

doi: 10.12029/gc20200829001

张照伟, 钱兵, 王亚磊, 李文渊. 2024. 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, 51(2): 371–384.

Zhang Zhaowei, Qian Bing, Wang Yalei, Li Wenyuan. 2024. Tectonic settings discussion of magmatic nickel–cobalt sulfide deposits in the eastern Kunlun orogenic belt[J]. Geology in China, 51(2): 371–384(in Chinese with English abstract).

东昆仑造山带岩浆镍钴硫化物矿床形成 构造背景探讨

张照伟^{1,2}, 钱兵^{1,2}, 王亚磊^{1,2}, 李文渊^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:【研究目的】青海省夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床是世界范围内造山带背景发现的最大岩浆镍钴硫化物矿床。此外在东昆仑造山带夏日哈木外围还发现了石头坑德等岩浆镍钴硫化物矿床, 初步显示东昆仑造山带良好的镍钴硫化物矿床形成条件和巨大的找矿潜力。【研究方法】通过野外地质调查, 室内开展岩石学、矿相学、主微量元素分析、同位素地球化学等。【研究结果】精确锆石 U–Pb 测年发现, 东昆仑造山带夏日哈木等含矿镁铁—超镁铁质岩体基本形成于 425~330 Ma, 沿柴达木盆地南缘昆北断裂和昆中断裂自西向东依次展布。含矿岩体的岩性主要为辉石橄榄岩、辉石岩、二辉橄榄岩、纯橄岩等, 其 SiO₂ 含量 31.52%~53.31%, MgO 含量 7.5%~39.03%, Al₂O₃ 含量 0.1%~16.01%, CaO 含量 0.23%~13.85%, MgO 与 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 均呈负相关关系。稀土总量介于 6.36×10^{-6} ~ 81.5×10^{-6} , 平均为 29.92×10^{-6} , LREE/HREE 平均值为 5.34, (La/Sm)_N、(La/Yb)_N、(Sm/Nd)_N、(Gd/Yb)_N 平均值分别为 2.58、5.99、0.76、1.78, 轻重稀土分异程度较高。含矿超镁铁质岩普遍具有较为一致的微量元素分布曲线, 且与镁铁质岩石表现特征类似, 亏损高场强元素 Ta、Nb、Ti、P 等, 而相对富集大离子亲石元素 Rb、Th、U 等。Sr、Nd 同位素研究指示夏日哈木、石头坑德等岩体岩浆源区来源于软流圈地幔, 同时 $\delta^{34}\text{S}$ 均表现出较高的正值, 揭示地壳物质同化混染是形成岩浆镍钴硫化物矿床的关键因素。【结论】结合区域最新构造演化认识, 认为东昆仑夏日哈木等超大型岩浆镍钴硫化物矿床是伴随古特提斯裂解岩浆活动的成矿表现。该认识对丰富造山带内岩浆镍钴硫化物矿床成矿理论研究、拓展岩浆镍钴矿床找矿空间与潜力、支撑引领区域找矿实践实现新突破, 均具有重要的研究价值和意义。

关键词: 镁铁—超镁铁质岩; 构造背景; 岩浆成矿作用; 镍钴矿床; 东昆仑造山带; 矿产勘查工程

创新点: 提出东昆仑夏日哈木等岩浆镍钴硫化物矿床是古特提斯洋裂谷岩浆作用成矿的结果。

中图分类号: P588.1; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)02–0371–14

Tectonic settings discussion of magmatic nickel–cobalt sulfide deposits in the eastern Kunlun orogenic belt

ZHANG Zhaowei^{1,2}, QIAN Bing^{1,2}, WANG Yalei^{1,2}, LI Wenyuan^{1,2}

收稿日期: 2020–08–29; 改回日期: 2020–11–23

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“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(DD20240128)联合资助。

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

(1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Xiarihamu giant magmatic nickel-cobalt sulfide ore deposit in the eastern Kunlun orogenic belt, the largest magmatic nickel-cobalt sulfide deposit discovered in orogenic belt in the world, is the world's largest prospecting breakthrough in the magmatic sulfide deposits area in the past twenty years after the discovery of the Voisey's Bay deposit in Canada. In addition, several large-scale magmatic nickel-cobalt sulfide deposits, such as Shitoukengde, were discovered, indicating enormous prospecting potential in the eastern Kunlun orogenic belt. **[Methods]** Accurate zircon U-Pb dating found that the ore-bearing mafic-ultramafic rocks in the eastern Kunlun orogenic belt formed at 425–330 Ma. The ore-bearing mafic-ultramafic rocks are distributed along the north Kunlun fault and the central Kunlun fault. The ore-bearing mafic-ultramafic rocks reflected a large-scale magmatism event. **[Results]** The lithofacies of these ore-forming rocks are mainly dunite, pyroxene peridotite, and pyroxenite. The SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , and CaO content ranges from 31.52% to 53.31%, from 7.5% to 39.03%, from 0.1% to 16.01%, and from 0.23% to 13.85%, respectively. On the Harker diagram, the MgO content is negatively correlated with SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , and K_2O , respectively. The total amount of rare earth elements is between 6.36×10^{-6} and 81.5×10^{-6} , with an average of 29.92×10^{-6} . The average LREE/HREE, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$, $(\text{Sm}/\text{Nd})_{\text{N}}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ value is 5.34, 2.58, 5.99, 0.76, and 1.78, respectively, indicating the degree of differentiation between light and heavy rare earths is high. On the primitive mantle-normalized trace element spider diagram, the ore-bearing mafic and ultramafic rocks have a relatively uniform distribution curve, which are characterized by depletion of high field strength element (Ta, Nb, Ti, and P) and enrichment of large-ion lithophile elements (Rb, Th, and U). The Sr and Nd isotope data indicate that the magma source areas of the Xiarihamu ultramafic intrusion and the Shitongkengde ultramafic intrusions were derived from the asthenosphere mantle. The $\delta^{34}\text{S}$ value shows a high positive value, revealing that crustal-sulfur contamination played a great role during sulfide saturation. **[Conclusions]** Based on the regional tectonic evolution, we believed that the magmatic nickel-cobalt sulfide deposits in the eastern Kunlun orogenic belt are associated with the break-up of the Paleo-Tethys Ocean. This opinion is significant to the ore-forming theory of magmatic nickel-cobalt sulfide deposits in the orogenic belt and could guide the regional exploration of the magmatic nickel-cobalt sulfide deposits.

Key words: mafic-ultramafic intrusions; tectonic settings; Paleozoic Tethys Ocean; magmatic nickel-cobalt sulfide deposit; eastern Kunlun orogenic belt; mineral exploration engineering

Highlights: The Xiarihamu magmatic Ni-Co sulfide deposits in the eastern Kunlun orogenic belt was the result of the break-up of the Paleo-Tethys Ocean.

About the first author: ZHANG Zhaowei, male, born in 1976, doctor, researcher, mainly engaged in magmatic Ni-Co sulfide deposits and ore exploration; E-mail: zhaoweiz@126.com.

Fund support: Supported by the projects of the National Natural Science Foundation of China "Comparative study of across national border metallogeny of Ni-Co-Li deposits in the Kunlun orogenic belt and its western extension" (No.U2244204), the Second Comprehensive Scientific Investigation and Research Project of the Qinghai-Tibet Plateau (No.2019QZKK0801), and China Geological Survey (No.DD20240128).

1 引 言

镍钴金属及其加工材料和化合物具有优良的力学性能、物理性能和化学性能,广泛应用于航空航天、新能源、轨道交通、海洋舰船、核电、电子信息、环境保护等工业领域,是保障国防安全的重要战略资源,是支撑我国战略性新兴产业的保障资

源,对国民经济可持续健康发展具有重要意义(Mao et al., 2014; 凌锦兰, 2014; 王冠, 2014; Zhang et al., 2019)。镍钴金属大多赋存于岩浆硫化物矿床中,因其冶炼简单、成本低也成为镍钴金属来源的主要矿床类型。岩浆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镁铁—超镁铁质岩浆。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的成矿表现 (Zhang et al., 2018; 刘金龙等, 2023)。近几年在东昆仑造山带青海省境内新发现了夏日哈木镍钴矿床, 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 年加拿大沃尔斯贝 (Voisey's Bay) 岩浆硫化物矿床发现以来近二十年全球镍矿最重要的发现 (张照伟等, 2015, 2016; Li et al., 2015; 孔会磊等, 2019)。不仅如此, 在东昆仑造山带还发现了冰沟南、石头坑德、浪木日等多个镁铁—超镁铁质岩体, 这些岩体形成时的构造背景如何? 是否是同一构造环境岩浆成矿的表现? 该问题的认识水平直接制约东昆仑区域岩体含矿性评价及找矿新发现。本文拟通过分析研究东昆仑造山带新发现的岩浆镍钴硫化物矿床地质特点, 旨在揭示区域构造背景与镁铁—超镁铁质岩浆成矿作用过程, 不仅可以提升造山带背景该类矿床岩浆成矿理论的认识水平, 也可以拓展和支撑引领东昆仑地区岩浆镍钴硫化

物矿床的找矿实践与新发现。

2 区域地质构造背景

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, 是古亚洲构造域与特提斯构造域结合部位 (图 1)。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—早新生代洋陆转换阶段以及中新元古代陆内造山阶段 (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; 王兴等, 2019; 曾忠诚等, 2020)。原特提斯洋是新元古代开裂, 早古生代早中期演化成熟, 于早古生代末闭合的构造演化历史, 在早古生代与古亚洲洋相连成一个洋 (李文渊, 2018; 张国伟和郭安林, 2019; 陈宣华等, 2019)。志留纪末塔里木陆块、华北陆块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

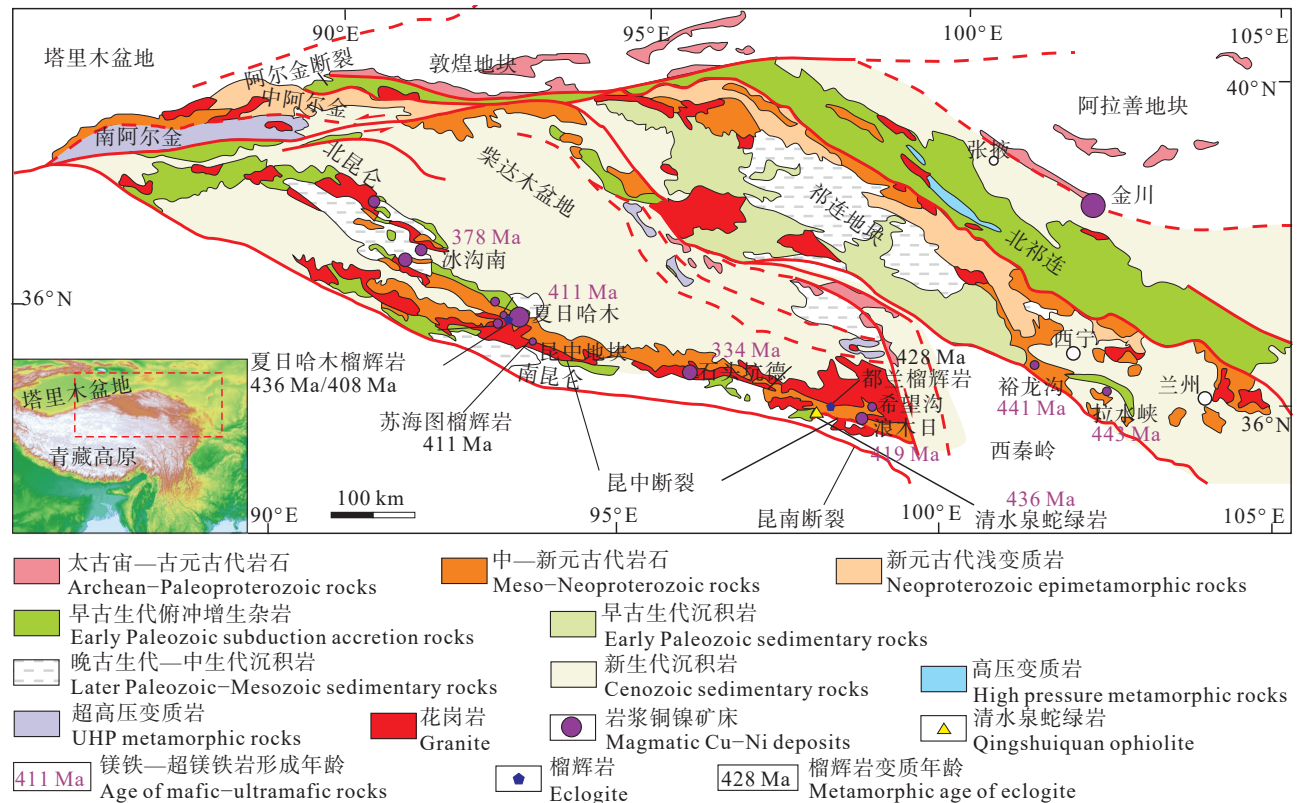


图 1 东昆仑造山带区域地质及岩浆铜镍硫化物矿床分布略图 (据 Zhang et al., 2019)

Fig.1 The sketch regional geological map and magmatic Cu–Ni sulfide deposits in eastern Kunlun orogenic belt (after Zhang et al., 2019)

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、榴辉岩的产出是主要证据。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(孟繁聪等, 2017; 李文渊, 2018; 潘桂堂等, 2019; 宋光永等, 2020)。

东昆仑造山带按构造单元划分,自北而南可分为祁漫塔格北坡—夏日哈岩浆弧、祁漫塔格蛇绿混杂岩带、中昆仑岩浆弧及东昆仑南坡俯冲增生杂岩带 4 个单元。祁漫塔格北坡—夏日哈岩浆弧呈近东西向分布于祁漫塔格山北坡至夏日哈一带。南侧以祁漫塔格蛇绿混杂岩带与中昆仑岩浆弧分隔,西段祁漫塔格北界由东昆北断裂的北支与柴达木盆地分开,东段夏日哈一带的北界由柴北(蛇绿)构造混杂岩带限定,中段因新生界覆盖而失去连续性(张雪亭和杨生德, 2007; 李荣社等, 2008; 范丽琨等, 2009; 祁生胜等, 2014; 潘桂堂等, 2019)。祁漫塔格蛇绿混杂岩带位于阿达滩断裂和那陵郭勒河(东昆北断裂)之间。西起滩北雪峰,沿祁漫塔格山脉北坡向东经狼牙山、开木棋陡里格至苏海图隐伏于柴达木盆地南缘新生代沉积物中。该带以中酸性岩体、祁漫塔格群及分布于其中的镁铁质、超镁铁质岩为主体。中昆仑岩浆弧即泛称的东昆仑中部或昆中结晶岩带,北以昆北断裂与祁漫塔格北坡—夏日哈岩浆弧和柴达木断拗盆地毗邻,南界为泛称的昆中断裂,西端延入新疆,东端被哇洪山—温泉断裂截切。带内出露主要地层为古元古界金水口岩群,原岩为泥砂质碎屑岩—基性火山岩—碳酸盐岩建造,变质程度以角闪岩相为主,局部为麻粒岩相。基性—超基性侵入岩及蛇绿岩残块总体上在昆中地区零星分布,岩体规模较小,综合分析研究前人资料,初步确定该构造单元的基性—超基性岩产出地质构造背景主要是裂谷型,按照岩体侵位时代可以划分为中新元古代、中志留世—早泥盆世、二叠纪和三叠纪 4 期,中新元古代岩体主要分布在大灶火和白日其利一带,中志留世—早泥盆世岩体分布在阿克楚克塞、夏日哈木、石头坑德和浪木日一带,平面上多为不规则状的小岩株(李文渊, 2018)。东昆仑南坡俯冲增生杂岩带沿东昆仑山主脊两侧横亘于青海省中部,西起塔鹤托坂日向东经大干沟、清水泉、吉日迈被温泉—哇洪山断裂切断后隐伏于赛什塘—兴海蛇绿混杂岩带。北以昆中断裂带与中昆仑岩浆弧相邻,南以昆南断裂带与阿尼玛

卿结合带接壤。该构造单元沉积建造类型较为复杂,构造岩浆活动十分频繁,具有增生杂岩带特征,成矿地质条件十分有利,是寻找金、铜、钴等多金属矿产的有利地区(李荣社等, 2008; 潘桂堂等, 2019)。

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(李文渊, 2018)。青海地处青藏高原东北部,属特提斯构造域。其大地构造的基本特征是由一系列不同时代、不同造山机制的造山带、结合带及其被卷入的和经过强烈改造的地块(基底残块)镶嵌而成的复杂造山系,自古元古代以来经历了长期而复杂的造山过程(李荣社等, 2008; 潘桂堂等, 2019; 贺承广等, 2019),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)。东昆仑造山带地质构造演化复杂,岩浆活动多样,镁铁—超镁铁质岩体发育,自夏日哈木铜镍矿床发现以来,先后发现了冰沟南、石头坑德、尕牙合东沟、阿克楚克塞、浪木日、希望沟等镍钴矿床及矿(化)点(图 1),形成了长达 690 km 的岩浆镍钴成矿带,显示出优越的成矿条件和良好的找矿前景。

3 东昆仑岩浆硫化物矿床

3.1 夏日哈木超大型镍钴矿床

3.1.1 岩(矿)体地质特征

东昆仑夏日哈木矿区已发现 5 个镁铁质—超镁铁质岩体,主要呈岩盆状或岩墙状侵位于元古宇金水口群变质岩系及新元古代花岗片麻岩中。夏日哈木镍钴矿体主要赋存于 I 号岩体的辉石岩与橄榄岩内,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,镍钴矿体达到了最厚(约 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、镍钴矿体品位变富(钱兵等, 2015; 潘彤, 2015; 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)。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 0.68%;铜金属资源量 23.83 万 t,平

均品位 0.166%; 钴资源量 4.29 万 t, 平均品位 0.028%。

3.1.2 岩石地球化学特征

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 7.5%~38.81%, SiO₂ 含量 34.11%~54.60%, Al₂O₃ 含量 0.57%~18.19%(Li et al., 2015; 张照伟等, 2015; 姜常义等, 2015; 汤庆艳等, 2017)。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, Al₂O₃、CaO、TiO₂、Na₂O 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。

3.1.3 可能形成环境

通过铂族元素特征、母岩浆成分推算、尖晶石成分特征研究, 认为夏日哈木 I 号岩体的母岩浆为高镁玄武质岩浆。板片断裂引起的软流圈岩浆上涌, 榴辉岩折返过程中受到了俯冲带浅部富水流体的影响, 而夏日哈木母岩浆受到了俯冲带深部含水熔体的影响(Liu et al., 2016, 2018)。伸展环境可能是伴随古特提斯洋开启大陆裂解的构造响应(李文渊, 2018)。深部部分熔融的超镁铁质岩浆沿构造薄弱部位上涌, 岩浆上涌过程中发生岩浆演化及硫化物熔离, 地壳物质的混染是导致大量硫化物熔离的主控因素, 发生硫化物熔离的岩浆继续上涌至地壳浅部形成硫化物的聚集成岩成矿, 是多次岩浆脉冲叠加成矿的具体表现(张照伟等, 2019; Zhang et al., 2019)。

3.2 石头坑德大型岩浆镍钴矿床

3.2.1 岩(矿)体地质特征

石头坑德镁铁—超镁铁质岩体主要由 I 号、II 号和 III 号岩体组成, 主要岩性为辉石岩、橄榄二辉岩、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。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。岩浆铜镍矿体基本赋存于 I 号岩体的辉石岩及橄榄岩中。石头坑德铜镍矿体基本赋存于中—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。①号铜镍矿体, 位于岩体北西

部, 属后期贯入式矿体, 赋矿岩石为中—粗辉石岩和含长橄辉岩, 两侧围岩均为中—细粒橄辉岩。该矿体长约 1150 m, 宽约 4.06~30 m, 走向近 25°, 倾向约 115°, 倾角约 75°, 地表 Ni 平均品位 1.21%, 深部钴孔已控制, Ni 品位变化于 0.31%~1.91%, 变化较大。矿体在 ZK4001 厚度达到了 120 m, 在剖面上看橄榄岩侵入到辉长岩中, 这也是橄榄岩晚于辉长岩的一个证据(Zhang et al., 2018)。

3.2.2 岩石地球化学特征

球粒陨石标准化稀土元素在配分模式图上各配分曲线表现出较为一致的右倾平滑曲线, 稀土总量总体较低, ΣREE 变化在 0.9×10^{-6} ~ 35.61×10^{-6} , 并由橄榄岩到辉长岩稀土总量逐渐升高, 显示同源岩浆演化的特点。全部样品的 (La/Yb)_N 为 0.63~5.51, (La/Sm)_N 为 0.4~3.65, (Gd/Yb)_N 为 0.61~1.72, 显示了轻—重稀土元素之间、轻稀土元素之间分馏强, 而重稀土元素之间分馏弱(董俊等, 2017)。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示了与稀土配分型式较好的一致性。岩石总体富集 LILEs(如 Rb、Ba、Th、U)而贫 HFSEs(如 Nb、Ta、Zr、Y), 整体呈向右下倾趋势, 同时表现了明显的 Rb、U 正异常以及 Nb、Ta 负异常(张照伟等, 2017)。

3.2.3 可能形成环境

形成石头坑德岩体的原始岩浆为拉斑玄武岩, 由地幔部分熔融形成, 在到达地壳某一深度处与地壳岩石相互作用发生混染, 形成深部岩浆房, 由于同化了含硫的片麻岩性质的岩浆房顶部的围岩, 加速了深部岩浆房上部的岩浆初步分异后, 在岩浆房内部构造—岩浆作用下, 深部岩浆房上部以基性为主岩浆先行上侵, 形成以浅色辉长岩为主的第一期侵入体, 其残余岩浆形成次级岩浆房——终端岩浆房; 深部岩浆房接受幔源区玄武岩浆的补给, 打乱深部岩浆房内分异体系, 在温度压力作用和新岩浆混熔作用下, 岩浆由深部岩浆房进一步上涌至终端岩浆房, 继续分异、熔离。伴随区域构造活动, 终端岩浆房发生脉动式上侵, 形成各期次辉石岩和橄榄岩相互穿插, 地质观察表明, 各岩相间的侵位先后顺序为辉长岩相→辉石岩相→橄榄岩相, 但不同岩相内部的不同岩石类型之间为渐变过渡关系。在岩浆作用的后期, 深部硫化物矿浆沿断裂裂隙上侵贯入到先期形成的岩体内形成脉状矿体

(Zhang et al., 2018)。

3.3 冰沟南铜镍硫化物矿床

3.3.1 岩(矿)体地质特征

冰沟南镁铁—超镁铁质岩体主要由斜长橄榄辉石岩、辉长岩、辉长辉绿岩脉等构成,整体侵位于狼牙山组大理岩及石英片岩中。区内岩浆构造活动发育,闪长岩、花岗闪长岩及后期脉岩均有不同程度出露。冰沟南铜镍矿体赋存于含长橄榄辉石岩中,呈岩脉产出,该岩脉呈北西向展布,侵入到辉长岩中,侵入界线不清晰,该岩相长约 800 m,厚度 17~30 m,倾向北,倾角 35°~45°。经钻探验证,在岩脉内圈定一条铜镍矿体,矿体长约 300 m,厚 3.57~5.47 m,平均 4.20 m。Ni 品位 0.26%~0.53%,平均 0.36%;Cu 品位 0.19%~0.36%,平均 0.28%。铜镍矿化主要为磁黄铁矿化、镍黄铁矿化、黄铜矿化等,硫化物在透射光下中为黑色,呈浸染状或稀疏浸染状分布。冰沟南岩体辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 (427.4 ± 7.3) Ma(何书跃等, 2018)。冰沟南岩体含长橄榄辉石岩中的锆石同位素年龄为 (377.8 ± 3.4) Ma(张照伟等, 2017)。

3.3.2 岩石地球化学特征

冰沟南含长辉石橄榄岩中橄榄石 Fo 值为 81.5~84.4, Ni 含量为 754×10^{-6} ~ 1438×10^{-6} ; 含橄斜长辉石岩中橄榄石 Fo 值为 76.2~80.9, Ni 含量为 912×10^{-6} ~ 1012×10^{-6} , 橄榄石主要为贵橄榄石,且随着基性程度的降低橄榄石 Fo 值和 Ni 含量也呈逐渐降低的趋势。单斜辉石 En=44.5~47.1, Wo=44.3~46.7, 主要属顽透辉石—透辉石; 斜长石 An=62.1~67, 主要为拉长石(张照伟等, 2017)。冰沟南镁铁—超镁铁质岩体的母岩浆可能为 MgO 含量 >9.5% 的拉斑玄武质岩浆。冰沟南镁铁—超镁铁质岩体适度演化的岩浆具有轻稀土元素富集型配分曲线,同时富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr 等)。

3.3.3 可能形成环境

对冰沟南研究发现,其岩浆源区可能位于软流圈地幔,并混有一部分被俯冲板片交代的地幔楔物质。冰沟南深部部分熔融的幔源岩浆,在上涌过程中遭受地壳物质的混染作用,导致岩浆中的 S 达到饱和,发生岩浆不混溶作用,熔离出的富含硫化物的岩浆,沿东昆仑造山带西段构造薄弱部位,就位于冰沟南地区成岩成矿(张照伟等, 2017)。

3.4 浪木日岩浆镍钴硫化物矿床

浪木日镍钴矿化岩体位于东昆仑东段,昆中断裂以北,距都兰县南东方向约 30 km 处。岩体呈椭圆状,近东西向延伸,长 300~800 m,宽 30~100 m,侵位于古元古代金水口群白沙河岩组中,在地表及钻孔内均发现了典型的镍钴矿化。岩石类型主要为辉橄岩、辉石岩和辉长岩。

3.4.1 岩(矿)体地质特征

古元古代金水口岩群白沙河岩组是浪木日矿区内出露的主要地层,出露面积约占 70%,该地层多被后期花岗岩体所侵蚀,呈断块或侵入岩残留体展布。白沙河岩组主要为一套中深变质岩系,其原岩建造为泥砂质沉积碎屑岩—基性火山岩—碳酸盐岩建造,具有海相陆源碎屑岩为主的沉积建造特点,变质程度达角闪岩相。主要岩性为片麻岩和斜长角闪岩,其次为大理岩、变粒岩和黑云石英片岩(张照伟等, 2018)。

区内断裂构造比较发育,总体呈北东—近东西向,具张扭性断裂性质,规模不等,主要表现为构造应力强弱不一、矿化蚀变不均匀,断裂带中岩性以构造角砾岩等构造岩为主,宽度 3~50 m。北西、近南北向次级构造也较发育,构造破碎带受后期热液叠加改造明显,具生成于同一成矿环境和同期区域性断裂控制的特点。所发现镁铁—超镁铁质岩体主要呈较陡产状的岩墙侵入于古元古代金水口群地层中,岩石类型主要为辉橄岩、辉石岩和辉长岩,三者为同一岩浆分异的产物(图 2a)。岩石普遍发生较强的自变质作用,包括蛇纹石化、透闪石化和黑云母化等。超镁铁质岩体含矿率较高,以产出典型的岩浆铜镍硫化物矿床金属矿物组合(镍黄铁矿+黄铜矿+磁黄铁矿)为特征。

截至目前,镍钴矿化较好岩体主要是 2 号和 4 号岩体。2 号岩体位于矿区中北部,地表覆盖较厚,露头不明显,仅出露长约 150 m,宽约 110 m,岩体呈椭圆状近东西向展布,隐伏于白沙河岩组片麻岩中,岩体深部厚度 150 m,岩体南倾,倾角在 45°~50°(图 2b)。2 号岩体地表为辉橄岩,中粒结构,岩石颗粒较大,矿物粒径一般在 3~5 mm,岩石结晶分异程度较好,岩石具强的金云母化、蛇纹石化、磁黄铁矿化、镍黄铁矿化。通过钻探圈定工业矿体 5 条,矿体厚度 1.75~15.9 m, Ni 品位 0.23%~0.64%,

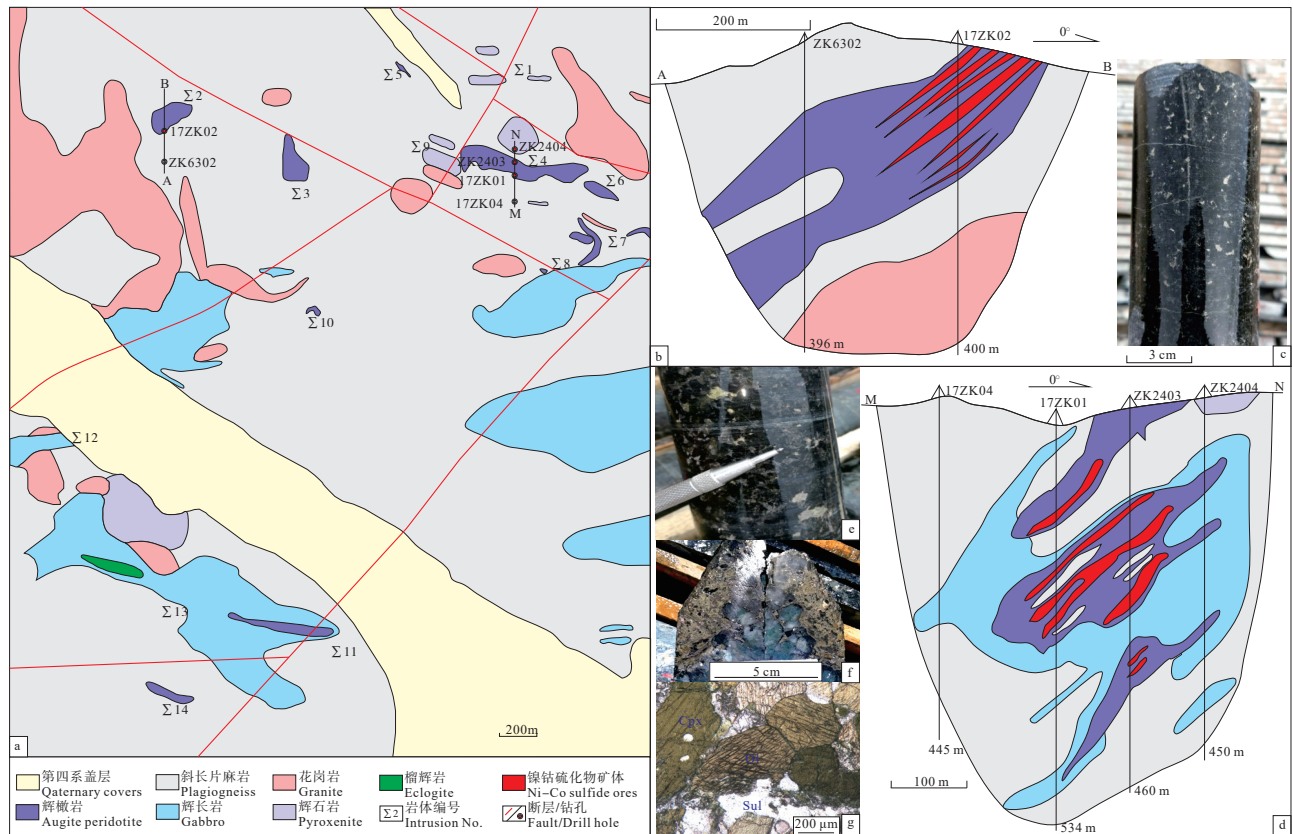


图 2 浪木日镁铁—超镁铁质岩体平面(a)及剖面(b、d)地质简图和矿石岩心照片(c、e、f)及显微照片(g)

Cpx—单斜辉石; Ol—橄榄石; Sul—硫化物

Fig.2 The sketch plan (a) and section (b, d) map and photos of ore core (c, e, f) and micrograph (g) from Langmuri mafic-ultramafic intrusion in eastern Kunlun orogenic belt

Cpx—Clinopyroxene; Ol—Olivine; Sul—Sulfide

Co 品位 0.016%, Cu 品位 0.19%。

4 号岩体位于矿区中北部, 地表露头局部明显, 岩性为辉橄岩, 多处第四系覆盖较厚, 长约 850 m, 宽 30~100 m, 岩体呈长条状近北西向展布, 整体隐伏于白沙河岩组片麻岩中, 岩体向南东倾斜, 产状 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (图 2d)。4 号岩体边部为辉石岩相, 中心部位分异为橄榄岩相, 中—粗粒结构, 岩石颗粒较大, 矿物粒径一般在 5~10 mm, 岩石普遍具有孔雀石化、金云母化、蛇纹石化、磁黄铁矿化及镍铁矿化。钴孔圈定 6 条工业矿体, 矿体厚度 2.44~16.8 m, Ni 品位 0.38%~1.72%, 平均 0.91%; Co 品位 0.017%~0.11%, 平均 0.058%; Cu 品位 0.2%~0.55%, 平均 0.38%。

在浪木日地区, 通过槽探、钻探初步控制, 查明含镍钴矿岩体 5 处, 分别为 2 号、3 号、4 号、7 号、14 号, 并对 2 号和 4 号含矿岩体地质及矿石特征做了详细解剖。目前已圈定镍钴矿体多条, 与夏日哈

木镍钴矿床相比, Ni 品位较低, Co 含量较高。浪木日矿区岩石类型主要有细粒纯橄岩、中粒黑云母辉石橄榄岩、黑云母辉石岩、绿泥黑云母角闪石岩、辉长岩等。辉石橄榄岩为主要的含矿岩石类型, 目前纯橄岩、辉长岩中未见明显矿化。目前矿区发现的矿石类型主要呈点状或(稀疏)浸染状矿石, 少量的近海绵陨铁状矿石和贯入式的脉状矿石 (图 2c、e)。

3.4.2 岩石地球化学特征

浪木日矿区含矿岩体岩石类型主要有辉橄岩、辉石岩、辉长岩等。辉橄岩颜色为灰黑色, 粒状结构, 块状构造, 岩石主要由橄榄石 (40%~50%), 辉石 (20%~30%), 铬云母 (8%~10%), 金属矿物 (5%~10%) (图 2c、e)。辉石岩呈灰色—灰绿色, 粒状结构、块状构造, 岩石主要由辉石 (85%)、黑云母 (10%)、橄榄石 (5%) 及少量副矿物组成。辉石呈半自形—自

形晶,橄榄石呈他形晶。岩石普遍具有绿泥石化、蛇纹石化、碳酸盐化。辉长岩主要呈灰白色,辉长结构、块状构造,岩石主要由基性斜长石(35%~55%)、辉石(50%~55%)、云母和金属矿物(3%~5%)组成,其次含有少量角闪石和黑云母(图 2f)。斜长石、辉石自形程度相近,均呈半自形—他形结构。岩石裂隙较为发育,见有镍华、镍黄铁矿沿岩石裂隙分布(图 2g)。

辉石橄榄岩 SiO₂ 含量介于 40.06%~42.42%,平均 40.37%; MgO 含量介于 31.5%~34.06%,平均 30.16%; Al₂O₃ 含量介于 2.38%~3.64%,平均 3.15%; CaO 含量介于 0.76%~1.26%,平均 0.95%; TiO₂ 含量介于 0.14%~0.25%,平均 0.23%; 其中 MgO、Al₂O₃、CaO 等含量变化较大主要由岩石次生蚀变程度控制,特别是蛇纹石化作用普遍造成岩石 Al₂O₃ 含量大幅度升高。超基性岩稀土总量介于 6.36×10⁻⁶~81.5×10⁻⁶,平均为 29.92×10⁻⁶,稀土总量较基性岩略低,LREE/HREE 值平均为 5.34,(La/Sm)_N、(La/Yb)_N、(Sm/Nd)_N、(Gd/Yb)_N 平均值分别为 2.58、5.99、0.76、1.78。稀土元素配分图中,超基性岩轻重稀土分异程度较基性岩更为强烈。在微量元素蛛网图中,含矿超基性岩普遍具有较为一致的分布曲线,且与基性岩表现特征类似,亏损高场强元素 Ta、Nb、Ti、P 等,而相对富集大离子亲石元素 Rb、Th、U 等(Namkha et al., 2020)。

3.4.3 可能形成环境

通过岩石学、矿物学及地球化学研究,认为浪木日岩体的母岩浆为高镁玄武质岩浆,形成于裂解

伸展环境(Namkha et al., 2020),可能是伴随古特提斯洋开启大陆裂解的构造响应(李文渊, 2018)。深部部分熔融的超镁铁质岩浆沿构造薄弱部位上涌,岩浆上涌过程中发生岩浆演化及硫化物熔离,地壳物质的混染是导致大量硫化物熔离的主控因素,发生硫化物熔离的岩浆继续上涌至地壳浅部形成硫化物聚集而成岩成矿。

东昆仑造山带典型铜镍硫化物矿床基本赋存于辉石岩相和橄榄岩相内,基性程度越高矿石越富,大陆边缘裂解环境可能生成超大规模的铜镍矿体,岩浆分异越好越有利于形成巨大经济价值的矿体(表 1)。

4 讨论

4.1 构造背景探讨

东昆仑夏日哈木辉长岩形成年龄约为 431 Ma(Li et al., 2015),邻近昆北断裂位于昆北地体的北缘,冰沟南辉长岩形成年龄约为 427 Ma(张志炳等, 2016),同样邻近于昆北断裂,位于昆北断裂的北部;而石头坑德辉长岩形成时代约为 425 Ma(Zhang et al., 2018)、浪木日辉长岩形成年龄约 430 Ma(Namkha et al., 2020),邻近昆中断裂位于昆北地体的南缘。可以看出这些年龄数据正逐步揭示东昆仑志留纪的镁铁—超镁铁质岩的侵入事件,以及与之相关的岩浆成矿作用。

根据研究,原特提斯洋在加里东早期开始沿现今的昆中断裂附近由南而北向柴达木地块俯冲,在昆中断裂处形成海沟,随着俯冲的加剧,在昆北断

表 1 东昆仑造山带典型铜镍硫化物矿床特征对比

Table 1 Characteristics of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in eastern Kunlun orogenic belt				
矿床名称	冰沟南	夏日哈木	石头坑德	浪木日
产出位置	造山带	造山带	造山带	造山带
形成时代	427 Ma (辉长岩)	431 Ma (辉长岩)	425 Ma (辉长岩)	430 Ma (辉长岩)
	378 Ma (辉石岩)	411 Ma (橄榄辉石岩)	334 Ma (辉石岩)	419 Ma (辉石岩)
岩体面积	0.024 km ²	0.9 km ²	4.71 km ²	0.08 km ²
主要岩性	斜长橄榄辉石岩、辉长岩、辉长辉绿岩脉	辉长岩、二辉橄榄岩、纯橄岩、辉石岩、二辉岩、方辉岩	辉石岩、橄榄二辉岩、橄榄岩、辉长岩	辉橄岩、辉石岩、辉长岩
含矿岩相	斜长橄榄辉石岩	橄榄岩相、辉石岩相	辉石岩、含长橄辉岩及橄榄岩	辉石岩相、橄榄岩相
矿石类型	稠密浸染状	海绵陨铁状、块状、稠密浸染状	浸染状、半块状	浸染状、海绵陨铁状、珠滴状
围岩特征	狼牙山组大理岩及石英片岩	金水口岩群片麻状花岗岩(含星点状硫化物)和大理岩	金水口群白沙河岩组及万保沟大理岩凝灰岩	金水口岩群白沙河岩组中深变质岩系
数据来源	张照伟等, 2017, 2018	张照伟等, 2015; Li et al., 2015; Song et al., 2016	Zhang et al., 2018	Namkha et al., 2020

裂以北形成弧后裂陷槽, 局部扩张为小洋盆并接受滩间山群的沉积, 昆中断裂以南的大洋环境主要为万宝沟群大洋玄武岩高原(莫宣学, 2019)。在对加里东造山旋回进行研究的过程中, 莫宣学(2019)通过对阿拉克湖岩体、德拉托郭勒岩体和万宝沟岩体的研究发现, 东昆仑东部在早寒武世为洋盆形成及扩张阶段, 中寒武世开始俯冲, 持续到晚奥陶世, 西部地区形成洋盆的时间稍晚。晚寒武世—早志留世期间, 原特提斯洋向北俯冲消减, 东昆仑地区在此时限内转化为沟—弧—盆体系(张志炳等, 2017)。位于东昆中清水泉—可可沙—科科可特一线发育的岛弧型中酸性侵入岩(515~427 Ma), 可能就是对该时期洋壳俯冲事件的响应(Meng et al., 2013)。昆中缝合带出露的胡晓钦角闪辉绿岩(438 Ma, Meng et al., 2013)、清水泉辉绿岩(436 Ma, Wang et al., 2019)等镁铁质岩石和基性岩脉可能代表了早古生代原特提斯洋俯冲最晚的岩浆记录(Meng et al., 2015)。高压榴辉岩相变质年龄为 428 Ma(Meng et al., 2015), 中压(绿帘)角闪岩相变质峰期年龄为 427 Ma(Song et al., 2006), 可能反映了特提斯洋的最终关闭。400~423 Ma 磨拉石建造的出现则标志着洋盆最终关闭(Song et al., 2016)。早泥盆世之后, 东昆南大洋板块与东昆中带发生碰撞—拼贴, 随后昆北弧后裂陷槽关闭, 以夏日哈木为代表的 431~411 Ma 的基性—超基性杂岩的大量出现, 暗示该时期东昆仑地区的构造体制发生了重大转变, 由洋壳俯冲体制转变为碰撞拼贴后的伸展体制(何书跃等, 2018)。

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、与华北相连及与华南和澳大利亚大陆相连 3 种认识, 并认为超级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级地幔柱作用的结果(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)。早寒武世—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—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(李文渊, 2018)。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(李文渊, 2018)。阿尔金带是夭折的裂谷带, 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解的产物(李文渊, 2018)。除夏日哈木矿床之外, 东昆仑的石头坑德、冰沟南、浪木日矿床, 以及南祁连的裕龙沟、拉水峡、亚曲等岩浆镍钴硫化物矿床的形成, 可能都与该构造背景密切相关, 此时期的伸展环境可能是古特提斯洋演化开始裂解的具体表现, 岩浆活动是岩浆镍钴硫化物矿床的成矿响应(张照伟等, 2019)。

4.2 成矿过程认识

东昆仑夏日哈木、石头坑德、冰沟南、浪木日等镁铁—超镁铁质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, 地壳混染在成矿过程中起着重要作用(Li et al., 2009, 2013; Yang et al., 2012; Lightfoot and Evans-Lamswood, 2015; Salama et al., 2016; Zhang et al., 2017)。夏日哈木岩体的含矿母岩浆组成经计算为 MgO、FeO、SiO₂ 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(Wendlandt, 1982; Naldrett, 2004, 2011; Tao et al., 2008; 宋谢炎等, 2009; Maier and Barnes, 2010; Maier and Groves, 2011; Liu et al., 2017)。夏日哈木母岩浆在早期阶段硫是不饱和的, 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

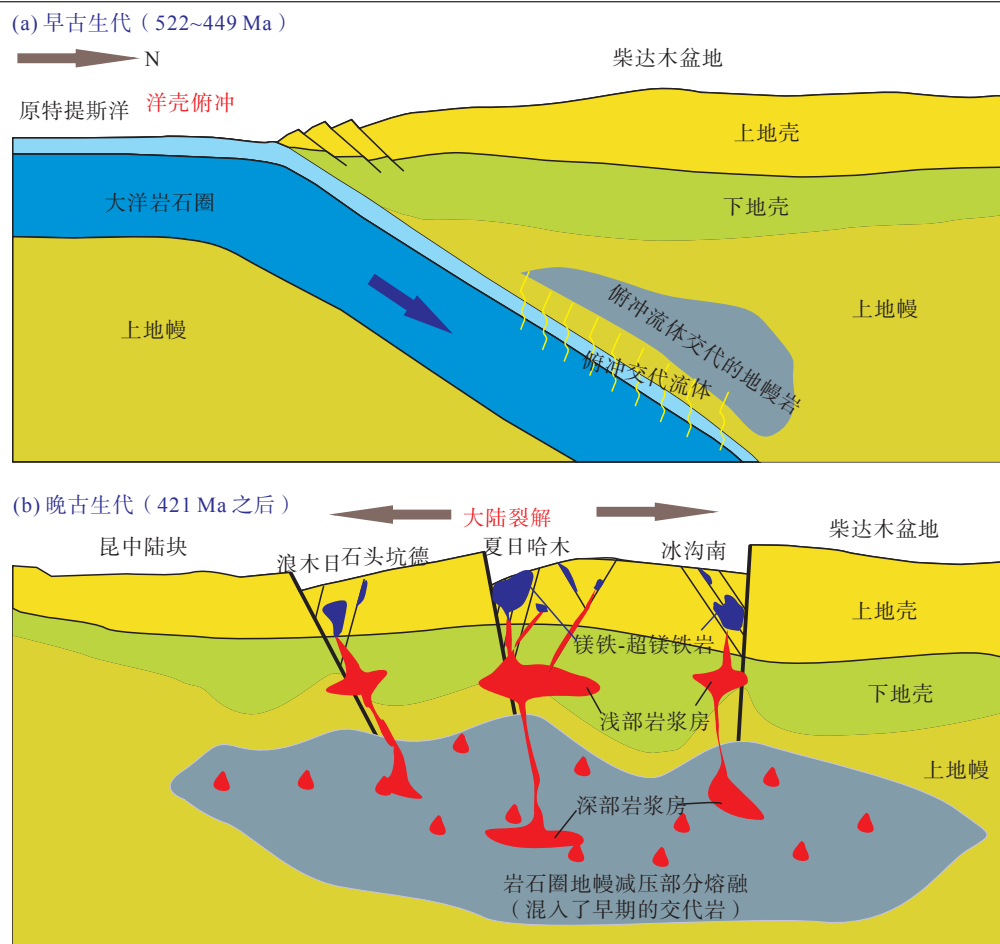


图3 东昆仑镍钴硫化物矿床成矿模式简图

Fig.3 The sketched metallogenic model map of magmatic Ni-Co sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt

岩浆的注入及地壳物质的混染,使得矿床中形成的镁铁—超镁铁质岩体具有岛弧岩浆岩的一些地球化学性质,同时该过程中外来硫的加入导致岩浆房中的硫发生饱和,促使富 Ni、Cu、Co 等金属元素的硫化物发生大规模熔离作用。东昆仑此时期的镁铁—超镁铁质岩体的形成,是随着部分熔融形成的岩浆上涌,深部和浅部均发生了硫化物的不混溶作用,演化的岩浆恰逢伸展环境,于柴达木克拉通南缘东昆仑造山带夏日哈木、石头坑德、冰沟南、浪木日等构造薄弱部位成岩成矿,形成岩浆镍钴硫化物矿床(图3)。此时期岩浆成矿作用规模强大,可能是伴随古特提斯洋演化开始大陆裂解岩浆镍钴成矿响应的具体表现。

5 结论

(1)东昆仑夏日哈木、浪木日等镁铁—超镁铁

质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,可能是由于从洋壳释放出的流体交代地幔楔的结果。结合区域构造演化和岩体形成时代,认为东昆仑夏日哈木、石头坑德、冰沟南及浪木日等镁铁—超镁铁质岩体形成于伸展环境。

(2)东昆仑夏日哈木、浪木日等镁铁—超镁铁质岩体的形成,可能是伴随部分熔融形成的岩浆上涌,深部和浅部发生了硫化物的不混溶作用,地壳混染对硫化物饱和具有关键作用,演化的岩浆恰逢伸展环境,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,是多次岩浆脉冲上涌叠加成矿的结果。此时期岩浆成矿作用规模强大,可能是伴随古特提斯洋演化开始大陆裂解岩浆镍钴成矿响应的具体表现。此时期同类岩体的含矿性评价是下一步找矿主要方向。

References

- Chen Xuanhua, Shao Zhaogang, Xiong Xiaosong, Gao Rui, Liu Xuejun, Wang Caifu, Li Bing, Wang Zengzhen, Zhang Yiping. 2019. Fault system, deep structure and tectonic evolution of the Qilian Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Geology in China*, 46(5): 995–1020 (in Chinese with English abstract).
- Dong Jun, Huang Hualiang, Yin Jianhua, Li Shijin, Tian Chengsheng. 2017. Geological characteristics of the Shitoukengde mafic-ultramafic rocks in East Kunlun and related metallogenic conditions[J]. *Northwestern Geology*, 50(2): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- Fan Likun, Cai Yanping, Liang Haichuan, Li Honglu. 2009. Characteristics of geological tectonic and geodynamics evolution in eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Survey and Research*, 33(3): 181–186 (in Chinese with English abstract).
- He Chengguang, Wang Shiyan, Fang Huaibin, Chai Jianyu, Su Jiancang, Chang Yongwei, Wang Liulin, Chen Denghui. 2019. Redefinition and ore forming significance of Maeryang Forming, Taxkorgan, Western Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 46(3): 517–536 (in Chinese with English abstract).
- He Shuyue, Li Dongsheng, Bai Guolong, Liu Yongle, Liu Zhigang, Sun Feifei, Zhang Yong, Qu Guangju. 2018. The report on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar age of muscovite from the Qunli Fe-polymetallic deposit in the Qimantag area, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(1): 201–202 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Changyi, Ling Jinlan, Zhou Wei, Du Wei, Wang Zixi, Fan Yazhou, Song Yanfang, Song Zhongbao. 2015. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni-bearing layered mafic-ultramafic intrusion, east Kunlun: Implications for its extensional island arc environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(4): 1117–1136 (in Chinese with English abstract).
- Kong Huilei, Li Jinchao, Guo Xianzheng, Yao Xuegang, Jia Qunzi. 2019. The discovery of Early Devonian pyroxene peridotite from the Xiwanggou magmatic Ni–Cu sulfide ore spot in East Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 46(1): 205–206 (in Chinese with English abstract).
- Li C S, Ripley E M. 2009. Sulfur contents at sulfide–liquid or anhydrite saturation in silicate melts: Empirical equations and example applications[J]. *Economic Geology*, 104(3): 405–412.
- Li C S, Ripley E M, Thakurta J. 2013. Variations of olivine Fo–Ni contents and highly chalcophile element abundances in arc ultramafic cumulates, southern Alaska[J]. *Chemical Geology*, 351: 15–28.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, Wang Y L, Sun T, Ripley E M. 2015. 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*, 216–217: 224–240.
- Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng. 2008. *Geology of Kunlun Orogenic Belt and Its Adjacent Area*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–309 (in Chinese).
- Li Tingdong, Xiao Qinghui, Pan Guitang, Lu Songnian, Ding Xiaozhong, Liu Yong. 2019. A consideration about the development of ocean plate geology[J]. *Earth Science*, 44(5): 1441–1451 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 2018. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2201–2210 (in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C, Evans-Lamswood D. 2015. 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 Reviews*, 64: 354–386.
- Ling Jinlan. 2014. *Metallogenesis of Nickel Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province*[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–214 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y G, Li W Y, Lü X B. 2017. Sulfide saturation mechanism of the Poyi magmatic Cu–Ni sulfide deposit in Beishan, Xinjiang, Northwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 419–431.
- Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, Zhang Z W. 2018. 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*, 113(6): 1383–1417.
- Liu Y G, Lü X B, Wu C M. 2016. 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*, 72: 538–545.
- Liu Jinlong, Li Zhumin, Zhou Yongheng, Wang Li, Wang Guan, Jiang Ping, Chen Liangxi, Dong Cunjie. 2023. Distribution, geology and development status of nickel deposits[J]. *Geology in China*, 50(1): 118–132 (in Chinese with English abstract).
- Maier W D, Barnes S J. 2010. The Kabanga Ni sulfide deposits, Tanzania: II. Chalcophile and siderophile element geochemistry[J]. *Mineralium Deposita*, 45(5): 443–460.
- Maier W D, Groves D I. 2011. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni–Cu deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 46(8): 841–857.
- Mao Y W, Qin K Z, Li C S. 2014. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. *Lithos*, 200: 111–125.
- Meng F C, Cui M H, Wu X K, Ren Y F. 2015. Heishan mafic-ultramafic rocks in the Qimantag area of Eastern Kunlun, NW China: Remnants of an early Paleozoic incipient island arc[J]. *Gondwana Research*, 27: 745–759.
- Meng F C, Zhang J X, Cui M H. 2013. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic

- significance[J]. *Gondwana Research*, 23(2): 825–836.
- Meng Fancong, Jia Lihui, Ren Yufeng, Liu Qiang, Duan Xuepeng. 2017. Magmatic and metamorphic events recorded in the gneisses of the Wenquan region, east Kunlun Mountains, Northwestern China: Evidence from the zircon U–Pb geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3691–3709 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue. 2019. Magmatism and deep geological process[J]. *Earth Science*, 44(5): 1487–1493 (in Chinese with English abstract).
- Naldrett A. J. 2004. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration[M]. Berlin: Springer–Verlag, 1–366.
- Naldrett A. J. 2011. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 17: 1–50.
- Namkha N, Li J C, Liu Y G, Jia Q Z, Kong H L. 2020. Tectonomagmatic setting and Cu–Ni mineralization potential of the Gayahedonggou Complex, northern Qinghai–Tibetan Plateau[J]. *Minerals*, 10(11): 950.
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Ren Fei, Peng Zhimin, Wang Jiaxuan. 2019. Recognition of the oceanic subduction–accretion zones from the orogenic belt in continents and its important scientific significance[J]. *Earth Science*, 44(5): 1544–1561 (in Chinese with English abstract).
- Pan Tong. 2015. The prospecting for magmatic liquation type nickel deposits on the southern and northern margin of Qaidam Basin, Qinghai Province: A case study of the Xiarihamu Ni–Cu sulfide deposit[J]. *Geology in China*, 42(3): 713–723 (in Chinese with English abstract).
- Qi Shengsheng, Song Shuguang, Shi Lianchang, Cai Hangjia, Hu Jichun. 2014. Discovery and its geological significance of Early Paleozoic eclogite in Xiarihamu–Suhaitu area, western part of the East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3345–3356 (in Chinese with English abstract).
- Qian Bing, Zhang Zhaowei, Zhang Zhibing, Shao Ji. 2015. Zircon U–Pb geochronology of Niubiziliang mafic–ultramafic intrusion on the northwest margin of Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Geology in China*, 42(3): 482–493 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Zhao Lei, Li Chong, Zhu Junbin, Xiao Liwei. 2017. Thinking on Chinese tectonics—Duty and responsibility of Chinese geologists[J]. *Geology in China*, 44(1): 33–43 (in Chinese with English abstract).
- Salama W, Anand R, Verral M. 2016. 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 Reviews*, 72: 485–509.
- Song Guangyong, Gong Qingshun, Pang Hao, Xia Zhiyuan, Li Senming, Wu Jin, Tian Mingzhi, Huang Xuebing. 2020. High–precision sequence stratigraphy and sandbody architecture of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 47(1): 188–200 (in Chinese with English abstract).
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, Su L. 2006. 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*, 47(3): 435–455.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M. 2016. The giant Xiarihamu Ni–Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet plateau, China[J]. *Economic Geology*, 111: 29–55.
- Song Xieyan, Hu Ruizhong, Chen Liemeng. 2009. Geochemical properties of Ni, Cu, PGE and its significance for mantle magma origin, evolution and magmatic sulfide deposits research[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 287–305 (in Chinese with English abstract).
- Tang Qingyan, Li Jianping, Zhang Mingjie, Song Zhe, Dang Yongxi, Du Li. 2017. 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*, 33(1): 104–114 (in Chinese with English abstract).
- Tao Y, Li C S, Song X Y. 2008. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic–ultramafic intrusion and associated Ni–Cu sulfide ores, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 43(8): 849–872.
- Wang Guan. 2014. Metallogenesis of Nickel Deposits in Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–200 (in Chinese with English abstract).
- Wang K Y, Song X Y, Yi J N, Chen L M. 2019. 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: 103–122.
- Wang Xing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Liu Chenjun, Chen Youxin, Li Zuochen, Zhang Yu, Hu Chenguang, Yan Quanzhi, Peng Sizhong. 2019. 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*, 46(1): 155–177 (in Chinese with English abstract).
- Wendlandt R F. 1982. Sulfide saturation of basalt and andesite melts at high pressures and temperatures[J]. *American Mineralogist*, 67: 877–885.
- Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Hu Yunxu. 2014. Geological Settings Study on Arkim–West Part of Eastern Kunlun Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–261 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Hou Zengqian, Zhang Zeming, Zeng Lingsen, Li Haibing, Zhang Jianxin, Li Zhonghai, Ma Xuxuan. 2016. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 43(1): 1–42 (in Chinese with English abstract).
- Yang S H, Zhou M F, Lightfoot P C. 2012. 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*, 302–303: 106–118.
- Zeng Zhongcheng, Hong Zenglin, Liu Fangxiao, Bian Xiaowei, Li Qi, Gao Feng, He Yuanfang, Jian Kunkun. 2020. Confirmation of gneissic granite of Qingbaikou period and its constraint on the timing of the Rodinia supercontinent on the Altun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 47(3): 569–589 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Guo Anlin. 2019. Thoughts on continental tectonics[J]. *Earth Science*, 44(5): 1464–1475 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xueting, Yang Shengde. 2007. Study on Plate Tectonic in Qinghai Province—I:100000000 Specification for Tectonic Graph in Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–178 (in Chinese).
- Zhang Yu, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Liu Chengjun, Chen Youxin, Li Zuochen, Wang Xing, Hu Chenguang, Yan Quanzhi, Peng Sizhong. 2017. 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*, 44(3): 526–540 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Qian Bing, Wang Yalei, Li Shijin, Liu Changzheng, Zhang Jiangwei, Yang Qi'an, You Minxin, Wang Zhian. 2015. Metallogenic epoch of the Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt and its prospecting significance[J]. *Geology in China*, 42(3): 438–451 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaowei, Qian Bing, Wang Yalei, Li Shijin, Liu Changzheng. 2016. Petrogeochemical characteristics of the Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit in Qinghai province and its study for olivine[J]. *Northwestern Geology*, 49(2): 45–58 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaowei, Wang Yalei, Qian Bing, Li Wenyuan. 2017. Zircon SHRIMP U–Pb age of the Binggouan magmatic Ni–Cu deposit in East Kunlun Mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 724–735 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaowei, Wang Chiyuan, Qian Bing, Li Wenyuan. 2018. 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*, 34(8): 2262–2274 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaowei, Wang Chiyuan, Liu Chao, Wang Yalei, Qian Bing, Li Wenyuan, You Minxin, Zhang Jiangwei. 2019. Mineralization characteristics and formation mechanism of the intrusions in Xiarihamu magmatic Ni–Cu sulfide deposit, East Kunlun Orogenic Belt, Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 52(3): 35–45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhibing, Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, Qian Bing. 2016. Characteristics of chromian spinels 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*, 35(5): 966–975 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhibing, Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, Qian Bing, Liu Yuegao, Peng Xin. 2017. 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*, 53(5): 867–879 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, Li C S, Ripley E M, Kamo S. 2014. 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*, 49(2): 279–292.
- Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, Wang Y L, Ripley E M. 2017. Sr–Nd–Os isotopes and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai–Tibet plateau, China[J]. *Mineralium Deposita*, 52: 51–68.
- Zhang Z W, Wang Y L, Qian B, Liu Y G, Zhang D Y, Lü P R, Dong J. 2018. Metallogeny and tectonomagmatic setting of Ni–Cu magmatic sulfide mineralization, number 1 Shitoukengde mafic–ultramafic complex, East Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 236–246.
- Zhang Z W, Wang Y L, Wang C Y, Qian B, Li W Y, Zhang J W, You M X. 2019. Mafic–ultramafic magma activity and copper–nickel sulfide metallogeny during Paleozoic in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 2(4): 467–477.

附中文参考文献

- 陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 高锐, 刘雪军, 王财富, 李冰, 王增振, 张义平. 2019. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. *中国地质*, 46(5): 995–1020.
- 董俊, 黄华良, 尹建华, 李世金, 田承胜. 2017. 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*, 50(2): 49–60.
- 范丽琨, 蔡岩萍, 梁海川, 李宏录. 2009. 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*, 33(3): 181–186.
- 贺承广, 王世炎, 方怀宾, 柴建玉, 苏建仓, 常永伟, 王柳林, 陈登辉. 2019. 西昆仑塔什库干马尔洋岩组的厘定及控矿意义[J]. *中国地质*, 46(3): 517–536.
- 何书跃, 李东生, 白国龙, 刘永乐, 刘智刚, 孙非非, 张勇, 屈光菊. 2018. 青海祁漫塔格群力矿床矽卡岩中白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄报道[J]. *中国地质*, 45(1): 201–202.
- 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 杜玮, 王子玺, 范亚洲, 宋艳芳, 宋忠宝. 2015. 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*, 31(4): 1117–1136.
- 孔会磊, 李金超, 国显正, 姚学钢, 贾群子. 2019. 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*, 46(1): 205–206.
- 李荣社, 计文化, 杨永成. 2008. 昆仑山及邻区地质[M]. 北京: 地质出

- 版社, 1-309.
- 李廷栋, 肖庆辉, 潘桂棠, 陆松年, 丁孝忠, 刘勇. 2019. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. 地球科学, 44(5): 1441-1451.
- 李文渊. 2018. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 34(8): 2201-2210.
- 凌锦兰. 2014. 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, 1-214.
- 刘金龙, 李仁民, 周永恒, 王力, 王冠, 姜平, 陈良玺, 董存杰. 2023. 镍矿床分布、成矿背景和开发现状[J]. 中国地质, 50(1): 118-132.
- 孟繁聪, 贾丽辉, 任玉峰, 刘强, 段雪鹏. 2017. 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, 32(12): 3691-3709.
- 莫宣学. 2019. 岩浆作用与地球深部过程[J]. 地球科学, 44(5): 1487-1493.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 任飞, 彭智敏, 王嘉轩. 2019. 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, 44(5): 1544-1561.
- 潘彤. 2015. 青海省柴达木南北缘岩浆熔离型镍矿的找矿——以夏日哈木镍矿为例[J]. 中国地质, 42(3): 713-723.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 才航加, 胡继春. 2014. 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, 30(11): 3345-3356.
- 钱兵, 张照伟, 张志炳, 邵继. 2015. 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, 42(3): 482-493.
- 任纪舜, 赵磊, 李崇, 朱俊宾, 肖黎微. 2017. 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, 44(1): 33-43.
- 宋光永, 宫清顺, 庞皓, 夏志远, 李森明, 伍劲, 田明智, 黄学兵. 2020. 柴达木盆地西部斜坡区下干柴沟组下段高精度层序地层及砂体构型分析[J]. 中国地质, 47(1): 188-200.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列猛. 2009. 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, 16(4): 287-305.
- 汤庆艳, 李建平, 张铭杰, 宋哲, 党永西, 杜丽. 2017. 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, 33(1): 104-114.
- 王冠. 2014. 东昆仑造山带镍矿成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 1-200.
- 王兴, 裴先治, 李瑞保, 刘成军, 陈有炘, 李佐臣, 张玉, 胡晨光, 颜全治, 彭思钟. 2019. 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, 46(1): 155-177.
- 校培喜, 高晓峰, 胡云绪. 2014. 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, 1-261.
- 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 张泽明, 曾令森, 李海兵, 张建新, 李忠海, 马绪宣. 2016. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 43(1): 1-42.
- 曾忠诚, 洪增林, 刘芳晓, 边小卫, 李琦, 高峰, 何元方, 菅坤坤. 2020. 阿尔金造山带青白口纪片麻状花岗岩的厘定及对 Rodinia 超大陆汇聚时限的制约[J]. 中国地质, 47(3): 569-589.
- 张国伟, 郭安林. 2019. 关于大陆构造研究的一些思考与讨论[J]. 地球科学, 44(5): 1464-1475.
- 张雪亭, 杨生德. 2007. 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, 1-178.
- 张玉, 裴先治, 李瑞保, 刘成军, 陈有炘, 李佐臣, 王兴, 胡晨光, 颜全治, 彭思钟. 2017. 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, 44(3): 526-540.
- 张照伟, 李文渊, 钱兵, 王亚磊, 李世金, 刘长征, 张江伟, 杨启安, 尤敏鑫, 王治安. 2015. 东昆仑夏日哈木岩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, 42(3): 438-451.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 李世金, 刘长征. 2016. 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, 49(2): 45-58.
- 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 李文渊. 2017. 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, 91(4): 724-735.
- 张照伟, 王驰源, 钱兵, 李文渊. 2018. 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, 34(8): 2262-2274.
- 张照伟, 王驰源, 刘超, 王亚磊, 钱兵, 李文渊, 尤敏鑫, 张江伟. 2019. 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, 52(3): 35-45.
- 张志炳, 李文渊, 张照伟, 钱兵. 2016. 东昆仑夏日哈木岩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, 35(5): 966-975.
- 张志炳, 李文渊, 张照伟, 钱兵, 刘月高, 彭欣. 2017. 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, 53(5): 867-879.