第 52 卷 第 3 期
2019 年(总 213 期)

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 52 No. 3
2019(Sum213)

DOI:10.19751/j.cnki.61—1149/p.2019.03.004

东昆仑夏日哈木矿区岩体含矿性特点与形成机理探讨

张照伟[1,2],王驰源[3,2],刘超[1,4],王亚磊[1],钱兵[1],李文渊[1],尤敏鑫[1],张江伟[1]

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,陕西 西安 710054;2. 新疆维吾尔自治区自然资源厅,新疆 乌鲁木齐 830002;3. 成都理工大学地球科学学院,四川 成都 610059;4. 长安大学地球科学与资源学院,陕西 西安 710054)

摘　要:东昆仑造山带有众多基性-超基性岩体,但目前仅在夏日哈木Ⅰ号岩体发现有超大型镍矿。对其含矿性特点与形成机理的研究有助于东昆仑地区的铜镍矿勘查。笔者梳理了目前诸多学者对夏日哈木铜镍矿的研究工作,并结合野外实际,发现铁质系列的镁铁-超镁铁质岩体才可能形成有经济价值的岩浆铜镍矿体,镁质系列的镁铁-超镁铁质岩体不可能成就大规模岩浆铜镍硫化物矿体;大断裂为地幔岩浆上侵提供了有利条件;分异良好的超基性岩体更具有成铜镍矿的潜力;结晶分异促进了硫化物饱和,地壳硫混染是成矿的关键;橄榄石和单斜辉石具有低的 CaO 和 FeO 含量的岩体特征,更有利于成铜镍矿。

关键词:镁铁-超镁铁质岩体;铜镍矿;含矿特点;成矿机理;夏日哈木

中图分类号:P588.1　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1009-6248(2019)03-0035-11

Mineralization Characteristics and Formation Mechanism of the Intrusions in Xiarihamu Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Kunlun Orogenic Belt, Northwest China

ZHANG Zhaowei[1,2], WANG Chiyuan[3,2], LIU Chao[1,4], WANG Yalei[1], QIAN Bing[1], LI Wenyuan[1], YOU Minxin[1], ZHANG Jiangwei[1]

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Department of Natural Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 3. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Some mafic-ultramafic intrusions have been found in the East Kunlun Orogenic Belt, but only the Xiarihamu I intrusions produces the giant Ni deposit. The study on ore-bearing characteristics and formation mechanism of the Xiarihamu I intrusion contributes to the exploration of copper-nickel deposits in the east Kunlun area. The research work of many scholars on the Xiari-

收稿日期:2018-12-31;**修回日期:**2019-02-19

基金项目: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),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),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)、第二次青藏高原综合科学考察研究专题(2019QZKK0802－5、2019QZKK0807－2)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

hamu nickel ore deposit has been summarized in this paper. Based on the field investigation, it's found that the iron series mafic-ultramafic intrusions can form the magmatic copper-nickel ore body with economic value, but magnesia series mafic-ultramafic intrusions are unlikely to achieve copper-nickel sulfide ore bodies. Large faults provide favorable conditions for the intrusion of mantle magma. The well-differentiated mafic-ultramafic intrusions have the better potential to form a copper-nickel ore. Crystallization differentiation promotes sulfide saturation, and the crustal sulfur contamination is the key to mineralization. The intrusions with olivine and clinopyroxene have low CaO and FeO content, which is more conducive to copper-nickel ore.

Keywords: mafic-ultramafic intrusion; magmatic Ni-Cu sulfide deposit; mineralization characteristics; metallogenic mechanism; Xiarihamu

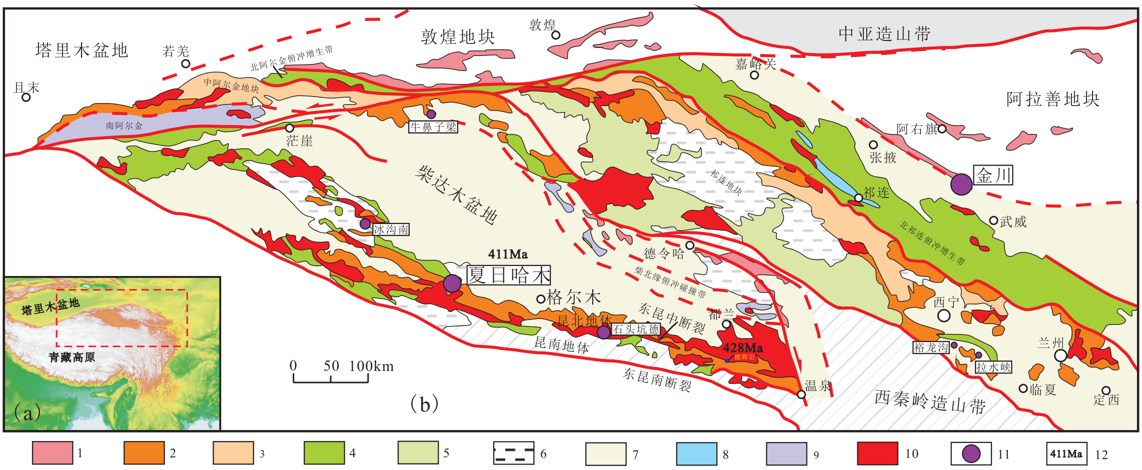
岩浆铜镍硫化物矿床大都赋存于镁铁-超镁铁质岩体内,其岩浆属于铁质系列的基性-超基性岩浆。该类矿床一般多发育于稳定陆块边缘裂谷系统,或与大火成岩省的岩浆活动密切相关,是深部地幔上涌硫化物不混溶作用发生的具体表现(ZHANG et al., 2018)。在中国,岩浆铜镍硫化物矿床还发育在造山带内,如新疆东天山的黄山岩带,产出了黄山、黄山东、图拉尔根等大型岩浆铜镍硫化物矿床和东北吉林红旗岭矿床(郗爱华等, 2006;李文渊,2015,2018)。尤其是近几年在东昆仑造山带新发现了夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿床,120 万 t 镍金属储量已达到超大型规模(张照伟等,2015;LI et al., 2015;ZHANG et al., 2017),这也是继 1996 年加拿大沃斯贝(VOISEY'S BAY)岩浆硫化物矿床发现以来近 20 年全球镍矿最重要的发现(张照伟等,2016)。这无疑会引起矿床学家研究的兴趣和热情。青海夏日哈木镍矿床在大地构造位置上处于东昆仑造山带的昆中带古生代岛弧带内(姜春发等, 1992;李荣社等,2008),造山带内也能产出超大型岩浆铜镍硫化物矿床,其铁质系列的基性-超基性岩浆是如何形成和演化的呢?不仅如此,在夏日哈木矿区发育有 5 个镁铁-超镁铁质岩体,但仅有Ⅰ号岩体含矿,是一个低铜贫铂族元素的岩浆硫化镍矿床(丰成友等,2016),其余Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ号岩体均不含有具经济价值的工业矿体,具体是一种什么样的构造背景和成矿机理形成的呢?如对该问题能够客观回答,一方面可以提升造山带背景岩浆成矿理论的认识水平,另一方面可极大推进东昆仑造山带岩浆铜镍硫化物矿床的找矿实践与新突破。

1 区域地质构造背景

东昆仑造山带整体位于青藏高原的东北部,柴达木盆地南缘(图 1a)。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新生代陆内造山阶段(ZHANG et al., 2014;校培喜等,2014;钱兵等,2015;张玉等,2017;何书跃等,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,发现有榴辉岩约为 428 Ma(MENG et al., 2013,2015)。其他几处蛇绿混杂岩的年龄变化为 467～518Ma,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)。由此推测,昆北造山带地体大约于 428Ma 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)。

2 岩体地质特征

夏日哈木矿区已发现的镁铁质-超镁铁质岩体共5个,呈北西向带状展布,单个岩体出露面积较



1. 太古宙—古元古代变质基底;2. 中新元古代深变质岩石;3. 新元古代浅变质岩;4. 早古生代俯冲增生杂岩;5. 早古生代沉积建造;6. 晚古生代—中生代沉积建造;7. 新生代沉积岩;8. 高压低温变质岩;9. 超高压变质岩;10. 花岗岩;11. 铜镍硫化物矿床;12. 成岩年龄

图 1　东昆仑岩浆铜镍硫化物矿床区域地质构造简图(据孟繁聪等,2017;张照伟等,2018)

Fig. 1　The sketch regional geological map of magmatic Ni－Cu sulfide deposits in eastern Kunlun

小,最大出露面积仅为 0.9km²,主要呈岩盆状或岩墙状侵位于元古代金水口群变质岩系及新元古代花岗片麻岩中(图 2)。其中,Ⅰ号岩体为含矿岩体,其余 4 个Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ号岩体矿化较弱,尽管Ⅱ号岩体地表见较强的铜镍矿化,但仍未发现有经济价值的矿体。

夏日哈木矿区Ⅰ号岩体据钻孔施工及勘探工作,初步确定其岩体形态,长约为 1.4 km,宽约为 0.6 km,长轴方向近东西向,西段略向南偏转(图 3a),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 3b),总体形态为向西倾伏的岩床(图 3)。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 3a)。岩体岩性主要是辉石岩、橄榄岩、辉长岩及少量的花岗岩脉(图 3a、图 3b),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。在钻孔横剖面图上,上述情况则更加明显直观(图 3b),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(张照伟等,2015,2016)。

Ⅱ号岩体位于矿区东侧,地表出露 2 个露头,围岩为金水口群片麻岩。其中东侧Ⅱ－1 号岩体呈北东东向展布,走向约 75°,长约为 550 m,宽为 50～240 m,出露面积约为 0.15 km²。岩体主要由辉长岩组成,其次含少量辉石岩。辉长岩中可见二长花岗岩的捕虏体(图 2)。地表岩石普遍发育透闪石化、蛇纹石化和碳酸盐化蚀变,局部可见孔雀石、镍华、褐铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等矿化。西侧Ⅱ－2 号岩体呈东西向展布,走向约为 90°,长约为 400 m,宽约为 200～350 m,出露面积约为0.1 km²。主要由辉长岩组成,局部见有少量的辉石岩,辉石岩普遍有碳酸盐化、褐铁矿化,地表探槽中仅见有少量镍黄铁矿化,镍黄铁矿呈团块状、星点状分布。

Ⅲ号岩体位于矿区北西部,岩体形态呈圆形展布,出露面积约为 0.35 km²,侵位于金水口群变质岩系中。岩体主要由中细粒的蛇纹岩和石榴子石斜长角闪岩组成,其次含少量辉石岩(图 2)。根据地表槽探揭露和少量钻孔验证,蛇纹岩普遍具有弱镍矿化,偶见铜镍矿化的辉石岩转石。

Ⅳ号岩体位于矿区中部偏南,围岩为金水口群片麻岩。岩体呈长条状,近东西向展布,长约为 0.7 km,宽约为 60～150 m,面积约为 0.7 km²。岩体主要由蛇纹岩和辉长岩组成,局部为辉石岩(图 2)。在岩体内见有少量分布的金水口群白沙河组和花岗岩体,经初步槽探揭露,岩体中偶见有镍黄铁矿和黄铁矿。

Ⅴ号岩体位于矿区最南端,围岩为金水口群片麻岩(图 2)。岩体呈漏斗状,北宽南窄。岩体主要由蛇纹岩组成,局部偶见辉石岩,岩体中未见镍黄铁矿化和黄铁矿化。

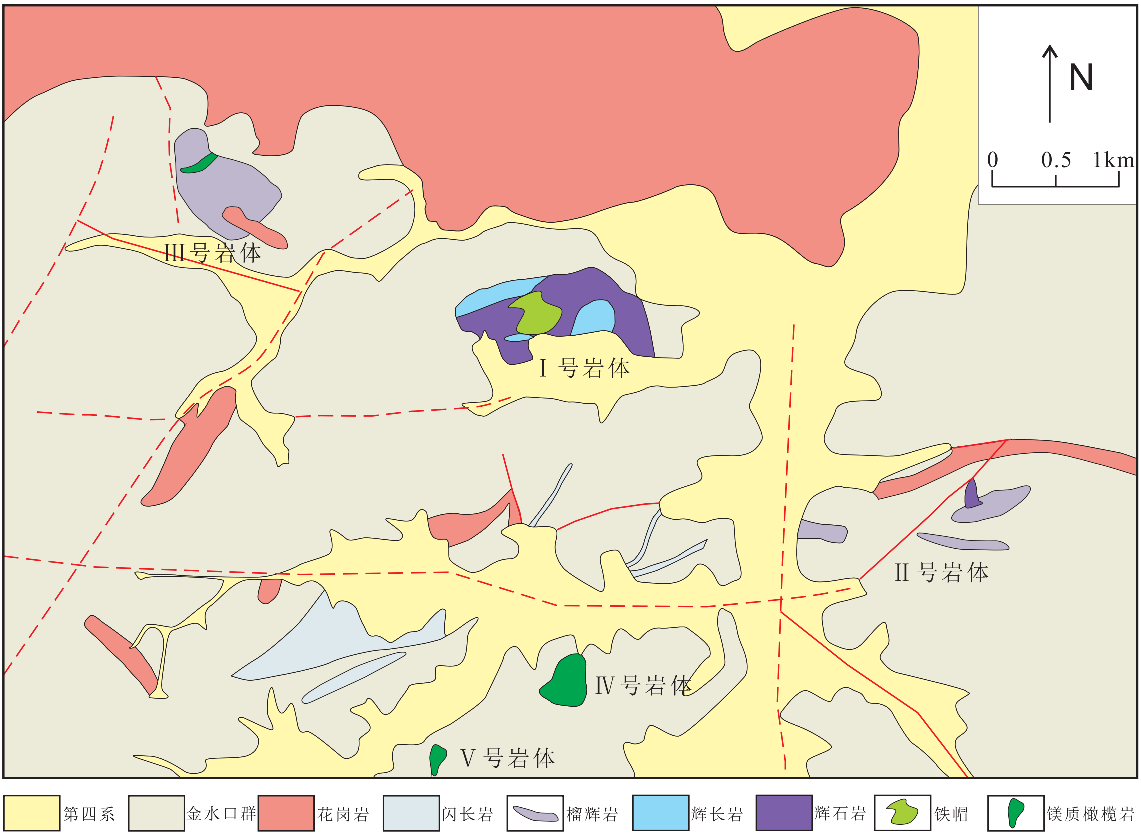


图 2 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化物矿区岩体地质分布略图(据张照伟等，2015)

Fig. 2 Schematic geological map for mafic - ultramafic intrusions from Xiarihamu magmatic Ni - Cu deposit in Eastern Kunlun orogenic belt (After ZHANG, et al., 2015)

3 岩体含矿性特点

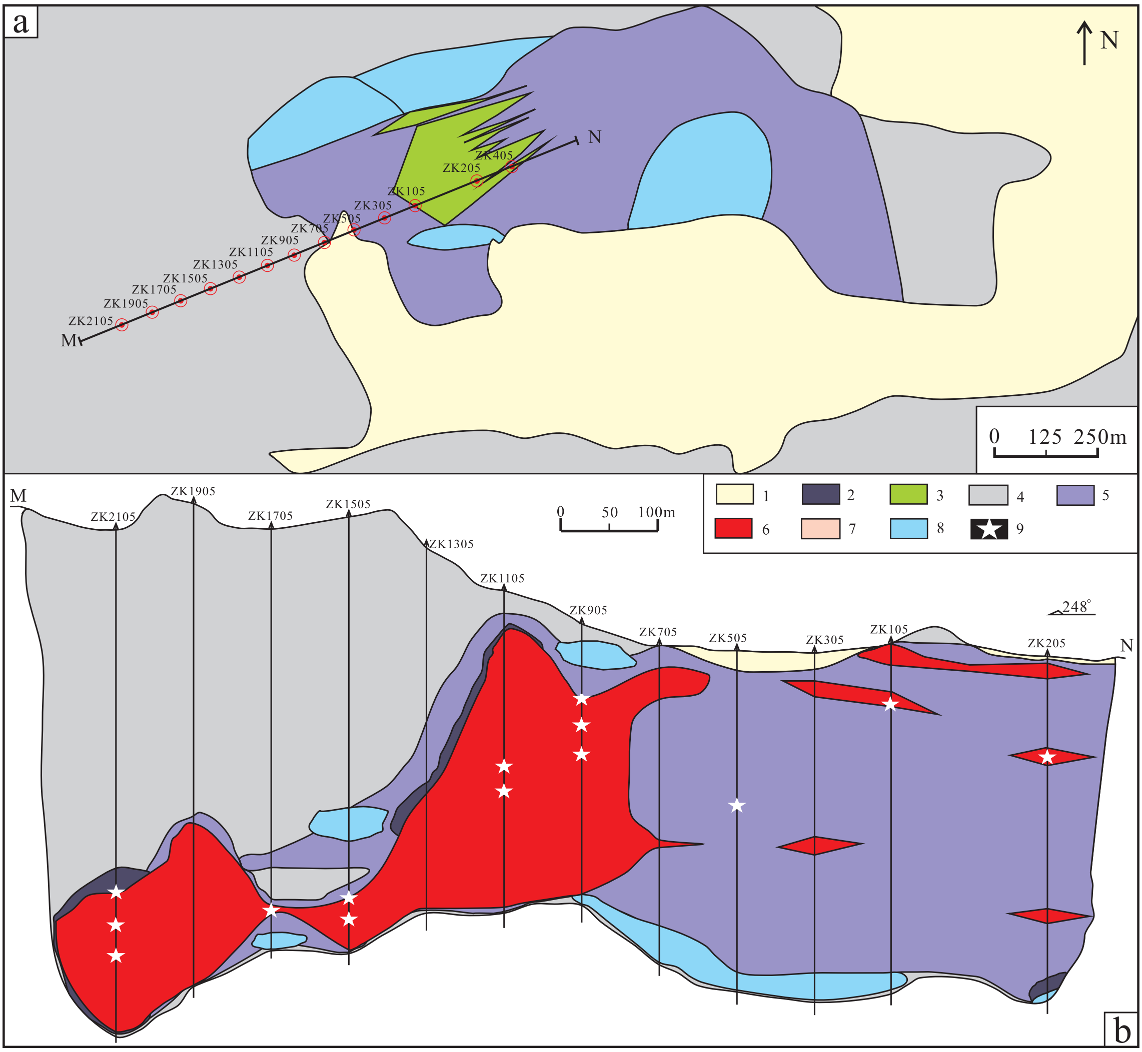
在东昆仑夏日哈木铜镍矿区中，仅有Ⅰ号岩体含有岩浆铜镍硫化物矿体，其他 4 个岩体均不含矿。夏日哈木 120 万 t 镍金属全部集中在Ⅰ号岩体内。Ⅱ号和Ⅲ号岩体主体是榴辉岩，在Ⅰ号岩体的深部钻孔岩心内也见有榴辉岩。该榴辉岩的年龄为 440Ma(张照伟等，2017)。Ⅳ号和Ⅴ号岩体主体为蛇纹岩，或称为镁质橄榄岩，是冷侵位构造活动的产物，这类镁铁-超镁铁质岩体基本不含铜镍矿。即便是表现有微弱程度的铜镍矿化，也基本是橄榄石结晶时所包裹的 Ni 元素，无利用价值。

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 3b)(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 431Ma，含矿辉石岩形成时代为 411Ma (张照伟等，2015，2016，2017；LI et al.，2015；SONG et al.，2016；ZHANG et al.，2017)。矿石类型以稠密浸染状(图 4a)和团块状(图 4b)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 4c、图 4d)。

4 成矿机理探讨

4.1 构造环境分析

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、后碰撞环境中(张照伟等，2015；LI et al.，2015；SONG et



1. 新生代盖层;2. 橄榄岩;3. 铁帽;4. 变质岩基底;5. 辉石岩;6. 铜镍硫化物矿化;7. 花岗岩;8. 辉长岩;9. 采样位置

图 3 (a)东昆仑夏日哈木矿区Ⅰ号岩体平面及(b)剖面地质略图

Fig. 3 (a) Schematic geological map for plan and (b) profile from Xiarihamu intrusion Ⅰ in Eastern Kunlun orogenic belt

al.,2016;ZHANG et al.,2017;LIU et al.,2016,2018)。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)。其西端起于博卡雷克塔格北坡,向东穿过大干沟至鄂拉山,东段则被温泉-哇洪山断裂所截,西延部分可能与新疆的奥依塔格-库地断裂相接。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),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)。所以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。

4.2 硫化物不混溶作用

夏日哈木Ⅰ号岩体存在纯橄岩→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

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

图 4 夏日哈木铜镍矿区矿石及显微照片

Fig. 4 Microphotographs of rocks and ore minerals in Xiarihamu magmatic Ni－Cu sulfide deposit

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)。岩浆中硫化物的熔离需要岩浆体系中的硫含量达到一定含量，这个临界值称为硫化物饱和时的 S 含量[sulfur content at sulfide saturation (SCSS)]。在结晶分异进行过程中，SCSS 在逐渐降低，该值降低有利于硫化物的出现，进而促进了硫化物的饱和(LIU et al.，2019)，这也解释了为什么分异良好的基性-超基性岩体具有好的成矿潜力。

地壳混染过程主要从 2 个方面影响硫化物饱和：①混染过程导致岩浆中的主量元素含量变化，如无硫化物大理岩的混染对新疆坡北的硫化物饱和起到了抑制作用，主要原因在于无硫化物大理岩的混染使岩浆体系的 CaO 含量升高，CaO 升高会抑制硫化物饱和(LIU et al.，2017)；而 SiO_2 的混染可以促使硫化物饱和(IRVINE，1975；张招崇等，2003)。②含硫化物围岩的混染使岩浆体系的 S 含量增高进而有利于硫化物饱和，如 Noril'sk 矿床硫同位素数据表明，沉积围岩中的膏盐层对成矿具有一定的贡献(LI et al.，2009)。

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 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$＝11.2‰，而夏日哈木的岩体中不同岩相硫化物 $\delta^{34}S$＝2.4‰～7.7‰，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 S 的贡献程度为 40%～60%。可见地壳硫混染是成矿的关键因素。

4.3 矿物学分析

LIU et al. (2019)总结了东昆仑不含矿基性-超

基性岩体与夏日哈木Ⅰ号岩体(成超大型镍矿)的橄榄石与单斜辉石的成分差异，发现：①不含矿岩体相对于夏日哈木的橄榄岩有低的 MgO、Fo 和 SiO_2 的含量，但是有高的 CaO 和 FeO 含量。②不含矿岩体的单斜辉石相对夏日哈木矿区的单斜辉石具有大致相同的 MgO 和 SiO_2 含量，但具有相对高的 FeO 和 CaO 含量。根据橄榄石和单斜辉石的成分结果可以推测，不含矿岩体相对于成矿的夏日哈木Ⅰ号岩体，是从一个相对高的 FeO 和 CaO 含量与相对低的 MgO 和 SiO_2 含量的母岩浆中结晶的，而相对高的 FeO 和 CaO 且相对低的 SiO_2 含量的母岩浆更难达到硫化物饱和，这可能是夏日哈木Ⅰ号岩体成矿的一个原因(LIU et al. 2019)。其根本原因在于 SCSS 与压力、FeO、TiO_2 和 CaO 的含量成正比与 SiO_2 成反比(WENDLANDT，1982；MAVROGENES et al.，1999；LIU et al.，2007；LI et al.，2009；LIU et al.，2017)(图 5)。

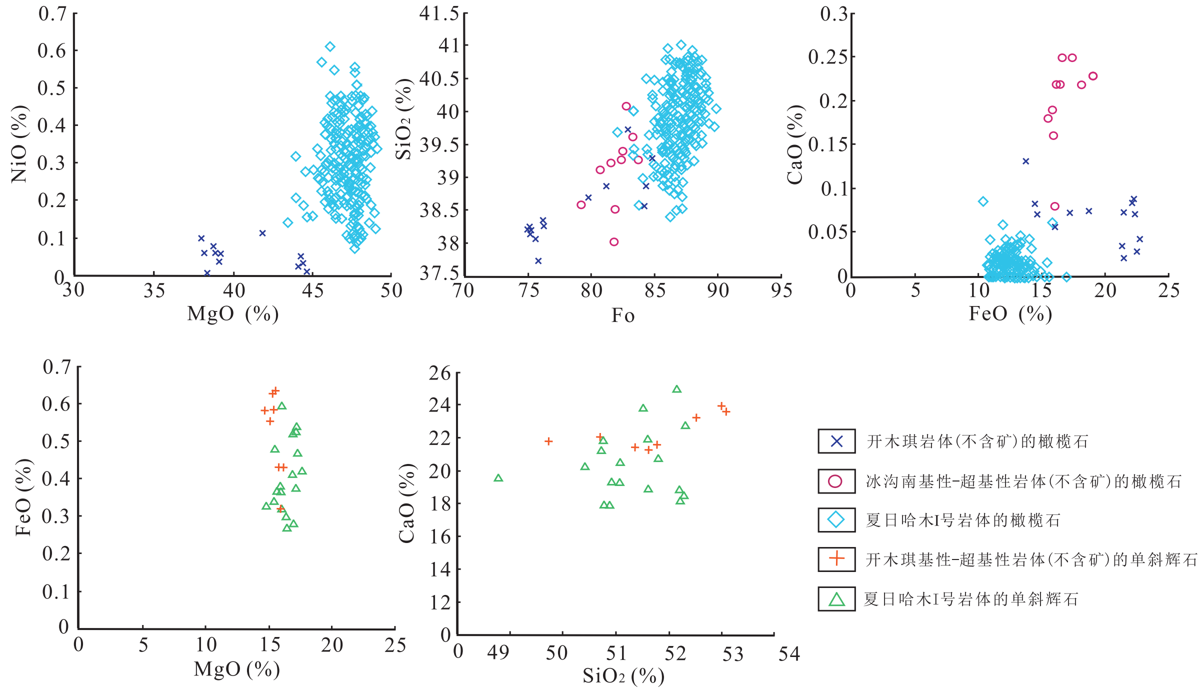


图 5　成矿夏日哈木Ⅰ号岩体与不含矿的冰沟南、开木琪基性-超基性岩的橄榄石和单斜辉石成分对比(LIU et al.，2019)(开木琪数据来自 LIU et al.，2019；夏日哈木橄榄石数据来自 LI et al.，2015；凌锦兰，2014；王冠，2014；冰沟南橄榄石数据来自王冠，2014；夏日哈木单斜辉石数据来自王冠，2014)

Fig. 5　Comparison of the olivine and clinopyroxene compositions from the Xiarihamu and Kaimuqi and Binggounan mafic - ultramafic intrusions.

4.4　成矿机理认识

硫化物不混溶作用的发生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铜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)。东昆仑造山带夏日哈木矿区尽管发育有 5 个镁铁-超镁铁质岩体，但仅Ⅰ号岩体含有超大型规模的岩浆铜镍矿体，其余 4 个岩体并不含矿。可能存在以下几个方面的因素：①这 5 个岩体本身就不是一期的产物，岩浆源区性质存在区别。②不同构造背景的产物，岩浆属性本身就不同，只有铁质系列的镁铁-超镁铁质岩浆才可能形成铜镍矿体，而镁质系列的镁铁-超镁铁质岩浆不可能形成有经济价值的铜镍矿体，尽管能见到铜镍矿化。③岩浆上侵就位的方式和机制明显不同，硫化物不混溶作用发生的空间位置各异，如果硫化物不混溶作用发生在岩浆深部，即便形成铜镍矿体也因深埋地下而无法利用。在东昆仑造山带夏日哈木矿区的 5 个岩体中，仅Ⅰ号和Ⅱ号岩体属铁质系列的镁铁-超镁铁质岩体，而Ⅲ号、Ⅳ号和Ⅴ号岩体是镁质系列的镁铁-超镁铁质岩体，本身不能形成岩浆铜镍矿体。在Ⅰ号和Ⅱ号岩

体中，只有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有重要作用(ZHANG et al.,2017)。而Ⅱ号岩体的岩浆由于规模太小，并且与榴辉岩接触，地壳混染作用非常有限，没有促进大规模硫化物饱和，因而在Ⅱ号岩体内只能见到弱的铜镍矿化(段建华等,2017;张照伟等,2018)。

5　结论

(1)东昆仑造山带夏日哈木铜镍矿区仅Ⅰ号岩体含岩浆铜镍矿体，属铁质系列的镁铁-超镁铁质岩浆多次脉冲叠加硫化物不混溶作用的结果。

(2)如果铁质系列的镁铁-超镁铁质岩体的橄榄石和单斜辉石具有低 CaO 和 FeO 含量，就更有利于形成富矿体。

(3)在夏日哈木矿区 5 个镁铁-超镁铁质岩体中，仅Ⅰ号赋存超大规模铜镍矿体，Ⅱ号岩体可见弱的铜镍矿化。除此之外，其余 3 个岩体属于榴辉岩和镁质橄榄岩，不具备成铜镍矿的岩浆条件。

致谢：野外地质工作得到青海省地质调查局、青海省地矿局、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)：

段建华，张照伟，祁昌炜，等．东昆仑夏日哈木Ⅱ号岩体辉长岩形成年龄与找矿潜力[J]．地质与勘探，2017，53(5)：880-888.

DUAN Jianhua, ZHANG Zhaowei, QI Changwei, et al. Formation age of the gabbro in No. Ⅱ intrusion at the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt and its prospecting potential[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(5): 880-888.

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.

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 C Y, ZHAO Y M, LI D X, et al. Mineralogical characteristics of the Xiarihamu nickel deposit in the Qiman Tagh Mountain, East Kunlun, China[J]. Geologica Review, 2016, 62(1): 215-228.

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 Runmin. 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$^{40}Ar/^{39}Ar$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 $^{40}Ar/^{39}Ar$ age of muscovite from the Qunli Fe-polymetallic 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.

姜春发，杨经绥，冯秉贵．昆仑开合构造[M]．北京：地质出版社，1992，224.

JING Chunfa, YANG Jingsui, FENG Binggui. Opening-closing tectonics of Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992, 224.

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.

孟繁聪，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.

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.

钱兵，张照伟，张志炳，等．柴达木盆地西北缘牛鼻子梁镁铁-超镁铁质岩体年代学及其地质意义[J]. 中国地质，2015,42(3):482-493.

QIAN Bing,ZHANG Zhaowei,ZHANG Zhibing,et al. Zircon U-Pb geochronology of Niubiziliang mafic-ultramafic intrusion on the northwest margin of Qaidam Basin, Qinghai[J]. Geology in China, 2015,42(3):482-493.

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.

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.

王冠．东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 长春:吉林大学，2014，1-200.

WANG G. Metallogenesis of nickel deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[J]. Changchun:Jilin University, 2014, 1-200.

郗爱华，顾连兴，李绪俊，等．中国北方造山带岩浆铜镍硫化物矿床及其地球动力学背景——以吉林红旗岭矿床为例[J]. 地质学报，2006，80(11): 1721-1729.

XI A H, GU L X, LI X J, et al. The magmatic sulfide Cu-Ni deposits and their earth dynamics setting in north orogenic belt of China: A case study of Hongqiling deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(11): 1721-1729.

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.

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.

张雪亭，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 Boling，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.

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.

IRIVINE T. Crystallization sequences in the Muskox intrusion and other layered intrusions—II. Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，1975，39(6)：991-1020.

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.，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.，RIPLEY E. M.，NALDRETT A. J.，et al. Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in the plumbing system of the Siberian Traps[J]. Geology，2009，37(3)：259-262.

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.

LIU Y.，SAMAHA N. T.，BAKER D. R. Sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in magmatic silicate melts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2007，71(7)：1783-1799.

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.

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]. Gondawana 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.

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.

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.

TAO Y, LI C S, SONG X Y, et al. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramatic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China[J]. Mineralium Deposita, 2008, 43(8): 849-872.

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.