

doi: 10.12029/gc20230128003

刘月高, 张江伟, 冯志兴, 杨顺龙, 王义忠, 李积清, 赵志逸, 王治安, 李树雷, 陈正国, 王厚方. 2025. 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]. 中国地质, 52(3): 972–1001.

Liu Yuegao, Zhang Jiangwei, Feng Zhixing, Yang Shunlong, Wang Yizhong, Li Jiqing, Zhao Zhiyi, Wang Zhian, Li Shulei, Chen Zhengguo, Wang Houfang. 2025. Exploration and research progress of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in the north-eastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 52(3): 972–1001(in Chinese with English abstract).

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

刘月高¹, 张江伟², 冯志兴³, 杨顺龙⁴, 王义忠⁵, 李积清⁶, 赵志逸⁶, 王治安⁷,
李树雷⁸, 陈正国⁵, 王厚方⁹

(1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南 三亚 572000; 2. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 西部矿业集团有限公司, 青海 西宁 810001; 4. 青海省有色第三地质勘查院, 青海 西宁 811601; 5. 中陕核工业集团有限公司, 陕西 西安 710100; 6. 青海省地质调查院, 青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012; 7. 青海省第五地质矿产勘查院, 青海 西宁 810028; 8. 咸阳西北有色七一二总队有限公司, 陕西 咸阳 712000; 9. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第三地质大队, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:【研究目的】为提升我国 Cu-Ni-Co 资源供应安全,有必要梳理青藏高原东北缘东昆仑造山带的岩浆型铜镍钴硫化物矿床的成矿规律与找矿标志。【研究方法】为建立矿床勘查模型,本文剖析了代表性岩浆铜镍钴硫化物矿床的地质特征与成因,并系统总结了东昆仑地区晚奥陶世—早志留世、中晚志留世—早中泥盆世、早石炭世、中二叠世—早三叠世、中—晚三叠世 5 期基性—超基性侵入杂岩体的矿物学、岩石学、年代学、地球化学和地球物理特征。【研究结果】东昆仑在显生宙存在 2 期岛弧基性或基性—超基性岩体: (1)原特提斯洋向北俯冲背景下形成的晚奥陶世—早志留世的基性岩体; (2)中二叠世—早三叠世的古特提斯洋俯冲形成的基性—超基性岩体; 与之对应,存在 2 期碰撞后伸展基性—超基性岩体,分别为中晚志留世—早中泥盆世和中晚三叠世。辉石岩地幔可能是东昆仑部分岩浆型镍矿床的源区,板块断离—折返模型可较好解释岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿年龄与高压—超高压退变质年龄一致的现象。针对幔源岩浆硫化物饱和机制,大体识别了有利地壳混染与有害地壳混染的种类,并深入分析结晶分异对硫化物饱和影响,提出了矿体优选赋存的位置,对比了成矿岩体与非成矿岩体在构造、岩石类型、矿物学、时代、蚀变、围岩种类代表性差异。【结论】建立了东昆仑造山带岩浆铜镍钴硫化物矿床的地质—地球化学—地球物理综合信息勘查模型。

关键词: 岩浆型铜镍钴硫化物矿床; 榴辉岩; 超高压变质; 原特提斯; 古特提斯; 关键金属; 矿产勘查工程; 东昆仑造山带

创 新 点: (1)基于直接服务勘查一线的角度,总结了东昆仑造山带多期基性—超基性岩的构造背景及其成矿潜力; (2)总结了非矿与成矿基性超基性岩体的代表性差异,特别是归纳了镍矿体优选赋存的位置与岩相的关系,建立了铜镍钴硫化物矿床的综合信息勘查模型。

中图分类号: P618.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0972-30

收稿日期: 2023-01-28; 改回日期: 2023-05-09

基金项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目 (2021CXLH0027) 和国家重点研发计划 (2019YFC0605201) 联合资助。

作者简介: 刘月高,男,1987 年生,副研究员,从事实验岩石学、岩浆型铜镍钴铂族矿床定位预测、海陆矿产对比与预测工作; E-mail: liuyg@idsse.ac.cn。

通信作者: 张江伟,男,1984 年生,高级工程师,从事大地构造学、矿产地质调查工作; E-mail: 63290005@qq.com。

Exploration and research progress of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in the north–eastern margin of the Qinghai–Tibetan Plateau

LIU Yuegao¹, ZHANG Jiangwei², FENG Zhixing³, YANG Shunlong⁴, WANG Yizhong⁵, LI Jiqing⁶, ZHAO Zhiyi⁶, WANG Zhian⁷, LI Shulei⁸, CHEN Zhengguo⁵, WANG Houfang⁹

(1. *Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, Hainan, China*; 2. *Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China*; 3. *Western Mining Group Co., Ltd., Xining 810001, Qinghai, China*; 4. *The third Nonferrous Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 811601, Qinghai, China*; 5. *Sino Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710100, Shaanxi, China*; 6. *Qinghai Geological Survey Institute, Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources in the Northern Part of Qinghai Tibet Plateau, Xining 810012, Qinghai, China*; 7. *The Fifth Geological and Mineral Survey Institute of Qinghai Province, Xining 810028, Qinghai, China*; 8. *Xianyang 712 General Co., Ltd. of Northwest Nonferrous Geological Prospecting Bureau, Xianyang 712000, Shaanxi, China*; 9. *The Third Geological Branch, Xinjiang Geological and Mineral Bureau, Kuerle 841000, Xinjiang, China*)

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

[Objective] To improve the supply security of Cu–Ni–Co resources in China, it is necessary to sort out the mineralization regularity and prospecting indicators of the magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposit in the Phanerozoic in the Eastern Kunlun orogenic belt on the northern margin of the Qinghai–Tibet Plateau. **[Methods]** To establish the exploration model, this paper analyzed the geological characteristics and genesis of representative magmatic copper–nickel sulfide deposits, and the geological, geochronology, geochemistry, and geophysical characteristics of five stages mafic–ultramafic complexes including the Late Ordovician–Early Silurian, the Middle Silurian–Middle Devonian, the Early Carboniferous, the Middle Permian–Early Triassic, and the Middle–Late Triassic are summarized. **[Results]** There are two stages of island arc mafic or basic–ultramafic rocks in the East Kunlun during the Phanerozoic: (1) Mafic rocks formed in the Late Ordovician–Early Silurian during the northward subduction of the Proto–Tethys Ocean; (2) Mafic–ultramafic rocks formed due to the subduction of the Paleo–Tethys Ocean in the Middle Permian–Early Triassic. Correspondingly, there are two stages of post–collision extensional mafic–ultramafic rocks: From Middle–Late Silurian to Early–Middle Devonian and Middle–Late Triassic. The pyroxenite mantle may be the source of some magmatic nickel deposits in the East Kunlun, and the plate break–off model can explain the phenomenon that the mineralization age of magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits is nearly same to the high–pressure–ultra–high–pressure retrograde metamorphism age. Regarding the sulfide saturation mechanism of mantle–derived magma, the types of favorable crustal contamination and harmful crustal contamination were roughly identified, and the influence of crystal differentiation on sulfide saturation was analyzed. The preferred location of ore bodies was proposed, and the representative differences between ore–forming and non–ore–forming rock bodies in geological structure, rock type, mineralogy, age, alteration type, and surrounding rock types were compared. **[Conclusions]** Finally, this paper established a geological–geochemical–geophysical comprehensive information exploration model for magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits in the East Kunlun orogenic belt.

Key words: magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposit; eclogite; ultra–high–pressure metamorphism; Proto–Tethys; Paleo–Tethys; critical metals; mineral exploration engineering; Eastern Kunlun orogenic belt

Highlights: (1) Based on the pragmatic spirit and the perspective of directly serving the exploration front line, the geological background and mineralization potential of multistages mafic–ultramafic intrusions in the East Kunlun orogenic belt are summarized; (2) The representative differences between no–ore and ore–forming mafic–ultramafic intrusions are summarized, especially the relationship between the optimal location of nickel ore bodies and lithofacies are described. And a comprehensive information exploration model for magmatic copper–nickel–cobalt sulfide deposits is established.

About the first author: LIU Yuegao, male, born in 1987, associate researcher, mainly engaged in the study of the location prediction of ore deposit, high T – P experiments (experimental petrology), and comparison and prediction of sea and land minerals resources; E–mail: liuyg@idsse.ac.cn.

About the corresponding author: ZHANG Jiangwei, male, born in 1984, senior engineer, mainly engaged in the study of the location prediction of ore deposit; E-mail: 63290005@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of Sanya Yazhou Bay Science and Technology City of Hainan Province (No.2021CXLH0027) and National Key Research and Development Project (No.2019YFC0605201).

1 引 言

青藏高原 2011 年发现的夏日哈木镍矿床是继 1994 年加拿大 Labrador 地区 Voisey's Bay 矿床发现之后世界范围内又一储量达百万吨级的岩浆型硫化物矿床(李世金等, 2012; Li et al., 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018)。在我国, 夏日哈木矿床是储量仅次于金川的超大型铜镍硫化物矿床; 同时, 夏日哈木也是首次在东昆仑造山带内发现的超大型岩浆铜镍硫化物矿床(图 1)(Li et al., 2015; Song et al., 2016)。露天首采区已探明镍金属资源量 118 万 t, 揭示东昆仑造山带具有巨大的岩浆型铜镍钴矿床勘查潜力。造山带成矿与区域构造演化密切相关(Li et al., 2022), 有必要梳理区域构造演化, 特别是原特提斯洋和古特提斯洋演化与基性—超基性岩体的关系。

东昆仑造山带在显生宙发生过至少五期幔源基性—超基性岩浆活动(表 1): 第一期为晚奥陶世—早志留世原特提斯洋俯冲的构造背景下(刘彬等, 2013; 王冠, 2014); 第二期为中晚志留世—早中泥盆世(朱云海等, 2005; 刘彬等, 2012, 2013; Zhang et al., 2023)碰撞后伸展环境; 第三期为早石炭世(Zhang et al., 2018)裂解环境; 第四期为中二叠世—早三叠世(熊富浩等, 2011; 李玉龙等, 2018; 孔会磊等, 2017, 2018, 2019b, 2021)古特提斯洋俯冲阶段; 第五期为中—晚三叠世(丰成友等, 2012; 罗明非等, 2014; 王亚磊等, 2017; Liu et al., 2019)碰撞后伸展环境(裴先治等, 2018)。

在不同时代的幔源岩浆活动过程中, 形成了大量的基性—超基性岩体。晚奥陶世—早志留世的代表性岩体有胡晓钦岩体(438 Ma)和夏日哈木矿区早期的辉长岩体(447 Ma)(刘彬等, 2013; 王冠, 2014); 中晚志留世—早泥盆世的代表性基性—超基性岩体由西到东依次有: 玉古萨依(孟杰等, 2019; Hu et al., 2023)、阿克楚克塞 I 号岩体(Yan et al., 2019b)、阿克楚克塞 IV 号岩体(Yan et al.,

2020)、冰沟南(何书跃等, 2017)、夏日哈木 I 号岩体(李世金等, 2012; Li et al., 2015; 姜常义等, 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018; Li et al., 2020)、夏日哈木 II 号岩体(Peng et al., 2016; 杜玮等, 2017; 段建华等, 2017)、夏日哈木 IV 号岩体(Li et al., 2020)、尕牙河东沟(Norbu et al., 2020)、石头坑德的部分基性—超基性岩体(周伟, 2016; Zhang et al., 2018; Jia et al., 2021)、浪木日 IV 号岩体(孟庆鹏, 2019)、希望沟含矿辉石橄榄岩体(孔会磊等, 2019a); 尽管大多数学者报道的石头坑德基性—超基性岩体的测年结果为 422~425 Ma(周伟, 2016; Zhang et al., 2018; Jia et al., 2021), 但 Zhang et al. (2018)通过高精度 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年方法获得了橄榄二辉岩的成岩时代为 (334 ± 4) Ma, 且同时代在昆中断裂存在早石炭世的洋中脊玄武岩(袁万明等, 1998), 意味着早石炭世也存在一期幔源岩浆活动; 中二叠世—早三叠世的代表性基性—超基性岩体有: 中二叠世希望沟的辉长岩、橄榄辉长岩和橄榄辉石岩(262~271 Ma)(李玉龙等, 2018; 孔会磊等, 2019b, 2021), 早三叠世加当岩体(孔会磊等, 2018)和白日其利岩体(熊富浩等, 2011); 中—晚三叠世的基性—超基性岩体代表性的有开木琪岩体(Liu et al., 2019; Fan et al., 2023)、小尖山岩体(奥琮等, 2015; 王亚磊等, 2017)、拉陵高里 2 号和拉陵高里 3 号岩体(王亚磊等, 2017)、阿克楚克塞的部分辉长岩(杨锡铭等, 2018)、达拉库岸(夏明哲等, 2018)、石灰沟外滩岩体(罗照华等, 2002)、约格鲁岩体(刘成东等, 2004)、肯德可克岩体(赵财胜等, 2006)。

东昆仑岩浆型铜镍钴矿床及矿化点产于上述岩体中。前人针对于这些岩体的研究主要集中于构造背景与矿床成因, 找矿勘查模式的视角相对缺乏。本文在总结前人研究的基础上, 从地质、地球化学、地球物理方面总结青海东昆仑地区铜镍矿床的勘查研究进展, 提出一些可能对东昆仑地区铜镍钴矿床勘查有一定借鉴意义的找矿标志。

表 1 东昆仑造山带代表性基性—超基性岩体 (不含岩墙) 年龄

Table 1 Age of typical mafic-ultramafic complexes (excluding rock walls) in the Eastern Kunlun Orogenic Belt

岩体	测试对象	时代/Ma	方法	来源
夏日哈木I号	淡色辉长岩	447 ± 1	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb	王冠, 2014
夏日哈木I号	0号勘探线探槽中的辉长岩	439 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	姜常义等, 2015
夏日哈木I号	ZK1905的430 m处的辉长岩	431 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2015
胡晓钦	辉长岩	438 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	刘彬等, 2013
夏日哈木I号	岩体上部条带状辉长岩	394 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	李世金等, 2012
夏日哈木I号	0号勘探线北部辉长苏长岩	406 ± 3	SHRIMP锆石U-Pb	Song et al., 2016
夏日哈木I号	0线勘探线地表的二辉岩	408 ± 3	SHRIMP锆石U-Pb	Song et al., 2016
夏日哈木I号	ZK203的二辉岩	406 ± 3	SHRIMP锆石U-Pb	Song et al., 2016
夏日哈木I号	ZK5E07S-347 m+ ZK1501S-340 m的二辉岩	412 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2015
夏日哈木I号	ZK1309、ZK1307和ZK0E09块状硫化物	408 ± 11	Re-Os同位素等时年龄	Li et al., 2020
夏日哈木I号	辉长岩	423 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2020
夏日哈木I号	超基性岩	423 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2020
夏日哈木I号	ZK5E07S的340~350 m非矿化橄辉岩	413 ± 4	LA-ICP-MS锆石U-Pb	张照伟等, 2015
夏日哈木I号	ZK1109的辉长苏长岩	423 ± 1	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb	王冠等, 2014
夏日哈木I号	ZK1501S的330~340 m非矿化橄辉岩	411 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	张照伟等, 2015
夏日哈木II号	辉长岩	423 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2020
夏日哈木II号	辉长岩	424 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Peng et al., 2016
夏日哈木II号	辉长岩	385 ± 4	LA-ICP-MS锆石U-Pb	段建华等, 2017
夏日哈木II号	辉长岩	430 ± 5	LA-ICP-MS锆石U-Pb	段建华等, 2017
夏日哈木II号	辉长岩	424 ± 5	SHRIMP锆石U-Pb	杜玮等, 2017
夏日哈木IV号	辉长岩	423 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2020
希望沟	含矿辉石橄榄岩	407 ± 5	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孔会磊等, 2019a
冰沟南	辉长岩	427 ± 7	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb	何书跃等, 2017
阿克楚克塞I号	辉长岩	422 ± 10	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Yan et al., 2020
阿克楚克塞IV号	辉长岩	424 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Yan et al., 2019b
水仙南	辉长岩	420 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Yan et al., 2019a
德探沟	辉长岩	413 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Yan et al., 2019a
向阳沟西	辉长岩	399 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Yan et al., 2019a
玛兴大湾	辉长岩	397 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Yan et al., 2019c
尕牙河东沟	单辉橄辉岩	420 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Norbu et al., 2020
玉古萨依	角闪辉长岩	406 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孟杰等, 2019
玉古萨依	角闪辉长岩	405 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Hu et al., 2023
浪木日4号	含矿橄辉辉石岩	439 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孟庆鹏, 2019
浪木日2号	辉石橄榄岩	429 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	田楠, 2022
石头坑德	辉长岩	424 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	周伟, 2016
石头坑德	Zk7201的132 m辉长岩	425 ± 4	SHRIMP锆石U-Pb	Zhang et al., 2018
石头坑德	辉长苏长岩	421 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Jia et al., 2021
石头坑德	橄辉二辉岩	420 ± 6	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Jia et al., 2021
石头坑德	橄辉二辉岩	424 ± 6	SIMS锆石U-Pb	Jia et al., 2021
石头坑德	ZK001橄辉二辉岩	422 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2018
石头坑德	ZK001辉长岩	426 ± 6	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2018
石头坑德	ZK003的橄辉二辉岩	418 ± 9	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Li et al., 2021
石头坑德	ZK4001的38 m橄辉二辉岩	334 ± 4	SHRIMP锆石U-Pb	Zhang et al., 2018
希望沟	橄辉辉长岩	266 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孔会磊等, 2021
希望沟	橄辉辉石岩	262 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孔会磊等, 2019b
希望沟	辉长岩	271 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	李玉龙等, 2018
加当	辉长岩	263 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孔会磊等, 2017
加当	橄辉辉长岩	250 ± 3	LA-ICP-MS锆石U-Pb	孔会磊等, 2018
白日其利	角闪辉长岩	249 ± 4	LA-ICP-MS锆石U-Pb	熊富浩等, 2011
开木琪	二辉岩	221 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Liu et al., 2019
开木琪	辉长岩	222 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	Fan et al., 2023
约格鲁	角闪辉长岩	239 ± 6	SHRIMP锆石U-Pb	刘成东等, 2004
小尖山	辉长岩	228 ± 1	LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb	奥琮等, 2015
阿克楚克塞	辉长岩	219 ± 1	LA-ICP-MS锆石U-Pb	杨锡铭等, 2018
拉陵高里2号	辉长岩	245 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	王亚磊等, 2017
拉陵高里3号	辉长岩	238 ± 4	LA-ICP-MS锆石U-Pb	王亚磊等, 2017
达拉库岸	辉长岩	244 ± 2	LA-ICP-MS锆石U-Pb	夏明哲等, 2018
石灰沟外滩	角闪辉长岩	219 ± 1	角闪石 ³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar坪年龄	罗照华等, 2002
肯德可克	辉长岩	208 ± 2	斜长石 ³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar坪年龄	赵财胜等, 2006

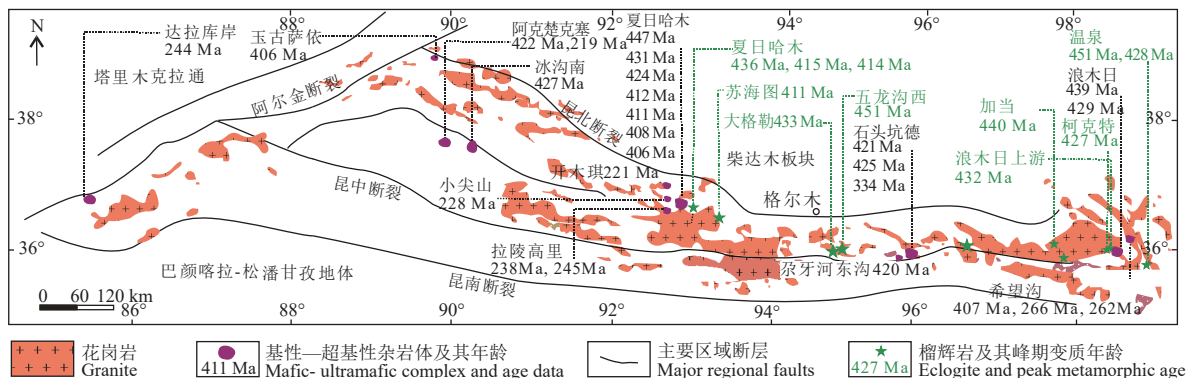


图1 东昆仑显生宙主要岩浆岩和榴辉岩分布图

(底图据校培喜等, 2014 和 Dong et al., 2018 修改; 年龄数据来源请详见表1和表2)

Fig.1 Distribution map of magmatic rocks and eclogites in the Phanerozoic of the Eastern Kunlun Orogenic Belt (modified from Xiao Peixi et al., 2014 and Dong et al., 2018; age data seen in Table 1 and Table 2)

2 代表性矿床

目前东昆仑地区夏日哈木超大型镍钴矿床在开采之中, 石头坑德铜镍矿床处于详查之中, 浪木日镍铂钨矿床和阿克楚克塞铜镍矿床处于普查阶段, 本文选择研究程度高, 特别是剖面岩相分布、期次明确且与矿体关系清晰的夏日哈木和石头坑德进行重点介绍。

2.1 夏日哈木镍钴矿床

夏日哈木岩体由 I 号、II 号、III 号、IV 号、V 号 5 个岩体组成, 其中 I 号赋存超大型镍矿, II 号、IV 号成矿潜力仍在评价中。夏日哈木 I 号岩体的围岩为新元古代地层花岗片麻岩或大理岩(图 2a、b), 围岩中含有稀疏浸染状硫化物。夏日哈木 I 号岩体呈不规则状, 长 1400 m, 宽 900 m, 主体深度在 300~600 m。岩体西部呈隐伏状态, 岩体的南边为新生代沉积。地表岩体中部为方辉橄榄岩、东部为方辉岩和二辉岩, 北部为辉长岩。氧化矿产在二辉岩中, 主要分布在勘探线 L2 与 L5 之间。Li et al. (2015) 和 Song et al. (2016) 测试得到的二辉岩的年龄分别为 (412 ± 2) Ma 和 (406 ± 3) Ma, 勘探线 L2 与 L5 号之间的辉长苏长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (406 ± 3) Ma (Song et al., 2016), 而 ZK1905 深部 430 m 的辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (431 ± 3) Ma (Li et al., 2015), 地表探槽中的辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (439 ± 3) Ma (姜常义等, 2015), 地表淡色辉长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (447 ± 1) Ma

(王冠, 2014)。因此辉长岩类可以分为两期, 分别为 447~431 Ma 和 406 Ma。成矿超基性岩体(如 406~412 Ma 的二辉岩)比老的辉长岩晚 20~40 Ma。

夏日哈木基性—超基性岩体具有西部窄, 东部膨大的特征(图 2c)。基性—超基性岩体的上部围岩为元古代花岗片麻岩, 在西部下部围岩为大理岩, 在东部下部为元古代花岗片麻岩。纵剖面上夏日哈木的岩相主要有纯橄岩、方辉橄榄岩和单辉橄榄岩、二辉岩和辉长岩。笔者将纵剖面分为两部分: 西部和东部。纯橄岩主要分布在 11 线号勘探线以西, 其主体位于基性—超基性岩体的中上部(图 2c)。

在纵剖面的西南部纯橄岩厚度从 ZK1903 的 156 m 降低到 ZK2305 的 36 m, 呈现厚度逐渐降低的趋势; 纯橄岩上部分布有一定厚度的单辉橄榄岩, 单辉橄榄岩厚度从 ZK1903 的 80 m 逐渐降低 ZK2305 的 0.5 m, 此外 ZK1903 纯橄岩下部分布有 9 m 厚的单辉橄榄岩; 橄榄岩相下部分布有 14~49 m 的辉石岩(Liu et al., 2018)。在纵剖面的北东部分, 纯橄岩厚度在 ZK1105 达到最大的 87 m 向两侧钻孔渐减少 ZK1505 的 5 m 和 ZK905 的 3 m。岩体北东部分的辉石橄榄岩为方辉橄榄岩, 主要分布在 ZK1505、ZK15E05 和 ZK11E05 纯橄岩的上部, 与围岩元古代花岗片麻岩直接接触。纯橄岩下部为辉石岩, 辉石岩的厚度从 ZK1505 的 50 m 逐渐增加到 ZK705 的 265 m(图 2c)。在 ZK11E05、ZK9E05、ZK705 的底部和 ZK9E05 和 ZK905 的顶部分别有 43~80 m、50~80 m 的辉长岩。

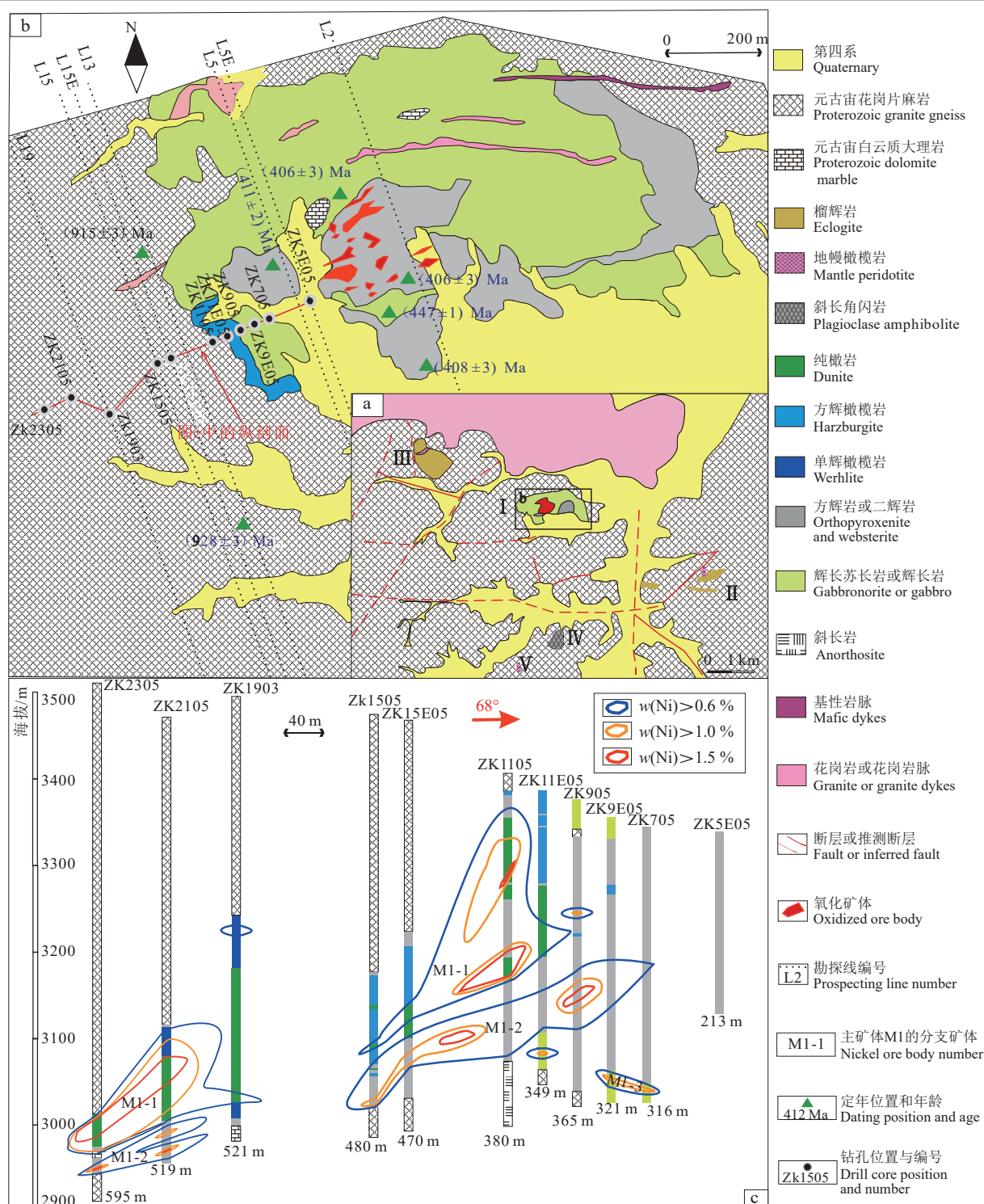


图 2 夏日哈木矿区 (a)、I 号岩体地质图 (b) 及纵剖面图 (c)

(a 据李文渊, 2015; b 据青海省第五地质矿产勘查院, 2014^①; 新元古代年龄来源于甘彩红, 2014; 王冠, 2014; 基性—超基性岩体年龄来源于王冠, 2014; Li et al., 2015; Song et al., 2016; 图 c 据 Liu et al., 2018)

Fig.2 Geological map of the Xiarihamu area (a), the geological map of No. I intrusion (b), and longitudinal section of Xiarihamu Ni-Co deposit (c)

(a from Li Wenyuan, 2015; b from No. 5 Geological and Mineral Survey Institute of Qinghai, 2014^①, Neoproterozoic age adapted from Gan Caihong, 2014 and Wang Guan, 2014, mafic-ultramafic rock age from Wang Guan, 2014; Li et al., 2015; Song et al., 2016; c from Liu et al., 2018)

夏日哈木铜镍矿体按照赋存位置分为三类(Liu et al., 2018)(图 2c): (1)位于橄榄岩相的矿体; (2)位于辉石岩相的矿体; (3)位于辉长岩相的矿体。其中橄榄岩相的矿体富矿部分($\text{Ni}>0.8\%$)在纵剖面的北东部位主要位于纯橄岩的底部, 在纵剖面的南西部位主要位于纯橄岩的上部; 辉石岩相中的富矿主要位于辉石岩相的中部; 辉长岩相中富矿($\text{Ni}>0.8\%$)的矿体位于辉长岩的上部。夏日哈木 I 号岩体的岩浆侵入期次由早到晚为: 早期辉长岩—纯橄岩+方辉橄榄岩+单辉橄榄岩—二辉岩—晚期辉长岩(Liu et al., 2018)。

夏日哈木 I 号岩体具有的极低铂族元素含量(PGE; $<4\times 10^{-9}$ Ir, $<85\times 10^{-9}$ Pt, $<115\times 10^{-9}$ Pd)(Song et al., 2016), 围岩花岗片麻岩中黄铁矿的原位硫同位素值 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 11.2‰, 而岩体中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 为 2.4‰~7.7‰, 均值为 4.5‰; 地壳硫对全岩硫的贡献在 40%~60%, 而母岩浆结晶分异过程对全岩硫的贡献仅在 3.3%~6%(Liu et al., 2018)。

2.2 石头坑德铜镍矿床

石头坑德矿床位于东昆仑造山带的东段, 与位于造山带中段的夏日哈木矿床相距近 200 km, 石头坑德岩浆铜镍矿床邻近昆中断裂(Zhang et al., 2019)。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(图 3a), 岩性为单辉岩、二辉岩、橄榄二辉岩、纯橄岩、二辉橄榄岩、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(图 3a)。

I 号岩体出露面积约 5.8 km², 超镁铁岩体呈不规则形状侵位于早期辉长岩内, 出露面积不等, 其中最大者达 1.4 km², 地表主要出露 4 个规模较大的超镁铁质岩, 呈岩株状产出(图 3a)。岩体整体倾向南东, 倾角变化较大。镁铁质、超镁铁质岩相均有发育, 表明岩浆分异较充分, 野外观察各岩相间的侵位先后顺序为辉长岩→二辉橄榄岩+纯橄岩→二辉岩(Zhang et al., 2018)。

石头坑德的矿体赋存在橄榄岩中, 矿体在 ZK4001 厚度达 120 m(图 3b), 镍品位最高为 0.61%, 平均值为 0.32%。在剖面上可见橄榄岩侵入到辉长岩中(图 3b), 这也是橄榄岩晚于辉长岩的一个证据。锆石测年数据也显示橄榄二辉岩锆石 SHRIMP

U-Pb 年龄为 $(334\pm 4)\text{Ma}$, 而辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $(425\pm 4)\text{Ma}$, 说明基性岩辉长岩早于超基性岩(Zhang et al., 2018)。当然不同学者测得石头坑德的橄榄二辉岩的年龄主要集中于 418~424 Ma(Jia et al., 2021; Li et al., 2021), 这体现了石头坑德矿区成矿的复杂性。矿区可见大理岩被岩体包裹(图 3b), 推测岩体混染了一定程度的大理岩。尽管浸染状硫化物只存在于 ZK4001 橄榄岩的中心相(图 3b), 但其他钻孔可见脉状贯入的矿体。硫化物的种类主要有镍黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿。硫化物存在于橄榄石粒间或橄榄石中。

3 成矿理论的新认识

3.1 板块断离-折返模型解释了岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿年龄与高压-超高压退变质年龄一致的现象

在东昆仑造山带的昆中带厘定出一条长逾 530 km 高压变质带(图 1), 基本确定本次高压变质的峰期时代为志留纪—早泥盆世(表 2), 为陆陆碰撞型榴辉岩。Bi et al. (2018)在克合特发现柯石英, 表明东昆仑为高压—超高压变质带。该高压—超高压变质带的发现, 表明东昆仑在早古生代发生了深俯冲作用。夏日哈木 III 号榴辉岩和克合特榴辉岩退变质年龄分别为 409 Ma 和 410.5 Ma(表 2), 这与夏日哈木超大型矿床含矿超基性岩的年龄基本一致(表 1)。Liu et al. (2018)提出可利用板片俯冲折返模型来解释: (1)508~438 Ma 为洋壳俯冲阶段, 出现了东昆仑地区出现沟-弧-盆体系; (2)438~428 Ma 为陆陆碰撞阶段, 洋壳牵引陆壳俯冲, 榴辉岩开始形成; (3)428 Ma 之后深俯冲的洋壳与所拖曳的陆壳断开(breakoff), 携带部分榴辉岩的陆壳开始快速折返并在 $\leq 2\text{ GPa}$ 的位置受到富水流体的影响, 而同时俯冲板片软流圈地幔上涌(夏日哈木母岩浆形成), 上升过程中受到了含水熔体的影响, 幔源岩浆最终顺断裂上侵到地壳。

上述板片断离折返模型解释了超高压变质岩与产铜镍矿床的关系, 同时也提供了勘查方向的启示: 在超高压折返榴辉岩存在的构造带中, 与榴辉岩退变质年龄一致的基性—超基性岩体有较大可能产铜镍矿床。板片断离的过程中大多伴随着强烈的幔源岩浆活动, 这可能是产铜镍矿床的重要动

力。除东昆仑外, 中国及邻国存在多条高压—超高压变质带 (Wang et al., 1989; Enami, 1990; Yang et al., 2002; Yang et al., 2003; Liou et al., 2009; Zhang et al., 2010; Song et al., 2014; Fu et al., 2021), 在这些构造带中寻找与高压—超高压变质榴辉岩退变质年龄一致的基性—超基性岩体可能是岩浆型铜镍钴矿床勘查的一个方向。东昆仑夏日哈木基性

—超基性侵入体在 1 : 5 万地质调查中曾被认为是蛇绿岩, 可能在中国其他地区也存在上述情况。一线勘查队伍可以仔细寻找那些与超高压退变质年龄接近的蛇绿岩, 其或许是基性—超基性侵入体被错认为是蛇绿岩, 有进一步评价铜镍矿床成矿潜力。当然, 蛇绿岩也并不一定完全没有岩浆型硫化物矿床成矿潜力, 目前国内蛇绿岩成铜镍矿床的唯

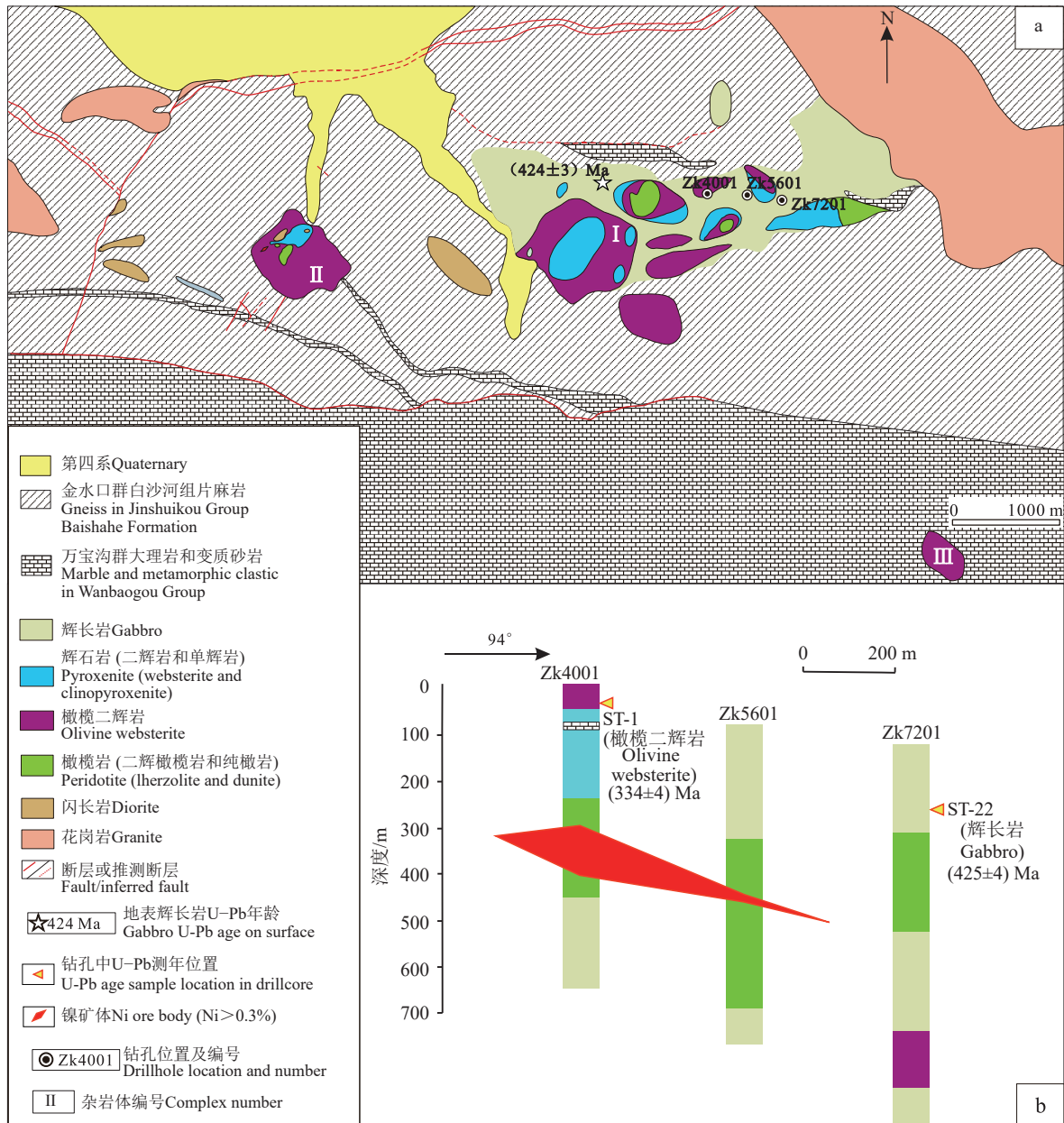


图 3 东昆仑石头坑德镁铁—超镁铁质岩地质图(a)和剖面图(b)

(a 据四川地矿局 108 地质队, 2016^②修改, 年龄数据来源于周伟, 2016; b 及其年龄数据据 Zhang et al., 2018)

Fig.3 The geological map (a) and cross-section figure (b) of the Shitoukengde mafic-ultramafic complex (a modified from Team 108 of Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources, 2016^②, age data from Zhou Wei et al., 2016; b and age data from Zhang et al., 2018)

表 2 东昆仑榴辉岩、榴闪岩锆石同位素年龄

Table 2 Zircon isotopic age of eclogite in the Eastern Kunlun

位置	岩石	原岩年龄/Ma	榴辉岩相 变质年龄/Ma	退变质 年龄/Ma	测定方法	资料来源
温泉	细粒榴辉岩	934			SHRIMP	Meng et al., 2013
温泉	粗粒榴辉岩		428 ± 2		LA-MC-ICP-MS	Meng et al., 2013
温泉	榴辉岩		451 ± 2		LA-ICP-MS	贾丽辉等, 2014
温泉	榴辉岩中 石英脉		450 ± 2		LA-ICP-MS	贾丽辉等, 2014
苏海图	榴辉岩		411 ± 2		LA-ICP-MS	祁生胜等, 2014
夏日哈木III号	榴辉岩		436	409	LA-MC-ICP-MS	张照伟等, 2017
夏日哈木II号岩体西	榴辉岩	777~773	415 ± 6		LA-ICP-MS	潘彤和张勇, 2020
夏日哈木PM4剖面	退变榴辉岩		414 ± 7		SIMS	郭峰等, 2020
五龙沟西	榴辉岩	650~520	451 ± 4		LA-ICP-MS	熊富浩和马昌前, 2016
加当	榴闪岩	934 ± 15	440 ± 13		LA-ICP-MS	国显正等, 2018
浪木日上游	榴辉岩		432 ± 2		LA-ICP-MS	祁晓鹏等, 2016
浪木日	榴闪岩		445	415	LA-ICP-MS	田楠, 2022
大格勒	榴辉岩		433 ± 5		LA-ICP-MS	Du et al., 2017
柯克特	榴辉岩		427 ± 1	410.5 ± 2	SIMS	Song et al., 2018
艾日克汗森	榴辉岩		435 ± 4		LA-ICP-MS	王启蒙, 2020

一案例为位于陕西略阳成矿时代为新元古代(Re-Os 等时线年龄(878 ± 27)Ma)的煎茶岭镍矿(王瑞廷等, 2003), 岩石几乎全部蛇纹石化和热液镍成矿作用是该矿床的一个显著特点(Jiang and Zhu, 2017)。

3.2 辉石岩地幔可能是东昆仑高 Ni/Cu、极低 PGE 岩浆型镍矿的源区

夏日哈木硫化物具有高的 Ni、Cu 和极低的 PGE 元素含量(橄榄方辉岩、方辉岩、二辉岩的 Ni/Cu 比值分别为 5~14.5、3~9、3.2~14.1, 夏日哈木的 $\text{Ir}_{100} < 4.1 \times 10^{-9}$, $\text{Pd}_{100} < 133.3 \times 10^{-9}$)(Song et al., 2016; Zhang et al., 2017; Liu et al., 2018), 高 Ni/Cu 比值在 3~14.5, 类似科马提岩, 科马提岩中高的 Ni/Cu 通常被认为是来自地幔橄榄岩的高程度部分熔融产生的高 Ni 和高 PGE 含量的科马提质岩浆, 但夏日哈木硫化物中的铂族金属不仅低于地幔橄榄岩高程度部分熔融产生的科马提质岩浆, 更低于从地幔橄榄岩低程度部分熔融产生的玄武质岩浆中熔离的硫化物, 故夏日哈木的母岩浆可能不是来源于地幔橄榄岩的部分熔融(Song et al., 2016)。

夏日哈木的橄榄石 Fo 在 83.9~90.7, 镍含量在 $802 \times 10^{-6} \sim 3760 \times 10^{-6}$, 大部分在 $2000 \times 10^{-6} \sim 3000 \times 10^{-6}$ (Li et al., 2015; Liu et al., 2018), 其高于由富集橄榄岩部分熔融产生的玄武质岩浆中结晶出来的、具有相似 Fo 大小的橄榄石中的镍含量, 而与由辉石岩地幔部分熔融产生的苦橄质岩浆与玄武质岩浆中的橄榄石斑晶中的 Ni 含量相当 (Song et al.,

2016)。辉石岩地幔被认为是由橄榄岩地幔与 SiO_2 熔体反应形成的 (Sobolev et al., 2007), 如 Sobolev et al. (2005) 认为夏威夷地区的母岩浆具有富镍富硅特征的原因在于其源区是辉石岩地幔, 而该辉石岩地幔是由于地幔橄榄岩与再循环的洋壳熔融产生的富 SiO_2 流体或熔体相互作用产生的。Liu et al. (2023) 通过高温高压实验模拟发现在 0.5 GPa/1045℃ 和 1.5 GPa/1240℃ 条件下含硫化物斜方辉石岩的部分熔融可产生岩浆硫化物矿床常见的母岩浆高镁玄武质岩浆, 为岩浆硫化物矿床可起源于辉石岩地幔的认识提供了关键的证据。

3.3 造山带中夏日哈木超大型镍钴矿床是产于岛弧环境吗?

部分学者认为夏日哈木超大型镍钴矿床是产于岛弧环境的一大证据是: 通过 $(\text{NiS}/\text{FeS})_{\text{sulfide}}/(\text{NiO}/\text{FeO})_{\text{olivine}} - \text{Ni}$ 金属量的氧逸度计算方法 (Barnes et al., 2013) 计算的夏日哈木超基性岩的氧逸度, 类似岛弧氧逸度 (Li et al., 2015)。

典型岛弧阿拉斯加型岩体的尖晶石的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 通常高于 0.3 (Liu et al., 2018), 但夏日哈木矿床的尖晶石的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 明显低于典型阿拉斯加型岩体的 (图 4), 代表了其形成的氧逸度明显低于岛弧构造环境。稀有气体研究也显示夏日哈木存在很多还原性气体 (李建平, 2016)。夏日哈木尖晶石的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值和 $\text{Cr}^\#$ 与产于碰撞后伸展环境的黄山

东岩体较为类似, 从一个侧面反映夏日哈木的形成环境可能为碰撞后环境。

上述两种体现岩体氧逸度的计算方法存在较大差别的原因是: (1) 铬尖晶石 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 反映的氧逸度失准; (2) Barnes et al. (2013) 的氧逸度计算方法失准。鉴于铬尖晶石 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 是反映超基性岩氧逸度的普遍方法, 而 Barnes et al. (2013) 提出的方法仅局限于研究铜镍矿床中的少数学者, 第二种原因的可能性略大。故本文认为青海省第五地质矿产勘查院和吉林大学联合(李世金等, 2012)最早提出夏日哈木形成于碰撞后伸展环境的解释更合理。

3.4 原特提斯—古特提斯演化与东昆仑地区基性—超基性岩的关系

青藏高原构造演化与成矿关系密切(侯增谦等, 2020), 故有必要梳理构造演化与基性—超基性岩浆活动的关系。青藏高原东北缘东昆仑地区在显生宙发生了至少五期基性—超基性岩浆活动, 分别

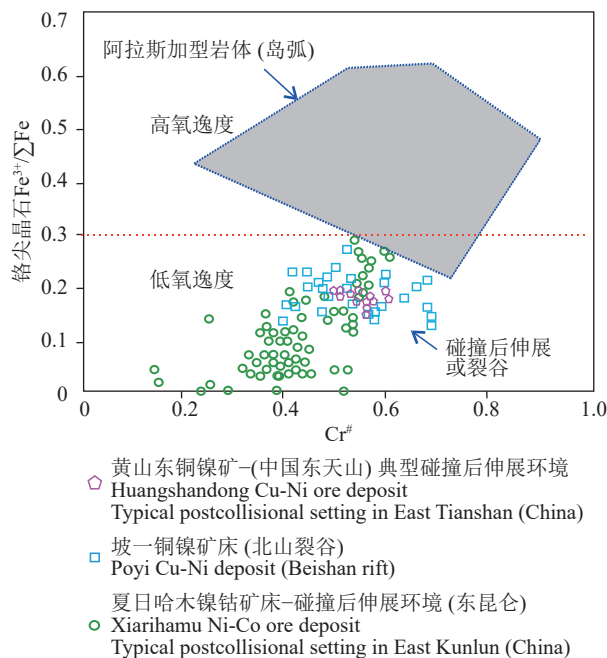


图 4 夏日哈木岩体氧逸度与岛弧阿拉斯加型岩体氧逸度的对比(Liu et al., 2018)

阿拉斯加范围和夏日哈木超大型 Ni-Co 矿床铬尖晶石来源于 Liu et al., 2018; 黄山东 Cu-Ni 矿床铬尖晶石据傅飘儿, 2012; 坡一 Cu-Ni 矿床铬尖晶石据吴建亮等, 2018

Fig.4 Comparison of oxygen fugacity between typical Cu-Ni deposit and island arc Alaskan complex (Liu et al., 2018)
Alaskan area from Liu et al., 2018; Cr-spinel of Huangshandong Cu-Ni ore deposit from Fu Piaoer, 2012; Poyi Cu-Ni deposit from Wu Jianliang et al., 2018

为晚奥陶世—早志留世、中晚志留世—早中泥盆世、早石炭世、中二叠世—早三叠世、中—晚三叠世。

希望沟发现的中二叠世的橄榄辉石岩和辉长岩类和早三叠世加当岩体和白日其利岩体被认为形成于岛弧环境, 是古特提斯洋向北俯冲的产物(李玉龙等, 2018; 孔会磊等, 2019b; 2021); 中—晚三叠世镁铁质—超镁铁质侵入体的地质背景为碰撞后伸展阶段(奥琮等, 2015; 王亚磊等, 2017; Liu et al., 2019)。上述两期基性—超基性岩体的构造背景不存在争议。

然而, 对于中晚志留世—早中泥盆世基性—超基性岩体和早期石炭世基性—超基性岩体的地质背景, 目前主要有 4 种观点。

一些学者认为, 中晚志留世—早泥盆世夏日哈木岩体形成于岛弧环境(Li et al., 2015; 姜常义等, 2015; 杜玮等, 2017), 认为其是原特提斯洋俯冲的产物。主要证据是: (1) 岩石的微量元素显示岛弧特征; (2) 时代较老的辉长岩年龄(439 Ma)数据处于区域上原特提斯洋的俯冲阶段(姜常义等, 2015)。

第二种观点认为: 晚志留世—早泥盆世基性—超基性岩体形成于碰撞后伸展环境(李世金等, 2012; Song et al., 2016; Liu et al., 2018; Yan et al., 2019; 孔会磊等, 2019a; Wang et al., 2020)。主要证据有 3 个: (1) 碰撞后阶段的岩石组合在昆中带广泛发育, 如中志留世—晚志留世(428~419 Ma)玄武岩(朱云海等, 2005; 青海地质调查院, 2012^⑧)、早泥盆世—中泥盆世(411.5~382.8 Ma)辉绿岩(孙延贵等, 2004; Xiong et al., 2014; 杨柳等, 2014)、晚志留世—中泥盆世(419.0~391.1 Ma)A2 型花岗岩(陈静等, 2013; 甘彩红, 2014; 严威等, 2016)。这些岩浆活动被认为是碰撞后伸展的产物(刘彬等, 2012; 甘彩虹, 2014; Peng et al., 2016; Song et al., 2016; Norbu et al., 2020)。428 Ma 被解释为陆陆碰撞和碰撞后环境的时代分界(Meng et al., 2013; Liu et al., 2018)。(2) 榴辉岩在大陆折返的年龄为 409 Ma(张照伟等, 2017), 板片断离折返模型可以解释东昆仑岩浆型铜镍硫化物矿床与高压—超高压榴辉岩退变质年龄(折返年龄)一致的现象(Liu et al., 2018)。(3) Liu et al.(2018)总结了世界典型岛弧阿拉斯加型侵入体的尖晶石总体上 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe} > 0.3$, 而中国的碰撞后伸展环境的岩体中的尖晶石总体上 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe} < 0.3$ 。夏

日哈木的尖晶石 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe} < 0.3$, 显示出是碰撞后伸展的背景而非岛弧背景。

第三种观点是夏日哈木超大型镍钴矿床代表了古特提斯洋的开启(裂解)(李文渊等, 2020, 2022; 张照伟等, 2024)。这种观点的证据主要基于全球构造演化与东昆仑早泥盆世处于张裂背景的现实, 其可合理解释为什么东昆仑诸多岩浆硫化物矿床在泥盆世形成, 是重大成矿事件响应重大构造转换的典范。关于东昆仑地区古特提斯洋的开启时间, 另一种观点是早石炭世的基性—超基性岩, 如石头坑德橄榄辉石岩代表着古特提斯洋开启的时间(Zhang et al., 2018), 蛇绿岩研究也显示古特提斯洋在早石炭世开始开启(Li et al., 2022), 证据如下: 南昆仑断裂附近布青山蛇绿岩中的枕状玄武岩年龄为 $(340.3 \pm 11.6) \text{ Ma}$ (边千韬等, 1999)、布青山蛇绿岩中的辉长岩年龄为 $(332.8 \pm 3.1) \text{ Ma}$ (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄)(刘战庆等, 2011)、昆中断裂的早期石炭纪火山岩含有一些洋中脊玄武岩(袁万明等, 1998)、温泉地区单斜辉石岩的锆石 U-Pb 同位素年龄为 $(331 \pm 2) \text{ Ma}$, 与布青山晚古生代蛇绿岩的年龄基本一致, 说明温泉超镁铁岩与布青山蛇绿岩在成因上有一定的联系, 由于所处构造位置的特殊性, 温泉地区超镁铁岩可能为古特提斯洋的洋壳残留(Jia et al., 2018), 即在东昆中断裂带也存在古特提斯洋的遗迹。

部分学者认为夏日哈木的构造背景为岛弧环境的一个重要的原因是受了部分不含矿的早期老辉长岩年龄的影响, 如 0 号勘探线探槽中的辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(439.1 \pm 3) \text{ Ma}$ (早志留世)(姜常义等, 2015)和 0 号勘探线附近地表的淡色辉长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(447.1 \pm 1) \text{ Ma}$ (晚奥陶世)(王冠, 2014), 而含矿岩相的二辉岩的年龄分别为 $(411.6 \pm 2.4) \text{ Ma}$ 和 $(406.1 \pm 2.7) \text{ Ma}$ (Li et al., 2015; Song et al., 2016), 故不含矿的辉长岩(早志留世)比含矿的超基性岩(早泥盆世)早了 20~40 Ma, 本文认为其解释为两期幔源岩浆作用更合适。从区域构造演化来讲, 晚奥陶世—早志留世是原特提斯洋向北俯冲的阶段, 产生了大量弧岩浆岩(莫宣学等, 2007)和弧后的海相基性火山岩($(440.2 \pm 2.4) \text{ Ma}$)(王秉璋等, 2012), 而昆中缝合带胡晓钦岩体(438 Ma)可能代表了早

古生代原特提斯洋俯冲最晚阶段的记录(刘彬等, 2013), 故夏日哈木矿区不含矿的早期辉长岩被解释为形成于原特提斯洋向北俯冲阶段对应的岛弧或弧后盆地环境, 而 428 Ma 之后的含矿超基性岩被解释为碰撞后伸展相对更合适。综上, 东昆仑在显生宙除了蛇绿岩以外存在 2 期岛弧基性或基性—超基性岩体: (1)原特提斯洋向北俯冲背景下形成的晚奥陶世—早志留世的基性岩体; (2)中二叠世—早三叠世的古特提斯洋俯冲形成的基性—超基性岩体; 与之对应, 东昆仑存在 2 期碰撞后伸展基性—超基性岩体, 分别为中晚志留世—早中泥盆世和中晚三叠世。

东昆仑这种构造演化类似黄汲清(1994)提出的手风琴运动, 可以用开合构造思想来解释(姜春发, 2004; 杨巍然, 2004)。晚奥陶世—早志留世的基性岩体产于原特提斯洋向北俯冲背景下岛弧背景, 属于“合”, 目前无矿化; 中晚志留世—早中泥盆世超基性岩体产于碰撞后伸展环境, 属于“开”, 有超大型镍—钴矿, 成矿良好; 上述合开仍处于原特提斯洋消亡阶段。晚石炭世为裂解环境, 属于“开”, 有铜镍成矿显示; 中二叠世—早三叠世基性—超基性岩体产于古特提斯洋俯冲的岛弧背景, 属于“合”, 目前无矿化; 中晚三叠世岩体为碰撞后伸展环境, 属于“开”, 有铜镍矿化, 但达不到矿床的规模。上述开、合、开过程代表了古特提斯洋的开启、闭合、消亡过程。总体来看, 避开“合”的背景而选择在“开”的背景下进行岩浆型铜镍钴矿床勘查更容易取得突破。

3.5 结晶分异(包括岩浆温度的降低和岩浆成分变化)对硫化物饱和的贡献程度

结晶分异与地壳硫混染对硫化物饱和的贡献程度的分析是明确岩浆型 Cu-Ni-Co-PGE 矿床控矿因素的关键。Liu et al. (2018)在世界上首次尝试定量分析了地壳硫混染与结晶分异这两个因素对一个岩浆型铜镍硫化物矿床的相对贡献大小。其采用 Rhyolite-Melts 软件模拟了夏日哈木母岩浆(含量 %: MgO 8.58, FeO 6.79, Fe_2O_3 0.75, SiO_2 52.62, Al_2O_3 15.06, CaO 10.48, K_2O 0.39, MnO 0.19, Na_2O 0.28, Cr_2O_3 0.11, P_2O_5 0.14, TiO_2 0.62, H_2O 4.00)在 1 kb、FMQ+1(FMQ 为铁橄榄石+磁铁矿+石英平衡时的氧逸度)的条件下, 在 1300°C ~ 1050°C 的结晶

序列(图 5)。硫化物饱和是岩浆的硫含量(SCSS)通过 Liu et al. (2007) 和 Li and Ripley (2009) 的 SCSS 公式分别计算。为了计算岩浆成分和温度这两个因素对 SCSS 的影响, 笔者固定岩浆成分, 并只让温度逐渐降低, 这样在每一个温度点都会有对应的 SCSS, 笔者命名为 $SCSS_T$ 。当温度从温度 T_1 降低到 T_2 , 温度对 SCSS 的影响为 $\Delta SCSS_T = SCSS_{T_1} - SCSS_{T_2}$ 。在正常岩浆结晶过程中(不固定岩浆成分)的 SCSS 值, 笔者命名为 $SCSS_{normal}$, 其减去 $SCSS_T$, 即为岩浆成分对 SCSS 的影响, 笔者将其命名为 $\Delta SCSS_C = SCSS_{normal} - SCSS_T$ 。如图 5 所示, 当温度从 1300℃ 降到 1050℃ 时, 经 Liu et al. (2007) 和 Li and Ripley (2009) 计算得到的 $\Delta SCSS_T$ 分别为 510×10^{-6} 和 518×10^{-6} , $\Delta SCSS_C$ 分别为 54×10^{-6} 和 138×10^{-6} 。因此, 温度对硫化物饱和的贡献为 90% [$510/(510+54)$] 或者 79% [$518/(518+138)$], 而岩浆成分的贡献对应为 10% 或 21%。故结晶分异过程中 SCSS 的降低主要受温度影响, 岩浆成分的变化是个很小的因素。

上述认识基本上否定了“橄榄石、铬铁矿等矿物的结晶分异中对岩浆熔体中 FeO 的消耗是促进

硫化物饱和的一个主要原因”的传统认识, 而实际是: 岩浆温度的降低是结晶分异过程中促进硫化饱和的主要原因。

从 1300℃ 到 1050℃, $SCSS_{normal}(\Delta SCSS_C + SCSS_T)$ 通过 Liu et al. (2007) 和 Li and Ripley (2009) 计算得到的值分别为 565×10^{-6} 和 656×10^{-6} 。因此, 大概有 565×10^{-6} 或 656×10^{-6} 的硫从熔体中析出变为硫化物。夏日哈木超基性岩体的平均硫含量为 2%。因此, 结晶分异对夏日哈木硫的贡献为 3.3% ($656 \times 10^{-6}/2\%$)。在 1300℃ 的时候, SCSS 为 1200×10^{-6} , 即使所有的硫从熔体中析出变为硫化物, 那么岩体固结过程中结晶分异对全岩硫的贡献率为 6% ($1200 \times 10^{-6}/2\%$) (Liu et al., 2018)。而通过同位素两端元混染计算的地壳硫对全岩硫的贡献为 40%~60%, 所以结晶分异相对于地壳硫混染对硫化物饱和的影响是很小的因素, 夏日哈木成矿主要受益于地壳硫的混染 (Zhang et al., 2017; Liu et al., 2018)。

3.6 氧逸度的变化对成矿的影响

为了厘定氧逸度对东昆仑铜镍成矿的关键环节, Jia et al. (2022a) 选取东昆仑造山带夏日哈木超大型镍矿床(I 号岩体)和石头坑德弱矿化—无矿超镁铁质岩作为研究对象, 利用电子探针同时测定尖晶石主量元素及 $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 比值 (Jia et al., 2022b), 对比不同期次岩浆的氧逸度特征。结果表明, 夏日哈木镍铜矿中最高 Fo 值的橄榄岩具有高氧逸度值 (QFM+2.2), 表明最初期的岩浆形成于氧化环境; 随后岩浆氧逸度逐渐降低 (QFM-0.6), 导致岩浆中硫过饱和以致发生硫化物熔离, 最终成矿。而石头坑德岩体的氧逸度演化恰恰相反, 随着岩浆演化从还原逐渐变为氧化状态 (QFM-1.3 至 QFM+1.0), 致使岩浆中硫的溶解度逐渐增高, 这可能是石头坑德岩体成矿相对不好的一个重要原因 (Jia et al., 2022a)。尽管对于橄榄石—尖晶石氧逸度计 (Ballhaus et al., 1991) 需要橄榄石、尖晶石、斜方辉石达到矿物平衡且计算过程中需要可靠地计算该平衡时的压力, 鉴于目前没有可靠的压力计计算尖晶石生成时的压力, 导致上述研究中计算的氧逸度值可能存在部分误差, 但其同一杂岩体的不同岩相的氧逸度的变化应该是可靠的。夏日哈木 I 号岩体 ZK11E05 的橄榄岩相尖晶石的 $Cr^{\#}$ 值从岩相顶部的 0.611 变为底部的 0.259, $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 值从岩相顶部的 0.295 变为底

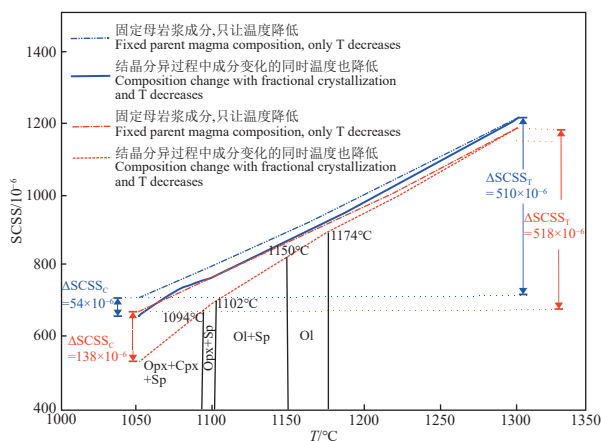


图 5 结晶过程中 SCSS 变化情况的定量模拟 (Liu et al., 2018)

蓝色线 SCSS 据 Liu et al. (2007) 计算, 红色线 SCSS 据 Li et al. (2009) 计算; Ol—橄榄石, Sp—尖晶石, Opx—斜方辉石, Cpx—单斜辉石

Fig.5 Model of the variation in the sulfur contents at sulfide saturation (SCSS) during the fractional crystallization process (Liu et al., 2018)

The SCSS in blue and in red calculated after Liu et al. (2007) and Li et al. (2009), respectively; Ol—Olivine, Sp—Spinel, Opx—Orthopyroxene, Cpx—Clinopyroxene

部的 0.046 (Liu et al., 2018), 表明随着尖晶石的结晶分异岩浆的氧逸度在逐渐降低。上述研究揭示了岩浆还原过程是铜镍硫化物矿床形成的关键环节。段雪鹏等(2019)通过对夏日哈木 II 号岩体中的含长橄榄方辉岩中的角闪石类的研究发现: 角闪石的氧逸度分布在 FMQ+0.16 到 FMQ+2.06, 且角闪石的核部到边部岩浆氧逸度先升高后降低的过程。从以上研究可以看出, 不同岩相、同一钻孔同一岩相的不同部位、同一矿物不同位置的氧逸度均具有很大的变化, 故在研究氧逸度对岩浆硫化物矿床的影响的过程中, 关键是定位信息或基于同一地质对象的变化规律研究, 而不同矿床之间的氧逸度差异的对比需要基于大量的数据, 否则对比出来的氧逸度大小可能导致南辕北辙的结论。

3.7 矿体优选赋存位置规律总结

本文总结了一些编录的大量钻孔、绘制了典型矿床剖面、采样系统定位的研究成果, 总结了东昆仑矿体优选的位置(图 6), 为一线勘查队伍勘查提供直接启示与模式参考。

研究矿体分布规律的前提是搞清楚岩相, 野外分析岩浆铜镍矿床岩浆期次的主要途径有 3 种方式: 冷凝边、烘烤边和穿插关系。若没明显的期次关系, 则可能为渐变关系; 尽管有的有明显的侵入关系但成分上还是渐变关系, 比如坡一 ZK22-7 的纯橄岩与角闪橄榄岩(图 6a), 没有明显矿物成分间断的笼统归为一个岩相; 同样, 夏日哈木 ZK11E05 的方辉橄榄岩和纯橄岩(图 6b)以及 ZK1903 的单辉橄榄岩和纯橄岩也笼统地归为橄橄榄岩相(图 6c)。

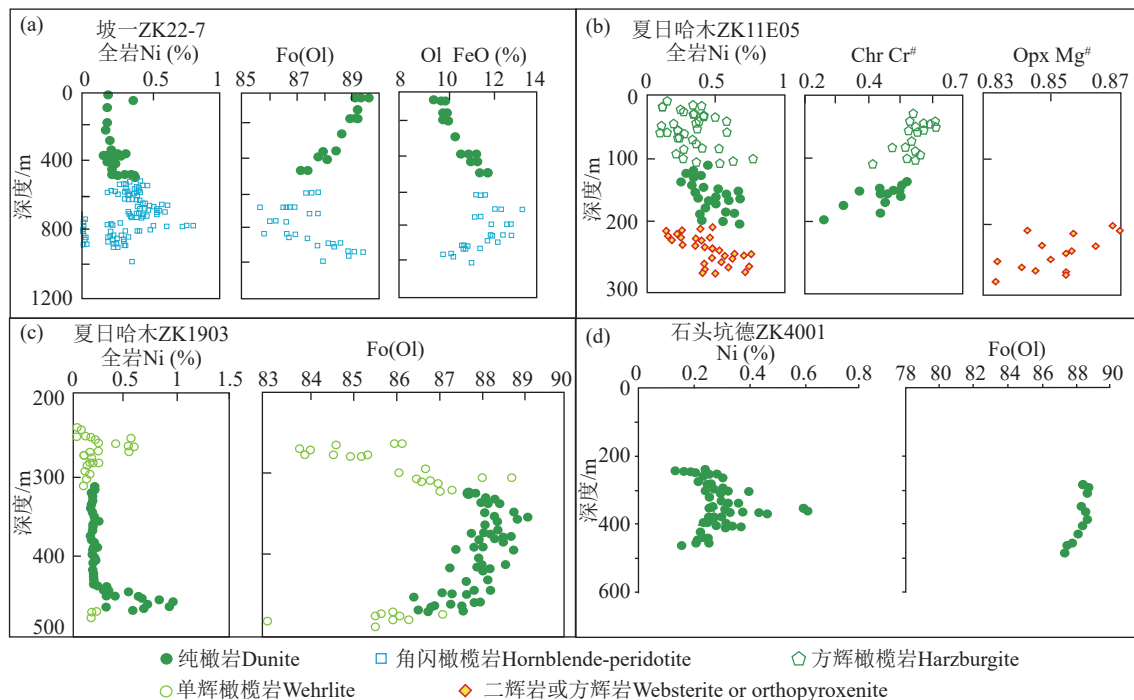


图 6 铜镍矿体优选位置总结

a—坡一铜镍矿主勘探线 22 线 ZK22-7 岩相分布与 Ni 含量关系图, 矿体位于岩相的中部偏下(Liu et al., 2017); b—夏日哈木镍钴矿床 ZK11E05 岩相分布与 Ni 含量分布图, 矿体位于岩相的底部(Liu et al., 2018); c—夏日哈木镍钴矿床 ZK1903 岩相分布与 Ni 含量分布图, 矿体位于岩相的顶部和底部(Liu et al., 2018); d—石头坑德铜镍矿床 ZK4001 岩相分布与 Ni 含量分布, 矿体位于岩相的中部(Zhang et al., 2018); Ol—橄榄石; Chr—铬铁矿; Opx—斜方辉石, Fo—橄榄石中的镁橄榄石所占百分比

Fig.6 Summary of preferred locations for copper-nickel ore bodies

a—Lithofacies distribution and Ni content of ZK22-7 in Poyi Cu-Ni deposit, ore body is located at the middle to lower part of the lithofacies (Liu et al., 2017b); b—Lithofacies distribution and Ni content of ZK11E05 in Xiarihamu Ni-Co ore deposit, ore body is located at the bottom part of the lithofacies (Liu et al., 2018); c—Lithofacies distribution and Ni content of ZK1903 in Xiarihamu Ni-Co ore deposit, ore bodies are located at the bottom part of the lithofacies (Liu et al., 2018); d—The relationship of Fo and Ni content in ZK4001 of Shitoukengde Cu-Ni deposit, ore body is located at the central part of the lithofacies (Zhang et al., 2018); Ol—Olivine; Chr—Chromite; Opx—Orthopyroxene; Fo—Percentage of forsterite in olivine

橄榄岩相中矿体($\text{Ni}>0.4\%$)可以分布在岩相的中部(图 6d)、中下部(图 6a)、下部(图 6b)、边部(顶底)(图 6c);辉石岩相中富品位矿主要集中于底部(图 6b)。尽管位置多变,但有一点基本原则是:矿体更容易产在岩相最晚固结的地方,如坡一铜镍矿 ZK22-7 橄榄岩相(包括纯橄岩和角闪橄榄岩)(图 6a)和夏日哈木 ZK1903 的橄榄岩相(包括纯橄岩和单辉橄榄岩)(图 6c)镍品位与橄榄石 Fo 成反比、夏日哈木 ZK11E05 的橄榄岩相的 Ni 品位与铬铁矿的 Cr# 值成反比、辉石岩相 Ni 品位与斜方辉石的 Mg# 成反比(图 6b),都说明了矿体更容易产在岩相最晚固结的地方。当然也有特殊情况,如石头坑德 ZK4001 镍矿体($\text{Ni}>0.4\%$)出现在 Fo 最高的地方(图 6d),这被解释为:中间岩相具有更少的地壳混染,而恰巧围岩的混染抑制了硫化物饱和(Zhang et al., 2018)。故矿体更倾向于在岩相的哪个位置还需要结合围岩混染对硫化物饱和的抑制或促进作用以及结晶顺序的早晚来综合考量,但总体来看镍品位大于 0.7% 的矿体更容易出现在岩相的中下部或底部。

特别需要提及的是,东昆仑造山带铜镍矿床勘查最稳妥的勘查目标是稠密浸染状矿石、海绵陨铁状矿石,而以偶见的几或十几厘米的贯入矿石为中心开展工作,是欠妥的,特别是在贯入式矿石中的 100% 硫化物 PGE 含量比浸染状矿石的值还低且贯入式矿石中镍黄铁矿占不到矿石的 10% 的情况下。因为 PGE 强相溶于硫化物,若贯入式矿石中 100% 硫化物 PGE 含量比浸染状矿石的还低,则说明其熔离的时间要晚于浸染状硫化物,后期岩浆演化过程中形成硫化物富集从而形成一点贯入式硫化物属于大概率事件。勘查经验显示:若一个钻孔中发现了厘米到几十厘米的贯入式矿石或矿体且这些硫化物的 100% 硫化物 PGE 含量比浸染状矿石的硫化物还低,其相邻钻孔(40 m 孔距)再次发现贯入式的矿体可能性很小,如坡一铜镍矿、坡东铜镍矿体、浪木日矿区尽管都发现了贯入式矿石,但相邻钻孔均未再次发现。相邻钻孔再次发现贯入式矿体当然更好,但若前期勘查中发现该贯入式硫化物相对于浸染矿石更加贫 PGE,则需适时改变在其相邻位置密集布置钻孔的策略。

4 勘查模型

4.1 地质标志

4.1.1 构造标志

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。东昆仑典型矿床夏日哈木镍矿和石头坑德镍矿分别位于黑山—那陵格勒断裂和昆中断裂附近。那陵格勒断裂(为岩石圈破裂带,呈 NW-SE 向,大致与昆北断裂平行展布(图 1),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 NE 向展布的白干湖断裂。昆中断裂呈 NW-SE 向,东段近 W-E 向展布,是昆中带和昆南带的分界断裂。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(王国灿等, 1999),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。超壳深大断裂(黑山—那陵格勒断裂和昆中断裂)为铜镍矿产出提供了必要条件。

4.1.2 岩体时代与岩石组合

东昆仑显生宙只有晚志留世—早泥盆世的夏日哈木镍钴矿床目前处于开采阶段,石头坑德、阿克楚克塞和浪木日具有一定成矿潜力仍在勘探阶段。石头坑德部分超基性岩显示出早石炭世年龄,故早石炭世的超基性岩体的成矿潜力也有待评价。东昆仑地区的中晚三叠世基性—超基性岩体虽具有零星硫化物发现,但尚未发现达到工业品位;而晚奥陶世—早志留世基性岩和中二叠世—早三叠世基性—超基性岩未发现矿化。东昆仑基性—超基性岩体的时代多样,导致含矿性评价具有复杂性,主要体现在 2 个方面:(1)东昆仑发育蛇绿岩体,在野外勘查过程中需要与侵入型基性—超基性岩进行仔细甄别;(2)除蛇绿岩外,东昆仑发育至少 5 期幔源岩浆活动,且不同时代的幔源岩浆活动可以集中于一个矿区或杂岩体,有三个矿区是典型

例子,分别是①夏日哈木矿区既有与原特斯洋俯冲有关的晚奥陶世年龄(王冠, 2014)和早志留世年龄报道(姜常义等, 2015),又有碰撞后伸展背景下的早志留世—早中泥盆世年龄报道(表 1);②石头坑德矿区超基性岩既有晚志留世—早泥盆世年龄报道(表 1),又有早石炭世年龄报道(Zhang et al., 2018);③阿克楚克塞矿区既有晚志留世年龄报道(Yan et al., 2019b, 2020),又有晚三叠世年龄报道(杨锡铭等, 2018)。上述三个矿区恰巧是目前成矿最好的杂岩体。基性—超基性杂岩体的形成时代的多样性或许也可以成为一个含矿好的一个指标。岩浆型铜镍矿床的形成需要岩浆通道或大断裂,一个矿区的基性—超基岩体形成时代的多样可能说明该矿区的岩浆通道或断裂构造更畅通或更容易活化,从而为深部的岩浆或深部分异形成硫化物熔浆的上侵提供了便利。很难想象,这些岩浆通道或断裂跨越数亿年依然可以重新被后期岩浆使用,但的确是一种地质现象。另外需要指出的是新元古代是裂解活动广泛发育时期,是我国铜镍矿床形成的最重要的时期之一(Li et al., 2005; Zhang et al., 2010)。Zhang et al. (2023)认为东昆仑地区存在新元古代地幔柱的影响,且东昆仑镍成矿作用存在新元古代的前期富集。夏日哈木含矿岩体的围岩花岗片麻岩形成于新元古代(图 2)(甘彩红, 2014; 王冠, 2014),晚志留世—早泥盆世成矿的夏日哈木岩体是不是利用了新元古代的岩浆通道或断裂是值得科学家研究的问题。从勘查角度上讲,东昆仑是不是存在新元古代的岩浆硫化物矿床的成矿作用也是一线勘查工作者有必要留心的问题。

对比东昆仑代表性基性—超基性岩体特征(表 3)发现成矿相对良好的岩体均存在纯橄岩→辉石橄榄岩→辉石岩的分异过程(如夏日哈木 I 号和石头坑德),且岩石中有大量的斜方辉石,如方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、二辉岩、方辉岩;若岩石中贫斜方辉石,如以单辉橄榄岩、单辉岩等为主的岩体,成矿潜力则较差。在野外编录工作中,特别需要注意的是:岩石定名为辉石橄榄岩、辉石岩,是不明确的,而是要具体到何种辉石橄榄岩,如方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、单辉橄榄岩;具体到何种辉石岩,如斜方辉石岩、二辉岩、单斜辉石岩。这样有助于了解岩相变化规律和成矿潜力。

4.1.3 蚀变及风化标志

发现东昆仑地区夏日哈木矿的一个重要线索是吉林大学孙丰月团队和青海第五地质矿产勘查院在地表发现了孔雀石化(图 7a)和镍华(图 7b)。孔雀石 $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ 是铜矿物氧化形成的,是良好的找矿标志;镍华 $\text{Ni}_3(\text{H}_2\text{O})_8[\text{AsO}_4]_2$ 是一种含水的镍砷酸盐矿物,形状有柱状、板状,晶体的集合体常为皮壳状、土状或粉末状,颜色有白、灰、淡绿、黄绿色,透明到半透明。鲜绿色镍华(图 7b)多呈针状。作为勘查工作者,对蚀变或鲜艳风化产物的辨识是一种职业素养,基础且关键。超基性岩与围岩接触部位常产生蚀变作用,如绿帘石化等;超基性岩本身也会产生蛇纹石化、滑石化、角闪石化等。

4.1.4 围岩对成矿的影响

幔源岩浆地壳混染过程中,促进硫化物饱和的地壳混染,被定义为“有利地壳混染”;抑制硫化物饱和的地壳混染,被定义为“有害地壳混染”(刘月高等, 2019)。典型的有利于硫化物饱和的围岩有:石膏层(CaSO_4)(Li et al., 2009)、石墨层(Jugo, 2009)、以 SiO_2 为主的地层(如花岗片麻岩)(张招崇等, 2003; Liu et al., 2018)、有机质层(Lacono-Marziano et al., 2017)及硫化物。

东昆仑成矿良好的夏日哈木 I 号岩体、石头坑德、阿克楚克塞岩体均表现出明显的地壳硫混染。对于夏日哈木岩浆硫化物矿床,夏日哈木围岩中的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 11.2‰($n=3$),岩体中硫化物的原位硫同位素值分布在 2.4‰~7.7‰($n=43$),均值为 4.5‰(Liu et al., 2018),远高于地幔的 $\delta^{34}\text{S}$ (-1.80‰~0.49‰)(Gao and Thiemens, 1993; Labidi et al., 2013)。所以夏日哈木明显有地壳硫的混染,这是成矿的有利条件。阿克楚克塞 IV 号岩体的浸染状硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 5.0‰~8.5‰($n=5$),均值在 7.1‰,脉状硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 13.1‰~13.4‰($n=4$),均值为 13.3(Yan et al., 2019);阿克楚克塞 I 号岩体的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 5‰~11.5‰,均值为 7.2‰(Yan et al., 2020)。石头坑德硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 1.9‰~4.3‰($n=11$),平均值为 2.9‰(周伟, 2016; Li et al., 2018),说明其存在地壳硫混染。故岩体中硫化物明显偏离地幔值是成矿良好的重要指标。

石头坑德的围岩主要分为两类:金水口群无硫化物的大理岩和含星点状硫化物片麻状花岗岩,故

表 3 东昆仑代表性基性-超基性岩体特征
Table 3 The geological feature of typical mafic-ultramafic intrusions

岩体	面积/km ²	形状	岩相	含矿岩相	矿石特征	围岩	m/f	来源
夏日哈木I号	1.2	向西倾伏的岩床	辉长岩、斜方辉石岩、二辉岩、方辉橄辉岩、二辉橄辉岩、单辉橄辉岩、纯橄岩	辉石岩、纯橄岩	块状、海绵陨铁状矿石、稠密浸染状、稀疏浸染状、星点状、脉状矿石	金水口岩群片麻状花岗岩(含星点状硫化物)和大理岩(含星点状硫化物)	2.06~6.3	Li et al., 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018; Wang et al., 2019
夏日哈木II号	0.15	长方形	辉长岩、辉石岩	辉长岩、辉石岩	浸染状硫化物	古元古界金水口群白沙河岩组	2.32~4.08	Peng et al., 2016; 杜玮等, 2017; 段建华等, 2017
阿克楚克塞I号	0.008	椭圆形	单斜辉石岩、角闪单斜辉石岩、辉长岩	角闪单斜辉石岩、单斜辉石岩	浸染状硫化物	滩间山群大理岩	0.36~2.96	Yan et al., 2020
阿克楚克塞IV号	0.1	圆形	橄辉辉石岩、辉石岩、辉长岩	辉石岩	海绵陨铁状硫化物、脉状硫化物、浸染状硫化物	滩间山群大理岩	0.87~0.92	Yan et al., 2019b; 赵拓飞, 2021
冰沟南镍矿化点	4	近正方形	辉石岩、辉长岩	辉石岩	浸染状硫化物	中元古代狼牙山组片麻岩夹大理岩	2.5~2.9	王冠, 2014; 张照伟等, 2017
水仙南	0.32	椭圆形	角闪辉石岩、角闪苏长岩、辉石角闪石岩、角闪辉长岩	角闪辉长岩	浸染状硫化物	金水口岩群白沙河岩组	0.8~3.8	Yan et al., 2019a
玉古萨依	0.6	呈岩席-岩床状产出	方辉橄辉岩、橄辉斜方辉石岩、角闪斜方辉石岩、角闪辉长岩	角闪斜方辉石岩	斑状或浸染状硫化物	祁漫塔格岩群变砂岩	1.1~3.7	孟杰等, 2019; Hu et al., 2023
浪木日IV号岩体	0.2~0.8	椭圆形	辉石橄辉岩、橄辉辉石岩、辉石岩、辉长岩	辉石橄辉岩、辉石岩	浸染状硫化物、块状硫化物	白沙河岩组片麻岩	1.0~5.3	孟庆鹏, 2019
希望沟	2.1	近正方形	辉长岩、橄辉辉长岩、橄辉辉石岩、辉石橄辉岩	辉石橄辉岩	稀疏浸染状矿石	古元古界白沙河组片麻岩		孔会磊等, 2019a
杂牙河东沟	0.2	呈岩席-岩床状产出	辉长岩、单辉橄辉岩	单辉橄辉岩	稀疏浸染状矿石	古元古界白沙河组片麻岩和大理岩	2.84~3.75	Norbu et al., 2020
石头坑德	4	岩床状	辉长岩相岩石包括辉长岩、暗色橄辉辉长岩; 辉石岩相岩石包括单斜辉石岩、二辉岩和斜方辉石岩; 橄辉岩相岩石包括单辉橄辉岩、方辉橄辉岩和纯橄岩。	二辉岩 二辉岩	星点状构造、稀疏浸染状构造、稠密浸染状构造、团块状构造、脉状构造	主要为金水口岩群白沙河岩组的黑云斜长片麻岩(含星点状硫化物, 局部与中-新元古代万宝沟群大理岩接触(未见硫化物))	1.93~5.96	周伟, 2016; Li et al., 2018; Zhang et al., 2018; Wang et al., 2020
达拉库岸	0.1	长条状	二辉橄辉岩、单辉橄辉岩、橄辉二辉岩、单斜辉石岩和辉长岩	二辉橄辉岩	星点状构造、稠密浸染状构造	华力西中期的花岗岩、二长花岗岩	3.1~5.1	夏明哲等, 2018
开木琪镍矿化点	2.01	近圆形	二辉岩、辉长岩、少量辉石橄辉岩	辉石岩	星点状构造	晚三叠世黑云母二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩		Liu et al., 2019; Fan et al., 2023
小尖山基性-超基性岩体	1.5	正方形	中心为橄辉辉长岩, 边部为辉长岩	无	无	晚三叠世中细粒二长花岗岩、晚三叠世中粒石英闪长岩	1.5~2.9	奥琼等, 2015
拉陵高里沟脑2号岩体	0.045		粗粒辉长岩、小范围出露的细粒辉石岩	辉石岩	辉石岩中见零星磁黄铁矿化	古元古代金水口岩群		王亚磊等, 2017
拉陵高里沟脑3号岩体	0.004		橄辉二辉岩、辉长岩	无	无	古元古代金水口岩群		王亚磊等, 2017

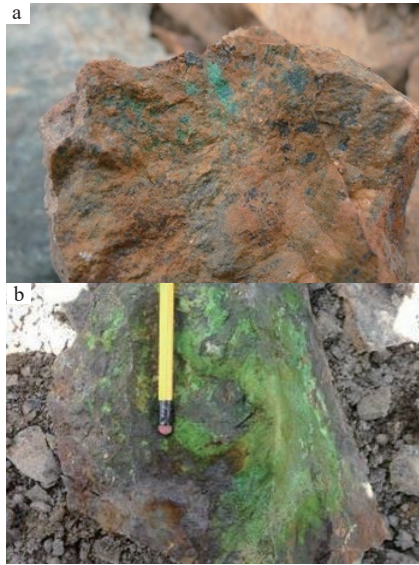


图7 夏日哈木矿区地表的孔雀石化(a)和镍华(b)
Fig.7 Malachite (a) and annabergite (b) in the Xiarihamu giant Ni-Co ore deposit

可以判断石头坑德的地壳硫主要来自含星点状硫化物的片麻状花岗岩,该类片麻状花岗岩也存在于夏日哈木矿区。该片麻状花岗岩的混染既可以为岩浆提供地壳硫又可以提供 SiO_2 , 故该含星点状的片麻状花岗岩很可能是成矿的有利围岩。

然而在石头坑德的 ZK4001 镍含量最高的位置对应了最低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (图 8), 通常 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 越高, 代表的地壳混染程度越大。故我们判断在 ZK4001 岩相中的地壳混染并不利于成矿, 甚至抑

制了硫化物饱和作用。ZK4001 的围岩为无硫化物大理岩, 无硫化物大理岩的混染是岩浆体系的 CaO 含量升高, 而 CaO 升高抑制硫化物饱和 (Liu et al., 2017), 故在石头坑德的今后勘查中应该避免与无硫化物方解石大理岩接触的地段, 而应该关注岩体中与片麻状花岗岩接触的地段 (Zhang et al., 2018)。

但需要注意的是, 白云质大理岩 (MgO 含量高) 的混染可能是对铜镍矿床成矿有利的, 如: 夏日哈木的 ZK3509 钻孔可见超基性岩侵入到白云质大理岩中, 与大理岩的接触部位可见富品位矿石及绿帘石 (图 9)。基于镁同位素研究, Chen et al. (2021) 认为夏日哈木岩体存在富镁碳酸盐岩的影响。白云质大理岩的混染可能是造成其镁同位素特征的一个原因。围岩还有一个重要的功能为: 区别基性—超基性岩的热侵位与蛇绿岩的冷侵位。东昆仑地区一些基性—超基性岩最初被认为是蛇绿岩。图 9 现象为典型的岩浆岩热侵位, 明显区别于蛇绿岩的冷侵位。

4.2 地球化学标志

4.2.1 化探异常

化探异常是勘查中重要的找矿标志之一。1:1 万土壤测量显示夏日哈木 I 号岩体存在以 Ni 为主, 伴生有 Cu、Co 元素的综合异常 1 处, 异常呈条带状北北东向展布, 异常强度高、规模大, 外带和内带基本重合, 外带面积约 0.8 km^2 , 局部达到边界品位。Cu、Ni、Co 峰值分别高达 3564×10^{-6} 、

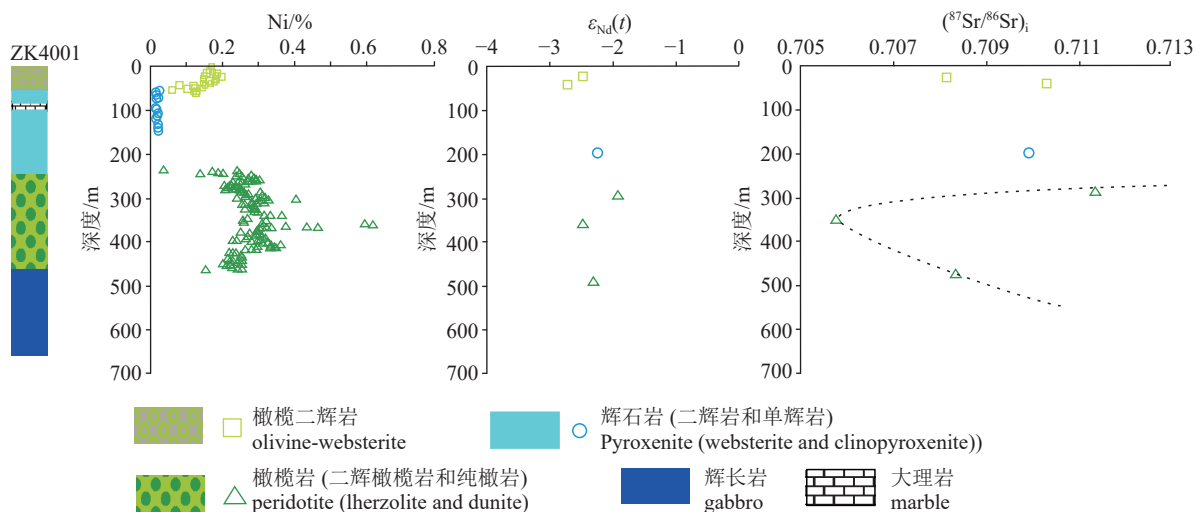


图8 石头坑德矿区 ZK4001 岩相、镍含量与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 的对应关系 (Zhang et al., 2018)
Fig.8 The relationship of nickel content with $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ in Shitoukengde Cu-Ni deposit (Zhang et al., 2018)

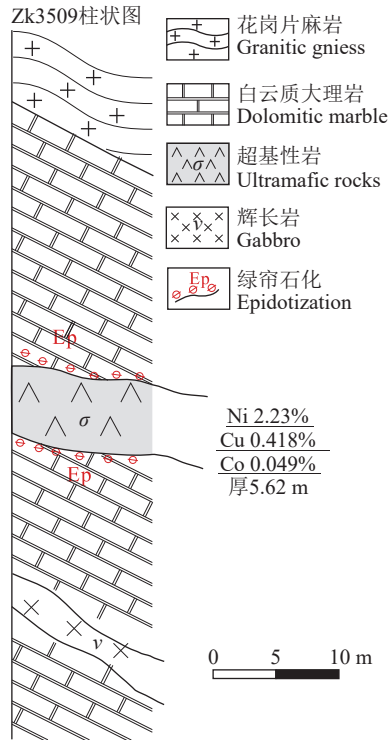


图 9 夏日哈木矿区 ZK3509 超基性岩与白云质大理岩的接触关系

Fig.9 Contact relationship between ultramafic rock and dolomitic marble in Xiarihamu area

11560×10^{-6} 、 302×10^{-6} ，平均值为 247.3×10^{-6} 、 853.9×10^{-6} 、 67.4×10^{-6} (王治安, 2019)。异常内通过 1 : 10000 地质草测圈出一基性—超基性杂岩体，超基性杂岩体岩性主要为辉石岩、辉长岩。1 : 2000 地球化学剖面圈出的化探异常具有以下特点：①Cu = $150 \mu\text{g/g}$ 和 Co = $100 \mu\text{g/g}$ 的等值线与近地表矿体范围对应较好；②Ni = $80 \mu\text{g/g}$ 和 Co = $25 \mu\text{g/g}$ 等值线范围与超镁铁质岩体的出露范围相吻合；③Ni > $160 \mu\text{g/g}$ 异常范围常位于山脚和周边第四系之中，表明 Ni 在地表的迁移能力较强，受淋滤作用强烈富集(赵海超等, 2018)。通过 1 : 2000 探槽样品缩小异常异常范围。青海省第五地质矿产勘查院对圈出的异常经深部钻孔验证，圈出铜镍钴矿体，矿体一般长 80~1200 m，厚度 3.0~281.81 m，镍品位 0.05×10^{-2} ~ 4.87×10^{-2} ，钴品位 0.004×10^{-2} ~ 0.21×10^{-2} ，铜品位为 0.02×10^{-2} ~ 4.34×10^{-2} (王治安, 2019)。

4.2.2 矿物学标志

铜镍矿中最核心的金属硫化物为镍黄铁矿。成铜镍矿的夏日哈木和石头坑德基性—超基性岩

的金属硫化物以磁黄铁矿和镍黄铁矿为主，含少量的黄铜矿；不成矿的开木琪岩体以磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿为主，含少量的镍黄铁矿。

东昆仑地区达到铜镍工业矿床的基性—超基性岩体含的斜方辉石明显要高于单斜辉石，比如有方辉橄榄岩或斜方辉石岩，而开木琪岩体以单斜辉石为主，尽管有二辉岩，但斜方辉石较少，是成矿的不利因素(Liu et al., 2019)；东天山含矿与非含矿岩体也有类似规律(秦克章等, 2012)。

不成矿的开木琪岩体、冰沟南岩体的橄榄石相对夏日哈木的橄榄石具有明显低的 MgO、NiO、Fo、SiO₂ 含量，但有高的 CaO 和 FeO 含量(图 10)，且开木琪的单斜辉石相对夏日哈木矿区的单斜辉石具有相对高的 FeO 和 CaO 含量(图 10)。可以推测不成矿的开木琪岩体相对于成矿的夏日哈木岩体是从一个相对高的 FeO 和 CaO 含量但相对低的 MgO 和 SiO₂ 含量的母岩浆中结晶的。一般来讲，SCSS 与压力、FeO、TiO₂ 和 CaO 的含量呈正比，与 SiO₂ 呈反比(Wendlandt, 1982; Mavrogenes and O'Neill, 1999; Liu et al., 2007; Li and Ripley, 2009; Ripley and Li, 2013; Liu et al., 2017)。含量相对高的 FeO 和 CaO 但相对低的 SiO₂ 母岩浆更不容易达到硫化物饱和，这可能是开木琪岩体不成矿的一个原因。故从矿物成分上，笔者认为成矿的基性—超基性岩岩体的橄榄石和单斜辉石具有相对低的 FeO 和 CaO 含量，但有相对高的 MgO 和 SiO₂ 含量。高 MgO 或者高 Fo 给勘查者直接的启示是：在实际的野外工作中应该注重区域上超基性程度最高的岩性。这与本文总结的东昆仑含矿好的岩体均存在纯橄岩→辉石橄榄岩→辉石岩的分异过程，而成矿不好的岩体虽有含矿的目标岩相辉石岩，但无纯橄岩的结论是一致的。综上分析，笔者大致总结了有成矿潜力的基性—超基性岩的橄榄石和单斜辉石的元素含量范围：橄榄石 MgO > 45%、Fo > 85、CaO < 0.04%、FeO < 15% 的岩体是优选岩体。单斜辉石 CaO < 12% 的岩体是优选岩体。

需要指出的是，上述规律是在一个构造带中总结的，即同一成矿带中 A 岩体比 B 岩体的橄榄石更富 MgO 且更贫 CaO 与 FeO，则 A 岩体相对 B 岩体更容易成矿，但若不在同一构造带中，上述规律需要综合考虑其他因素。如新疆北山裂谷坡一岩体

橄榄石的 MgO 含量高于东天山黄山东岩体的橄榄石 MgO 含量,且坡一橄榄石的 CaO、FeO 含量小于黄山东橄榄石,按道理坡一岩体更容易硫化物饱和,本应表现为硫化物更多,但事实是黄山东硫化物更多, Cu-Ni 品位更富,这其中的原因是坡一的地壳硫混染程度明显低于黄山东(Liu et al., 2015)。故勘查评价时矿物指标需要结合其他因素综合考虑。

4.3 地球物理标志

4.3.1 磁法

通常超基性岩体磁异常 ΔT 异常一般 300~1000 nT, 高达 1600 nT, ΔT 曲线形态不规则, 反映岩体磁性极不均匀, 辉长岩 ΔT 值一般 200~300 nT, 最高也在 500 nT 以下, 围岩多为弱一无磁性特征反映。故地面磁法扫面(特别是 1:10 万和 1:5 万航磁, 以及矿产地质调查中的 1:5 万、1:1 万高精度磁测)过程可以快速圈定出露、或埋藏浅的超基性岩体(刘月高等, 2019; Xiong, 2021; 黄旭钊等, 2022)。以开木棋岩体为例 1:1 万高精度磁法圈定的磁异常与基性-超基性岩出露的范围大

体一致(图 11a)。针对 1:1 万地面磁测资料可以通过 3D 磁化率反演来推测约束 300 m 以浅超基性岩体的空间分布特征。3D 磁化率成像属于位场反演问题定量的磁法解释方法, 它是将地下介质剖分为多层多块网格状磁化率模型, 在空间域构建目标函数然后用最优化反演算法进行求解, 从而获得地下磁化率不均匀分布的特征(Liu et al., 2018), 在铜镍矿床勘查(如坡一铜镍矿)中利于可以利用地面的高精度磁测数据(最好是矿区水平, 比如 1:1 万或更大比例尺)通过 3D 磁化率反演来推演超基性岩体空间分布(刘月高等, 2019), 该方法在东昆仑开木棋岩体的勘探中也被认为是可以寻找 500 m 以浅的超基性岩体的, 结合地表 C2 磁异常有辉石岩, 并根据 C2 磁异常三维反演图像确定了辉石岩深部的分布, 成为开木棋第一个钻孔的布置的重要依据(图 11b)。

4.3.2 激电中梯

夏日哈木 HS26 异常 7#勘探线(走向 330°), 有 11 个钻孔控制, 工作程度高, 找矿效果好。激电中梯工作在试验剖面取得的成果见图 12。工作时选

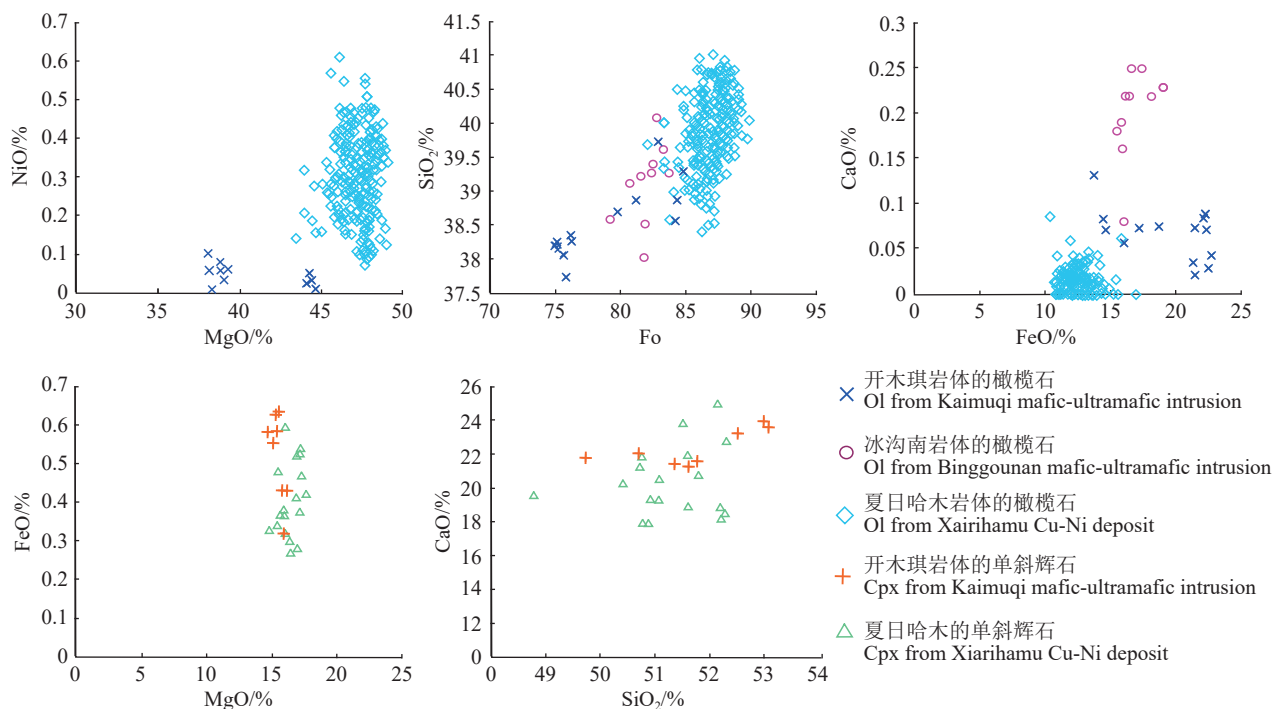


图 10 夏日哈木、冰沟南、开木琪基性-超基性岩的橄榄石和单斜辉石成分对比(Liu et al., 2019)

Fig.10 Comparison of the olivine and clinopyroxene compositions from the Xairihamu giant Cu-Ni deposit and the no mineralized mafic-ultramafic complexes (Liu et al., 2019).

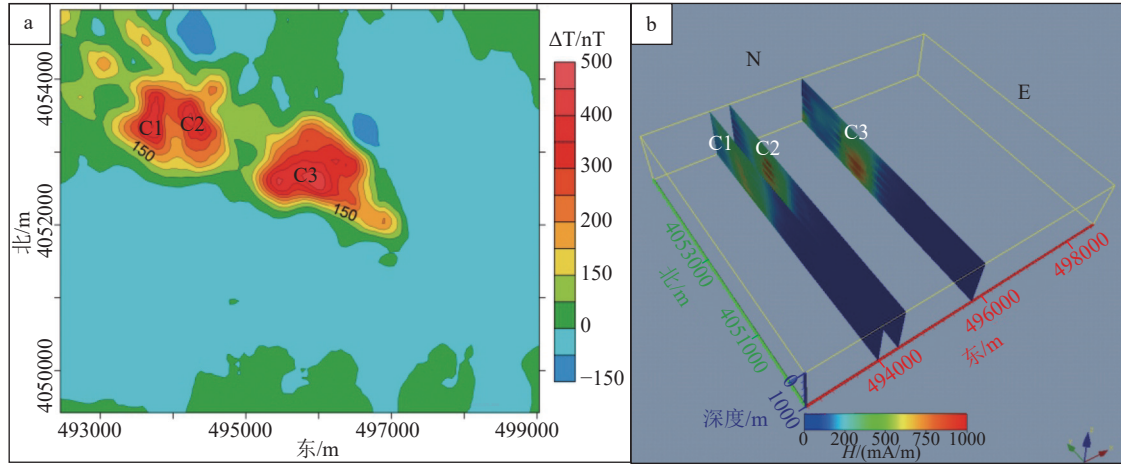


图 11 开木棋岩体地面磁测数据化极图(a)和三维磁化率反演图(b)C1、C2 和 C3 为磁异常编号
Fig.11 Magnetic anomaly polarization map (a) in Kaimuqi area and 3D inversion of magnetic data (b) C1, C2, and C3 are the magnetic anomalies

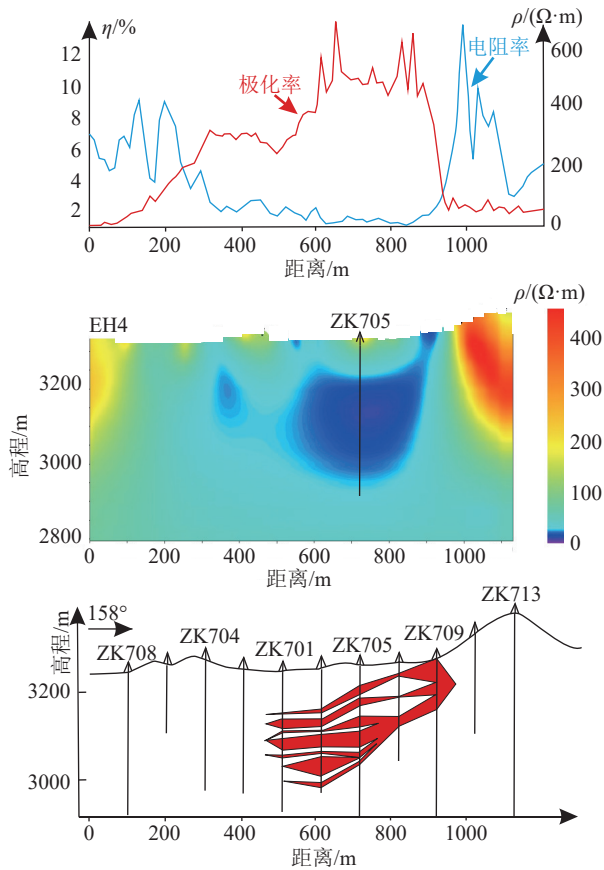


图 12 夏日哈木 7 号线激电中梯和高频大地电磁测深异常图(宋梦馨, 2015)

Fig.12 Anomalies of IP mid-ladder and high-frequency magnetotelluric sounding of Line 7 in Xiarihamu area (Song Mengxin, 2015)

择的参数为: 发射极距=1800 m, 测量距=40 m, 供电周期=32 s, 断电延时=200 ms。从图上可以看出, 在

含矿岩体部位, 点 1400~1900 极化率明显升高, 电阻率明显降低, 且极化率和电阻率的变化与含矿岩体部位吻合的非常好, 表明常规激电测量在该地区是一种非常有效的方法。从以上试验结果可以看出, 激电中梯工作在该地区针对多金属矿(尤其是硫化物矿)是一种非常有效的勘探手段。

4.3.3 高频大地电磁测深法

HS26 异常 7#勘探线的电磁数据采用 1966 年美国 Geometrics 公司和 EMI 公司生产的一种混合源频率域电磁测深系统(频率 1~100 kHz)EH4, 进行高频大地电磁测深法勘探试验和示范工作, 点距为 40 m。由二维反演得到的电性结构(图 12)可以看出, 在测线的左边和右边出现了明显的高阻体, 在测线中部偏右的下方出现了较为明显的低阻异常, 而该异常通过对比钻井验证结果, 该区域存在部分的低阻矿体, 这也说明了勘探精度在横向上较高, 而对于矿体的上下边界识别较好, 这种方法更好地对矿体的埋深边界进行半定量解释。

5 矿床勘查模型

从大地构造层面来讲, 板片断离折返模型可解释东昆仑造山带夏日哈木超大型镍钴矿床形成年龄与高压—超高压榴辉岩退变质年龄一致的现象。在中国及邻区的高压—超高压构造带中寻找与高压—超高压变质榴辉岩退变质年龄一致的基性—超基性岩体可能是下一步铜镍勘查的一个重要方向。

在实际的矿产勘查中,不同的工作阶段需要选择不同的勘查方法,以期在有限的人力、财力、时间内达到良好的勘查效果。本文总结了青藏高原东缘东昆仑地区岩浆型铜镍硫化物的勘查模式(图 13)。

针对东昆仑地区,可以首选利用 1:20 万水系沉积物地球化学和 1:5 万地球化学数据,对 Cu、Ni、Co 异常区进行调查研究,在 1:5 万地质填图的基础上利用 1:5 万航磁资料的化极和向上延拓

图(关注高磁异常)初步识别基性—超基性岩体,根据热侵位特征区分蛇绿岩与基性超基性侵入岩体,并准确识别镍华、黄钾铁矾、孔雀石化。重点关注黑山—那陵郭勒大断裂及昆中断裂附近的基性—超基性岩体,成岩时代为晚志留世—早泥盆世的基性—超基性岩体成矿潜力大,早石炭世基性—超基性岩成矿潜力良好,晚奥陶世—早志留世、中二叠世—早三叠世、中晚三叠世的基性—超基性岩体目前未有成矿岩体。有成矿潜力的岩体有下列特征:(1)有

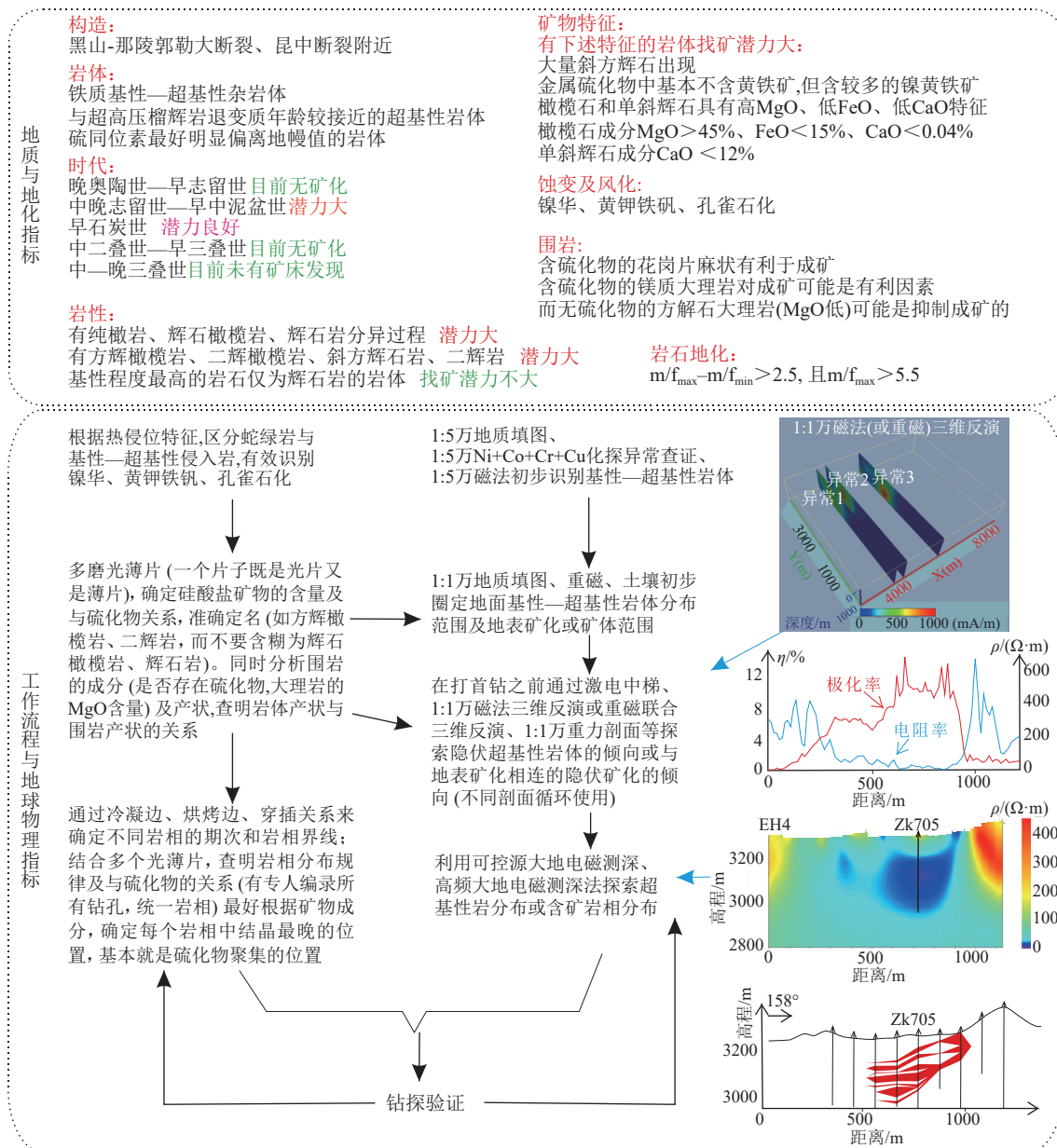


图 13 青海东昆仑地区岩浆硫化物矿床勘查模型

Fig.13 The exploration model of magmatic copper-nickel sulfide deposits in East Kunlun area, Qinghai-Tibetan Plateau

孔雀石化、有黄钾铁矾化、镍华等蚀变或风化;(2)岩体中硫化物明显偏离地幔值是成矿良好的重要指标;(3)存在纯橄岩→辉石橄榄岩→辉石岩的分异的岩体;(4)存在大量斜方辉石的岩体;(5) $m/f_{\max}-m/f_{\min}$ 大于 2.5 且 $m/f_{\max}$ 大于 5.5 的岩体;(6)橄榄石和单斜辉石具有高 MgO、低 FeO 和低 CaO 的岩体;(7)围岩为含硫化物的花岗片麻岩的岩体是重点评价的对象(图 13)。对于东昆仑地区,超基性岩混染无硫化物方解石大理岩围岩可能是不利于成矿的,而混染白云质大理岩和含硫化物的花岗片麻岩很可能是有利于成矿的。

对已经发现的基性-超基性岩体进行 1:1 万地质填图工作和探槽揭露工作,辅以 1:1 万高精度磁法和 1:1 万化探,圈定超基性岩相的范围,查明其岩相分布特征,查明镍华、黄钾铁矾、孔雀石化的分布的范围,进行探槽样分析工作,初步查明矿体或矿化体的分布特征。同时多磨光薄片(一个片子既是光片,又是薄片),确定岩石准确定名及硅酸盐矿物与硫化物的关系,特别需要注意的是:岩石定名为辉石橄榄岩、辉石岩是工作不彻底的,而是要具体到何种辉石橄榄岩,如方辉橄榄岩、二辉橄榄岩、单辉橄榄岩;何种辉石岩,如斜方辉石岩、二辉岩、单斜辉石岩。1:1 万工作中围岩的成分特征有必要分析,比如是否存在硫化物,大理岩是白云质大理岩还是方解石大理岩,对围岩是抑制还是促进硫化物饱和做初步评判,矿体可能更容易产在与促进硫化物饱和的围岩接触的岩相中(图 13)。

在上述工作基础上,在明确含矿岩相、不同超基性岩相、基性岩相的物性特征的基础上,采用激电中梯法、1:1 万磁法三维反演来确定剖面上岩相的倾向及产状,并初步探索矿化地段浅隐伏矿体的位置,然后运用可控源大地电磁测深、高频大地电磁测深法确定超基性岩分布或含矿岩相分布,最后钻探验证(图 13)。在多个钻孔施工后,要通过冷凝边、烘烤边、穿插关系来确定不同岩相的期次与不同岩相的边界,结合多个光薄片查明剖面上岩相的分布规律及与硫化物或矿体的关系,需要注意的是有必要安排一位技术员编录所有钻孔,统一岩相,避免钻孔数量增加后,不同人对一些细微岩相分布

特别是关键标志层认识的差异造成的岩相混乱。如有条件可以根据矿物成分特征,确定每个岩相中结晶最晚的位置,基本就是硫化物聚集的位置,镍品位大于 0.7% 的矿体更容易出现在岩相的中下部或底部,当然有一些后期贯入矿体不一定符合上述规律。细致准确的岩相编录是再次布置前排或后排钻孔最主要的依据。岩相编录、物探、钻孔需不断反复循环验证(图 13)。

6 结 论

(1)在中国及邻区的高压—超高压构造带中寻找与高压—超高压变质榴辉岩退变质年龄一致的基性-超基性岩体可能是下一步岩浆型铜镍钴矿床勘查的一个重要方向。

(2)快速识别风化及蚀变、正确区分蛇绿岩与侵位超基性岩体、准确厘清岩浆期次与矿物特征(种类、成分、粒度)的剖面变化规律是岩浆型铜镍钴硫化物矿床勘查的关键。对于单期的超基性岩相,其顶部、底部、中部、中下部是矿体优选位置,具体需结合结晶顺序和围岩对硫化物饱和是抑制还是促进作用来综合分析。镍品位大于 0.7% 的矿体更容易出现在岩相的中下部或底部。

(3)成矿潜力大的岩体具备下列特征:尖晶石(铬铁矿)的 $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ 摩尔比 <0.3 、橄榄石和辉石富 Mg 贫 Fe 和 Ca、存在大量斜方辉石、存在纯橄岩→辉石橄榄岩→辉石岩的分异、 $m/f_{\max}-m/f_{\min}$ 大于 2.5 且 $m/f_{\max}$ 大于 5.5、围岩富硫贫钙。

致谢:在青藏高原缺氧的高海拔与气候多变的环境下,得到了青海省第五地质矿产勘查院、青海省有色第三地质勘查院、青海省地质调查院、中陕核工业集团有限公司等多家一线勘查单位的大力协助与指导,致敬野外一线艰苦卓绝的奋斗者、勘探者!感谢审稿专家提出的建设性意见!

注释

①青海省第五地质矿产勘查院. 2014. 青海省格尔木市夏日哈木铜镍矿区 HS26 号异常区详查报告 [R].

②四川地矿局 108 地质队. 2016. 石头坑德铜镍矿地质调查报告 [R].

③青海地质调查院. 2012. 青海东昆仑拉陵灶火地区 1:50000 区域地质调查 [R].

References

- Ao Cong, Sun Fengyue, Li Bile, Wang Guan, Li Liang, Li Shijin, Zhao Junwei. 2015. U–Pb dating, geochemistry and tectonic implications of Xiaojianshan gabbro in Qimantage Mountain, Eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 1176–1184 (in Chinese with English abstract).
- Ballhaus C, Berry R F, Green D H. 1991. High pressure experimental calibration of the olivine–orthopyroxene–spinel oxygen geobarometer: Implications for the oxidation state of the upper mantle[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(1): 27–40.
- Barnes S J, Godel B, Gürer D, Brenan J M, Robertson J, Paterson D. 2013. Sulfide–Olivine Fe–Ni exchange and the origin of anomalously Ni rich magmatic sulfides[J]. *Economic Geology*, 108(8): 1971–1982.
- Bi H Z, Song S G, Dong J L, Yang L M, Qi S S, Allen M B. 2018. First discovery of coesite in eclogite from East Kunlun, northwest China[J]. *Science Bulletin*, 63(23): 1536–1538.
- Bian Qiantao, Luo Xiaoquan, Li Hongshen, Chen Haihong, Zhao Dasheng, Li Dihui. 1999. Discovery of Early Paleozoic and Early Carboniferous–Early Permian ophiolites in the A'nyemaqen, Qinghai province, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 523–524 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jing, Xie Zhiyong, Li Bin, Tan Shengxiang, Ren Hua, Zhang Qimei, Li Yan. 2013. Petrogenesis of Devonian intrusive rocks in Lalingzaohuo area, Eastern Kunlun, and its geological significance[J]. *Journal of Mineralogy & Petrology*, 33(3): 26–34 (in Chinese with English abstract).
- Chen L, Song X, Hu R, Yu S, Yi J, Kang J, Huang K. 2021. Mg–Sr–Nd isotopic insights into petrogenesis of the Xiarihamu mafic–ultramafic intrusion, northern Tibetan plateau, China[J]. *Journal of Petrology*, 62(2): egaal13.
- Dong Y, He D, Sun S, Liu X, Zhou X, Zhang F, Yang Z, Cheng B, Zhao G, Li J. 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, Jiang C, Tang Z, Xia M, Xia Z, Ling J, Zhou W, Wang B. 2017. Discovery of the Dagele eclogite in East Kunlun, Western China and its zircon SHRIMP U–Pb ages: New constrains on the Central Kunlun Suture Zone[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(3): 1153–1154.
- Du Wei, Jiang Changyi, Ling Jinlan, Zhou Wei, Xia Mingzhe, Xia Zhaoede. 2017. Zircon SHRIMP U–Pb geochronology, geochemistry and implications of No. II intrusion in Xiarihamu Cu–Ni deposit, East Kunlun Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 36(05): 1185–1196 (in Chinese with English abstract).
- Duan Jianhua, Zhang Zhaowei, Qi Changwei, Wang Yalei, Qian Bing, Zhang Jiangwei, Mi Jiaru, You Minxin, Liu Yuegao. 2017. 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*, 53(05): 880–888 (in Chinese with English abstract).
- Duan Xuepeng, Meng Fancong, Fan Yazhou. 2019. The constraints of kaersutite and pargasite on metallogeny in Xiarihamu mafic–ultramafic intrusion, East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(6): 1819–1832 (in Chinese with English abstract).
- Enami M. 1990. Quartz pseudomorph after coesite in eclogites from Shandong Province, east China[J]. *American Mineralogist*, 75(3): 381–386.
- Fan D, Tan S, Wang X, Qin Z, Zhao J, Yang L, Zhang W, Li X, Yan Z, Yang G, Li L. 2023. Geochronology, petrogenesis and geodynamic setting of the Kaimuqi mafic–ultramafic and dioritic intrusions in the Eastern Kunlun Orogen, NW China[J]. *Minerals*, 13(1): 73.
- Feng Cengyou, Wang Song, Li Guochen, Ma Shengchao, Li Dongsheng. 2012. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665–678 (in Chinese with English abstract).
- Fu Piaoer. 2012. Ore Genesis of Late–Paleozoic Cu–Ni Sulfide Deposit in North Xinjiang, China: Constraints from Geochemical Data and Volatile Compositions[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 87 (in Chinese with English abstract).
- Fu Y Z, Peng Z M, Wang G Z, Hu J F, Guan J L, Zhang J, Zhang Z, Liu Y H, Hao Z. 2021. Petrology and metamorphism of glaucophane eclogites in Changning–Menglian suture zone, Bangbing area, southeast Tibetan Plateau: An evidence for Paleo–Tethyan subduction[J]. *China Geology*, 49(1): 111–125.
- Gan Caihong. 2014. Petrology, Geochemistry, U–Pb Dating and Hf Isotopic Composition of Zircons in Igneous Rocks from East Kunlun orogen, Qinghai[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–83 (in Chinese with English abstract).
- Gao X, Thiemens M H. 1993. Variations of the isotopic composition of sulfur in enstatite and ordinary chondrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(13): 3171–3176.
- Guo Xianzheng, Jia Qunzi, Li Jinchao, Kong Huilei, Yao Xuegang, Mi Jiaru, Qian Bing, Wang Yu. 2018. Zircon U–Pb Geochronology and Geochemistry and Their Geological Significances of Eclogites from East Kunlun High–Pressure Metamorphic Belt[J]. *Earth Science*, 43(12): 4300–4318 (in Chinese with English abstract).
- Guo Feng, Wang Panxi, Wang Zhenning, Feng Naiqi. 2020. Geochemical and geochronology characteristics of retrograde eclogite in Xiarihamu area, East Kunlun Mountains, and its geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40(4): 45–55 (in Chinese with English abstract).
- He Shuyue, Sun Feifei, Li Yunping, Li Dongsheng, Yu Miao, Qian Ye, Liu Yongle, Bai Guolong, Zhao Mengqi, Zhang Peng, Zhang Aikui, Ma Shenglong, Liu Guoyan, Liu Zhigang. 2017. Geochemical and geochronological significance of the Binggounan garbbro in the Qiman Tage Region, Qinghai Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(4): 582–592 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Lu Zhanwu, Xu Bo, Wang Changming, Zhang Hongrui. 2020. Growth, thickening and

- evolution of the thickened crust of the Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(10): 2797–2815 (in Chinese with English abstract).
- Hu C, Li M, Feng C, Zha X, Meng J. 2023. Petrogenesis and metallogenic potential of the early devonian Yugusayi mafic-ultramafic complex in Qimantagh, East Kunlun orogenic belt[J]. *International Geology Review*, 65(7): 1056–1076.
- Huang Jiqing. 1984. New researches on the tectonic characteristics of China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (9): 5–18 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xuzhao, Fan Zhengguo, He Jingzi, Ge Tengfei, Wang Sixun, Man Yi, Wang Peng, Li Jun, Wang Heng. 2022. A collaborative airborne, ground, and borehole exploration technology system for concealed magmatic copper-nickel deposits[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(3): 597–607 (in Chinese with English abstract).
- Jia L, Chen Y, Su B, Mao Q, Zhang D. 2022a. Oxygen-fugacity evolution of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in East Kunlun: Insights from Cr-spinel composition[J]. *American Mineralogist*, 107(10): 1968–1981.
- Jia L, Chen Y, Mao Q, Zhang D, Yuan J, Li X, Wu S, Zhang D. 2022b. Simultaneous in-situ determination of major, trace elements and $\text{Fe}^{3+}/\Sigma \text{Fe}$ in spinel using EPMA[J]. *Atomic Spectroscopy*, 43(1): 42–52.
- Jia L, Meng F, Feng H. 2018. The Wenquan ultramafic rocks in the Central East Kunlun Fault zone, Qinghai-Tibet Plateau—crustal relics of the Paleo-Tethys ocean[J]. *Mineralogy and Petrology*, 112(3): 317–339.
- Jia L H, Mao J W, Li B L, Zhang D Y, Sun T T. 2021. Geochronology and petrogenesis of the Late Silurian Shitoukengde mafic-ultramafic intrusion, 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.
- Jia Lihui, Meng Fancong, Feng Huibin. 2014. Fluid activity during eclogite-facies peak metamorphism: Evidence from a quartz vein in eclogite in the East Kunlun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2339–2350 (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 Nibearing 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).
- Jiang Chunfa. 2004. An introduction to opening-closing tectonics[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 200–207 (in Chinese with English abstract).
- Jiang J, Zhu Y. 2017. Geology and geochemistry of the Jianchaling hydrothermal nickel deposit: T - pH - $f\text{O}_2$ - $f\text{S}_2$ conditions and nickel precipitation mechanism[J]. *Ore Geology Reviews*, 91: 216–235.
- Jugo P J. 2009. Sulfur content at sulfide saturation in oxidized magmas[J]. *Geology*, 37(5): 415–418.
- Kong Huilei, Li Jinchao, Guo Xianzheng, Yao Xuegang, Jia Qunzi. 2019a. The discovery of Early Devonian pyroxene peridotite from the Xiwangmu magmatic Ni-Cu sulfide ore spot in East Kunlun Mountains[J]. *Geology in China*, 46(1): 205–206 (in Chinese with English abstract).
- Kong Huilei, Li Jinchao, Li Yazhi, Jia Qunzi, Guo Xianzheng. 2017. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and its geological significance of the Jiadang gabbro in the eastern section of East Kunlun, Qinghai Province[J]. *Geology and Exploration*, 53(5): 889–902 (in Chinese with English abstract).
- Kong Huilei, Li Jinchao, Li Yazhi, Jia Qunzi, Guo Xianzheng, Zhang Bin. 2018. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Jiadang olivine gabbro in the eastern section of East Kunlun, Qinghai Province and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 964–979 (in Chinese with English abstract).
- Kong Huilei, Li Jinchao, Jia Qunzi, Guo Xianzheng, Wang Yu, Yao Xuegang, Li Yazhi. 2021. Petrogenesis of Xiwangmu olivine gabbro in East Kunlun: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. *Geology in China*, 48(1): 173–188 (in Chinese with English abstract).
- Kong Huilei, Li Yazhi, Li Jinchao, Jia Qunzi, Guo Xianzheng, Zhang Bin. 2019b. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Xiwangmu olivine pyroxenite in East Kunlun[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(3): 440–452 (in Chinese with English abstract).
- Labidi J, Cartigny P, Moreira M. 2013. Non-chondritic sulphur isotope composition of the terrestrial mantle[J]. *Nature*, 501(7466): 208–211.
- Lacono-Marziano G, Ferraina C, Gaillard F, Carlo I, Arndt N. 2017. Assimilation of sulfate and carbonaceous rocks: Experimental study, thermodynamic modeling and application to the Noril'sk-Talnakh region (Russia)[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 399–413.
- Li C, 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, Ripley E M, Naldrett A J, Schmitt A K, Moore C H. 2009. Magmatic anhydrite-sulfide assemblages in the plumbing system of the Siberian Traps[J]. *Geology*, 37(3): 259–262.
- 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: 224–240.
- Li H R, Qian Y, Sun F Y, Sun J L, Wang G. 2020. Zircon U-Pb dating and sulfide Re-Os isotopes of the Xiarihamu Cu-Ni sulfide deposit in Qinghai Province, Northwestern China[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 57(8): 885–902.
- Li Jianping. 2016. The Ore-forming Magmatism of Xiarihamu Ni-Cu Sulfide Deposit in Eastern Kunlun Orogenic Belt, China: Constraints from Petrochemistry and Volatile Geochemistry[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 1–64 (in Chinese with English abstract).
- Li L, Sun F Y, Li B L, Li S J, Chen G J, Wang W, Yan J M, Zhao T F, Dong J, Zhang D X. 2018. Geochronology, geochemistry and

- Sm-Nd-Pb-Hf isotopes of No. I Complex from the Shitoukengde Ni-Cu sulfide deposit in the Eastern Kunlun Orogen, Western China: Implications for the magmatic source, geodynamic setting and genesis[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(1): 106–126.
- Li L, Zhang D, Tan S, Sun F, Wang C, Zhao T, Li S, Yang Y. 2021. The parental magma composition, crustal contamination process, and metallogenesis of the Shitoukengde Ni-Cu sulfide deposit in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Resource Geology*, 71: 339–62.
- Li R B, Pei X Z, Li Z C, Pei L, Chen G C, Liu Z Q, Chen Y X, Liu C J, Wang M, Zhang M. 2022. Paleo-tethyan ocean evolution and indosinian orogenesis in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. *Minerals*, 12: 1590.
- Li Shijin., Sun Fengyue, Gao Yongwei, Zhao Junwei, Li Liansong, Yang Qian. 2012. The theoretical guidance and the practice of small intrusions forming large deposits: The enlightenment and significance for searching breakthrough of Cu-Ni sulfide deposit in Xiarihamu, East Kunlun, Qinghai[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 185–191 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 2015. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China[J]. *Geology in China*, 42(3): 365–380 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan. 2022. Study of ore-forming theoretical innovation and prospecting breakthrough of magmatic copper-nickel-cobalt sulfide deposits in China[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 793–820 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan, Wang Yalei, Qian Bing, Liu Yuegao, Han Yixiao. 2020. Discussion on the formation of magmatic Cu-Ni-Co sulfide deposits in margin of Tarim Block[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 276–293 (in Chinese with English abstract).
- Li X H, Su L, Chung S L, Li Z X, Liu Y, Song B, Liu D Y. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the 825 Ma south China mantle plume? [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(11): 1–16.
- Li Yulong, Cai Shengshun, Chang Tao, Hu Jichun, Chen Jian, Shu Shulan. 2018. The new evidence of Permian ocean-continent subduction in the east section of East Kunlun: Constraint from U-Pb age dating of Xiawanggou gabbro[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 38(1): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- Liou J G, Ernst W G, Song S G, Jahn B M. 2009. Tectonics and HP-UHP metamorphism of northern Tibet – preface[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3): 191–198.
- Liu Bin, Ma Changqian, Jiang Hongan, Guo Pan, Zhang Jinyang, Xiong Fuhao. 2013. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 2093–2106 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Ma Changqian, Zhang Jinyang, Xiong Fuhao, Huang Jian, Jiang Hongan. 2012. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1785–1807 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chendong, Mo Xuexue, Luo Zhaohua, Yu Xuehui, Chen Hongwei, Li Shuwei, Zhao Xin. 2004. Crust-mantle magma mixing in East Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP chronology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 596–602 (in Chinese with English abstract).
- Liu S, Fedi M, Hu X, Ou Y, Baniamarian J, Zuo B, Liu Y, Zhu R. 2018. 3D inversion of magnetic data in the simultaneous presence of significant remanent magnetization and self-demagnetization: Example from Daye iron-ore deposit, Hubei Province, China[J]. *Geophysical Journal International*, 215: 614–634.
- Liu Y, Samaha N T, Baker D R. 2007. Sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in magmatic silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(7): 1783–1799.
- Liu Y, Chou I M, Chen J, Wu N, Li W, Bagas L, Ren M, Liu Z, Mei S, Wang L. 2023. Oldhamite: A new link in upper mantle for C-O-S-Ca cycles and an indicator for planetary habitability[J]. *National Science Review* 10: nwad159.
- Liu Y G, Chen Z G, Li W Y, Xu X H, Kou X, Jia Q Z, Zhang Z W, Liu F, Wang Y L, You M X. 2019. 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*, 198: 41–53.
- Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, Zhang Z W, Wang Z A, Zhang Z B, Zhang J W, Qian B. 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, Li W Y, Lü X B, Liu Y R, Ruan B X, Liu X. 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, Lü X B, Yang L S, Wang H F, Meng Y F, Yi Q, Zhang B, Wu J L, Ma J. 2015. Metallogeny of the Poyi magmatic Cu-Ni deposit: Revelation from the contrast of PGE and olivine composition with other Cu-Ni sulfide deposits in the Early Permian, Xinjiang, China[J]. *Geosciences Journal*, 19(4): 613–620.
- Liu Yuegao, Lü Xinbiao, Ruan Banxiao, Liu Xiao, Liu Shuang, Feng Jing, Deng Gang, Wang Heng, Zeng Huadong, Wang Peng, Wang Wei, Lu Qiang. 2019. A comprehensive information exploration model for magmatic Cu-Ni sulfide deposits in Beishan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 38(3): 644–666 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Zhang Xiaofei, Liu Zhigang, Chen Guochao, Chen Youxin, Ding Saping, Guo Junfeng. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the two suites of ophiolites at the Buqingshan area of the A'nyemaqen Orogenic Belt in the southern margin of East Kunlun and its tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 185–194 (in Chinese

- with English abstract).
- Luo Mingfei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Li Xiaowei, Huang Xiongfei, Yu Junchuan. 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age dating, petrogenesis and tectonic implications of the Late Triassic granites from the Xiangride area, East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3229–3241 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Ke Shan, Cao Yongqing, Deng Jinfu, Chen Hongwei. 2002. Late Indosinian mantle-derived magmatism in the East Kunlun[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 292–297 (in Chinese with English abstract).
- Mavrogenes J A, O'Neill H S C. 1999. The relative effects of pressure, temperature and oxygen fugacity on the solubility of sulfide in mafic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(7): 1173–1180.
- 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 Jie, Hu Chaobin, Xiao Peixi. 2019. Genesis and tectonic significance of the Yugusayi basic-ultrabasic complex in Qimantage area of East Kunlun[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 35(2): 171–185 (in Chinese with English abstract).
- Meng Qingpeng. 2019. Study on Geological Characteristics and Genesis of Langmuri Copper-Nickel Deposit in Eastern Kunlun, Qinghai[D]. Changchun: Jilin University, 1–86 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Deng Jinfu, Yu Xuehui, Liu Chengdong, Yuan Wanming, Liu Yunhua. 2007. Granitoids and crustal growth in the East- Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414 (in Chinese with English abstract).
- Norbu N, Li J, Liu Y, Jia Q, Kong H. 2020. Tectonomagmatic setting and Cu-Ni mineralization potential of the Gayahedonggou Complex, Northern Qinghai, Tibetan Plateau, China[J]. *Minerals*, 10(11): 950.
- Pan Tong, Zhang Yong. 2020. Geochemical characteristics and metallogenic response of the eclogite from Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 447–464 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Liu Chengjun, Chen Youxin, Pei Lei, Liu Zhanqing, Chen Guochao, Li Xiaobing, Wang Meng. 2018. Composition feature and formation process of Buqingshan composite accretionary mélange belt in southern margin of East Kunlun orogen[J]. *Earth Science*, 43(12): 4498–4520 (in Chinese with English abstract).
- Peng B, Sun F Y, Li B L, Wang G, Li S J, Zhao T F, Li L, Zhi Y B. 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: 13–28.
- 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).
- Qi Xiaopeng, Fan Xiangang, Yang Jie, Cui Jiantang, Wang Bangyao, Fan Yazhou, Yang Gaoxue, Li Zhen, Chao Wendi. 2016. The discovery of Early Paleozoic eclogite in the upper reaches of Langmuri in eastern East Kunlun Mountains and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(11): 1771–1783 (in Chinese with English abstract).
- Qin Kezhang, Tang Dongmei, Su Benxun, Mao Yajing, Xue Shengchao, Tian Ye, Sun He, San Jinzhu, Xiao Qinghua, Deng Gang. 2012. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, ore-bearing evaluation sign, potential analysis of mineralization of Cu-Ni-bearing Permian mafic-ultramafic complexes, Northern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 45(4): 83–116 (in Chinese with English abstract).
- Ripley E M, Li C. 2013. Sulfide saturation in mafic magmas: is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis?[J]. *Economic Geology*, 108(1): 45–58.
- Sobolev A V, Hofmann A W, Kuzmin D V, Yaxley G M, Arndt N T, Chung S L, Danyushevsky L V, Elliott T, Frey F A, Garcia M O, Gurenko A A, Kamenetsky V S, Kerr A C, Krivolutsкая N A, Matvienkov V V, Nikogosian I K, Rocholl A, Sigurdsson I A, Sushchevskaya N M, Teklay M. 2007. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts[J]. *Science*, 316(5823): 412–417.
- Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, Nikogosian I K. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts[J]. *Nature*, 434(7033): 590.
- Song Mengxin. 2015. Xiarihamu Cu-Ni Deposit Comprehensive Interpretation of Electromagnetic Data Research[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–58 (in Chinese with English abstract).
- Song S, Bi H, Qi S, Yang L, Allen M B, Niu Y, Su L, Li W. 2018. HP-UHP metamorphic belt in the East Kunlun Orogen: Final closure of the Proto-Tethys Ocean and formation of the Pan-North-China Continent[J]. *Journal of Petrology*, 59(11): 2043–2060.
- Song S, Niu Y, Su L, Zhang C, Zhang L. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 129: 59–84.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, She Y W, Liu C Z, Dang X Y, Yang Q A, Wu S K. 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.
- Sun Yangui, Zhang Guowei, Wang Jin, Zhan Fayu, Zhang Zhiyong. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the basic sill swarms of two periods in the junction area of Qinling and Kunlun and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 65–71 (in Chinese with English abstract).
- Tian Nan. 2022. Metallogenesis of Cu-Ni Sulfide Deposits in the Eastern Section of East Kunlun Orogenic belt, Qinghai

- Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–257 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bingzhang, Luo Zhaohua, Pan Tong, Song Taizhong, Xiao Peixi, Zhang Zhiqing. 2012. Petrotectonic assemblages and LA–ICP–MS zircon U–Pb age of Early Paleozoic volcanic rocks in Qimantag area, Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(6): 860–874 (in Chinese with English abstract).
- Wang C, Zhang Z, Zhang C, Chen C, Li Y, Qian B. 2020. Constraints on sulfide saturation by crustal contamination in the Shitoukengde Cu–Ni deposit, East Kunlun orogenic belt, northern Qinghai–Tibet Plateau, China[J]. *Geosciences Journal*, 24(6): 1–15.
- 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 Guan, Sun Fengyue, Li Bile, Li Shijin, Zhao Junwei, Ao Cong, Yang Qian. 2014. Petrography, Zircon U–Pb geochronology and geochemistry of the mafic–ultramafic intrusion in Xiarihamu Cu–Ni deposit from East Kunlun, with implications for geodynamic setting[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 381–401 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Zhang Tianping, Liang Bin, Chen Nengsong, Zhu Yunhai, Zhu Jie, Bai Yongshan. 1999. Composite ophiolitic melange zone in the central part of the Eastern Kunlun orogenic zone and geological significance of fault belt in central part of eastern section of Eastern Kunlun orogenic zone[J]. *Earth Science*, 24(2): 129–133 (in Chinese with English abstract).
- Wang K Y, Song X Y, Yi J N, Barnes S J, She Y W, Zheng W Q, Schoneveld L E. 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: 103082.
- Wang Ruiting, He Ying, Wang Dongsheng, Liu Minwu. 2003. Re–Os isotopic age and its application to the Jianchaling nickel–copper sulfide deposit, Luyang, Shanxi Province[J]. *Geological Review*, 49(2): 205–211 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qimeng. 2020. Geochemical characteristics and geological significance of eclogite in Airikehansen Area, Dulan County, Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Wang X, Liou J, Mao H. 1989. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 17(12): 1085–1088.
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Zhang Jiangwei, Qian Bing, Liu Yuegao, You Minxin. 2017. Early Mesozoic mantle-derived magmatic events and their geological significance in the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geology & Exploration*, 53(5): 855–866 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhian. 2019. Extraction of Comprehensive Prospecting Information and Application of Xiarihamu Cu–Ni Exploration Area in the East Kunlun, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–51 (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.
- Wu Jianliang, Lü Xinbiao, Feng Jing, Wang Heng, Liu Yuegao, Yin Xianke, Zhang Wei, Liu Wen. 2018. Mineralogical characteristics of chromite from the Poyi mafic–ultramafic intrusion in Beishan, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(2): 348–364 (in Chinese with English abstract).
- Xia Mingzhe, Fan Yazhou, Xia Zhaode, Rui Huichao, Jiang Changyi. 2018. Geochronology, geochemical characteristics and ore-forming conditions of the Dalakuan mafic–ultramafic intrusion, East Kunlun, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2380–2392 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Hu Yunxu, Xie Congrui, Guo Lei, Xi Rengang, Dong Zengchan, Kang Lei. 2014. Study on the Geological Background of the Metallogenic Belt in the Western Section of the Altun–East Kunlun Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–261 (in Chinese).
- Xin W, Sun F, Zhang Y, Fan X, Wang Y, Li L. 2019. Mafic–intermediate igneous rocks in the East Kunlun Orogenic Belt, northwestern China: Petrogenesis and implications for regional geodynamic evolution during the Triassic[J]. *Lithos*, 346: 105159.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian, Zhang Jinyang, Liu Bin, Jiang Hongan, Huang Jian. 2011. Zircon LA–ICP–MS U–Pb dating of Bairiqili gabbro pluton in East Kunlun orogenic belt and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(8): 1196–1202 (in Chinese with English abstract).
- Xiong F, Ma C, Jiang H A, Liu B, Huang J. 2014. Geochronology and geochemistry of Middle Devonian mafic dykes in the East Kunlun orogenic belt, Northern Tibet Plateau: Implications for the transition from Prototethys to Paleotethys orogeny[J]. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 74(2): 225–235.
- Xiong Fuhao, Ma Changqian. 2016. Petrological evidence for the deep subduction of the proto–Tethys oceanic crust in the central East Kunlun[C]//Symposium on New Advances in Resource Environment and Geospatial Information Technology. Chengdu: Sichuan, China (in Chinese).
- Xiong S. 2021. Research achievements of the Qinghai–Tibet Plateau based on 60 years of aeromagnetic surveys[J]. *China Geology*, 4(1): 147–177.
- Yan J, Sun F, Li B, Li L, Zhang W, Yan Z, Zhang Y. 2020. Geochronological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Akechukesai–I mafic–ultramafic complex in the eastern Kunlun area of the northern Tibet Plateau, west China: Insights into ore potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 121: 103468.
- Yan J, Sun F, Li L, Yang Y, Zhang D. 2019a. A slab break-off model for mafic–ultramafic igneous complexes in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibet: insights from Early Palaeozoic accretion related to post-collisional magmatism[J]. *International Geology Review*, 61(10): 1171–1188.
- Yan J, Sun F, Qian Y, Li L, Zhang Y, Yan Z. 2019b. Geochemistry, geochronology, and Hf–S–Pb isotopes of the Akechukesai IV

- mafic-ultramafic complex, Western China[J]. *Minerals*, 9(5): 275.
- Yan J, Sun G, Sun F, Li L, Li H, Gao Z, Hua L, Yan Z. 2019c. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopic compositions of monzogranites and mafic-ultramafic complexes in the Maxingdawannan area, eastern Kunlun orogen, western China: Implications for magma sources, geodynamic setting, and petrogenesis[J]. *Journal of Earth Science*, 30(2): 335–347.
- Yan Wei, Qiu Dianming, Ding Qingfeng, Liu Fei. 2016. Geochronology, petrogenesis, source and its structural significance of Houtougou monzogranite of Wulonggou Area in Eastern Kunlun Orogen[J]. *Journal of Jilin University*, 46(2): 443–460 (in Chinese with English abstract).
- Yang Liu, Zhou Hanwen, Zhu Yunhai, Dai Xiong, Lin Qixiang, Ma Zhanqing, Jian Kunkun, Zhang Minyue. 2014. Geochemical characteristics and LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of intermediate to mafic dyke swarms in Haxiya area, Golmud, Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(6): 804–819 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Xu Z, Dobrzinetskaia L F, Green II H W, Pei X, Shi R, Wu C, Wooden J L, Zhang J, Wan Y. 2003. Discovery of metamorphic diamonds in central China: An indication of a > 4000-km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions[J]. *Terra Nova*, 15(6): 370–379.
- Yang J, Xu Z, Zhang J, Song S, Wu C, Shi R, Li H, Brunel M. 2002. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model[J]. *Terra Nova*, 14(5): 397–404.
- Yang Weiran. 2004. Some problems of opening-closing tectonics[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 195–199 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ximing, Sun Fengyue, Zhao Tuofei, Liu Jinlong, Peng Bo. 2018. Zircon U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of Akechukesai gabbro in East Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(10): 1842–1852 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Wanming, Mo Xuanxue, Wang Xiaohong. 1998. Geochemical characteristics and tectonic setting of the Early Carboniferous volcanic rocks in East Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 17(4): 289–295 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, Li J P, Meng F. 2010. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: Spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(9): 955–978.
- Zhang J, Lei H, Ma C, Li J, Pan Y. 2021. Silurian-Devonian granites and associated intermediate-mafic rocks along the Eastern Kunlun Orogen, western China: Evidence for a prolonged post-collisional lithospheric extension[J]. *Gondwana Research*, 89: 131–146.
- Zhang M, Kamo S L, Li C, Hu P, Ripley E. 2010. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. *Mineralium Deposita* 45(1), 3–9.
- Zhang M, Liu Y, Chen A, Liang K, Yang Y, Xu W. 2023. The tectonic links between Palaeozoic eclogites and mafic magmatic Cu-Ni-Co mineralization in East Kunlun orogenic belt, western China[J]. *International Geology Review*, 65(7): 1158–1178.
- Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, Wang Y L, Ripley E M. 2017. Sr-Nd-Os-S isotope 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 I Shitoukengde mafic-ultramafic complex, East Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 96: 236–246.
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, He Lixin, He Yongsheng, Zhou Gang. 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217–224 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Qian Bing, Wang Yalei, Li Shijin, Liu Changzheng, Zhang Jiangwei, Yang Qian, 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, Li Wenyuan, Qian Bing, Li Wenyuan, Wang Yalei, Zhang Jiangwei, You Minxin, Liu Yuegao. 2017. The discovery of Early Paleozoic eclogite from the Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt: Zircon U-Pb chronologic evidence[J]. *Geology in China*, 44(4): 816–817 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- 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.
- Zhao Caisheng, Yang Fuquan, Dai Junzhi. 2006. Metallogenic age of the Kendekeke Co, Bi, Au deposit in East Kunlun Mountains, Qinghai Province, and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 25(S1): 427–430 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Haichao, Zhang Jinling, Liu Caile, Sun Tingting, Wang Yongde. 2018. Copper-nickel-cobalt sulfide deposit prospecting model of Xiarihamu in Qinghai Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 18(36): 166–174 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Tuofei. 2021. Study on Metallogenesis of Nickel and Copper Deposits in Kaerqueka-Akechukesai Area, Western Segment of the East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–227 (in Chinese with English abstract).

- Zhou Wei. 2016. Petrogenesis of Shitoukengde Mafic-Ultramafic Intrusion and Analysis of its Metallogenic Potential, East Kunlun [D]. Xi'an: Chang'an University, 1-99 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yunhai, Lin Qixiang, Jia Chunxing, Wang Guocan. 2005. Zircon SHRIMP age of Early Paleozoic volcanic rocks in the East Kunlun Orogenic Belt and its geological significance[J]. Science China-Earth Sciences, 35(12): 1112-1119 (in Chinese).

附中文参考文献

- 奥琼, 孙丰月, 李碧乐, 王冠, 李良, 李世金, 赵俊伟. 2015. 东昆仑祁漫塔格地区小尖山辉长岩地球化学特征、U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 39(6): 1176-1184.
- 边千韬, 罗小全, 李红生, 陈海泓, 赵大升, 李涤微. 1999. 阿尼玛卿山早古生代和早石炭—早二叠世蛇绿岩的发现[J]. 地质科学, 34(4): 523-524.
- 陈静, 谢智勇, 李彬, 谈生祥, 任华, 张启梅, 李燕. 2013. 东昆仑拉陵灶火地区泥盆纪侵入岩成因及其地质意义[J]. 矿物岩石, 33(2): 26-34.
- 杜玮, 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 夏明哲, 夏昭德. 2017. 东昆仑夏日哈木铜镍矿床 II 号岩体年代学、地球化学及其意义[J]. 矿床地质, 36(5): 1185-1196.
- 段建华, 张照伟, 祁昌炜, 王亚磊, 钱兵, 张江伟, 弥佳茹, 尤敏鑫, 刘月高. 2017. 东昆仑夏日哈木铜镍矿床 II 号岩体辉长岩形成年龄与找矿潜力[J]. 地质与勘探, 53(5): 880-888.
- 段雪鹏, 孟繁聪, 范亚洲. 2019. 东昆仑夏日哈木镁铁-超镁铁岩中的钛闪石-韭闪石对成矿过程的约束[J]. 岩石学报, 35(6): 1819-1932.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 马圣钊, 李东生. 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): 311-324.
- 傅飘儿. 2012. 新疆北部晚古生代岩浆铜镍硫化物矿床成因: 岩石及流体地球化学制约[D]. 兰州: 兰州大学, 1-87.
- 甘彩红. 2014. 青海东昆仑造山带火成岩岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-83.
- 国显正, 贾群子, 李金超, 孔会磊, 姚学钢, 弥佳茹, 钱兵, 王宇. 2018. 东昆仑高压变质带榴辉岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地球科学, 43(12): 4300-4318.
- 郭峰, 王盘喜, 王振宁, 冯乃琦. 2020. 东昆仑夏日哈木退变质榴辉岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 40(4): 45-55.
- 贾丽辉, 孟繁聪, 冯惠彬. 2014. 榴辉岩相峰期流体活动: 来自东昆仑榴辉岩石英脉的证据[J]. 岩石学报, 30(8): 2339-2350.
- 何书跃, 孙非非, 李云平, 李东生, 于森, 钱烨, 刘永乐, 白国龙, 赵梦琪, 张鹏. 张爱奎, 马生龙, 刘国燕, 刘智刚. 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.
- 侯增谦, 郑远川, 卢占武, 许博, 王长明, 张洪瑞. 2020. 青藏高原巨厚地壳: 生长、加厚与演化[J]. 地质学报, 94(10): 2797-2815.
- 黄汲清. 1984. 中国大地构造特征的新研究[J]. 中国地质科学院院报, (9): 5-18.
- 黄旭钊, 范正国, 何敬梓, 葛藤菲, 王思浔, 满毅, 王鹏, 李军, 王恒. 2022. 隐伏岩浆型铜镍矿空—地—井协同勘查技术体系[J]. 物探与化探, 46(3): 597-607.
- 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.
- 姜春发. 2004. 开合构造概述[J]. 地质通报, 23(3): 200-207.
- 孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 贾群子, 国显正. 2017. 青海东昆仑东段加当辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质与勘探, 53(5): 889-902.
- 孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 贾群子, 国显正, 张斌. 2018. 青海东昆仑东段加当橄辉长岩锆石 U-Pb 年代学, 地球化学及地质意义[J]. 地质学报, 92(5): 964-978.
- 孔会磊, 李金超, 国显正, 姚学钢, 贾群子. 2019a. 青海东昆仑希望沟铜镍矿点发现早泥盆世橄辉岩[J]. 中国地质, 46(1): 205-206.
- 孔会磊, 栗亚芝, 李金超, 贾群子, 国显正, 张斌. 2019b. 东昆仑希望沟橄辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J]. 地质力学学报, 25(3): 440-452.
- 孔会磊, 李金超, 贾群子, 国显正, 王宇, 姚学钢, 栗亚芝. 2021. 东昆仑希望沟橄辉长岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素制约[J]. 中国地质, 48(1): 173-188.
- 李建平. 2016. 东昆仑造山带夏日哈木铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用: 岩石及流体地球化学制约[D]. 兰州: 兰州大学, 1-64.
- 李世金, 孙丰月, 高永旺, 赵俊伟, 李连松, 杨启安. 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.
- 李文渊. 2015. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质, 42(3): 365-380.
- 李文渊, 王亚磊, 钱兵, 刘月高, 韩一筱. 2020. 塔里木陆块周缘岩浆 Cu-Ni-Co 硫化物矿床形成的探讨[J]. 地学前缘, 27(2): 276-293.
- 李文渊. 2022. 中国岩浆铜镍钴硫化物矿床成矿理论创新和找矿突破[J]. 地质力学学报, 28(5): 793-820.
- 李玉龙, 蔡生顺, 常涛, 胡继春, 陈健, 舒树兰. 2018. 东昆仑东段中二叠世洋陆俯冲的新证据: 来自希望沟辉长岩 U-Pb 年龄的约束[J]. 矿物岩石, 38(1): 91-98.
- 刘彬, 马昌前, 蒋红安, 郭盼, 张金阳, 熊富浩. 2013. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换: 来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J]. 岩石学报, 29(6): 2093-2106.
- 刘彬, 马昌前, 张金阳, 熊富浩, 黄坚, 蒋红安. 2012. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示[J]. 岩石学报, 28(6): 1785-1807.
- 刘成东, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 谌宏伟, 李述为, 赵欣. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用: 来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. 科学通报, 49(6): 596-602.
- 刘月高, 吕新彪, 阮班晓, 柳潇, 刘双, 冯京, 邓刚, 王恒, 曾华栋, 王鹏, 王伟, 王磊, 陆强. 2019. 新疆北山早二叠世岩浆型铜镍硫化物矿床综合信息勘查模式[J]. 矿床地质, 38(3): 644-666.
- 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 张晓飞, 刘智刚, 陈国超, 陈有炘, 丁仁平, 郭俊峰. 2011. 东昆仑南缘阿尼玛卿构造带布青山地区两期蛇绿岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其构造意义[J]. 地质学报, 85(2): 185-194.

- 罗明非, 莫宣学, 喻学惠, 李小伟, 黄雄飞, 于峻川. 2014. 东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义[J]. 岩石学报, 30(11): 3229-3241.
- 罗照华, 柯珊, 曹永清, 邓晋福, 谌宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 21(6): 292-297.
- 孟杰, 胡朝斌, 校培喜. 2019. 东昆仑祁漫塔格地区玉古萨依基性超基性岩体成因及构造意义[J]. 华南地质与矿产, 35(2): 171-185.
- 孟庆鹏. 2019. 青海东昆仑浪木日铜镍矿矿床地质特征及成因探讨[D]. 长春: 吉林大学, 1-86.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 谌宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403-414.
- 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 刘成军, 陈有炘, 裴磊, 刘战庆, 陈国超, 李小兵, 王盟. 2018. 东昆仑南缘布青山复合增生型构造混杂岩带组成特征及其形成演化过程[J]. 地球科学, 43(12): 4498-4520.
- 潘彤, 张勇. 2020. 东昆仑夏日哈木铜镍矿区榴辉岩地球化学特征及成矿响应[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 447-464.
- 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.
- 祁晓鹏, 范显刚, 杨杰, 崔建堂, 汪帮耀, 范亚洲, 杨高学, 李真, 晁文迪. 2016. 东昆仑东段浪木日上游早古生代榴辉岩的发现及其意义[J]. 地质通报, 35(11): 1771-1783.
- 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 毛亚晶, 薛胜超, 田野, 孙赫, 三金柱, 肖庆华, 邓刚. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析[J]. 西北地质, 45(4): 83-116.
- 宋梦馨. 2015. 夏日哈木铜镍矿电磁法资料综合解释研究[D]. 北京: 中国地质大学, 1-58.
- 孙延贵, 张国伟, 王瑾, 詹发余, 张智勇. 2004. 秦昆结合区两期基性岩墙群⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年及其构造意义[J]. 地质学报, 78(1): 65-71.
- 田楠. 2022. 青海省东昆仑造山带东段铜镍硫化物矿床成矿作用[D]. 长春: 吉林大学, 1-257.
- 王秉璋, 罗照华, 潘彤, 宋泰忠, 校培喜, 张志青. 2012. 青藏高原祁漫塔格地区早古生代火山岩岩石构造组合和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 31(6): 860-874.
- 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.
- 王冠, 孙丰月, 李碧乐, 李世金, 赵俊伟, 奥琮, 杨启安. 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: 381-401.
- 王国灿, 张天平, 梁斌, 陈能松, 朱云海, 朱杰, 拜永山. 1999. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学, 24(2): 129-133.
- 王瑞廷, 赫英, 王东生, 刘民武. 2003. 略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 49(2): 205-211.
- 王启蒙. 2020. 青海省都兰县艾日克汗森地区榴辉岩地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 53(1): 1-12.
- 王亚磊, 张照伟, 张江伟, 钱兵, 刘月高, 尤敏鑫. 2017. 东昆仑造山带早中生代幔源岩浆事件及其地质意义[J]. 地质与勘探, 53(5): 855-866.
- 王治安. 2019. 青海省东昆仑夏日哈木铜镍矿勘查区综合找矿信息提取及应用[D]. 长春: 吉林大学, 1-51.
- 吴建亮, 吕新彪, 冯金, 王恒, 邓刚, 刘月高, 尹显科, 张伟, 刘文. 2018. 新疆北山坡一基性-超基性岩体铬铁矿矿物学特征及其指示意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(2): 348-364.
- 夏明哲, 范亚洲, 夏昭德, 芮会超, 姜常义. 2018. 新疆东昆仑达拉库岸镁铁-超镁铁质岩体年代学、地球化学及成矿条件[J]. 岩石学报, 34(8): 2380-2392.
- 校培喜, 高晓峰, 胡云绪, 谢从瑞, 过磊, 奚仁刚, 董增产, 康磊. 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, 261.
- 熊富浩, 马昌前, 张金阳, 刘彬, 蒋红安, 黄坚. 2011. 东昆仑造山带白日其利辉长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质通报, 30(8): 1196-1201.
- 熊富浩, 马昌前. 2016. 东昆仑中部原特提斯洋壳深俯冲事件的岩石学证据[C]//资源环境与地学空间信息技术新进展学术讨论会. 成都: 四川.
- 严威, 邱殿明, 丁清峰, 刘飞. 2016. 东昆仑五龙沟地区猴头沟二长花岗岩年龄、成因、源区及其构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(2): 443-460.
- 杨柳, 周汉文, 朱云海, 代雄, 林启祥, 马占青, 营坤坤, 张旻玥. 2014. 青海格尔木哈希牙地区中基性岩墙群地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 33(6): 804-819.
- 杨巍然. 2004. 开合构造研究中的几个问题[J]. 地质通报, 23(3): 195-199.
- 杨锡铭, 孙丰月, 赵拓飞, 刘金龙, 彭勃. 2018. 东昆仑阿克楚克塞地区辉长岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 37(10): 1842-1852.
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华, 王晓红. 1998. 东昆仑早石炭世火山岩的地球化学特征及其构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 17(4): 289-295.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 何立新, 何永胜, 周刚. 2003. 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, 22(3): 217-224.
- 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. 2015. 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, 42(3): 438-451.
- 张照伟, 钱兵, 李文渊, 王亚磊, 张江伟, 尤敏鑫, 刘月高. 2017. 东昆仑夏日哈木铜镍矿区发现早古生代榴辉岩: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. 中国地质, 44(4): 816-817.
- 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.
- 赵财胜, 杨富全, 代军治. 2006. 青海东昆仑肯德可克钴镍金矿床成矿年龄及意义[J]. 矿床地质, 25(S1): 427-430.
- 赵海超, 张金玲, 刘彩乐, 孙婷婷, 王永德. 2018. 青海省夏日哈木铜镍钴硫化物矿床找矿模型[J]. 科学技术与工程, 18(36): 166-174.
- 赵拓飞. 2021. 青海东昆仑西段卡尔却卡-阿克楚克塞地区镍、铜成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 1-227.
- 周伟. 2016. 东昆仑石头坑德镁铁-超镁铁质岩体岩石成因与成矿潜力分析[D]. 西安: 长安大学, 1-99.
- 朱云海, 林启祥, 贾春兴, 王国灿. 2005. 东昆仑造山带早古生代火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 35(12): 1112-1119.