



引文格式: 张照伟, 谭文娟, 全孝勤, 等. 西北地区钴矿资源禀赋特征及产业链分析[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 11–26. DOI: 10.12401/j.nwg.2024012

Citation: ZHANG Zhaowei, TAN Wenjuan, QUAN Xiaoqin, et al. Study on Cobalt Resource Endowment and Its Industry Chain in Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 11–26. DOI: 10.12401/j.nwg.2024012

西北地区钴矿资源禀赋特征及产业链分析

张照伟¹, 谭文娟^{1,*}, 全孝勤², 王亚磊¹, 孙超¹, 谢春林¹, 荆德龙¹

(1. 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 710119; 2. 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 陕西 西安 710119)

摘要: 钴是全球战略性关键矿产, 对国民经济、国家安全和科技发展不可或缺。中国现有钴资源储量较低, 超过 98% 的钴原材料依赖进口, 给国家战略性关键矿产资源供应带来重大安全隐患。因此, 立足国内加强钴矿成矿规律认识、寻找新的资源接续区已迫在眉睫。西北地区钴矿资源禀赋条件优越, 拥有较好成矿地质条件和资源潜力, 展示了巨大的找矿前景。但目前不同类型矿床中钴矿发育特征、赋存状态、富集机制与成矿潜力尚不明确, 缺少针对性的找矿模型与高效的勘查技术方法, 极大地制约了钴资源的找矿新发现。笔者通过西北地区钴矿资源地质分布、成矿特征、控矿条件、找矿标志、找矿潜力的系统梳理, 总结西北地区钴矿资源禀赋特征, 结合钴矿资源产业链、供应链安全, 分析提出西北地区钴矿资源进一步找矿方向和勘查重点, 旨在揭示钴矿资源成矿潜力和找矿新靶区, 支撑服务新一轮找矿突破战略行动, 引领中国钴矿资源找矿新发现, 提升钴矿资源安全供应和保障能力。

关键词: 钴; 资源禀赋; 成矿特征; 找矿潜力; 产业链

中图分类号: P588.1; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0011-16

Study on Cobalt Resource Endowment and Its Industry Chain in Northwestern China

ZHANG Zhaowei¹, TAN Wenjuan^{1,*}, QUAN Xiaoqin², WANG Yalei¹, SUN Chao¹, XIE Chunlin¹, JING Delong¹

(1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Administration, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: Cobalt is a global strategic critical mineral resource, which is of great strategic significance to the national economy, national security, and technological development. More than 98% of cobalt raw materials rely

收稿日期: 2023-09-30; 修回日期: 2024-01-18; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目“昆仑成矿带及西延镍钴锂矿产境内外对比与跨境成矿规律研究(U2244204)”, 陕西省创新能力支撑计划-创新人才推进计划“岩浆作用成矿与找矿创新团队(2020TD-030)”及中国地质调查局项目“全国镍钴矿战略性矿产调查(DD20240128)”联合资助。

作者简介: 张照伟(1976–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩浆镍钴硫化物矿床成矿理论与矿产资源调查评价工作。E-mail: zhaoweiz@126.com。

* 通讯作者: 谭文娟(1980–), 女, 高级工程师, 主要从事区域成矿规律研究与矿产资源潜力评价。E-mail: 781683087@qq.com。

deeply on imports due to its scarcity in China, which brings major security risks to the supply of national strategic key mineral resources. Accordingly, it is urgent to strengthen the study of cobalt metallogenic regularity and to identify the new resource supply areas. Favorable cobalt resource endowment is recognized in Northwest China, possessing well ore-forming geological conditions and resource potential, exhibiting promising exploration prospects. Nevertheless, the development characteristics, occurrence state, enrichment mechanism, and metallogenic potential of different types of cobalt deposits remain unclear. Also, the lack of targeted prospecting models and efficient exploration techniques greatly hinders the discovery of new cobalt resources. Based on a comprehensive review encompassing the geological distribution, metallogenic characteristics, ore-controlling conditions, prospecting indicators as well as industrial chain and supply chain security considerations related to cobalt resources in Northwest China, this paper summarizes the cobalt resource endowment and proposes further prospecting target and exploration focus in this region. The research aims to uncover metallogenic potential and identify new prospecting targets for cobalt resources, support strategic mineral prospecting operations, lead the new discovery of cobalt resources, and enhance the capacity of safe supply and guarantee capability of cobalt resources.

Keywords: cobalt; resource endowment; metallogenic characteristic; prospecting potential; industry chain

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,对于保障国家经济、国防和产业安全等具有至关重要的意义。全球局部地区局势紧张,对全球产业链和供应链造成了极大的冲击,加剧了新能源相关关键矿产(如锂、钴、镍、稀土)的竞争,推动了全球能源和矿产资源格局的重塑。由于金属钴具耐磨、耐热、高强度和强磁性等性能,被广泛应用在航空航天、电池材料、电子电器、超级合金及机械制造等新兴产业领域,对国民经济和国家安全至关重要(侯增谦等, 2020; 张洪瑞等, 2020)。随着新兴产业的高速发展与低碳经济时代的到来,全球对钴资源需求增长迅猛,钴资源的安全供给已引起高度关注(李文渊等, 2020; 张照伟等, 2022)。在大陆钴矿资源中,沉积层控型铜钴矿约占 60%、铜镍硫化物矿床中的 Co 约占 23%、红土型镍钴矿中的 Co 占 15%、其他热液含钴矿床仅占 2%(Schulz et al., 2018; Smith et al., 2021)。除摩洛哥 Bou Azzer 的 Co-Ni-As-Au-Ag 矿床等少数独立钴矿床外,世界上大部分钴金属与铜、铜-镍、铜-金、铜-铁、镍-银-砷-铋等伴生作为副产品利用,独立的工业矿床罕见,这与 Co 的亲铜、亲铁、亲硫的地球化学性质有关(Williams-Jones et al., 2022)。

中国钴资源主体赋存在西北地区,如金川铜镍硫化物矿床含钴金属 17.7 万 t、夏日哈木镍钴硫化物矿床含钴金属 4.29 万 t(张照伟等, 2021)。除伴生在岩浆矿床中的钴资源之外,近几年在新疆蕴都卡拉一带新发现了热液脉型金铜钴矿床,已探获 1.6 万 t 钴金属

(张照伟等, 2023),并且在区域表现了较好的钴矿成矿条件和找矿潜力。目前,中国可利用的钴矿床类型相对单一,主要为岩浆 Ni-Cu(-Co)硫化物矿床(张照伟等, 2023)。尽管上述不同类型钴矿床在中国西北地区均有产出,但 Co 富集机理与成矿模式、成矿规律与找矿潜力、钴资源禀赋特征及产业链与供应链尚不清楚,严重制约了钴资源找矿新发现,亟待解决。笔者从西北地区钴矿资源特征及地质分布入手,分析成矿特征和富集规律,研究钴矿成矿类型与构造-岩浆成矿事件及多圈层物质循环的关系,通过钴矿产业链分析,探讨西北地区钴矿资源找矿潜力和重点勘查地区,旨在助推钴矿成矿潜力的全面、科学评价和高效找矿勘查,提高钴矿资源的自给能力。

1 西北地区钴矿成矿类型及地质分布

1.1 钴矿主要成矿类型

金属钴属于典型的幔源型元素,在地壳中极为分散。Co 元素从地幔源区发生大规模运移、分异和重新分配,进而到地壳浅部富集成矿,经历了多期次超常富集过程,这一过程往往与构造-岩浆事件及多圈层物质循环密切相关(张伟波等, 2018; 赵俊兴等, 2019; 王辉等, 2019; 王焰等, 2020)。含钴矿床类型多样,最主要的是沉积型、岩浆型、红土型及热液脉型(张照伟等, 2022)。

岩浆 Ni-Cu(-Co)硫化物矿床(约占全球 Ni 资源

量40%、Co资源量的15%)多数产于地幔柱相关的裂谷环境(如俄罗斯Noril'sk、甘肃金川)或造山带碰撞后伸展环境(如青海夏日哈木)(张照伟等, 2020), 钴的富集成矿既与地幔熔融程度和母岩浆钴含量有关, 也与Co在硅酸盐熔体和硫化物熔体之间、单硫化物固溶体和硫化物熔体之间的分配系数密切相关, 也可能受到岩浆期后热液过程的改造(李文渊等, 2020)。岩浆硫化物矿床中, Co通过硫化物-硅酸盐液相不混溶而强烈富集于硫化物液相内。这类一般钴品位较高的矿床, 往往容矿岩石为富橄榄石的超镁铁质岩石。并非所有的岩浆硫化物矿床均有Co的富集。聚集于地幔橄榄石中的 Co^{2+} , 通过高程度的地幔部分熔融, 使它进入科马提质和玄武质岩浆内, 通过不混溶(熔离)作用而富集于硫化物液相中。与超镁铁质岩浆有关的岩浆镍钴硫化物矿床的Co/Ni值为1:29, 镁铁质岩浆有关矿床的Co/Ni值为1:21, 但科马提岩有关超镁铁质岩浆矿床的钴品位似乎更高一些, 平均高达0.06%以上, 镁铁质岩浆矿床也可达0.06%, 但平均Co品位约为0.03%(Patten et al., 2013; William et al., 2021)。

沉积型铜钴矿主要产于非洲的刚果(金)。该类型矿床赋存于横跨刚果(金)与赞比亚边境的变沉积岩带中, Co/Cu值平均为1:13, 可高达1:3, Co品位为1.12%~0.06%(Slack et al., 2017)。通过热力学数据和地质信息分析, 现在已经比较明确该类型矿床的Co源于镁铁质和超镁铁质岩石, 通过氧化、富氯热液流体蒸发而富集, 内陆裂谷盆地的碳质沉积使 $f\text{O}_2$ 降低, 从而使Co沉淀而成矿。此外, 由于具有高渗透性, 便于热液流体的汇聚, 含Co沉积地层曾经释放了Co, 是钴成矿的矿源层(Qiu et al., 2021a)。矿化也发育在与基底隆起区域相邻的断层交汇部位, 这些构造发育部位, 钴矿体往往也比较发育。钴矿化与造山作用密切相关, 造山期中-高温变质热液使得Co、Cu金属元素再富集, 并以含矿热液脉状形式在区域上产出。山西中条山钴矿的最新研究进一步揭示了Co的释放、迁移与富集成矿离不开强氧化性的高温、高盐流体(Qiu et al., 2021b)。Co作为亲铁元素, 在地幔中含量相对较高, 而在地壳中极为分散。

红土型镍钴矿由富含橄榄石的纯橄岩和二辉橄榄岩蚀变而成, Co平均品位为0.07%, Co/Ni值1:15, 发育于富橄榄石的超镁铁质岩石或其蛇纹石化的岩石中。热力学模型显示, 源于超镁铁质岩的Co, 通过

偏酸性的流体以 Co^{2+} 态被迁移于红土剖面, 由于Mn氧化物的吸附而富集, 作为水钴矿共生产出。向下氧化物减少, 其效果是阻止了地表钴的溶解。在活动大陆边缘或稳定的克拉通环境下, 超镁铁质岩石经历长期(约1 Ma)且强烈的风化作用, 可导致Ni、Co等元素在风化壳中富集, 形成红土型镍钴矿(Marsh et al., 2013; Mao et al., 2014)。目前, 世界上已知的红土型镍钴矿多位于南北纬26°以内的亚热带-热带地区。中国仅有约1/4区域位于南北纬26°以内, 目前仅在海南和云南地区有一些红土型镍钴发现, 矿数量不多。

热液脉型钴矿床往往与蛇纹岩共生, Co品位可达2%。目前, 主要发现于摩洛哥的布阿泽尔(Bou Azze)地区, 形成于蛇纹岩与石英闪长岩或长英质到中酸性火山岩的接触带内(Bouabdellah et al., 2016)。钴源于相邻的蛇纹石化的橄榄岩。成矿流体被氧化, 派生于蒸发作用而成的高盐卤水, 成矿发生于长英质到中性火成岩为主岩的pH值中和环境中。岩浆热液型Co矿床常与基性-超基性岩具有密切的空间关系, 多受断裂和裂隙构造控制, 形成脉状矿体。该类矿床一般品位较高, 规模相对较小, 常具有Ag-Ni-Co-As-Bi的元素组合特征。

1.2 西北地区钴资源地质分布

中国西北地区已发现钴矿产地约100余处, 主要分布在青海、甘肃、新疆和陕西等省区(图1)。在102处含钴矿床中, 超大型规模矿床1处、大型规模矿床2处、中型规模矿床21处、小型规模矿床29处、矿点49处(表1)。西北地区含钴矿床类型较多, 主要包括岩浆型、沉积型、风化型、VMS型、矽卡岩型、热液脉型及IOCG型等(张照伟等, 2023)。但独立或以钴为主的工业矿床十分稀缺, 钴主要作为伴生组分产于铜、镍、铁等矿床中。西北地区钴矿资源主要产于龙首山-柴达木克拉通周缘、塔里木克拉通东北缘、扬子克拉通西缘等重点区带(图1), 以金川镍钴矿、夏日哈木镍钴矿、德尔尼铜钴矿、驼路沟铜钴矿、煎茶岭镍钴矿、元石山铁钴矿、蕴都卡拉铜钴矿等超大型、大型及中型的岩浆型、沉积型、风化型和脉型含钴矿床为代表, 也是中国钴矿资源最主要的富集地区。

2 钴的成矿作用与主要认识

钴的成矿作用主要有岩浆作用和热液作用。岩浆作用包括上地幔的部分熔融作用、分离结晶作用、

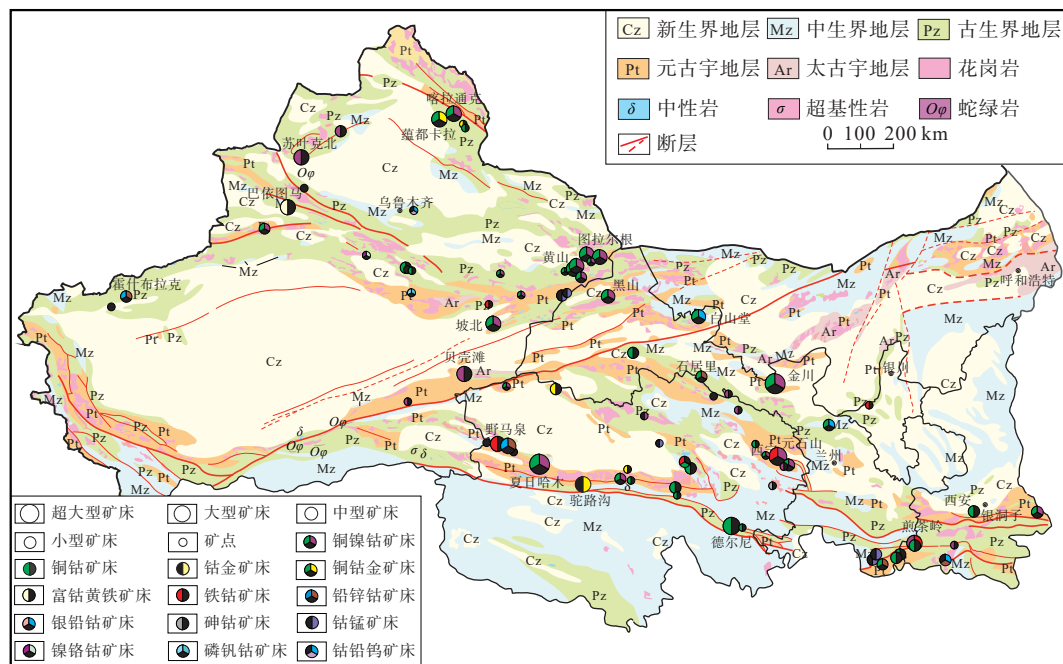


图1 西北地区含钴矿床地质分布略图

Fig. 1 The sketched geological distribution map of Co deposits in Northwestern of China

硫化物液相-硅酸盐熔体之间的不混溶(熔离)作用和岩浆热液作用。其中,最为关键的是硫化物液相-硅酸盐熔体之间的不混溶(熔离)对 Co 的富集作用,或简称为“硫化物-硅酸盐液相不混溶作用”;热液作用主要是非岩浆热液或者是包含一定岩浆热液的混合热液流体,高温或低温,在不同氧逸度和酸碱度条件下对 Co 的迁移和沉淀富集作用。因此,从根本上来说,钴矿的富集作用,无非硫化物-硅酸盐液相不混溶作用和热液流体的迁移及沉淀作用,Co 的源区一定是幔源的超镁铁质和镁铁质岩浆及岩石(Williams-Jones et al., 2022)。

2.1 岩浆成矿作用

橄榄岩中的 Co 含量最高,辉长岩中只有橄榄岩的一半,而花岗岩仅为橄榄岩的 5%。因此,只有高程度的地幔部分熔融形成的超镁铁质-镁铁质岩浆,才可能获得足量的钴。岩浆硫化物矿床要有 Co 的富集,必须是高程度部分熔融的地幔岩的岩浆源区。这是由于 Co 的离子半径介于 Mg 和 Fe 之间,因而 Co 倾向于集中在橄榄石、辉石等铁镁质矿物内,并相容于超镁铁质和镁铁质岩浆的结晶作用。分配系数决定了 Co 富集到橄榄石的能力超过斜方辉石,富集到斜方辉石的能力大于单斜辉石。利用对矿物-硅酸盐熔体分配系数的认识,研究发现橄榄石的结晶是导致 Co 富集的关键因素。尽管,橄榄石和单斜辉石的分离结

晶作用不可能支持钴矿床的形成,但可为热液型和红土型钴矿的成矿提供很好的矿源。

岩浆硫化物矿床钴的富集,主要依靠硫化物-硅酸盐液相的不混溶作用。硫饱和是促使硫化物-硅酸盐液相不混溶作用的关键。要使地幔中的科马提质和玄武质岩浆达到硫饱和, S 的丰度值要分别达到 $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$, 除非地幔高程度地部分熔融(地幔 S 含量约为 200×10^{-6})(Palme et al., 2014), 即使全部部分熔融也不可能达到硫饱和。只有当岩浆喷出或侵入到浅部时,压力突然降低,才可能使硫化物饱和而产生 S 的富集。因此,要使幔源岩浆达到硫饱和,要么改变温度、压力、化学成分和氧逸度(fO_2),要么获得外来的 S, 如从围岩中获取。

硫化物-硅酸盐的钴分配系数已有深入的研究,硫化物液相-硅酸盐熔体的钴分配系数与硅酸盐岩浆的 fS_2 、 fO_2 和 FeO 总的丰度有关。当然,同样也与温度相关(Li et al., 2015), 而且与硅酸盐熔体初始钴的丰度和硅酸盐/硫化物质量比相关。硫化物液相中 Co 的富集不仅取决于分配系数,而且同样与硅酸盐熔体的初始钴的丰度和硅酸盐/硫化物质量比相关。这些相关参数可以被用来计算硫化物液相中 Co 的富集。可见,硫化物液相-硅酸盐熔体的不混溶作用对 Co 的富集具有重要作用(Mungall et al., 2020)。硫化物-硅酸盐液相的不混溶作用,可以使 Co 高效的富集,硫化

物液相的浓度达到能够从硅酸盐熔体(因为与之平衡)有效地萃取 Co, 然后重力沉降而在岩浆房下部或底部堆积, 从而达到具有经济价值的富集。

经历硫化物-硅酸盐液相不混溶作用镁铁质岩浆, 同样可能经历硅酸盐-硅酸盐之间的不混溶而导致富碱, 这种不混溶的特点使长英质熔体从镁铁质熔体中分离。长英质熔体富 Si、Al 和碱, 而主岩镁铁质岩墙/岩床则富 Ca 和 Mg, 特别是富 Fe 而贫 Si。这些侵入体具有少量 Co 的富集($10 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$), 但更重要的是 Co 倾向于分配至残余的贫 Si、富 Fe 的岩浆中, 分配系数为 3。从已获得的 Co 在碱性镁铁质和长英质熔体的分配数据看, 富 Fe 的镁铁质和富 Si 的长英质岩浆之间 Co 的分配系数为 5~17(Lester et al., 2013; Barnes et al., 2016), 变化主要取决于分离的岩浆成分, 以及镁铁质熔体中 Co 的配分与 S、P 和 F 的高丰度值等。因此, 富碱岩浆系统的硅酸盐-硅酸盐液相不混溶可以使得 Co 有效分离, 特别是长英质岩浆相对与共存的镁铁质岩浆比例较大时更为显著, 这主要是 R/N 因子对 Co 丰度值的作用所决定的。但必须指出的是, 碱性岩浆是低程度地幔部分熔融的产物, 而富 Co 的岩浆仅源于地幔高程度的部分熔融, 这是由于 Co 多配分于地幔的橄榄石等铁镁矿物中所决定的。因此, 即使镁铁质-长英质液相不混溶能促使 Co 的富集, 但原始碱性岩浆极低的初始 Co 含量亦很难通过这种作用形成有经济价值的钴矿床。

岩浆作用过程中, 出溶的热液可以在金属钴的迁移中发挥重要作用。例如, 斑岩、铁氧化物-铜-金(IOCG)和矽卡岩矿床均是这种流体的产物, 有时这些矿床中含有经济价值的 Co 富集(Soloviev et al., 2013)。因此, 岩浆-热液转换作用可以形成钴矿床。通过优先分离的 Co 到硫化物液相和经过这种液相的溶解的岩浆-热液流体, 或者通过从共存的硅酸盐熔体中出溶的含水流体产生固体, Co 可以富集到具有经济价值的水平, 就像斑岩系统的 Cu 一样。按照这种模式, 残余的长英质岩浆不是这种金属的最终物源, 而是这种金属被小量硫化物饱和的镁铁质岩浆引入并注入到结晶的长英质岩浆中。钴的观测结果似乎支持这一模式, 有气孔的弧火山岩的 Co/Ni 值, 与来自相同火山岩的镁铁质火山灰中的硫化物熔融包裹体非常相似, 当钴显著配分于硫化物液相时, 后者的 Co 含量可超过 2000×10^{-6} (Vasyukova et al., 2022), 这些液相的溶解通过岩浆-热液流体可使含水相中比预期的

硅酸盐熔体的流体的配分具有更高的 Co 含量。总之, 硅酸盐岩浆出溶的热液流体难以使 Co 富集成矿, 但有共存的硫化物岩浆和其结晶矿物的溶解时有可能形成钴矿床。

2.2 热液成矿作用

常温条件下, 由于水的高介电常数, 单离子 Co^{2+} 在钴矿物溶解中扮演了重要的作用。高温条件下, 只要有适当的配体可用于络合, 钴矿物溶解主要形成络合物相, 当 Co^{2+} 接触酸时, 它会与边缘碱基形成最强的含水络合物(Williams-Jones et al., 2014)。只有边缘碱基是有意义的 Cl 时, 与天然水配体。一般情况下, 钴可能与其他配体, 如二硫化物(软)和氢氧化物(硬)离子, 形成稳定的络合物, 而在含水流体中形成有经济价值的富集。

热液流体对 Co 的迁移作用研究, 目前比较清楚的是, Co 主要以氯的络合物被迁移, 当环境温度为 25 °C 和 150 °C 以上时, 在氯化物活性为 1 和总硫活性为 0.001 的含水流体中, 分别以 CoCl^+ 和 CoCl_4^{2-} 的形式迁移。Cl 低的活性, 特别是在低温和微弱酸性条件下, 对于单 Co^{2+} 离子的迁移是重要的, 二硫化物相仅在微弱酸性到碱性条件下才可能迁移, 但温度必须低于 150 °C。氢氧化物相在钴的热液流体搬运中不可能发挥重要作用, 除非 pH 值非常高。实验表明, 对 Co 的迁移重要性的顺序, 依次是 Cl^- 、 HS^- 和 OH^- 。在氯化物活性为 1、总硫活性为 0.001 和 Co 浓度为 0.01M 条件下, 环境温度为 25 °C, pH 值为 1~3.5 时, CoCl^+ 是主要相; pH 值为 3 时, CoCl^+ 和 Co^{2+} 分别 >60% 和 >20%; pH 值 >3.5 时, CoHS^+ 成了主要相; pH 值为 5~10 时, 有了明显的溶解的钴相。

在适温条件下, 不论是富橄榄石超镁铁岩的风化蚀变, 还是岩浆和热液硫化物矿石的表生富集, 形成的钴矿物主要是水钴矿, 从钴的砷化物和硫砷化物矿石形成的次生富集并不主要。短暂的风化蚀变流体代表的水钴矿形成, 反映了强酸和低氯的特点。可见, 水钴矿的沉淀, 要么是 $f\text{O}_2$ 的增加, 要么 pH 值增加, 是后生变化的主要控制因素(Vasyukova et al., 2022)。热液矿床的形成是硫化物、硫砷化物和砷化物沉淀的结果。就世界范围, 绝大多数钴来源于硫化物。砷化物和硫砷化物只存在于个别矿床, 如摩洛哥布阿泽尔地区和加拿大的钴矿产出区。硫化物矿石主要矿物是方硫钴矿、硫钴矿和钴镍黄铁矿, 控制这些矿物沉淀的因素有 $f\text{O}_2$ 、pH、S 的活性和配体活性。引起这些控

制因素改变的原因有很多,可以是水-岩反应、沸腾(如气相 CO_2 的出溶)和流体混合。实验表明,温度降低和 pH 值增加,钴矿物的稳定性降低,钴镍黄铁矿(Co_9S_8)是高温下, pH 值 7 以上时,沉淀的第一个矿物。 pH 值降低,钴溶解使流体过饱和,而出现钴镍黄铁矿(Co_9S_8)。随着温度和 pH 值进一步降低,流体饱和而相继出现硫钴矿(CoS_2)、方硫钴矿(Co_3S_4)。这一实验结果,可以帮助解释刚果(金)相对低温的热液矿床,为什么常见矿石矿物是硫钴矿和方硫钴矿,而很少见到钴镍黄铁矿(Vasyukova et al., 2022)。只有沸腾和流体混合才能产生高热梯度,冷却就能生成钴矿床。

Co 的硫化物和砷化物稳定性研究表明,Co 的硫化物并不喜欢与 Co 的砷化物共生,除非低 $f\text{O}_2$ 情况下,硫化物和砷化物的稳定性的 $f\text{O}_2$ 是相一致的。反之,As/S 比率在 $f\text{O}_2$ 高的情况下,阻碍流体钴硫化物矿物的饱和度。这就解释了为什么钴硫化物矿物相比 Co 的砷化物矿物见到的要少的原因。Co 在自然温度下作为单 Co^{2+} 离子迁移,并形成 Co^{3+} 矿物水钴矿,还作为主要热液矿石氧化的结果或富橄榄石超镁铁岩遭受风化侵蚀而形成红土型矿床。两种情况下, pH 值的增加是导致矿石矿物沉淀的主要原因(Vasyukova et al., 2022)。在热液条件下,Co 转变为 CoCl_4^{2-} 相和沉积形成硫化物矿物,除非 As 高活性时($f\text{O}_2$ 极低时)。低温条件下(如 $150\text{ }^\circ\text{C}$)控制钴硫化物沉淀的主要因素是 $f\text{O}_2$ 降低,而高温条件下成矿的主要控制因素则是 pH 值的增加。硫活性的变化扮演了一个次要的角色,硫活性降低引起像硫化作用的发生,实际阻止了钴矿的形成,除非有 pH 值的增加。高活性时,钴硫化物矿物被钴硫砷化物和砷化物替代。尽管还缺乏热力学数据的支持,但化学分析显示,低 $f\text{O}_2$ 时,钴砷化物相比钴硫化物是稳定的,随着 As/S 比率增加,它们替代钴硫化物,在 S 活性稳定条件下,相对稳定的 $f\text{O}_2$ 和高的 As 活性, pH 值增加导致钴硫化物被被钴硫砷化物替代,随之转变为砷化物。可以说在许多热液系统, $f\text{O}_2$ 、 pH 值是矿石沉淀的主要控制因素。

热液作用使 Co 被转化为氯络合物(CoCl_4^{2-}),它在低 pH 值和高 $f\text{O}_2$ 条件下是稳定的,沉淀形成硫化物、硫砷化物和砷化物矿物。根据钴硫化物相平衡和溶解度关系,导致钴矿石矿物沉淀的因素是低的 $f\text{O}_2$ 条件,特别是相对低温的沉积-容矿型矿床的形成。高温条件下, pH 值的增加是关键。化学分析表明,就 As 的含水相认识而言,在低 $f\text{O}_2$ 条件下,钴硫砷化物

和砷化物相比钴硫化物是更稳定的。钴硫砷化物(辉钴矿),在 $f\text{O}_2$ 稳定条件下,相对于硫化物和砷化物之间的中间状态是稳定的。因此,硫化物和砷化物两组矿物不能共生(除非砷极高的活性同时硫极低的活性)。同样显示,高的 As/S 比率。例如,高比率支持钴硫砷化物的沉淀永远超过钴硫化物,以及相对高的 $f\text{O}_2$ 值,Co 的砷化物和硫砷化物是稳定的。

2.3 主要认识

鉴于西北地区含钴矿床主要成矿类型和地质分布的特点,无论是钴的岩浆成矿作用,还是热液成矿作用,都与镁铁-超镁铁质岩浆和岩石密切相关(张照伟等, 2023)。含钴矿床成因受多种因素控制,包括母岩浆的 Co 含量、Co 在硅酸盐熔体和硫化物熔体之间与在单硫化物固溶体(MSS)和硫化物熔体之间的分配系数、后期热液活动对矿石的改造程度以及风化作用等(王焰等, 2020)。通常认为,在地幔部分熔融过程中 Co 和 Ni 的地球化学行为相似,幔源熔体的 Co 含量主要受上地幔硅酸盐矿物、硫化物以及氧化物等控制(Shi et al., 2022)。在等压熔融条件下,地幔高程度部分熔融产生的熔体具有较高的 Ni 和 Co 含量(Naldrett et al., 2011)。但是,地幔部分熔融受源区成分和热力学状态、熔融类型和机制、温压条件,以及挥发分含量等众多因素的控制。不仅如此,温度、压力、含水量和地幔热力学状态等因素对幔源岩浆 Co 含量也有一定影响(王焰等, 2020)。

钴矿是从深部地幔元素到浅部工业矿体超常富集的结果。通过不同地质过程(岩浆、热液、表生)镍钴实现共生-分离和 Co 超常富集,形成从深部地幔到浅部地壳再循环到深部的物质循环和 Co 富集成矿(张照伟等, 2022)。硫化物熔离、堆晶矿物结晶均可导致镍钴解耦,硫化物熔体固结、填隙矿物结晶则有利于镍钴配分进入同种矿物。在岩浆阶段,镍钴共生;岩浆热液阶段,镍钴实现解耦;进入热液阶段,Co 可以与 Cu、Fe、Au 等金属元素共伴生富集形成有经济价值的钴矿资源(图 2)。在东准噶尔地区,喀拉通克铜镍矿和蕴都卡拉铜钴矿就是岩浆型含钴矿床与热液型含钴矿床大尺度物质循环的结果,都与区域性深大断裂、火山岩、基性-超基性岩、蛇绿岩及中酸性岩密切相关。当然,目前还仅是浅显的地质认识,深层次的成矿富集机理与关系还需要深入系统研究。

铜镍硫化物矿床中 Co 富集与硫化物熔体的熔离作用有关。硫化物熔体的 Co 含量与 R-factor 有关,也

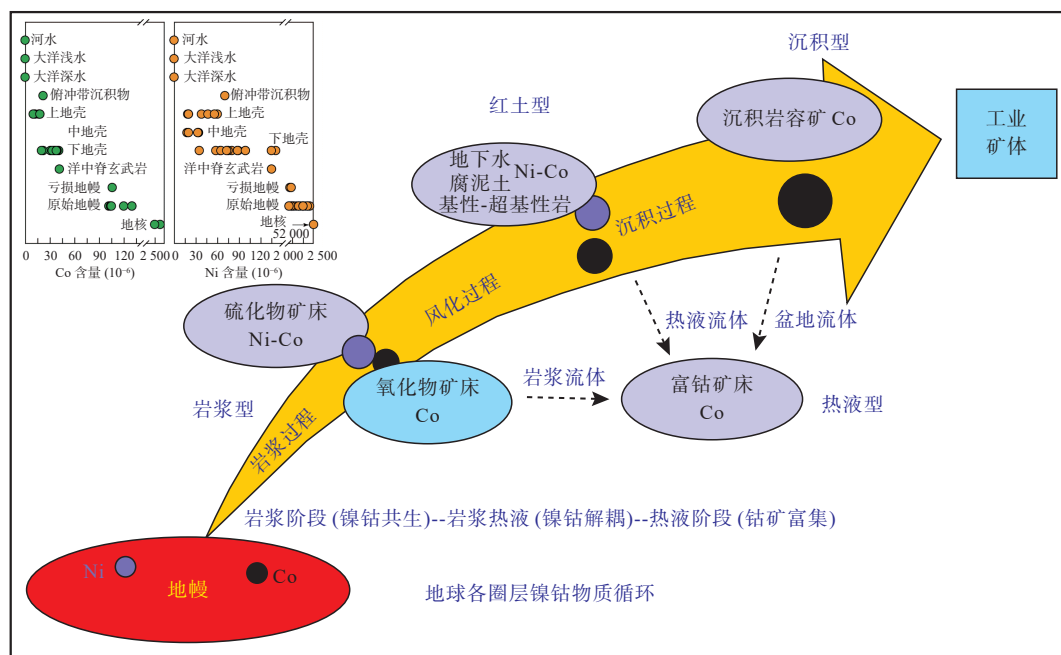


图2 不同地质过程(岩浆、热液、表生)与钴成矿作用示意图

Fig. 2 The sketch map between geological process of magma, hydrothermal solution and supergene and Co mineralization

受其在硫化物与硅酸盐熔体之间的分配系数控制。研究表明,岩浆中可能同时存在 Co^{2+} 和 Co^{3+} , Co 在 MSS 与硫化物熔体间的分配系数略高于 1 (Li et al., 2015), 表明其在硫化物熔体分异过程中只是略倾向于富集在 MSS 中。但是,在大多数铜镍硫化物矿石中,从 MSS 结晶的镍黄铁矿、磁黄铁矿或黄铁矿一般 Co 含量很高,而从中间态硫化物固溶体 (ISS) 结晶的黄铜矿 Co 含量则很低,说明分配系数可能不是控制不同硫化物 Co 含量的唯一因素 (王焰等, 2020)。热液中 Co 的地球化学行为受流体性质、温度和盐度等多种因素影响。已有的实验结果表明,热液中 Co 主要以氯络合物形式迁移,铜镍硫化物矿床晚期或后期热液活动可造成 Co 的活化和进一步富集。例如,铜镍硫化物矿石原生橄榄石和辉石中的 Co 一般很难选冶,但橄榄石经蛇纹石化后可释放 Co, 如果其进入后期热液硫化物晶格,则可提升矿石的 Co 含量 (张照伟等, 2023)。

风化过程中,超镁铁质岩中的 Si、Mg、Cr、Ca 和 Na 等元素被地下水淋滤,而分散在橄榄石、辉石和硫化物中的 Co 则通过蚀变作用被释放并通过吸附或离子交换赋存在铁氧化物(如褐铁矿、针铁矿和赤铁矿)、锰氧化物、绿泥石、利蛇纹石、镍蛇纹石、高岭石和蒙脱石等风化成因矿物中,这是形成红土型镍钴矿的关键 (杨学善等, 2013)。红土型镍钴矿可进一步分为富

水镁硅酸盐型、黏土型和氧化物型,其中,黏土型及氧化物型的 Co 品位可达 0.3%,而富水镁硅酸盐型的 Co 品位相对较低。

3 西北地区钴矿资源禀赋特征与成因认识

3.1 西北地区 Co 的岩浆成矿作用

西北地区钴矿资源以岩浆镍钴矿床中赋存的钴占突出位置,总体达到 70% 以上,以金川、夏日哈木、喀拉通克、煎茶岭、香山、黄山、黄山东、图拉尔根、黑山、坡北等岩浆矿床为代表,也是中国钴资源的主要来源 (表 1)。此类含钴矿床主要发育于祁连山-龙首山-柴达木克拉通周缘及东天山-北山造山带中 (塔里木克拉通东北缘),是区域性大规模岩浆成矿作用的结果 (图 1)。例如,龙首山金川超大型岩浆镍钴矿床是新元古代超级地幔柱作用的产物,东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴矿床则是伴随古特提斯洋演化开始大陆裂谷岩浆成矿作用的结果,坡北、黄山、黄山东等大型岩浆镍钴矿床是塔里木地幔柱岩浆活动的成矿表现。这些都是区域性的地质事件,在其深部和外围具有独特的钴矿资源禀赋条件和潜在的重要找矿潜力。

金川含矿岩体呈 NW 向展布,全长为 6 000 m,厚

表 1 西北地区含钴矿床地质特征一览表

Tab. 1 The list of geological characteristics of Co deposits in Northwestern of China

序号	矿产地名称	矿床类型	规模	成矿时代	品位(%)	查明资源储量(万 t)	共伴生矿产	数据来源
1	金昌市金川铜镍矿	岩浆型	超大型	Pt ₂	0.81	17.77	铂族、金、钴	中国矿产地 质志•甘肃卷
2	肃北县黑山铜镍矿	岩浆型	中型	O	0.012~0.17	0.37	钴、铂族	
3	金塔县白山堂铜钴矿	岩浆型	中型	C、P	0.023	0.49	锌、银、钴	
4	康县阳坝铜矿坡铜钴矿	热液型	中型	Pz ₁	0.024	0.22	金、钴、铁	
5	文县沟岭子锰钴矿	沉积型	小型	Pt ₃	0.083	0.06	钴、镍、银	
6	景泰县猪嘴哑吧铜钴矿	热液型	小型	O ₂	0.092	0.003 3	钴、硫铁	
7	肃北县香毛山铜钴矿	热液型	小型	Є ₂	0.087	0.097	钴、金、银	
8	肃南县石居里铜锌钴矿	热液型	小型	O	0.05	0.019	钴、锌	
9	康县杜坝铜钴矿	热液型	小型	Pz ₁	0.03	0.047	金、银、钴	
10	文县筏子坝铜钴矿	热液型	小型	Pt ₂	0.02	0.003 1	金、银、铁	
11	文县赵家嘴锰钴矿	沉积型	小型	Pt ₃	0.048	0.005 6	钴	
12	富蕴县喀拉通克铜镍矿一号	岩浆型	中型	C ₂	0.03	1.170 9	铜、镍	中国矿产地 质志•新疆卷
13	富蕴县蕴都卡拉铜金钴矿	热液型	中型	C ₂	0.068		铜、金	
14	青河县加马特(钴)金铜矿	热液型	矿点	C	0.01~0.1		金、铜	
15	青河县哈旦孙(钴)铜矿	岩浆型	矿点	C	0.01~0.03		铜	
16	托里县萨尔托海铬铁钴矿	岩浆型	小型	D	0.018	0.050	铬铁矿	
17	托里县萨尔托海铬矿24矿群	岩浆型	小型	D ₂	0.02~0.2	0.050	铬铁矿	
18	托里县萨尔托海镍钴矿	岩浆型	矿点	D ₂	0.02		镍	
19	托里县苏叶克北镍钴矿	岩浆型	中型	D ₂	0.01	0.296 1	镍	
20	乌苏市西白提钴矿	岩浆型	矿点	C	0.02			
21	新源县巴依图马富钴黄铁矿	热液型	中型	C ₂	0.3	0.254 1	金、银	
22	特克斯县青布拉克铜镍矿	岩浆型	小型	C	0.029		铜、镍	
23	和静县哈让古镍铬钴矿	岩浆型	矿点	C	0.02		镍、铬铁矿	
24	阜康市博格达钴铅钨矿	热液型	矿点	C	0.01~0.1		钨、铅	
25	哈密市图拉尔根铜镍矿	岩浆型	中型	C ₂	0.02	0.466 2	铜、镍	
26	哈密市葫芦铜镍矿	岩浆型	中型	C ₂	0.027	0.599 9	铜、镍	
27	哈密县镜儿泉红石岗镍钴矿	岩浆型	小型	C ₂	0.01~0.13	0.06	铜、镍	
28	哈密市香山铜镍矿	岩浆型	小型	C ₂	0.024	0.748 3	铜、镍	
29	哈密市黄山东铜镍矿	岩浆型	中型	C ₂	0.024	1.689 6	铜、镍	
30	哈密市黄山南铜镍矿	岩浆型	中型	C ₂	0.029~0.34	0.849 1	铜、镍	
31	哈密市1033铜镍钴矿	岩浆型	矿点	P	0.01~0.2		铜、镍	
32	哈密市二红洼铜镍钴矿	岩浆型	矿点	P	0.01		铜、镍	
33	哈密市白石泉铜镍矿	岩浆型	小型	P	0.017	0.023 6	铜、镍	
34	托克逊县库米什铜花山钴矿	热液型	小型	P	0.059		铜、镍	
35	托克逊县库米什铜花山二区	热液型	矿点	P	0.089		铜、镍、钴	
36	托克逊县库米什47号钴铜矿	热液型	矿点	C	0.02		铜	
37	鄯善县康尔塔格红岭镍钴矿	岩浆型	矿点	P	0.07		镍	

续表 1

序号	矿产地名称	矿床类型	规模	成矿时代	品位 (%)	查明资源储量 (万 t)	共伴生矿产	数据来源
38	哈密市大水井北钴锰矿	沉积型	矿点	C ₁	0.03		锰	中国矿产地 质志·新疆卷
39	哈密市小黑山铜(钴镍)矿	岩浆型	矿点	P	0.01~0.02		镍	
40	哈密市大水钴锰矿	沉积型	小型	C ₁	0.04	0.016 7	锰、钒	
41	哈密市大水西(含钴)钒矿	沉积型	小型	C ₁	0.04	0.036 3	钒	
42	尉犁县库鲁克塔格磷钴矿	沉积型	矿点	C ₁	0.02		磷、钒	
43	若羌县湾南东钴铁矿	岩浆型	矿点	C	0.033		铁	
44	若羌县坡北岩体铜镍钴矿	岩浆型	中型	C ₂	0.023	0.671 0	铜、镍	
45	阿图什市霍什布拉克钴矿	热液型	小型	D ₂	0.01	0.010 6	铅、锌	
46	若羌县贝克滩镍钴矿	岩浆型	中型	Pt ₂	0.011	0.303 1	镍	
47	阿图什市丘苏克塔格钴矿	热液型	矿点	D	0.02~0.2			
48	若羌县塔得拉克布拉克钴矿	热液型	矿点	C	0.03		铜、镍	中国矿产地 质志·陕西卷
49	略阳县煎茶岭镍铁钴矿	岩浆型	中型	Pt ₃		1.124 5	镍、铁、钴	
50	商南县金盆铜镍矿	岩浆型	小型	O ₁		0.047	铜(共生钴)	
51	西乡县乔家山钴镍矿	岩浆型	矿点	Pt ₃			镍(伴生钴)	
52	西乡县余家山镍钴矿	岩浆型	矿点	Pt ₃			镍(伴生钴)	
53	户县东流水铜钴矿	热液型	小型	Pz ₁		0.022 7	铜、金、钴	
54	略阳县徐家沟铜钴矿	热液型	小型	Pt ₃		0.030 6	铜、金、钴	
55	柞水县银洞子银钴矿	热液型	小型	Pz ₂		0.025 6	银、铜、钴	
56	南郑县二郎坝钴铅锌矿	风化型	小型	C ₁		0.047 8	铅(共生锌钴)	
57	旬阳县柏木沟钴矿	风化型	矿点	C			钴	中国矿产地 质志·青海卷
58	勉县漆树坝钴土矿	风化型	矿点	O ₃			钴	
59	南郑县九岭钴土矿	风化型	矿点	C ₁			钴	
60	格尔木市野马泉铁钴矿	热液型	中型	T	0.392	0.016 7	铁、铜、钴	
61	德令哈市阿日郭勒河钴镍矿	岩浆型	矿点	D	0.04~0.05		钴、镍	
62	德令哈市旺尕秀南钴锰矿	沉积型	矿点	C ₂	0.011~0.018		钴、锰	
63	都兰县石头坑德铜镍矿	岩浆型	小型	Pz ₁	0.4		镍、钴、铜	
64	都兰县跃进山金钴矿	热液型	矿点	P ₃	0.018~0.05		钴、金	
65	都兰县郭勒铜钴矿	热液型	矿点	S	0.01~0.032		铜、钴	
66	都兰县督冷沟铜钴矿	热液型	小型	Pt	0.36~2.78	0.042 49	铜、钴	
67	都兰县柯柯赛铁钴铜矿	热液型	小型	T	0.26	0.053 86	钴、铜	中国矿产地 质志·青海卷
68	都兰县三岔沟西沟脑铜钴矿	热液型	矿点	T ₃	0.04~0.315		铜、钴	
69	都兰县赛钦铜钴矿	热液型	小型	T ₃	0.032~0.44		铜、钴、铋	
70	甘德县恰格弄统铜钴矿	热液型	矿点	Pt ₂₋₃	0.027~0.467		铜、钴	
71	格尔木市喀雅克登塔铜钴矿	热液型	矿点	T			铜、钴	
72	格尔木市球路噢窝头东钴矿	热液型	矿点	O			钴	
73	格尔木市哈是托东岔沟脑钴矿	热液型	矿点	Pt ₂₋₃			钴	
74	格尔木市夏日哈木镍钴矿	岩浆型	大型	Pz ₂	0.68		镍、钴、铜	
75	格尔木市菜园子沟铜钴矿	热液型	矿点	P ₁	0.048	0.012	铜、钴	

续表 1

序号	矿产地名称	矿床类型	规模	成矿时代	品位(%)	查明资源储量(万 t)	共伴生矿产	数据来源
76	格尔木市驼路沟钴矿	热液型	中型	P ₁	0.068	0.216 5	钴、金	中国矿产地 质志·青海卷
77	化隆县全藏钴铜矿	岩浆型	矿点	O ₁	0.05~0.23		铜、钴	
78	化隆县沙加铜镍钴矿	岩浆型	矿点	Pt	1.15	0.054 2	镍、铜、钴	
79	化隆县沙家铜镍矿	岩浆型	矿点	Pt ₁	0.59	0.001 9	铜、镍、钴	
80	化隆县下什堂镍钴矿	岩浆型	矿点	Pt ₁	0.02~0.21		镍、钴	
81	化隆县冶什春镍钴矿	岩浆型	中型	PZ ₁	1.89	0.320 3	镍、钴、铜	
82	化隆县拉水峡铜镍钴矿	岩浆型	小型	C	0.11	0.046 5	铜、镍、钴	
83	湟源县炭窑尔铜钴矿	热液型	矿点	Pt ₁			铜、钴	
84	玛多县牧羊山铜钴矿	热液型	矿点	P ₁	0.01~0.014		铜、钴	
85	玛沁县化石沟铜钴矿	热液型	矿点	Pt ₁			铜、钴	
86	玛沁县咋布得山梁铜钴矿	热液型	矿点	Pt ₁			铜、钴	
87	玛沁县德尔尼铜钴矿	热液型	大型	P	1.27	2.825 5	铜、钴、金	
88	玛沁县哈仔里沟钴矿	热液型	矿点	P ₂	0.06~0.10	0.007 3	钴	
89	茫崖市牛鼻子梁铜镍矿	岩浆型	矿点	PZ ₂	0.5		镍、铜、钴	
90	平安县元石山铁镍钴矿	风化型	中型	PZ ₁	0.84	0.495 3	镍、铁、钴	
91	祁连县石居里Ⅵ号矿	热液型	矿点	O ₁	0.01~0.22		铜、钴	
92	祁连县油葫芦沟中游钴矿	热液型	矿点	O ₁			钴	
93	祁连县拉喇前山镍钴矿	岩浆型	矿点	O ₁			镍、钴	
94	祁连县木里滩北山镍钴矿	岩浆型	矿点	O	0.001~0.025		镍、钴	
95	泽库县瓦尔沟砷钴矿	热液型	矿点	T ₃	0.021~0.101		砷、钴	
96	茫崖市野骆驼泉西金钴矿	热液型	小型	T	0.043	0.000 32	金、钴	
97	格尔木市肯德可克铁钴矿	热液型	中型	T		0.426	铁、金、钴	
98	格尔木市杂林格铁钴矿	热液型	中型	O	0.09~0.23	0.32	铁、钴、铜	
99	格尔木市牛苦头铜钴矿	热液型	中型	T			锌、铜、铁	
100	都兰县哈尔汗铜钴矿	热液型	矿点	Pt			铜	
101	湟中县三岔金铜镍矿	岩浆型	矿点	PZ ₁			镍、钴、铜	
102	化隆县关藏沟镍钴矿	岩浆型	矿点	PZ ₁	1.22		镍	

注：中国矿产地质志·甘肃卷资料来源于甘肃省地质调查院(2021)；中国矿产地质志·新疆卷资料来源于新疆维吾尔自治区地质调查院(2020)；中国矿产地质志·陕西卷资料来源于陕西省地质调查院(2020)；中国矿产地质志·青海卷资料来源于青海省地质矿产勘查开发局(2021)。

数 10 m 至 300 余 m, 倾斜延伸数百至千米以上, 呈岩墙状产出。根据含矿岩体的分布及矿床与构造的关系, 金川铜镍矿床划分成 4 个矿区, 由 NW 到 SE 左形雁行式排列, 依次为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ和Ⅵ矿区(图 3a)。其中, Ⅰ矿区矿体出露地表, Ⅱ矿区地表可见矿化体, Ⅲ、Ⅵ矿区均被新生界覆盖, 厚度>10~230 m。Ⅱ矿区岩体最长, 约 3 000 余 m; 次为 Ⅰ、Ⅳ矿区岩体, 各长 1 000 余 m, Ⅲ矿区岩体最短, 仅数百米(图 3b)。金川矿床钴资源的 75%~96% 分布于硫化物中, 其中 96% 以上

又含于镍黄铁矿及紫硫镍铁矿中(图 3c)。Co 多以类质同象存在, 仅在星点状贫矿中的磁黄铁矿内见有含钴砷镍矿、含钴辉砷镍矿及镍质辉钴矿。

岩浆型含钴矿床, 除岩浆硫化物外, 岩浆期后热液也可以富集成矿, 主要表现为矽卡岩型、斑岩型等伴生钴资源的矿床, 典型矿床包括祁曼塔格地区杂林格铁钴矿、肯德可克铁钴矿、牛苦头铜钴矿等(表 1), 都取得很好的找矿进展, 进一步找矿潜力巨大。当然, 风化成矿作用也是起源于岩浆作用的镁铁质-超镁

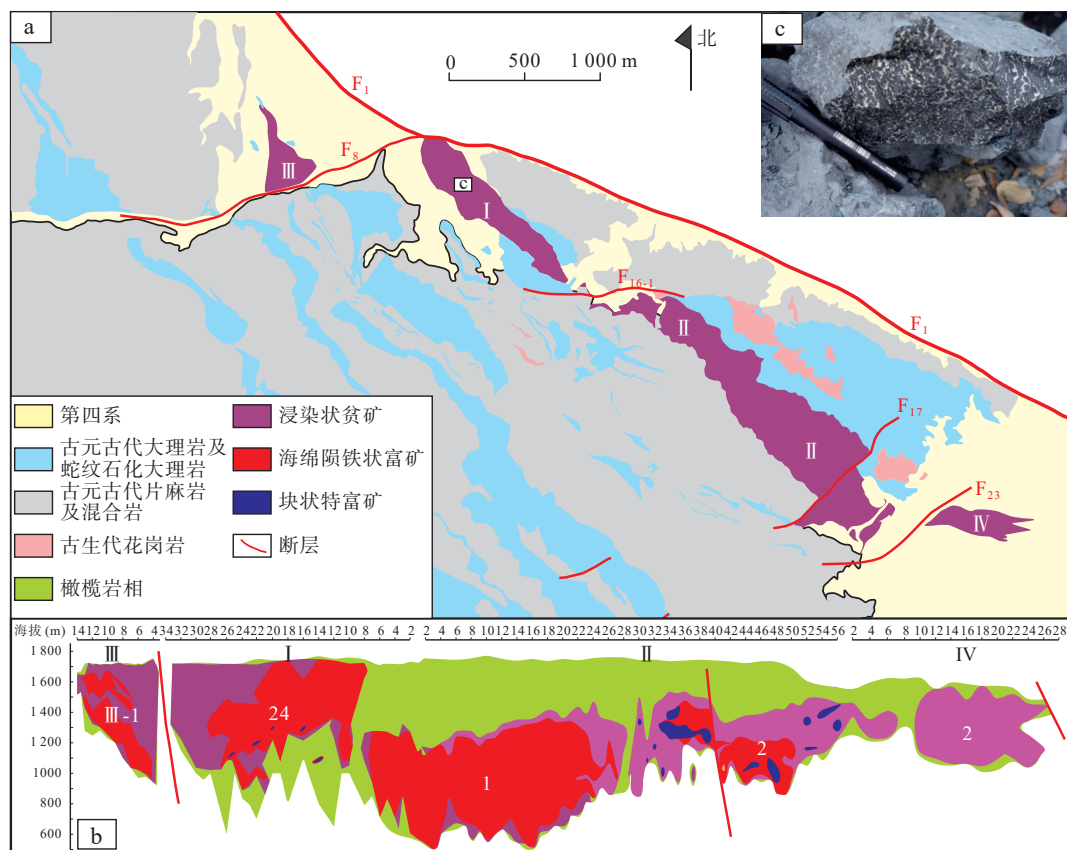


图3 金川矿床矿区地质简图(a)、矿床纵投影图(b)及岩浆型硫化镍钴矿石(c)

Fig. 3 (a) Geological map of the Jinchuan intrusion, (b) projected long section and (c) the magmatic Ni-Co sulfide ore in Jinchuan deposit

铁质岩石,如青海元石山铁镍矿床,富含0.5万t钴资源。

3.2 西北地区Co的热液成矿作用

西北地区多数含钴矿床都是热液成矿作用的结果,102处含钴矿床中,46处属于热液型,典型矿床如驼路沟钴矿。但规模小,钴矿化线索很多,个别也达到大型规模,如德尔尼铜钴矿床。西北地区Co的热液成矿作用,更多表现了脉型的特点,邻近深大断裂,发育于蛇绿岩或火山岩与中酸性岩的接触部位,构造控矿明显,多与Cu、Au伴生,如铜花山钴多金属矿床和新发现的蕴都卡拉铜钴矿床等(朱伯鹏等, 2020; 张照伟等, 2023)。青海德尔尼大型铜钴矿、陕西煎茶岭中型钴矿也都表现了脉型钴矿的主要特征。

(1) 驼路沟钴矿位于东昆仑南部,大地构造单元为纳赤台蛇绿混杂岩带。区域出露地层主要为纳赤台岩群,该岩群分为碎屑岩段和碳酸盐岩段,其中前者为矿区的主要含矿层位。矿区处于昆南断裂和昆中断裂之间,由于受印支期—燕山期SN向挤压作用的影响致使构造线呈EW向展布,其内褶皱与断裂及

韧性剪切带十分发育,为含矿热液的运移和赋存提供了通道与矿体定位空间(图4)。区域上岩浆岩十分发育,侵入岩以华力西期、印支期—燕山期中酸性侵入岩为主。

矿区出露地层主要为志留系—奥陶系纳赤台群第二、第三及第四岩性段:碳质千枚岩段,千枚岩段、砂板岩段(图4)。地层在走向、倾向上具扭曲现象,总体走向近EW,倾向N。碳质千枚岩段岩性主要为斑点状碳质千枚岩、碳质板岩夹粉砂岩、薄层灰岩;千枚岩段岩性主要有绿泥绢云石英片岩、石英钠长岩、绢云石英片岩;砂板岩段岩性以绿泥绢云石英片岩为主,夹变砂岩、变质砾岩、石英钠长岩、硅质岩等。矿体主要赋存于千枚岩段和砂板岩段,石英钠长岩、绿泥绢云石英片岩为主要的赋矿岩石。矿区内脆性断裂构造少见,主要表现为区域性韧性剪切的特征,矿区韧性剪切断裂发育,形成规模较大的长征沟—短沟韧性剪切带,使区内地层呈现出宽大的片理化带、糜棱岩化带,地层在走向、倾向上均呈现出扭曲现象,沿片理分布的石英脉体呈现出透镜状的特征。根据遥

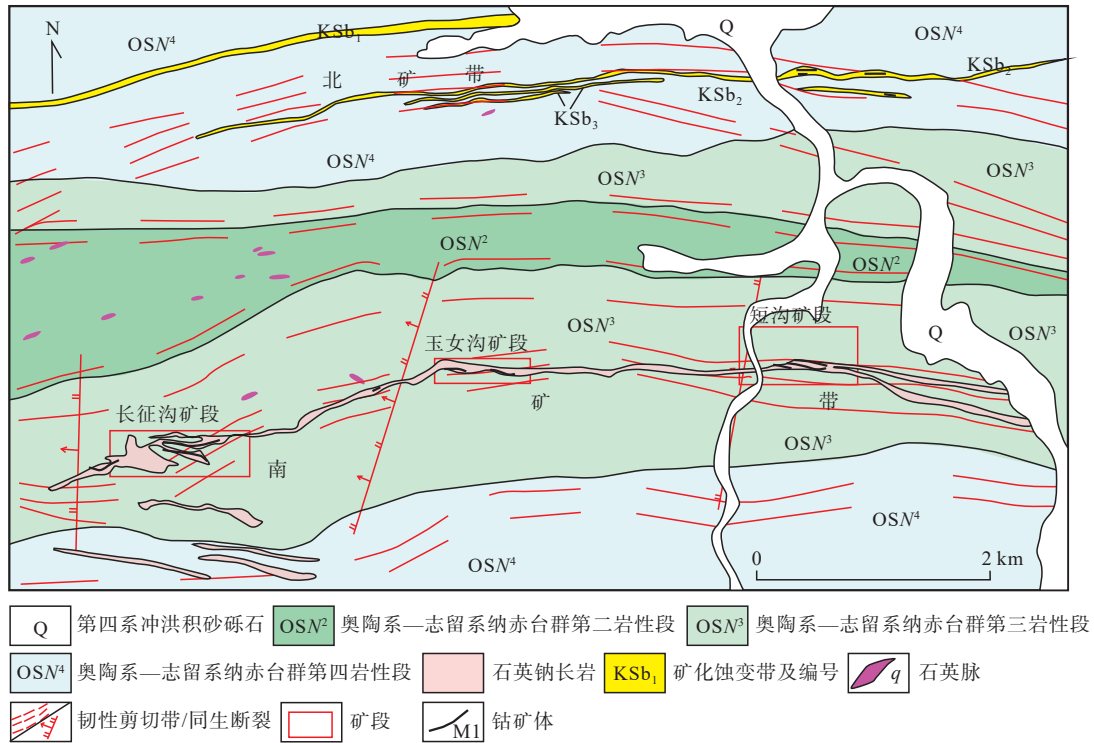


图4 格尔木市驼路沟矿区地质简图(据潘彤等, 2019 修)

Fig. 4 The sketched geological map in Tuolugou Co deposit, Golmud

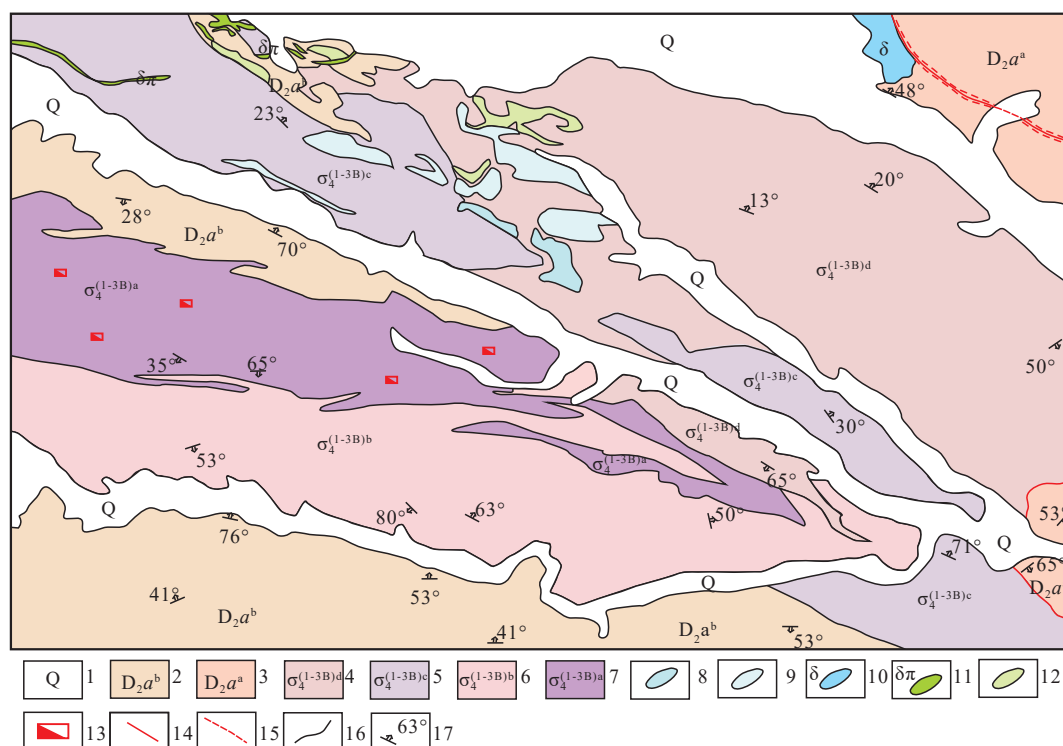
感成果, 矿区存在平行排列的 3 条 NNE 向断裂, 是控制南矿带 3 个矿段的同沉积断裂(图 4)。

驼路沟钴矿体分南北两个矿带。南矿带产于奥陶系—志留系纳赤台岩群哈拉巴依沟组第三岩性段中, 受短沟—长征沟复合型韧性剪切带控制, 呈近 EW 向展布, 在地表形成一条十分醒目的黄褐色条带。矿带走向延伸约为 7 km, 宽为 15~50 m, 最大宽度为 200 m。矿体明显受地层层位和岩性控制, 产出与围岩产状基本一致。已发现的钴矿体在矿带内断续出露, 分为 3 个矿段, 即长征沟矿段、玉女沟矿段和短沟矿段。矿体多呈似层状、透镜状产出。共圈出 27 条钴矿体, 矿体一般长为 28~450 m, 最长达 513 m, 厚度为 1.31~7.09 m, Co 品位为 0.022%~0.109%。北矿带位于驼路沟北东部, 产于奥陶系纳赤台岩群哈拉巴依沟组第四岩性段内, 呈 EW 向展布, 与地层走向一致, 由 3 条矿化蚀变带组成。已发现的钴矿体产于 KSb2 矿化蚀变带东端以及 KSb3 矿化蚀变带中。矿体多呈似层状、透镜状产出。共圈出 5 条钴矿体, 矿体一般长为 66~400 m, 最长达 550.50 m, 厚度为 2.51~7.20 m, Co 品位为 0.031%~0.051%。矿石矿物主要有黄铁矿(>30%), 此外有少量毒砂、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿, 以及微量的钴镍黄铁矿、硫钴矿、硫铜钴矿、方硫

镍钴矿、自然金等。矿石中的钴主要赋存于黄铁矿中; 脉石矿物有石英、钠长石、碳酸盐矿物、绢云母、绿泥石等。

驼路沟钴矿床既表现了热水沉积的特征, 又有热液叠加成矿的特点。前人研究认为, 该矿床属于海相火山岩型、热水喷流沉积—构造改造型或层控—改造型矿床。从矿体特征、地球化学及同位素约束来看, 该矿床更符合热液矿床的特点。

(2) 托克逊县铜花山脉型钴多金属矿床位于哈萨克斯坦古洋板块之准噶尔微板块与塔里木古陆板块碰撞对接带南侧。出露地层为中泥盆统阿拉塔格组第一亚组和第二亚组。阿拉塔格组第一亚组岩性为灰岩夹火山凝灰岩。阿拉塔格组第二亚组由 4 个岩性段组成, 岩性为黑云母石英片岩、绿泥石绢云母石英片岩、钙质片岩和灰岩等。区内岩浆活动强烈, 侵入岩发育。侵入岩为华力西期的产物, 呈带状分布, 主要岩性为橄榄岩、闪长岩、花岗岩。钴矿体产于蛇纹石化辉石橄榄岩中(图 5), 矿区断层有 3 组, NWW-SEE 为主, 多为逆掩断层; 次有 NNE-SSW 及 NNW-SSE 两组断裂, 多为平推断层。铜花山钴—多金属矿床受 NWW-SEE 向逆掩断层的次级构造裂隙控制。脉岩在区内广泛发育, 华力西早期形成的脉岩以



1.第四系; 2.中泥盆统阿拉塔格组第二亚组; 3.中泥盆统阿拉塔格组第一亚组; 4.草绿色蛇纹岩化橄榄岩; 5.灰绿色蛇纹岩化橄榄岩; 6.含铁蛇纹岩化橄榄岩; 7.含钴蛇纹岩化橄榄岩; 8.蛇纹岩化变斑状橄榄岩分离体; 9.达尔布拉克第二亚组悬垂体; 10.闪长岩脉; 11.蛇纹岩化绿泥石化透闪石化蚀变带; 12.闪斜煌斑岩脉; 13.褐铁矿化; 14.逆断层; 15.平移断层; 16.地质界线; 17.层理产状

图5 托克逊县铜花山钴多金属矿地质简图

Fig. 5 The sketched geological map of Tonghuashan Co deposit in Tuokexun county

基性为主,中晚期形成的脉岩以酸性为主。主要有煌斑岩、闪长玢岩、花岗岩、石英钠长斑岩、石英脉等(图5)。

铜花山矿区共圈定矿体19条。其中,6号矿体长为300m,厚为1.0~24.66m,平均厚度为8.63m,控制最大延深为285m,矿体呈分枝脉状,Co品位为0.036%~0.278%,平均为0.056%。8号矿体产于6号矿体下盘,长为300m,厚为0.86~18.37m,平均厚度为6.22m,控制延深为310m,矿体呈分枝脉状,钴品位为0.035%~0.311%,平均为0.080%。矿脉产状受构造裂隙控制,在矿区东部呈NWW-SEE走向,倾向NNE。在矿区中部呈近EW走向,倾向北。在矿区西部呈NEE-SWW走向,倾向NNW。矿石类型以原生矿石为主,氧化矿石很少。氧化矿石为褐铁矿矿石,原生矿石进一步分为铁矿型矿石、混合类型矿石和硫化类型矿石。矿石金属矿物主要有磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿,其次为镍黄铁矿、紫硫镍矿、黄铜矿等;少量及微量的方铅矿、硫钴矿、硫镍钴矿、马基诺矿、辉铜矿、铜兰、白铁矿、针镍矿、六方硫镍矿、斜方硫镍矿

等。金属氧化物主要为磁铁矿,其次为赤铁矿,少量及微量的铬铁矿、钛铁矿、针铁矿、孔雀石、金红石、菱铁矿等。脉石矿物为蛇纹石,以及绿泥石、辉石、透闪石、橄榄石、云母类矿物、滑石等。矿石结构主要有各种交代残余结构、他形晶粒结构、半自形-自形晶粒结构,其次为包含结构、固溶体分离乳滴状结构、脉状-网脉(格)状结构,胶状肾状结构、反应边结构及压碎结构较少。矿石的构造主要有块状构造、致密浸染状构造、稀疏浸染状构造、斑状构造、网(脉)状构造等。

铜花山矿床的形成经历了岩浆期、气成热液期及表生氧化期3个成矿期,其中气成热液期表现为早、晚两个成矿阶段。岩浆期形成主要的造岩矿物橄榄石、辉石及少量的半自形晶磁黄铁矿、镍黄铁矿等。气成热液早期阶段,通过交代橄榄石、辉石,形成大量的蛇纹石、绿泥石、滑石、透闪石等造岩矿物,同时形成大量的磁铁矿、磁黄铁矿及少量的镍黄铁矿、黄铁矿。气成热液晚期阶段为最主要成矿阶段,形成了大量的磁铁矿及众多的硫化物,以及钴的硫矿物。表生

氧化期生成了以矾类矿物为主的众多次生氧化矿物,主要为棕铁矾、三斜粒铁矾、黄钾铁矾、胆矾等,同时还有褐铁矿、孔雀石、氯铜矿、水钴矿、钴华等矿物。

4 钴矿资源产业链分析

Co 既亲铁又亲硫,多呈类质同象分散在其他矿物中。因此,绝大多数 Co 是铜、镍和铁等矿床中的伴生组分,只有极少部分形成单独的工业矿床。在西北地区 102 处含钴矿床中,仅岩浆型得到了开发利用,其他沉积型、热液型、风化型含钴矿床中的钴资源尚未得到有效开发。这也进一步缩短了产业链,影响供应链安全。伴生 Co 品位较低,钴主要作为副产品加以回收,现已发现的伴生钴矿品位为 0.02%~0.083%,因而生产过程中金属回收率低,工艺复杂,生产成本低,钴资源的开发受矿床主矿种的制约,仅金川公司钴的回收已比较成熟,其余矿区,地方开采主矿种时,均未回收钴。

由于矿产资源的不均匀分布属性,全球矿产资源供需分离是客观存在的。只有通过技术、资金、市场等方面的合作,提高矿产资源的开采效率和质量,促进矿产品的流通和贸易,实现矿产资源的优化配置,才能实现资源互补和互利共赢。随着全球进入百年未有之大变局,锂钴镍等战略性矿产资源的争夺愈发激烈。碳达峰和碳中和行动的推进,导致新能源关键矿产的需求持续增长,但供给增长受到限制,供需缺口将长期存在。根据国际能源署“世界能源展望报告”数据,2040 年清洁能源转型对关键矿产的需求比现在将增加 2~4 倍,但现有的新矿山建设速度难以满足快速增长的需求。各国对稀有矿产资源的互相依赖关系也增加了全球围绕战略性矿产资源的占有、萃取、精炼、加工和应用的竞争。

中国钴资源的现状是量小、需求大、家底不清。尽管西北地区钴资源在全国占有比较优势,但在产业链上存在致命缺陷,仅金川集团能对岩浆铜镍矿石中的钴加以回收利用,势必导致供应链较大的安全隐患,影响战略性关键矿产的有效供应。除尽快摸清钴矿资源家底和寻找新的钴矿资源外,大力加强其他类型含钴矿床的赋存状态及综合利用研究,创新钴矿认识和选冶技术,延长钴矿资源的产业链和供应链,以提升保障紧缺战略性矿产资源安全的能力和水平。

5 结论

(1) 钴作为中国紧缺战略性矿产资源,极度匮乏的资源现状存在重大安全隐患,进一步摸清钴矿资源家底和找矿潜力,对于提升资源储量和回收率、延长产业链都显得尤为重要。

(2) 西北地区钴矿资源禀赋条件优越,成矿作用多样,Co 的岩浆成矿作用和热液成矿作用是钴资源富集的关键机理,岩浆、热液、表生地质过程是深部物质大尺度循环并实现钴富集成矿的重要环节。

(3) 加强钴成矿元素赋存状态及综合利用的系统研究,揭示钴矿资源超常富集机理和关键控矿因素,定量评估资源潜力,是钴资源增储上产、提升战略性关键矿产安全供应的重要途径。

致谢: 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室的技术人员共同参与编写及插图绘制,论文评审专家给予了很好的建议和具体修改意见,在此一致深表感谢。

参考文献(References):

- 侯增谦,陈骏,翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3651-3652.
- HOU Zengqian, CHEN Jun, ZHAI Mingguo. Current status and frontiers of research on critical mineral resources[J]. Chin Sci Bull, 2020, 65(33): 3651-3652.
- 李文渊,王亚磊,钱兵,等. 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, 2020, 27(2): 276-293.
- LI Wenyuan, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Discussion on the formation of magmatic Cu-Ni-Co sulfide deposits in margin of Tarim Block[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 276-293.
- 甘肃省地质调查院. 中国矿产地质志·甘肃卷[R]. 甘肃省地质调查院, 2021.
- 潘彤,等. 柴达木盆地南北缘成矿系列及找矿预测[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2019, 1-372.
- PAN Tong, et al. Metallogenic series and prospecting prediction in the northern and southern edges of the Qaidam Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2019, 1-372.
- 青海省地质矿产勘查开发局. 中国矿产地质志·青海卷[R]. 陕西省地质调查院, 2021.
- 陕西省地质调查院. 中国矿产地质志·陕西卷[R]. 陕西省地质调查院, 2020.

- 王辉, 丰成友, 张明玉. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. 矿床地质, 2019, 38(4): 739–750.
- WANG Hui, FENG Chengyou, ZHANG Mingyu. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4): 739–750.
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 等. 我国铂族元素、钴和铬主要矿床类型的分布特征及成矿机制[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3825–3838.
- WANG Yan, ZHONG Hong, CAO Yonghua, et al. Genetic classification, distribution and ore genesis of major PGE, Co and Cr deposits in China: A critical review[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3825–3838.
- 新疆维吾尔自治区地质调查院. 中国矿产地志·新疆卷[R]. 新疆维吾尔自治区地质调查院, 2020.
- 杨学善, 郭远生, 陈百友, 等. 世界红土型镍矿的资源分布及勘查、开发利用现状[J]. 地球学报, 2013, 34(A1): 193–201.
- YANG Xueshan, GUO Yuansheng, CHEN Baiyou, et al. The Distribution and the Exploration, Development and Utilization Situation of the Lateritic Nickel Ore Resources in the World[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 34(A1): 193–201.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明, 等. 钴矿床类型划分初探及其对特提斯钴矿带的指示意义[J]. 矿床地质, 2020, 39(3): 501–510.
- ZHANG Hongrui, HOU Zengqian, YANG Zhiming, et al. A new division of genetic types of cobalt deposits: Implications for Tethyan cobalt-rich belt[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(3): 501–510.
- 张伟波, 叶锦华, 陈秀法, 等. 全球钴矿资源分布与找矿潜力[J]. 资源与产业, 2018, 20(4): 56–61.
- ZHANG Weibo, YE Jinhua, CHEN Xiufa, et al. Global cobalt resources distribution and exploration potentials[J]. Resources & Industries, 2018, 20(4): 5–61.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 东昆仑夏日哈木镍成矿赋矿机理认识与找矿方向指示[J]. 西北地质, 2020, 53(3): 153–168.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Understanding of metallogenic ore-forming mechanism and its indication of prospecting direction in Xiarihamu magmatic Ni-Co sulfide deposit, eastern Kunlun orogenic belt, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(3): 153–168.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 中国西北地区岩浆铜镍矿床地质特点与找矿潜力[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 82–99.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Geological characteristics and prospecting potential of magmatic Ni-Cu sulfide deposits in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 82–99.
- 张照伟, 李文渊, 丰成友, 等. 中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 14–34.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, FENG Chengyou, et al. Study on Metallogenic Regularity of Co-Ni Deposits in China and Its Efficient Exploration Techniques[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 14–34.
- 张照伟, 张江伟, 王亚磊, 等. 准噶尔北缘成矿带蕴都卡拉钴矿成矿特征[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 1–10.
- ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, WANG Yalei, et al. Metallogenic Characteristics of Yundukala Co Deposit in Northern Margin of Junggar Metallogenic Belt, Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 1–10.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. 科学通报, 2019, 64(24): 2484–2500.
- ZHAO Junxing, LI Guangming, QIN Kezhang, et al. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(24): 2484–2500.
- 朱伯鹏, 张汉清, 秦纪华, 等. 新疆准噶尔东北缘蕴都卡拉金铜钴矿床地质特征及前景分析[J]. 地质论评, 2020, 66(1): 157–168.
- ZHU Bopeng, ZHANG Hanqing, QIN Jihua, et al. Geological characteristics and prospect analysis of the Yundukala Au-Cu-Co deposit in the northeastern margin of Junggar, Xinjiang[J]. Geological Review, 2020, 66(1): 157–168.
- Barnes S J, Cruden A R, Arndt N, et al. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulfide deposits[J]. Ore Geology Review, 2016, 76: 296–316.
- Bouabdellah M, Maacha L, Levresse G, et al. The Bou Azzer Co-Ni-Fe-As($\pm$ Au $\pm$ Ag) district of central Anti-Atlas (Morocco): A long-lived late Hercynian to Triassic magmatic-hydrothermal to low-sulphidation epithermal system[A]. In: Bouabdellah M, Slack J F (eds). Mineral deposits of north Africa[M]. Cham, Switzerland, Springer International Publishing, 2016, 229–247.
- Lester G W, Kyser T K, Clark A H, et al. Trace element partitioning between immiscible silicate melts with H₂O, P, S, F, and Cl[J]. Chemical Geology, 2013, 357: 178–185.
- Li C S, Zhang Z W, Li W Y, et al. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly-discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China[J]. Lithos, 2015, 216–217: 224–240.
- Li Y, Audétat A. Effects of temperature, silicate melt composition, and oxygen fugacity on the partitioning of V, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Sb, W, Au, Pb, and Bi between sulfide phases and silicate melt[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2015, 162: 25–45.
- Mao Y J, Qin K Z, Li C S, et al. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. Lithos, 2014, 200: 111–125.
- Marsh E E, Anderson E D, Gray F. Nickel-Cobalt Laterites: A Deposit Model[R]. US Scientific Investigations Report 2010-5070-H, US Geological Survey, 2013.

- Mungall J E, Christopher Jenkins M, Robb S J, et al. Upgrading of magmatic sulfides, revisited[J]. *Economic Geology*, 2020, 115: 1827–1833.
- Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[A]. In: Li C, Ripley E M (eds). *Reviews in Economic Geology*[M]. Denver: Society of Economic Geologists, Inc., 2011, 17: 1–50.
- Palme H, O'Neill H S. Cosmochemical estimates of mantle composition[A]. In: Rudnick R L (ed). *Treatise on geochemistry*[M]. Oxford, Elsevier, 2014, 3: 1–38.
- Patten C, Barnes S J, Mathez E A, et al. Partition coefficients of chalcophile elements between sulfide and silicate melts and the early crystallization history of sulfide liquid: LA-ICP-MS analysis of MORB sulfide droplets[J]. *Chemical Geology*, 2013, 358: 170–188.
- Qiu Zhengjie, Fan Hongrui, Goldfarb R, et al. Cobalt concentration in a sulfidic sea and mobilization during orogenesis: Implications for targeting epigenetic sediment-hosted Cu-Co deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021a: 305, 1–18.
- Qiu Zhengjie, Fan Hongrui, Tomkins G A, et al. Insights into salty metamorphic fluid evolution from scapolite in the Trans-North China Orogen: Implication for ore genesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021b, 293: 256–276.
- Schulz K J, DeYoung J H, Seal R R, et al. Critical mineral resources of the United States: Economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. US Geological Survey Professional Paper Series 1802, 2018: 797.
- Shi Jinhua, Zeng Gang, Chen Lihui, et al. An eclogitic component in the Pitcairn mantle plume: evidence from olivine compositions and Fe isotopes of basalts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 318: 415–427.
- Slack J F, Kimball B E, Shedd K B. Chapter F: Cobalt[A]. In: Schulz K J, DeYoung J J H, Seal R R (eds). *Critical mineral resources of the United States: Economic and environmental geology and prospects for future supply*[R]. US Geological Survey, Professional Paper 1802, 2017: F1–F40.
- Smith Joshua M, Ripley Edward M, Li Chusi, et al. Cu and Ni Isotope Variations of Country Rock-Hosted Massive Sulfides Located Near Midcontinent Rift Intrusions[J]. *Economic Geology*, 2021, 4872: 1–16.
- Soloviev S G, Kryazhev S G, Dvurechenskaya S S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au-(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48: 603–627.
- Vasyukova O V, Williams-Jones A E. Constrains on the genesis of cobalt deposits: Part II, application to natural systems[J]. *Economic Geology*, 2022, 117: 529–544.
- Williams-Jones A E, Migdisov A A. Experimental constraints on the transport and deposition of metals in ore-forming hydrothermal systems[J]. *Society of Economic Geologists, Special Publication* 18, 2014: 77–95.
- Williams-Jones A E, Vasyukova O V. Constraints on the genesis of cobalt deposits: Part I, theoretical considerations[J]. *Economic Geology*, 2022, 117: 513–528.
- William Hutchison, Rainer J. Babel, Adrian A. Finch, et al. Sulphur isotopes of alkaline magmas unlock long-term records of crustal recycling on Earth[J]. *Nature Communications*, 2021, 10: 4208.