

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.002

中国钴-镍成矿规律与高效勘查技术

张照伟¹, 李文渊¹, 丰成友², 王辉³, 王亚磊¹, 武军杰⁴, 李德贤⁵,
吕新彪⁶, 朱伯鹏⁷, 惠博⁸, 刘会文^{9,*}

- (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 710054;
2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安
710054; 4. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 5. 镍钴资源综合利
用国家重点实验室 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737102; 6. 中国地质大学(武汉)地质调
查研究院, 湖北 武汉 430074; 7. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第四地质大队,
新疆 阿勒泰 836500; 8. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川 成都 610041;
9. 青海省核工业局, 青海 西宁 810016)

摘要:钴、镍是全球战略性关键矿产,对国民经济、国家安全和科技发展具有重要战略意义。中国现有钴、镍资源储量均较低,超过 90% 的钴、镍原材料依赖进口,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-镍成矿规律研究,创新高效勘查技术,寻找新的接替资源已迫在眉睫。中国含钴矿床类型多样,特别是随着钴成矿新类型(辽吉带变沉积岩容矿钴-铜矿及三江带伴生钴矿)的发现,展示了巨大的找矿前景。但目前不同类型矿床中钴-镍发育特征、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-镍资源的找矿突破。笔者拟通过对钴-镍元素超常富集机理与成矿规律及勘查技术的研究,解决大陆聚-散过程中多圈层相互作用与钴-镍超常富集机理的重大科学问题和空-地-井高精度重磁电震物探数据采集、处理与多参数联合正反演解译的关键技术难题,旨在揭示钴-镍矿产资源成矿潜力和找矿新靶区,支撑服务战略性矿产找矿行动,极大增强中国钴-镍矿产资源安全供应保障能力。

关键词:钴-镍;富集机理;成矿规律;勘查技术;找矿潜力

中图分类号:P588.1;P597

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)02-0014-21

Study on Metallogenic Regularity of Co - Ni Deposits in China and Its Efficient Exploration Techniques

ZHANG Zhaowei¹, LI Wenyuan¹, FENG Chengyou², WANG Hui³, WANG Yalei¹,
WU Junjie⁴, LI Dexian⁵, LÜ Xinbiao⁶, ZHU Bopeng⁷, HUI Bo⁸, LIU Huiwen^{9,*}

收稿日期:2021-07-30;修回日期:2022-01-15;网络发表日期:2022-05-10;责任编辑:吕鹏瑞

基金项目:国家自然科学基金面上项目“东昆仑夏日哈木铜镍矿床硫化物不混溶作用研究”(41873053);第二次青藏高原综合科学考察研究“稀贵金属(金、镍、钴、铬铁矿、铂族元素)科学考察与远景评估”(2019QZKK0801);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);中国地质调查局项目“西北地区铜镍稀有金属等矿产地质调查”(DD20221691)联合资助成果。

作者简介:张照伟(1976-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事岩浆铜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:刘会文(1978-),男,高级工程师,主要从事岩浆作用成矿理论与找矿方向调查工作。E-mail: 45346474@qq.com。

- (1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Center of CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China; 5. State Key Laboratory for Comprehensive Utilization of Nickel and Cobalt Resources, Jinchuan Group Corporation Ltd, Jinchang 737102, Gansu, China; 6. The Institute of Geological Survey of China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 7. No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Altay 836500, Xinjiang, China; 8. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610041, Sichuan, China; 9. Uranium Geological Bureau of Qinghai Province, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: Cobalt and nickel are global strategic critical minerals, which are of great strategic significance to the national economy, national security, and technological development. Existing cobalt and nickel resource reserves are relatively low in China, and more than 90% of the cobalt and nickel raw materials are imported, which brings major safety risks to the supply of strategic critical mineral resources. Therefore, it is urgent to strengthen the study of cobalt-nickel mineralization regularity, to develop efficient exploration technology, and to search the new continuous resources. There are various types of cobalt-bearing deposits in China, especially with the discovery of cobalt mineralization (such as cobalt-copper deposits in meta-sedimentary rock in the Liaoning-Jilin belt and associated cobalt deposits in the Sanjiang belt), which shows great prospecting potential. However, the occurrence status, enrichment mechanism, and metallogenic potential of cobalt-nickel in different types of deposits are still unclear. The lack of prospecting models and efficient exploration techniques has greatly restricted the development of cobalt-nickel resources. Based on the comprehensive research of the cobalt-nickel supernormal enrichment mechanism, mineralization regularity, and exploration technology, this paper intends to solve two major problems. One is the scientific problem about the multi-layer interaction in the cobalt-nickel super-concentration mechanism during the continental accumulation-dispersion process, the other is the technical problem about the acquisition, processing, and multi-parameter interpretation for the high-precision gravity, magnetic, electrical, seismic, and geophysical prospecting data in the air-ground-well. This work could reveal the metallogenic potential of cobalt-nickel mineral resources, determine new prospecting targets, support the strategic mineral prospecting operations, and enhance the ability to ensure the safe supply of cobalt-nickel mineral resources in China.

Keywords: cobalt-nickel; enrichment mechanism; metallogenic regularity; exploration techniques; prospecting potential

钴、镍作为全球性战略金属矿产被广泛应用于新能源汽车、电子通讯、航空航天及高端装备制造等领域(王汝成等,2020)。全球钴资源主要来自现代海底钴矿和大陆钴矿(张伟波等,2018;侯增谦等,2020)。现代海底铁锰结核蕴含巨大的钴资源(>80%),但受限于当前技术条件而无法开采(秦克章等,2021)。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钴约占23%、红土

型镍钴矿占15%、其他热液含钴矿床仅占2%(Schulz K J et al.,2018;Smith et al.,2021)。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、镍金属的需求增长迅猛且前景广阔(邢佳韵等,2019;张照伟等,2020)。拥有丰富钴、镍矿产资源的国家不仅具有定价权,也提升了国家资源战略安全等级(Zhang et al.,2019)。中国目前是全球第一大钴、镍金属消费国,然而超过90%的钴、镍资源

依赖进口,后备资源严重不足(翟裕生,2020)。特别对于钴资源,长期以来主要源自加工铜、镍等金属矿产回收的副产品。岩浆铜镍硫化物矿床中赋存大量的钴、镍资源,因其冶炼简单、成本低而成为钴、镍金属来源的主要矿床类型。该类矿床一般多发育于稳定陆块边缘裂谷系统,或与大火成岩省岩浆活动密切相关,是深部地幔上涌硫化物不混溶作用的成矿表现(Zhang et al., 2014; 任纪舜等, 2017; 2018; 李廷栋等, 2019; 张国伟等, 2019)。对于钴矿专门性的研究、勘查投入较少,导致存在基础研究薄弱、资源家底不清、全球市场控制力不足等诸多因素,加之在本次新冠肺炎疫情中暴露出供应链和运输安全等问题,使得中国钴、镍资源形势更为严峻,国家安全战略受到严重威胁和挑战(李文渊, 2015; 2018; 莫宣学, 2019; 2020)。

目前,中国可利用的钴、镍矿床类型相对单一,主要为岩浆型镍-铜(-钴)硫化物矿床(陈华勇, 2020)。近几年,相继发现了沉积-变沉积岩容矿型钴矿、红土型镍-钴矿及岩浆热液型钴矿;此外,在部分砂卡岩型、VMS 型、IOCG 型等矿床中也伴生有工业意义的钴资源,显示出较好的成矿条件和找矿潜力(丰成友等, 2006; 李向前等, 2009; 张东红等, 2013; 王辉等, 2019; 许德如等, 2019)。尽管上述不同类型钴、镍矿床在中国均有产出,但钴、镍富集机理与成矿模式、成矿规律与找矿潜力、勘查技术与找矿模型尚不清楚,严重制约了钴、镍资源找矿新发现,亟待解决。笔者遵循地球系统科学和成矿系统科学融合发展,探索大陆聚-散过程中多圈层相互作用与钴、镍超常富集机理,通过空-地-井现代勘查技术和多元信息矿产预测深度挖掘,精细构建中国不同类型钴-镍矿床成矿模式,并揭示成矿规律,建立勘查技术找矿模型,摸清钴-镍资源潜力的家底,优选找矿新靶区,有力助推钴-镍成矿潜力的全面、科学评价和高效找矿勘查,提高钴、镍资源的自给能力,为低碳经济时代新兴产业的高质量发展提供重要资源保障。

1 钴-镍成矿类型与地质分布

1.1 钴-镍主要成矿类型

钴、镍属于典型的幔源型元素,在地壳中极为分散(宋谢炎, 2019)。钴、镍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,这一过程往往与大陆聚-散过程中多圈层相互作用密切相关(王辉等, 2019; 王焰等, 2020)。钴-镍矿床类型多样,最主要的是沉积型、岩浆型、红土型及岩浆热液型(张洪瑞等, 2020; 张照伟等, 2021a)。

沉积-变沉积岩容矿型钴矿包括典型沉积岩容矿层控铜-钴矿床(亦称砂岩型或“SSC”型,如中非铜-钴矿带)和变沉积岩容矿层控铜-钴矿(美国 Idaho 钴矿带、中国辽吉裂谷带);此外,在少部分 MVT 型矿床、黑色页岩容矿型矿床中也伴有工业意义的钴(Gus Gunn, 2014)。该类钴矿是目前全球钴最重要的来源,所含钴资源超过全球陆地钴资源的 41%(USGS, 2019)。典型沉积岩容矿层控铜-钴矿床主要呈层状或似层状产于沉积盆地碎屑岩或碳酸盐岩中,发育底部氧化相的红层、上部还原性海相沉积“二元结构”的裂谷盆地是矿床形成的有利地质条件,尽管存在争议,但目前主流观点认为成矿作用至少部分始于成岩阶段晚期(刘东盛等, 2021),主期成矿与盆地卤水的演化有关;而变沉积岩容矿钴矿大多赋存在元古代(或古生代)裂谷环境的变形变质碎屑岩中,一般缺少前者必要的红层,矿床的形成可能与大陆聚合-裂解导致的多期次沉积-变质变形-岩浆流体改造过程有关。

岩浆型镍-铜(-钴)硫化物矿床(约占全球镍资源量 40%、钴资源量的 15%)(USGS, 2019)多数产于地幔柱相关的裂谷环境(俄罗斯 Noril'sk、甘肃金川)或造山带碰撞后伸展环境(青海夏日哈木)(李文渊等, 2019; 王岩等, 2020; 张照伟等, 2020);钴富集成矿既与地幔熔融程度和母岩浆 Co 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(Patten et al., 2013; William et al., 2021),也可能受到岩浆期后热液过程的改造(李文渊等, 2020)。除岩浆型硫化物含有 Co、Ni 之外,岩浆型氧化物也含有一定比例的 Co、Ni,如钕钛磁铁矿中。

红土型镍-钴矿床(约占全球镍资源量的 60%、钴资源量的 36%)(USGS, 2019)主要来自热带-亚热带地区富含 Co、Ni 基性-超基性岩的风化,其成矿依赖于热带气候环境、稳定的大地构造背景、纯橄榄岩母岩及剪切构造带等多种因素的耦合成矿作用(Naldrett, 2011; 汤庆艳等, 2017; Fu et al., 2019; 王

旋等,2021)。岩浆热液型钴矿床常与基性-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(Barnes et al., 2013; Chen et al., 2017; 张照伟等, 2019),常具有 Ag - Ni - Co - As - Bi 元素组合特征(张照伟等, 2014; 赵俊兴等, 2019);此外,在部分矽卡岩型、VMS 型、IOCG 型等矿床中也伴有工业意义的钴资源。

从全球钴-镍资源工业产量来看,沉积-变沉积岩容矿型钴工业产量占比高达 63%,红土型和岩浆

型分别占比 20%和 14%(图 1a);在全球镍资源工业产量中,红土型占比高达 70%,岩浆型 30%(图 1b)。因此,钴的工业来源重点是沉积-变沉积岩容矿型,镍的工业来源重点是红土型;具体到中国的钴-镍成矿类型,沉积-变沉积岩容矿型是重点要攻克的类型,解决钴超常富集机理和成矿潜力;其次,就是岩浆型钴-镍矿床的高效勘查技术,加大深部找矿,增加资源储量。而中国红土型镍-钴矿床类型由于所处地理位置和成矿条件不够优越,不能成为钴-镍资源的重点成矿类型(张照伟等, 2021b)。

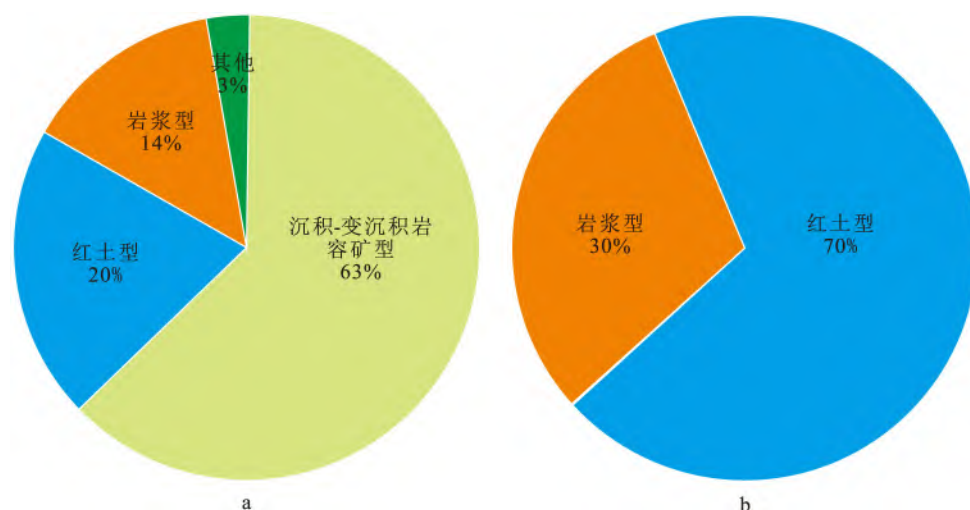


图 1 全球钴(a)-镍(b)资源工业产量饼图(USGS, 2019)

Fig. 1 The pie chart of Co (a)-Ni (b) resource industry yield in the world

1.2 中国钴-镍资源地质分布规律

在中国已发现的钴矿产地约 150 余处,主要分布在青海、甘肃、云南、吉林、江西、湖南、新疆和海南等省份(图 2)(刘东盛等, 2020)。含钴矿床类型较多,主要包括岩浆型、沉积-变沉积岩容矿型、红土型、VMS 型、矽卡岩型、热液脉型及 IOCG 型等(王辉等, 2019; 卢宜冠等, 2021)。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、镍等矿床中。中国镍矿资源主要产于华北克拉通西南缘及北缘、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 3)。目前,岩浆铜镍硫化物矿床是中国镍矿最主要的来源。

沉积型钴铜矿床多发育在辽东-吉南、西南三江、东昆仑、中条山和钦杭东段成矿带,发现了多个大中型沉积-变沉积岩容矿钴矿,分别以大横路、白秧坪、驼路沟、篦子沟、七宝山钴铜矿床为典型代表

(图 4),显示出较好的成矿潜力和找矿前景。

岩浆型钴-镍矿床:主要是铜镍(钴)硫化物矿床,多分布在华北克拉通西南缘及北缘、龙首山-柴达木克拉通周缘、塔里木克拉通东北缘及扬子克拉通西缘等重点地区(李立兴等, 2018; 张照伟等, 2018)。从成矿时代看,中国岩浆铜镍(钴)硫化物矿床主要集中在新元古代早期(1 000~800 Ma),以金川矿床为代表;早古生代晚期-晚古生代早期(390~430 Ma),以夏日哈木矿床为代表;晚古生代晚期(295~250 Ma),以黄山、黄山东、图拉尔根、喀拉通克等矿床为代表(王亚磊等, 2017; 张照伟等, 2017; Zhang et al., 2018)(图 4)。除此之外,岩浆型氧化物钒钛磁铁矿矿床中也蕴含着丰富的钴-镍资源,主要分布在攀西裂谷带中(李潇雨等, 2016; 刘应冬等, 2020),以攀枝花、红格、太和、白马等超大型钒钛磁铁矿矿床为典型代表(图 4)。

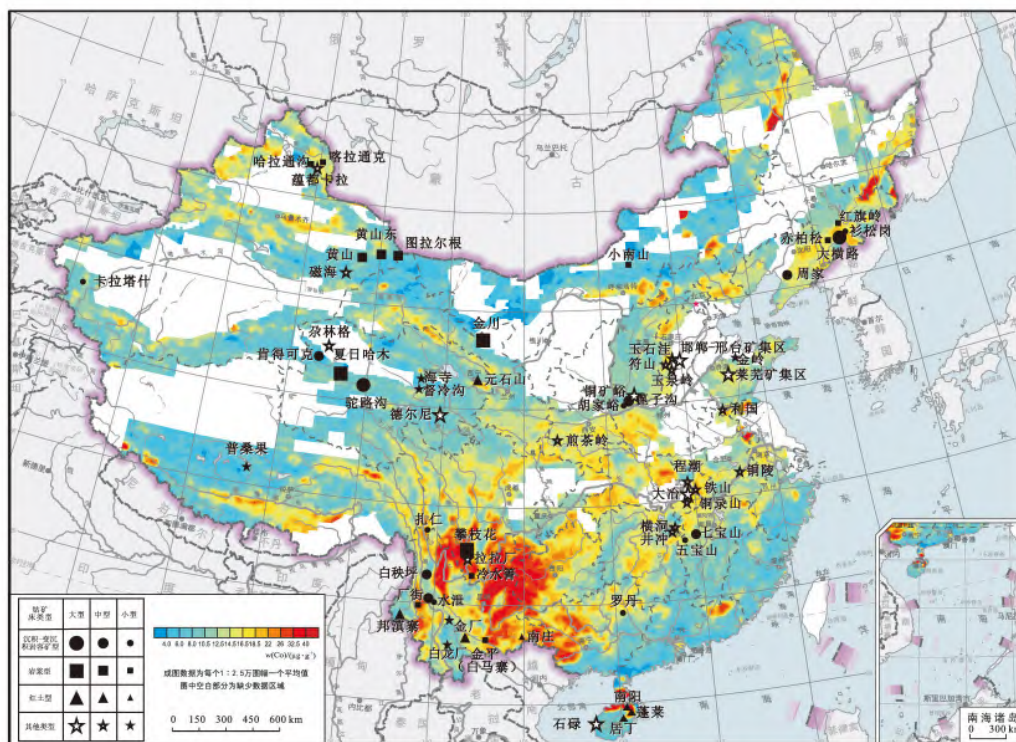


图2 中国钴地球化学及钴资源分布图(底图据谢学锦等,2012)

Fig. 2 The distribution of cobalt and its geochemistry in China

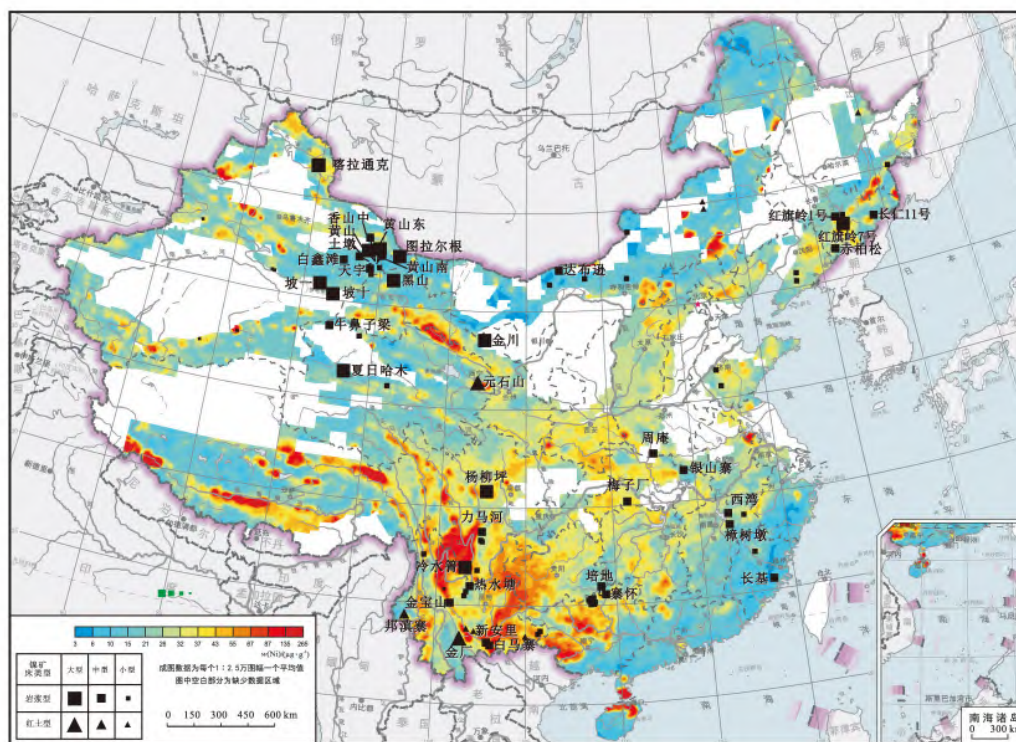


图3 中国镍地球化学及镍资源分布图(底图据谢学锦等,2012)

Fig. 3 The distribution of nickel and its geochemistry in China

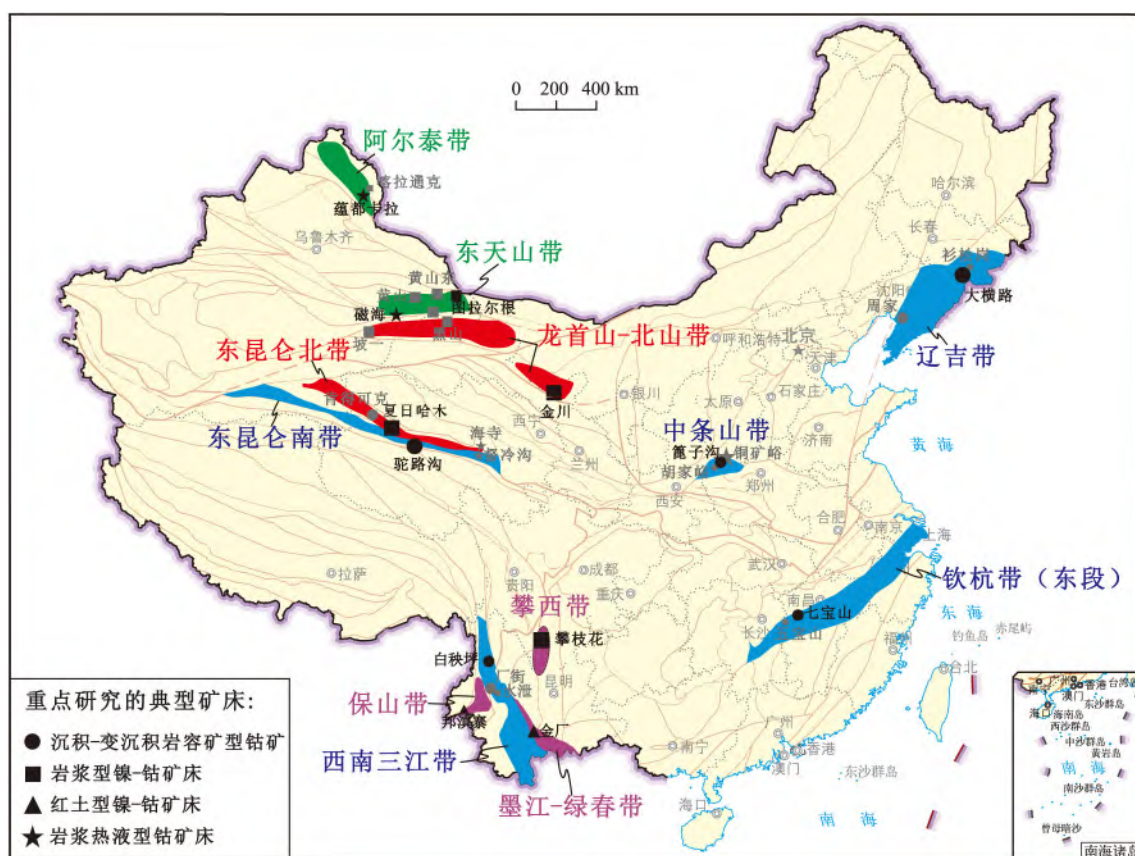


图4 中国钴-镍矿床地质分布规律略图(王辉等,2019)

Fig 4 The sketch map of geological distribution of cobalt-nickel deposits in China

红土型镍-钴矿床:该成矿类型由于受气候条件等因素制约,主要发育在中国云南墨江-绿春、保山成矿带内(Li Y et al., 2015),以金厂、邦滇寨红土型镍-钴矿床为典型代表(图4)。对岩浆热液型钴铜多金属矿床找矿勘查在新疆北部取得新进展,少量深部钻探验证已获得钴金属量超过1万t,以阿勒泰成矿带蕴都卡拉矿床为典型代表(图4)(朱伯鹏等,2020;张铭杰等,2020)。

2 钴-镍成矿作用与成矿规律

2.1 沉积型钴-铜矿床成矿作用

沉积型钴-铜矿床主要集中发育在中非裂谷带的赞比亚-刚果(金)境内,中非钴铜成矿带蕴含超过1000万t钴资源量,占全球大陆型钴资源的70%以上(王武名等,2021;卢宜冠等,2021)。赞比亚成矿带是中非钴铜成矿带的重要组成部分,钴资源集中在铜带省的几个主要矿床中,谦比希矿床就是典

型代表(Hitzman et al., 2005)。赞比亚成矿带沉积型钴矿床整体上具有明显构造控矿特征,矿体常常发育在复向斜的两翼(张东红等,2013);受造山运动影响,中非成矿带自新元古代晚期起受到区域上北东-南西向的持续挤压,成矿作用与区域上第二期变形作用联系紧密,矿体常常发育在该变形产生的褶皱枢纽及相应的二级、三级褶皱中,尤其是同造山期及后造山期形成的热液脉体;Co元素高度富集(卢宜冠等,2021)。此外,由于具有高渗透性,便于热液流体的汇聚,最新研究发现,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(卢宜冠等,2021)。

沉积-变沉积岩容矿型钴矿是中国极具潜力的重要钴矿床类型,在中国多个区域均有发现,但发育

特征不明、成矿潜力不清(王辉等,2019;王武名等,2021)。沉积岩容矿富钴矿床中 Co 富集成矿与物质源区、沉积成岩环境、盆地流体演化过程密切相关,同时矿床形成之后可能会受到区域变质、变形作用或岩浆-热液作用的改造,从而掩盖矿床的一些原生特征。最新研究山西中条山钴矿进一步揭示了 Co 的释放、迁移与富集成矿离不开强氧化性高温高盐流体(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。沉积岩-变沉积岩容矿型钴的物质来源和驱动机制是重点要解决的关键问题。

2.2 岩浆型硫化物和氧化物矿床成矿作用

岩浆铜镍(钴)硫化物矿床多数位于克拉通边缘,通常被认为是由于克拉通边缘地壳较薄造成的(汤中立等,2011;张照伟等,2016;王博林等,2017;王辰等,2018;Wang et al.,2019)。在地壳运动过程中,应力较为集中,容易形成超壳岩石圈断裂,有利于幔源岩浆上升、就位及地壳物质混染作用的发生(孟繁聪等,2017;莫宣学,2019;王焰等,2020)。另外,Pirajno et al.(2015)认为大型岩浆铜镍(钴)硫化物矿床的形成和地幔柱在岩石圈地幔底部的叠加作用密切相关。赋矿的镁铁-超镁铁岩体多为多岩相的复式岩体,该类岩体由多种岩相构成,但堆晶结构和堆晶层理不发育;在大多数情况下,构成岩体的岩相主要包括辉长岩相(暗色辉长岩、辉长岩、淡色辉长岩、斜长岩、闪长岩)、苏长岩相、辉石岩相和橄榄岩相(汤中立等,2011;Song et al.,2016;Sun et al.,2019);各种岩相相对集中产出,构成岩相带,岩相带之间为侵入接触关系,而且具有相对固定的侵位顺序:辉长岩相→苏长岩相→辉石岩相→橄榄岩相;辉长岩相总是侵位在先,橄榄岩相总是最后侵位,岩浆继橄榄岩相侵位之后贯入(毛亚晶等,2014;Su et al.,2020)。海绵陨铁状矿石主要赋存在橄榄岩相中,浸染状矿石主要赋存在苏长岩相和辉石岩相中。若橄榄岩相侵位与岩浆贯入的时差小,则岩浆往往贯入到橄榄岩相内部或其附近;若二者的时差大,块状矿石的赋存部位受构造裂隙控制,而与岩相带无关(张照伟等,2015;姜常义等,2015;钱兵等,2017;刘月高等,2019)。

中国岩浆铜镍(钴)硫化物矿床母岩浆性质主要为高镁拉斑玄武岩和苦橄岩,如金川、黄山、图拉尔根等矿床原生岩浆均为高镁拉斑玄武岩(Li et al.,

2015;2019);坡一等矿床的原生岩浆为苦橄岩(王亚磊等,2017);最近也有一些研究认为夏日哈木铜镍矿的原生岩浆为玻安岩(Li et al.,2018;Chen et al.,2021)。原生岩浆中 MgO 的含量往往与岩浆源区的部分熔融程度密切相关;除此之外,源区的温度-压力也是重要因素。通常情况下,较高的部分熔融程度会导致 MgO 含量较高,从而可以形成 Ni 品位较高的矿床。Ni 在橄榄石中是相容元素,橄榄石的大量分离结晶将明显导致岩浆中 Ni 含量的降低。因此,岩浆演化过程中硫化物饱和熔离的早晚以及 R-factor 等因素同样影响硫化物中的 Ni 含量(Song et al.,2016)。与世界范围内铜镍矿床相比,中国典型铜镍矿床的 Ni 品位明显偏低,如金川巨型矿床 Ni 平均品位为 1.08%,夏日哈木超大型镍矿平均品位为 0.68%,黄山东矿床平均品位为 0.52%,黄山铜镍矿平均品位为 0.42%,这可能也与其部分熔融程度较低有关(Maier et al.,2011;祁生胜等,2014;Lightfoot et al.,2015;Barnes et al.,2016;Chen et al.,2018;Xue et al.,2019)。

岩浆型氧化物钒钛磁铁矿矿床中的钴-镍资源,主要是伴生元素,重点在于综合利用(张志炳等,2016)。攀西裂谷带钒钛磁铁矿资源极为丰富,其中 Co、Ni、Cu 伴生组分储量规模极大;Co、Ni 元素通常较为集中赋存于金属硫化物中,硫化物种类繁多,包括少量砷化物和锑化物在内共计 33 种(张贵山等,2021);主要硫化物包括磁黄铁矿、黄铁矿、含钴镍磁黄铁矿、含钴镍黄铁矿、硫钴镍铁矿等。不同种类矿物量差别很大,其中磁黄铁矿和黄铁矿的含量占硫化物总量 90%以上。Co 主要赋存在金属硫化物中,以白马钒钛磁铁矿矿床为例,硫钴粗精矿 Co 品位为 0.35%、S 品位为 35.91%。工艺矿物学研究表明,硫钴粗精矿中 Co 的分布率分别为:含钴镍黄铁矿中为 74.63%,硫钴镍铁矿中为 10.84%,磁黄铁矿中 12.50%,黄铁矿和黄铜矿中分别均为 0.08%;另有 1.87%的 Co 分布于铁钛氧化矿物和硅酸盐脉石矿物中(李潇雨等,2016)。攀西裂谷带钒钛磁铁矿远景储量高达 100 亿 t,其不仅是铁矿的重要补充,且是铬、钒、钛资源的主要载体,是钢铁、钒钛等多种金属的重要原料;而且伴生资源量可观的硫化物、铂族元素、稀土元素和稀散元素等,四大矿区钴金属资源量 90 万 t(钴金属量)、镍 70 万 t(镍金属量),具有极高的综合利用价值(刘应

冬等,2020)。

2.3 红土型镍-钴矿床成矿作用

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 E E 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,因此红土型镍钴矿数量不多,目前仅在海南和云南地区有一些发现,代表性矿床如云南元江-墨江镍钴矿(由二辉橄榄岩及纯橄岩风化而成,Co品位为0.03%~0.04%,钴金属量为~4 000 t)、海南文昌蓬莱(由橄榄玄武岩风化形成,Co品位为0.03%,钴金属量约为8 000 t)及安定居丁钴土矿(由橄榄玄武岩风化形成,Co品位为1.63%,钴金属量为1.4万t),两个伴生Co的镍矿体(赵俊兴等,2019;王焰等,2020)可能具有一定的潜力。

2.4 岩浆热液型钴-铜矿床成矿作用

岩浆热液型钴-铜矿床赋矿地层多为基性-中基性火山岩、火山碎屑岩及火山碎屑沉积岩,主要岩性为玄武岩、凝灰岩,局部夹少量含角砾凝灰岩、凝灰质砂岩、玄武质沉凝灰岩等(Steffi Burchardt, 2018; Virtanen et al., 2021)。与区域性大断裂及次级断裂关系密切,这为岩浆热液流体上涌提供了空间和条件。侵入岩主要是闪长岩,与矿化关系最为密切,钴铜矿化主要赋存于闪长岩内外接触带中。闪长岩主要侵位于中基性火山岩中,多呈不规则岩株、岩枝、岩脉状,部分地段与地层断层接触,受断裂控制的影响,表现为较强的碎裂岩化(Dare et al., 2010; Ding et al., 2019)。

矿区岩石热液蚀变十分发育且种类多,主要为硅化、碳酸盐化、黏土化、绿泥石化、绿帘石化、高岭石化、绢云母化和蛇纹石化等,其中硅化与成矿关系最为密切(朱伯鹏等,2020)。各蚀变带的矿化特征也有明显差异,蚀变类型和强弱明显受闪长岩侵入体控制,在岩体内部及近岩体处蚀变强烈,远离接触带蚀变逐渐减弱甚至消失(王玉往等,2018)。铜-钴矿区矿化受闪长岩-玄武岩接触带和构造破碎带控制,矿化主要分布于内外接触带与构造破碎带中;矿化类型为浸染状、细脉-浸染状、细脉状、团斑状、稠密浸染状及块状等;成矿元素主要为Co、Cu、Au。

进一步表明,上述特征都是与闪长岩有关的热液脉状矿床的典型特征,局部与构造热液活动有关(朱伯鹏等,2020)。

2.5 钴-镍成矿规律与关键科学问题

2.5.1 钴-镍成矿认识

鉴于中国含钴-镍矿床主要成矿类型和地质分布的特点,除沉积型之外,其他3个主要钴-镍成矿类型与镁铁-超镁铁质岩密切相关(张照伟等, 2021a)。此类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(Patten C et al., 2013; 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 A J., 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(Yao et al., 2018);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)。

铜镍硫化物矿床中Co的富集与硫化物熔体的熔离作用有关。硫化物熔体的Co含量一方面与R-factor有关,另一方面也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大于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Co含量一般很高,而从中间态硫化物固溶体(ISS)结晶的黄铜矿Co含量则很低(Dare S A S et al., 2010),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(石少华等,2019)。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 品位(王焰等, 2020)。

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(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)。按照富 Ni 矿物的不同, 红土型镍钴矿可进一步区分为富水镁硅酸盐型、黏土型、和氧化物型 3 种。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。值得注意的是, 红土型镍钴矿的 Co 品位还与超镁铁质岩的类型、地下水及水位、断裂和剪切构造作用及地形有关(Fu et al., 2019)。

2.5.2 关键科学问题

对以上 4 种成矿类型的认识, 初步揭示了钴-镍成矿机理和超常富集规律, 但制约找矿新突破的关键科学问题仍未得到解决, 是限制中国钴-镍资源增量增储的关键。

大陆聚-散与钴-镍成矿的时空耦合关系。Co、Ni 属典型的幔源元素, 在地壳中极为分散; Co、Ni 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, 经历了多期次的超常富集过程, 这一过程往往与大陆聚-散过程中多圈层相互作用密切相关(徐义刚等, 2017; Sisir K et al., 2018)。中国钴-镍矿床产于不同构造单元中, 成矿类型多样且成矿时代涵盖元古代—新生代。因此, 查明不同类型钴-镍矿床的成矿地质构造背景与关键控制因素, 探讨大陆聚-散过程中壳幔相互作用与钴-镍成矿的时空耦合关系, 对深入认识钴-镍矿床时空分布与发育规律、构建成矿模型奠定创新基础和解决关键科学问题的知识积蓄。

沉积-变沉积岩容矿钴的物质来源及超常富集机理。富钴矿床的形成大多与基性-超基性岩有着直接或间接的成因联系(王辉等, 2019; 王焰等, 2020)。对于典型的沉积岩容矿型铜-钴矿床(“SSC”型), 国际主流观点认为铜来源于盆地流体对红层或下伏基底岩石的淋滤, 而对钴的来源一直缺少针对性研究; 此外, 由于富钴沉积岩容矿床多数形成于元古代, 矿床形成时或形成之后普遍经历了区域变质、变形作用和岩浆-热液作用的叠加与改

造, 钴矿的形成很可能经历了多期次、多阶段的富集作用过程。因此, 不同产出背景下的沉积-变沉积岩容矿钴的物质来源、以及主导 Co 元素超常富集成矿的机理是该钴-镍成矿类型的关键科学问题, 亟待解决。

岩浆源区及其岩浆演化对岩浆型钴-镍富集成矿的制约。岩浆型钴(-镍)矿床提供了全球约 15% 的钴和 40% 的镍金属量, 该类型矿床大多产于地幔柱相关的裂谷环境(金川)或造山带碰撞后伸展环境(夏日哈木)。岩浆型矿床被认为形成于液相硫化物相和基性或超基性岩浆的不混溶作用; 岩浆型矿床中 Co 的富集与地幔的部分熔融程度或母岩浆的 Co 含量有关, 还受到 Co 在硅酸盐熔体和硫化物熔体之间、单硫化物固溶体(MSS)和硫化物熔体之间的分配系数和岩浆后期热液活动改造等的影响(Patten et al., 2013; Matthew et al., 2016)。目前, 对幔源岩浆演化过程中温度、压力、含水量、氧逸度和地幔热力学状态等多种因素对 Co 地球化学行为的影响认识仍十分有限, Co 在岩浆型矿床中的富集成矿的关键控制因素亦亟待查明。

3 钴-镍矿床高效勘查技术

随着找矿勘查工作的持续推进, 找到矿的难度越来越大。当今时代的找矿工作重点是攻深找盲, 要么是已知矿床的深边部, 要么就是覆盖区的盲矿体; 高效的勘查技术则显得尤为重要, 天-空-地一体化的深部探测可能会把找矿变成现实, 不同的矿床类型, 勘查技术方法组合的有效性也不尽相同。

3.1 沉积型钴-铜矿床勘查技术

中国沉积-变沉积岩容矿型钴矿在辽吉带、西南三江带、东昆仑南带、钦杭带及中条山带等都有发现(图 4); 通过快速查明富 Co 沉积盆地的时空结构与演化历史, 解析关键赋矿层位的沉积环境、物质来源及构造变形-变质-岩浆作用的叠加改造过程, 进一步阐明中国代表性沉积-变沉积岩容矿型钴矿的发育特征和形成的有利地质条件, 揭示形成的构造背景与关键控矿因素; 系统精细剖析沉积成岩阶段、成岩晚期(之后)盆地流体活动及构造变形、变质作用或岩浆-热液作用叠加过程中可能发生的 Co 富集与改造作用, 查明成矿物理化学条件及其演化过程, 确定成矿物质来源, 揭示 Co 的超常富集机制, 建立

成矿模式(朱海宾等,2019)。

基于典型矿床的成矿模式,利用中-高分辨率、多-高光谱遥感影像,建立赋矿层位及其特征岩性的解译标志及提取方法;基于 VNIR-SWIR 光谱分析技术研究赋矿层位的三维空间分布特征,确定勘查评价的光谱指示标志;利用多比例尺无人机航磁、大功率三分量高温超导瞬变电磁测量、综合测井等地球物理数据,结合原生晕、次生晕地球化学分析,构建赋矿层位物化探异常组合特征;以关键赋矿层位的综合找矿标志信息提取为重点,形成高效勘查技术体系;利用现代数据科学技术,有效识别、量化并融合重点成矿区带物探、化探和遥感异常,对重点研究区带钴成矿潜力进行定量评估;优选找矿远景区,基于高效勘查技术方法开展大比例尺综合找矿预测,确定有利找矿靶区;结合小口径多分支定向钻探验证,完善勘查技术体系,综合建立勘查示范基地。

3.2 岩浆型硫化物和氧化物矿床勘查技术

岩浆型铜镍钴硫化物矿床主要发育在中国西北地区,以龙首山的金川超大型矿床、东昆仑北带的夏日哈木超大型矿床,以及东天山-北山成矿带的黄山、图拉尔根等大型矿床为典型代表(图4);矿床成因多为深部熔离-岩浆贯入型模式(张照伟等,2021a)。可进一步查明成矿地质构造背景、赋矿岩体特征(分布规律、岩石组合、矿物组成、岩石地球化学特征、同位素组成、地球物理及地球化学特征参数)、矿体特征、矿石特征、矿化蚀变特征等方面的异同,揭示岩浆源区性质(王旋等,2021);结合 Co 元素赋存状态和富集成矿机制,构建以金川、夏日哈木等钴-镍矿床为代表的三维矿体模型,总结成矿规律、控矿因素和找矿标志(张照伟等,2021b)。

“空-地-井”三维钴-镍高效勘查技术和勘查示范。典型矿床深部强干扰条件下矿体定位预测及勘查示范,系统搜集梳理以往各时期物化探资料,首先初步评价各种勘查技术方法的有效性;充分利用矿区已有重、磁资料,结合金川集团股份有限公司在金川矿床深部找矿正在实施的钻探工程,进一步开展钻孔综合测井、高温超导井中三分量磁测、地-井 TEM 和钻孔原生晕测量,探测钻孔孔旁及孔底周围一定范围内可能存在的盲矿体;总结有支护充填体、强矿场、高地应力等干扰因素影响的矿床深部勘查技术组合(高亚林等,2021)。

复杂地形隐伏岩体定位预测及勘查示范:充分利用已有区域地物化遥资料,在龙首山-北山带和东昆仑北带初步圈定找矿有利区;在此基础上,进一步利用无人机航磁技术开展大比例尺磁法测量、多源电磁测深、高温超导地面瞬变电磁测量、激电中梯和岩石/土壤热磁组分地球化学测量,逐步缩小找矿靶区。

攀枝花地区钒钛磁铁矿不同类型、不同层位和不同品级的矿石普遍分布有硫化物。硫化物的矿物量在不同矿区不同层位矿石的差别很大。攀枝花矿区硫化物富集,全区硫化物含量为 8.72%~0.05%,其中,白马矿区为 2.59%~0.4%,太和矿区为 4.03%~0.34%,红格矿区为 7.15%~0.13%。原矿硫化物中含 Co 量一般大于 0.3%;原矿硫化物中含 Ni 量一般大于 0.1%;四大矿区相比较,红格矿区 Ni 含量最高,太和矿区 Ni 含量最低。硫化物中 Cu 的含量一般大于 0.1%,与 Ni 含量高低同步。进一步加大对 Co、Ni 元素赋存状态和分离富集工艺研究力度,提高钴-镍资源综合利用效率(李潇雨等,2016)。可通过矿物加工及选矿手段,将金属硫化物进一步富集,获得硫精矿,在硫精矿的基础上开展相关研究工作。采用 X 射线衍射分析、电子探针、扫描电镜、透射电镜及 AMICS 矿物全自动定量分析等手段,查明 Co、Ni 的载体矿物类型、含量、粒度分布特征,以及载体矿物中 Co、Ni 元素的含量及其他组分含量;综合所有矿物参数数据研究 Co、Ni 赋存状态,为 Co、Ni 资源综合评价提供支撑。

3.3 红土型镍-钴矿床勘查技术

红土型镍-钴矿床的有效勘查,清楚该类型的成矿地质特征可增强勘查技术的针对性及有效性,分析钴-镍时空分布规律,综合地物化遥资料,建立红土型镍-钴矿床的成矿模式(肖明忠,2018)。综合地质信息法进行矿产预测,在成矿规律研究的基础上,充分考虑地层、构造、岩体、物化遥等与成矿的关系,通过预测要素叠加分析来圈定最小预测区,并运用地质体积法等不同的储量估算方法计算潜在资源量(Yao et al., 2018; You et al., 2021; Wang et al., 2021)。

红土型镍-钴矿中 Co 赋存状态的认识,可结合工艺矿物学研究,开展钴-镍高效分离机理分析,综合评估钴资源的利用潜力(杨玉华等,2013);进一步

明确钴-镍综合利用载体对象,厘清钴-镍等亲硫元素聚散机制和富集规律,确定钴-镍的理论分离指标;研发绿色高效的分离提取技术,结合技术经济评价,综合评估典型矿床钴资源的利用潜力。

3.4 岩浆热液型钴-铜矿床勘查技术

岩浆热液型钴-铜矿床矿区,除中基性火山岩及侵入岩、围岩蚀变的地质特征外,地球物理、地球化学也表现了比较明显的异常特征。物性参数表明,矿区岩(矿)石物性参数有明显差异,含矿岩石具中低极化、中-高阻特点,围岩具低极化、相对高阻的特点,而蛇纹石化橄榄岩则为高极化、低阻特征(朱伯鹏等,2020)。一般具有 $Au-Cu-As-Mo-Sb-Pb-Co-Zn-Sn$ 的地球化学综合异常,其中 Au 、 Cu 、 Co 、 As 异常套合较好,面积大,与矿体产出部位基本对应。

该类型矿床的勘查技术方法首先考虑土壤地球化学,针对土壤地球化学主要成矿元素(Au 、 Cu 、 Co 、 As)异常浓集中心,寻找地表矿化蚀变带,初步确定矿化类型、强度及范围;其次,基于地表孔雀石、褐铁矿、黄铁矿、辉铜矿和绿帘石化、绿泥石化、硅化、高岭土化矿化蚀变特点,开展地质专项填图,初步确定矿化蚀变带形态、规模、产状及其与地层、岩体和构造的相互关系,查明赋矿岩石类型;辅以探槽的系统揭露,详细确定地表矿体及矿化体的数量、形状、规模、产状和品位变化等特征(严加永等,2021);再次,对地表矿化蚀变带开展地面物探电法剖面测量,圈定物探激电异常($\eta \geq 1.8\%$, $\rho \geq 1000 \Omega \cdot m$),并结合化探、地表地质填图、工程施工等成果对物探异常进行优选;重点关注宽缓的激电异常,可能是深部隐伏富矿体的表现;最后,针对激电异常及地表矿化情况开展激电测深,查明异常与矿化的关系,大致确定异常形态、强度、埋深,为钴探施工提供依据并精准定位。钴探验证结果表明,针对该类型的物探异常特征取得较好的找矿效果,表明激电测深异常对矿化体在 300 m 以上的空间分布位置、产状有较明显的反映,特别是对隐伏矿顶板的埋深判断准确(朱伯鹏等,2020)。

3.5 勘查技术创新与勘查模型

3.5.1 钴-镍矿床勘查技术创新

钴-镍资源扩量增储要重点关注 2 个方面:一是勘查找矿发现新矿床,二是已有含钴矿床的综合利用,研究赋存状态和规律。钴-镍矿床的高效勘查与

矿产预测多元信息深度挖掘技术,焦点是勘查找矿发现钴-镍新矿床,形成新的矿产资源基地。从“新技术”、“低成本”和“快验证”3 个方面开展技术创新研发工作。其中,“新技术”主要体现在空-地-井重磁电探测技术、高光谱高分辨率遥感技术、超痕量元素(PGE)分析技术、小口径大斜度多分支定向钻探技术及现代数据科学计算机技术等在不同钴(-镍)矿床找矿勘查工作中的联合应用;“低成本”主要体现在充分借助已经完成的各种中小比例尺地物化遥数据、成矿规律和模型研究资料,利用多元信息深度挖掘技术,建立找矿预测模型,进行钴(-镍)资源定量评估,快速圈定找矿远景区;“快验证”体现在充分利用不同钴(-镍)成矿模型和成矿规律的研究成果,有针对性地获取大比例尺地物化遥数据,研发有效的数据提取技术,结合便携式数据采集设备(ASD 光谱仪、便携式 X 射线荧光分析仪、便携式磁化率仪等)及智能化模块化地球化学快速取样钻探技术等,进行快速野外采样和验证(Liu et al., 2016, 2017)。

含 Co 、 Ni 矿物结构和组成及赋存状态研究测试分析技术,可利用 X 射线衍射仪(XRD)、光学显微镜、扫描电镜(SEM)、电子探针、激光剥蚀等离子质谱仪等常规的矿物学研究手段(Kang et al., 2022),准确表征 Co 、 Ni 的嵌布特征及与其他矿物的共生关系;并结合 TESCAN 全自动矿物分析系统(TIMA)、微区 X 射线荧光光谱仪($\mu-XRF$)、工艺矿物参数自动定量分析(MLA)、透射电镜(TEM)、纳米离子探针(Nano-SIMS)、高分辨率透射电镜(HRTEM)等高精尖微区分析技术(王焰等, 2020),精细查明钴-镍矿石中各矿物粒度、显微结构、微区组分、元素分布和晶体结构等特征,从微观上表征 Co 、 Ni 元素在矿物晶体结构中的位置和赋存状态。

3.5.2 综合找矿勘查模型

基于 Co 、 Ni 金属元素超常富集机理和成矿过程及控矿因素和找矿标志的认识,综合创建找矿勘查模型,可有效引领找矿新突破。在地质勘查方面,对东昆仑夏日哈木超大型岩浆铜镍钴硫化物矿床做了大量的探索和实践,并取得一定的认识和进展(Meng et al., 2013; 张照伟等, 2017; 赵海超等, 2018; Fang et al., 2021),在地球物理勘查技术有效性试验方面获得突破(武军杰等, 2015a, 2015b; 王兴

春等,2015,2016)。综合地质特征(构造、时代、岩体、围岩、矿物特征、风化蚀变)、地球物理、地球化学和钻探工程等创建的找矿勘查模型(图5),使找矿

勘查更具实践性和高效性。应用于东昆仑石头坑德镁铁-超镁铁质岩体获得找矿新进展(刘月高等,2019;张照伟等,2020)。

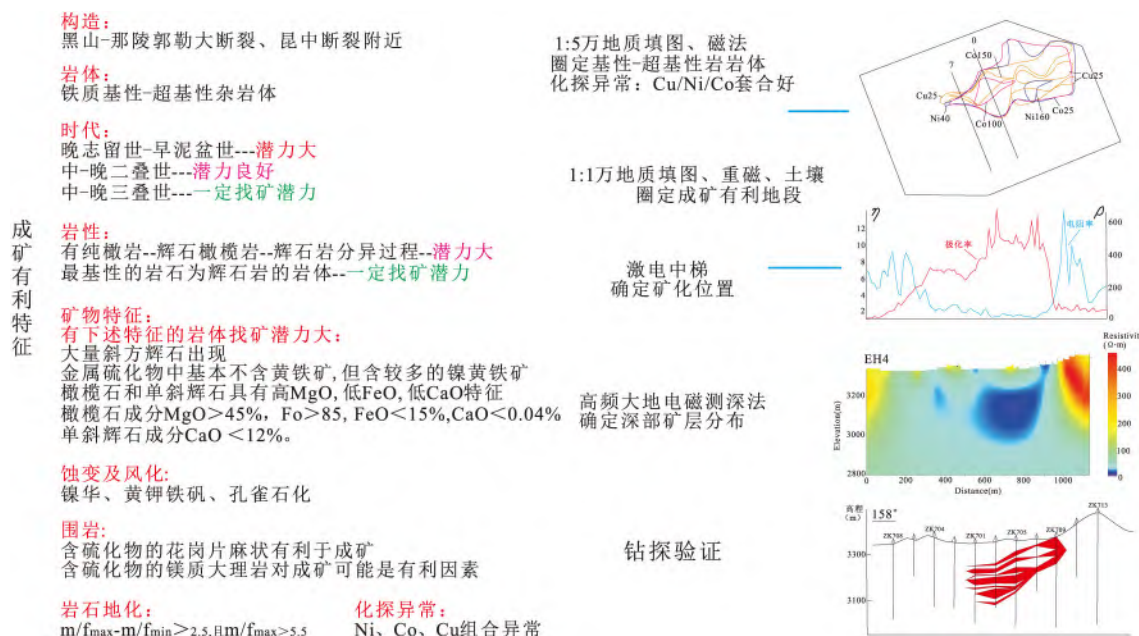


图5 东昆仑地区岩浆铜镍钴硫化物矿床综合信息勘查模型图(刘月高等,2019;张照伟等,2020)

Fig. 5 The exploration model for magmatic Cu - Ni - Co sulfide deposits in eastern Kunlun orogenic belt

钴矿一直是铜镍矿的副产品,目前没有专门针对钴镍矿的勘查方法,还不成体系(Liu et al., 2018; Yan et al., 2019; Zhang et al., 2021)。针对岩浆型钴镍硫化物矿床研究较多,现有的勘查方法一般是用地面重磁来圈定岩体,再围绕岩体开展常规地球物理方法开展探测。这种常规工作方法效率低,探测深度浅,分辨力低,已不能满足目前深部找矿需求。未来可创新建立针对矿体定位的空-地-井的勘查技术体系。在该体系中,以航空半航空电磁方法快速圈定岩体,调查盆地结构或含矿岩系,再利用大深度高分辨电磁法精细探测岩体及深部矿体,或含矿地层,在实施钻探后,开展井中物探和综合测井,进一步确定矿体位置和空间形态。该体系创新的独到之处在于:在空中,通过无人机航磁和半航空瞬变电磁快速扫面;在地面160 kw超大功率可控源电磁法和10 kw高温超导瞬变电磁,大功率,大深度,高分辨;井中瞬变电磁和井中三分量磁测,在深部探边摸底,准确定位;多分支钻探,一孔多支,多方向控制矿体。

采用针对不同钴-镍矿床类型空-地-井、点-线-

面协同高效的勘查技术方法组合(Zhang et al., 2017; Zheng et al., 2020)。沉积-变沉积岩容矿型,通过无人机航磁扫面快速识别沉积盆地结构与赋矿岩系+大深度地面电磁法剖面精细探测含矿层位(160 kw超大功率可控源电磁、10 kw高温超导瞬变电磁),应用小口径大斜度多分支定向钻探精确控制矿体展布(一基多孔);岩浆硫化物型,在深切割地形复杂地区通过半航空瞬变电磁扫面快速识别隐伏小岩体,针对金川等矿场强干扰条件采用地-井TEM瞬变电磁探测深部盲矿体;岩浆热液型,应用航空、半航空电/磁法快速识别中基性火山岩及控矿构造,多参数物探剖面圈定钴多金属矿体;红土型,无人机航磁扫面+10 kw高温超导瞬变电磁精确剖面快速圈定含矿地质体。

4 结语

钴-镍作为中国战略性稀缺金属,极度匮乏的资源现状存在巨大安全隐患,进一步开展钴-镍找矿勘查并加强成矿元素赋存状态系统研究,对于提升资

源储量和回收率都显得尤为重要。中国本身缺乏对沉积-变沉积岩容矿钴矿的超常富集机制和规律性的研究,汇聚板块边缘的岩浆铜镍钴硫化物矿床中钴金属量尚未查明,仍然缺乏针对性的详细地质调查,以获得钴金属量的准确数据。

Co 和 Ni 在镁铁-超镁铁质岩和相关矿床不同矿物相中的赋存状态存在显著差异。无论是否能发现新的含矿岩体,加强成矿元素赋存状态的系统研究都十分必要。

聚焦 Co、Ni 元素超常富集机理与成矿规律、高效勘查技术研究应成为未来亟待重点关注的方向。秉持“查明资源分布-揭示成矿规律-建立成矿模式-挖掘高效技术-评估成矿潜力-找矿勘查示范”全链条的研发理念,重点查明钴-镍物质来源、赋存状态,认识超常富集机理;揭示钴-镍主要类型矿床成矿特征、时空分布规律,形成成矿模式;建立 4 种钴-镍成矿类型的找矿模型和高效勘查技术体系,同时建立中国钴-镍资源多元信息数据库,定量评估资源潜力;在此基础上,圈定找矿新靶区、实施钻探验证,提交钴-镍找矿勘查示范基地。

同时,在成矿理论和勘查技术上实现科技创新,驱动钴-镍矿产勘查开发和供应保障能力。聚焦大陆聚-散对沉积-变沉积岩容矿钴活化、迁移与超常富集过程的制约研究,深化镁铁-超镁铁质岩浆源区性质对岩浆型钴-镍富集成矿的控制作用认识,基于现代高精微区原位分析技术所开展的钴-镍赋存状态及富集机理探索,都是钴-镍成矿理论上关键的创新点。

关于沉积岩或变沉积岩容矿富钴矿床的高效勘查技术体系一直以来缺乏针对性的研究,大型岩浆型钴-镍硫化物矿床在强干扰因素影响下深部勘查技术体系亟需完善,这都需要勘查技术方法组合创新,解决制约找矿突破中的关键技术难题。创建高效钴-镍资源潜力评估及靶区预测多元信息深度挖掘技术方法,加强空-地-井高精度重磁电物探数据采集、处理与多参数联合正反演解译,探索应用小口径大斜度多分支定向钻探技术。这些勘查技术上的创新点及方法组合创新势必驱动高效勘查技术的发展,极大促进找矿勘查效果并取得实质性找矿新突破,支撑保障中国钴-镍急缺战略性矿产的安全供应能力。

致谢:本文是在申请国家重点研发计划“十四

五”重点专项“战略性矿产资源开发利用”2021 年指南项目之“钴-镍成矿规律与高效勘查技术”的过程中形成的;期间,得到了各研发合作单位的大力支持,得到中国地质调查局西安地质调查中心计文化研究员的框架构建及研究思路的启发;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;论文评审专家及《西北地质》编辑部吕鹏瑞高级工程师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):

- 陈华勇. 对中国矿床学未来发展方向的思考[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 99-105.
- CHEN Huayong. Meditations on the future development of ore deposit science in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27 (2): 99-105.
- 丰成友, 张德全, 余宏全, 等. 青海驼路沟钴(金)矿床形成的构造环境及钴富集成矿机制[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 544-561.
- FENG Chengyou, ZHANG Dequan, SHE Hongquan, et al. Tectonic setting and metallogenic mechanism of Tuolugou cobalt (gold) deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2006, 25(5): 544-561.
- 高亚林, 和乾元, 李翠平, 等. 金川矿区龙首矿西二副井 1240~1120 m 段井筒破坏机理分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 9814-9822.
- GAO Yalin, HE Qianyu, LI Cuiping, et al. Analysis of Shaft Failure Mechanism in the 1240 m-1120 m Range of Xier Auxiliary Shaft in Longshou Mine of Jinchuan Deposit[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 9814-9822.
- 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.
- 姜常义, 凌锦兰, 周伟, 等. 东昆仑夏日哈木镁铁质-超镁铁质岩体岩石成因与拉张型岛弧背景[J]. 岩石学报, 2015, 31(4): 1117-1136.
- JIANG Changyi, LING Jinlan, ZHOU Wei, et al. Petrogenesis of the Xiarihamu Ni-bearing layered mafic-ultramafic intrusion, east Kunlun: implications for its extensional island arc environment[J]. Acta Petrologica Sini-

- ca, 2015, 31(4): 1117-1136.
- 李立兴,李厚民,丁建华,等. 东天山维权银铜矿床中钴矿化发现及成因意义[J]. 矿床地质, 2018, 37(4): 778-796.
- LI Lixing, LI Houmin, DING Jianhua, et al. The discovery of cobaltite mineralization in Weiquan Ag - Cu deposit, eastern Tianshan Mountains, and its significance[J]. Mineral Deposits, 2018, 37(4): 778-796.
- 李廷栋,肖庆辉,潘桂棠,等. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1441-1451.
- LI Tingdong, XIAO Qinghui, PAN Guitang, et al. A Consideration about the Development of Ocean Plate Geology[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1441-1451.
- 李文渊. 中国西北部成矿地质特征及找矿新发现[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 365-380.
- LI Wenyuan. Metallogenic geological characteristics and newly discovered orebodies in Northwest China[J]. Geology in China, 2015, 42 (3): 365-380.
- 李文渊. 古亚洲洋与古特提斯洋关系初探[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2201-2210.
- LI Wenyuan. The primary discussion on the relationship between Paleo-Asian Ocean and Paleo-Tethys Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34 (8): 2201-2210.
- 李文渊,张照伟,张江伟,等. 新疆北部晚古生代大规模岩浆作用与成矿耦合关系研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-324.
- LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. A study on the coupling relationship between large-scale-magmatism and mineralization of late Paleozoic in northern Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 2019: 1-324.
- 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.
- 李向前,毛景文,闫艳玲,等. 中非刚果(金)加丹加铜钴矿带主要矿化类型及特征[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 366-380.
- LI Xiangqian, MAO Jingwen, YAN Yanling, et al. Regional geology and characteristics of ore deposits in Katangan copper-cobalt belt within Congo (Kenshasa), Central Africa [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 366-380.
- 李满雨,周满赓,王婧,等. 攀西钒钛磁铁矿硫族元素工艺矿物学研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(1): 118-134.
- LI Xiaoyu, ZHOU Mangeng, WANG Jing, et al. Craft mineralogy research of chalcogens in Panxi vanadium-titanium magnetite[J]. China Mining Magazine, 2016, 25 (1): 118-134.
- 刘东盛,王学求,周建,等. 中国钴地球化学基准值特征及影响因素[J]. 地球学报, 2020, 41(6): 807-817.
- LIU Dongsheng, WANG Xueqiu, ZHOU Jian, et al. Characteristics of China's Cobalt Geochemical Baselines and Their Influence Factors[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(6): 807-817.
- 刘东盛,王学求,聂兰仕,等. 中国钴地球化学异常特征、成因及找矿远景区预测[J]. 地球科学, (录用定稿)网络首发时间: 2021-08-30.
- LIU Dongsheng, WANG Xueqiu, NIE Lanshi, et al. Geochemical abnormal characteristics, origin and prospecting prospect prediction of cobalt in China[J]. Earth Science, online, 2021-08-30.
- 刘应冬,徐力,王先达,等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中主要金属元素淋滤浸出行为研究 [J]. 矿产综合利用, 2020, 6: 88-94.
- LIU Yingdong, XU Li, WANG Xianda, et al. Study on Leaching Behavior of Main Metal Elements from Pan-zhihua Vanadium-titanium Magnetite Tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020, 6: 88-94.
- 刘月高,吕新彪,阮班晓,等. 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, 2019, 38(3): 644-666.
- LIU Yuegao, LÜ Xinbiao, RUAN Banxiao, et al. A comprehensive information exploration model for magmatic Cu - Ni sulfide deposits in Beishan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(3): 644-666.
- 卢冠冠,涂家润,孙凯,等. 中非赞比亚成矿带谦比希铜钴矿床钴的赋存状态与成矿规律[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 338-354.
- LU Yiguan, TU Jiarun, SUN Kai, et al. Cobalt occurrence and ore-forming process in the Chambishi deposit in the Zambian Copperbelt, Central Africa[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 338-354.
- 毛亚晶,秦克章,唐冬梅,等. 东天山岩基铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1575-1594.
- MAO Yajing, QIN Kezhang, TANG Dongmei, et al. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by the Huang-

- shan Ni - Cu deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1575-1594.
- 孟繁聪, 贾丽辉, 任玉峰, 等. 东昆仑东段温泉地区片麻岩记录的岩浆和变质事件: 锆石 U - Pb 年代学证据[J]. *岩石学报*, 2017, 32(12): 3691-3709.
- MENG Fancong, JIA Lihui, REN Yufeng, et al. Magmatic and metamorphic events recrded in the gneisses of the Wenquan region, east Kunlun Mountains, Northwestern China: evidence from the zircon U - Pb geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 32 (12): 3691-3709.
- 莫宣学. 岩浆作用与地球深部过程[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1487-1493.
- MO Xuanxue. Magmatism and Deep Geological Process[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1487-1493.
- 莫宣学. 大型-超大型矿床成矿地球动力学背景[J]. *地学前缘*, 2020, 27(2): 13-19.
- MO Xuanxue. Geodynamic background of metalogenesis of large-superlarge ore deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27 (2): 13-19.
- 祁生胜, 宋述光, 史连昌, 等. 东昆仑西段夏日哈木-苏海图早古生代榴辉岩的发现及意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3345-3356.
- QI Shengsheng, SONG Shuguang, SHI Lianchang, et al. Discovery and its geological significance of Early Paleozoic eclogite in Xiarihamu-Suhaitu area, western part of the East Kunlun[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3345-3356.
- 钱兵, 张照伟, 刘会文, 等. 柴达木西北缘古生代镁铁超镁铁质岩体 Cu - Ni 成矿条件与找矿潜力分析[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 35-49.
- QIAN Bing, ZHANG Zhaowei, LIU Huiwen, et al. Analysis on the Prospecting Potentiality and Cu - Ni Metallogenic Conditions of the Paleozoic Mafic-ultramafic in the Northwestern Margin of Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 35-49.
- 秦克章, 赵俊兴, 范宏瑞, 等. 试论主要类型矿床的形成深度与最大延深垂幅[J]. *地学前缘*, 2021, 28(3): 271-294.
- QIN Kezhang, ZHAO Junxing, FAN Hongrui, et al. On the ore-forming depth and possible maximum vertical extension of the major type ore deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(3): 271-294.
- 任纪舜, 赵磊, 李崇, 等. 中国大地构造研究之思考——中国地质学家的责任与担当[J]. *中国地质*, 2017, 44(1): 33-43.
- REN Jishun, ZHAO Lei, LI Chong, et al. Thinking on Chinese tectonics——Duty and responsibility of Chinese geologists[J]. *Geology in China*, 2017, 44(1): 33-43.
- 石少华, 邹源, 岑敏, 等. 初论雪峰山地区基性-超基性岩镍钴铜金矿找矿方向[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2019, 38(1): 80-89.
- SHI Shaohua, ZOU Yuan, CEN Min, et al. A Preliminary Discussion on the Prospective of Exploring Ni - Co - Cu - Au Ore Deposits Related to Mafic-ultramafic Rocks in the Xuefengshan Region, Hunan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2019, 38(1): 80-89.
- 宋谢炎. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 699-710.
- SONG Xieyan. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits [J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 699-710.
- 汤庆艳, 李建平, 张铭杰, 等. 东昆仑夏日哈木镍铜硫化物矿床成矿岩浆条件: 流体挥发份化学组成与碳同位素组成制约[J]. *岩石学报*, 2017, 33(1): 104-114.
- TANG Qingyan, LI Jianping, ZHANG Mingjie, et al. The volatile conditions of ore-forming magma for the Xiarihamu Ni - Cu sulfide deposit in East Kunlun orogenic belt, western China: Constraints from chemical and carbon isotopic compositions of volatiles[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(1): 104-114.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 1-9.
- TANG Zhongli, QIAN Zhuangzhi, JIANG Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 1-9.
- 王博林, 李文渊, 张照伟, 等. 东天山香山中镁铁-超镁铁质岩体岩石学与矿物学特征: 对成岩成矿过程的约束[J]. *中国地质*, 2017, 44(6): 1207-1233.
- WANG Bolin, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, et al. Petrological and mineralogical characteristics of the Xiangshanzhong maficultramafic intrusion in eastern Tianshan Mountains: Constrains on rockforming and ore-forming processes [J]. *Geology in China*, 2017, 44 (6): 1207-1233.
- 王辰, 刘建朝, 王浩然, 等. 甘肃金川二矿区岩体橄榄石组构特征研究[J]. *西北地质*, 2018, 51(1): 13-22.

- WANG Chen, LIU Jianchao, WANG Haoran, et al. Fabric Characteristics of the Olivine from No. 2 Mining Area in the Jinchuan Deposit, Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(1): 13-22.
- 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.
- 王汝成, 车旭东, 邬斌, 等. 中国铌钽锆铪资源[J]. *科学通报*, 2020, 65: 3763-3777.
- WANG Rucheng, CHE Xudong, WU Bin, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China[J]. *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3763-3777.
- 王武名, 盛涛, 王丽娟, 等. 刚果(金)加丹加鲁苏西铜钴矿床 S、C、O、Sr 同位素特征及矿床成因[J]. *地学前缘*, 2021, 28(6): 318-330.
- WANG Wuming, SHENG Tao, WANG Lijuan, et al. Characteristics of S, C, O and Sr isotopes and genesis of the Luiswishi Cu-Co deposit in Katanga, Democratic Republic of Congo[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(6): 318-330.
- 王兴春, 窦智, 郑学萍, 等. 夏日哈木铜镍矿区瞬变电磁法有效性试验[J]. *物探与化探*, 2015, 39(4): 733-737.
- WANG Xingchun, DOU Zhi, ZHENG Xueping, et al. The method effective experiment of transient electromagnetic in xiarihamu nickel copper[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(4): 733-737.
- 王兴春, 杨毅, 邓晓红, 等. 定源回线三分量测量在夏日哈木铜镍矿矿区有效性试验[J]. *物探化探计算技术*, 2016, 8(3): 327-333.
- WANG Xinchun, YANG Yi, DENG Xiaohong, et al. Effective test for three-component data of fixed TEM in Xiarihamu Cu-Ni ore mine[J]. *Computing Techniques For Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 38(3): 327-333.
- 王旋, 曹俊, 张盖之. 造山带铜镍硫化物矿床的岩浆起源: 以东天山黄山南铜镍矿床为例[J]. *地球科学*, 2021, 46(11): 3829-3849.
- WANG Xuan, CAO Jun, ZHANG Gaizhi. Origin of Ore-Forming Magmas Associated with Ni-Cu Sulfide Deposits in Orogenic Belts: Case Study of Permian Huangshannan Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposit, East Tianshan, NW China[J]. *Earth Science*, 2021, 46(11): 3829-3849.
- 王焰, 钟宏, 曹勇华, 等. 中国铂族元素、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: 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]. *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3825-3838.
- 王岩, 王登红, 孙涛, 等. 中国镍矿成矿规律的量化研究与找矿方向探讨[J]. *地质学报*, 2020, 94(1): 217-240.
- WANG Yan, WANG Denghong, SUN Tao, et al. A quantitative study of metallogenic regularity of nickel deposits in China and their prospecting outlook[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1): 217-240.
- 王亚磊, 张照伟, 张江伟, 等. 新疆坡北铜镍矿床铂族元素特征及其对成矿过程的约束[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 13-24.
- WANG Yalei, ZHANG Zhaowei, ZHANG Jiangwei, et al. Geochemical Characters of Platinum-group Elements and Its Significances on the Mineralization Process of the Pobei Cu-Ni Sulfide Deposit in Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 13-24.
- 王玉往, 石煜, 唐萍芝, 等. 新疆磁海 Fe(-Co)矿床: 两个系列幔源岩浆复合的热液矿床[J]. *地学前缘*, 2018, 25(2): 280-298.
- WANG Yuwang, SHI Yu, TANG Pingzhi, et al. The Cihai Fe-Co deposit, Xinjiang: a superimposed hydrothermal mineralization of two mantle-derived magmatic series[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 280-298.
- 武军杰, 智庆全, 李貅, 等. 定源回线瞬变电磁三分量纯异常三维反演方法[J]. *地球物理学进展*, 2015a, 30(6): 2827-2835.
- WU Junjie, ZHI Qingquan, LI Xiu, et al. 3D inversion method of fixed-loop TEM with three-component pure anomaly response[J]. *Progress in Geophysics*, 2015a, 30(6): 2827-2835.
- 武军杰, 王兴春, 杨毅, 等. 偶极 TEM 三分量曲线特征分析及应用试验[J]. *物探与化探*, 2015b, 39(5): 973-977.
- WU Junjie, WANG Xingchun, YANG Yi, et al. Characteristic analysis and applied experiment of three-component dipole TEM forward simulation[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015b, 39(5): 973-977.
- 肖明忠. 菲律宾红土型镍矿地质特征及找矿标志分析[J]. *世界有色金属*, 2018, 11: 73-75.
- XIAO Mingzhong. Analysis on geological characteristics and

- prospecting criteria of Philippine laterite nickel ore[J]. World Nonferrous Metal, 2018, 11: 73+75.
- 邢佳韵,陈其慎,张艳飞,等. 新能源汽车发展下锂钴镍等矿产资源需求展望[J]. 中国矿业, 2019, 28(12): 67-71.
- XING Jiayun, CHEN Qizhen, ZHANG Yanfei, et al. Demand outlook for Li-Co-Ni mineral resources under development of new energy vehicles[J]. China Mining, 2019, 28(12): 67-71.
- 许德如,叶挺威,王智琳. 成矿作用的空间分布不均匀性及其控制因素探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(3): 368-388.
- XU Deru, YE Tingwei, WANG Zhilin. Spatially Heterogeneous Distribution of Metallogenesis and its Controlling Factors[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(3): 368-388.
- 徐义刚,钟玉婷,位荀,等. 二叠纪地幔柱与地表系统演变[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(3): 359-373.
- XU Yigang, ZHONG Yuting, WEI Xun, et al. Permian Mantle Plumes and Earth's Surface System Evolution[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(3): 359-373.
- 严加永,孟贵祥,吕庆田,等. 综合地球物理在荒漠覆盖区隐伏矿床预测与定位中的应用:以新疆拉伊克勒克铜多金属矿床为例[J]. 地球物理学报, 2021, 64(11): 4117-4133.
- YAN Jiayong, MENG Guixiang, LÜ Qingtian, et al. Prediction and location of concealed deposits in desertgobi coverage areas using integrated geophysics: An example of the Layikeleke copper polymetallic deposit in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(11): 4117-4133.
- 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.
- 杨玉华,何灿,张峻源,等. 印度尼西亚苏拉威西岛-北马露姑群岛红土型镍矿成矿预测[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 619-624.
- YANG Yuhua, HE Can, ZHANG Junyuan, et al. Laterite Nickel Ore Prediction of Sulawesi Island-North Maluku Islands, Indonesia[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(4): 619-624.
- 翟裕生. 矿床学思维方法探讨[J]. 地质前缘, 2020, 27(2): 1-12.
- ZHAI Yusheng. On the method of thinking in studying mineral deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 1-12.
- 张东红,肖波. 中部非洲沉积型铜-钴矿地质及找矿潜力[M]. 北京:地质出版社, 2013: 1-141.
- ZHANG Donghong, XIAO Bo. Geology of sedimentary type Cu-Co deposit in Central Africa and its prospecting potential[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-141.
- 张贵山,邱红信,温汉捷,等. 攀西红格钒钛磁铁矿田富钴硫化物中钴的地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1740-1752.
- ZHANG Guishan, QIU Hongxin, WEN Hanjie, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Cobalt in Cobalt-Rich Sulfide of Hongge V-Ti Magnetite Ore Field, Panxi[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1740-1752.
- 张国伟,郭安林. 关于大陆构造研究的一些思考与讨论[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1464-1475.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin. Thoughts on Continental Tectonics[J]. Earth Science, 2019, 44(5): 1464-1475.
- 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.
- 张铭杰,班舒悦,李思奥,等. 新疆图拉尔根镁铁-超镁铁质杂岩体镍铜钴成矿岩浆作用过程:流体化学与碳同位素组成制约[J]. 岩石学报, 2020, 36(12): 3673-3682.
- ZHANG Mingjie, BAN Shuyue, LI Siao, et al. The magmatic process of Cu-Ni-Co sulfide ore-forming in the Tulaergen mafic-ultramafic complex, Xinjiang, northwestern China: Constrains from chemical and carbon isotopic compositions of volatiles[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(12): 3673-3682.
- 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.
- HANG Weibo, YE Jinhua, CHEN Xiufa, et al. Global cobalt resources distribution and exploration potentials[J]. Resources & Industries, 2018, 20(4): 56-61.
- 张志炳,李文渊,张照伟,等. 东昆仑夏日哈木岩浆铜镍硫化

- 物矿床铬尖晶石特征及其指示意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 966-975.
- ZHANG Zhibing, LI Wenyuan, ZHANG Zhaowei, et al. Characteristics of Chromian Spinel from the Xiarihamu Magmatic Ni - Cu Sulfide Ore Deposit in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Northwest China and Their Implication[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 966-975.
- 张照伟, 李文渊, 张江伟, 等. 新疆天山石炭—二叠纪大规模岩浆成矿事件与形成机制探讨[J]. 西北地质, 2014, 47(1): 36-51.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, ZHANG Jiangwei, et al. Mineralization and Formation Mechanism of Carboniferous-Permian Large-scale Magmatic Ore Deposits in Tianshan Orogenic Belt and Adjacent Area, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(1): 36-51.
- 张照伟, 李文渊, 王亚磊, 等. 南祁连山地区下什堂含铜镍矿基性-超基性岩体成因研究: 锆石年代学、地球化学和 Sr - Nd 同位素约束[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2539-2548.
- ZHANG Zhaowei, LI Wenyuan, WANG Yalei, et al. The genesis study on Xiashentang basic-ultrabasic intrusion associated with Ni - Cu mineralization in Hualong, southern Qilian Mountains; Zircon geochronology, geochemistry and Sr - Nd isotopic constraints[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2539-2548.
- 张照伟, 钱兵, 王亚磊, 等. 青海省夏日哈木铜镍矿床岩石地球化学特征及其意义[J]. 西北地质, 2016, 49(2): 45-58.
- ZHANG Zhaowei, QIAN Bing, WANG Yalei, et al. Petro-geochemical characteristics of the Xiarihamu magmatic Ni - Cu sulfide deposit in Qinghai province and its study for olivine[J]. Northwestern Geology, 2016, 49(2): 45-58.
- 张照伟, 王亚磊, 钱兵, 等. 东昆仑冰沟南铜镍矿锆石 SHRIMP U - Pb 年龄及构造意义[J]. 地质学报, 2017, 91(4): 724-735.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, QIAN Bing, et al. Zircon SHRIMP U Pb Age of the Binggounan Magmatic Ni - Cu Deposit in East Kunlun Mountains and Its Tectonic Implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(4): 724-735.
- 张照伟, 王驰源, 钱兵, 等. 东昆仑志留纪辉长岩地球化学特征及与铜镍成矿关系探讨[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2262-2274.
- ZHANG Zhaowei, WANG Chiyuan, QIAN Bing, et al. The geochemistry characteristics of Silurian gabbro in eastern Kunlun orogenic belt and its mineralization relationship with magmatic Ni - Cu sulfide deposit[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2262-2274.
- 张照伟, 王驰源, 刘超, 等. 东昆仑夏日哈木矿区岩体含矿性特点与形成机理探讨[J]. 西北地质, 2019, 52(3): 35-45.
- ZHANG Zhaowei, WANG Chiyuan, LIU Chao, et al. Mineralization Characteristics and Formation Mechanism of the Intrusions in Xiarihamu Magmatic Ni - Cu Sulfide Deposit, East Kunlun Orogenic Belt, Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(3): 35-45.
- 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, 2021a, 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, 2021a, 54(1): 82-99.
- 张照伟, 王亚磊, 邵继, 等. 东昆仑夏日哈木超大型岩浆镍钴硫化物矿床成矿特征[J]. 矿床地质, 2021b, 40(6): 1230-1247.
- ZHANG Zhaowei, WANG Yalei, SHAO Ji, et al. Metallogenic characteristics of Xiarihamu super-large magmatic Ni - Co sulfide deposit in eastern Kunlun orogenic belt[J]. Mineral Deposits, 2021b, 40(6): 1230-1247.
- 赵海超, 张金玲, 刘彩乐, 等. 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, 2018, 18(36): 166-174.
- ZHAO Haichao, ZHANG Jinling, LIU Caile, et al. Copper-nickel-cobalt sulfide deposit prospecting model of Xiarihamu in Qinghai Province[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(36): 166-174.
- 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: 2484-2500.
- ZHAO Junxing, LI Guangming, QIN Kezhang, et al. A re-

- view of the types and ore mechanism of the cobalt deposits (in Chinese) [J]. *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 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.
- 朱海滨, 肖波, 刘国平. 中南部非洲卢富里安铜-钴矿带地层对比研究[J]. *矿产与地质*, 2019, 33(3): 385-392.
- ZHU Haibing, XIAO Bo, LIU Guoping. The comparative study of ore-bearing strata in Lufilian copper-cobalt belt in the Central-South Africa [J]. *Mineral resources and geology*, 2019, 33(3): 385-392.
- Barnes S J, Godel B, Gurer D, et al. Sulfide-olivine Fe—Ni exchange and the origin of anomalously Ni-rich magmatic sulfides [J]. *Economic Geology*, 2013, 108: 1971-1982.
- 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.
- Chen B Y, Yu J J, Liu S J. Source characteristics and tectonic setting of mafic-ultramafic intrusions in North Xinjiang, NW China: Insights from the petrology and geochemistry of the Lubei mafic-ultramafic intrusion [J]. *Lithos*, 2018, (308-309): 329-345.
- Chen L M, Song X Y, Hu R Z, et al. Mg—Sr—Nd Isotopic Insights into Petrogenesis of the Xiarihamu Mafic-Ultramafic Intrusion, Northern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Petrology*, 2021, 1-25, doi: 10.1093/petrology/egaa113.
- Chen R X, Li H Y, Zheng Y F, et al. Crust-Mantle Interaction in a Continental Subduction Channel: Evidence from Orogenic Peridotites in North Qaidam, Northern Tibet [J]. *Journal of Petrology*, 2017, 58(2): 191-226.
- Dare S A S, Barnes S J, Prichard H M. The distribution of platinum group elements (PGE) and other chalcophile elements among sulfides from the Creighton Ni—Cu—PGE sulfide deposit, Sudbury, Canada, and the origin of palladium in pentlandite [J]. *Miner Depos*, 2010, 45: 765-793.
- Ding Xin, Ripley Edward M., Wang Wenzhong, et al. Iron isotope fractionation during sulfide liquid segregation and crystallization at the Lengshuiqing Ni—Cu magmatic sulfide deposit, SW China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, (261): 327-341.
- Fang W, Dai L, Q, Zheng Y, F, et al. Syn-exhumation magmatism in an active continental margin above a continental subduction zone: Evidence from Late Triassic mafic igneous rocks in the southeastern North China Block [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2021, DOI: 10.1130/B35656.1.
- Fu W, Feng Y, Luo P, et al. Weathering of ophiolite remnant and formation of Ni laterite in a strong uplifted tectonic region (Yuanjiang, Southwest China) [J]. *Minerals*, 2019, 9: 1-25.
- Gus Gunn. *Critical Metals Handbook* [M]. © 2014 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2014 by John Wiley & Sons, Ltd. P 1-451.
- Hitzman, M, Kirkham, R, Broughton, D, et al. The sediment-hosted stratiform copper ore system [J]. *Economic Geology*, 2005, 100th Anniversary Volume.
- Kang J, Chen L M, Yu S Y, et al. Chromite geochemistry of the Jinchuan Ni—Cu sulfide-bearing ultramafic intrusion (NW China) and its petrogenetic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141: 104644.
- Li C S, Ripley E M, Thakurta J, et al. Variations of olivine Fo—Ni contents and highly chalcophile element abundances in arc ultramafic cumulates, southern Alaska [J]. *Chemical Geology*, 2013, 351: 15-28.
- Li C 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 C S, Ripley E M, Tao Y. Magmatic Ni—Cu and Pt—Pd Sulfide Deposits in China [J]. 2019, Society of Economic Geologists, Inc. SEG Special Publications, 22: 483-508.
- Li L, Sun F Y, Li B L, et al. Geochronology, Geochemistry and Sr—Nd—Pb—Hf Isotopes of No. 1 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)*, 2018, 92(1): 106-126.
- Li Y, Audeéat 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.
- Lightfoot P C, Evans-Lamswood, D. Structural controls on the primary distribution of mafic-ultramafic intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces [J]. *Ore Geology Review*, 2015, 64: 354-386.
- Liu Y G, Lü X B, Wu C M, et al. The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: As suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 538-545.
- Liu Y G, Li W Y, Lü X B, et al. Sulfide saturation mechanism of the Poyi magmatic Cu-Ni sulfide deposit in Beishan, Xinjiang, Northwest China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 91: 419-431.
- Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, et al. The Dynamic Sulfide Saturation Process and a Possible Slab Break-off Model for the Giant Xiarihamu Magmatic Nickel Ore Deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Economic Geology*, 2018, 113(6): 1383-1417.
- Maier W D, Groves D I. Temporal and spatial controls on the formation of magmatic PGE and Ni-Cu deposits [J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46: 841-857.
- Matthew J. Manor, James S. Scoates, Graham T. Nixon and Doreen E. Ames. The Giant Mascot Ni-Cu-PGE Deposit, British Columbia: Mineralized Conduits in a Convergent Margin Tectonic Setting [J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 57-87.
- 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, 2013, US Geological Survey.
- Meng F C, Zhang J X, Cui M H. Discovery of Early Paleozoic eclogite from the East Kunlun, Western China and its tectonic significance [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(2): 825-836.
- Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li C, Ripley E M, eds. *Reviews in Economic Geology* [M]. Denver: Society of Economic Geologists, Inc., 2011, 17: 1-50.
- 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]. *Chem Geol*, 2013, 358: 170-188.
- Pirajno F, Santosh M. Mantle plumes, supercontinents, intracontinental rifting and mineral systems [J]. *Precambrian Research*, 2015, 259: 243-261.
- 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 Li-hui, 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.12.017>.
- Sisir K M, William L G. Processes and Ore Deposits of Ultramafic-Mafic Magmas through Space and Time [M]. Candice Janco, 2018, Elsevier Inc. 1-384.
- Smith J M, Ripley E M, Li C S, et al. Cu and Ni Isotope Variations of Country Rock-Hosted Massive Sulfides Located Near Midcontinent Rift Intrusions [J]. *Economic Geology*, 2021, doi:10.5382/econgeol.4872; 16 p.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, et al. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun orogenic belt, northern Tibet plateau, China [J]. *Economic Geology*, 2016, 111: 29-55.
- Steffi B. Volcanic and Igneous Plumbing Systems [M]. Elsevier Inc, 2018, 1-329.
- Su B X, Robinson P T, Chen C, et al. The occurrence, ori-

- gin, and fate of water in chromitites in ophiolites[J]. *American Mineralogist*, 2020, 105: 894-903.
- Sun Jinggui, He Yunpeng, Han Jilong, and Wang Zhongyu. Genesis of the Wuxing Pt - Pd - rich Cu - Ni sulfide deposit in the eastern Central Asian Orogenic Belt: evidences from geochronology, elemental geochemistry, and Sr - Nd - Hf isotopic data[J]. *Can. J. Earth Sci* 2019, 56: 380-398.
- USGS. Mineral commodity summaries[R]. U. S. Geological Survey, 200.
- Virtanen V J, Heinonen J S, Molnar F, et al. , Fluids as primary carriers of sulphur and copper in magmatic assimilation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12, 6609.
- Wang C Y, Zhang Z W, Zhang C J, et al. 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*, 2021, 25(3): 401-415.
- Wang Kaiyuan, Song Xieyan, Yi Junnian, et al. Zoned orthopyroxenes in the Ni - Co sulfide ore-bearing Xiarihamu mafic-T ultramafic intrusion in northern Tibetan Plateau, China: Implications for multiple magma replenishments [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 113: 103082.
- William H, Rainer J B, Adrian A F, et al. Sulphur isotopes of alkaline magmas unlock long-term records of crustal recycling on Earth[J]. *Nature Communications*, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12218-1>.
- Xue S C, Li C S, Wang Q F, et al. Geochronology, petrology and Sr - Nd - Hf - S isotope geochemistry of the T newly-discovered Qixin magmatic Ni - Cu sulfide prospect, southern Central Asian Orogenic Belt, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 111: 103002.
- Yan J M, Sun F Y, Li L, Yang Y Q, et al. 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*, 2019, 61(10): 1171-1188.
- Yao Z S, Qin K Z, Mungall J E. Tectonic controls on Ni and Cu contents of primary mantle-derived magmas for the formation of magmatic sulfide deposits[J]. *Am Miner*, 2018, 103: 1545-1567.
- You M X, Li W Y, Li H M, et al. Petrogenesis and Tectonic Significance of the ~276 Ma Baixintan Ni - Cu Ore-Bearing Mafic-Ultramafic Intrusion in the Eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China[J]. *Minerals*, 2021, 11, 348. <https://doi.org/10.3390/min11040348>
- Zhang M J, Liu Y G, Chen A P, et al. The tectonic links between Palaeozoic eclogites and mafic magmatic Cu - Ni - Co mineralization in East Kunlun orogenic belt, western China [J]. *International Geology Review*. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1885504>.
- Zhang Z W, Li W Y, Gao Y B, et al. Sulfide mineralization associated with arc magmatism in the Qilian Block, western China: zircon U - Pb age and Sr - Nd - Os - S isotope constraints from the Yulonggou and Yagu gabbroic intrusions [J]. *Mineralium Deposita*, 2014, 49(2): 279-292.
- Zhang Z W, Tang Q Y, Li C S, et al. Sr - Nd - Os isotopes and PGE geochemistry of the Xiarihamu magmatic sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, China [J]. *Miner Deposita*, 2017, 52: 51-68.
- Zhang Z W, Wang Y L, Qian B, et al. Metallogeny and tectonomagmatic setting of Ni - Cu magmatic sulfide mineralization, number I Shitoukengde mafic-ultramafic complex, East Kunlun Orogenic Belt, NW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 96: 236-246.
- Zhang Z W, Wang Y L, Wang C Y, et al. Mafic-ultramafic magma activity and copper-nickel sulfide metallogeny during Paleozoic in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China [J]. *China Geology*, 2019, 2(4): 467-477.
- Zheng F, Dai L Q, Zhao Z F, et al. Syn-exhumation magmatism during continental collision: Geochemical evidence from the early Paleozoic Fushui mafic rocks in the Qinling orogen, Central China [J]. *Lithos*, 2020, 352-353: 105318.