

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.03.013

东昆仑夏日哈木镍成矿赋矿机理认识与找矿方向指示

张照伟, 钱兵, 王亚磊, 李文渊, 张江伟, 尤敏鑫

(自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘 要:东昆仑造山带夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿体全部赋存于Ⅰ号镁铁-超镁铁质岩体内, 118 万 t 镍, 23.8 万 t 铜, 4.3 万 t 钴, 是迄今为止全球造山带背景发现的规模最大的岩浆镍钴矿床。与传统的大火成岩省、大陆边缘裂谷等成矿构造背景认识明显不同, 对其含矿性特点与成矿赋矿机理认识有助于揭示造山带背景岩浆镍钴硫化物矿床形成机制和成矿模式, 指示进一步找矿方向和岩体含矿性评价, 拓展东昆仑造山带镍钴硫化物矿床的找矿空间, 实现找矿新突破。笔者通过对夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床的岩(矿)体地质特点、矿物学及地球化学的研究, 并结合前人的区域构造背景研究成果及野外实际, 发现地壳 S 的混染加入是导致夏日哈木镁铁-超镁铁质岩浆硫化物熔离的关键因素, 斜方辉石含量高的岩相更有利于赋存富矿体。提出夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床是伴随古特提斯洋演化开始大陆裂解、镁铁-超镁铁质岩浆多次脉冲叠加硫化物熔离成矿结果的认识, 大断裂为地幔岩浆上侵提供了有利条件。东昆仑造山带沿昆北、昆中断裂带于夏日哈木镍钴硫化物矿床北西、南东方位发育的岩体、铁质系列的镁铁-超镁铁质岩相是该区域进一步找矿的重要方向。

关键词:镁铁-超镁铁质岩体; 镍钴硫化物; 成矿机理; 找矿方向; 夏日哈木

中图分类号: P588.1; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)03-0153-16

Understanding of the Metallogenic Ore-Bearing Mechanism and Its Indication of Prospecting Direction in Xiarihamu Magmatic Ni-Co Sulfide Deposit, East Kunlun Orogenic Belt, Northwestern China

ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, YOU Minxin

(Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The Xiarihamu nickel-cobalt sulfide ore deposit in the East Kunlun orogenic belt is hosted in the No. 1 mafic-ultramafic intrusion, with 1.18 million tons of Ni, 238,000 tons of Cu, and 43,000 tons of Co, which is the largest magmatic nickel-cobalt deposit found in the orogenic

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-05-19

基金项目: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), 国家自然科学基金项目“东昆仑夏日哈木铜镍矿床硫化物不混溶作用研究”(41873053), 国土资源公益性行业科研专项“拉陵灶火镍成矿赋矿机理及勘查技术研究示范”(201511020)及中国地质调查局地质调查项目“西昆仑大红柳滩-甜水海地区大型矿产资源基地综合调查”(DD20190143)资助成果

作者简介:张照伟(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事岩浆铜镍硫化物矿床成矿理论研究与镍矿资源调查评价工作。E-mail: zhaoweiz@126.com

belt to date. Its geological background is obviously different from the large igneous province and the continental marginal rifts. The profound analysis of Xiarihamu is helpful to reveal the formation mechanism and metallogeny of the magmatic nickel-cobalt sulfide deposits in the orogenic belt, to provide instructions for the prospecting direction, and to expand the prospecting space of nickel-cobalt sulfide deposits in the East Kunlun orogenic belt. Through the research work of geological characteristics, mineralogy, and geochemistry of the Xiarihamu magmatic nickel-cobalt sulfide deposit and in combination with previous research results and practice of regional tectonic background, we found that the crustal sulfur contamination is the key factor for the sulfide saturation. The lithofacies with a high content of orthopyroxene are very favorable for the occurrence of rich ore bodies. we proposed that the Xiarihamu giant magmatic nickel-cobalt sulfide deposit is the result of the continental break-up related to the Paleo-Tethys ocean evolution. The regional fault provided channels for the mantle-derived magma. The ferruginous mafic-ultramafic intrusions along the Northern Kunlun Fault and the Central Kunlun Fault to the northwest and south-east of the Xiarihamu nickel-cobalt sulfide deposit have the potential to be the magmatic Ni-Co deposits.

Keywords: mafic-ultramafic intrusion; magmatic Ni-Co sulfide deposit; metallogenic mechanism; prospecting direction; Xiarihamu

岩浆起源-演化、侵位与喷发(火山活动)过程是地球内部物质与能量向外部迁移的主要机制之一,也是地球上绝大多数金属矿床形成的重要驱动力,所形成的各类侵入岩及喷出岩是金属矿产的直接载体(MAO, et al., 2014; 李文渊, 2018; 莫宣学, 2019)。因此,对于各类侵入岩的成因机制、成矿作用及控矿因素等的深入研究、创新发展符合客观实际的岩浆作用成矿与找矿地质理论,是国内外岩浆作用成矿与找矿研究的重要趋势和关键内容。另一方面,岩浆活动的样式、特点和空间分布规律等与地球构造动力学机制和全球构造环境密切相关,不同的构造环境均伴随不同成因类型的岩浆活动和成矿作用,其形成是地球内部不同动力学机制转换、不同圈层(核-幔-壳)相互作用的结果(PIRAJNO, et al., 2009; MAIER, et al., 2011; 王博林等, 2017; ZHANG, et al., 2018)。与超大型镍钴硫化物矿床密切相关的镁铁-超镁铁质岩体不仅是研究地球深部岩浆起源、分异演化过程和地壳混染作用的最佳对象,且其赋存的镍钴等金属具有重要的战略地位。对这类镁铁-超镁铁质岩体的研究不仅可以认识岩浆的起源、演化等形成过程及形成规律,亦可揭示与岩浆作用有关的成矿过程。

近几年,在东昆仑造山带新发现的夏日哈木岩浆镍(钴)硫化物矿床,118 万 t 镍金属储量已达到

超大型规模(张照伟等, 2015; LI, et al., 2015; ZHANG, et al., 2017; 钱兵等, 2017),这也是继 1996 年加拿大沃尔斯贝(Voisey's Bay)岩浆硫化物矿床发现以来近 20 年全球硫化镍矿最重大的发现(张照伟等, 2016; 王岩等, 2020)。造山带内也能产出超大型岩浆镍(钴)硫化物矿床,其铁质系列的基性-超基性岩浆是如何形成和演化的呢? 具体是一种什么样的构造背景和成矿机理形成的呢? 笔者拟通过夏日哈木超大型矿床的地质特征、地球化学特征及矿物学研究,旨在揭示造山带内夏日哈木镍(钴)矿床的成矿过程与赋矿机理,指示进一步找矿方向,拓展区域找矿空间,实现镍(钴)找矿新发现。

1 区域地质背景及构造演化

东昆仑造山带属于中央造山带西段,整体位于青藏高原的东北部,柴达木盆地南缘(图 1a),是古亚洲构造域与特提斯构造域结合部位,地处塔里木、扬子与印度三大陆块之间,其区域构造演化史与三大陆块的发展有着密切的关系。东昆仑造山带整体区域构造演化先后经历 5 个阶段,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

代陆内造山阶段(SONG, et al. , 2006;ZHANG, et al. , 2014;校培喜等, 2014;张玉等, 2017;何书跃等, 2018;李廷栋等, 2019)。原特提斯洋是新元古宙开裂、早古生代早中期演化成熟并于早古生代末闭合的构造演化历史。原特提斯洋在早古生代与古亚洲洋相连,是一个洋(李文渊, 2018;张国伟等, 2019)。志留纪末塔里木、华北和华南陆块与冈瓦纳大陆之间的大洋分支或有限洋盆昆仑洋、祁连洋和

秦岭洋相继闭合造山,有多处志留纪末高压-超高压变质带榴闪岩、榴辉岩的产出为主要证据。志留纪末—早泥盆世古特提斯洋开启,最终泥盆纪末原特提斯-古亚洲主洋闭合(李文渊, 2018;潘桂堂等, 2019)。对东、西昆仑造山带的研究,古特提斯洋主要形成于晚古生代—早中生代,其形成演化和闭合造山过程中留下了大量的地质构造建造和相应的众多矿产资源(李文渊, 2018)。

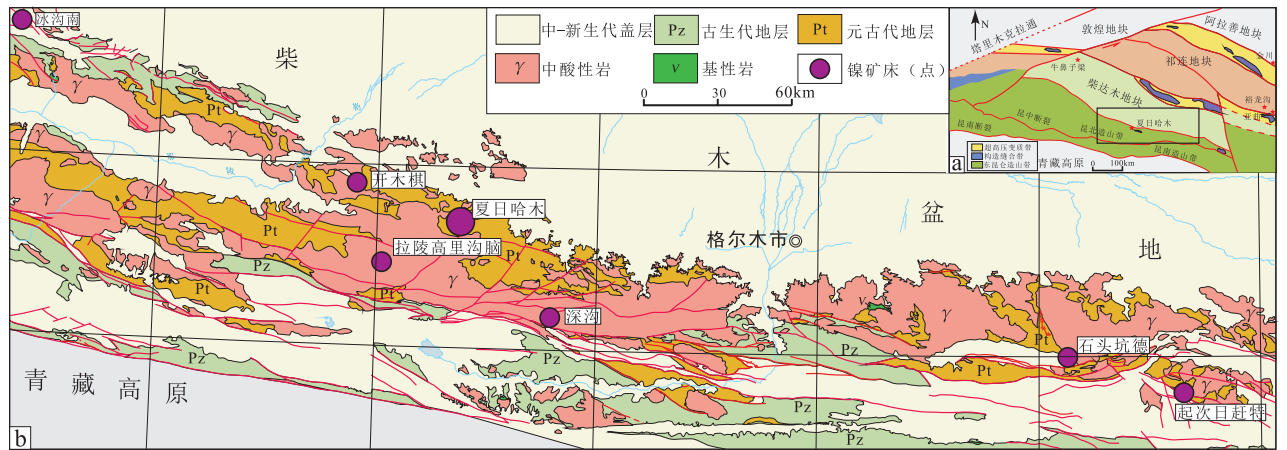


图 1 东昆仑岩浆铜镍硫化物矿床区域地质构造简图(张照伟等, 2018)

Fig.1 Sketch map of magmatic Ni - Cu sulfide deposits in eastern Kunlun(After ZHANG, et al. , 2018)

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 个部分(图 1b)。在昆北造山带的东部,发现有榴辉岩,约 428 Ma(MENG, et al. , 2013, 2015;孟繁聪等, 2017)。其他几处蛇绿混杂岩的年龄变化为 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(BIAN, et al. , 2004;宋谢炎等, 2009;姜常义等, 2015;杜玮等, 2017)。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。在昆北地体的北部边界产出了夏日哈木超大型岩浆铜镍硫化物矿床(图 1b)(张照伟等, 2015, 2016, 2017; LI, et al. , 2015; SONG, et al. , 2016; ZHANG, et al. , 2017; LIU, et al. , 2018)。矿区出露地层主要为古元古代白沙河岩群,岩石类型为黑云斜长片麻岩、眼球状混合片麻岩、大理岩、二云石英片岩等,原岩恢复为碎屑岩-碳酸盐岩-火山岩建造,经历了

角闪岩相区域变质作用(张雪亭等, 2007;耿林等, 2007;李荣社等, 2008;范丽琨等, 2009;校培喜等, 2014;张照伟等, 2015, 2017; LIU et al. , 2018; 孙小攀等, 2018;孔会磊等, 2019)。

2 夏日哈木岩(矿)体地质特征

2.1 岩体地质特征

在东昆仑夏日哈木镍钴硫化物矿区已发现 5 个镁铁质-超镁铁质岩体,呈北西向带状展布,单个岩体出露面积较小,最大出露面积仅为 0.9 km²,主要呈岩盆状或岩墙状侵位于古元古代金水口群变质岩系及新元古代花岗片麻岩中(图 2a)。其中, I 号岩体为含矿岩体,其余 II、III、IV、V 号岩体是榴辉岩和镁质橄榄岩,基本不含矿,尽管 II 号岩体地表见有较好的铜镍矿化,但仍未发现有经济价值的矿体(图 2a)。

I 号岩体呈椭圆状长条形近东北—西南向延伸,岩体走向北东东(约 60°),长约 2 000 m,宽约 1 400 m,地表出露长 1.6 km,宽 0.5 km,面积约为

0.9 km²。岩体向西倾伏，西部隐伏于地下，南部被第四系所覆盖(图 2b)；钻孔勘察表明，夏日哈木 I 号岩体总体呈岩体北部南倾，倾角为 0~30°，南部北倾，倾角为 5°~30°；岩体呈东高西低，向西呈隐伏状态，中部出露于地表，两侧岩体隐伏于围岩之下，剖面呈平缓的“岩盆状”，并被后期近东西向分布的闪长玢岩脉所穿插，西段隐伏于地下，且越向西埋深越深(图 2e)。从夏日哈木 I 号岩体的剖面图可以看出，夏日哈木 I 号岩体具有西部窄，东部膨大的特征；岩体的上部围岩为元古代花岗片麻岩，在西部下部围岩为大理岩，在东部下部为元

古代片麻岩(LIU,et al. , 2018)。夏日哈木 I 号岩体西部呈隐伏状态，岩体的南边为新生代沉积。岩体地表出露部分中部为方辉橄榄岩，东部为斜方辉石岩和二辉辉石岩，北部为辉长岩(图 2b)。夏日哈木矿区 I 号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 2c)。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。在钻孔剖面图上，上述情况则更加明显直观(图 2e)(张照伟等,2015,2016)。

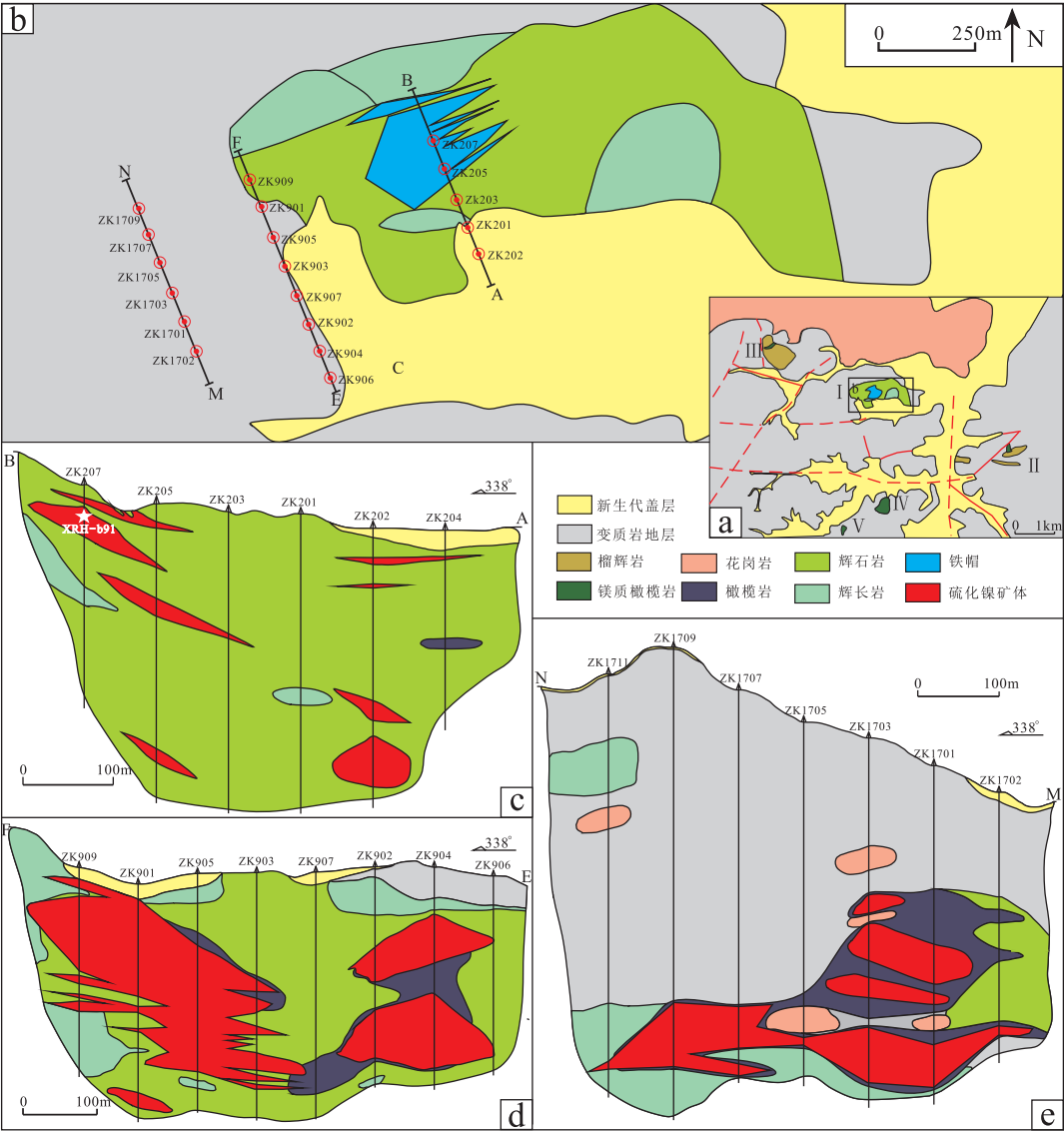


图 2 东昆仑夏日哈木矿区 I 号岩体平面及剖面地质略图(据张照伟等, 2015)

Fig. 2 Geological sketch map for plan and profile from Xiarihamu intrusion I in eastern Kunlun orogenic belt (After ZHANG, et al. , 2015).

根据岩相间的穿插关系,夏日哈木岩体可以划分为2期侵入岩相。第一期为少量辉长岩相(苏长岩、辉长苏长岩)侵入,分布于岩体上部,总体呈岩枝状随岩体向西倾伏;第二期为含矿辉石岩相(橄榄二辉辉石岩、斜方辉石岩、二辉辉石岩)-橄榄岩相(纯橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩)-辉长岩相(辉长苏长岩)侵入,构成岩体主体,是主含矿岩相。含矿岩相由北东向南西基性程度增高,出现纯橄榄岩。其中第二期成矿岩浆的侵入相按其先后顺序及接触关系又可进一步划分为不同阶段。含矿岩体不同岩相野外接触关系表明,纯橄榄岩与方辉橄榄岩或单辉橄榄岩之间没有穿插关系,说明为同一阶段岩浆演化的产物;二辉辉石岩穿插纯橄榄岩及方辉橄榄岩,说明辉石岩稍晚于纯橄榄岩。辉长岩细脉插入二辉辉石岩中,说明辉长岩略晚于二辉辉石岩;在ZK11E05底部可见块状硫化物穿插辉长岩,说明辉长岩顶部的硫化物为后期贯入的硫化物。结合LI, et al. (2015)锆石测年,证实存在一期早于二辉辉石岩20 Ma的辉长岩,可见夏日哈木I号岩体的岩浆侵入期次由早到晚为:早期辉长岩—纯橄榄岩+方辉橄榄岩+单辉橄榄岩—二辉辉石岩—晚期辉长岩。

2.2 矿体地质特征

夏日哈木铜镍矿体主要赋存于I号岩体的辉石岩与橄榄岩中,主矿体位于2号勘探线以西地表以下的空间区域,在9号勘探线、11号勘探线的位置区域,铜镍矿体达到了最厚(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、铜镍矿体变富(图2d)(张照伟等,2015;LI, et al., 2015;ZHANG, et al., 2017)。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(张照伟等,2015,2016,2017;LI, et al., 2015;SONG, et al., 2016;ZHANG, et al., 2017)。钻探工作显示,I号岩体中赋存主要镍-钴-铜矿体数条,以M1、M2镍钴矿体为主(占比>95%)。M1镍-钴-铜矿体最大,长约960 m,平均厚度62.95 m,最大厚度达290 m(11线),倾向最大延伸520 m(7、11线);从走向上看,矿体中间厚、品位高,两侧趋于尖灭;从倾向上看,矿体中间较厚,两边较薄(图2)。经详查工作查明,I号岩体已获得镍金属资源量

118.30万t,平均品位为0.68%;铜金属资源量23.83万t,平均品位为0.166%;钴资源量4.29万t,平均品位为0.028%。

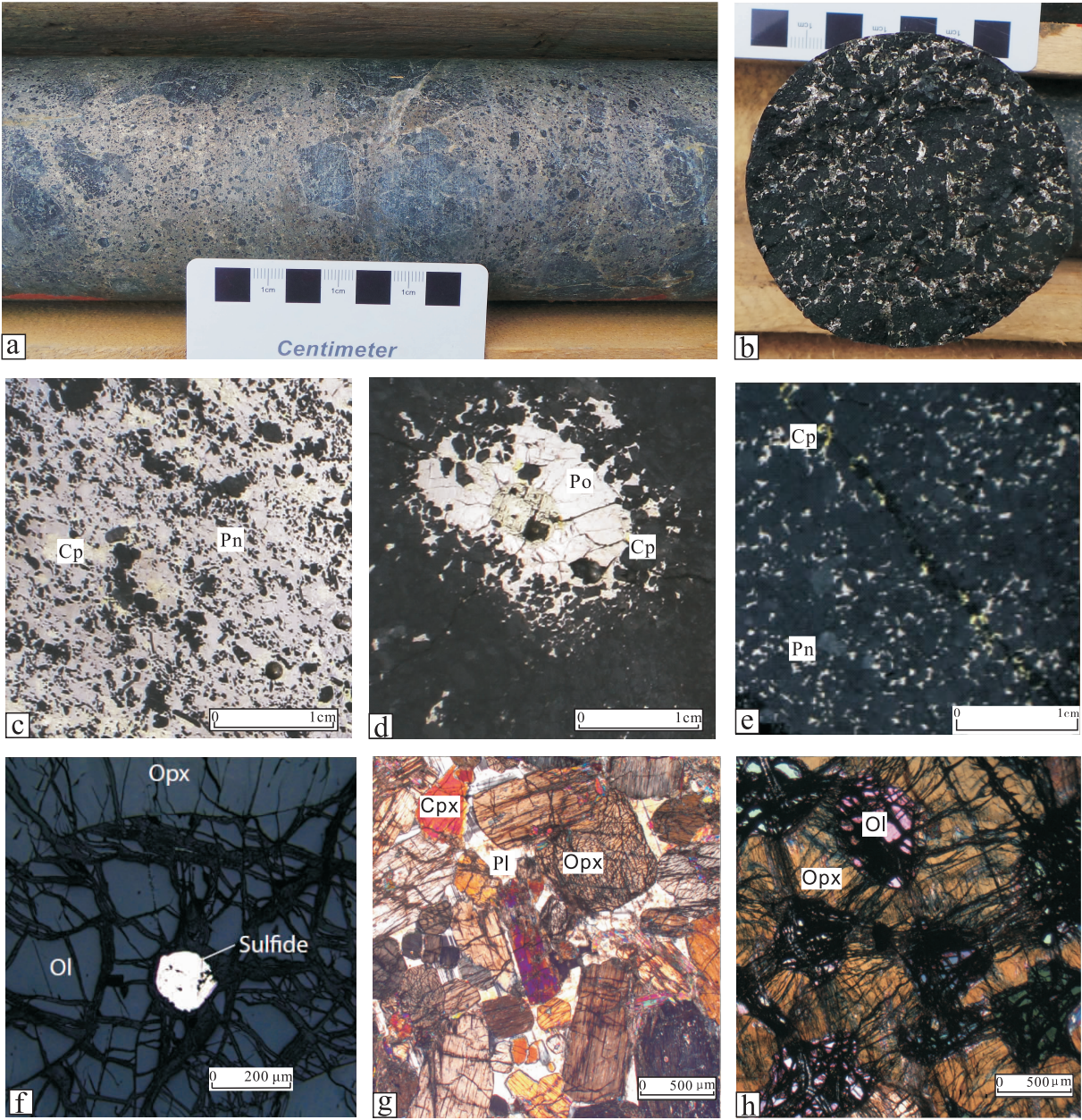
工业矿体主要分布于辉石岩相和橄榄岩相内(图2d、图2e)。矿体多呈厚大的似层状,一般上部以浸染状、团斑状矿石为主,中下部及底部以稠密浸染状、致密块状矿石为主。少数矿体呈透镜状、漏斗状位于岩体上部,呈上悬矿体或呈条带状分布于岩体中。矿石矿物主要有镍黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和后期形成的黄铁矿等;矿石结构主要为半自形-自形粒状结构、堆晶结构、固溶体分离结构和海绵陨铁结构;矿石类型以块状(图3a、图3b、图3c)、稠密浸染状(图3e)和团块状(图3d)为主。矿石矿物主要是镍黄铁矿、磁黄铁矿及少量的黄铜矿(图3c、图3d、图3e),早期熔离出的硫化物液滴被橄榄石包裹在矿石的显微照片中清晰可见(图3f),含矿辉石岩中斜方辉石的含量明显高于单斜辉石(图3g),斜方辉石更利于铜镍硫化物的形成,结构构造中可见典型的橄榄石被辉石包裹的包橄结构(图3h)。矿石中有益组分主要是Ni、Co、Cu,铂族元素(PGE)含量较低。

3 夏日哈木矿床矿物学及地球化学特征

3.1 矿物学特征

3.1.1 橄榄石

夏日哈木镍钴矿床中,橄榄石作为主要的造岩矿物,其种属以贵橄榄石为主,镁橄榄石次之,主要分布于纯橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩及橄榄二辉辉石岩中。橄榄石多呈自形-半自形圆粒状或短柱状以堆晶形式产出,粒径一般1~2 mm,大者可达5~8 mm,裂理发育,常沿裂理及边缘发生强烈蛇纹石化蚀变,同时析出粉尘状铁质而成网状结构。蚀变强烈者蛇纹石与黑色铁质矿物构成橄榄石假象,只残留少量黄褐色橄榄石残块;另外,可见橄榄石发生伊丁石化蚀变。他形辉石包裹橄榄石形成包橄结构或包含结构。电子探针分析显示,纯橄榄岩中橄榄石成分:SiO₂为38.12%~41.86%,TF_{FeO}为12.4%~14.38%,MgO为44.32%~46.78%;Ni为 574×10^{-6} ~ 2751×10^{-6} ,Mn为 1046×10^{-6} ~ 2364×10^{-6} ,Ca大多数低于检测下限,含量相对较



a. 矿石岩心表面; b. 矿石岩心断口; c. 块状矿石; d. 团块状矿石; e. 稠密浸染状矿石; f. 硫化物熔离结构; g. 含矿岩石显微结构; h. 包橄结构; Cp. 黄铜矿; Po. 磁黄铁矿; Pn. 镍黄铁矿; Ol. 橄榄石; Opx. 斜方辉石; Sulfide. 硫化物

图 3 夏日哈木铜镍矿石类型及显微照片

Fig. 3 Microphotographs of rocks and ore minerals in Xiarihamu magmatic Ni - Cu sulfide deposit

低,最大为 $1\,299 \times 10^{-6}$, 相应 Fo 值为 $79.83 \sim 86.86$ 。方辉橄榄岩中: SiO_2 为 $36.49\% \sim 42.03\%$, $TFeO$ 为 $9.54\% \sim 15.34\%$, MgO 为 $44.00\% \sim 49.71\%$; Ni 为 $841 \times 10^{-6} \sim 2\,885 \times 10^{-6}$, Mn 少量低于检测下限,为 $0 \sim 2\,596 \times 10^{-6}$, Ca 大多数低于检测下限,含量相对较低,最大为 350×10^{-6} , 相应 Fo 值为 $83.63 \sim 90.12$ 。二辉橄榄岩中: SiO_2 为

$36.60\% \sim 41.15\%$, $TFeO$ 为 $11.15\% \sim 16.51\%$, MgO 为 $42.48\% \sim 48.90\%$; Ni 为 $676 \times 10^{-6} \sim 3\,922 \times 10^{-6}$, Mn 少量低于检测下限,为 $0 \sim 2\,255 \times 10^{-6}$, Ca 大多数低于检测下限,含量相对较低,最大为 $1\,163 \times 10^{-6}$, 相应 Fo 值为 $82.10 \sim 88.36$ 。总体上,橄榄石具有低 Ca 的特征,其 Fo 变化范围为 $80 \sim 90$, Ni 变化范围为 $574 \times 10^{-6} \sim 3\,922 \times 10^{-6}$

(LIU, et al., 2018)。

影响橄榄石成分的主要因素有:①母岩浆成分。②岩浆结晶分异和硫化物熔离。③橄榄石与后期的晶间硅酸盐岩浆、硫化物熔体发生反应。④新鲜岩浆的注入。母岩浆中 MgO 及 Ni 含量较高则结晶形成的橄榄石中 Fo 值及 Ni 含量也相对较高。在硫不饱和条件下,随着岩浆的结晶分异,橄榄石中 Ni 含量将随 Fo 值的减小而减小,呈正相关关系。在硫饱和条件下,硫化物熔离作用会导致岩浆中 Ni 含量急剧亏损,进而结晶出 Ni 亏损的橄榄石,橄榄石的 Ni 亏损程度主要由岩浆中橄榄石和硫化物的质量比决定。当早期结晶的橄榄石与晶间硅酸盐岩浆发生物质交换,橄榄石 Fo 值与 Ni 含量会降低(WANG, et al., 2019);而在橄榄石晶体与硫化物熔体之间发生 Fe-Ni 交换的过程中,FeO 含量高的橄榄石将得到更多的 Ni,橄榄石中 Ni 含量与 Fo 值呈负相关关系(张招崇等,2003;PinAR, et al., 2006;BARNES, et al., 2016;王辰等,2018)。另外,新鲜岩浆的注入改变了母岩浆中 FeO、MgO 的比值及 Ni 含量也会影响橄榄石中的 MgO 及 Ni 的含量。

橄榄石在封闭稳定的系统中结晶时,从核部到边部 Fo 值会有减小或几乎不变的趋势,而夏日哈木矿床中被巨大斜方辉石“斑晶”包裹的橄榄石的 Fo、Ni 从核部到边部均升高。橄榄石与晶间硅酸盐熔浆反应会使得橄榄石 Fo 值及 Ni 含量都减小;橄榄石与硫化物反应会使得橄榄石边部富集更多的 Ni,但并不会提高其 Fo 值。因此,被巨大斜方辉石“斑晶”包裹的橄榄石形成过程中很可能存在 MgO 及 Ni 含量都相对较高的新鲜岩浆的加入。这从单矿物角度说明夏日哈木镍钴矿床含矿岩相侵入过程中至少存在 2 次岩浆活动。

3.1.2 斜方辉石

夏日哈木镍钴矿床斜方辉石主要赋存于纯橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、二辉辉石岩、斜方辉石岩及辉长岩中,岩体中总体含量~50%。其种属以古铜辉石为主,紫苏辉石次之,多充填于橄榄石晶间或呈自形短柱状以堆晶矿物形式产出,粒径一般为 3~5 mm,可见“巨型”斜方辉石“斑晶”(粒度~20 mm)包裹数颗粒度较小的橄榄石。斜方辉石多发生蛇纹石化、滑石化、伊丁石化和纤闪石化蚀变,在手标本中可见新鲜的古铜辉石。发生蛇纹石化的

斜方辉石具有类似橄榄石蚀变之后的镜下特征,但保留原有的短柱状晶形。橄榄岩相中的斜方辉石 MgO 含量较高,这可能是其形成较早造成的,即从岩浆活动早期到晚期,其成分由富 Mg 向富 Fe 端元演化。斜方辉石中的 Al_2O_3 含量为 0.27%~5.77%,平均为 2.82%(张志炳等,2017),这与地幔橄榄岩中的斜方辉石 Al_2O_3 含量接近(2.1%~5.0%)(MAVROGENES, et al., 1999)。斜方辉石种属均为古铜辉石,其 En(顽火辉石)分子介于 76%~88%,但不同岩相中 En 分子含量存在较大的差异,这可能与较长时间的岩浆演化有关。

3.1.3 单斜辉石

单斜辉石主要赋存于二辉橄榄岩、二辉辉石岩及辉长岩中,岩体中总体含量~20%。以透辉石为主,含极少量的顽透辉石和普通辉石,多呈半自形-自形短柱状堆晶矿物或以橄榄石晶间矿物的形式产出,粒径一般 2~3 mm。可见其与自形程度相近的斜长石构成“辉长结构”。单斜辉石蚀变产物通常为阳起石、透闪石、纤闪石及黑云母等。单斜辉石电子探针数据显示,橄榄岩相中单斜辉石的 Cr_2O_3 含量较高,可能与其较早结晶有关; TiO_2 含量较低,与岛弧成因的单斜辉石具有一定的相似性;经计算 Fe^{3+} 离子也相对较低,这表明单斜辉石是在较低氧逸度环境下结晶的,夏日哈木单斜辉石种属主要为透辉石,少量为次透辉石和普通辉石,其 Wo 为 22.00%~51.75%,En 为 39.21%~70.19%,Fs 为 3.89%~13.22%,从橄榄岩相至辉长岩相有向 Fs 演化的趋势(张志炳等,2017)。

单斜辉石成分取决于母岩浆成分和结晶环境(KUSHIRO, 1960),在单斜辉石 $\text{Si}-\text{Al}$ 图解和 Al_2-TiO_2 图解中,大多数单斜辉石落于亚碱性系列中,表明夏日哈木矿床母岩浆属于亚碱性系列。单斜辉石 $\text{SiO}_2-\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2$ 图解中,大多数单斜辉石落于拉斑玄武系列中,说明其母岩浆属于拉斑玄武系列(张志炳等,2017)。

3.1.4 铬尖晶石

铬尖晶石在夏日哈木镍钴矿床产出于辉石岩相-橄榄岩相中(纯橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄二辉辉石岩)。与橄榄石紧密共生,随岩石中橄榄石含量减少而减少,但也有些含橄榄石的样品中未见铬尖晶石。铬尖晶石一般为深褐色或深棕色,多呈粒状或浑圆状被橄榄石或辉石包裹,也可呈

堆晶形式产出,粒径一般为 0.05~0.20 mm,可见其被磁铁矿沿内部裂纹或边缘交代,偶见铬尖晶石内部包裹未知矿物。夏日哈木铬尖晶石中 Cr_2O_3 与 Al_2O_3 、 MgO 呈负相关关系,与 TFeO 呈正相关关系,是岩浆结晶的铬尖晶石特征(张志炳等,2016)。 Al_2O_3 含量 > 18.30%,平均为 34.18%,这明显高于玻安岩中的铬尖晶石 Al_2O_3 含量(<15%)(WENDLANDT,1982)。橄榄石中包裹的铬尖晶石的 Cr_2O_3 含量总体上高于辉石中包裹的铬尖晶石,这与岩浆结晶作用中所有含 Cr 的矿物,早期形成者往往比晚期形成者富含 Cr 的说法是一致的。 $\text{Mg}^\# - \text{Cr}^\#$ 图解显示,铬尖晶石 $\text{Cr}^\#$ 值(22~62)及 $\text{Mg}^\#$ 值(22~60)变化范围较大,呈负相关关系(张志炳等,2016)。

铬尖晶石在一定程度上可以反演母岩浆成分。PGE、橄榄石及单斜辉石的研究表明,夏日哈木矿床的母岩浆属于高 Mg 拉斑玄武质岩浆,由铬尖晶石成分可推断夏日哈木镍钴矿床的母岩浆属于低 Ti、高 Mg 拉斑玄武质岩浆(张志炳等,2016)。经电子探针分析,铬尖晶石中所包裹的未知矿物为角闪石,由角闪石^N $\text{Al} - \text{Na} + \text{K}$ 图解确定其为幔源岩浆成因,这说明岩浆演化早期发生了少量角闪石的结晶。角闪石的出现表明形成夏日哈木岩体岩浆演化的早期含水,可能是幔源岩浆混染了含水矿物导致的。张志炳等(2017)研究得出橄榄石中的铬尖晶石形成温度为 1 360~1 411℃,岩浆源区部分熔融时的温度应大于铬尖晶石的形成温度,即源区温度至少为 1 400℃,通常认为软流圈地幔的温度为 1 280~1 350℃,认为夏日哈木岩体的母岩浆很有可能起源于软流圈地幔。

3.2 矿床地球化学

3.2.1 成岩成矿时代

夏日哈木镍钴矿床已开展了系统锆石 U-Pb 年代学研究。夏日哈木 I 号含矿岩体镁铁-超镁铁质岩侵入于年代更老的辉长岩中,夏日哈木 I 号赋矿超镁铁质岩体辉石岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为 $(411.6 \pm 2.4)\text{Ma}$,而寄主岩石辉长岩侵入年龄为 $(431.3 \pm 2.1)\text{Ma}$ (LI, et al., 2015; 张照伟等,2015)。SONG, et al. (2016) 研究夏日哈木 I 号含矿岩体获得二辉辉石岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(406.1 \pm 2.7)\text{Ma}$ 。

3.2.2 岩石地球化学

夏日哈木镁铁-超镁铁质岩体不同岩相主要元素氧化物含量变化较大, I 号岩体全岩 MgO 含量变化于 7.5%~38.81%, SiO_2 含量变化于 34.11%~54.60%, Al_2O_3 含量变化于 0.57%~18.19%(LI, et al., 2015; 张照伟等,2015)。各类岩石主量元素总体显示出低硅、低钛、高镁、贫碱的特征;在主要元素氧化物与 MgO 含量图解中, Al_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 、 Na_2O 与 MgO 呈明显的负相关,不同岩石类型主要氧化物与 MgO 含量的系统协变特征表明为岩浆结晶演化的产物,岩浆演化过程中发生了橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和斜长石的结晶分离作用和不同期次岩浆的注入。

夏日哈木镁铁-超镁铁质岩体岩石地球化学数据显示,各种岩相微量元素具有相似的配分模式,均富集轻稀土元素 LREE 和大离子亲石元素 LILE (Rb、Th、U、K),相对亏损高场强元素 HFSE (Nb、Ta、Ti、P)。稀土元素总含量较低,球粒陨石标准化配分曲线呈右倾型。I 号岩体从橄榄岩、辉石岩及辉长岩不同岩石类型的微量元素和稀土元素配分模式相似,但含量依次增加,显示为岩浆连续结晶的产物(LIU, et al., 2018)。

3.2.3 同位素地球化学

根据夏日哈木 I 号镁铁-超镁铁质岩体的年龄(超镁铁质岩体年龄为 $(411.6 \pm 2.4)\text{Ma}$,辉长质岩体年龄为 $(431.3 \pm 2.1)\text{Ma}$)(LI, et al., 2015),得到超镁铁质岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 ϵ_{Nd} 分别为 0.706 426~0.710 463 和 $-1.97 \sim -5.74$, 镁铁质岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 ϵ_{Nd} 分别为 0.709 390 和 -5.65 (王冠等,2014; 姜常义等,2015; ZHANG, et al., 2017)。I 号岩体斜方辉石岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -3.1 \sim -1.7(t=422)$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.703 105 \sim 0.710 932$, 平均值为 0.705 811;全岩氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 5.2\text{‰} \sim 7.0\text{‰}$ 。辉石单矿物的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.2 \sim -1.6(t=422)$ (王冠等,2014)。

夏日哈木侵入体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与弧环境形成的黑山矿床相似,但比典型的裂谷环境形成的金川矿床的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 相比较低。夏日哈木侵入体 ϵ_{Nd} 与黑山矿床相比较低,但是高于金川矿床的 ϵ_{Nd} 值。Sr-Nd 同位素数据表明夏日哈木侵入体的母岩浆比黑山侵入体更加富集,但没有金川矿床富集(LI, et al., 2009)。夏日哈木 I 号岩体 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化

于 17.774~18.346, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 15.536~15.598, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化于 37.529~38.209。硫化物铅同位素显示出地幔和造山带 Pb 同位素特征(王冠等,2014)。

夏日哈木矿床侵入体的 Hf、S、Os 同位素值显示,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 +4.44‰~+6.45‰,矿石 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i 值为 0.159 0~2.009 7, γ_{Os} 值为 28~1 520(凌锦兰等,2014)。I 号岩体辉长苏长岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 628~0.282 833,对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=4.0\sim 10.9$,tDM1 为 610~875 Ma,平均值为 788 Ma(王冠等,2014)。

4 成矿机理探讨

4.1 构造背景认识

新元古代时期,塔里木与华北、华南克拉通的关系有相互远离、与华北相连和与华南和澳大利亚大陆相连 3 种认识,并认为超地幔柱作用导致新元古代 Rodinia 超大陆的裂解,新元古代金川超大型岩浆铜镍硫化物矿床是该超地幔柱作用的结果(许志琴等,2016)。早古生代以来塔里木克拉通与华北克拉通相连,与华南克拉通相离(任纪舜等,2017),但总体上是冈瓦纳大陆北缘的组成部分。随着古亚洲洋的收缩汇聚,塔里木、华北和华南克拉通北移构成了劳亚大陆的南缘。但古亚洲洋闭合时限存在很大争议,至少有泥盆纪末、石炭纪晚期和三叠纪初期 3 种观点。古亚洲洋闭合过程中,古特提斯开始裂解并于石炭纪裂解成洋(任纪舜等,2017)。早寒武一晚奥陶世末,古亚洲-原特提斯洋分支(昆仑洋、祁连洋)俯冲消减(蛇绿岩,522~449 Ma);中一晚志留世,原特提斯洋闭合,发生陆-陆碰撞(榴辉岩高压变质,435 Ma);晚志留世,陆-陆碰撞后伸展阶段(榴辉岩折返退变质,408 Ma);晚志留世末,冈瓦纳大陆裂解,标志古特提斯洋演化阶段的开始,裂谷化形成(李文渊,2018)。

镁铁-超镁铁岩是幔源岩浆结晶分异的产物,多产在大陆边缘裂谷、克拉通裂谷、岛弧裂谷、后碰撞伸展环境中(张照伟等,2015;LI,et al.,2015;SONG,et al.,2016;ZHANG,et al.,2019;LIU,et al.,2016,2019)。控制岩浆硫化物矿床成矿作用的首要因素是具有连通地幔的断裂或通道,需要有超壳深大断裂作为导矿构造。东昆仑夏日哈木岩

体位于黑山-那陵格勒断裂和昆中断裂附近。昆中断裂为岩石圈破裂带,呈北西-南东向,大致与昆北断裂平行展布,其东端起于格尔木以东,向西经过小灶火、那陵格勒河,穿越库木库里盆地,最终汇于呈北东向展布的白干湖断裂。昆中断裂呈北西-南东向,东段近西-东向展布,是昆中带和昆南带的分界断裂(图 1)。区域地球物理资料显示,沿该断裂带重力梯度明显,地震测深显示该断裂下延切割莫霍面,莫霍面深度和岩石圈深度均显示南高北低,落差分别为 8 km 和 20 km(SONG,et al.,2006;祁生胜等,2014;王亚磊等,2017),且这种地幔顶界面的落差可能在志留纪就已经存在(姜常义等,2015)。可见,昆中断裂是一条规模巨大的超岩石圈断裂,为深部岩浆上侵并形成铜镍矿体提供了必要的条件。

夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床是原特提斯洋闭合后,古特提斯开裂,如同金川是罗迪尼亚超大陆三叉裂点一样,夏日哈木可能是冈瓦纳大陆边缘三叉裂点大陆裂谷的产物。阿尔金带是夭折的那条裂谷带,而东昆仑(现今的东昆仑和南祁连)和西昆仑裂谷则继续发育,直至裂解成古特提斯洋。整个东昆仑-南祁连早古生代末岩浆镍钴硫化物矿床都是古特提斯洋裂谷化的产物(李文渊,2018)。

4.2 硫化物熔离

硫化物熔离是岩浆铜镍矿床形成的关键环节,从硅酸盐岩浆中熔离出来且富含亲 Cu 元素的硫化物液滴发生聚集、就位,固结形成岩浆铜镍硫化物矿体(MAIER,et al.,2010;SONG,et al.,2016;ZHANG,et al.,2018;LIU,et al.,2018)。幔源成矿岩浆分离结晶、岩浆混合、富硅物质的混染和外来硫的加入等是硫饱和、硫化物熔离形成岩浆矿床的重要因素。夏日哈木镍钴硫化物矿床硫饱和、硫化物熔离成矿的重要因素是结晶分离、地壳混染和外来硫的加入。夏日哈木 I 号岩体存在纯橄榄岩→辉石橄榄岩→辉石岩的分异过程,且有大量的斜方辉石。结晶分异过程有利于铜镍矿的硫化物饱和(LI,et al.,2013;LIU,et al.,2017,2018)。硫化物饱和是幔源岩浆形成铜镍硫化物矿床的关键机制。岩浆铜镍硫化物矿床是幔源岩浆经历了复杂的演化最终达到硫化物饱和而发生硫化物熔离的产物(NALDRETT,2004,2009,2011;BARNES,et al.,2013)。

S 同位素特征显示有明显地壳硫的加入

(ZHANG, et al., 2017)。地壳浅部围岩 S 的混入对镍矿体的形成具有重要贡献(YANG, et al., 2012; 张照伟等, 2015)。从二辉橄榄岩到二辉辉石岩 H_2S 含量依次增加, 表明成矿岩浆演化过程中有富 S 组分的加入; 各个温度段挥发分 $RH = \log(XH_2/XH_2O)$ 值均大于 -2.82, 结合挥发分化学组成表明还原的岩浆介质环境, 其有利于发生硫化物熔离和成矿(汤庆艳等, 2017)。与地壳混染有关的 $^3He/^4He$ 值与 Ni、Cu 含量呈负相关, $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值与 Ni、Cu 含量呈正相关, 表明地壳物质的加入可能是硫化物熔离成矿的重要因素(汤庆艳等, 2017)。

岩浆镍铜硫化物矿床的形成过程中硫饱和促使硫化物熔离是关键因素, 外来硫的加入是造成硫饱和的一种重要方式(TAO, et al., 2008; LI, et al., 2009; LI, et al., 2013; LIGHTFOOT, et al., 2015; SALAMA, et al., 2016)。夏日哈木镍钴硫化物矿床中 H_2S 含量低, 且未检测到 SO_2 ; 岩浆流体 H_2S 含量从二辉橄榄岩($10\text{ mm}^3/\text{g}$)、橄榄辉石岩($18\text{ mm}^3/\text{g}$)到二辉辉石岩($28\text{ mm}^3/\text{g}$)逐渐增加, 表明在岩浆演化过程中存在富 S 组分的加入(汤庆艳等, 2017)。S 同位素指示母岩浆中存在地壳硫的加入(LI, et al., 2015; ZHANG, et al., 2017), 可能为岩浆侵位之前上升过程中地壳硫的混染。因此夏日哈木富 S 流体应该来自元古宙金水口岩群变质岩及新元古代含石榴石花岗片麻岩。LIU, et al. (2018) 发现夏日哈木围岩片麻状花岗岩中星点状硫化物的原位 S 同位素为 $\delta^{34}S_{V-CDT} = 11.2\text{‰}$, 而夏日哈木的岩体中不同岩相硫化物 $\delta^{34}S = 2.4\text{‰} \sim 7.7\text{‰}$, 均值为 4.5‰ , 并通过同位素两端元混染模型发现, 地壳硫对夏日哈木总硫的贡献程度在 $40\% \sim 60\%$, 可见地壳硫混染是夏日哈木镍钴矿床成矿的关键因素。

4.3 成矿赋矿机理

夏日哈木 I 号岩体的岩浆在上侵过程中发生了硫化物不混溶作用, 是多次岩浆脉动上侵成矿的结果, 地壳混染作用在成矿过程中起着重要作用(ZHANG, et al., 2017)。夏日哈木 I 号岩体的含矿母岩浆组成经计算为 MgO 、 FeO 、 SiO_2 含量分别为 9.76% 、 6.54% 和 59.17% 。微量元素比值显示岩浆源区受到俯冲流体交代作用和软流圈物质加入, 并发生低程度部分熔融, 成矿岩浆发生橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、斜长石和尖晶石等矿物结晶分

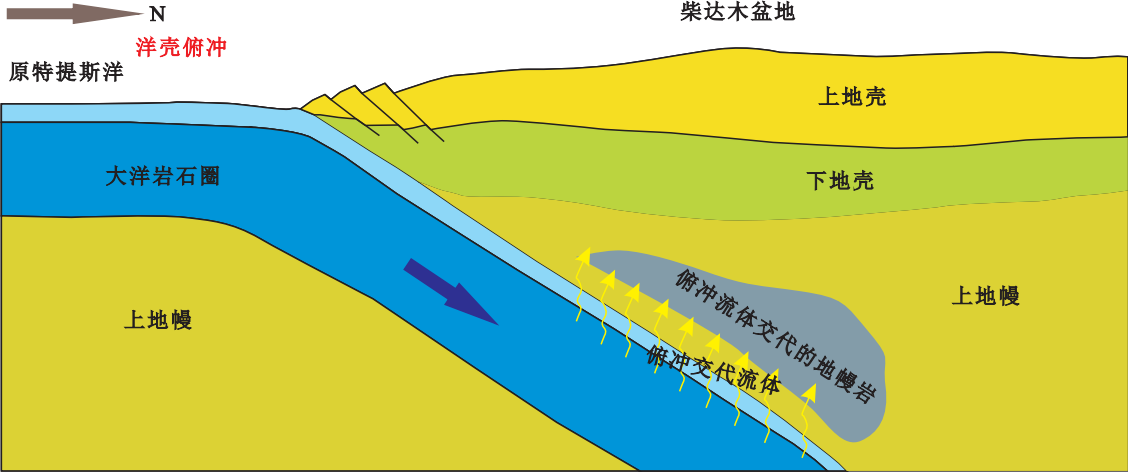
离(LIU, et al., 2018)。SONG, et al. (2016) 通过夏日哈木镍钴硫化物矿体特征研究, 认为岩浆经由西向东的岩浆通道侵位过程中携带橄榄石晶体和硫化物珠滴, 岩浆形成不同方向的分支, 后分别形成了 2 个豆荚状矿体。夏日哈木镍铜硫化物矿床不同位置(勘探线)岩浆矿物稀有气体同位素结果表明, 从岩体西部至东部 $^3He/^4He$ 值降低、 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值升高。从岩体西部至东部全岩 Ni 和 Cu 含量总体呈升高的趋势(SONG, et al., 2016; ZHANG, et al., 2017)。 $^3He/^4He$ 和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 值的空间变化特征表明, 4He 和 ^{40}Ar 由西向东增加, 即地壳(围岩)物质是在岩浆侵入过程中不断加入的, 即岩浆可能自西向东侵入。

夏日哈木母岩浆在早期阶段 S 是不饱和的, 橄榄石的分离结晶作用导致母岩浆中 S 发生了初步富集, 随着岩浆房中具有弧岩浆物质的新鲜岩浆的注入及地壳物质的混染, 使得矿床中形成的镁铁质-超镁铁质岩体具有岛弧岩浆岩的一些地球化学性质, 同时该过程中外来 S 的加入导致岩浆房中的 S 发生饱和, 促使富 Ni、Cu、Co 等金属元素的硫化物发生大规模熔离作用, 随着部分熔融发生的岩浆上涌, 深部和浅部均产生了硫化物的不混溶作用, 演化的岩浆恰逢古特提斯洋演化开始大陆裂解的构造背景, 于柴达木克拉通南缘东昆仑造山带构造薄弱部位成岩成矿, 形成夏日哈木岩浆镍钴硫化物矿床(图 4)。

4.4 进一步找矿方向

夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床的形成, 是伴随岩浆源区部分熔融发生的岩浆上涌、深部和浅部均产生了硫化物的熔离、富含硫化物的岩浆于柴达木盆地南缘古特提斯洋演化开始大陆裂解构造-岩浆作用与成矿的结果。夏日哈木镍钴硫化物矿床微量元素比值显示岩浆源区受到俯冲流体交代作用和软流圈物质加入并发生低程度部分熔融, 成矿岩浆发生橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、斜长石和尖晶石等矿物结晶分离(ZHANG, et al., 2017; LIU, et al., 2018)。根据对夏日哈木镁铁-超镁铁质岩浆自西而东侵位方向的研究认识, 在夏日哈木岩体西端深部可能有隐伏的含矿岩体, 是该矿床就矿找矿和深部找矿的重要找矿方向。后经钻探工作验证, 在夏日哈木岩体西段 23 线、27 线、31 线深部均发现了镍钴矿体。钻孔深度已超过 $1\ 000\text{ m}$, 在 31 线以西, 35 线、39 线或更西的深部 $2\ 000\text{ m}$ 以浅

(a) 早古生代 (522~449Ma)



(b) 晚古生代 (411Ma之后)

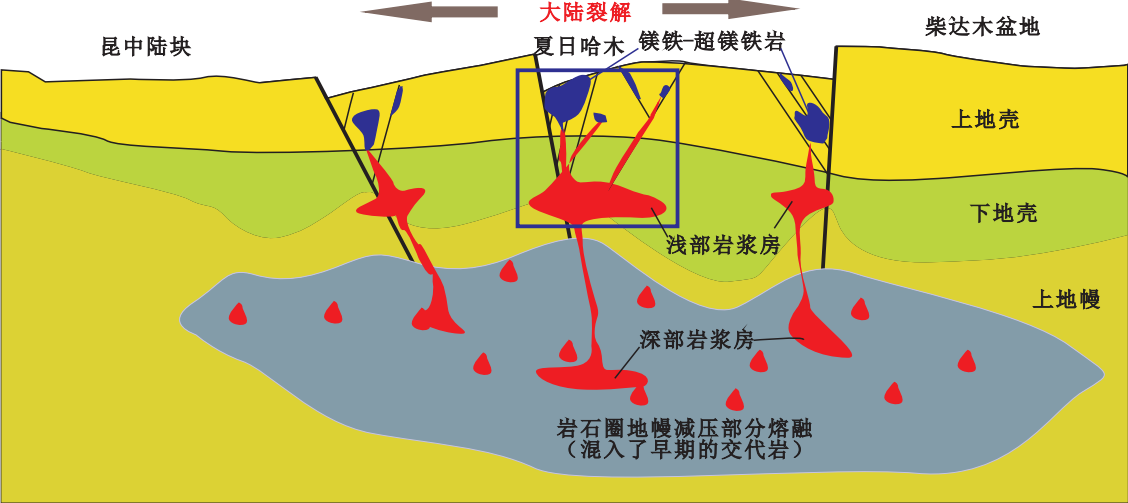


图 4 东昆仑夏日哈木镍钴硫化物矿床成矿模式简图

Fig. 4 Sketch map of metallogenic pattern Xiarihamu magmatic Ni - Co sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt

区域,可能仍有隐伏矿体的赋存,深部找矿应重点关注。

既然夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床是大陆裂谷环境的岩浆成矿表现,沿着昆北、昆中断裂夏日哈木矿床的北西、南东方向,可能发育更多的镁铁-超镁铁质岩体,且伴有镍钴硫化物矿化。在昆北断裂带发现的冰沟南小型矿床、昆中断裂带发现的石头坑德大型岩浆镍钴硫化物矿床(图 1)可能均为同一构造背景岩浆活动的结果。昆北、昆中断裂沿南东-北西方向绵延上千千米都可能是古特提斯洋演

化开始大陆裂解岩浆活动的范围,同类型的镁铁-超镁铁质岩体均是下一步区域找矿的重要方向。

5 结论

(1)东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床是伴随古特提斯洋演化开始大陆裂解镁铁-超镁铁质岩浆多次脉冲叠加硫化物熔离成矿的结果。

(2)地壳 S 的混染加入是导致夏日哈木镁铁-超镁铁质岩浆硫化物熔离的关键因素,斜方辉石含量高的岩相更有利于赋存富矿体。

(3)东昆仑造山带沿昆北、昆中断裂带于夏日哈木镍钴硫化物矿床北西、南东方位发育的岩体,铁质系列的镁铁-超镁铁质岩相是该区域进一步找矿的重要方向。

致谢:野外地质工作得到青海省地质调查局、青海省第五地质矿产勘查院领导及野外一线工作同志的支持、关心与帮助;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野外工作及插图绘制;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):

杜玮,汤中立,杜玉良,等. 青海夏日哈木铜镍矿床成矿特征及找矿研究[J]. 西北地质, 2017, 50(3): 180-186.

DU Wei, TANG Zhongli, DU Yuliang, et al. Reserch on Mineralization characters and Prospecting of the Xiarihamu Magematic Ni - Cu Sufide Deposit [J]. North-western Geology, 2017, 50(3): 180-186.

范丽琨,蔡岩萍,梁海川,等. 东昆仑地质构造及地球动力学演化特征[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3): 181-186.

FAN Likun, CAI Yanping, LIANG Haichuan, et al. Characteristics of geological tectonic and geodynamics evolution in eastern Kunlun orogenic belt[J]. Geological Survey and Research, 2009, 33(3): 181-186.

耿林,翟裕生,彭润民. 中国铂族元素矿床特征及资源潜力分析[J]. 地质与勘探, 2007, 43(1): 1-7.

GENG Lin, ZHAI Yusheng, PENG Ruimin. Characteristics and Resource Potential of Platinum Group Elements Deposit in China[J]. Geology and Exploration, 2007, 43(1): 1-7.

何书跃,李东生,白国龙,等. 青海祁漫塔格群力矿床矽卡岩中白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄报道[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 201-202.

HE Shuyue, LI Dongsheng, BAI Guolong, et al. The report on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of muscovite from the Qunli Fe-poly-metallic deposit in the Qimantag area, Qinghai Province [J]. Geology in China, 2018, 45(1): 201-202.

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 Jinlan, 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.

孔会磊,李金超,国显正,等. 青海东昆仑希望沟铜镍矿点发现早泥盆世辉橄岩[J]. 中国地质, 2019, 46(1): 205-206.

KONG Huilei, LI Jinchao, GUO Xianzheng, et al. The discovery of Early Devonian pyroxene peridotite from the Xiwanggou magmatic Ni-Cu sulfide ore spot in East Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2019, 46(1): 205-206.

李荣社,计文化,杨永成,等. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京:地质出版社: 2008, 15-309.

LI Rongshe, JI Wenhua, YANG Yongcheng, et al. Geology of Kunlun orogenic belt and its adjacent area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 2008, 15-309.

李廷栋,肖庆辉,潘桂棠,等. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1441-1451.

LI Tingdong, XIAO Qinghui, PAN Guitang, et al. A Consideration about the Development of Ocean Plate Geology[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1441-1451.

李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 365-380.

LI Wenyuan. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 365-380.

李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2201-2210.

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

凌锦兰. 柴周缘镁铁质-超镁铁质岩体与镍矿床成因研究[D]. 西安:长安大学, 2014, 214.

LING J L. Metallogenesis of Nickel Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014, 214.

孟繁聰,贾丽辉,任玉峰,等. 东昆仑东段温泉地区片麻岩记录的岩浆和变质事件:锆石 U - Pb 年代学证据[J]. 岩石学报, 2017, 32(12): 3691-3709.

MENG Fancong, JIA Lihui, REN Yufeng, et al. Magmatic and metamorphic events recrded in the gneisses of the Wenquan region, east Kunlun Mountains, Northwestern China: evidence from the zircon U - Pb geochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 32(12): 3691-3709.

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

MO Xuanxue. Magmatism and Deep Geological Process[J].

- Earth Science, 2019, 44(5): 1487-1493.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 等. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1544-1561.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, ZHANG Kexin, et al. Recognition of the Oceanic Subduction-Accretion Zones from the Orogenic Belt in Continents and Its Important Scientific Significance[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1544-1561.
- 钱兵, 张照伟, 刘会文, 等. 柴达木西北缘古生代镁铁超镁铁质岩体 Cu-Ni 成矿条件与找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 35-49.
- QIAN Bing, ZHANG Zhaowei, LIU Huiwen, et al. Analysis on the Prospecting Potentiality and Cu-Ni Metallogenic Conditions of the Paleozoic Mafic-ultramafic in the Northwestern Margin of Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 35-49.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 等. 东昆仑西段夏日哈木-苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3345-3356.
- QI Shengsheng, SONG Shuguang, SHI Lianchang, et al. Discovery and its geological significance of Early Paleozoic eclogite in Xiarihamu-Suhaitu area, western part of the East Kunlun [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3345-3356.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 287-305.
- SONG Xieyan, HU Ruizhong, CHEN Liemeng. Geochemical properties of Ni, Cu, PGE and its significance for mantle magma origin, evolution and magmatic sulfide deposits research[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 287-305.
- 任纪舜, 赵磊, 李崇, 等. 中国大地构造研究之思考——中国地质学家的责任与担当[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 33-43.
- REN Jishun, ZHAO Lei, LI Chong, et al. Thinking on Chinese tectonics——Duty and responsibility of Chinese geologists[J]. Geology in China, 2017, 44(1): 33-43.
- 孙小攀, 杨春雷, 齐耀辉, 等. 柴达木西北缘大通沟南山基性-超基性岩地球化学特征及找矿前景分析[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 53-66.
- SUN Xiaopan, YANG Chunlei, QI Yaohui, et al. Geochemistry and Prospecting Potential of Datonggou South Mountain Basic-ultrabasic Rocks in Northwest Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 53-66.
- 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.
- 王博林, 李文渊, 张照伟, 等. 东天山香山中镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学特征: 对成岩成矿过程的约束[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1207-1233.
- WANG Bolin, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, et al. Petrological and mineralogical characteristics of the Xiangshanzhong maficultramafic intrusion in eastern Tianshan Mountains: Constrains on rockforming and ore-forming processes[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1207-1233.
- 王辰, 刘建朝, 王浩然, 等. 甘肃金川二矿区岩体橄榄石组构特征研究[J]. 西北地质, 2018, 51(1): 13-22.
- WANG Chen, LIU Jianchao, WANG Haoran, et al. Fabric Characteristics of the Olivine from No. 2 Mining Area in the Jinchuan Deposit, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(1): 13-22.
- 王冠. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2014, 1-200.
- WANG Guan. Metallogenesis of nickel deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[J]. Jilin University Doctoral Dissertation, 2014, 1-200.
- 王岩, 王登红, 孙涛, 等. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J]. 地质学报, 2020, 94(1): 217-240.
- WANG Yan, WANG Denghong, SUN Tao, et al. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(1): 217-240.
- 王亚磊, 张照伟, 张江伟, 等. 新疆坡北铜镍矿床铂族元素特征及其对成矿过程的约束[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 13-24.
- WANG Yalei, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. Geochemical Characters of Platinum-group Elements and Its Significances on the Mineralization Process of the Pobei Cu-Ni Sulfide Deposit in Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 13-24.
- 校培喜, 高晓峰, 胡云绪, 等. 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, 1-261.
- XIAO Peixi, GAO Xiaofeng, HU Yunxu, et al. Geological

- settings study on Arkin-west part of eastern Kunlun orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014, 1-261.
- 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 1-42.
- XU Zhiqin, YANG Jingsui, HOU Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 1-42.
- 张国伟, 郭安林. 关于大陆构造研究的一些思考与讨论[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1464-1475.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin. Thoughts on Continental Tectonics[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1464-1475.
- 张玉, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段阿拉思木辉长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及洋盆闭合时限界定[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 526-540.
- ZHANG Yu, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry of the Alasimu gabbro in eastern section of East Kunlun Mountains and the closing time of Paleo-ocean basin[J]. Geology in China, 2017, 44(3): 526-540.
- 张雪宁, 杨生德. 青海省板块构造研究-1: 100 万青海省大地构造图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2007, 1-178.
- ZHANG Xueting, YANG Shengde. Study on plate tectonic in Qinghai province—1: 100000000 specification for tectonic graph in Qinghai province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007, 1-178.
- 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(5): 966-975.
- ZHANG Zhibing, 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(5): 966-975.
- 张志炳, 李文渊, 张照伟, 等. 东昆仑夏日哈木铜镍硫化物矿床辉石特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 2017, 53(5): 867-879.
- ZHANG Zhibing, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, et al. Mineral Characteristic and geological significance of pyroxene from Xiarihamu Ni-Cu sulfide deposit in the Eastern Kunlun orogenic belt, Northwestern China[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(5): 867-879.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 217-224.
- ZHANG Zhaochong, YAN Senghao, CHEN Bailin, et al. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(3): 217-224.
- 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 deposit 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, 2017, 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, 2017, 91(4): 724-735.
- 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.

- 王兴,裴先治,李瑞保,等. 东昆仑东段下三叠统洪水川组砾岩源区研究:来自砾岩特征及锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 中国地质, 2019, 46(1): 155-177.
- WANG Xing, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Conglomerate source and source area property of Lower Triassic Hongshuichuan Formation in the East Kunlun Mountains: Evidence from conglomerate characteristics and U-Pb dating[J]. Geology in China, 2019, 46(1): 155-177(in Chinese with English abstract).
- 孔会磊,李金超,国显正,等. 青海东昆仑希望沟铜镍矿点发现早泥盆世辉橄岩[J]. 中国地质, 2019, 46(1): 205-206.
- KONG Huilei, LI Jinchao, GUO Xianzheng, et al. The discovery of Early Devonian pyroxene peridotite from the Xiwanggou magmatic Ni-Cu sulfide ore spot in East Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2019, 46(1): 205-206(in Chinese with English abstract).
- BARNES S J, GODEL B, GURER D, et al. Sulfide-olivine Fe-Ni exchange and the origin of anomalously Ni-rich magmatic sulfides [J]. Economic Geology, 2013, 108: 1971-1982.
- BARNES S J, CRUDEN A R, ARNDT N, et al. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits [J]. Ore Geology Review, 2016, 76: 296-316.
- BIAN Q T, LI D H, Psopelov I, et al. Age, geochemistry and tectonic setting of the Buqingshan ophiolites, North Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(4): 577-596.
- LI C S, RIPLEY E M, THAKURTA J, et al. Variations of olivine Fo-Ni contents and highly chalcophile element abundances in arc ultramafic cumulates, southern Alaska [J]. Chemical Geology, 2013, 351: 15-28.
- LI C S, RIPLEY E M, Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: empirical equations and example applications[J]. Economic Geology, 2009, 104(3): 405-412.
- LI C S, ZHANG Z W, LI W Y, et al. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China[J]. Lithos, 2015, 216-217: 224-240.
- LIGHTFOOT P C, EVANS L D. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces[J]. Ore Geology Review, 2015, 64: 354-386.
- LIU Y G, CHEN Z G, LI W Y, et al. The Cu-Ni mineralization potential of the Kaimuqi mafic-ultramafic complex and the indicators for the magmatic Cu-Ni sulfide deposit exploration in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 198: 41-53.
- LIU Y G, LI W Y, LÜ X B, et al. Sulfide saturation mechanism of the Poyi magmatic Cu-Ni sulfide deposit in Beishan, Xinjiang, Northwest China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 91: 419-431.
- 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.
- LIU Y G, LÜ X B, WU C M, et al. The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: As suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data [J]. Ore Geology Reviews, 2016, 72: 538-545.
- MAIER W D, BARNES S J. The Kabanga Ni sulfide deposits, Tanzania: II. Chalcophile and siderophile element geochemistry[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(5): 443-460.
- MAIER W D, GROVES D I. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits [J]. Mineralium Deposita, 2011, 46: 841-857.
- MAO Y J, QIN K Z, LI C S, et al. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. Lithos, 2014, 200: 111-125.
- MAVROGENES J A, O'NEILL H S C. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(7): 1173-1180.
- MENG F C, CUI M H, WU X K, REN Y F. Heishan mafic-ultramafic rocks in the Qimantage area of Eastern Kunlun, NW China: Remnants of an early Paleozoic incipient island arc[J]. Gondwana Research, 2015, 27: 745-759.
- 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. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004, 1-366.
- NALDRETT A J. Fundamentals of Magmatic Sulfide Deposits[A]. Li and Ripley. *New Developments in Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits*[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2009, 1-309.
- NALDRETT A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2011, 17: 1-50.
- PIÑA R, LUNAR R, ORTEGA L, et al. Petrology and geochemistry of mafic-ultramafic fragments from the Aguablanca Ni-Cu ore breccia, southwest Spain[J]. *Economic Geology*, 2006, 101(4): 865-881.
- PIRAJNO F, ERNST R E, BORISENKO A S, et al. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny[J]. *Ore Geology Review*, 2009, 35(2): 114-136.
- SALAMA W, ANAND R, VERRAL M. Mineral exploration and basement mapping in areas of deep transported cover using indicator heavy minerals and paleoredox fronts, Yilgarn Craton, Western Australia[J]. *Ore Geology Review*, 2016, 72: 485-509.
- SONG S G, ZHANG L F, NIU Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: a case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(3): 435-455.
- 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.
- TAO Y, LI C S, SONG X Y, et al. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(8): 849-872.
- WANG Kaiyuan, SONG Xieyan, YI Junnian, et al. Zoned orthopyroxenes in the Ni-Co sulfide ore-bearing Xiarihamu mafic-ultramafic intrusion in northern Tibetan Plateau, China: Implications for multiple magma replenishments[J]. *Ore Geology Reviews* 113 (2019) 103082.
- WENDLANDT R F. Sulfide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperatures[J]. *American Mineralogist*, 1982, 67: 877-885.
- YANG S H, ZHOU M F, LIGHTFOOT P C. Selective crustal contamination and decoupling of lithophile and chalcophile element isotopes in sulfide-bearing mafic intrusions: An example from the Jingbulake intrusion, Xinjiang, NW China[J]. *Chemical Geology*, 2012, 302-303: 106-118.
- ZHANG Z W, LI W Y, GAO Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: zircon U-Pb age and Sr-Nd-Os-S isotope constraints from the Yulonggou and Yaqu gabbroic intrusions[J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49(2): 279-292.
- ZHANG Z W, TANG Q Y, LI C S, et al. Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, China[J]. *Miner Deposita*, 2017, 52: 51-68.
- ZHANG Z W, WANG Y L, QIAN B, et al. Metallogeny and tectonomagmatic setting of Ni-Cu magmatic sulfide mineralization, number 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(4): 467-477.