最大者达1.4 km²,地表主要出露四个规模较大的超镁铁质岩,呈岩株状产出(图4a)。岩体整体倾向SE,倾角变化较大。镁铁质、超镁铁质岩相均有发育,表明岩浆分异较充分,野外观察各岩相间的侵位先后顺序为辉长岩→超镁铁岩(多期次侵位)→中酸性岩脉(张照伟等, 2017a; 董俊等, 2017)。

辉长岩呈灰色,中-细粒结构,辉长结构,堆晶结构,块状构造。主要由斜长石(50%~60%),单斜辉石(30%~45%),斜方辉石(10%~15%)及少量不透明矿物(1%)组成。岩石总体为辉长结构,在局部范围内可见牌号较低的斜长石包裹辉石,形成包辉结构。不透明矿物主要为磁黄铁矿,镍黄铁矿等,经常生长于造岩矿物的粒间或晶内(张照伟等, 2017a; 董俊等, 2017)。

辉石岩主要表现为深灰色,中-细粒结构,包辉结构,堆晶结构,块状构造。主要由斜方辉石(40%~50%)、单斜辉石(30%~40%)、斜长石(5%~10%)及少量不透明矿物(3%~5%)组成。斜方辉石多为自形一半自形短柱状,单斜辉石为半自形短柱状。岩石中局部可见堆晶结构,斜方辉石和大部分单斜辉石为堆晶相,斜长石和少部分单斜辉石为填隙相。各矿物均较新鲜,在斜长石较集中部位可见大颗粒斜长石包裹斜方辉石,形成包辉结构(张照伟等, 2017b; 董俊等, 2017)。

石头坑德镍钴矿体基本赋存于中-粗粒辉石岩和含长橄辉岩及橄榄岩中,属于I号岩体北西部,多为贯入式矿体,两侧围岩为中-细粒橄辉岩(图4b)。该矿体长约为1150 m,宽约为4.06~30 m,走向近25°,倾向约为115°,倾角约为75°,地表Ni平均品位为1.21%;深部钻孔已控制,Ni品位为0.31%~1.91%,变化较大。深部工程验证该矿具有典型的贯入式矿体特征(图5b)。矿石类型主要为团块状和浸染状(图5a),矿体与围岩接触界线较为明显(图5b)。磁黄铁矿呈金黄色,强金属光泽,半自形-他形粒状,为多呈细粒状、粒状集合体分布,主要为浸染状和细脉状。

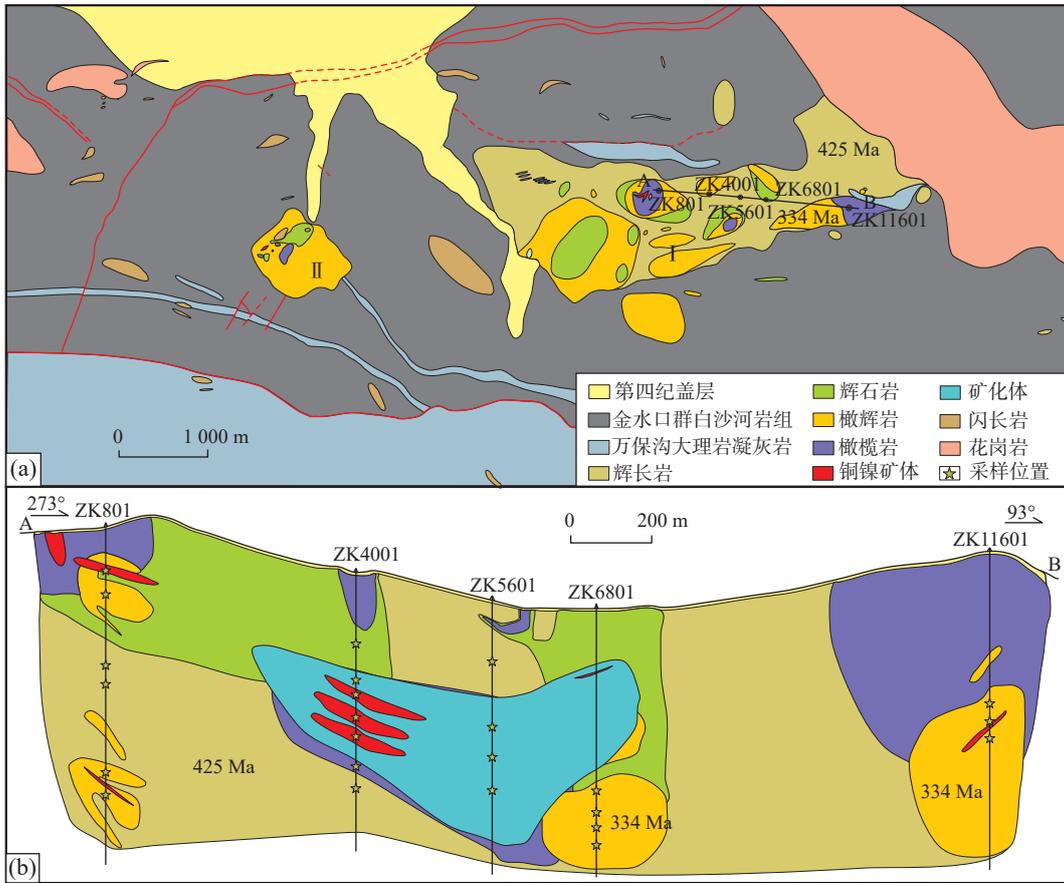
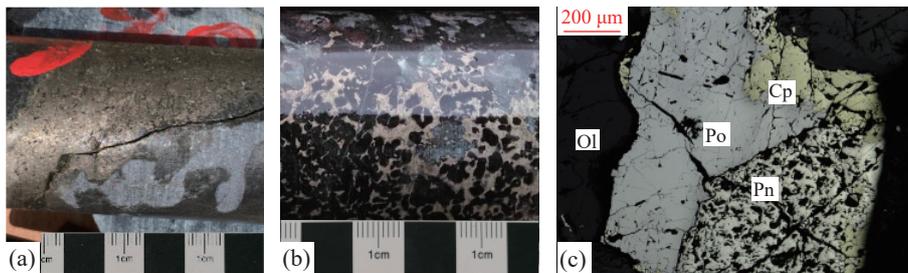


图4 东昆仑石头坑德岩浆镍钴硫化物矿床平面图(a)及剖面图(b) (Zhang et al., 2018)

Fig. 4 (a) Plan view and (b) cross section of the Shitoukengde magmatic Ni-Co sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt



a.石头坑德浸染状矿石; b.石头坑德贯入状矿石; c.石头坑德矿石显微照片; Cp.黄铜矿; Po.磁黄铁矿; Pn.镍黄铁矿; Ol.橄榄石

图5 石头坑德岩浆镍钴硫化物矿床矿石及显微照片

Fig. 5 Ore and microphotographs of the Shitoukengde Magmatic Ni-Co sulfide deposit

镍黄铁矿属于等轴晶系硫化矿物,在偏光镜下呈淡黄色和乳黄色,无多色性,无内反射;在正交偏光镜下呈均质性,镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿多为共生关系(图5c)。

3 东昆仑含矿岩体地质及地球化学特征

3.1 矿相学特征

对夏日哈木及石头坑德镍钴硫化物矿床做了系

统的矿相学研究,基本特征相似,主体由磁黄铁矿、镍黄铁矿及黄铜矿构成。磁黄铁矿,硫化物中含量最多的金属矿物,呈半自形-他形粒状聚晶,与镍黄铁矿紧密共生,自然光下呈青铜色,略具银白光泽,显微镜下呈浅玫瑰色,略带紫色调,具多色性,强非均质性。可见固溶体分离结构、互边结构、海绵陨铁结构等(张照伟等, 2021b)。

磁黄铁矿的通式为 $Fe_{1-x}S$, 具有六方磁黄铁矿(hpo)、单斜磁黄铁矿(mpo)和斜方磁黄铁矿(tr)3个

同质多象变体,以六方磁黄铁矿和单斜磁黄铁矿比较常见。在表达式上,六方磁黄铁矿 Fe 原子含量百分比(mol%)为 47.0%~47.8%,对应的分子式为 $\text{Fe}_{0.887}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.916}\text{S}$,单斜磁黄铁矿 Fe 原子含量百分比为 46.5%~47.0%,对应分子式为 $\text{Fe}_{0.869}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.887}\text{S}$ 。通过前人电子探针数据可以看出(丰成友等, 2016),磁黄铁矿的类型以六方磁黄铁矿为主,与单斜磁黄铁矿出现频率比值为 4:3。

镍黄铁矿,硫化物中最重要的金属矿物,多呈半自形-他形粒状,与磁黄铁矿连生,肉眼难以鉴定,镜下呈淡黄色或乳黄色,反射色较磁黄铁矿略高,无多色性,均质性,多见镍黄铁矿出溶于磁黄铁矿形成固溶体分离结构、结状结构、火焰状结构。化学组成 $(\text{Ni}, \text{Fe})_9\text{S}_8$, 探针分析结果表明, Ni 含量介于 31.95%~35.03%, S 含量为 32.45%~33.23%, Co 的含量偏高,为 1.16%~2.73%;还含少量 Te 为 0.23%~0.43%(丰成友等, 2016),说明 Co 和 Te 主要以类质同像的形式赋存于镍黄铁矿中。

黄铜矿,在镍矿石中常有产出,多呈他形粒状集合体,在各个光薄片,黄铜矿均有分布,但含量较少,镜下呈铜黄色,弱非均质性,与磁黄铁矿(Po)和镍黄铁矿(Pn)共生,形成黄铜矿+磁黄铁矿+镍黄铁矿的典型共生组合,发育在颗粒间和边部,生成顺序略晚于磁黄铁矿。光片中未见有后期热液交代类型的黄铜矿出现。

磁铁矿,在硫化物中常有产出,多呈粒状集合体,与镍黄铁矿伴生。镜下呈灰色,均质性,无内反射,多见早期磁铁矿从富铁的单硫化物固溶体中晶出,呈他形粒状集合体与镍黄铁矿共生或沿岩屑边部充填交代,后期磁铁矿沿造岩矿物裂隙发育。

3.2 岩石地球化学特征

夏日哈木及石头坑德辉长岩样品 SiO_2 含量介于 49.66%~51.94%, MgO 含量介于 6.69%~8.32%, Fe_2O_3 含量介于 5.44%~6.75%, Al_2O_3 含量介于 17.36%~19.29%, CaO 含量介于 9.17%~12.61%, TiO_2 含量介于 0.40%~1.41%,各矿物的变化范围较小(张照伟等, 2018)。橄榄岩相和辉石岩相岩石中 SiO_2 含量介于 36.33%~42.42%, MgO 含量介于 29.19%~38.09%, Fe_2O_3 含量介于 1.92%~6.63%, Al_2O_3 含量介于 0.57%~7.05%, CaO 含量介于 0.82%~5.67%, TiO_2 含量介于 0.05%~0.37%,各组分的变化范围均较大。m/f 值变化介于 2.15~4.33,属铁质系列的镁铁-超镁铁岩。在

主量元素相关性图解上,不同岩体中各组分的变化范围呈现出一定的相似性, SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、 TiO_2 与 MgO 之间呈一定的负相关性, Fe_2O_3 与 MgO 之间呈明显的正相关性。

夏日哈木及石头坑德辉长岩样品中, $\sum\text{REE}$ 为 $18.54 \times 10^{-6} \sim 39.19 \times 10^{-6}$,平均值为 28.62×10^{-6} 。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 0.94~1.64, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 1.35~1.59, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 1.81~2.78,表明轻、重稀土元素内部的分馏较弱,而轻、重稀土元素之间分馏相对较强(张照伟等, 2018)。橄榄岩相和辉石岩相岩石中, $\sum\text{REE}$ 为 $8.92 \times 10^{-6} \sim 47.93 \times 10^{-6}$,平均值为 23.27×10^{-6} ,其中,橄榄岩相 $\sum\text{REE}$ 平均值为 22.29×10^{-6} ,辉石岩相 $\sum\text{REE}$ 平均值为 25.23×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Sm})_N=1.35 \sim 3.54$,平均为 1.81; $(\text{La}/\text{Yb})_N=1.79 \sim 7.55$,平均为 3.31; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N=0.83 \sim 1.88$,平均为 1.44; $\delta\text{Eu}=0.04 \sim 0.39$,平均为 0.18,表现为明显的负 Eu 异常。以上特征表明,赋矿岩体稀土元素总量较低,重稀土元素内部分馏较弱,而轻稀土元素内部和轻、重稀土元素之间分馏较强。各岩石类型的微量元素原始地幔标准化蛛网图,均具有较明显的 Nb、Ta、Ti 的负异常。

3.3 铂族元素特征

夏日哈木及石头坑德镍钴硫化物矿床矿石 PGE 含量为 $2.98 \times 10^{-9} \sim 349.21 \times 10^{-9}$,平均为 95.98×10^{-9} 。样品以 IPGE(Os, Ir, Ru, Rh)为主, PPGE(Pt, Pd)含量明显低于 IPGE(Zhang et al., 2017)。在矿石中,除了 Pt 以外,其余 PGE 含量与硫含量总体呈较好的正相关关系,表明 PGE 与硫化物的强烈相容性,且 PGE 的分配受岩浆硫化物的控制。而 Pt 的异常可能是由于成矿时硫化物的后期热液作用导致的(Zhang et al., 2018)。100% 硫化物计算后,夏日哈木矿石 PGE 含量为 $28.31 \times 10^{-9} \sim 438.50 \times 10^{-9}$,平均为 119.45×10^{-9} ,矿石 Pd/Pt 值为 $0.20 \times 10^{-9} \sim 23.58 \times 10^{-9}$,平均为 5.96×10^{-9} 。Ni/Cu 值为 12.98~68.4,远大于 1,表明矿床以 Ni 为主。Cu/Pd 的值较高,介于 $87.41 \times 10^3 \sim 460.53 \times 10^3$,平均为 228.16×10^3 。在原始地幔标准化图解中,均表现为向左倾斜的曲线,总体上显示出 Cu、Ni 较 PGE 富集的特征。

3.4 Sr-Nd-S 同位素地球化学特征

夏日哈木及石头坑德辉长岩全岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.711 50~0.712 75,初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.512 41~0.512 47(张照伟等, 2018)。根据辉长岩的锆石 U-Pb 年龄 431.3 Ma(Li et al., 2015a),分别计算求得辉长岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.710 33~0.712 46, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值变化范围

为 $-2.59\sim+0.08$ 。二辉橄榄岩和斜方辉石岩初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.708\ 031\sim 0.735\ 188$,平均值为 $0.714\ 273$,初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值 $0.512\ 302\sim 0.512\ 520$,平均值为 $0.512\ 449$ 。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 根据超镁铁质岩体的锆石U-Pb年龄 411.6Ma 计算求得 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 $0.706\ 426\sim 0.710\ 463$, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 变化范围分别为 $-5.74\sim -1.97$ (Zhang et al., 2017)。

样品中硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $2.4\text{‰}\sim 6.4\text{‰}$,平均为 4.78‰ 。通过归纳亏损地幔的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 -1.80‰ (Labidi et al., 2013),顽辉石球粒陨石、普通球粒陨石和碳质球粒陨石的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 分别为 $-0.26\pm 0.07\text{‰}$ 、 $-0.02\pm 0.06\text{‰}$ 、 $0.49\pm 0.16\text{‰}$,推断出 -1.80‰ 到 0.49‰ 可以大致代表地幔的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 组成(Liu et al., 2018)。夏日哈木矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 变化均值为 4.78‰ ,远高于幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围 $-1.80\text{‰}\sim 0.49\text{‰}$ 。从数据表可以看出,辉石岩相中矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值 \rightarrow 橄榄岩相矿石 $\delta^{34}\text{S}$ 值是依次升高的(张照伟等, 2021b)。

4 成矿过程及差异性分析

4.1 构造背景与岩浆源区性质

以夏日哈木和石头坑德为代表的镁铁-超镁铁质岩体,整体形成于 $406\sim 430\text{Ma}$ (张照伟等, 2024),是伴随古特提斯洋裂解岩浆活动的结果(李文渊, 2020, 2024)。在与镁铁-超镁铁质岩浆活动有关的镍钴硫化物矿床中,母岩浆性质是成矿的关键。一般认为,与镍钴矿床相关的原生岩浆系列可分为两类,一类是科马提质岩浆,另一类是拉斑玄武质岩浆。在镜下可见夏日哈木和石头坑德含矿镁铁-超镁铁质岩体中橄榄石边缘的斜方辉石反应边和斜方辉石与单斜辉石共生等拉斑玄武岩相特征(张照伟等, 2021b)。由于蚀变、风化等原因,玄武岩的化学成分经常会发生变化,其中的斜长石也是最先发生成分变化的矿物,不能准确判断玄武岩的系列。而单斜辉石作为主要造岩矿物之一,是玄武岩主微量元素的重要赋存矿物相,通常利用单斜辉石的主量元素来指示原生岩浆性质。在单斜辉石相关($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-TiO}_2$)图解中(图6),大部分样品也落入拉斑玄武岩系列,进一步表明母岩浆为拉斑玄武质岩浆。

由于早期结晶的橄榄石与残余晶间熔体要发生再平衡作用,镁铁矿物中的Mg含量会逐步下降,所以Fo值最高的橄榄石成分可能更接近于液相线橄榄

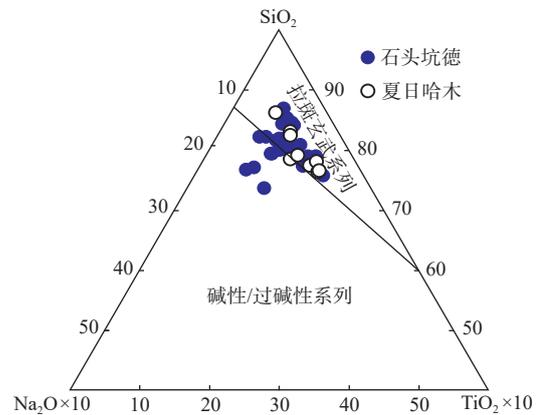


图6 单斜辉石 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-TiO}_2$ 关系图(张照伟等, 2021b)

Fig. 6 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-TiO}_2$ diagram of clinopyroxene

石的组成。夏日哈木和石头坑德超镁铁质岩体方辉橄榄岩、二辉橄榄岩中橄榄石Fo最高均为89,对应样品中的TFeO含量分别为 10.92% 和 10.62% ,估算出与之平衡状态的岩浆中MgO的含量为 12.47% 和 12.82% ($K_d=0.3$),小于科马提岩的范围($\text{MgO}>18\%$)(Zhang et al., 2018)。在Ni/Cu-Pd/Ir图解上(图7),大多数样品落在高镁玄武岩区域,初步显示了与高镁玄武质岩浆有关的特征。结合岩体中可见一定数量的角闪石和黑云母等含水矿物,且大部分角闪石根据Si-Al和 $\text{Na+K-Al}^{\text{IV}}$ 图解确定属于幔源成因,推测东昆仑含镍钴矿岩体的母岩浆为含水的高镁拉斑玄武岩浆(张照伟等, 2021a)。

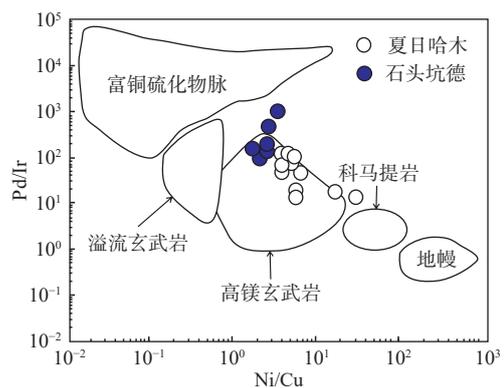


图7 夏日哈木和石头坑德Ni/Cu-Pd/Ir图解(Zhang et al., 2018)

Fig. 7 Ni/Cu-Pd/Ir diagram of the Xiarihamu and Shitoukengde deposits

夏日哈木和石头坑德赋矿岩体中相容元素Cr(634×10^{-6} ; $2\ 431\times 10^{-6}$)和Ni($3\ 330\times 10^{-6}$; $1\ 612\times 10^{-6}$)含量远高于原生玄武岩岩浆范围($\text{Cr}=300\times 10^{-6}\sim 500\times 10^{-6}$, $\text{Ni}=300\times 10^{-6}\sim 400\times 10^{-6}$),表明其不是原始的地

幔橄榄岩部分熔融的产物,明显属于演化的岩浆(张照伟等, 2018)。岩体以富集轻稀土元素、贫重稀土元素以及 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素的亏损为特征,这一特征可以有两种形成机制,一是强烈的地壳混染;二是由于俯冲带流体/熔体交代作用而形成的富集地幔的部分熔融。从判断俯冲物质加入程度的图解可以看出,夏日哈木和石头坑德镁铁-超镁铁质岩体主要是受到了俯冲带物质的加入,这些物质可能是浅部的含水流体,也可能是深部的含水熔体,但超镁铁质岩体未显示浅部含水流体加入的特征,所以夏日哈木和石头坑德超镁铁质岩体主要受到了深部(大于 2 GPa)含水熔体的影响(张照伟等, 2021b)。而 Th/Nb 值(0.27~1.38)较高,大离子亲石元素富集及 Nb、Ta 亏损等特征表明源区含有交代的地幔楔物质。

夏日哈木和石头坑德镁铁-超镁铁质岩体的来源存在着来自软流圈地幔和岩石圈地幔的争议。EMII 地幔通常被解释成有地壳物质的混入,而 EMI 地幔代表了岩石圈地幔,通过 $(^{87}\text{Sr}-^{86}\text{Sr})_t-\epsilon\text{Nd}(t)$ 相关图发现(图 8),夏日哈木和石头坑德超镁铁质岩体并未显示出岩石圈地幔物质富集(EMI)的特征,而是存在向 EMII 地幔源区富集的趋势,说明其岩石圈地幔物质参与很少。

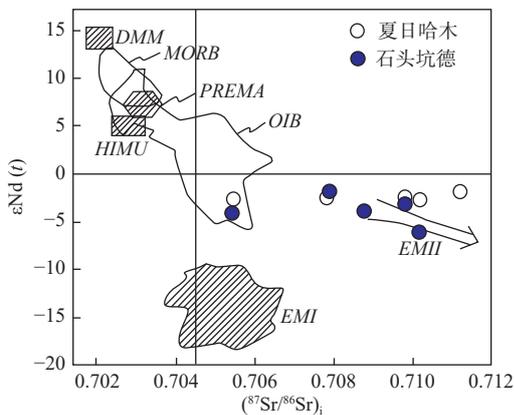


图8 夏日哈木和石头坑德镁铁质-超镁铁质岩石的 $(^{87}\text{Sr}-^{86}\text{Sr})_t-\epsilon\text{Nd}(t)$ 相关图

Fig. 8 $(^{87}\text{Sr}-^{86}\text{Sr})_t-\epsilon\text{Nd}(t)$ diagram of the Xiarhamu and Shitoukengde deposits

4.2 成矿差异性分析

硫化物饱和机制是决定岩浆镍钴矿床形成的关键环节,当硫化物过饱和时,从硅酸盐岩浆中熔离出来且富含亲铜元素的硫化物液滴发生聚集、就位,固结形成岩浆镍钴硫化物矿体(Naldrett, 2011)。幔源岩浆分离结晶、岩浆混合、地壳混染等方式则是岩浆矿床中硫达

到饱和并发生硫化物熔离的重要因素(张照伟等, 2022)。岩浆混合作用是两种或两种以上不同成分的岩浆以不同的比例混合,促使硫化物达到饱和。以端元成分为铁镁质和长英质岩浆发生混合作用的情况较为常见。夏日哈木及石头坑德岩浆镍钴硫化物矿床未见明显的岩浆混合对成矿的贡献(张照伟等, 2024)。

(1) 分离结晶作用

岩浆分离结晶可以通过消耗岩浆体系中 FeO, 改变岩浆组分,促使硫化物熔离(Liu et al., 2018),所以分异较好的镁铁-超镁铁质岩体往往具有较好成矿潜力(薛胜超等, 2024)。但由于岩浆分离结晶程度往往较低,且在橄榄石结晶分异时会造成 Ni 的亏损,仅靠分离结晶作用,即使岩浆中硫最终达到饱和,往往不能形成具有重要经济意义的矿床(张照伟等, 2018)。地壳混染主要以两种形式促进硫化物饱和,一种是混染的物质降低了硫化物饱和和所需的硫含量(SCSS),如水的混染、碳质成分的混染、硅质成分的混染,均可促进硫化物饱和(Ripley et al., 2013);另一种是混染的物质使岩浆体系 S 含量显著升高,促进硫化物饱和,前人通过测定围岩中硫化物的原位 S 同位素和计算同位素两端元混染模型等方式发现,地壳中 S 的加入对镍钴硫化物成矿尤为重要(Zhang et al., 2018; Liu et al., 2018)。

分离结晶作用是指岩浆在结晶作用开始后,结晶矿物与残余岩浆分离的过程。伴随着温度逐步降低和 FeO 的消耗,分离结晶作用可以促进硫化物的熔离。在夏日哈木和石头坑德镁铁-超镁铁质岩体中,富铬尖晶石在橄榄岩相中呈自形立方体被橄榄石和斜方辉石包裹,橄榄石在橄榄岩相和辉石岩相中主要呈堆晶相,斜方辉石在辉石岩相中主要呈堆晶相。在全岩主要元素与 MgO 地球化学图解中, FeO^T 与 MgO 具有正相关关系,表明存在橄榄石、铬尖晶石、辉石等早期结晶矿物的分离结晶作用(张照伟等, 2015)。 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO 与 MgO 呈负相关关系,表明在夏日哈木和石头坑德镁铁-超镁铁质岩体中存在辉石或长石的分离结晶。微量元素 Eu 明显亏损,显示岩体发生了斜长石的分离结晶作用。结合 $(\text{Mg}+\text{Fe})/\text{Ti}-\text{Si}/\text{Ti}$ 图解(张照伟等, 2021a),夏日哈木和石头坑德含矿岩体主要经历了橄榄石、斜方辉石和尖晶石的分离结晶,并伴有少量单斜辉石和斜长石等矿物的分离结晶。

FeO 是控制硫在岩浆中溶解度的重要组分, SCSS 与 FeO 呈强相关关系,即随着岩浆中 FeO 含量的下降,硫的溶解度也逐渐降低。所以矿物结晶过程不

断消耗岩浆熔体中的 FeO, 有利于硫化物达到饱和。在夏日哈木 ZK11E05 中, 橄榄岩全岩镍与尖晶石的 FeO 含量成反比 (Liu et al., 2018), 表明在尖晶石结晶过程中可能有更多的硫化物形成。在石头坑德 ZK4001 钻孔中, 橄榄岩相中全岩 Ni 含量与尖晶石 FeO 含量成正比 (Zhang et al., 2018), 暗示该矿床中的尖晶石结晶对硫化物饱和和影响不大。已有研究认为, 如果岩浆发生大约 20% 的分离结晶作用, 残余岩浆中硫含量上升将会达到饱和曲线位置, 进一步的分离结晶作用就可以促进硫化物的熔离, 而大多数玄武岩浆在地表条件下硫将永远达不到饱和, 除非岩浆至少有 60% 的分离结晶 (Tao et al., 2015)。Liu 等 (2018) 通过 rhyolite-Melt 软件, 在 1 kb、FMQ+1 的氧逸度的条件下发现夏日哈木镁铁-超镁铁质岩体中矿物分离结晶作用对夏日哈木总硫含量的贡献仅为 3.3%, 所以夏日哈木和石头坑德岩体中的尖晶石、斜方辉石结晶对成矿贡献较小, 不是主导因素 (Li et al., 2015b)。

(2) 同化混染作用

硫的加入是导致硫饱和的重要方式, 东昆仑地壳中浅部围岩 S 主要来源于古元古代金水口群花岗岩片麻岩中的黄铁矿, 含 S 围岩同化混染被卷入岩浆中, 以 H_2S 的形式融入岩浆参与成矿。辉石岩、橄榄岩的 S 同位素含量、 H_2S 含量与 Ni 含量明显成正比, 通过 S 同位素两端元混染模型发现, 地壳硫对夏日哈木和石头坑德总 S 的贡献程度分别为 59.7% 和 41.8% (图 9)。

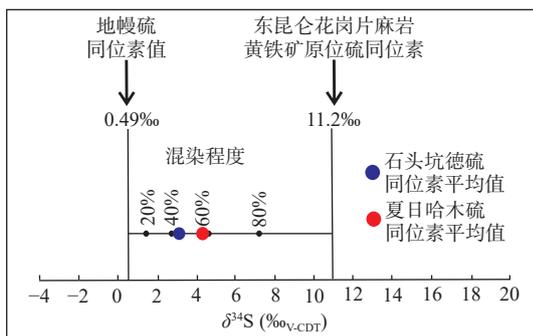


图9 夏日哈木和石头坑德岩体混染地壳硫程度示意图

Fig. 9 Diagram of the degree of crustal sulfur contamination in the Xiarihamu and Shitoukengde intrusions

硅质的混染能降低 SCSS, 即硫化物饱和和可通过富硅物质的加入来实现。当混染熔体中 10% 的 SiO_2 时, 岩浆依然是橄榄石先结晶, 而当大于 15% 的 SiO_2 时, SCSS 下降至 569×10^{-6} , 且会抑制橄榄石结晶而促进斜方辉石优先结晶。东昆仑地区的花岗质片麻岩中 SiO_2 高达 73.5%。在夏日哈木和石头坑德矿

区, 发育大量斜方辉石岩相的矿化更好, 镜下观察到他形石英颗粒与斜方辉石共存。由于 Ni 在斜方辉石/熔体的分配系数为 1~3, 低于橄榄石/熔体之间的分配系数, 所以相对于橄榄石结晶而言, 斜方辉石结晶更容易使 Ni 进入到硫化物中聚集。夏日哈木和石头坑德岩体中辉石岩相的斜方辉石 SiO_2 与 Ni 的含量呈负相关, 表明 SiO_2 的混染不仅降低了 SCSS 值, 而且促进了斜方辉石优先快速结晶, 使更多的 Ni 进入到硫化物中, 加速硫化物饱和 (图 10)。

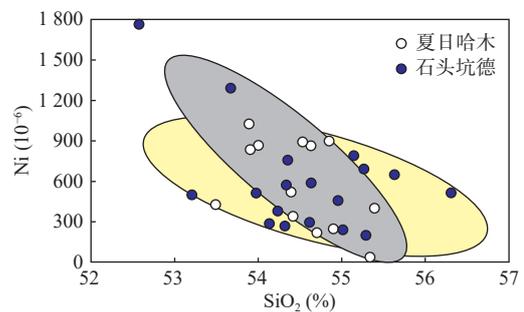


图10 夏日哈木和石头坑德岩体全岩 SiO_2 与斜方辉石 Ni 相关性图解

Fig. 10 Correlation diagram of whole-rock SiO_2 and orthopyroxene Ni in the Xiarihamu and Shitoukengde intrusions

钙质成分的混染, 抑制硫化物饱和。钙质成分的混染, 特别是 CaO 的加入, 致岩浆中 CaO 含量升高, 抑制硫化物饱和和发生。在东昆仑含钙质的物质主要为大理岩, 夏日哈木和石头坑德矿区可见镁铁-超镁铁质岩体穿插大理岩, 镜下可见小颗粒方解石, 且单斜辉石均显示具有逐步向富钙的透辉石端元演化的特征。夏日哈木和石头坑德岩体中的 CaO 与 Ni 含量呈负相关, 且在石头坑德钻孔 ZK4001 中这种现象尤为明显, 表明大理岩中 CaO 的加入并不利于成矿, 甚至抑制了硫化物饱和 (图 11)。

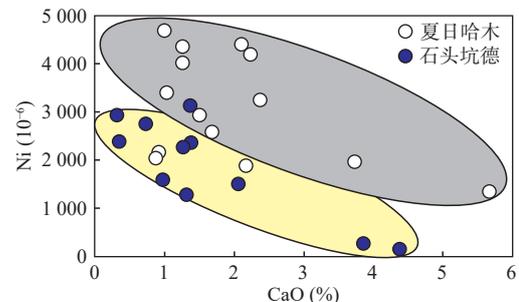


图11 夏日哈木和石头坑德岩体全岩 Ni 与 CaO 相关性图解

Fig. 11 Correlation diagram of whole-rock Ni and CaO in the Xiarihamu and Shitoukengde intrusions

水的混染可促进硫化物饱和。实验研究表明, 对于富 FeO 富 MgO 的玄武质岩浆, 增加 1% 的 H₂O 有助于液相线下硫化物饱和时的硫的溶解度降低 135×10^{-6} , 且富水的岩浆有利于成矿元素的迁移与聚集。夏日哈木和石头坑德矿床的原生岩浆均为高 MgO 玄武质岩浆, 发生深部熔离作用可能是早期有富水流体的加入。大量 H₂O 等流体加入, 使得岩浆中 FeO 的含量减少, Fe₂O₃ 含量提高, 降低硫化物的溶解度, 有利于硫化物的熔离。夏日哈木和石头坑德赋矿岩体的烧失量 (LOL) 与 Ni 呈正相关性 (图 12)。说明混染片麻岩中的含水矿物促进了硫化物饱和, 夏日哈木 LOL 与 Ni 的相关性好于石头坑德, 可能是由于夏日哈木矿床混染的片麻岩较多。

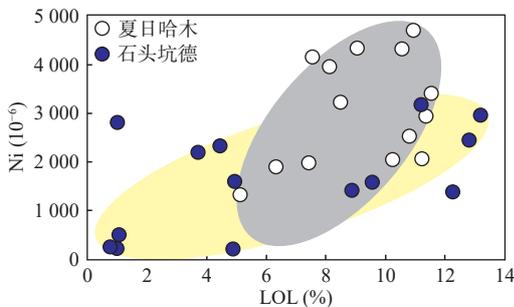


图 12 夏日哈木和石头坑德岩体全岩 Ni 与 LOL 相关性图解

Fig. 12 Correlation diagram of whole-rock Ni and LOL in the Xiarihamu and Shitoukengde intrusions

碳质成分的混染。在夏日哈木岩体中, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值较低, 烷烃碳同位素存在局部反序的特征, 反映夏日哈木幔源岩浆存在洋壳俯冲过程中携带的碳质沉积物和大气组分进入到地幔源区 (王小东, 2019)。汤庆艳等 (2017) 发现夏日哈木岩体的甲烷同系物碳同位素具有正序分布、局部反序的分布特征, 指示来自俯冲洋壳或者沉积物中有机质的热裂解, 反映壳源混染组分可能来源于岩浆源区的板块俯冲沉积有机质。在板块俯冲过程中, 特别是在相对较冷的俯冲板块中, 含碳矿物或碳的单质能够进入到深部地幔。推测地幔源区可能在 508~428 Ma 的东昆仑地区洋壳俯冲阶段受到碳质成分的混染, 幔源岩浆混染了沉积在洋壳上和洋壳自身的含碳物质, 促进了岩浆中硫化物的饱和, 这可能是岩浆源区发生深部熔离的另一个原因, 但在早期幔源岩浆中 S 属于微量元素, 只有很少一部分硫化物会析出。作为围岩的金水口群白沙河组大理岩和片麻岩, 原岩为泥质碎屑岩, 均含有一定量的碳质成分;

相比较而言, 大理岩还能在熔融时释放 CO₂。在昆中和昆北地区陆续发现了红水河东、努克图郭勒、细细特郭勒等石墨矿床, 石墨矿体呈层状分布在金水口岩群的大理岩中。在石头坑德矿床中, 可以观察到石墨矿物, 判断东昆仑地区的幔源岩浆在上升过程中也混染了地壳含碳物质, 碳质来源主要是大理岩。

硫的混染。对于同化混染作用而言, 促进硫化物饱和最为有效、显著的方式就是外来 S 的加入, 前人通过不同实验的物理参数也证实了这一观点, 特别是富含 S 的围岩, 是外来 S 加入的关键。地球上不同 S 的主要储库其 S 同位素组成也不同, 因此, $\delta^{34}\text{S}$ 值可以用来判别幔源岩石在成岩、成矿过程中硫的来源及壳源物质的混染程度 (William et al., 2021)。夏日哈木和石头坑德岩体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 均值分别为 4.78‰ 和 3.18‰, 与国内外其他大型镍钴矿床相比 (图 13), 明显低于 Noril'sk (-0.7‰~+13.8‰), 与 Voisey' Bay (-5‰~+1‰)、金川 (-3‰~+5‰) 大体相当, 高于坡一 (-0.8‰~-3.5‰)、红旗岭矿床 (-4.70‰~2.13‰) (Liu et al., 2018)。夏日哈木和石头坑德矿石中 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显高于幔源硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (-1.80‰~0.49‰), 表明这些含矿岩体在成岩成矿过程中经历了壳源 S 的混染, 东昆仑地区的花岗片麻岩黄铁矿原位硫同位素值 $\delta^{34}\text{S}$ (‰_{v.CDT}) 达 11.2‰ (Liu et al., 2018), 判断 S 来自含黄铁矿的花岗片麻岩。

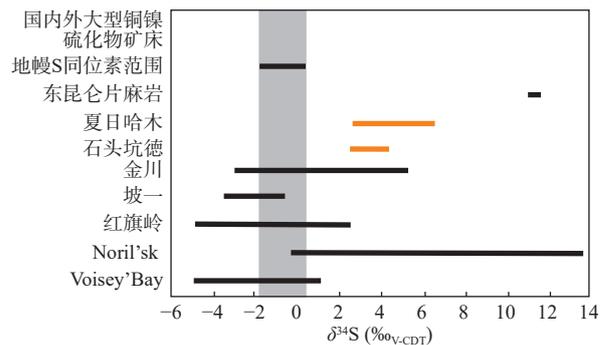


图 13 夏日哈木和石头坑德铜镍矿与其他铜镍硫化物矿床硫化物硫同位素对比图

Fig. 13 Comparison diagram of sulfide sulfur isotopes between the Xiarihamu and Shitoukengde Co-Ni deposits and other Co-Ni Sulfide Deposits

地壳混染作用是东昆仑造山带的铜镍矿床硫化物富集的主要控制因素, 地壳中的水、碳质成分、钙质成分、硅质成分和硫参与了混染作用。水的混染分为两个阶段, 第一阶段发生在洋壳俯冲时期, 原生岩浆混染了大洋岩石圈受挤压释放的水和蚀变的洋壳

玄武岩及其上覆沉积物在温度压力升高时释放的富水流体,但由于岩浆中S的含量较少,未能析出大量硫化物。第二阶段发生在岩浆上侵时,花岗片麻岩在岩浆中熔融时,富水矿物角闪石、黑云母发生脱水反应产生了富水流体,对硫化物的析出起到了促进作用,但对成矿作用影响较小。碳质成分的混染分为两个阶段,第一阶段发生在洋壳俯冲时期,原生岩浆混染了洋壳上部和洋壳自身的含碳物质,析出少量硫化物。第二阶段发生在岩浆上侵时,当大理岩在岩浆中发生熔融时,所含的碳质成分和释放的CO₂对硫化物的析出起到了促进作用,但对成矿影响有限。钙质成分主要来自岩浆上侵过程中混染的大理岩,大理岩的混染使岩浆体系的CaO含量升高,对硫化物饱和有抑制的作用。硅质成分和S主要来自岩浆上侵过程中混染的花岗片麻岩,SiO₂的加入不仅能够降低硫的溶解度,还能够引起斜方辉石优先快速结晶,促进Ni在硫化物中聚集。花岗片麻岩中的S以黄铁矿的形式存在,通过遇热分解形成H₂S来增加岩浆中硫含量,这是硫化物过饱和并发生熔离的主导因素。夏日哈木镁铁-超镁铁质岩体混染的地壳S程度明显大于石头坑德,这也是夏日哈木矿石品位高、矿体规模大的主要原因。

5 结论

(1)以夏日哈木和石头坑德为代表的青海省东昆仑岩浆镍钴硫化物矿床,是同一构造背景同期岩浆成矿作用的结果,可能与古特提斯洋裂解裂谷岩浆作用关系密切。

(2)导致夏日哈木和石头坑德矿床硫化物熔离的关键因素均为地壳物质混染作用,混染程度的差异及围岩地层含S量的不同,是成矿差异的主控因素。

(3)青海省东昆仑造山带区域内岩浆镍钴硫化物矿床的找矿勘查和重点工作方向,取决于岩浆分异程度、围岩地层条件以及S含量的具体情况。

致谢: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):

董俊,黄华良,尹建华,等.东昆仑石头坑德镁铁超镁铁质岩地

- 质特征及成矿条件分析[J].西北地质,2017,50(2):49-60.
- DONG Jun, HUANG Hualiang, YIN Jianhua, et al. Geological Characteristics of the Shitoukengde Mafic-Ultramafic Rocks in East Kunlun and Related Metallogenic Conditions[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(2): 49-60.
- 丰成友,赵一鸣,李大新,等.东昆仑祁漫塔格山地区夏日哈木镍矿床矿物学特征[J].地质论评,2016,62(1):215-228.
- FENG Chengyou, ZHAO Yiming, LI Daxin, et al. Mineralogical Characteristics of the Xiarihamu Nickel Deposit in the Qiman Tagh Mountain, East Kunlun, China[J]. Geological Review, 2016, 62(1): 215-228.
- 韩见,陈其慎,杨雪松,等.钴资源现状及未来5—10年供需形势分析[J].中国地质,2023,50(3):743-755.
- HAN Jian, CHEN Qishen, YANG Xuesong, et al. Current situation of cobalt resources and analysis of supply and demand situation in the next 5-10 years[J]. Geology in China, 2023, 50(3): 743-755.
- 郝洪昌,王安建,马哲,等.镍全球治理框架体系构成、演变及中国参与路径选择[J].科技导报,2024,42(5):61-69.
- HAO Hongchang, WANG Anjian, MA Zhe, et al. Composition and evolution of the nickel global governance framework and the participation path of China[J]. Science & Technology Review, 2024, 42(5): 61-69.
- 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.
- 李文渊.古特提斯构造演化及其成矿作用[J].地质学报,2024,98(11):3255-3273.
- LI Wenyuan. The Paleo-Tethys tectonic evolution and corresponding metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(11): 3255-3273.
- 李文渊,张照伟,刘月高,等.夏日哈木铜镍钴硫化物矿床成矿机理与勘查示范[M].北京:科学出版社,2023.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, LIU Yuegao, et al. Metallogenic mechanism and exploration demonstration of Xiarihamu magmatic Cu-Ni-Co sulfide deposit[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- 潘彤.柴达木盆地南北缘成矿系列及找矿预测[M].武汉:中国地质大学出版社,2019.
- PAN Tong. Metallogenic series and prospecting prediction in the northern and southern edges of the Qaidam Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2019.
- 宋谢炎,余宇伟,栾燕,等.峨眉大火成岩省攀西钒钛磁铁矿矿集区钴、镓、铋资源及综合利用潜力[J].矿物岩石地球化学通报,2024,43(1):218-231.
- SONG Xieyan, SHE Yuwei, LUAN Yan, et al. Resources of Co, Ga

- and Sc of V-Ti magnetite deposits in the Panxi area within the Emeishan Large Igneous Province and their integrated utilization potentials[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(1): 218–231.
- 苏本勋, 秦克章, 蒋少涌, 等. 我国钴镍矿床的成矿规律、科学问题、勘查技术瓶颈与研究展望[J]. *岩石学报*, 2023, 39(4): 968–980.
- SU Benxun, QIN Kezhang, JIANG Shaoyong, et al. Mineralization regularity, scientific issues, prospecting technology and research prospect of Co-Ni deposits in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(4): 968–980.
- 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(1): 104–114.
- TANG Qingyan, LI Jianping, 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(1): 104–114.
- 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.
- 王小东. 夏日哈木镍铜硫化物矿床镁铁质成岩浆就位机制: 稀有气体和碳同位素制约[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- WANG Xiaodong. Mechanism of mafic ore-forming magma emplacement in the Xiarihamu nickel-copper sulfide deposit: constraints from noble gas and carbon isotopes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- 王亚磊, 张照伟, 张江伟, 等. 东昆仑造山带早中生代幔源岩浆事件及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 2017, 53(5): 855–866.
- WANG Yalei, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. Early Mesozoic mantle-derived magmatic events and their geological significance in the East Kunlun orogenic belt[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(5): 855–866.
- 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(33): 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(33): 3825–3838.
- 吴琪, 李政, 王楠, 等. 中国镍矿供需形势及对策建议[J]. *科技导报*, 2024, 42(5): 53–60.
- WU Qi, LI Zheng, WANG Nan, et al. Domestic supply-demand situation of nickel and suggested countermeasures in China[J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(5): 53–60.
- 校培喜, 高晓峰, 胡云绪. 阿尔金-东昆仑西段成矿带地质背景研究[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, HU Yunxu. The geology background research in western segment of Altun-East Kunlun metallogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- 薛胜超, 刘金宇, 周翊, 等. 交代地幔源区与造山带铜镍成矿作用[J]. *岩石学报*, 2024, 40(1): 60–78.
- XUE Shengchao, LIU Jinyu, ZHOU Yu, et al. Genetic correlation of metasomatized mantle source with Ni-Cu mineralization in orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(1): 60–78.
- 袁小晶, 王安建, 马哲. 钴资源全球治理体系及中国参与路径[J]. *科技导报*, 2024, 42(5): 70–80.
- YUAN Xiaojing, WANG Anjian, MA Zhe. Anatomy of global governance system of cobalt and China's path to participation[J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(5): 70–80.
- 翟明国. 提升战略性关键矿产资源保障能力, 把握全球矿产资源格局[J]. *科技导报*, 2024, 42(5): 1–6.
- ZHAI Mingguo. Enhance strategic critical mineral resources, safeguard capabilities, and grasp the global mineral resource pattern[J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(5): 1–6.
- 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.
- 张伟波, 叶锦华, 陈秀法, 等. 全球钴矿资源分布与找矿潜力[J]. *资源与产业*, 2018, 20(4): 56–61.
- ZHANG Weibo, YE Jinhua, CHEN Xiufa, et al. Global cobalt resources distribution and exploration potentials[J]. *Resources & Industries*, 2018, 20(4): 56–61.
- 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(3): 438–451.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, QIAN Bing, 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(3): 438–451.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 青海省夏日哈木铜镍矿床岩石地球化学特征及其意义[J]. *西北地质*, 2016, 49(2): 45–58.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Petrogeochemical characteristics of the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide de-

- posit in Qinghai province and its study for olivine[J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(2): 45–58.
- 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 东昆仑冰沟南铜镍矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质学报*, 2017a, 91(4): 724–735.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Zircon SHRIMP U Pb Age of the Binggounan Magmatic Ni-Cu Deposit in East Kunlun Mountains and its Tectonic Implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017a, 91(4): 724–735.
- 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*, 2017b, 53(5): 825–837.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Mineralogical characteristics of the Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion in the East Kunlun orogenic belt and its ore-forming indicators[J]. *Geology and Exploration*, 2017b, 53(5): 825–837.
- 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, 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(3): 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(3): 35–45.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 东昆仑夏日哈木镍成矿赋矿机理认识与找矿方向指示[J]. *西北地质*, 2020, 53(3): 153–168.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Understanding of metallogenic ore-forming mechanism and its indication of prospecting direction in Xiarihamu magmatic Ni-Co sulfide deposit, eastern Kunlun orogenic belt, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(3): 153–168.
- 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*, 2021a, 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*, 2021a, 54(1): 82–99.
- 张照伟, 王亚磊, 邵继, 等. 东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床成矿特征[J]. *矿床地质*, 2021b, 40(6): 1230–1247.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, SHAO Ji, et al. Metallogenic characteristics of Xiarihamu super-large magmatic nickel-cobalt sulfide deposit in eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. *Mineral Deposits*, 2021b, 40(6): 1230–1247.
- 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.
- 张照伟, 谭文娟, 杜辉, 等. 金川岩浆镍钴硫化物矿床深部找矿勘查技术研究[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 242–253.
- ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, DU Hui, et al. Study on Exploration Techniques of Deep Ore Prospecting in Jinchuan Magmatic Co-Ni Sulfide Deposit, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 242–253.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 东昆仑造山带岩浆镍钴硫化物矿床形成构造背景探讨[J]. *中国地质*, 2024, 51(2): 371–384.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Tectonic settings discussion of magmatic nickel-cobalt sulfide deposits in the eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 2024, 51(2): 371–384.
- 张照伟, 吴华英, 谭文娟, 等. 中国镍钴矿产资源禀赋条件与找矿潜力[J]. *岩石学报*, 2025, 41(2): 416–430.
- ZHANG Zhaowei, WU Huaying, TAN Wenjuan, et al. Endowment conditions and prospecting potential of nickel and cobalt mineral resources in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2025, 41(2): 416–430.
- 钟世华, 黄宇, 刘永乐, 等. 东昆仑志留纪—泥盆纪关键金属成矿大爆发[J]. *地质通报*, 2025, 44(4): 574–586.
- ZHONG Shihua, HUANG Yu, LIU Yongle, et al. Silurian-Devonian critical metal mineralization boom of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(4): 574–586.
- 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(24): 2484–2500.
- ZHAO Junxing, LI Guangming, QIN Kezhang, et al. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(24): 2484–2500.
- Labidi J, Cartigny P, Moreira M. Non-chondritic sulphur isotope composition of the terrestrial mantle[J]. *Nature*, 2013, 501: 208–211.
- 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*, 2015a, 216–217: 224–240.
- Li Y, Audétat A. Effects of temperature, silicate melt composition, and oxygen fugacity on the partitioning of V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb, and Bi between sulfide phases and silicate melt[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015b,

- 162: 25–45.
- Liu Y, Li W, Jia Q, 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.
- Meng F C, Zhang J X, Cui M H. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, western China and its tectonic significance[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(2): 825–836.
- Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li C, Ripley E M, eds. *Reviews in Economic Geology*[M]. Denver: Society of Economic Geologists, Inc., 2011, 1–50.
- Qiu Z J, Fan H R, 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*, 2021, 305: 1–18.
- Ripley E M, Li C S. Sulfide Saturation in Mafic Magmas: Is External Sulfur Required for Magmatic Ni-Cu-(PGE) Ore Genesis?[J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 45–58.
- Schulz K J, DeYoung J H, Seal R R, et al. Critical mineral resources of the United States — Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U S Geological Survey Professional Paper Series 1802, 2018, 797.
- Slack J F, Kimball B E, Shedd K B, et al. Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U S Geological Survey Professional Paper 1802, 2017, F1–F40.
- Smith J M, Ripley E M, Li C S, et al. Cu and Ni Isotope Variations of Country Rock-Hosted Massive Sulfides Located Near Midcontinent Rift Intrusions[J]. *Economic Geology*, 2021, doi:10.5382/econgeo.4872; 16 p.
- 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(1): 29–55.
- Tao Y, Putirka K, Hu R Z, et al. The magma plumbing system of the Emeishan large igneous province and its role in basaltic magma differentiation in a continental setting[J]. *American Mineralogist*, 2015, 100(11-12): 2509–2517.
- Vasyukova O V, Williams-Jones A E. Constraints on the genesis of cobalt deposits: Part II, application to natural systems[J]. *Economic Geology*, 2022, 117: 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: 513–528.
- William H, Rainer J B, Adrian A F, et al. Sulphur isotopes of alkaline magmas unlock long-term records of crustal recycling on Earth[J]. *Nature Communications*, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12218-1>.
- 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: 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]. *Mineralium 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 I 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.