

doi: [10.12097/gbc.2024.06.020](https://doi.org/10.12097/gbc.2024.06.020)

东昆仑志留纪—泥盆纪关键金属成矿大爆发

钟世华^{1,2}, 黄宇^{1,2}, 刘永乐^{3*}, 张勇³, 白国龙³, 刘智刚³, 马强³, 王丽君³,
赵芙蓉³, 何书跃³

ZHONG Shihua^{1,2}, HUANG Yu^{1,2}, LIU Yongle^{3*}, ZHANG Yong³, BAI Guolong³,
LIU Zhigang³, MA Qiang³, WANG Lijun³, ZHAO Furong³, HE Shuyue³

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院/海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237;

3. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810029

1. College of Marine Geosciences/Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE and Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, Shandong, China;
3. The Third Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810029, Qinghai, China

摘要:【研究目的】随着地质调查和研究的深入,大量的证据显示东昆仑造山带在志留纪—泥盆纪存在大规模成矿作用,但对志留纪—泥盆纪成矿作用长期缺乏深入研究。本文旨在厘定东昆仑志留纪—泥盆纪大规模成矿的特点及其他地球动力学背景,服务新一轮找矿突破战略行动。【研究方法】系统收集东昆仑造山带最新的找矿工作成果,对该地区志留纪—泥盆纪成矿作用类型和特点进行了综合分析研究。【研究结果】东昆仑地区在志留纪—泥盆纪主要发育3种矿床类型:①与基性—超基性岩有关的岩浆熔离型铜镍矿床,如夏日哈木、冰沟南等;②与花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩矿床,可进一步分为斑岩-矽卡岩铜铁多金属矿床和矽卡岩钨锡矿床,如卡尔却卡、乌兰乌珠尔、白干湖等;③与碱性岩-碳酸岩有关的碱性岩-碳酸岩型铌矿床,以大格勒为代表。【结论】综合前人研究表明,东昆仑志留纪—泥盆纪大规模金属矿床的形成与原特提斯洋闭合后的演化密切相关。原特提斯洋在约435 Ma闭合后,东昆仑地区进入陆-陆碰撞环境,由于板片断离和后碰撞伸展作用,诱发软流圈地幔大规模上涌,慢源岩浆在上升过程中与陆壳物质发生不同程度的壳幔相互作用,形成了富含成矿元素的岩浆,并最终在上地壳就位,形成了不同的矿床类型。下一步,应进一步加大对东昆仑志留纪—泥盆纪基性—超基性岩、碳酸岩和花岗岩类分布范围及成矿潜力的研究,为全面认识东昆仑地区金属成矿规律、实现找矿突破提供理论指导。

关键词:东昆仑;原特提斯;斑岩-矽卡岩矿床;岩浆矿床;关键金属

创新点:东昆仑造山带在志留纪—泥盆纪成矿潜力巨大,发育岩浆熔离型铜镍矿床、斑岩-矽卡岩矿床及碱性岩-碳酸岩型铌矿床,与原特提斯洋闭合后的演化密切相关。

中图分类号:P534.43; P534.44; P618.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2025)04-0574-13

Zhong S H, Huang Y, Liu Y L, Zhang Y, Bai G L, Liu Z G, Ma Q, Wang L J, Zhao F R, He S Y. Silurian-Devonian critical metal mineralization boom of the East Kunlun Orogenic Belt. Geological Bulletin of China, 2025, 44(4): 574–586

Abstract: [Objective] With the deepening of geological surveys and research, substantial evidence has indicated that the East Kunlun Orogenic Belt experienced large-scale mineralization during the Silurian–Devonian periods. However, there has been a long-standing

收稿日期: 2024-06-11; 修订日期: 2024-12-11

资助项目: 国家自然科学基金项目《青海野马泉矿床成矿岩浆 H₂O 和 Cl 含量精细研究: 对矽卡岩矿床成因的约束》(批准号: 42203066)、《基于多维数据的斑岩 Cu 矿床成矿岩浆机器学习识别方法和矿床成因研究》(批准号: 42472104) 和青海省科技厅项目《青海省祁漫塔格地区铜镍钴找矿突破研究》(编号: 2024028ky002)

作者简介: 钟世华(1989-), 男, 博士, 副教授, 从事矿床学研究。E-mail: zhongshihua@ouc.edu.cn

* 通信作者: 刘永乐(1985-), 男, 高级工程师, 从事地质矿产研究工作。E-mail: 281023605@qq.com

lack of in-depth research on the mineralization processes of these periods. This paper aims to clarify the characteristics of large-scale mineralization during the Silurian–Devonian in East Kunlun and its geodynamic background, with the goal of supporting a new round of strategic actions for mineral exploration breakthroughs. **[Methods]** Based on a systematic collection of the latest mineral exploration results from the East Kunlun Orogenic Belt, this paper conducts a comprehensive analysis of the types and characteristics of mineralization during the Silurian–Devonian periods in this region. **[Results]** The East Kunlun region primarily developed three types of deposits during the Silurian–Devonian periods: magmatic segregation-type copper–nickel deposits related to mafic–ultramafic rocks, such as those found in Xiarihamu and Binggounan; porphyry–skarn deposits related to granitoids, which can be further subdivided into porphyry–skarn copper–iron polymetallic deposits and skarn tungsten–tin deposits, such as those in Kaerqueka, Wulanwuzhuer, and Baiganhu; alkaline rock–carbonatite–type niobium deposits related to alkaline rocks and carbonatites, represented by the Dagele deposit. **[Conclusions]** Comprehensive previous studies indicate that the formation of large-scale metal deposits in East Kunlun during the Silurian–Devonian periods is closely related to the evolution following the closure of the Proto–Tethys Ocean. After the closure of the Proto–Tethys Ocean around 435 Ma, the East Kunlun region entered a continent–continent collision environment. Due to slab break-off and post-collisional extension, large-scale upwelling of the asthenospheric mantle was induced. During the ascent of mantle-derived magmas, varying degrees of crust–mantle interaction with continental crust materials occurred, forming magmas rich in ore-forming elements, which eventually emplaced in the upper crust, resulting in different types of deposits. Future research should further investigate the distribution and mineralization potential of Silurian–Devonian mafic–ultramafic rocks, carbonatites, and granitoids in East Kunlun, providing theoretical guidance for a comprehensive understanding of the metallogenic patterns in the region and achieving breakthroughs in mineral exploration.

Key words: East Kunlun; Proto-Tethys; porphyry-skarn deposit; magmatic deposit; critical metal

Highlights: The East Kunlun Orogenic Belt has great potential for metallogenic in the Silurian and Devonian periods, and develops magmatic segregation-type copper-nickel deposits, porphyry-skarn-type deposits and alkaline-carbonate-type niobium deposits, which are closely related to the evolution of the Proto-Tethys Ocean after its closure.

东昆仑造山带位于青藏高原东北部,东部以哇洪山–温泉断裂为界与西秦岭造山带相隔,西部以阿尔金断裂为界与西昆仑造山带相望,北部以昆北断裂为界与柴达木盆地相邻,南部为布青山–阿尼玛卿

构造混杂岩带,后者将东昆仑造山带与可可西里–巴颜喀拉造山带分开(Dong et al., 2018; Yu et al., 2020)(图1)。作为横贯中国大陆的中央造山带的重要组成部分,东昆仑造山带是研究青藏高原特提斯

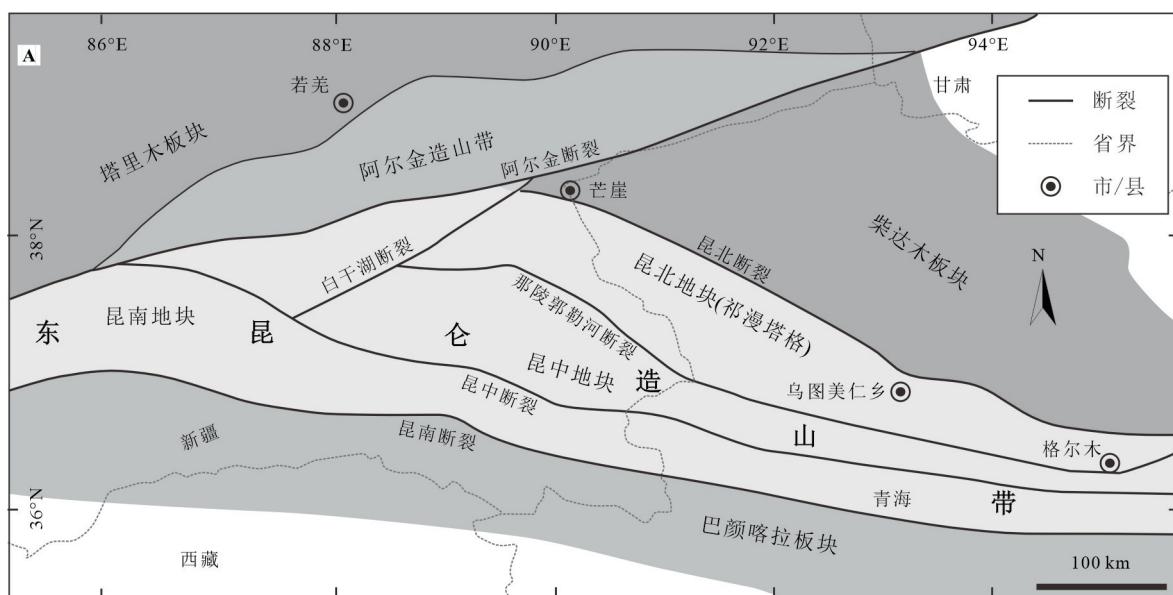


图1 东昆仑造山带大地构造位置图(据 Fang et al., 2015; Zhong et al., 2018)

Fig. 1 Tectonic framework of the East Kunlun Orogenic Belt and adjacent region

构造演化与成矿作用的天然实验室(莫宣学等, 2007; 许志琴等, 2013)。前人研究表明, 东昆仑造山带具有多旋回、多板块、多期次拼贴的构造演化历史(Meng et al., 2013; 王秉璋等, 2022), 对研究原—古特提斯北缘演化及中国西部大陆拼合过程具有非常重要的意义。

东昆仑造山带岩浆岩类发育, 出露岩体以中酸性岩体为主, 时代多为三叠纪(郭广慧等, 2023; 刘嘉情等, 2023; 黄宇等, 2025)。在三叠纪岩体与围岩的接触带附近, 先后发现了许多斑岩-矽卡岩型铜铁铅锌多金属矿床(Zhong et al., 2018, 2021a, b), 因此长期以来三叠纪被认为是东昆仑地区最主要的金属矿产成矿期(丰成友等, 2012; 毛景文, 2012; 高永宝等, 2014; 马忠元等, 2023)。近些年来, 随着勘探程度的提高和研究的深入, 大量志留纪—泥盆纪岩浆岩和与之相关的矿床被发现(何书跃等, 2017, 2023; 李良等, 2022), 志留纪—泥盆纪大规模金属成矿作用面貌逐渐显露。其中, 在东昆仑西段发现了全国第二大的夏日哈木超大型铜镍矿, 2022年又新发现了大格勒大型碱性岩-碳酸岩型铌矿(李五福等, 2024), 它们均被证实形成于志留纪—泥盆纪。这些矿床的发现掀起了东昆仑造山带铜镍钴铌等关键金属找矿研究的热潮。目前, 对这些形成于志留纪—泥盆纪的矿床, 前人已经开展了丰富的研究, 查明了它们的地质特征、成矿时代, 初步厘定了金属富集机制和成矿地球动力学背景(杜玮等, 2014; 李积清等, 2024; 王涛等, 2024; 王泰山等, 2024; 王强等, 2024)。不过, 相比于三叠纪成矿作用, 对志留纪—泥盆纪成矿作用的研究大都停留在矿床和矿区尺度, 缺乏区域尺度的系统性、综合性研究, 导致对东昆仑造山带志留纪—泥盆纪金属成矿作用发育的机理、特征、成矿环境及志留纪—泥盆纪矿床找矿前景缺乏深入认识, 制约了对东昆仑铜镍钴铌等关键金属成矿规律的认识及找矿勘查工作的部署。

为此, 本文系统收集整理了东昆仑造山带最新的找矿工作成果, 重点介绍了该地区志留纪—泥盆纪斑岩-矽卡岩型铜铁多金属矿、岩浆熔离型铜镍矿及碱性岩-碳酸岩型铌矿的时空分布、典型矿床特征和成因。在此基础上, 初步厘定了东昆仑志留纪—泥盆纪大规模成矿的特点及其地球动力学背景, 以期服务新一轮找矿突破战略行动, 为该地区找矿勘查工作部署提供依据, 助力战略性关键金属找矿

突破。

1 区域构造演化概况

东昆仑地区记录了原特提斯和古特提斯从俯冲、闭合至碰撞造山的复杂过程(Dong et al., 2018; 钟世华等, 2018; Yu et al., 2020)。其中, 原特提斯洋被认为存在于北美劳伦-波罗的海-塔里木-华北板块和冈瓦纳大陆之间, 最初是由 Rodinia 超大陆裂解而来(吴福元等, 2020)。在 480~400 Ma, 伴随着扬子、塔里木、柴达木等一系列(微)陆块南向俯冲至冈瓦纳大陆北缘, 原特提斯洋发生闭合(Li et al., 2018)。Zhong et al. (2021b) 根据东昆仑西段祁漫塔格地区弧岩浆岩相对不发育的特征, 认为在俯冲阶段, 洋壳以平板俯冲为主, 抑制了弧岩浆作用。前人在东昆仑地区深变质岩中发现了大量的榴辉岩(孟繁聪等, 2015), 初步研究显示其变质时代为 430 Ma 左右, 原岩时代为 928 Ma(Meng et al., 2013)。近年来, 在东昆仑西部夏日哈木矿床的金水口群中也发现了退变榴辉岩, 初步锆石 U-Pb 测定获得 410 Ma 左右的变质年龄(祁生胜等, 2014), 表明在柴达木地块南北两侧均有早古生代榴辉岩出露, 基本确定东昆仑在志留纪—泥盆纪存在陆陆碰撞型的板片断离-折返过程(刘月高等, 2024), 构造环境经历了从挤压构造体制向伸展构造体制的转化。类似地, Zhong et al. (2021b) 提出板片断离应该是导致原特提斯洋闭合后岩浆作用大规模出现的原因, 这是由于板片断离可以引发软流圈物质上涌, 从而形成大量的碰撞成因岩浆岩。这一构造演化过程为大量的幔源物质上涌和金属成矿作用提供了重要基础, 最终孕育了东昆仑地区独具特色的大规模关键金属成矿作用, 形成一系列岩浆型和热液型关键金属矿床。

原特提斯洋闭合后, 东昆仑地区进入到古特提斯造山阶段。古特提斯造山作用叠加到原特提斯造山作用之上, 一方面对原特提斯造山阶段的地质记录起到了破坏作用, 造就了东昆仑地区复杂的地球动力学特征, 另一方面, 2 期造山作用在东昆仑地区集中出现, 使东昆仑地区具有优越的成矿条件, 为三叠纪关键金属成矿作用再次爆发提供了能量和金属来源(Zhong et al., 2021b; 何书跃等, 2023)。古特提斯洋在该地区的出现可能发生在晚泥盆纪, 包括昆南缝合线代表的勉略洋和阿尔玛卿缝合线记录的阿尔玛卿洋(Jia et al., 2021; Li et al., 2018), 并在约 306

Ma 开始向北俯冲(陆济璞等, 2005), 在约 245 Ma 最终发生闭合(Liu et al., 2005; Xiong et al., 2012; Xia et al., 2015), 东昆中、东昆北地体最终与柴达木地体拼贴到一起。古特提斯洋闭合后的碰撞过程何时结束还存在不同认识, 但现有研究表明后碰撞岩浆作用至少持续到 196 Ma(李洪普等, 2011)。与原特提斯洋的演化过程一致, 古特提斯洋的演化过程也可以用以平板俯冲为主的大洋俯冲模型和以板片断离为特征的大陆碰撞模型解释(Zhong et al., 2021b)。

2 志留纪—泥盆纪主要矿床类型

虽然相对于东昆仑造山带的整个演化历史, 该时期相对短暂, 但形成的矿产资源类型丰富, 主要包括 3 类(表 1): 与基性—超基性岩有关的岩浆熔离型铜镍(-钴)矿(如夏日哈木; 王冠等, 2014; Song et al., 2016)、与花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩型多金属矿(如牛苦头、卡尔却卡、野马泉、哈日扎、白干湖等; 国显正等, 2019; Zhong et al., 2021a, b), 以及与碱性岩-碳酸岩有关的碱性岩-碳酸岩型铌矿(如大格勒; 王强等, 2024; 王泰等, 2024; 王涛等, 2024)。这些矿床大部分位于青海省境内, 而白干湖矽卡岩钨锡矿田和维宝矽卡岩铜多金属矿床分布于东昆仑最西段的新疆地区(钟世华等, 2017a, b, c)。与花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩型多金属矿除志留纪—泥盆纪成矿作用外, 大都同时存在三叠纪成矿作用, 显示出这些矿床可能是由 2 期成矿事件形成的(Zhong et al., 2021b)。

2.1 与基性—超基性岩有关的岩浆熔离型铜镍钴矿

在志留纪—泥盆纪, 东昆仑造山带基性—超基性岩浆岩和中酸性岩浆岩均十分发育(图 2)。其中, 志留纪—泥盆纪基性—超基性岩体在东昆仑造山带虽然数量不多(出露面积不到全区的 10%), 但金属矿化率极高, 产出的矿床规模最大。与其他成矿期的基性—超基性岩体零星分布于整个东昆仑造山带不同, 志留纪—泥盆纪基性—超基性岩体严格产在昆中断裂和昆北断裂两侧, 又以昆中断裂带附近岩体数量最多, 丛聚性明显(图 2)。志留纪—泥盆纪基性—超基性成矿岩体均以杂岩体产出, 岩相发育齐全, 多属于铁质超基性岩, 位于 EM II 富集端元, 并且具有明显的成矿专属性, 富含贵橄榄石和斜方辉石的超镁铁质岩是最重要的含矿岩石(王冠等, 2014; Song et al., 2016; 李良等, 2022; 李华等, 2023)。

与志留纪—泥盆纪基性—超基性岩体相关的矿

床主要有沟里地区的浪木日镍铂钯矿床、五龙沟地区的大格勒铌矿床和石头坑德镍钴矿床、拉陵灶火地区的夏日哈木镍铜钴矿床和卡尔却卡地区的阿克楚克塞镍矿床(表 1)。这些岩体出露的面积普遍不大, 均小于 2 km², 并且富含贵橄榄石和斜方辉石的超镁铁质岩是最重要的含矿岩石, 多属于铁质超基性岩(李良等, 2022)。含矿岩体发育堆晶结构, 从粒径上看以中—粗粒结构为主, 矿石构造为浸染状、海绵陨铁状、稠密浸染状和块状构造, 原始岩浆起源于亏损的软流圈地幔, 深部岩浆房发生了强烈而充分的分异和熔离作用, 且岩体侵位深度较大, 有利于成矿(Song et al., 2016; 李良等, 2022; 李华等, 2023)。

2.2 与花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩型多金属矿

相比于基性—超基性岩体, 泥盆纪—志留纪中酸性岩体在东昆仑造山带分布数量较丰富(图 2), 主要为碰撞—后碰撞伸展阶段形成的闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩(Zhong et al., 2021a, b), 常分布在泥盆纪—志留纪基性—超基性岩体周边(10 km 范围内), 出露面积除野马泉—牛苦头地区较大(约 30 km²)外, 其他矿区出露面积均小于 20 km²。从岩石成因类型看, 陆-陆同碰撞阶段主要形成与碰撞有关的 S 型花岗岩和高分异花岗岩, 同时也可以出现 I 型、A 型花岗岩和埃达克岩(南卡俄吾, 2021)。后碰撞—碰撞后伸展阶段则以 A 型花岗岩和 I 型花岗岩为主, 并且 I 型花岗岩内部可见暗色微粒包体(MMEs)(Zhong et al., 2021b)。这些花岗岩类就位过程中形成了许多斑岩-矽卡岩矿床。根据成矿元素组合特征可以进一步分为 2 类: 一类是与 I 型花岗岩有关的斑岩-矽卡岩铜铁铅锌多金属矿床, 如卡尔却卡、野马泉、牛苦头等, 主要位于青海省祁漫塔格地区; 另一类是与 S 型花岗岩和 A 型花岗岩有关的矽卡岩钨锡矿床, 位于新疆祁漫塔格地区。地壳减薄过程中, 深部大规模幔源岩浆上侵, 它们携带着成矿元素与壳源岩浆发生混合, 最终在地壳浅部就位形成了卡尔却卡、野马泉、牛苦头、哈日扎等斑岩-矽卡岩型铜铁多金属矿床及白干湖钨锡矿田(姚磊等, 2016; Gao et al., 2023)(表 1)。

2.3 与碱性岩-碳酸岩有关的碱性岩-碳酸岩型铌矿

志留纪—泥盆纪碱性岩-碳酸岩岩体目前仅分布在大格勒地区(图 2; 表 1), 杂岩体主要由橄榄岩、辉石岩、辉长岩、角闪石岩和碳酸岩组成, 岩体中心为碳酸岩相, 紧邻碳酸岩为中—粗粒橄榄-辉石岩相,

表 1 东昆仑志留纪—泥盆纪主要矿床

Table 1 Main Silurian—Devonian deposits (points) in the East Kunlun Orogenic Belt

序号	矿床 (点)	成矿岩体	出露面 积/ km ²	成岩成矿时代	Cu资源 量/10 ⁴ t	Ni资源 量/10 ⁴ t	Co资源 量/t	WO ₃ 资源 量/10 ⁴ t	Sn资源量/ 10 ⁴ t	备注
岩浆熔离型铜镍矿床										
1 夏日哈木										
1	夏日哈木	橄榄岩、辉石 岩、辉长岩	I号杂岩体1.12	辉长苏长岩423±1 Ma, 二辉岩412~406 Ma, 黄铁矿Re-Os年龄411 Ma(王冠等, 2014; Qian et al., 2020)	23.83	118.3	42928			
2	阿克楚 克塞	正长花岗岩、 闪长玢岩	正长花岗岩10.7	热液榍石413±3.6 Ma, 闪长玢岩381.7± 1.9 Ma(奥琮等, 2014)	0.2					夏日哈木 东铅锌矿
3	喀雅克登	阿克楚 克塞	0.01~0.1	辉长岩423.9±2.6 Ma, 辉石岩427.3± 2.3 Ma(同佳铭, 2017)	0.04	0.6	41.78			
3	喀雅克登	橄榄岩、辉石 岩、辉长岩	3.5	二辉橄榄岩386.4±3.2 Ma, 辉长岩 386.9±2.6 Ma、403.3±3.2(张勇等, 2015)	0.1	0.1				
4	冰沟南	二长花岗岩、 花岗岩	<13.5	二长花岗岩403.1±1.2 Ma(张勇等, 2016)	0.23					
4	冰沟南	辉石岩、辉长 岩	0.2	辉长岩427.4±7.3 Ma, 含长橄榄辉石岩 377.8±3.4 Ma(何书跃等, 2017; 张照伟 等, 2017)	0.1	0.08				
5	石头坑德	橄榄岩、辉石 岩、辉长岩	4	辉长岩423.5±3.2 Ma	0.1	14.7	7800			资源量 数据
6	浪木日	橄榄辉石岩、 辉石岩、辉长 岩	0.1	橄榄辉石岩438.8±2.6 Ma, 辉长岩 439.5±2.0 Ma(孟庆鹏, 2019)	0.64	220				李华等, 2023
斑岩-矽卡岩型多金属矿床										
7	卡尔却卡	二长花岗岩、 花岗斑岩	约17.2	斑状黑云母二长花岗岩 410.1~406.4 Ma, 花岗闪长岩245.1~211.8 Ma, 辉钼矿Re- Os年龄 245.5~238.8 Ma, 金云母Ar-Ar年 龄233.9±1.4 Ma(Zhong et al., 2021b)	16.83					
8	牛苦头	二长花岗岩、 花岗闪长岩	约17.2	花岗闪长岩 394.0~393.7 Ma, 二长花岗岩 361.8±3.4 Ma, 斑状花岗岩222.7±2.2 Ma, 黄铁矿Re-Os年龄 359.2±6.3 Ma, 石榴子 石U-Pb定年 219±12 Ma(Zhong et al., 2021b; 王新雨等, 2023; 2024)	19.56	1275.43				内部 资料
9	野马泉	二长花岗岩、 花岗闪长岩	<30	二长花岗岩(M13) 393±2 Ma, 花岗闪长 岩386±1 Ma, 石英闪长岩392.4±2.2 Ma(高永宝等, 2014; 宋忠宝等, 2014)	4.50	166.85				
10	哈日扎	花岗闪长岩、 英云闪长岩	2	V矿带花岗闪长岩423.8±4.3 Ma, 英云闪 长岩422.3±1.9 Ma(南卡俄吾, 2021)	8.51					详查 报告
11	白干湖	正长花岗岩、 二长花岗岩	2	二长花岗岩 431.3±4.0 Ma, 正长花岗岩 413.6±2.4 Ma(周建厚等, 2015; Zheng et al., 2018)			17	8		
碱性岩-碳酸岩型铌矿床										
12	大格勒	碳酸岩、橄揽 岩、辉石岩	1~5.63	碳酸岩381.1±2.3 Ma, 橄榄岩和辉石岩 417.7±3.4 Ma(王秉璋等, 2024)						大型 铌矿

向外为中粒角闪石—辉长岩相, 最外围为角闪正长岩, 整体岩性从内到外表现出超基性向基性过渡的特征, 岩相分带不明显, 其中角闪石岩为杂岩体的外壳和顶部, 含矿性差; 橄榄辉石岩呈不规则状侵入早期角闪石岩中, 为主要的赋矿岩相, 位于 EM I 富集端元; 方解石云母岩和碳酸岩呈脉状、似层状产于辉石岩中, 为铌矿化最富集地段, 岩体具有全岩铌矿化特征, 岩体即为铌矿体(王泰山等, 2024)。这类岩体主要形成在碰撞后岩石圈强烈伸展阶段, 地壳减薄导致软流圈上涌, 在岩浆活动最强时期形成橄榄岩(418 Ma)。碳酸岩的形成时代为 382 Ma, 与金水口麻粒岩相高温变质作用和堇青石花岗岩侵位时间相当(王秉璋等, 2024)。岩浆活动时间长, 持续时间约 40 Ma。该地区是东昆仑碰撞—碰撞后伸展相关岩浆活动最强烈的地区, 携带着成矿元素(Nb、REE)的深部大规模幔源岩浆上侵, 在地壳深处形成富含 CO₂、Nb、P、REE 等元素的硅酸盐—碳酸岩岩浆房, 后来在向上运移过程中通过岩浆的结晶分异及不混溶作用, 沿昆中断裂就位, 形成以橄榄岩—辉石岩—碳酸岩为主的碱性杂岩体, 并最终形成了大格勒碱性岩—碳酸岩铌矿床(王泰山等, 2024)。

3 不同矿床类型特征

3.1 时空分布特征

目前, 东昆仑志留纪—泥盆纪金属矿产集中分布在夏日哈木、石头坑德、浪木日、牛苦头、野马泉、卡尔却卡、哈日扎和大格勒地区。从成矿时代和空间分布看, 具有以下特征。

(1) 岩浆熔离型铜镍钴矿: 成矿时代上, 该类型矿床形成于 424.0~377.8 Ma(Zhong et al., 2021b), 成矿岩浆活动时间跨度大; 空间分布上, 志留纪—泥盆纪岩浆熔离型铜镍钴矿在东昆仑成矿带西部、中部和东部均有分布, 铜镍钴矿成矿强度和规模大。典型矿床包括西部的夏日哈木超大型矿床、冰沟南小型矿床和中部的石头坑德中型矿床及东部的浪木日小型矿床(图 2)。以上镍资源量约占青海省资源量的 90%, 钴资源量约占青海省资源量的 70%。该类型矿以铜镍钴矿为主, 矿化较单一, 共伴生铂族元素矿(奥琮等, 2014; 王冠等, 2014; 张勇等, 2015; 何书跃等, 2017; 闫佳铭, 2017; 孟庆鹏, 2019)。

(2) 斑岩-矽卡岩型铜多金属矿: 与该类型矿床形成有关的花岗岩类岩体就位时代变化范围也很大,

为 435~370 Ma(Zhong et al., 2021b)。尽管该地区矽卡岩型钨锡矿床集中出现在志留纪—泥盆纪已经成为公认的事实, 也有大量年代学证据, 但是对斑岩-矽卡岩铜铁多金属矿床的直接成矿年龄报道很少。需要指出的是, 王新雨等(2023)获得来自牛苦头铅锌矿石的黄铁矿 Re-Os 年龄为 359.2±6.3 Ma(表 1), 为晚泥盆世, 但由于该年龄对应的 MSWD 过高(45), 因此该年龄可能并非真实的成矿年龄, 牛苦头矿床实际年龄可能在早—中泥盆世。空间上, 志留纪—泥盆纪斑岩-矽卡岩型铜多金属矿主要分布在东昆仑成矿带西段的祁漫塔格地区(Zhong et al., 2021b)。铜矿成矿强度较大, 其中西段形成了卡尔却卡、牛苦头等大中型矿床, 东段则分布有哈日扎中型矿床(图 2; 表 1), 铜资源量约占青海省铜资源量的 30%(潘彤等, 2025)。该类型矿以铜矿为主, 矿化较复杂, 共伴生大量的铅锌银金矿。

(3) 碱性岩-碳酸岩型铌矿: 志留纪—泥盆纪碱性岩-碳酸岩型铌矿目前仅在东昆仑成矿带中部的大格勒地区有发现, 含矿碳酸岩就位时代为 382 Ma(王秉璋等, 2024; 王春涛等, 2024)。区内铌矿成矿强度最大, 但目前仅发现了大格勒大型铌矿床(图 2、表 1), 铌资源量约占青海省资源量的 90%(王泰山等, 2024)。该类型矿床的矿化较单一, 共伴生稀有稀土元素矿。

3.2 矿床地质特征

关于东昆仑志留纪—泥盆纪主要矿床的地质特征, 前人已经进行了大量的研究, 本文主要以夏日哈木、卡而却卡和大格勒矿床为例, 介绍该地区岩浆熔离型铜镍钴矿、斑岩-矽卡岩型多金属矿和碱性岩-碳酸盐型铌矿特征。

夏日哈木铜镍钴硫化物矿床主要产于 I 号岩体, 矿体长 1680 m, 最大延伸 940 m, 厚度 1.84~295.13 m, 平均厚度 84.31 m, Ni 平均品位 0.68×10^{-2} , Cu 平均品位 0.163×10^{-2} , Co 平均品位 0.024×10^{-2} , 成岩—成矿时代为晚志留世—早泥盆世(表 1)。大量学者对夏日哈木开展了研究(李世金等, 2012; 奥琮等, 2014; 杜玮等, 2014; 王冠等, 2014; 李良等, 2022), 从目前的研究结果看, 夏日哈木成矿岩体不是层状岩体, 而是期间历经多次岩浆脉动式侵位形成的基性—超基性杂岩体。岩浆演化过程中在岩浆房已经发生熔离及结晶分异作用, 岩浆呈脉动式侵位至少有 3 次, 最早一次在 423 Ma 左右, 以不含矿或极弱矿化的玄武质熔浆为主侵位, 形成辉长岩, 也

存在弱含矿或中等矿化的辉石岩侵位;第二次岩浆侵位为主成矿期,富含Ni、Co、Cu矿质的橄榄质熔浆在410 Ma左右形成了富矿橄榄辉岩-辉橄榄岩-橄榄岩岩石组合;最后,在岩浆演化末期,形成了393~382 Ma不含矿化的细粒闪长岩、闪长玢岩。

卡尔却卡矿床分为A、B、C、D四个区,矿化类型有所不同。除A区产于二长花岗斑岩(地表受构造破碎带控制),成矿类型为斑岩型外,其他矿体主要产于中酸性侵入岩与奥陶系—志留系滩间山群外接触带的矽卡岩中,成矿类型属于矽卡岩型。铜矿主要分布在B区,其次为A区(丰成友等,2012)。目前,研究显示,至少在B区存在志留纪—泥盆纪铜多金属成矿事件。牛苦头和哈日扎也被证实存在志留纪—泥盆纪斑岩-矽卡岩铜多金属成矿作用。3个矿床志留纪—泥盆纪成矿岩体主要为具有(似)斑状结构的花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩。然而,与卡尔却卡矿床类似,牛苦头和哈日扎矿床志留纪—泥盆纪金属矿化范围还有待进一步研究,志留纪—泥盆纪成矿岩体和三叠纪成矿岩体的成矿能力异同也亟需深入研究。不过,已有证据表明,与三叠纪矿体类似,在这些斑岩-矽卡岩矿床中志留纪—泥盆纪矿体也主要赋存在金水口群、祁漫塔格群等以大理岩为主的地层中,Cu最高品位可达7.57%。

东昆仑大格勒碱性岩-碳酸岩型铌矿矿体产于碱性岩-碳酸岩杂岩体内,目前在杂岩体内圈定了5条铌矿体,矿体延伸长160~1280 m,控制最大斜深800 m,矿体厚度4.3~115.7 m,Nb₂O₅平均品位0.092%~0.156%,伴生P₂O₅平均品位3.8%~5.6%。通过资源量估算,Nb₂O₅推断资源量超过10×10⁴ t,已达大型矿床规模(王涛等,2024)。矿石矿物主要有铌铁矿+磷灰石+磁铁矿,呈浸染状分布,与铁白云石、方解石、橄榄石、斜方辉石、金云母等矿物密切共生。大格勒沟碱性杂岩中含铌辉石岩的形成时代为418 Ma(王春涛等,2024)、碳酸岩和橄榄岩的形成时代分别为382 Ma和418 Ma(王秉璋,2024),而富铌橄榄岩边部的碳酸岩由晚阶段侵位的富CO₂的深部流体结晶分异而成(王泰山等,2024)。

3.3 地球物理特征

本文收集了东昆仑造山带的地球物理勘探资料,目的在于揭示发育志留纪—泥盆纪成矿事件矿床的地球物理特征。综合重力异常、航磁异常等地球物理特征,发现东昆仑造山带矿床分布与区域地

球物理特征具有很好的对应关系。

(1)布格重力异常特征

东昆仑1:100万布格重力异常总体显示为较大的负值(图3),重力场表现为重力低,反映了该地区巨厚的地壳结构,异常等值线总体呈北西向、北西西向,与区域构造线方向基本一致(何书跃等,2023)。重力异常显示,东昆仑重力值在-470×10⁻⁵~-430×10⁻⁵ m/s²间由南至北呈较陡梯度变化,并在冰沟南-夏日哈木一大格勒-浪木日南形成一明显的长达1000 km的线型条带状-460×10⁻⁵~-470×10⁻⁵ m/s²陡倾重力梯度带;在东经93°和98°附近显示较明显的北东走向,重力场值在-510×10⁻⁵~-430×10⁻⁵ m/s²之间变化(何书跃等,2023)。

大型—超大型铜镍钴铌矿床(如夏日哈木岩浆熔离型铜镍钴矿和大格勒碱性岩-碳酸岩型铌矿)布格重力场表现为中等重力,在北西西向的重力异常梯级带上,重力场值在-460×10⁻⁵~-470×10⁻⁵ m/s²之间变化,小型铜镍矿床(冰沟南、石头坑德)在近东西向的重力异常梯级带上,重力场值约为-465×10⁻⁵ m/s²;野马泉、牛苦头在近东西向的重力异常梯级带上,重力场值在-450×10⁻⁵~-455×10⁻⁵ m/s²之间变化,哈日扎和浪木日的重力场值基本一致,推测所处构造环境也基本一致;卡尔却卡位于昆中南部一带,在近东西向的重力异常梯级带上,重力场值约为-530×10⁻⁵ m/s²,表现为区内最厚地壳(图3)。

(2)航磁异常特征

夏日哈木、浪木日、石头坑德、冰沟南、卡尔却卡、牛苦头、大格勒、哈日扎等矿床均位于串珠状、条带状分布的正异常区内或边部,以北西—南东向展布为主(局部近南北向展布)(图4)。其中,卡尔却卡矿床磁异常强度在-50~0 nT,其余矿床磁异常强度均在0~200 nT之间变化。

(3)莫霍面结构特征

东昆仑地区莫霍面总体特征为南深北浅,西深东浅(图5)。在缝合带附近莫霍面出现错断现象,断距可达10 km以上;在块体内部具有起伏不平的特点(何书跃等,2023)。

在已发现的志留纪—泥盆纪矿床中,卡尔却卡莫霍面深度最大达68 km左右,夏日哈木和大格勒莫霍面深度最浅约为63 km,野马泉、牛苦头、群力的莫霍面深度约为64 km,上地幔顶部的速度为7.9 km/s。同样,根据莫霍面等深形态推断,在东经

93°和98°附近显示较明显的北东走向,等深曲线表现为明显的平缓带,莫霍面深度在62~63 km(东经93°)之间和65~66 km(东经98°)之间变化。

综上可以看出,东昆仑志留纪—泥盆纪铜镍铌钴矿床从南至北重力值有逐渐变高的趋势,可能意味着结晶基底向北逐步抬升,暗示地幔物质逐步增

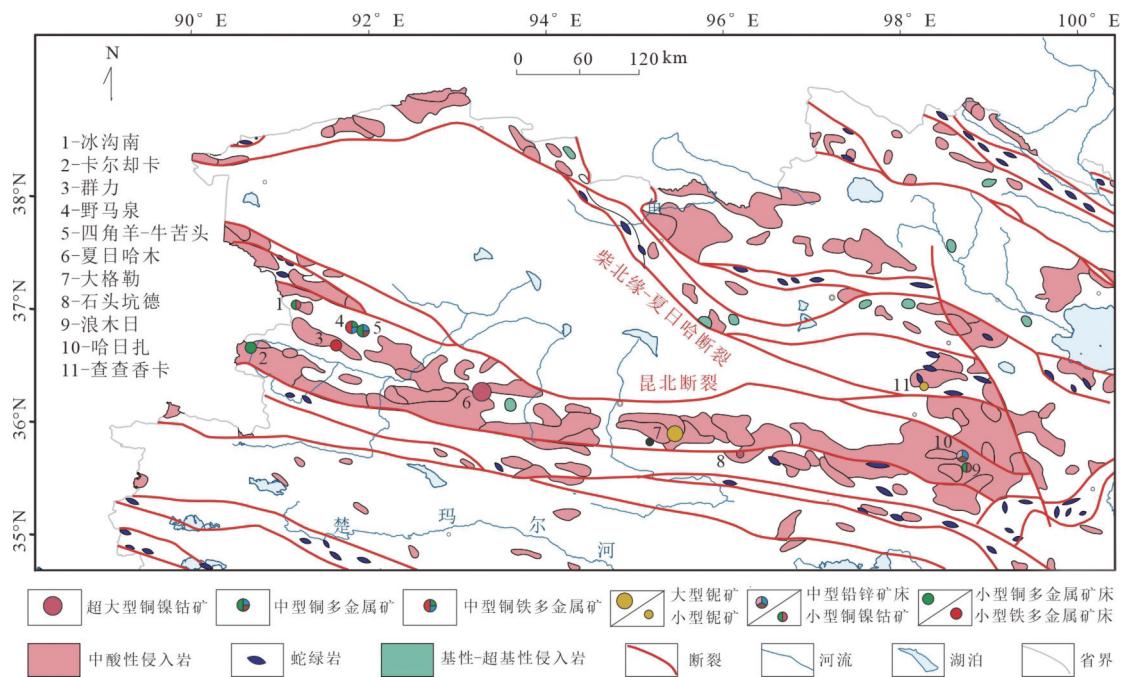


图2 东昆仑青海段内岩浆岩和主要矿床类型分布图(据何书跃等,2023)

Fig. 2 Distribution of East Kunlun intrusive rocks and major mineral deposits located in the Qinghai Province, the East Kunlun Orogenic Belt

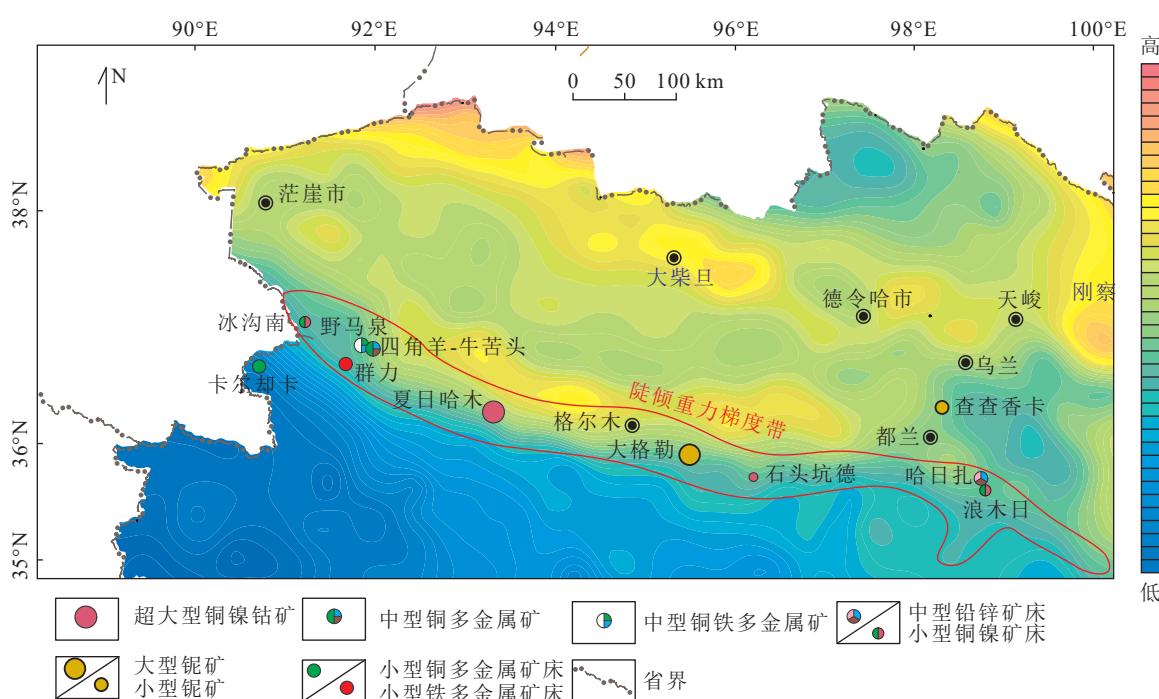


图3 东昆仑青海段内布格重力异常图(据何书跃等,2023)

Fig. 3 Bugge gravity anomaly map of the East Kunlun located in the Qinghai Province, the East Kunlun Orogenic Belt

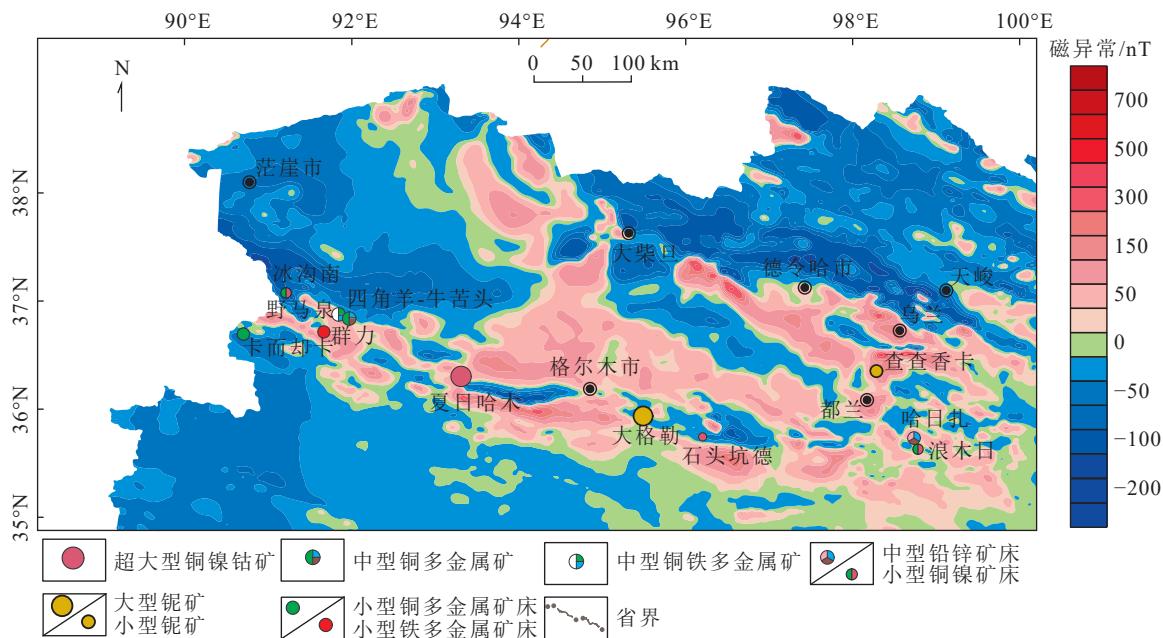


图 4 东昆仑青海段内航磁异常图(据何书跃等, 2023)

Fig. 4 Aeromagnetic anomaly map of the East Kunlun located in the Qinghai Province

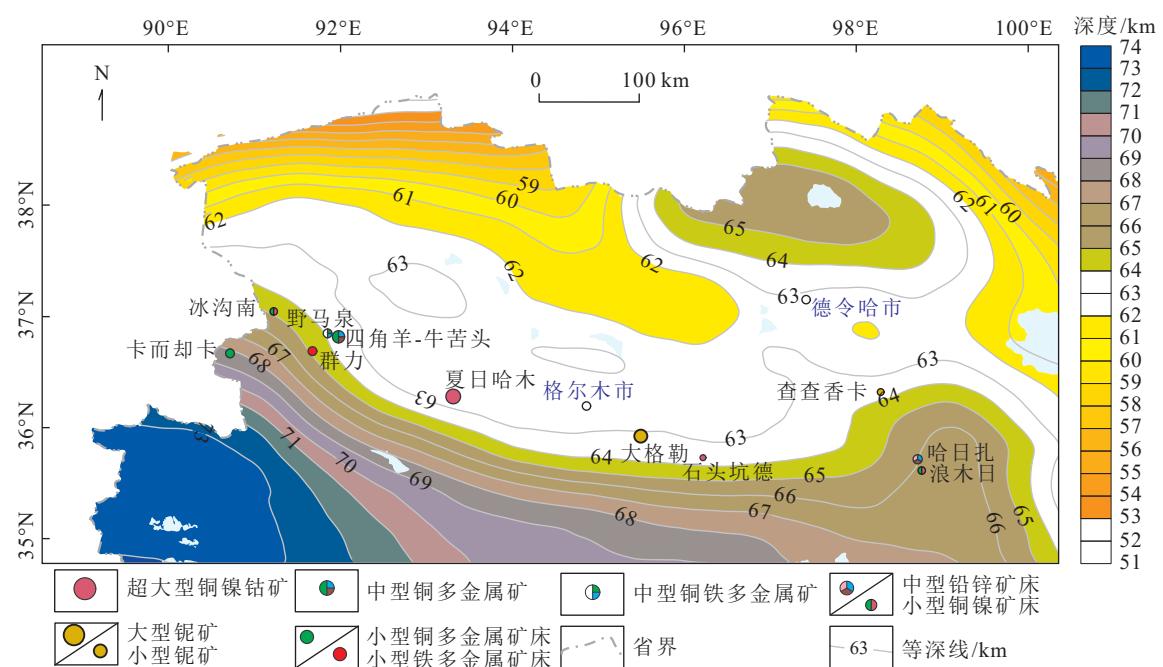


图 5 东昆仑青海段内莫霍面等深图(据何书跃等, 2023)

Fig. 5 Moho isophote map of the East Kunlun located in the Qinghai Province

多, 铜矿成矿能力得到增强, 但主体受控于冰沟南-夏日哈木-大格勒-浪木日南重力梯度带; 航磁异常带总体呈条带状或串珠状连续展布, 并与重力梯度带大部分重合, 在东经 93° 和 98° 附近显示较明显的北东走向, 磁异常值在 50~300 nT 之间变化, 推测为柴达木微地块被撕裂的部位, 结晶基底沿北东向被抬升,

有利含矿幔源岩浆上涌交代地壳富集成矿, 并受 63~64 km 的北西西向莫霍面等深带控制。

3.4 成矿物质来源

由于志留纪—泥盆纪发育的 3 种主要矿床类型均与岩浆岩具有密切的成因联系, 并且无论对于斑岩-矽卡岩矿床、岩浆熔离型铜镍硫化物矿床还是碱性

岩-碳酸岩型铌矿床,岩浆均是成矿物质的主要来源,因此志留纪—泥盆纪成矿岩体的Sr-Nd同位素特征在一定程度上能够指示3种矿床类型的成矿物质来源。

Chen et al. (2018) 报道野马泉矽卡岩铁铜多金属矿床早泥盆世成矿二长花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-0.7 \sim -0.1$ (均值为 -0.5), 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70295 \sim 0.70663$ (均值为 0.70851); 白干湖矽卡岩钨锡矿床的成矿岩浆则具有明显富集的Sr-Nd同位素特征, 其中早泥盆世成矿二长花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-8.1 \sim -4.3$ (均值为 -5.1), 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70708 \sim 0.71023$ (均值为 0.70851) (Zheng et al., 2018), 这一同位素特征显著区别于野马泉矽卡岩矿床。夏日哈木志留纪—泥盆纪成矿镁铁质-超镁铁质岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于野马泉和白干湖矿床成矿岩体之间, 分别为 $-4.0 \sim -0.7$ (均值为 -2.3) 和 $0.703117 \sim 0.710932$ (均值为 0.70780) (Peng et al., 2016), 而同属岩浆熔离型铜镍矿床的冰沟南晚泥盆世成矿辉石岩显示出更亏损的同位素特征, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+2.4 \sim +3.8$, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70575 \sim 0.71046$ (张照伟等, 2017)。大格勒矿床的3类成矿岩体(橄榄岩、辉石岩和碳酸岩)具有类似的同位素特征, 其中 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-1.1 \sim -0.3$, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.70372 \sim 0.70467$ (李积清等, 2024; 王春涛等, 2024; 王泰山等, 2024)。

在Sr-Nd同位素图解上,可以更清楚地看出矽卡岩钨锡矿床比其他矿床类型具有更亏损的同位素特征。另外,无论对于斑岩-矽卡岩矿床,还是对于岩浆矿床,目前获得的数据显示成矿岩体和非成矿岩体的同位素组成并无明显差异(图6)。为进一步约束志留纪—泥盆纪岩浆源区特征,在Sr-Nd同位素图解上绘制了由亏损软流圈地幔(金沙江大洋中脊玄武岩)和中元古代陆壳物质(金水口花岗岩)作为2个岩浆端元的混合曲线。可以看出,所有志留纪—泥盆纪岩体均落到了拟合曲线附近,证明这些岩浆岩均为混合成因。对于白干湖矽卡岩钨锡矿田的成矿岩浆,亏损地幔贡献了70%~80%,陆壳物质贡献了20%~30%。夏日哈木矿床的成矿镁铁质-超镁铁质岩浆中,幔源组分比例进一步增加,为80%~90%,而野马泉和大格勒类似,幔源组分比例占90%左右。亏损地幔端元对冰沟南矿床的形成贡献最大,占比90%~95%。

综上可知,3种类型矿床的成矿岩浆在演化过程中发生了广泛的壳幔相互作用,这与古特提斯造山

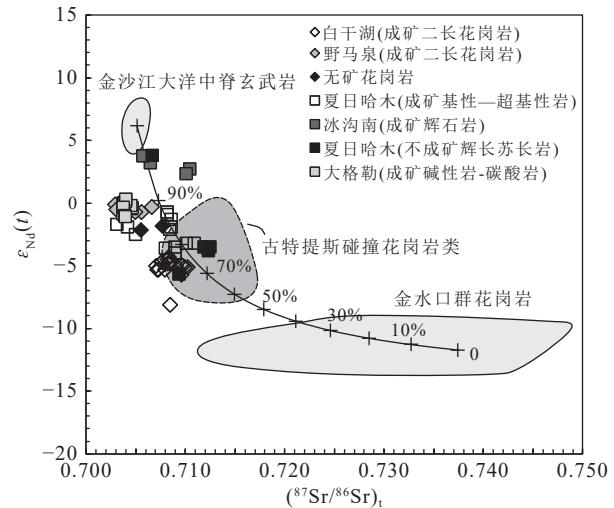


图6 东昆仑地区志留纪—泥盆纪岩浆岩全岩Sr-Nd同位素图解(底图据Zhong et al., 2021b修改;数据来源:白干湖据Zheng et al., 2018;野马泉和无矿花岗岩据Chen et al., 2018;夏日哈木成矿岩体据Peng et al., 2016;夏日哈木不成矿岩体据Zhang et al., 2018;冰沟南据张照伟等, 2017;大格勒据王春涛等, 2024;王泰山等, 2024;李积清等, 2024)

Fig. 6 Whole-rock Sr-Nd isotopic diagram for Siliurian—Devonian intrusions from the East Kunlun area

阶段类似,后者在碰撞阶段也形成了大量具有混合岩浆源区特征的岩浆岩。大量的研究证实,壳幔相互作用是许多大型多金属矿床得以形成的关键(Fan et al., 2020; Zhou et al., 2022; Yang et al., 2024)。在东昆仑地区,这种广泛存在的壳幔相互作用也造就了志留纪—泥盆纪和三叠纪关键金属成矿大爆发。

4 下一步找矿方向

通过梳理东昆仑地区志留纪—泥盆纪主要矿床类型特征,为该地区下一步找矿指明了方向。总的来说,东昆仑造山带最西端的阿尔金断裂至白干湖断裂部位,是矽卡岩钨锡矿的有利找矿位置,接下来应重点关注地表出露的具有石榴子石等特征矿物的S型花岗岩和形成于伸展背景的A型花岗岩,这2种类型花岗岩均有可能形成矽卡岩钨锡矿化。斑岩-矽卡岩铜铁多金属矿、岩浆熔离型铜镍矿及碱性岩-碳酸岩型铌矿则主要产于昆北和昆中断裂附近,与原特提斯洋俯冲闭合-碰撞后伸展造山和陆块撕裂带关系密切。陆陆碰撞阶段,由于板片断离和后碰撞伸展作用,引发软流圈地幔上涌,带来了大量的成矿物质,并造成区内构造-岩浆事件与关键金属矿成矿作用在时间和空间上高度耦合,在地球物理资料

上表现为 $-460 \times 10^{-5} \sim -470 \times 10^{-5}$ m/s² 的陡倾重力梯度带和北东向航磁异常带, 沿冰沟南—夏日哈木—大格勒—浪木日南呈线型条带状分布, 延伸约 1000 km(见图 3 红色曲线所指区域)。因此, 下一步找矿工作应聚焦陆—陆碰撞带中幔源岩浆发育地段, 也就是碰撞后伸展造山和陆块撕裂带, 该地区是寻找斑岩-矽卡岩铜铁多金属矿、岩浆熔离型铜镍矿, 以及碱性岩-碳酸岩型铌矿等关键金属矿的最有利地段(图 3)。

5 结 论

(1) 东昆仑在志留纪—泥盆纪存在大规模金属成矿作用, 其强度和矿化范围可能与三叠纪成矿作用相媲美。

(2) 志留纪—泥盆纪主要发育 3 种矿床类型: 与基性—超基性岩有关的岩浆熔离型铜镍矿床, 如夏日哈木、冰沟南等; 与花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩矿床, 如卡尔却卡、乌兰乌珠尔、白干湖等; 与碱性岩-碳酸岩有关的碱性岩-碳酸岩型铌矿床, 以大格勒为代表。

(3) 东昆仑志留纪—泥盆纪大规模成矿作用与原特提斯洋的演化密切相关, 金属成矿主要发生在原特提斯洋闭合后的陆-陆碰撞阶段, 由于板片断离和后碰撞伸展作用, 诱发软流圈地幔大规模上涌, 幔源岩浆在上升过程中与陆壳物质发生不同程度的壳幔相互作用, 使岩浆富含成矿元素, 并最终在上地壳就位形成不同的矿床类型。

致谢: 在成文过程中得到中国地质大学(武汉)蒋少涌教授的悉心指导, 两位审稿专家提出详细的修改意见, 在此一并表示感谢。

References

- Ao C, Sun F Y, Li B L, et al. 2014. Geochemistry, zircon U-Pb dating and geological significance of diorite porphyrite in Xiarihamu deposit, Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai[J]. Northwestern Geology, 47(1): 96–106 (in Chinese with English abstract).
- Chen J, Wang B, Lu H, et al. 2018. Geochronology and geochemistry of Early Devonian intrusions in the Qimantagh area, Northwest China: evidence for post-collisional slab break-off[J]. International Geology Review, 60(4): 479–495.
- Dong Y, He D, Sun S, et al. 2018. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 231–261.
- Du W, Ling J L, Zhou W, et al. 2014. Geological characteristics and genesis of Xiarihamu nickel deposit in East Kunlun[J]. *Mineral Deposits*, 33(4): 713–726 (in Chinese with English abstract).
- Fan J J, Wang Q, Li J, et al. 2020. Molybdenum and boron isotopic compositions of porphyry Cu mineralization-related adakitic rocks in central-eastern China: New insights into their petrogenesis and crust-mantle interaction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12): e2020JB020474.
- Fang J, Chen H, Zhang L, et al. 2015. Ore genesis of the Weibao lead-zinc district, Eastern Kunlun Orogen, China: Constraints from ore geology, fluid inclusion and isotope geochemistry[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 104: 1209–1233.
- Feng C, Wang S, Li G C, et al. 2012. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantagh area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenetic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665–678.
- Gao Y, Hattori K, Bagas L, et al. 2023. Origin of Silurian granite in the Baiganhu field, Eastern Kunlun Terrane, NW China: Implications for the tectonic setting of Sn-W mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*: 105749.
- Gao Y B, Li W Y, Qian B, et al. 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1647–1665 (in Chinese with English abstract).
- Guo G H, Zhong S H, Li S Z, et al. 2023. Constructing Discrimination Diagrams for Granite Mineralization Potential by Using Machine Learning and Zircon Trace Elements: Example from the Qimantagh, East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 56(6): 57–70 (in Chinese with English abstract).
- Guo X Z, Jia Q Z, Li J C, et al. 2019. The forming age and geochemistry characteristics of the granodiorites in Harizha, East Kunlun and its tectonic significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(2): 286–300.
- He S Y, Lin G, Zhong S H, et al. 2023. Geological Characteristics and Related Mineralization of “Qinghai Gold Belt” Formed by Orogeny[J]. *Northwestern Geology*, 56(6): 1–16 (in Chinese with English abstract).
- He S Y, Sun F F, Li Y P, et al. 2017. Geochemical and geochronological significance of the Binggounan gabbro in the Qiman Tage region, Qinghai province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(4): 582–592 (in Chinese with English abstract).
- Huang Y, Zhong S, Li S, et al. 2024. Effects of accessory mineral inclusions and signal acquisition time on zircon U-Pb ages and trace element analysis results[J]. *Earth Science Frontiers*, 32(1): 388–400 (in Chinese with English abstract).
- Jia L H, Mao J W, Li B L, et al. 2021. Geochronology and petrogenesis of the Late Silurian Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion[J]. NW China: Implications for the tectonic setting and magmatic Ni-Cu mineralization in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *International Geology Review*, 63(5): 549–570.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, et al. 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: 224–240.
- Li H P, Liu J C, Zhang X Q, et al. 2011. Characteristics of magmatic rocks from the Sijiaoyang Fe–polymetallic ore district in the southern margin of Qaidam, Qinghai Province and their metallogenic significance[J]. *Geology and Exploration*, 47(6): 1009–1017 (in Chinese with English abstract).
- Li H, Jiang S, Li S, et al. 2023. Geological characteristics, ore genetic mechanism and exploration indicators of magmatic nickel–cobalt deposits in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(4): 1041–1060 (in Chinese with English abstract).
- Li J, Wang T, Wang B, et al. 2024. Geochemistry, and Sr–Nd Isotopic Characteristics of the Niobium Rich Peridotite in the Dagele Area, East Kunlun[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 48(1): 114–124 (in Chinese with English abstract).
- Li L, Sun F, Li B, et al. 2022. Metallogenic geological conditions and regularity of magmatic Cu–Ni sulfide deposits in the East Kunlun metallogenic Belt[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(5): 1461–1496 (in Chinese with English abstract).
- Li S, Zhao S, Liu X, et al. 2018. Closure of the Proto–Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. *Earth–Science Reviews*, 186: 37–75.
- Liu Y, Genser J, Neubauer F, et al. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages from basement rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China, and their tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 398: 199–224.
- 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.
- Peng B, Sun F, Li B, et al. 2016. The geochemistry and geochronology of the Xiarihamu II mafic–ultramafic complex, Eastern Kunlun, Qinghai Province, China: Implications for the genesis of magmatic Ni–Cu sulfide deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 73(1): 13–28.
- Qian Y, Li H R, Sun F Y, et al. 2020. Zircon U–Pb dating and sulfide Re–Os isotopes of the Xiarihamu Cu–Ni sulfide deposit in Qinghai Province, NW China[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 57(8): 1–21.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, et al. 2016. The Giant Xiarihamu Ni–Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, Northern Tibet Plateau, China[J]. *Economic Geology*, 111(1): 29–55.
- Xia R, Wang C, Qing M, et al. 2015. Zircon U–Pb dating, geochemistry and Sr–Nd–Pb–Hf–O isotopes for the Nan'getan granodiorites and mafic microgranular enclaves in the East Kunlun Orogen: Record of closure of the Paleo–Tethys[J]. *Lithos*, 234/235: 47–60.
- Xiong F H, Ma C Q, Zhang J Y, et al. 2012. The origin of mafic microgranular enclaves and their host granodiorites from East Kunlun, Northern Qinghai–Tibet Plateau: implications for magma mixing during subduction of Paleo–Tethyan lithosphere[J]. *Mineralogy and Petrology*, 104: 211–224.
- Yan J M, Sun F Y, Qian Y, et al. 2020. Geochemistry, geochronology, and Hf–S–Pb isotopes of the Akechukesai IV mafic–ultramafic complex, western China[J]. *Minerals*, 95: 275.
- Yang L Q, Deng J, Zhang L, et al. 2024. Mantle–rooted fluid pathways and world-class gold mineralization in the giant Jiaodong gold province: Insights from integrated deep seismic reflection and tectonics[J]. *Earth–Science Reviews*: 104862.
- Yu M, Dick J M, Feng C, et al. 2020. The tectonic evolution of the East Kunlun Orogen, northern Tibetan Plateau: A critical review with an integrated geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 191: 104168.
- Zhang J, Lei H, Ma C, et al. 2018. Geochemical and thermodynamical modeling of magmatic sources and processes for the Xiarihamu sulfide deposit in the eastern Kunlun Orogen, western China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 190: 345–356.
- Zheng Z, Chen Y J, Deng X H, et al. 2018. Origin of the Bashierxi monzogranite, Qiman Tagh, East Kunlun Orogen, NW China: A magmatic response to the evolution of the Proto–Tethys Ocean[J]. *Lithos*, 296: 181–194.
- Zhong S, Feng C, Seltmann R, et al. 2018. Geochemical contrasts between Late Triassic ore-bearing and barren intrusions in the Weibao Cu–Pb–Zn deposit, East Kunlun Mountains, NW China: Constraints from accessory minerals (zircon and apatite)[J]. *Mineralium Deposita*, 53: 855–870.
- Zhong S, Li S, Feng C, et al. 2021a. Geochronology and geochemistry of mineralized and barren intrusive rocks in the Yemaquan polymetallic skarn deposit, northern Qinghai–Tibet Plateau: A zircon perspective[J]. *Ore Geology Reviews*, 139: 104560.
- Zhong S, Li S, Feng C, et al. 2021b. Porphyry copper and skarn fertility of the northern Qinghai–Tibet Plateau collisional granitoids[J]. *Earth–Science Reviews*, 214: 103524.
- Zhou J, Jin C, Suo Y, et al. 2022. The Yanshanian (Mesozoic) metallogenesis in China linked to crust–mantle interaction in the western Pacific margin: An overview from the Zhejiang Province[J]. *Gondwana Research*, 102: 95–132.

附中文参考文献

- 奥琮,孙丰月,李碧乐,等.2014.青海夏日哈木矿区中泥盆世闪长玢岩锆石U–Pb年代学、地球化学及其地质意义[J].*西北地质*,47(1): 96–106.
- 杜玮,凌锦兰,周伟,等.2014.东昆仑夏日哈木镍矿床地质特征与成因[J].*矿床地质*,33(4): 713–726.
- 丰成友,王松,李国臣,等.2012.青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩:年代学、地球化学及成矿意义[J].*岩石学报*,28(2): 665–678.
- 高永宝,李文渊,钱兵,等.2014.东昆仑野马泉铁矿相关花岗质岩体年代学、地球化学及Hf同位素特征[J].*岩石学报*,30(6): 1647–1665.
- 郭广慧,钟世华,李三忠,等.2023.运用机器学习和锆石微量元素构建花岗岩成矿潜力判别图解:以东昆仑祁漫塔格为例[J].*西北地质*,56(6): 57–70.
- 国显正,贾群子,李金超,等.2019.东昆仑哈日扎花岗闪长岩形成时代、地球化学特征及其构造意义[J].*地质力学学报*,25(2): 286–300.
- 何书跃,林贵,钟世华,等.2023.造山作用孕育“青海金腰带”[J].*西北地质*,56(6): 1–16.

- 何书跃, 孙非非, 李云平, 等. 2017. 青海祁漫塔格地区冰沟南辉长岩岩石地球化学特征及年代学意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(4): 582–592.
- 黄宇, 钟世华, 李三忠, 等. 2025. 副矿物包裹体和信号采集时间对锆石 U-Pb 年龄和微量元素分析结果的影响 [J/OL]. 地学前缘, 32(1): 388–400.
- 李洪普, 刘具仓, 张喜全, 等. 2011. 青海省柴南缘四角羊铁多金属矿区岩浆岩特征及其成矿意义 [J]. 地质与勘探, 47(6): 1009–1017.
- 李华, 蒋少涌, 李世金, 等. 2023. 东昆仑造山带岩浆型镍钴矿床地质特征、成因机制与找矿标志分析 [J]. 岩石学报, 39(4): 1041–1060.
- 李积清, 王涛, 王秉璋, 等. 2024. 东昆仑大格勒地区富铌橄榄岩矿物学、地球化学及 Sr-Nd 同位素特征 [J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 114–124.
- 李良, 孙丰月, 李世金, 等. 2022. 东昆仑成矿带岩浆铜镍硫化物矿床成矿地质条件与成矿规律 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 52(5): 1461–1496.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 等. 2012. 小岩体成大矿理论指导与实践——青海东昆仑夏日哈木铜镍矿找矿突破的启示及意义 [J]. 西北地质, 45(4): 185–191.
- 李五福, 王强, 王秉璋, 等. 2024. 东昆仑大格勒地区碱性杂岩体中辉石角闪石岩的年代学、地球化学特征及地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 144–167.
- 刘嘉情, 钟世华, 李三忠, 等. 2023. 基于机器学习和全岩成分识别东昆仑祁漫塔格斑岩-矽卡岩矿床成矿岩体和贫矿岩体 [J]. 西北地质, 56(6): 41–56.
- 刘月高, 张江伟, 冯志兴, 等. 2024. 青藏高原东北缘岩浆型铜镍钴硫化物矿床勘查模型与研究进展 [J/OL]. 中国地质: 1–46. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230511.0845.002.html>.
- 陆济璞, 李江, 覃小锋, 等. 2005. 东昆仑祁漫塔格伊涅克阿干花岗岩特征及构造意义 [J]. 沉积与特提斯地质, (4): 46–54.
- 马忠元, 张爱奎, 李军, 等. 2023. 东昆仑哈日扎矿床 V 矿带很多金属矿物赋存状态研究 [J]. 青海大学学报, 41(6): 78–87.
- 孟繁聪, 崔美慧, 贾丽辉, 等. 2015. 东昆仑造山带早古生代的大陆碰撞: 来自榴辉岩原岩性质的证据 [J]. 岩石学报, 31(12): 3581–3594.
- 孟庆鹏. 2019. 青海东昆仑浪木日铜镍矿床地质特征及成因探讨 [D]. 吉林大学硕士学位论文.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景 [J]. 中国地质, 39(6): 1437–1471.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长 [J]. 高校地质学报, (3): 403–414.
- 南卡俄吾. 2021. 青海东昆仑构造带志留—泥盆纪侵入岩浆活动及含矿性研究 [D]. 长安大学博士学位论文.
- 潘彤, 王福德, 薛万文, 等. 2025. 青海省成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地地质志·青海卷》研编 [J]. 地球学报, (1): 159–171.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 等. 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.
- 宋忠宝, 张雨莲, 贾群子, 等. 2014. 东昆仑祁漫塔格地区野马泉深部的华力西期花岗闪长岩 U-Pb 年龄及其意义 [J]. 现代地质, 28(6): 1161–1169.
- 王秉璋, 李积清, 付长奎, 等. 2022. 东昆仑布尔汗布达早古生代岩浆弧的形成与演化初探 [J]. 地球科学, 47(4): 1253–1270.
- 王秉璋, 李五福, 金婷婷, 等. 2024. 东昆仑大格勒稀有金属矿化碳酸岩和橄榄岩斜锆石 U-Pb 年代学研究和找矿意义 [J]. 地球科学, 49(4): 1245–1260.
- 王春涛, 李五福, 王秉璋, 等. 2024. 东昆仑大格勒地区碱性杂岩体中辉石岩的年代学、地球化学、Sr-Nd 同位素特征及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 125–147.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 等. 2014. 东昆仑夏日哈木铜镍矿镁铁质—超镁铁质岩体岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义 [J]. 地学前缘, 21(6): 381–401.
- 王强, 李五福, 王秉璋, 等. 2024. 与碱性岩-碳酸岩杂岩共生的铌-稀土成矿作用——兼论东昆仑大格勒铌-稀土矿床中的碱性岩-碳酸岩杂岩成因 [J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 1–37.
- 王泰山, 李五福, 王秉璋, 等. 2024. 东昆仑大格勒富铌碳酸岩地球化学特征及成因初探 [J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 97–113.
- 王涛, 王秉璋, 袁博武, 等. 2024. 东昆仑大格勒地区碱性岩-碳酸岩型铌矿勘查进展及找矿前景 [J]. 大地构造与成矿学, 48(1): 50–60.
- 王新雨, 王书来, 吴锦荣, 等. 2023. 青海省牛苦头铅锌矿床成矿时代研究: 来自成矿岩体年代学和黄铁矿 Re-Os 地球化学证据 [J]. 西北地质, 56(6): 71–81.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 2020. 特提斯地球动力学 [J]. 岩石学报, 36(6): 1627–1674.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等. 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用 [J]. 岩石学报, 29(6): 1847–1860.
- 姚磊, 吕志成, 赵财胜, 等. 2016. 青海祁漫塔格地区牛苦头矿床和卡却卡矿床 B 区花岗质岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄——对泥盆纪成岩成矿作用的指示 [J]. 地质通报, 35(7): 1158–1169.
- 闫佳铭. 2017. 青海东昆仑阿克楚克塞铜镍矿床地质特征及成因探讨 [D]. 吉林大学硕士学位论文.
- 张勇, 刘国燕, 喻忠鸿, 等. 2016. 东昆仑喀雅克登锌多金属矿床成因探讨 [J]. 矿产勘查, 7(2): 267–274.
- 张勇, 李泽峰, 刘国燕, 等. 2015. 东昆仑喀雅克登中泥盆世二辉橄榄岩的发现及找矿意义 [J]. 矿产勘查, 6(4): 405–412.
- 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 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.
- 钟世华. 2018. 新疆维宝铜铅锌矿床成因研究 [D]. 中国地质科学院博士学位论文.
- 钟世华, 丰成友, 李大新, 等. 2017a. 新疆维宝矽卡岩铜铅锌矿床维西矿段矿物学特征 [J]. 地质学报, 91(5): 1066–1082.
- 钟世华, 丰成友, 任雅琼, 等. 2017b. 新疆维宝矽卡岩铜铅锌矿床维西矿段成矿流体性质和来源 [J]. 矿床地质, 36(2): 483–500.
- 钟世华, 丰成友, 李大新, 等. 2017c. 新疆维宝多金属矿区辉绿岩脉 SIMS 年代学和地球化学 [J]. 地质学报, 91(4): 762–775.
- 周建厚, 丰成友, 李大新, 等. 2015. 东昆仑白干湖钨锡矿床成矿岩体岩石学、年代学和地球化学 [J]. 岩石学报, 31(8): 2277–2293.