

doi: 10.12029/gc20240825001

唐金荣, 张宇轩, 徐利, 牛亚卓, 任继刚, 于瑞. 2025. 全球关键矿产稳定供应研究新趋势、新热点与未来展望[J]. 中国地质, 52(2): 462–481.

Tang Jinrong, Zhang Yuxuan, Xu Li, Niu Yazhuo, Ren Jigang, Yu Rui. 2025. Stability of global critical mineral supplies: Trends, hot topics, and further outlook[J]. Geology in China, 52(2): 462–481(in Chinese with English abstract).

全球关键矿产稳定供应研究新趋势、新热点与未来展望

唐金荣^{1,2,3}, 张宇轩^{2,3}, 徐利⁴, 牛亚卓^{2,3}, 任继刚⁵, 于瑞¹

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心), 陕西 西安 710119; 3. 中国-上海合作组织地学合作研究中心, 陕西 西安 710119; 4. 亚洲开发银行学院, 日本 东京 100-6008; 5. 湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要:【研究目的】随着全球能源转型深入推进与新兴产业快速发展, 关键矿产作为经济技术转型的基础保障, 其安全稳定供应成为各国政府和跨国企业高度关注的重要议题, 也日益成为地球科学领域的研究热点之一。

【研究方法】本文在系统跟踪研究的基础上, 梳理全球关键矿产稳定供应研究的新趋势, 厘清全球关键矿产研究的新热点, 提出了对全球关键矿产的未来研判与展望, 对中国关键矿产产业布局和资源安全保障具有启示意义。

【研究结果】全球关键矿产稳定供应研究受到世界主要经济体和重要制造企业的高度关注。政府在塑造关键矿产供应链、产业链中的主导作用越来越明显, 关键矿产清单的厘定方法在持续改进, 矿种数量在扩大, 但交叉重叠矿种越来越聚集, 关键矿产成矿规律与赋存状态研究在不断深入, 新类型、新矿床不断涌现。制造企业与矿业企业对接更紧密, 向上一体化和向下一体化趋势明显, 投资机构也加大了对关键矿产的投资和新技术研发的支持力度。

【结论】随着低碳能源技术的快速发展, 关键矿产在能源转型中的作用会愈发凸显, 资源需求将持续增长, 投资将日益增加, 新类型、新矿床的发现也会随之增多, 以锂为代表的“小宗矿”有望成长为“大宗矿”。在澳大利亚和加拿大等关键矿产资源大国不断强化供应优势, 中亚和欧洲等失落地区的回归与重新重视, 海洋矿产资源勘查开发提上日程等的加持下, 全球关键矿产供应或将呈现多元化供应格局。新技术的变革与替代工艺的创新, 以及回收技术的迭代也将为关键矿产稳定供应提供新的路径。

关键词: 关键矿产; 能源转型; 电池金属; 稳定供应; 矿产勘查工程; 矿业形势

创 新 点: 全面系统地梳理了全球保障关键矿产稳定供应研究的新趋势, 厘清了关键矿产稳定供应研究的新热点, 对全球关键矿产供应研究的未来发展进行了研判与展望, 并提出了相关建议。

中图分类号: F416.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0462-20

Stability of global critical mineral supplies: Trends, hot topics, and further outlook

TANG Jinrong^{1,2,3}, ZHANG Yuxuan^{2,3}, XU Li⁴, NIU Yazhuo^{2,3}, REN Jigang⁵, YU Rui¹

(1. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey

收稿日期: 2024-08-25; 改回日期: 2024-09-24

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2024GH-YBXM-04)、中国地质调查局项目(DD20221665, DD20230026, DD20230268, DD20251227)和国家重点研发计划课题(2021YFC2901802)联合资助。

作者简介: 唐金荣, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事地质工作发展战略与资源战略研究; E-mail: jinrongt@163.com。

通信作者: 张宇轩, 男, 1990 年生, 工程师, 主要从事基础地质与战略性矿产研究; E-mail: yxzhang90@163.com。

(Northwest China Center of Geoscience Innovation), China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. China-SCO Geosciences Cooperation Research Center, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Asian Development Bank Institute, Tokyo 100-6008, Japan; 5. Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

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

[Objective] The global energy transition and the rapid development of emerging industries have heightened the importance of securing a stable supply of critical minerals, which are essential for economic and technological transformation. This issue has garnered significant attention from governments and multinational enterprises, becoming a focal point in earth sciences research.

[Methods] Through a systematic analysis, this paper examines the latest trend of global supply of critical minerals, identifies emerging research hotspots, and offers insights into future development. These findings provide valuable guidance for China's strategic planning in critical minerals and resource security. **[Results]** This study reveals that the stability of global critical minerals supplies has received a great deal of attention from the world's major economies and important manufacturing companies. The leading role of governments in shaping the supply chain of key minerals and the industrial chain is becoming increasingly evident. The methodology for determining critical list is evolving, the number of mineral species is expanding, but the overlapping mineral species are becoming more and more aggregated. With deeper research into mineralization processes and the occurrence of critical minerals, new deposit types are emerging. Manufacturing enterprises and mining enterprises are interfacing more closely, with a clear trend towards upward and downward integration, and investment institutions are increasing their support for investment in key minerals and research and development of new technologies. **[Conclusions]** As energy transition efforts intensify, the importance of critical minerals will continue to grow in the energy transition, driving increased demand, investment, and resource discovery. Notably, smaller critical minerals, such as lithium, may gain significance and emerge as major resources. Resource-rich nations like Australia and Canada are strengthening their supply advantages, while lost regions such as Central Asia and Europe are reasserting their roles in the market, marine mineral resources exploration and development on the agenda. The global supply landscape is likely to become more diversified. Advances in technology, innovations in alternative processes, and the iteration of recycling technology will open new avenues for the securing critical mineral supplies.

Key words: critical minerals; energy transition; battery metals; stabilization of supply; mineral exploration engineering; mining situation

Highlights: This paper systematically reviews emerging global trends in the stability of critical mineral supplies, identifies new research hotspots, predicts future developments in the critical minerals sector, and offers relevant recommendations.

About the first author: TANG Jinrong, male, born in 1978, researcher, engaged in geological science and technology information and resource strategy research; E-mail: jinrongt@163.com.

About the corresponding author: ZHANG Yuxuan, male, born in 1990, engineer, engaged in basic geology and strategic mineral research; E-mail: yxzhang90@163.com.

Fund support: Supported by Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No.2024GH-YBXM-04), the projects of China Geological Survey (No.DD20221665, No.DD20230026, No.DD20230268, No.DD20251227), and the National Key Research and Development Program of China (No.2021YFC2901802).

1 引言

随着全球能源转型的快速推进, 全球经济正加快从“燃料驱动”转向“材料驱动”, 关键矿产作为能源转型和科技革命的基础, 其安全稳定、可持续供应成为了各国政府和跨国企业高度关注的重要议题, 也日益成为地球科学领域的研究热点之一 (Nurmi et al., 2020; 蒋少涌和王微, 2022; 张所续和

周季鑫, 2022; Castillo et al., 2023; IRENA, 2023; 邢凯等, 2023)。以电动汽车、储能、光伏和风电等为主体的新能源产业迎来大发展, 促使锂、钴、镍、锰、石墨和铜等关键矿产资源需求和价格双双高企, 净零排放目标下关键矿产资源需求将呈爆发式增长。关键矿产资源禀赋集中度高, 供应链安全风险正从传统的上游资源获取向全产业链价值链扩散 (张宇宇等, 2023; 田慧芳, 2024)。为提高绿色新

兴产业链韧性,支撑能源转型,全球主要发达经济体以财政金融产业等支持政策、厘定关键矿产清单和全球战略布局等手段保障其关键矿产供应,且其厘定的关键矿产清单耦合性较高,反映出发达经济体对新一轮工业革命中诞生的新兴产业高度趋同,而这些产业恰是中国正在蓬勃发展的新能源产业和正在部署的未来产业(毛景文等, 2019)。中国关键矿产对外依存度较高,且进口来源地较为集中,面对趋紧的国际形势,借鉴国际经验,加强关键矿产资源国际合作,尽早优化海内外布局,对构建绿色产业链、确保能源安全转型深入推进具有重要意义。

近些年,国内外学者从国家经济可持续发展(Government of Canada, 2022; Yu et al., 2022; 王安建, 2023; 于瑞等, 2023; 张所续, 2023)、地缘关系(Vakulchuk and Overland, 2021; 王安建和袁小晶, 2022; Goldman Sachs, 2023; IRENA, 2023)、安全风险(唐金荣等, 2019; 成金华等, 2023)、关键矿产清单(BGS, 2022; 张生辉等, 2022; 李建武等, 2023)等多个视角,以及富集成矿规律(蒋少涌和王微, 2022; 毛景文等, 2023; 温汉捷等, 2024)、资源禀赋(毛景文等, 2022; 张艳飞等, 2022; Cust and Zeufack, 2023; Vysetti, 2023)、资源评价(European Commission, 2023; Josso et al., 2023; U.S. DoE, 2023)、勘探开发(王登红等, 2022; Castillo et al., 2023; 余韵等, 2024),以及产业链和供应链(干勇等, 2022; 宋建军和王国平, 2022; Kapil et al., 2023; UNCTAD, 2023; Liu et al., 2024; 朱清等, 2024)等多个维度,开展了大量研究。前人研究基本包括了关键矿产稳定供应研究的主要内容和影响其稳定供应的地质、政治、经济和技术等主要因素,取得了重要成果认识。但对关键矿产稳定供应研究的总体全貌刻画不充分,系统性认识有待提高。基于此,本文旨在长期跟踪的基础上,梳理全球关键矿产稳定供应研究的新趋势,厘清关键矿产研究的新方向和重点区域,对全球关键矿产的未来发展趋势进行研判与展望,并提出相关建议。

2 关键矿产稳定供应研究的新趋势

2.1 高科技和新兴产业所需关键矿种越来越聚焦, 电池金属和风光金属成为重点

关键矿产因其极度耐高温、耐腐蚀、光学和电

磁性质优良等物理化学特性,广泛应用于航空航天、电子信息、高端制造、新能源、新材料等重点领域和新兴产业发展(李文昌等, 2022)。随着一批高新技术的快速突破,并迅速转化为新兴产业,以光伏面板、风电发电涡轮、电动汽车、动力电池、储能设备等代表新能源产品大规模生产和使用,全球锂、镍、钴和铜等关键矿产的需求出现激增,供需矛盾日益凸显,引发国际社会各方高度关注。全球多数国家从本国或本行业的重要性或供应风险等视角提出了关键矿产清单。比如,美国、欧盟从需求方的角度提出关键矿产清单,且种类不断增加;澳大利亚、加拿大等国从供应方的角度确定关键矿产清单。从新兴产业发展来看,新能源矿产的需求增长远快于其他关键矿产,且目前全球普遍关注的新能源矿产主要聚焦于电池金属和风光金属两大类。

2.1.1 电池金属

随着电动汽车、动力电池和储能设备等产业的蓬勃发展,锂、镍、钴和锰等关键矿产的需求快速增长,同时由于稀土以及钛、镓、锗、铟等关键矿产在保证电池续航能力和安全性能方面发挥着重要作用,需求量也大幅增长(李昕蕾和刘倩如, 2023)。锂作为锂离子电池的关键元素,是电动汽车电池和锂基储能系统中电解质的重要成分,在电池中起到提高电荷密度和循环寿命的作用。镍是电池阴极的关键元素,可为电动汽车提供更高的能量密度和更长的续航里程,镍钴铝(NCA)电池、镍钴锰(NCM)电池、镍氢电池等都是利用镍来提高电池性能。钴能最大限度地提高电池的稳定性与寿命,在锂离子电池中,钴酸锂是最常用的一种正极材料。锰是许多电动汽车锂离子电池电极的重要成分,可提高电池的性能、安全性和降低成本。钛是近年新兴的一种电池材料,被广泛应用于锂离子和钠离子电池等。钛酸锂材料具有优异的安全性、稳定性、高容量和长寿命等特点,被认为是未来电池的发展方向之一。

2.1.2 风光金属

风能和太阳能光伏在能源转型中扮演着举足轻重的角色。其中,风能产业的风力涡轮机依靠永磁体直接驱动,其原材料主要为稀土、铂族金属等关键矿产;太阳能光伏产业发展中镓、铟、碲和铂族金属等关键矿产不可或缺(李昕蕾和刘倩如,

2023)。铂族金属在光伏产业中至关重要,是第三代光伏电池染料敏化太阳能电池的关键原材料,可改善太阳能电池效率(Goe and Gaustad, 2014; Grandell et al., 2016; Farooq et al., 2019)。铬在提高太阳能电池板能效方面起着关键作用;镓基半导体由于其具有优良的禁带宽度、高光电转化率、低成本、低污染和低光性能等优点,在太阳能光伏产业中应用广泛;镓和铜是半导体光伏器件的关键原材料,且具有不可替代性,铜钢镓硒薄膜电池因其具有高效、稳定、轻便和低成本等显著特点,在太阳能电池中具有广阔前景(Jackson et al., 2011; 卢洋, 2022)。

2.2 主要国家政府对保障关键矿产供应的主导作用愈发强劲,支持措施贯穿全产业链

美国、欧盟、澳大利亚和日本等主要发达经济体积极签署双边、多边合作协议,并通过制定完善的制度体系、开展资源外交构建共同体、制定相关战略、编制关键矿产清单、建立应急储备、开展循环利用和替代品研发等手段,积极构建多元化、有

韧性、可持续的关键矿产供应链,以确保其关键矿产资源安全稳定供应(表 1)。各国政府对关键矿产资源保障的主导作用涉及全产业链,从上游的勘探开发到下游清洁能源的终端应用(张宇宁等, 2023)。通过主导上游关键矿产的勘探开发,支持下游电动车制造企业采取供应链多元化策略,延伸并拓展供应链,以确保关键矿产长期稳定供应。主要发达经济体以“同盟合力”稳固关键矿产供应链,拓展关键矿产版图。一是构建排除中国和俄罗斯的关键矿产资源供应链。2022 年 6 月,美国宣布与澳大利亚、加拿大、芬兰、法国、德国、日本、韩国、瑞典、英国和欧盟组成“矿产安全伙伴关系”(MSP, 亦称“金属北约”),鼓励盟友间部署关键矿产供应链。二是打造技术创新与资源合作平台。美国通过美英澳安全协议(AUKUS)、美欧贸易和技术委员会(TTC)、四国机制(QUAD)、能源治理倡议(ERGI)等机制打造技术创新和资源合作平台。加拿大、澳大利亚、博茨瓦纳、秘鲁、阿根廷、巴西、

表 1 主要发达经济体保障关键矿产供应的相关战略与举措	
Table 1 Strategies and initiatives related to securing the supply of critical minerals in main developed economies	
战略与举措	主要发达经济体
制定和完善关键矿产相关法案	美国(《美国关键矿产独立法》、《通胀削减法案》、《基础建设法案》); 欧盟(《关键原材料法案》)等
制定关键矿产战略	美国(《关键矿产战略》、《确保关键矿产安全可靠供应的联邦战略》、《美国实现清洁能源转型的供应链保障战略》、《美国国家创新路径》等); 欧盟(《“REPowerEU”计划》、《关键原材料行动计划》等); 英国(《英国技术关键的战略性矿产与金属的关键性评估》、《未来的恢复力: 英国关键矿产战略》等); 澳大利亚(《关键矿产战略》、《澳大利亚地球科学战略2028》、《澳大利亚全球资源战略》、《关键矿产和高科技金属战略》、《关键矿产加速倡议》、《新未来勘探计划》、《关键矿产战略2023—2030》等); 加拿大(《关键矿产研发和示范计划》、《加拿大关键矿产战略(2022)》等); 日本(《稀有资源保障战略》、《新国际资源战略》等)等
编制关键矿产清单	美国(50种, 2022年)、欧盟(34种, 2023年)、英国(18种, 2022年)、澳大利亚(26种, 2022年)、加拿大(34种, 2024年)、日本(34种, 2020年)等
签署关键矿产双边、多边合作协议	美英澳安全协议(AUKUS)、美欧贸易和技术委员会(TTC)、四国机制(QUAD)、能源治理倡议(ERGI, 加拿大、澳大利亚、博茨瓦纳、秘鲁、阿根廷、巴西、刚果民主共和国和纳米比亚等)、美澳加关键矿产测绘计划(CMMI)、日美关于强化关键矿产供应链的协议(CMA)、欧盟原材料倡议(RMI, 加强与阿根廷、巴西、加拿大、智利、中国、日本、墨西哥、秘鲁、美国、欧洲地中海国家和非洲联盟的战略合作); 欧盟与澳大利亚签署关键矿产备忘录; 澳大利亚和加拿大共同发布《关于关键矿产合作的联合声明》等
实施关键矿产供应链本土化和“去中国化”战略	美国、欧盟、日本等
开展关键矿产资源外交, 构建共同体	“矿产安全伙伴关系”(美国、澳大利亚、加拿大、芬兰、法国、德国、日本、韩国、瑞典、英国和欧盟); “可持续关键矿产联盟”(SCMA, 加拿大牵头, 联合美国、澳大利亚、法国、德国、日本、英国和瑞典组建)等
支持关键矿产循环利用和替代品研发等科技创新	美国(《部署多项资助计划》)、欧盟(《关键原材料行动计划》)、加拿大(《从探索到回收: 为加拿大和世界的绿色和数字经济提供动力》)等
加大关键矿产财政资助	美国、欧盟、澳大利亚、加拿大等
设立关键矿产基金	澳大利亚(2021年9月)、欧盟(2024年5月)等

注: 表中资料来源于各国政府官网、公开信息和IRENA等。

刚果(金)和纳米比亚等未来全球关键矿产的主要供应国,均被吸纳进了美国主导的能源治理倡议。三是将中亚纳入关键矿产供应版图。在亚太地区实施“印太能源安全和脱碳计划,印太清洁能源生产链、美印清洁能源和资源合作(FRI)”。实施中亚战略 2019—2025,打造多元化能源资源合作平台,强化新能源矿产供应网络。

2.2.1 美国

美国不断完善制度体系,建立关键矿产清单,提高地质找矿预算,全力提高美国矿产资源自给率和控制力。美国关键矿产清单从 2018 年的 35 种矿产扩充至 2022 年的 50 种矿产。美国众议院于 2021 年 4 月提出制定《美国关键矿产独立法》,以确保经济发展和关键矿产供应链安全(宋建军和王国平, 2022)。同年,对国内供应链进行脆弱性审查,援引《国防生产法》为锂、镍、钴、石墨和锰的开采、加工和回收提供资金。2022 年 8 月,签署《通胀削减法案》激励对新能源矿产供应链投资,要求电池组件一定比例在美国国内组装,且将逐渐升高此比例。美国加大关键矿产加工基础设施建设投资,为参与矿产加工的公司提供额外税收抵免,为新能源汽车制造提供资金(尹文渊等, 2023)。美国为 30 多个关键矿产项目,提供了约 400 亿美元的贷款,其中 30 亿美元用于精炼电池材料的投资。2022 年美国地质调查局预算同比增长 25%, 2023 年再增长 8.4%, 达到 17.8 亿美元; 2022 年 6 月,美国内政部宣布将在 30 个州投资约 7400 万美元,以更好地了解 and 规划具有关键矿产潜力的地区。2023 年 4 月,美国政府发布《美国国家创新路径》,旨在为清洁能源技术创新提供支持 with 保障,将清洁能源供应链安全纳入美国法治轨道,构建了完整稳定的制度框架(黄云游, 2024)。2024 年 4 月,美国能源部先后部署多项资助计划,共投入 1.605 亿美元支持建立关键矿产及原材料供应链。

2.2.2 欧盟和英国

欧盟通过推进本土矿产资源勘查与矿业开发,提高循环使用资源的能力,加强替代矿产技术研发水平,推动海外矿产资源供应多元化等手段,构建独立于中国的矿产资源供应链。2008 年,欧盟启动原材料倡议,通过供应多元化,减少各方依赖和寻找替代品,确保欧洲原材料的供应安全(张所续,

2023)。欧盟主要从供应风险和经济重要性等两个维度确定其关键矿产种类,旨在为欧盟在贸易、创新和相关工业等方面的战略和政策制定提供参考和依据,以加强欧盟产业的竞争力。欧盟关键矿产清单种类不断增加,每 3 年更新一次,以反映出生产和市场的变化以及技术研发的进步。从 2011 年的 14 种,到 2014 年的 20 种,2017 年共 27 种,再到 2020 年的 30 种。2024 年 3 月,欧盟《关键原材料法案》确定 34 种关键矿产,明确了“减少对第三国获取关键原矿产的依赖”的目标,并实现采购多元化,计划到 2030 年将盟内国家的开采量增加到欧盟消费量的 10%, 域内加工量增加到 40%, 从单一国家进口比例不超过 60%(Goldman Sachs, 2023)。

与美国和欧盟不同,英国仅从供应风险指数的单一维度制定了风险矿产清单,于 2011 年、2012 年和 2015 年三次发布并更新风险矿产清单,最新的风险矿产清单共 41 种(组)(毛景文等, 2019)。2022 年 7 月,英国政府发布《未来的恢复力:英国关键矿产战略》,提出将通过提升国内生产能力、加强国际合作等方式,加强供应链弹性,提高供应链安全(GOV. UK, 2023; 于瑞等, 2023)。为了支持该战略的长期性,英国地质调查局进行了首次关键矿产评估,并根据英国经济的脆弱性和供应风险,为英国定义了一组关键矿产清单(包括:锑、铋、钴、镓、石墨、铟、锂、镁、铌、钽、铂、稀土元素、硅、钽、碲、锡、钨、钼)(BGS, 2022)。此外,商业、能源和工业战略部的关键矿产专家委员会还列出了第一个“观察名单”(包括铌、锰、镍、磷酸盐、钨)。

2.2.3 澳大利亚和加拿大

澳大利亚政府致力于加强与关键矿产部门的合作,通过实施《关键矿产战略》、《澳大利亚地球科学战略 2028》等加大对关键矿产的投资,激励创新,以降低成本、提高竞争力等方式,促进资源勘查和矿业高质量发展,使澳大利亚成为全球关键能源矿产供给的领导者。澳大利亚于 2019 年厘定了第一份包含 24 种关键矿产的清单,加快关键矿产战略布局; 2020 年,成立关键矿产办公室,负责制定国家政策和战略建议、统筹澳大利亚关键矿产行业 and 开展国际合作等。2021 年,关键能源矿产清单减少为 18 种; 2022 年,发布的关键矿产清单增加为 26 种,并制定了新的《关键矿产战略》,提出通过建

立关键矿产基金,帮助关键矿产战略项目的融资,促进项目顺利推进(张所续, 2023)。2023 年 6 月,澳大利亚再次发布《关键矿产战略 2023—2030》。同年 10 月,又宣布将把支持关键矿产项目的资金增加至 20 亿澳元,以吸引美国矿业企业和加工企业在澳大利亚开展业务。2023 年 12 月,澳大利亚发布公告称,对 2023 年 6 月设立的“关键矿产清单”进行了调整,更新后的关键矿产清单包含 30 种矿种,氟、钼、砷、硒和碲被纳入清单。同时,追加设立了一份“战略材料清单”,首批列入清单的有铝、铜、镍、磷、锡、锌 6 种(DISR, 2023; 中国有色金属报, 2024)。

加拿大将替代较少或无法替代,支撑新兴产业发展但供应受限,在提取或加工环节集中度较高的矿物列为关键矿产。主要依照两个标准制定关键矿产清单,一是供应链是否受到威胁,以及加拿大有合理的机会生产该矿产,二是保障加拿大的经济和国家能源资源安全,同时确保该国在全球供应链中地位。2021 年发布 31 种关键矿产清单,2024 年新增了高纯铁、磷和硅金属三种矿产,更新后关键矿产清单共计 34 种,每 3 年进行一次审查,并在必要时进行修订。2022 年,加拿大首次发布《从探索到回收:为加拿大和世界的绿色和数字经济提供动力》的关键矿产战略,促进其国内电动汽车电池相关的关键矿产的生产和加工(Government of Canada, 2022; 于瑞等, 2023)。

2.2.4 日本

日本积极融入美国战略,出台相关政策,加强二次资源循环利用以及替代技术研究;提高部分稀有金属储备量至半年消费量以上,储备数量不对外公开;企业通过与西方财团互相持股,融入美国和西欧矿产资源供应链体系。2009 年,日本出台《稀有资源保障战略》,将 31 个矿种列为关键矿产原材料(陈健和吴楠, 2011)。2012 年,将关键矿产原材料更新为 30 种。2015 年《日本资源战略中的金属关键性评估》从供应风险、价格风险、需求风险、回收限制以及潜在风险五个方面进行综合评估,最终厘定 22 种关键矿产(Hatayama and Tahara, 2015a)。2020 年颁布了《新国际资源战略》,提出了一系列保障关键矿产供应链的措施(刘雪莲和康喜顺, 2023)。

2.3 制造企业与资源生产企业对接更加密切

越来越多的汽车、电池设备制造商参与或主导关键矿产的勘查开发。世界最大的电动汽车电池制造商宁德时代近年收购了加拿大的千禧锂业公司(Millennial)、北美镍业(North American Nickel)和澳大利亚皮尔巴拉矿业公司(Pilbara Minerals)等多家矿业企业股份,布局电池原料产业链。赣锋锂业与宝马签署了长期供应协议,并与特斯拉和大众签署了战略合作协议。澳大利亚锂矿商 Liontown 资源公司与特斯拉、福特和 LG 新能源签订了直接采购协议。2022 年,大众汽车宣布与华友钴业和青山控股集团组建合资企业,以确保镍、钴资源的供应。同年,苏州天华时代能源科技有限公司与澳大利亚 AVZ 矿业公司签订协议,在刚果(金)的马诺诺(Manono)锂锡项目中投资 2.4 亿美元,获得 24% 的股权(Castillo and Purdy, 2022)。

2.4 投融资机构对关键矿产愈加重视

随着各国政府努力加强本国关键矿产供应链构建,出口信贷机构(ECA)和开发金融机构(DFI)等投融资机构对关键矿产领域交易关注度越发高涨,发挥的作用也越发重要。欧盟于 2023 年初启动 20 亿欧元的商品基金,带动公共和私营部门更多的资金,为关键矿产开采、加工及相关产业发展提供资金,目前正在为该基金寻求公共和私营部门的资金,以保障关键矿产的供给。英国通过汽车转型基金(ATF)、工业能源转型基金(IETF)、国家安全战略投资基金(NSSIF)、英国基础设施银行(UKIB)以及英国出口融资(UKEF)等为关键矿产企业提供一定的资金支持,加快本国关键矿产开采、精炼、加工和回收能力的发展(于瑞等, 2023)。加拿大启动设立关键矿产基础设施基金,已拨款近 40 亿美元用于关键矿产供应链的勘探项目和基础设施建设。2020 年 12 月,澳大利亚 Ironbark 公司表示,美国进出口银行正在考虑为其在格陵兰岛的 Citronen 锌铅项目提供 6.57 亿美元的融资。2022 年 2 月,澳大利亚关键矿产融资机制(Critical Minerals Facility)向两家澳大利亚公司发放了第一笔贷款。首先,给 EcoGraf 公司提供了 3500 万美元的贷款帮助其扩大在西澳大利亚罗金厄姆-奎纳纳战略工业区开发澳大利亚电池负极材料设施并生产球形石墨产品。其次,给 Renascor Resources 公司提供高

达 1.85 亿美元的贷款,支持其在南澳大利亚开发综合石墨矿和加工设施。2023 年 10 月,澳大利亚政府宣布将关键矿产融资规模扩大 20 亿澳元,以刺激对关键矿产的投资,该资金是通过澳大利亚出口金融公司(EFA)提供。

2.5 ESG 标准下关键矿产勘查开发门槛日益提高

在全球气候变化和 CO₂ 减排压力背景下,以如何减少环境污染、履行社会责任和增强公开治理能力为核心的环境、社会和公司治理(ESG, Environmental, Social and Governance)理念逐渐成为社会经济发展的共识(包小莲, 2024; 徐利等, 2024)。关键矿产勘查开发作为碳减排的主要行业之一,涉及环境、劳工、社区问题,极易引起争议,更应积极贯彻 ESG 理念(陈婉, 2024)。在发达国家政府及矿业公司大力推进下,是否将 ESG 纳入企业管理框架逐渐成为衡量矿业企业可持续发展的标准,也是影响矿业企业投资决策的重要因素(唐金荣等, 2023)。ESG 信息披露可作为矿业企业的市场策略,能够提升企业的竞争能力和企业价值(Giannarakis et al., 2014; 王丹励等, 2017; 汪慧妍, 2019)。相比资源和储量来讲,ESG 约束对关键矿产开采影响更大。实践证明,只要保持充裕的资金投入,通过技术的创新全球矿产储采比可以基本保持一定水平内不变,如今 ESG 约束的出现,相当一部分已发现或潜在的资源很难转化为有效供应。比如,Simon 等对全球 308 个未开发铜矿项目的 12 个风险进行评估后指出,绝大多数矿业项目未开发的原因主要是受到 ESG 风险的影响(Jowitt et al., 2020)。据安永对全球矿业和金属公司的高管的调查结果显示,ESG 位列全球矿业十大风险之首(Els, 2023)。

3 关键矿产稳定供应研究的主要方向与区域分布

3.1 关键矿产厘定方法持续改进,回收和环境因素引起重视

关键矿产厘定是确保重点矿产稳定供应的前提。国外主要发达经济体关键矿产厘定方法可分为定性、定量、定性与定量相结合等类型(表 2)。在定量方法中,二维矩阵法是经典的关键矿产厘定方法。美国国家研究委员会于 2008 年第一次引入

“关键性矩阵”方法,从供应风险和脆弱性两个维度构建矩阵量化评价金属和矿物的关键性,之后得到广泛地应用(National Research Council, 2008; 唐金荣等, 2014, 2019)。自 2010 年起,美国能源部(U.S. DoE, 2010, 2023)多次采用二维矩阵从供应风险和对能源的重要性两个维度对短期、中期清洁能源必需的关键材料进行评价,评价包括重要的金属中间品在内的矿产和工程材料。欧盟自 2010 年起,采用二维关键性矩阵进行了 5 轮关键原材料评价,主要使用世界和欧盟权威指标,对于回收率等难以准确获得的数据尝试用现有数据替代和简化,不断提高数据质量,持续增加评价矿种(European Commission, 2010, 2023)。英国采用相似方法确定了 2021 年关键矿产清单,于 2023 年对评价方法进行了审查和系列改进。将 ESG 方法纳入供应风险计算中,通过全球治理指数(WGI)、人类发展指数(WDI)和环境绩效指数(EPI)进行几何平均得到 ESG 指标(Josso et al., 2023)。考虑全球地缘政治大变局对资源供应的影响,李建武等(2023)在供应风险中首次引入双边关系这一指标,量化其他国家对中国的海外矿产资源供应造成的潜在威胁程度,以此修正全球治理指数。

二维矩阵如何更加科学表达关键性仍在不断完善中,例如,英国将关键性矩阵由线性坐标改为对数坐标,关键性临界线也从线性向凸度临界线转变。空间关键性矩阵是对传统关键性矩阵的创新,随着对环境的重视程度不断提高, Greadel et al.(2012)、Yan et al.(2021)在二维关键性矩阵基础上引入“环境影响”,把平面矩阵延伸至空间三维,考虑矿产生产、精炼、加工对生态环境以及人类健康的影响。除关键性矩阵外,日本新能源产业技术综合开发机构、美国国家科学技术委员会、美国地质调查局等研究采用了关键性指数方法。2009 年,日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)采用 5 类 12 个指标赋值打分法,确定重要性矿产(Hatayama and Tahara, 2015b; 郭晓茜和李建武, 2017)。2016 年,美国国家科学技术委员会利用供应风险、产业增长率和市场动态三个指标进行几何平均得到关键性指数,对矿产及中间品进行预警筛查,确定潜在关键矿产(Nassar et al., 2016)。在此基础上,美国地质调查局采用供应中断风险、制造业

表 2 主要发达经济体关键矿产厘定方法对比
Table 2 Comparison of critical mineral determination methods in main developed economies

机构与学者	美国国家研究理事会 (NRC)	美国国家科学技术委员会 (NSTC)	美国地质调查局 (USGS)	美国能源部 (DOE)	欧盟委员会 (EC)	日本 (NEDO)	英国关键矿产情报中心 (UKCMIC)	耶鲁大学 Graedel 等
目标	确定关键矿产	潜在关键矿产预警筛查	确定关键矿产	确定清洁能源必需的关键材料	确定关键原材料	确定重要性矿产	确定关键矿产	确定关键金属
时间	2008	2016	2022	2010, 2019, 2023	2010—2023 (每 3 年)	2009	2021, 2023	2012
区域尺度	美国	美国	美国	全球	欧盟	日本	英国	全球、国家、公司
时间尺度	<10 年	5~10 年	—	短期 5 年; 中期 10 年	—	—	—	全球 10~100 年, 国家 5~10 年, 公司 1~5 年
评价种类	11 种	50 种矿产及中间品, 共 78 种	65 种非燃料矿产	2023: 38 种矿产和工程材料	2011: 47 种; 2023: 87 种;	39 种	2021: 26 种; 2023: 82 种	—
关键种类	5 种	20 种潜在关键矿产	50 种	23 种	2011: 14 种; 2023: 34 种	14 种	2021: 18 种	
评估方法	定量, 二维关键性矩阵	定量 (关键性指数)、半定量 (单点故障)、定性结合	定量 (关键性指数)、半定量 (单点故障)、定性结合	定量评估 (二维关键矩阵) 与定性分析	定量, 二维关键性矩阵	定量, 关键性指数	定量, 二维性关键矩阵	定量, 三维关键性矩阵
主要维度	供应风险, 供应限制	供应中断风险、制造业对国外依赖、经济脆弱性	供应中断风险、制造业对国外依赖、经济脆弱性	供应风险, 对能源的重要性	供应风险, 经济性	5 个指标: 供应风险, 价格风险, 需求风险, 回收限制, 潜在风险	供应风险, 经济性	供应风险, 供应限制, 环境影响
综合算法	计算供应风险, 计算供应限制的 影响	供应风险、产业增长率和市场动态几何平均得到关键性指数	供应中断风险、制造业对国外依赖、经济脆弱性三个指标几何平均得到关键性指数	定量计算后对指标赋值 (1~4), 然后进行 2 个关键性坐标轴不平等的加权	计算供应风险, 计算经济重要性, 超过阈值即为关键材料	对指标赋值 (0~3) 和权重, 加权得到关键性指数	计算供应风险, 计算供应限制, 计算环境重要性	计算供应风险, 计算供应限制, 计算环境影响
环境因素	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	未考虑	考虑	考虑

对国外依赖、经济脆弱性三个指标确定了 2018 年的关键矿产清单; 2021 年对厘定方法进行了更新, 采用了定量、半定量与定性相结合的方法, 在有足够数据的情况下进行定量评估, 对供应链是否存在单点故障进行半定量评估, 在无法进行其他评估时进行定性评估(Nassar and Fortier, 2021), 最终确定了 2022 年 50 种关键矿产清单。

3.2 关键矿产富集规律研究不断深入, 新类型矿床不断涌现

关键矿产在地壳丰度低, 多与主成矿元素伴生成矿, 常以吸附、类质同象和极细小矿物形式存在于矿床中, 具有“稀、细、伴”的特征, 其成矿作用与重大地质事件和层圈循环过程密切相关, 成矿条件十分苛刻, 客观上制约了认识关键矿床超常富集成矿的源-运-聚过程, 造成了关键金属矿产资源在全球分布极度不均(蒋少涌等, 2019)。近年, 关键矿产富集规律研究不断深入, 形成了一系列新认识, 认为起源于地幔的碱性岩-碳酸岩中富集稀土元素和铌(Hou et al., 2015), 而地壳中的高分异花岗岩和 LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩中富集锂、铍、铷、铯、铌、钽等元素(吴福元等, 2017), 壳幔混合来源的碱性花岗岩和 NYF(Nb-Y-F)型伟晶岩则富含铌、钽、钨、钼、铪等元素(McCauley et al., 2014; Dostal and Shellnutt, 2015; London, 2018; Siegel et al., 2018)。黑色页岩多发生 Se、Te、Re、Cd、Tl 等稀散金属和 PGE、Co 等稀贵金属的超常富集。煤系中可见 Ga、Ge 的超常富集和稀土、稀贵金属的富集; 磷块岩中常显著富集稀土, 尤其是中重稀土(温汉捷等, 2024)。

过去, 全球锂矿主要为卤水型和硬岩型, 卤水型主要以盐湖卤水型为主, 硬岩型主要以花岗伟晶岩型为主。近年, 在世界不同地方发现了黏土型、锂云母型和地下卤水等锂矿新类型(王登红, 2019)。黏土型锂矿具有分布广、储量大的特点(Benson et al., 2017), 但目前还未大规模开发利用(朱丽等, 2020)。锂云母型锂矿在江西、湖南等地取得重大找矿突破, 改变了世界锂资源格局, 影响了锂矿价格, 因其规模大、采矿难度小的特点, 成为中国当前开采的主要类型(王登红, 2019)。据目前统计, 卤水型、硬岩型和黏土型三种类型在全球锂矿资源占比分别为 64%、26% 和 10%(刘雪等,

2024)。全球钴矿主要包括沉积岩赋矿层控型 Cu-Co 矿床、红土型 Ni-Co 矿床、岩浆硫化物型 Cu-Ni-Co 矿床, 以及热液和火山成因钴多金属矿床等其他成因类型, 分别占总储量的 41%、36%、15% 和 8%(USGS, 2017)。富钴矿床成因争议较大, 重点集中在同生成因(Cailteux et al., 2005; Selley et al., 2005)与后期叠加(McGowan et al., 2003; El et al., 2009; Muchez et al., 2010)之争, 除了少数脉状、黑色页岩容矿型、密西西比河谷型和铁氧化物铜金型矿床, 钴富集过程均与基性—超基性岩有关(赵俊兴等, 2019)。随着岩浆型 Ni-Cu-Co 矿山面临储量危机以及红土型 Ni-Co 矿床矿石选冶技术的突破(付伟等, 2013), 红土型 Ni-Co 矿床和黑色页岩型 Ni-Cu-Zn-Co 矿床关注度不断升温(Putzolu et al., 2018; Teitler et al., 2019)。此外, 近些年勘探实践中也发现了独立钴矿床, 对钴矿资源的成矿规律研究和勘探开发具有重要意义(程迁群等, 2024)。根据成矿作用过程、矿物组成、化学成分等特征, 将石墨矿重新厘定为区域变质型、热液型、岩浆型和接触变质型 4 种类型。区域变质型、接触变质型、岩浆热液型及深成岩型石墨矿的碳质来源主要为有机质, 而变质热液型和火成碳酸岩型石墨矿则以幔源岩浆碳为主(张艳飞等, 2022)。近年来, 随着锡石、黑钨矿和白钨矿等以及其他副矿物 U-Pb 测年技术的发展, 锡矿成矿机制与区域成矿规律认识不断深化(毛景文等, 2023)。

3.3 资源大国不断拓展产业链, 强化关键矿产供应优势

3.3.1 澳大利亚

澳大利亚拥有丰富的关键矿产资源, 且矿种齐全, 资源禀赋极佳, 锂、镍和钴等关键矿产储量居世界前列, 是世界重要的关键矿产资源生产国和出口国, 具有发展关键矿产产业链和供应链的先天优势。澳大利亚锂储量 2429×10^4 t(全球占比 25.47%、排名第 1 位)、镍储量 1288×10^4 t(全球占比 12.62%、排名第 2 位)、钽储量 5.39×10^4 t(全球占比 27.16%、排名第 2 位)、钴储量 65×10^4 t(全球占比 6.89%、排名第 3 位)、铟储量 501×10^4 t(全球占比 12.39%、排名第 3 位)(中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 2024)。锂产量占全球锂产量的 49%、锰产量占全球锰产量的 12%、稀土产

量占全球稀土产量的 8%(张所续, 2023)。

澳大利亚因其丰富的资源禀赋、完备的基础设施和健全的法律制度, 矿业市场成熟度高, 在全球矿业市场中占据优势地位。近些年, 澳大利亚高度重视关键矿产行业, 先后出台了整套一系列关键矿产发展战略及相关支持措施, 且根据形势变化不断更新调整内容, 尤其在 2023 年两度调整“关键矿产清单”。与此同时, 与美国、印度、法国、德国等多个发达国家及发展中国家广泛开展矿业领域合作, 形式多样且内容丰富。澳大利亚不断强化自身优势, 对全球投资资本极具吸引力, 矿业发展潜力巨大, 是全球关键矿产供应链中的关键一环(中国有色金属报, 2024)。

3.3.2 加拿大

加拿大的关键矿产资源矿种齐全, 储量丰富, 构成其关键矿产产业链发展的雄厚基础。加拿大铀储量 149×10^4 t(全球占比 7.13%、排名第 2 位)、钽储量 0.84×10^4 t(全球占比 4.23%、排名第 4 位)、铋储量 4.7×10^4 t(全球占比 11.91%、排名第 4 位)、铟储量 294 t(全球占比 7.28%、排名第 5 位)、铂族金属储量 163 t(全球占比 0.21%、排名第 5 位)、钴储量 23×10^4 t(全球占比 2.44%、排名第 7 位)、锂储量 399×10^4 t(全球占比 4.19%、排名第 8 位)、镍储量 535×10^4 t(全球占比 5.25%、排名第 8 位)(中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 2024)。加拿大矿业市场活跃度高, 全球矿业领域约 45% 上市公司在加拿大上市, 总市值约达到 5000 余亿加元, 极其有利于加拿大围绕关键矿产开展广泛产融国际合作。

近些年, 加拿大政府瞄准关键矿产领域, 不断强化其在关键矿产供应链中的优势, 对内出台了整套关键矿产发展战略及相关措施, 并从矿业运行的各个环节给予支持; 对外积极和其他国家在关键矿产领域开展多层次、全方位且各有侧重点的合作, 以获取关键矿产发展所需的资金、市场与技术。加拿大政府在 2023 年加拿大国际矿业大会期间宣布, 将投资近 3.6 亿加元用于推进关键矿产领域的相关研究、开发及拓展等工作(有色资讯, 2023)。加拿大可能需要 5 到 25 年的时间来开发新矿, 作为其 30 亿美元关键矿产战略的一部分, 加拿大正在简化其许可程序, 并正在与当地社区合作来实现这一目标(Goldman Sachs, 2023)。

3.3.3 南美洲

南美锂三角地区(阿根廷、玻利维亚和智利三国毗邻区域)盐湖卤水型锂矿丰富, 是全球最重要的锂资源基地。据统计, 区内已开展系统勘探盐湖 19 个, 总面积 1.62×10^4 km², 涉及 25 个锂矿项目。其中玻利维亚乌尤尼盐湖(Salar de Uyuni)、智利阿塔卡玛盐湖(Salar de Atacama)和阿根廷翁布雷穆埃尔托盐湖(Salar de Hombre Muerto)均为世界级超大型盐湖卤水型锂矿床。根据中国地质调查局 2024 年的统计数据(中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 2024), 目前, 全球锂矿资源量 56345×10^4 t(碳酸锂当量, 下同), 其中阿根廷 12634×10^4 t(全球占比 22.42%、排名第 1 位)、玻利维亚 9643×10^4 t(全球占比 17.11%、排名第 2 位)、智利 6489×10^4 t(全球占比 11.52%、排名第 4 位)。除锂矿外, 该地区铜、锑和铟等关键矿产资源也很丰富。智利铜储量 20995×10^4 t(全球占比 25.90%、排名第 1 位); 玻利维亚锑储量 31×10^4 t(全球占比 14.04%、排名第 2 位)、铟储量 342×10^4 t(全球占比 8.47%、排名第 4 位)、铋储量 1.5×10^4 t(全球占比 3.83%、排名第 5 位)(中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心, 2024)。

南美锂三角地区在全球锂矿产业中极具影响力, 锂矿资源量全球占比超过 50%, 且全球锂矿开发主要集中在锂三角地区的智利和阿根廷。阿根廷、玻利维亚和智利三国早在 2011 年就提出组建南美洲锂矿生产国组织“锂佩克”的提议, 但由于三国锂矿监管政策及管理运营模式具有较大差异, 该提议迟迟未进入实践阶段。南美“锂三角”希望通过加速打造“锂佩克”, 巩固和强化对锂资源的控制权。阿根廷对外资政策较为宽松, 锂资源开发均由外资主导, 美国、中国、加拿大、荷兰、澳大利亚、法国、日本、韩国等国的公司均在该地区投资开采锂矿。阿根廷已宣布取消锂、氧化锂、氢氧化锂和碳酸锂等产品 2.5%~5% 额度的出口退税政策(孙昱晗等, 2024)。玻利维亚于 2014 年 5 月 20 日颁布第 535 号法令, 出台了新的矿业法规——《535 号矿业与冶金法》, 对 1997 年 3 月 17 日第 1777 号法令的矿业法进行了比较大的调整, 总体上加强了国家对矿业资源的控制权。智利《矿业法》规定国家享有优先收购法定关键矿产品和铀钍含量较高的矿

产品的权利。综上所述,南美洲在全球关键矿产供应链中具有独特优势,是不容忽视的关键一极。

3.4 失落地区的回归和重新审视,中亚和欧洲的资源潜力不容忽视

3.4.1 中亚

长期以来,中亚地区是全球清洁能源转型关键矿产分析中缺失的一环,或将成为关键矿产新的热点地区,作为重要的关键矿产供应国。中亚地区横跨特提斯和古亚洲造山带,地质背景复杂,成矿条件优越,关键矿产资源较为丰富。哈萨克斯坦境内的东乌拉尔、额尔齐斯—斋桑、科克舍套—乌鲁套、吉尔吉斯斯坦北天山的卡拉套—伊塞克湖以及乌兹别克斯坦中天山恰特卡尔地区拥有丰富的锂、铍、铌、钽等关键矿产(李文渊等, 2019)(图 1)。中亚国家已探明的关键矿产储量差异很大,拥有全球

38.6% 的锰矿储量、30.07% 的铬矿储量、8.7% 的钛矿储量、5.3% 的铜矿储量和 5.3% 的钴矿储量。所有这些关键材料都用于广泛的清洁能源技术。其中哈萨克斯坦是中亚地区关键矿产最为丰富的国家,统计的 22 种关键矿产中有 16 种具有良好地质潜力。乌兹别克斯坦是中亚地区关键矿产第二大国,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦紧随其后,具有较大的资源潜力(Vakulchuk and Overland, 2021)。

2023 年 9 月,哈萨克斯坦总统托卡耶夫在向全国发表讲话时表示,开发稀有和稀土金属矿床应该是一项国家优先任务。哈萨克斯坦的稀有金属、稀土及其化合物的生产未充分发挥其潜力,已经出现 30 年的停滞。在 2023 年 6 月举行的哈德商业论坛上,哈萨克斯坦 Creada 公司和德国 HMS Bergbau 公司就投资和开发一个稀有金属项目达成一致,将

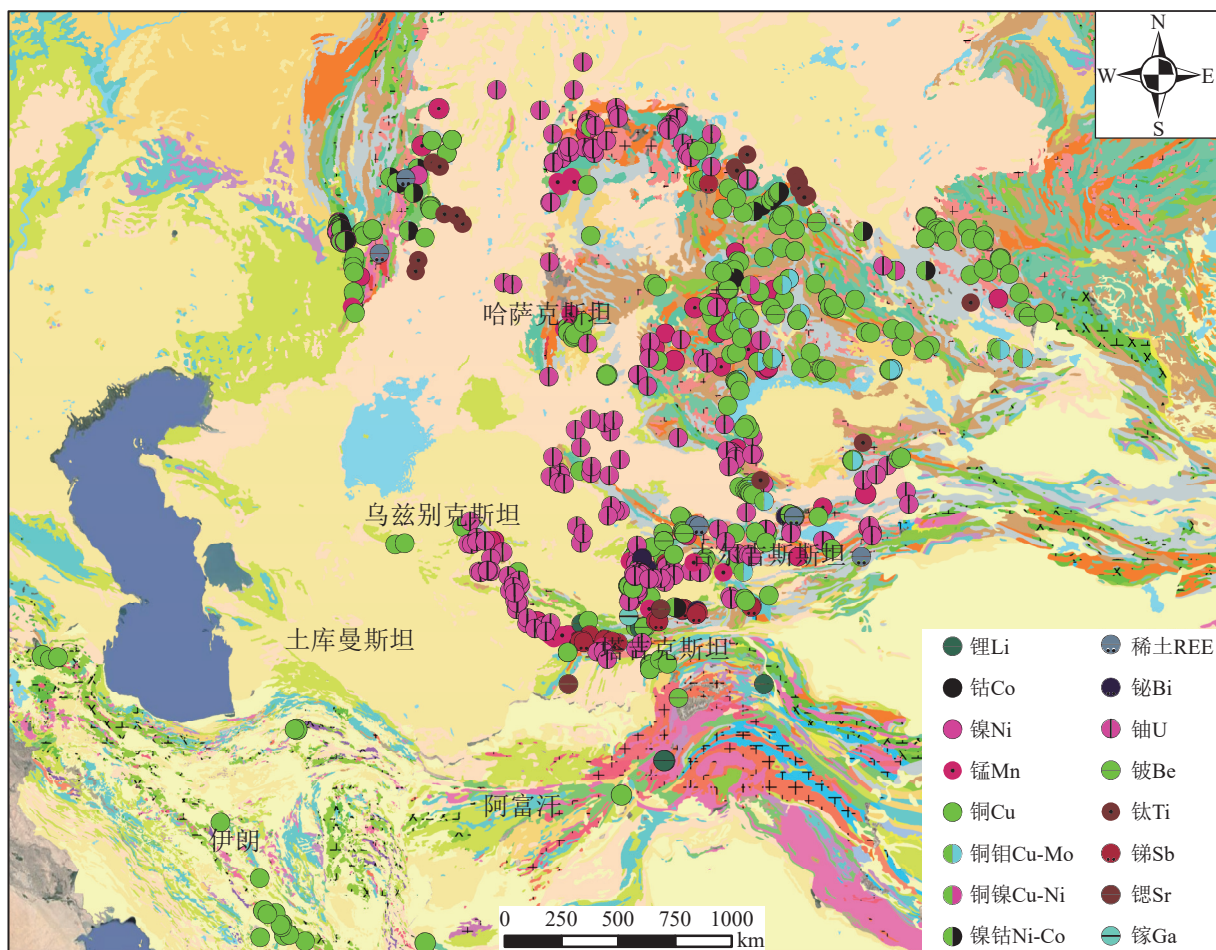


图 1 中亚及邻区主要关键矿产分布图(据李文渊等, 2019; Hong et al., 2024 修改)

Fig.1 Distribution of major critical minerals in Central Asia and neighboring regions (modified from Li Wenyuan et al., 2019; Hong et al., 2024)

在哈萨克斯坦东部勘探、开采和加工复杂的稀有金属矿石。该项目计划投资 2 亿美元。此外,哈萨克斯坦和欧盟于 2022 年 11 月签署了原材料、电池和可再生能源方面的战略伙伴关系协议(高永伟, 2024)。2024 年 4 月,欧盟与乌兹别克斯坦签署谅解备忘录,启动关键原材料战略伙伴关系。该伙伴关系将侧重于在整合可持续价值链方面开展合作,以提高供应链的韧性,以及投资、运营和出口有关措施的透明度。双方表示,将进一步加强在关键原材料领域的合作,并制定可行性行动路线图。同时,双方还将为关键矿产相关项目筹集资金,协助开展矿产开发的基础设施建设,并将合作开展关键矿产研究和技术创新等工作(EEAS, 2024)。

3.4.2 欧洲

欧洲的关键矿产资源虽然并不丰富,但对关键矿产的利用技术一直走在世界前列(王登红, 2019)。相比于美国、日本和韩国等主要工业国提前布局关键矿产产业链,欧洲长期以来对自身关键矿产供应链的脆弱性认识不足,是近几十年来唯一一个金属矿产产量下降的大洲。近年来,才逐渐认识到关键矿产供应链韧性严重不足,开始重视关键矿产产业布局(Vincent, 2022)。英国政府 2022 年发布首份《英国关键矿产战略》,旨在建立更具弹性、更安全的关键矿产供应链:一是查明国内的重要关键矿产资源,加强前沿技术研发,通过采矿、精炼、制造及关键矿产的回收再利用等工作,重建采矿与矿产加工方面的能力,加速英国关键矿产循环经济,提升国内关键矿产供应;二是将通过持续强化双边和多边关系,加强国际合作,推进深海矿物开采等,提升海外关键矿产供应弹性;三是拓展国际市场,在全球矿业市场中积极发挥主导作用,提升 ESG 绩效,提高全球市场的运作效率和透明度,营造良好的竞争环境,支持伦敦成为全球关键矿产金融之都(GOV. UK, 2023)。

2024 年 5 月,欧洲最大的三个经济体德国、法国和意大利日前在布鲁塞尔举行的 EIT 原材料峰会上,推出总额 25 亿欧元的关键矿产公共基金,以加强关键金属的供应。这些资金将为锂、铜和稀土元素等关键原材料的提取、加工和回收等项目提供资金。其中,德国将向关键矿产公共基金投资 10 亿欧元,该基金将由国有开发银行 KfW 管理;法

国政府将向该国关键矿产基金提供 5 亿欧元,同时该国私营企业 Rovia Capital Partners 还计划通过私募股权再筹集 15 亿欧元;意大利政府已建立 10 亿欧元的关键矿产基金,确保本国关键矿产资源供应链稳定,同时还将从私人投资者处再募集 10 亿欧元。

3.5 新技术的变革与替代工艺,为缓解关键矿产供需矛盾提供了可能

关键矿产供应链最重大变化可能并非来自建设新矿山、加工厂或制造设施的新投资,可能来自新生产技术、新替代品、新来源和新提取方法的技术创新(Goldman Sachs, 2023)。例如,除传统的提锂技术外,近年来还出现了一些新型提锂技术,如纳米过滤膜提锂、生物法提锂、电化学离子提取技术等,进一步推动了含锂资源的开发,是提锂技术的发展方向(余亮良和黄敏, 2024)。直接锂提取(DLE)是一种正在大规模测试的创新技术,该技术可大大缩短锂提取时间,降低成本,提高效率,一些项目目前正在建设中。如果该技术在智利和阿根廷等锂储量丰富的国家实施,成本约为 5700 美元/t,不仅可以改善供应,而且可以改善土地和水资源使用的可持续性(Goldman Sachs, 2023)。关键原材料替代也为缓解关键矿产供需矛盾提供了可能性。研究人员正在开发和探索永磁材料中替代稀土元素的新型材料与技术(Li et al., 2021; Ma et al., 2023; Wang et al., 2024),以及电池材料中的无钴磷酸铁锂电池等技术(Wang et al., 2023)。回收技术为关键矿产提供了新的有效供给端,有助于维持矿物的可持续供应,缓解关键原材料需求(Ali et al., 2017; Fishman and Graedel, 2019)。关键矿产回收利用率主要取决于回收难易程度、价格水平和市场成熟度。比如,全球铜、镍等基础金属和铂、钯等贵金属的回收利用率较高。但受回收技术限制,锂和稀土等回收利用率较低。此外,回收利用率也存在区域差异,欧盟约 50% 的基础金属可通过再生利用供应,而世界其他地区的这一比例仅为 18%(李丹, 2022)。

3.6 全球关键矿产争夺,正加速推动海洋矿产资源勘探开发步伐

近些年,随着关键矿产需求的不断增长以及陆上资源的大量消耗,海洋矿产成为新的探索方向,

勘探研究也迅速升温,美国、加拿大、中国、西班牙、英国、德国和日本等许多国家已经开始广泛的勘探研究,通过地质、地球物理、地球化学和矿物学方法寻找丰富的海底矿床。截至 2022 年 12 月,国际海底管理局(ISA)已向公共和私营采矿企业颁发了 31 份海底矿产资源勘探合同(Vysetti, 2023)。海洋中蕴含大量矿藏,其中含有大量的关键矿产,如锰结核、海底块状硫化物、铁锰结壳、富含稀土元素的海相泥浆和海相磷矿(Hein et al., 2013; Balaram, 2019; Heffernan, 2019)。其中,富钴结壳的勘探开发进程不断推进,各国都在攻关开采深海富钴结壳的新技术(赵俊兴等, 2019),截至目前,已完成首个五年任务,初步开展了富钴结壳资源开发和综合利用评价工作,并完成了富钴结壳开采系统方案设计、海上采掘功能试验以及富钴结壳可选冶性评价工作(王辉等, 2019)。

4 未来展望

4.1 关键矿产在能源转型中的作用不可替代,国际竞争仍将继续

全球已有 130 多个国家和地区设立“净零排放”或“碳中和”目标,在这一目标的驱动下,全球能源系统向清洁化、低碳化甚至无碳化发展已是大势所趋(王欢等, 2021; 尹文渊等, 2023; 张所续, 2023)。能源绿色转型,关键矿产先行,已成为全球业界共识。能源转型亟需大力发展风能、太阳能光

伏、储能等清洁能源技术,促使锂、镍、钴和铜等关键矿产的用途不断扩大,需求呈爆发式增长。氢能作为一种能源载体的快速发展,也导致镍、钴和铂族金属的需求量不断增长(王欢等, 2021)。随着全球能源转型向纵深推进,关键矿产已经成为能源绿色转型的重要基石,其长期稳定供应将持续成为世界主要国家高质量发展的优先关注方向(IEA, 2024)。

4.2 关键矿产已成为矿产勘查投资热点,将引领新一轮全球矿业复苏

2022 年,全球关键矿产勘探投资增长 20%。其中,锂和镍勘探投资预算分别上涨 88%、46%,铜和钴勘探投资预算分别上涨 21% 和 2%(朱清等, 2024)。2023 年,全球锂、钴、镍等关键矿产的勘查投入持续攀升。其中,锂矿勘查投入为 8.30 亿美元(同比增长 77%),占全球勘探总投入的 7%,成为仅次于金和铜的第三大全球重点勘查矿种;镍矿勘查投入为 7.32 亿美元,增速达 19%;钴矿勘查投入为 0.74 亿美元,呈缓慢稳定增长(余韵等, 2024)(图 2)。由于与需求前景相比,目前关键矿产项目储备有限,矿业投资和矿山开发必须赶上不断增长的需求。而地质数据和矿产资源分布调查的缺乏,又限制了关键矿产的勘探活动(Kapil et al., 2023)。未来 15 年铜、钴、镍和其他金属材料预计将需要价值 1.7 万亿美元的投资(Desai, 2021)。其他研究估计铜生产所需投资预计为 1000 亿美元(到 2030 年)(James, 2021),锂生产所需投资预计为 210 亿美元

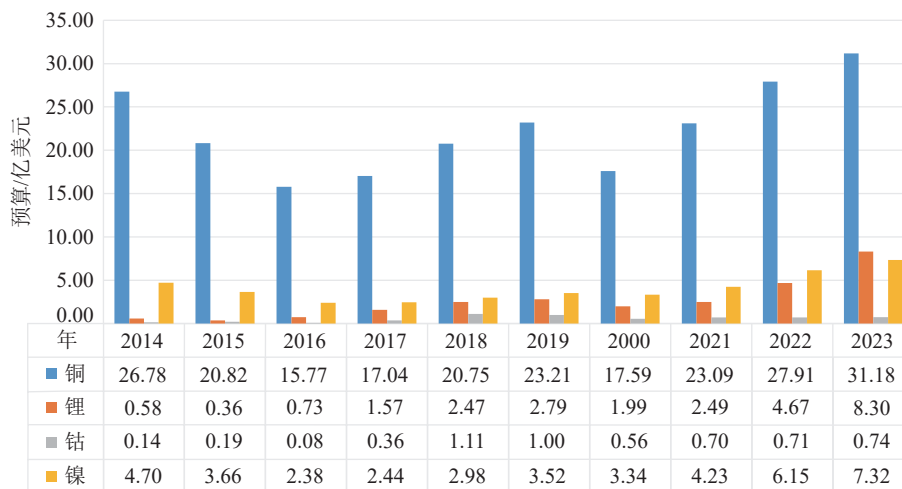


图 2 近十年全球铜、锂、钴和镍投资预算(数据来源于 Standard & Poor's, 2024)

Fig.2 Global investment budgets for copper, lithium, cobalt and nickel over the last decade (data from Standard & Poor's, 2024)

(到 2025 年)。关键矿产投资骤增被业界视为新一轮矿业复苏的重要引擎,也是当下矿业发展的标志性特征。

4.3 关键矿产需求将持续增长,锂有望实现从“小宗矿”到“大宗矿”的跃迁

随着新质生产力的加快发展,全球工业化发展模式正在改变(陈其慎等, 2024)。以新能源、新材料、新一代信息技术和高端装备制造业等为代表的新兴产业发展带来矿产分异态势,改变着各类矿产品的应用范围、供求关系和价格走向,使关键矿产成为国际矿业界共同关注的焦点。2016 年以来,全球矿业市场中铁、铝等传统大宗矿产市场关注度明显下降,而锂、钴、镍等与能源绿色低碳转型相关的关键矿产逐步兴起(张宇轩等, 2022)。与锌和铅等大宗矿产的温和增长形成鲜明对比,锂、镍、钴等原本用量较少的小宗矿产资源的使用强度不断增强,尤其是锂矿,有望逐渐从小宗矿产成长为大宗矿产。2023 年,全球对关键矿产的需求强劲增长,锂需求增长了 30%,而对镍、钴、石墨和稀土元素的需求均增长了 8%~15%。清洁能源应用已成为系列关键矿产需求增长的主要驱动力。电动汽车巩固了其作为锂最大消费细分市场的地位,并大幅增加了其在镍、钴和石墨需求中的份额(IEA, 2024)。根据 IEA 预测,在实现零排放情景中,随着电动汽车和电网储能电池部署大幅增加,到 2040 年,铜的需求将增长 50%,而镍、钴和稀土元素的需求将翻一番,石墨需求将增长四倍。在所有关键矿产中,锂需求增长最为突出,到 2040 年将增长八倍(IEA, 2024)。当资源需求、资源发现和大规模应用叠加出现时,“小宗矿”就有望成长为“大宗矿”。

4.4 回收技术将日益成为关键矿产供应研究的重要一环

关键矿产回收可最大程度地延长关键矿产资源的生命周期,减缓需求依赖和资源浪费,促进产业的可持续发展(张宇祺等, 2024)。随着关键矿产供需矛盾的突出,发展循环经济形成社会共识,回收技术和工艺创新将备受关注,迎来快速发展。锂作为本世纪最重要的新能源金属之一,其回收技术研究具有重要意义(黄莉等, 2021; 覃牧川等, 2024)。废旧锂离子电池的回收技术除了此前的物理方法、干法冶金技术和湿法冶金技术,近些年出现了生物溶出和离子交换等新技术方法(王斌等,

2019)。据估计,到 2040 年,欧洲电动汽车电池锂需求的 50% 以上和钴需求的 92% 可来自回收(Goldman Sachs, 2023)。

5 结 论

(1)随着全球能源转型快速推进,关键矿产稳定供应已成为世界主要经济体和相关企业高度关注的重要议题,各主要国家厘定的关键矿产的种类越来越多,但交叉重叠的矿种越来越集中在电动汽车、风力发电、光伏和储能等产业所需的矿产上,主要包括锂、镍、钴、锰、稀土和钛、镓、锗、铟、碲和铂族等。未来电池金属和风光金属的需求仍将快速增长,勘查开发所需的资金也将持续增加。

(2)为确保关键矿产的稳定供应,世界主要经济体的政府表现出深度参与关键矿产供应链和产业链的塑造之中,采取加大大地勘力度、加强对外合作和给予研发经费支持、税收优惠,以及设立投资基金等多种措施,制造型企业也加强了与资源型企业的对接,力图通过向上一体化或向下一体化等措施,锁定关键原材料的供应主渠道。国外诸多做法,值得国内学习借鉴。

(3)世界关键矿产稳定供应,除传统的加拿大、澳大利亚和非洲等国家和地区外,中亚等失落地区和后工业化的欧洲各国正逐渐回归和重新审视,海洋矿产资源勘查步伐明显加快,开发也被越来越多的国家提上议事日程,新技术的变革和替代工艺以及回收利用也被视为是缓解供应矛盾的重要方向。相关企业和机构也多元化布局,全方位发力,有效降低供应风险。

(4)在低碳技术快速发展的带动下,资源需求和勘查开发投资将呈现快速增长。当技术发展、需求增大和新发现不断涌现同时出现时,以锂为代表的“小宗”矿产将成长为“大宗”矿产。因此,无论是政府,还是企业,包括制造企业和矿业企业以及能源企业均要高度重视技术与关键矿产的发展动向和变化,及时研判并做出布局,以便赢得发展先机。

致谢:感谢中国地质调查局发展研究中心施俊法研究员、郝梓国研究员,以及责任编辑和匿名审稿专家为完善本文提出的宝贵修改意见。感谢中国地质调查局西安地质调查中心杨博、张茗爽、褚洪义和张雪琪对论文图件提供的数据与指导。

References

- Ali S H, Giurco D, Arndt N, Nickless E, Brown G, Demetriades A, Durrheim R, Enriquez M A, Kinnaird J, Littleboy A, Meinert L D, Oberhänsli R, Salem J, Schodde R, Schneider G, Vidal O, Yakovleva N. 2017. Mineral supply for sustainable development requires resource governance[J]. *Nature*, 543(7645): 367–372.
- Balaram V. 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(4): 1285–1303.
- Bao Xiaolian. 2024. Analysis of green financing effect in non-ferrous mining industry from ESG perspective—Taking Zijin mining as an example[J]. *Metallurgical Economy and Management*, (3): 49–52 (in Chinese).
- Benson T R, Coble M A, Rytuba J J, Mahood G A. 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins[J]. *Nature Communications*, 8(1): 270–279.
- BGS. 2022. UK Criticality Assessment of Technology Critical Minerals and Metals[R]. Nottingham: British Geological Survey.
- Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, Kaputo A K, Milesi J P. 2005. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African Copperbelt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 42(1): 134–158.
- Castillo E, Real I D, Roa C. 2023. Critical minerals versus major minerals: A comparative study of exploration budgets[J]. *Mineral Economics*, 37(3): 433–444.
- Castillo R, Purdy C. 2022. China's role in supplying critical minerals for the global energy transition: What could the future hold?[R]. Washington: Brookings Institution.
- Chen Jian, Wu Nan. 2011. Study on Japan's Scarce Resource Strategy and Implications for China[C]//2011 China Sustainable Development Forum 2011 Special Issue (II) Zhuhai: China Population, Resources and Environment, 214–218 (in Chinese).
- Chen Qishen, Zhang Yanfei, Xing Jiayun, Long Tao, Zheng Guodong, Wang Kun, Ren Xin. 2024. New quality productive forces and new pattern of mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 33(5): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wan. 2024. Top 10 ESG trends for 2024[J]. *Magazine Introduction*, (2): 64–69 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Jinhua, Shuai Jing, Zhao Yujia, Duan Haoran, Shuai Chuanmin. 2023. Risk assessment and prediction of critical mineral resources supply for China: A case of copper[J]. *Resources Science*, 45(9): 1778–1788 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Qianqun, Liang Yuanzhao, Liu Mingyong, Lei Yangai, Xie Hang, Zhu Zhendong, Li. Shucheng, Dou Song, Zheng Xiaojun. 2024. An independent cobalt deposit was discovered for the first time in Nanjian area, Yunnan Province[J]. *Mineral Exploration*, 15(5): 906–908 (in Chinese with English abstract).
- China Nonferrous Metals News. [2024–04–11]. Australia deepens its commitment to key minerals[EB/OL]. <https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=450786> (in Chinese).
- Cust J, Zeufack A. 2023. Africa's resource future[G]. Agence française de développement and World Bank, 1–274.
- Desai P. [2021–05–10]. Low Carbon World Needs \$1.7 Trillion in Mining Investment[EB/OL]. <http://www.reuters.com/business/energy/low-carbon-world-needs-17-trillion-mining-investment-2021-05-10>.
- DISR. [2023–12–16]. Updates to Australia's Critical Minerals List [EB/OL]. <https://www.industry.gov.au/news/updates-australias-critical-minerals-list>.
- Dostal J, Shellnutt J G. 2015. Origin of peralkaline granites of the Jurassic Bokan Mountain complex (southeastern Alaska) hosting rare metal mineralization[J]. *International Geology Review*, 58(1): 1–13.
- EEAS. [2024–04–05]. EU establishes strategic partnership with Uzbekistan on critical raw materials[EB/OL]. https://www.eeas.europa.eu/delegations/uzbekistan/eu-establishes-strategic-partnership-uzbekistan-critical-raw-materials_en?s=233.
- El D H A, Muchez P, Cailteux J. 2009. Two Cu–Co sulfide phases and contrasting fluid systems in the Katanga copper belt, Democratic Republic of Congo[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(4): 315–332.
- Els F. [2023–10–12]. Raising capital now biggest risk to mining companies after ESG[EB/OL]. <https://www.mining.com/raising-capital-now-biggest-risk-to-mining-companies-after-esg/>.
- European Commission. 2010. Critical raw materials for the EU[R/OL]. <https://maritime-forum.ec.europa.eu/system/files/2018-02/Critical%2520raw%2520materials%2520final%2520report.pdf>.
- European Commission. 2023. Study on the critical raw materials for the EU 2023[EB/OL]. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en.
- Farooq S, Tahir A A, Krewer U, Shah A U H A, Bilal S. 2019. Efficient photocatalysis through conductive polymer coated FTO counter electrode in platinum free dye sensitized solar cells[J]. *Electrochimica Acta*, 320134544.
- Fishman T, Graedel T. 2019. Impact of the establishment of US offshore wind power on neodymium flows[J]. *Nature Sustainability*, 2(4): 332–338.
- Fu Wei, Niu Hujie, Huang Xiaorong, Yang Mengli, Chen Yuanrong. 2013. Diversified genesis of the lateritic Nickel deposits: A comparative study based on the global scale[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 832–849 (in Chinese with English abstract).
- Gan Yong, Peng Suping, Mao Jingwen, Pei Rongfu, Li Zhongping, Tu Hailing, Sun Chuanyao, Chen Qishen, Xie Man, Zheng Wenjiang. 2022. High-quality development strategy for the supply chain of critical minerals and its material industry in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 24(3): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yongwei. 2024. Kazakhstan continues to strengthen the investigation and development of rare earth metal ores[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/qKhAYcldB5iTFdVzP19otg> (in Chinese).
- Giannarakis G, Konteos G, Sariannidis N. 2014. Financial, governance and environmental determinants of corporate social responsible disclosure[J]. *Management Decision*, 52(10): 1928–1951.
- Goe M, Gaustad G. 2014. Identifying critical materials for photovoltaics in the US: A multi-metric approach[J]. *Applied*

- Energy, 123: 387–396.
- Goldman Sachs. [2023–09–13]. Resource realism: The geopolitics of critical mineral supply chains[EB/OL]. <https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/resource-realism-the-geopolitics-of-critical-mineral-supply-chains.html>.
- GOV. UK. [2023–03–13]. Resilience for the future: The UK's critical minerals strategy[EB/OL]. <https://www.gov.uk/government/publications/uk-critical-mineral-strategy/resilience-for-the-future-the-uks-critical-minerals-strategy>.
- Government of Canada. [2022–12–12]. The Canadian critical minerals strategy— From exploration to recycling: powering the green and digital economy for Canada and the world[EB/OL]. <https://www.canada.ca/en/campaign/critical-minerals-incanada/canadian-critical-minerals-strategy.html>.
- Graedel T E, Barr R, Chandler C, Chase T, Choi J, Christoffersen L, Friedlander E, Henly C, Jun C, Nassar N T, Schechner D, Warren S, Yang M Y, Zhu C. 2012. Methodology of metal criticality determination[J]. Environmental Science & Technology, 46(2): 1063–1070.
- Grandell L, Lehtilä A, Kivinen M, Koljonen T, Kihlman S, Lauri L S. 2016. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies[J]. Renewable Energy, 95: 53–62.
- Guo Xiaoqian, Li Jianwu. 2017. An overview of critical mineral resource evaluation by foreign institutions[J]. China Mining Magazine, 26(9): 25–32 (in Chinese with English abstract).
- Hatayama H, Tahara K. 2015a. Evaluating the sufficiency of Japan's mineral resource entitlements for supply risk mitigation[J]. Resources Policy, 44: 72–80.
- Hatayama H, Tahara K. 2015b. Criticality assessment of metals for Japan's resource strategy[J]. Materials Transactions, 56(2): 229–235.
- Heffernan O. 2019. Scientists track damage from controversial deep-sea mining method[J]. Nature, 567(7748): 294.
- Hein J R, Mizell K, Koschinsky A, Conrad T A. 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high-and green-technology applications: Comparison with land-based resources(Review)[J]. Ore Geology Reviews, 51: 1–14.
- Hong Jun, Meng Guanglu, Zhang Jing, Cao Jifei, Wang Bin, Luo Yanjun, Yang Bo, Zhang Xueqi, Cicchella Domenico. 2024. National-scale geochemical survey: Distribution of chemical elements in stream sediment of South and Central Asia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 262107452.
- Hou Zengqian, Liu Yan, Tian Shihong, Yang Zhiming, Xie Yuling. 2015. Formation of carbonatite-related giant rare-earth-element deposits by the recycling of marine sediments[J]. Scientific Reports, 5(1): 10231.
- Huang Li, Li Fangqin, Dai Tao, Wang Peng. 2021. Recycling potential assessment of lithium metal—Based on existing recycling technology and process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 41(5): 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yunyou. 2024. Analysis of the Biden administration's clean energy supply chain security policies and their impacts[J]. International Petroleum Economics, 32(2): 36–49 (in Chinese with English abstract).
- IEA. 2024. Global Critical Minerals Outlook 2024[R]. Paris: International Energy Agency.
- Vincent D. 2022. Vers une ère métallisée: Renforcer la résilience des industries par un mécanisme de stockage stratégique de métaux rares[R]. Paris: Ifri.
- IRENA. 2023. Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials [R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jackson P, Hariskos D, Lotter E, Paetel S, Wuerz R, Menner R, Wischmann W, Powalla M. 2011. New world record efficiency for Cu(In, Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19(7): 894–897.
- James A. 2021. The World Will Need 10 Million Tonnes More Copper to Meet Demand[N]. <https://www.mining.com/web/the-world-will-need-10-million-tonnes-more-copper-to-meet-demand/>.
- Jiang Shaoyong, Wang Wei. 2022. How does extraordinary enrichment mineralization of strategic key metals occur?[J]. Earth Science, 47(10): 3869–3871 (in Chinese).
- Jiang Shaoyong, Wen Hanjie, Xu Cheng, Wang Yan, Su Huimin, Sun Weidong. 2019. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 112–118 (in Chinese with English abstract).
- Josso P, Lusty P, Gunn A, Shaw R, Singh N, Horn S, Petavratzi E. 2023. Review and Development of the Methodology and Data Used to Produce the UK Criticality Assessment of Technology-critical Minerals[R]. Nottingham: British Geological Survey.
- Jowitt S M, Mudd G M, Thompson J F H. 2020. Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production[J]. Communications Earth & Environment, 1(1): 1–8.
- Kapil N, Radia S, Harikrishnan T, Matthew W, Rajesh C, Ganesh S, Noura Y M, Isabelle R, Sebastian S, Morgan D B. 2023. Ensuring Sustainable Supply of Critical Minerals for a Clean, Just and Inclusive Energy Transition[R]. Madrid: T20 Policy Brief.
- Li Dan. 2022. Development of China's key mineral resources from “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions” [J]. Metallurgical Economy and Management, (3): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianwu, Li Tianjiao, Jia Hongxiang, Wang Anjian. 2023. Determination of China's strategic and critical minerals list[J]. Acta Geoscientia Sinica, 44(2): 261–270 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuo, Ma Longfei, Fan Jinkui, Yang Jianping, Zheng Qiang, Bian Baoru, Zhang Jian, Du Juan. 2021. High energy product of isotropic bulk Sm-Co/α-Fe(Co) nanocomposite magnet with multiple hard phases and nanoscale grains[J]. Journal of Materials Science & Technology, 88: 183–188.
- Li Wenchang, Li Jianwei, Xie Guiqing, Zhang Xiangfei, Liu Hong. 2022. Critical minerals in China: Current status, research focus and resource strategic analysis[J]. Earth Science Frontiers (China

- University of Geosciences(Beijing); Peking University), 29(1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan, Hong Jun, Chen Bo, Liu Jiang, Ma Zhongping, Yang Bo. 2019. Distribution regularity and main scientific issues of strategic mineral resources in Central Asia and adjacent regions[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 119–124 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinlei, Liu Qianru. 2023. The great power game and China's response to key minerals in the global clean energy transition[J]. Issues of Contemporary World Socialism, (4): 127–141 (in Chinese with English abstract).
- Liu Min, Mao Jingwen, Zhang Zhihua, Li Lixing, Long Tao, Chao Wendi. 2024. Current supply status, demand trends and security measures of chromium resources in China[J]. *Green and Smart Mining Engineering*, 1(1): 53–57.
- Liu Xue, Wang Chunlian, Liu Xuelong, Liu Dianhe, Yan Kai, Liu Sihan, Liu Yanting. 2024. Main types, distribution, development and utilization of lithium deposits in China[J]. *Geology in China*, 51(3): 811–832 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuelian, Kang Xishun. 2023. An evaluation and discussion on Japan's critical minerals supply chain security measures[J]. *Contemporary Economy of Japan*, (5): 27–41 (in Chinese with English abstract).
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, 101: 349–383.
- Lu Yang. 2022. Research on the Risk Evaluation and Early Warning of Critical Mineral Resources for China's Solar PV Industry[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Ma Longfei, Quan Wei, Fan Jinkui, Chen Yanbai, Zheng Qiang, Bian Baoru, Zhang Jian, Du Juan. 2023. High magnetic energy product in isotropic nanocomposite powders with high percent of soft phase towards ultrastrong magnets[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 144: 161–167.
- Mao Jingwen, Song Shiwei, Liu Min, Meng Jianyan. 2022. REE deposits: Basic characteristics and global metallogeny[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3675–3697 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Song Shiwei, Liu Peng, Liu Min, Zhao Panlao, Yuan Shunda. 2023. Current progress and development trend of the research on tin deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(5): 1233–1240. (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yang Zongxi, Xie Guiqing, Yuan Shunda. 2019. Critical minerals: International trends and thinking[J]. *Mineral deposits*, 38(4): 689–698 (in Chinese with English abstract).
- Mccauley A, Bradley D C. 2014. The global age distribution of granitic pegmatites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 52(2): 183–190.
- Mcgowan R R, Roberts S, Foster R P, Boyce A J, Collier D. 2003. Origin of the copper-cobalt deposits of the Zambian copper belt: An epigenetic view from Nchanga[J]. *Geology*, 31(6): 497–500.
- Muchez P, Brems D, Clara E, De C A, Lammens L, Boyce A, De M D, Mukumba W, Sikazwe O. 2010. Evolution of Cu–Co mineralizing fluids at Nkana Mine, Central African Copperbelt, Zambia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 58(3): 457–474.
- Nassar N T, Fortier S M. 2021. Methodology and technical input for the 2021 review and revision of the U. S. Critical Minerals List[R/OL]. <https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20211045>.
- Nassar N, Xun S, Fortier S, Schoeberlein D. 2016. Assessment of Critical Minerals: Screening Methodology and Initial Application[R]. Washington: National Science And Technology Council.
- National Research Council. 2008. Minerals, Critical mineral, and the U. S Economy[EB/OL]. https://nap.nationalacademies.org/resource/12034/critical_minerals_final.pdf.
- Nurmi P A, Hill P R, Lebel D, Hitzman M, Smelror M, Thorleifson H. 2020. The geological survey of finland strengthening its role as a key player in mineral raw materials innovation ecosystems[J]. Geological Society Special Publication, 499.
- Putzolu F, Balassone G, Boni M, Maczurad M, Mondillo N, Najorka J, Pirajno F. 2018. Mineralogical association and Ni–Co deportment in the Wingellina oxide-type laterite deposit (Western Australia)[J]. *Ore Geology Reviews*, 97: 21–34.
- Qin Muchuan, Liang Yanjie, Li Qingzhu, Ke Yong, Peng Cong, Zhu Zhihua, Bai Bangwei, Chai Liyuan. 2024. Analysis of the development of key non-ferrous metal extraction and recycling technology for new energy vehicles[J]. *Modern Transportation and Metallurgical Materials*, 4(1): 3–10 (in Chinese with English abstract).
- CGS. 2024. Assessment Report for Mineral Reserves in the World(2024)[R]. Beijing: Research Center for Strategy of Global Mineral Resources, China Geological Survey (in Chinese with English abstract).
- Selley D, Broughton D, Scott R, Hitzman M, Bull S, Large R, Mcgldrick P, Croaker M, Pollington N, Barra F. 2005. “A New Look at the Geology of the Zambian Copperbelt”, One Hundredth Anniversary Volume [M]. Littleton: Society of Economic Geologists, 965–1000.
- Siegel K, Vasyukova O V, Williams-Jones A E. 2018. Magmatic evolution and controls on rare metal-enrichment of the Strange Lake A-type peralkaline granitic pluton, Québec-Labrador[J]. *Lithos*, 308–309: 34–52.
- SMM. [2023–05–17]. Canada strengthens the industrial chain of 31 key minerals including copper, rare earths, and magnesium, and will provide support in multiple aspects of exploration and development in the future[EB/OL]. <https://news.smm.cn/news/102216986> (in Chinese).
- Song Jianjun, Wang Guoping. 2022. Thoughts on securing the supply chain for critical minerals under carbon peaking and carbon neutrality[J]. *Natural Resource Economics of China*, 35(8): 4–9 (in Chinese with English abstract).
- Standard & Poor's. 2024. Exploration Budget Trends. [EB/OL]. <https://www.capitaliq.spglobal.com/web/client?auth=inherit#industry/CommodityExploBudgetTrends>.
- Sun Yuhuan, Wu Xiqing, Yao Zhanhui. 2024. Research on foreign

- policies for key mineral resources of new energy vehicles[J]. *China Auto*, (1): 14–16 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jinrong, Hong Jun, He Zixin et al. . 2023. Mining Development Report of The Shanghai Cooperation Organization Member Countries (2023)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–51 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jinrong, Yang Zongxi, Zhou Ping, Shi Junfa. 2014. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1445–1453 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jinrong, Zhou Ping, Sha Jinghua. 2019. Research on Energy Resource Supply Risk and Governance Framework[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–419 (in Chinese with English abstract).
- Teitler Y, Cathelineau M, Ulrich M, Ambrosi J P, Munoz M, Sevin B. 2019. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni–Co laterites[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 196: 131–155.
- Tian Huifang. 2024. Global key mineral supply chain risks intensify[J]. *World Affairs*, (4): 17–19 (in Chinese with English abstract).
- U. S. DoE. 2010. Critical Materials Strategy[R]. Washington: United States Department of Energy.
- U. S. DoE. 2023. Critical Materials Assessment[R]. Washington: United States Department of Energy.
- UNCTAD. 2023. Technical note on critical minerals–Supply chains, trade flows and value addition[R]. Geneva: UN Trade and Development.
- USGS. 2017. Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply[R]. Virginia: United States Geological Survey.
- Vakulchuk R, Overland I. 2021. Central Asia is a missing link in analyses of critical materials for the global clean energy transition[J]. *One Earth*, 4(12): 1678–1692.
- Vysetti B. 2023. Deep-sea mineral deposits as a future source of critical metals, and environmental issues—a brief review[J]. *Minerals and Mineral Materials*, 2(2): 5.
- Wang Anjian, Yuan Xiaojing. 2022. Security of China's strategic and critical minerals under Background of Great Power Competition[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(11): 1550–1559 (in Chinese with English abstract).
- Wang Anjian. 2023. Strategies in global mineral resources: Guest editor's preface to “Studies on Strategic and Critical Mineral Resources” [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 44(2): 257–260 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Liang Jinglong, Li Hui, Yang Yu, Zheng Tianxin. 2019. Current status of recovery of valuable metal ions in lithium ion batteries[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 43(1): 165–167 (in Chinese with English abstract).
- Wang Danli, Guan Zhusun. 2017. Analysing the social category of ESG guideline[J]. *China WTO Tribune*, (3): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Li Jiankang, Wang Chenghui, Lou Debo, Yang Yueqing, Li Peng. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743–764 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189–1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang H H, Feng K S, Wang P, Yang Y Y, Sun L X, Yang F, Chen W Q, Zhang Y Y, Li J S. 2023. China's electric vehicle and climate ambitions jeopardized by surging critical material prices[J]. *Nature Communications*, 14(1): 1246.
- Wang Huan, Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Hu Jiaxiu, Wang Wei. 2021. The role, supply and demand of critical minerals in the clean energy transition under carbon neutrality targets and their recommendations[J]. *Geology in China*, 48(6): 1720–1733 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hui, Feng Chengyou, Zhang Mingyu. 2019. Characteristics and exploration and research progress of global cobalt deposits[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 739–750 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huiyan. 2019. How to achieve a win–win situation in ESG reporting[J]. *Directors & Boards*, (9): 40–43 (in Chinese with English abstract).
- Wang P, Yang Y Y, Heidrich O, Chen L Y, Chen L H, Fishman T, Chen W Q. 2024. Regional rare–earth element supply and demand balanced with circular economy strategies[J]. *Nature Geoscience*, 17(1): 94–102.
- Wen Hanjie, Zhou Zhengbing, Ma Wanping, Zhu Yu. 2024. Research progresses and main scientific issues of strategically critical minerals in black rock series[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43(1): 14–34 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 47(7): 745–765 (in Chinese with English abstract).
- Xing Kai, Zhu Qing, Zou Xiehua, Long Tao, Liu Jun'An, Wen Pengfei, Niu Maolin, Gu Benjie, Zhu Haibi, Mu Yiwei. 2023. Research on development of industry chain of lithium resources under the background of new energy[J]. *Geology in China*, 50(2): 395–409 (in Chinese with English abstract).
- Xu Li, Ke Wenxuan, Yuan Haojun. 2024. Leading the innovative development of green finance with ESG concepts[J]. *International Finance*, (3): 3–7 (in Chinese) .
- Yan Wenyi, Wang Zhaolong, Cao Hongbin, Zhang Yi, Sun Zhi. 2021. Criticality assessment of metal resources in China[J]. *Science*, 24(6): 102524.
- Yin Wenyan, Fan Shuwen, Liu Yizhuo. 2023. US critical minerals supply chains restructuring: Motivations, impacts, and policy recommendations[J]. *Asia-Pacific Economic Review*, (5): 81–89

- (in Chinese with English abstract).
- Yu Hongyuan, Guan Chenglong. 2022. Critical minerals strategy of the Biden administration[J]. *Contemporary International Relations*, 32(1): 1–22.
- Yu Liangliang, Huang Min. 2024. Current status and research progress of lithium extraction technology for lithium-bearing resources[J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*, 45(2): 5–9 (in Chinese with English abstract).
- Yu Rui, Zhang Weibo, Zhang Fuliang, Zhao Dongjie. 2023. Policy measures and revelations to strengthen critical mineral supply chain in developed countries[J]. *Mineral Exploration*, 14(10): 1788–1797 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yun, Yang Jianfeng, Ma Teng, Zhang Cuiguang. 2024. Global exploration review 2023 and outlook for lithium, cobalt, and nickel battery metals[J]. *Geology in China*, 51(1): 368–370 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shenghui, Wang Zhentao, Li Yongsheng, Mo Xuanxue, Dong Qingji, Chen Conglin, Geng Lin, Wang Li, Zhang Haiqi, Tan Xiumin, Xue Yingxi, Zhou Shangguo, Tian Yuming, Yao Chaomei, Jiao Sen, Chen Zhengguo, Chen Junyuan, Wang Shoucheng, Zhang Haoyu, Fu Shuixing, Wang Chunlian, Wang Yong. 2022. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 42(5): 138–168 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Suoxu, Zhou Jixin. 2022. Critical mineral security in the process of energy transformation[J]. *Natural Resource Economics of China*, 35(1): 22–28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Suoxu. 2023. Revelation of critical energy minerals strategies of the Europe Union and Australia[J]. *Petroleum and New Energy*, 35(3): 8–16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanfei, An Zhengzhen, Liang Shuai, Zhai Furong, Zhang Sen, Ju Nan, Jiang Ping, Jin Xiuying, Xiao Rongge. 2022. Distribution characteristics, genetic types and prospecting progress of graphite deposits[J]. *Geology in China*, 49(1): 135–150 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuning, Ding Ding, Wang Ke. 2023. Critical minerals strategies in the Occident amidst energy transformation and China's response[J]. *Journal of Environmental Economics*, 8(4): 209–228 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqi, Li Huajiao, An Haizhong, Wang Anjian. 2024. Progress and frontiers of critical mineral resource availability research based on the perspective of industrial chain[J]. *Resources Science*, 46(4): 671–686 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuxuan, Tang Jinrong, Niu Yazhuo, Zhang Jingya, Zhao Yu, Wei Jianshe, Jiang Guangzheng, Wang Liwei. 2022. Resource advantage and geological work suggestions under carbon neutralization in Northwest China[J]. *Geology in China*, 49(5): 1458–1480 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, Li Guangming, Qin Kezhang, Tang Dongmei. 2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(24): 2484–2500 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Li, Gu Hannian, Yang Yongqiong, Wen Hanjie, Wang Ning, Luo Chongguang. 2020. Research progress of lithium extraction from clay-type lithium ore resources[J]. *Light Metals*, (12): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qing, Zhu Haibi, Zou Xiehua. 2024. Analysis of global strategic mineral industry chain and supply chain[J/OL]. *Natural Resource Economics of China*, 37(7): 45–13(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包小莲. 2024. ESG 视角下有色矿业绿色融资效应分析——以紫金矿业为例[J]. *冶金经济与管理*, (3): 49–52.
- 陈健, 吴楠. 2011. 日本稀缺资源战略研究及对我国的启示 [C]//2011 中国可持续发展论坛 2011 年专刊 (二). 珠海: 中国人口·资源与环境, 214–218.
- 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 龙涛, 郑国栋, 王琨, 任鑫. 2024. 新质生产力与矿产资源新格局[J]. *中国矿业*, 33(5): 1–8.
- 陈婉. 2024. 2024 年 ESG 十大发展趋势[J]. *环境经济*, (2): 64–69.
- 成金华, 帅亮, 赵雨佳, 段浩然, 帅传敏. 2023. 关键矿产供应风险评估与预测——以铜资源为例[J]. *资源科学*, 45(9): 1778–1788.
- 程迁群, 梁元钊, 刘明勇, 雷阳艾, 谢行, 朱振东, 李书程, 豆松, 郑晓军. 2024. 云南南涧首次发现独立钴矿床[J]. *矿产勘查*, 15(5): 906–908.
- 付伟, 牛虎杰, 黄小荣, 杨梦力, 陈远荣. 2013. 红土型镍矿床成因的多样性: 基于全球尺度的对比研究[J]. *地质学报*, 87(6): 832–849.
- 干勇, 彭苏萍, 毛景文, 裴荣富, 李仲平, 屠海令, 孙传尧, 陈其慎, 谢曼, 郑文江. 2022. 我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 24(3): 1–9.
- 高永伟. 2024. 哈萨克斯坦不断加强稀有稀土金属矿调查开发 [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/qKhAYcldB5iTFdVzP19otg>.
- 郭晓茜, 李建武. 2017. 国外研究机构关键矿产评价方法综述[J]. *中国矿业*, 26(9): 25–32.
- 黄莉, 李芳琴, 代涛, 汪鹏. 2021. 锂金属回收潜力研究——基于现有回收技术与工艺[J]. *矿产保护与利用*, 41(5): 31–37.
- 黄云游. 2024. 拜登政府清洁能源供应链安全政策及其影响分析[J]. *国际石油经济*, 32(2): 36–49.
- 蒋少涌, 王微. 2022. 战略性关键金属是如何发生超常富集成矿的?[J]. *地球科学*, 47(10): 3869–3871.
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向[J]. *中国科学基金*, 33(2): 112–118.
- 李丹. 2022. 从《关键矿产资源在清洁能源转型中的作用》看我国关键矿产资源的发展[J]. *冶金经济与管理*, (3): 7–11.
- 李建武, 李天骄, 贾宏翔, 王安建. 2023. 中国战略性关键矿产目录厘定[J]. *地球学报*, 44(2): 261–270.
- 李文昌, 李建威, 谢桂青, 张向飞, 刘洪. 2022. 中国关键矿产现状、研究内容与资源战略分析[J]. *地学前缘*, 29(1): 1–13.
- 李文渊, 洪俊, 陈博, 刘江, 马中平, 杨博. 2019. 中亚及邻区战略性关

- 键矿产的分布规律与主要科学问题[J]. 中国科学基金, 33(2): 119–124.
- 李昕蕾, 刘倩如. 2023. 全球清洁能源转型中关键矿产的大国博弈及中国应对[J]. 当代世界社会主义问题, (4): 127–141.
- 刘雪, 王春连, 刘学龙, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 刘延亭. 2024. 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J]. 中国地质, 51(3): 811–832.
- 刘雪莲, 康喜顺. 2023. 日本关键矿产供应链保障措施评析与思考[J]. 现代日本经济, (5): 27–41.
- 卢洋. 2022. 中国光伏产业关键矿产资源供应风险评价与预警研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 毛景文, 宋世伟, 刘敏, 孟健寅. 2022. 稀土矿床: 基本特点与全球分布规律[J]. 地质学报, 96(11): 3675–3697.
- 毛景文, 宋世伟, 刘鹏, 刘敏, 赵盼撈, 袁顺达. 2023. 锡矿床研究现状及发展趋势[J]. 岩石学报, 39(5): 1233–1240.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 袁顺达. 2019. 关键矿产——国际动向与中国应对[J]. 矿床地质, 38(4): 689–698.
- 宋建军, 王国平. 2022. “双碳”背景下保障关键矿产供应链安全的思考[J]. 中国国土资源经济, 35(8): 4–9.
- 孙昱晗, 吴喜庆, 姚占辉. 2024. 新能源汽车关键矿产资源国外政策研究[J]. 中国汽车, (1): 14–16.
- 覃牧川, 梁彦杰, 李青竹, 柯勇, 彭聪, 朱志华, 白帮伟, 柴立元. 2024. 新能源汽车关键有色金属提取与回收技术发展分析[J]. 现代交通与冶金材料, 4(1): 3–10.
- 唐金荣, 洪俊, 何子鑫, 等. 2023. 上合组织国家矿业发展报告(2023)[M]. 北京: 地质出版社, 1–51.
- 唐金荣, 杨宗喜, 周平, 施俊法. 2014. 国外关键矿产战略研究进展及其启示[J]. 地质通报, 33(9): 1445–1453.
- 唐金荣, 周平, 沙景华. 2019. 能源资源供应风险与治理框架研究[M]. 北京: 地质出版社, 1–419.
- 田慧芳. 2024. 全球关键矿产供应链风险加剧[J]. 世界知识, (4): 17–19.
- 汪慧妍. 2019. 如何实现 ESG 报告双赢[J]. 董事会, (9): 40–43.
- 王安建, 袁小晶. 2022. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. 中国科学院院刊, 37(11): 1550–1559.
- 王安建. 2023. 全球矿产资源战略研究——“战略性关键矿产研究”专辑特邀主编寄语[J]. 地球学报, 44(2): 257–260.
- 王斌, 梁精龙, 李慧, 杨宇, 郑天新. 2019. 废旧锂离子电池金属离子回收技术综述[J]. 电源技术, 43(1): 165–167.
- 王丹励, 管竹笋. 2017. ESG 指引之社会范畴指标对标分析与信息披露[J]. WTO 经济导刊, (3): 21–25.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. 地质力学学报, 28(5): 743–764.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 93(6): 1189–1209.
- 王欢, 马冰, 贾凌霄, 于洋, 胡嘉修, 王为. 2021. 碳中和目标下关键矿产在清洁能源转型中的作用、供需分析及其建议[J]. 中国地质, 48(6): 1720–1733.
- 王辉, 丰成友, 张明玉. 2019. 全球钴矿资源特征及勘查研究进展[J]. 矿床地质, 38(4): 739–750.
- 温汉捷, 周正兵, 马万平, 朱玉. 2024. 黑色岩系型战略性关键矿产资源研究进展及主要科学问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 43(1): 14–34.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. 中国科学(地球科学), 47(7): 745–765.
- 徐利, 柯文轩, 袁浩峻. 2024. 以 ESG 理念引领绿色金融创新发展[J]. 国际金融, (3): 3–7.
- 尹文渊, 范舒雯, 刘艺卓. 2023. 美国关键矿产供应链重构: 动因、影响及对策[J]. 亚太经济, (5): 81–89.
- 有色资讯. [2023–05–17]. 加拿大强化铜、稀土、镁等 31 种关键矿产产业链, 未来将从勘查开发多个环节给予支持 [EB/OL]. <https://news.smm.cn/news/102216986>.
- 于瑞, 张伟波, 张福良, 赵东杰. 2023. 主要发达国家关键矿产供应链保障战略措施简述[J]. 矿产勘查, 14(10): 1788–1797.
- 余亮良, 黄敏. 2024. 含锂资源提锂技术现状及研究进展[J]. 有色冶金设计与研究, 45(2): 5–9.
- 余韵, 杨建锋, 马腾, 张翠光. 2024. 2023 年全球锂、钴、镍电池金属勘查形势与展望[J]. 中国地质, 51(1): 368–370.
- 张生辉, 王振涛, 李永胜, 莫宣学, 董庆吉, 陈丛林, 耿林, 王利, 张海敞, 谭秀民, 薛迎喜, 周尚国, 田郁溟, 姚超美, 焦森, 陈正国, 陈军元, 王寿成, 张浩钰, 付水兴, 王春连, 王永. 2022. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 42(5): 138–168.
- 张所续, 周季鑫. 2022. 能源转型进程中的关键矿产安全[J]. 中国国土资源经济, 35(1): 22–28.
- 张所续. 2023. 欧盟和澳大利亚关键能源矿产战略的启示[J]. 油气与新能源, 35(3): 8–16.
- 张艳飞, 安政臻, 梁帅, 翟富荣, 张森, 鞠楠, 姜平, 金秀英, 肖荣阁. 2022. 石墨矿床分布特征、成因类型及勘查进展[J]. 中国地质, 49(1): 135–150.
- 张宇宁, 丁珂, 王克. 2023. 能源转型背景下欧美关键矿产战略与中国应对策略[J]. 环境经济研究, 8(4): 209–228.
- 张宇祺, 李华姣, 安海忠, 王安建. 2024. 产业链视角下关键矿产资源可供性研究进展[J]. 资源科学, 46(4): 671–686.
- 张宇轩, 唐金荣, 牛亚卓, 张静雅, 赵禹, 魏建设, 姜光政, 王利伟. 2022. 中国西北在碳中和进程中的资源优势和地质工作建议[J]. 中国地质, 49(5): 1458–1480.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 唐冬梅. 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. 科学通报, 64(24): 2484–2500.
- 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心. 2024. 全球矿产资源储量评估报告(2024)[R]. 北京: 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心.
- 中国有色金属报. [2024–04–11]. 澳大利亚深耕关键矿产领域 [EB/OL]. <https://www.cnmn.com.cn/ShowNews1.aspx?id=450786>.
- 朱丽, 顾汉念, 杨永琼, 温汉捷, 王宁, 罗重光. 2020. 黏土型锂矿资源提锂工艺研究进展[J]. 轻金属, (12): 8–13.
- 朱清, 朱海碧, 邹谢华. 2024. 全球战略性矿产产业链供应链分析[J]. 中国国土资源经济, 37(7): 45–13.