

引用格式: 韩世通, 李华姣. 矿产资源供应风险研究进展和前沿[J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1723–1745. [Han S T, Li H J. Progress of research on supply risk of mineral resources and future directions[J]. Resources Science, 2023, 45(9): 1723–1745.] DOI: 10.18402/resci.2023.09.03

矿产资源供应风险研究进展和前沿

韩世通¹, 李华姣^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)经济管理学院, 北京 100083; 2. 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100083)

摘要: 受地缘政治等因素影响, 矿产资源供应脆弱性程度不断加剧。矿产资源作为重要的原材料, 供应风险扩散将导致经济系统遭受重大影响。评估矿产资源供应风险并预判供应风险的传播过程、路径和影响是重要的研究课题, 受到了国内外学者普遍关注。本文对矿产资源供应风险评估和供应风险传播的研究进展进行了总结归纳, 即“研究范围从国际/国家层面到企业/产品层面”“研究维度从单一环节到产业链、供应链”。供应风险的评估和传播是供应风险形成机制重要的组成部分。本文梳理出贸易风险、环境风险等不同类型供应风险形成机制, 并从供应、技术、环境和价格4个层面提出供应风险防范机制框架。在此基础上, 提出了矿产资源供应风险研究框架, 其由供应风险的量化、供应风险的测定、供应冲击的形成、供应冲击传播的动态模拟和政策建议的提出五部分组成, 并进一步讨论了亟待解决的问题。针对已有研究的进展提出矿产资源供应风险领域三方面的研究前沿与挑战: ①如何进一步提高矿产资源的可持续供应能力; ②如何提升矿产资源产业链韧性; ③如何衡量冲击对企业级供应链网络造成的宏观经济损失。

关键词: 矿产资源; 供应风险; 风险评估; 风险传播; 形成机制; 防范机制

DOI: 10.18402/resci.2023.09.03

1 引言

受公共卫生突发事件、地缘政治等多重因素影响, 矿产资源供应脆弱性程度不断加剧。在公共卫生突发事件方面, 以新冠疫情为例, 在爆发开始至结束期间, 新冠疫情导致276座矿山生产中断, 超过1600个采矿项目受到影响, 全球能源、金属、非金属矿产品产量同比分别下降5.1%、1.4%、0.5%^[1]。在地缘政治方面, 以俄乌冲突为例, 俄乌冲突进一步导致矿产资源供需失衡^[2]。2022年12月, 俄罗斯在欧洲天然气总供应量中的份额已从2019年的30%以上降至10%^[3], 这一减少导致欧洲天然气价格大幅上涨^[4], 并且进一步增加了国际矿产资源贸易市场的供应风险。

公共卫生突发事件、地缘政治等因素导致的矿产资源供应风险可以通过国家间的贸易联系、行业

间的投入产出联系、企业间的供应商-客户联系等渠道进行传播^[5], 使得经济系统遭受重大影响。在供应风险传播过程中, 直接受到影响的供应商因需求不足而减少产量, 客户也因材料短缺而缩减产量, 导致矿产资源及其中间产品的供需结构发生重大变化, 最终影响经济的恢复力和可持续性。因此, 识别、评估矿产资源供应风险并预判供应风险的传播过程、路径和影响是重要的研究课题, 受到了国内外学者普遍关注。有学者指出, 供应风险可以通过网络中的级联效应产生间接损失, 间接渠道放大了供应风险的传播效应^[6–8]。

为了应对供应风险传播造成的预期损失, 需了解不同类型供应风险的形成机制。基于国际/国家层面, 进口国利用对外贸易形式获取矿产资源和满足国家发展需求, 供应国贸易结构稳定成为贸易关

收稿日期: 2023-02-10, 修订日期: 2023-06-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71991481); 国家自然科学基金项目(72173119)。

作者简介: 韩世通, 男, 河北石家庄人, 硕士生, 研究方向为系统模拟与优化决策。E-mail: han13930177131@163.com

通讯作者: 李华姣, 女, 山东烟台人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境经济与复杂管理。E-mail: babyproud@126.com

系正常运转的关键。当供应风险发生时,传播源国家通过减少矿产资源的进口量或出口量形成供应冲击,进而通过贸易联系渠道传播到贸易伙伴国^[9]。矿产资源产业链具有不同的环节,环节内同一矿产资源的进出口贸易关系和环节间不同矿产资源的投入产出关系构成了一个相互依赖的贸易网络^[9]。在横向为国际贸易关系纵向为投入产出关系的产业链贸易网络中,供应风险可实现横向、纵向等多方向传播。基于产业/行业层面,劳动力供应减少和价格上涨影响矿产资源相关行业的正常生产运行^[10-14]。基于企业/产品层面,矿产资源市场的产品供需失衡引起价格上涨^[15],供应链的供需主体需具有一定的灵活性来应对价格上涨带来的负面影响。增加从宏观到微观层面的供应风险形成机制的了解,有助于控制供应风险带来的影响,从而降低经济损失。

随着不同类型供应风险的不断出现,矿产资源产业链供应链的安全稳定发展会受到影响^[9,15,16]。综合考虑供应风险识别、评估与供应风险传播的研究是保障矿产资源供应安全的必然选择。对于研究的目标和范围,学者已经基本形成了统一的认识,然而还有一些更深层次的问题亟待进一步探索。因此,本文在回顾矿产资源供应风险形成机制相关研究进展的基础上,提出了未来的研究方向,以期能为后续的矿产资源供应风险研究提供参考。

2 供应风险和供应冲击概念界定

矿产资源安全主要从矿产资源的供应稳定性和使用安全性,价格合理性,环境协调性三方面进行界定。其中,在供应稳定性和使用安全性方面,张雷^[17]认为矿产资源安全是指为了满足国家经济和社会发展目标,国家稳定地获取矿产资源的能力,并且实现矿产资源的开发利用与环境安全的统一,以保障矿产资源的可持续供应。在价格合理性方面,吴新春^[18]在供应稳定性和持续性的基础上,提出了矿产资源供应的经济性,即国家以合理的价格获得所需的矿产资源,进而确保矿产资源市场稳定运行。在环境协调性方面,罗辉等^[19]将生态环境安全纳入广义的矿产资源安全内涵,强调矿产资源开发与环境保护的协调发展,以保障矿产资源的代际安全。

基于矿产资源安全定义,矿产资源供应风险的概念主要包含四层含义:一是矿产资源在国家安全和社会经济发展中的重要性;二是供应短缺;三是

价格上涨;四是矿产资源的使用与生态环境保护的矛盾。与此同时,郝晓晴^[9]认为当前供应风险领域的研究不应局限于仅关注供应短缺风险,还需考虑国际贸易产业链上的供应过剩问题。因此,本文的供应风险概念包含供应过剩风险在内的五层含义。

在供应风险传播过程中,不同供应冲击强度下的预期损失存在异质性。供应冲击的发生是造成供应风险传播的原因,并且供应风险的影响程度随着供应冲击的增加而增加^[20]。供应冲击主要分为4类:供应短缺冲击、供应过剩冲击、劳动力供应冲击和价格冲击。供应短缺冲击是指供应短缺风险传播源国家出口量的减少程度;供应过剩冲击则是指供应过剩风险传播源国家进口量的减少程度^[9]。劳动力供应冲击是指行业劳动力数量的减少程度^[10]。价格冲击是指产量减少而引起的矿产资源价格上涨^[12]。

本文不仅关注影响矿产资源供应安全的潜在风险,而且关注不同类型供应风险在动态传播过程中产生的经济损失。基于供应风险和供应冲击定义,将供应风险形成机制的研究主题界定为供应风险评估和供应风险传播。研究范围分为国际/国家、产业/行业和企业/产品层面。其中,国际/国家层面涵盖国家间和矿产资源产业链不同环节间的供应短缺冲击和供应过剩冲击;产业/行业层面包含新冠疫情引起的劳动力供应冲击;企业/产品层面包含企业面临的价格冲击。

3 矿产资源供应风险形成机制研究进展分析

3.1 供应风险评估

3.1.1 国际/国家层面

目前的供应风险评估研究对象主要集中在战略性矿产和清洁能源矿产,涉及单一国家(经济体)的单一矿产资源、单一国家(经济体)的多种矿产资源、全球整体多种矿产资源和全球各国(经济体)的多种矿产资源。

供应风险评估的前提是确定矿产资源的经济重要性^[21]。战略性新兴产业的发展和低碳技术的大规模应用,为实现经济的高质量发展奠定了坚实基础,世界正从燃料密集型系统向材料密集型系统转变^[22,23]。因此对战略性矿产(或关键矿产)和清洁能源矿产的供应风险评估研究显得尤为重要。在对

2023年9月

单一国家(经济体)的单种矿产资源供应风险的评估研究中,朱春华^[24]从脆弱性和风险性两个维度,与8个不同的矿产资源安全指标相关联,提出中国铁矿石资源存在较高的供应风险,范松梅等^[25]的研究也得出相同的结论。在考虑供应风险影响因素和结合特定矿产资源特征性质的前提下,学者进一步建立了中国锂^[26]、镍^[27]、锡^[28]、铝^[29]、锆^[30]等资源的供应风险评价指标体系,为提升单一矿产资源安全预警能力提供了科学依据。在对单一国家(经济体)的多种矿产资源供应风险的评估研究中,Yu等^[31]将矿产可用性、经济相关性、技术水平和进口不稳定性作为中国战略性金属矿产供应风险的主要来源。Zhou等^[32]提出供应风险最高的生产阶段应成为供应风险评估研究的焦点,因此对开采阶段或精炼阶段的清洁能源矿产供应风险进行了评估。欧盟委员会在2020年发布的《欧盟关键原材料清单研究》报告中进一步指出:“矿产资源供应风险较高的生产阶段存在争议,因此欧盟委员会进行双阶段供应风险评估以确定关键矿产”^[33]。

在对全球整体多种矿产资源供应风险的评估研究中,黎江峰^[34]评估了全球战略性能源矿产资源2005—2015年的供应安全程度,其研究旨在增强能源矿产供应的稳定性和安全性。黄健柏等^[35]虽然与Zhou等^[32]研究的清洁能源技术相同,但是在此基础上扩大了研究范围,将研究扩展至全球清洁能源矿产的供应风险评估。在对全球各国(经济体)的多种矿产资源供应风险的评估研究中,Zhang等^[36]在Zhou等^[32]和黄健柏等^[35]的基础上,将风力发电、太阳能发电、电动汽车等清洁能源技术扩展至核能发电、水力发电、碳捕获和能量储存、发光二极管、液晶显示器。

目前的供应风险评估研究维度经历了从单一环节扩展至整个产业链的发展过程。以国家或地区为主体的矿产资源产业链包含矿产资源的开采、加工、使用、废弃、回收等环节^[37,38],侧重于产业内和产业间的联系。产业链视角下的供应风险可以分为上游开采风险、中游冶炼风险、下游应用风险和整体产业链风险。

上游开采风险和中游冶炼风险一般同时进行评估。例如,黄伟军等^[39]从地缘供应风险和供应限制的脆弱性两个维度对中国铜精矿和精炼铜的供

应风险进行了评估。Schnebele等^[40]基于供应中断风险量化指标,识别出中断风险在南美铜矿开采、冶炼和精炼环节中的差异性。单一指标可以量化矿产资源供应市场的特定风险,而供应风险评价指标体系可以全面测度矿产资源安全程度。在对下游应用风险的评估研究中,新能源汽车产业^[41,42]和以光伏产业^[43]为代表的新能源产业值得关注。在对整体产业链风险的评估研究中,Xun等^[44]对全球燃料电池汽车产业链上、中、下游商品的供应风险进行了评估。Li等^[45]基于全产业链角度,将铜产业链延伸至废弃环节,指出有少数国家在全产业链所有环节中分别呈现“高供应风险”和“高供应限制脆弱性”特征。

3.1.2 产业/行业层面

供应风险评估研究对象为国民经济第二产业和第三产业,矿产资源开采、初级加工、延伸行业构成了供应风险评估的主体。

矿产资源供应短缺和环境污染会制约能源低碳发展进程,进而阻碍能源系统的低碳转型。作为碳排放主要来源的电力行业^[46],其在应用低碳能源生产和利用技术时,将大幅增加对矿产资源的需求^[47],因此学者主要针对电力行业发展面临的矿产资源约束问题展开了一系列研究。例如,de Koning等^[48]结合全生命周期评价和投入产出分析方法,将满足未来金属需求所需的供应增长率和储量增长率分别与其历史增长率进行比较,综合评估了电力、汽车制造和建筑行业所需金属的供应风险。除增长率间的对比研究外,Li等^[49]和Wei等^[50]分析了电力行业发展过程中的矿产资源需求与产能或储量之间的不匹配性。然而,de Koning等^[48]和Wei等^[50]的研究虽基于供应风险的测定结果提出了解决措施,但并没有进一步探讨相应措施的有效性。

供应风险不仅体现在需求增长导致的供需失衡,矿产资源相关行业经济发展与环境保护之间的矛盾和运输中断也成为供应风险的表现形式。例如,Liu等^[51]从产业发展和环境压力两个维度评估了由煤炭开采业,石油和天然气开采业,金属矿开采业,非金属矿及其他采选业,石油加工炼焦和核燃料加工业,非金属矿物制品业,金属冶炼和压延加工业,金属制品业组成的中国资源型产业的可持续风险。Aydin等^[52]通过构建油气行业安全风险评估

框架,识别了引发油气行业中游阶段(存储和运输)火灾爆炸事故的因素,研究发现露天可燃气体或蒸汽是制约油气行业安全发展的最关键因素。

3.1.3 企业/产品层面

矿产资源供应链是指矿产从开采到成为最终产品所涉及的全部活动、组织、行为主体、技术、信息、资源、服务等所构成的体系^[53],侧重于企业间的分工协作关系^[37]。供应链相关主体主要包含供应商、制造商、分销商、批发商、零售商等企业。根据《经济合作与发展组织关于来自受冲突影响和高风险区域的矿石的负责任供应链尽职调查指南》对供应链风险的界定^[53],本文将供应链视角下的供应风险划分为上游风险、下游风险和整体供应链风险。其中,上游供应链是指从矿山企业到冶炼/精炼企业之间的企业,下游供应链是指从冶炼/精炼企业到零售商之间的企业。

上游供应风险评估研究主要在构建矿产资源供应链网络的基础上,利用网络分析指标与风险评估指标对上游供应链风险进行识别。例如,闻少博等^[54]和 van den Brink 等^[55]分别构建了全球铜资源、钴资源供应链风险评估框架,使用网络分析指标考察了企业在矿产资源供应链网络中的地位,研究表明高拓扑特征企业的供应中断更容易引发系统性风险。Li 等^[56]将微观层面的供应风险评估指标纳入全球铂资源供应链风险评估框架,运用HHI指数和ESG指数分别测算出企业层面的市场供应风险和整体供应风险。除市场供应风险和整体供应风险评估研究外,学者还分析了企业面临的采购风险。例如,Fattahi^[57]以生产锌锭和锌粉的伊朗公司为例,针对采购风险提出了强化不可靠供应商水平和期

权合同两种应对策略。Deberdt 等^[58]为了缓解手工钴矿和深海钴矿的采购风险,建议使用风险转移、风险修复、风险外包、风险情绪化、风险持久化5种方法将钴矿的下游购买者及上游供应商的责任采购风险管理概念化。

供应风险评估研究主要集中在上游风险,只有少数研究分析了下游和整体供应链风险。在对下游风险的评估研究中,Basiri 等^[59]以伊朗天然气分销公司为例,研究了天然气供应安全体系对天然气分销中断风险的缓解程度。Andr 等^[60]以永磁同步电机为例,采用生命周期评估、供应中断概率、关键性评估方法识别潜在的稀缺矿产,发现未来铜、钕、镝、铁、硅等电机生产所需的矿产资源会出现供应瓶颈。在对整体供应链风险的评估研究中,Sakib 等^[61]从石油供应链视角揭示了供应中断的影响因素。陈其慎等^[62]基于产运供应链角度,系统梳理了固体矿产与油气矿产的主要运输通道,并从自然风险和地缘风险两个维度构建了矿产资源供应通道运输风险评价体系。

综上所述,供应风险评估研究经历了从国际/国家层面到企业/产品层面的发展历程。本文根据 Jin 等^[63]提出的材料分类标准,对供应风险评估研究涉及的材料进行梳理。如表1所示,为了强调铂族金属和稀土元素的重要性,将铂族金属、稀土元素与金属材料区分开来。目前供应风险评估研究不仅涉及金属,还涉及一些非金属、能源和准金属。

如表2所示,本文从应用角度将供应风险评估研究涉及的材料分为3类。一是发展清洁能源技术以应对气候变化所需的材料。清洁能源技术主要包括风力涡轮机、太阳能收集器、水轮机、核反应

表1 供应风险评估研究涵盖的材料类别和详情

Table 1 Material categories and details covered by research on supply risk assessment

材料类别	材料详情
金属(金属矿产品)	铜 ^[31,32,35,36,39-41,43,45,48,50,54,60] 、锂 ^[26,31,32,35,36,41,42,48] 、钴 ^[31,32,35,36,41,42,50,55] 、镍 ^[41,50] 、铅 ^[36] 、铁 ^[24,25,31,35,36,41,48,60] 、镍 ^[27,31,32,36,41,48,50,60] 、铝 ^[29,31,35,36,41,48,60] 、铬 ^[31,32,36,41,43,48,50] 、钒 ^[36] 、锡 ^[28,31,32,36,41,50] 、锌 ^[35,36,41,48,50,60] 、镓 ^[35,36,41,43,50] 、镉 ^[32,35,36,50] 、金 ^[31,36,41,60] 、铂 ^[35,36,41] 、钢 ^[35,36,41,48,50] 、锰 ^[32,36,41,50] 、钼 ^[31,35,36,50,60] 、银 ^[32,36,41,50,60] 、钛 ^[32,35,36,41,50] 、锆 ^[30,31,32,36,41,50] 、铅 ^[36,48,50,60] 、钨 ^[31,36,50] 、铌 ^[36,50] 等
稀土元素	在没有细分稀土元素的情况下研究了整体稀土元素 ^[31,36,41,50] 在细分稀土元素的情况下研究了稀土元素:钕 ^[48,49,60] 、镨 ^[49] 、镱 ^[48,49,60] 、铈 ^[60] 等
铂族金属	在没有细分铂族金属的情况下研究了整体铂族金属 ^[41,43] 在细分铂族金属的情况下研究了铂族金属:铂 ^[35,44,56] 、钯 ^[35,36] 、铑 ^[60] 等
非金属(非金属矿产品)	硅 ^[50] 、硼 ^[36,60] 、硒 ^[32,35,36,41,50] 、石墨 ^[41] 等
能源(能源矿产品)	煤炭 ^[34] 、石油 ^[34,61] 、天然气 ^[34,61] 等
准金属(准金属矿产品)	锑 ^[31,36] 、硅 ^[41,50,60] 、碲 ^[50] 等

注:作者根据矿产资源供应风险评估文献整理所得。

2023年9月

表2 供应风险评估研究总结

Table 2 Summary of research on supply risk assessment

作者	时间范围	简单结论	应用情景1	应用情景2	应用情景3
朱春华 ^[24]	2000—2014年 2025、2035年	中国铁矿石资源存在较高的供应风险		✓	
范松梅等 ^[25]	2000—2015年	中国铁矿石资源存在较高的供应风险		✓	
Zhou等 ^[26]	2010—2018年	中国锂资源安全水平呈上升趋势,但波动较大		✓	
马玉芳等 ^[27]	2010—2016年	中国镍资源安全水平呈下降趋势	✓	✓	✓
范凤岩等 ^[28]	2000—2017年	中国锡资源供应安全等级由安全转变为危险		✓	
郑明贵等 ^[29]	2008—2017年 2008—2025年	中国铝资源供应风险等级由一般转变为危险,未来的供应风险仍然较高		✓	✓
王珏等 ^[30]	2003—2020年	中国锆资源平均进口成本呈现波动下降趋势		✓	
Yu等 ^[31]	2008—2017年 2018—2025年	铜、钨、金和锂的供应风险水平增加,并预测了矿产资源未来的供应风险水平		✓	
Zhou等 ^[32]	5~10年	锡、钴、铬和镍面临较高的供应风险	✓		
黎江峰 ^[34]	2005—2015年	煤炭供应风险总体呈上升趋势,石油和天然气供应风险总体呈下降趋势		✓	
黄健柏等 ^[35]	—	钢、镓、锗面临中高供应风险	✓		
Zhang等 ^[36]	—	中国的铝、锑、钨、锆、铜、铁、铅、锰、钼、锡、钨、钒、稀土等金属处于高风险水平	✓		
黄伟军等 ^[39]	2009—2019年	中国铜产品供应风险整体呈现上升趋势	✓	✓	✓
Schnebele等 ^[40]	2015年	量化了自然灾害对铜矿供应造成的风险水平			✓
王昶等 ^[41]	2017年	锡的供应风险最高	✓		
Yan等 ^[42]	2015—2030年	锂和钴存在潜在的供应短缺风险	✓		
卢洋 ^[43]	2008—2020年 2023—2025年	未来铬矿将处于高风险水平,铂族金属、镓矿、铜矿将处于中高风险水平	✓		
Xun等 ^[44]	2017—2019年	中国燃料电池汽车产业链中铂产品的供应风险最高	✓		
Li等 ^[45]	2019年	评估了不同国家在产业链各个环节的贸易风险	✓		✓
de Koning等 ^[48]	2000—2050年	11种金属的可用性不太可能成为行业向低碳经济过渡的瓶颈	✓		
Li等 ^[49]	2011—2050年	为了实现2050年发电目标,全球钹、镓、铟的生产规模分别需要扩大11~26倍、11~26倍、7~12倍	✓		
Wei等 ^[50]	2020—2060年	铬、铜、锰、银、碲、镓等矿产的产量和储量均不能满足未来的矿产需求	✓		
闻少博等 ^[54]	2019年	全球铜资源供应链在开采和精炼环节发生中断的可能性较低			✓
van den Brink等 ^[55]	2016年	具有较高的度中心性和中介中心性企业中断会引发系统性风险	✓		✓
Li等 ^[56]	2019年	全球领先的铂生产公司面临着相对较高的供应中断风险	✓		✓
Andr等 ^[60]	—	从长期来看,铜、钨和钨金属具有潜在稀缺的潜力	✓		
Sakib等 ^[61]	—	机械故障、油气开采技术和调度问题的技术因素对油气供应链中断的影响最大			✓

注:表格中文献列举的顺序:单一国家(经济体)的单种矿产、单一国家(经济体)的多种矿产、全球整体多种矿产、全球各国(经济体)的多种矿产、上中下游产业链、整体产业链、行业、上下游供应链和整体供应链。第一种应用情景代表清洁能源技术,第二种应用情景代表国家安全发展,第三种应用情景代表一般经济发展。

堆、镍氢电池、锂离子电池、新能源汽车等。随着中国《“十四五”可再生能源发展规划》的提出,清洁能源矿产的可持续供应能力值得进一步关注。二是保障国家安全发展所需的材料。目前围绕国家安全发展进行的供应风险评估研究主要集中在煤炭、石油、天然气等能源矿产品和铁、锂、镍、锡等金属矿产品,对非金属矿产品的关注相对较少。三是支撑一般经济发展所需的材料,即在现代工业中广泛应用的材料。与前两种应用情景相比,铜矿产品在一般经济发展过程中扮演着重要角色。与此同时,

镍、铜矿产品需要政策制定者特别关注,因为其不仅是一般工业活动中广泛使用的材料,而且对清洁能源技术发展(例如新能源汽车)和国家安全发展(矿产资源本身的战略性)具有重要意义。

根据表2列出的供应风险评估文献,可以看出当前供应风险评估研究正在逐步建立起完善的供应风险动态评估机制,不再局限于测定某个特定时间点的供应风险。设计科学有效的风险评价指标体系是完善供应风险动态评估机制的关系环节。根据研究方法的不同,本文将供应风险评估研究分

为定性分析和定量分析。定性分析是指在建立指标体系的基础上,研究指标随时间变化的趋势^[64],定量分析是指利用全生命周期评价^[48]、投入产出分析^[48]、物质流分析^[49,50]、系统动力学^[65]等方法测定矿

产资源的潜在稀缺性。

本文通过梳理供应风险的影响因素识别矿产资源供应的主要风险。如图1所示,资源可用性、经济相关性、技术水平、地缘政治、社会发展水平和监

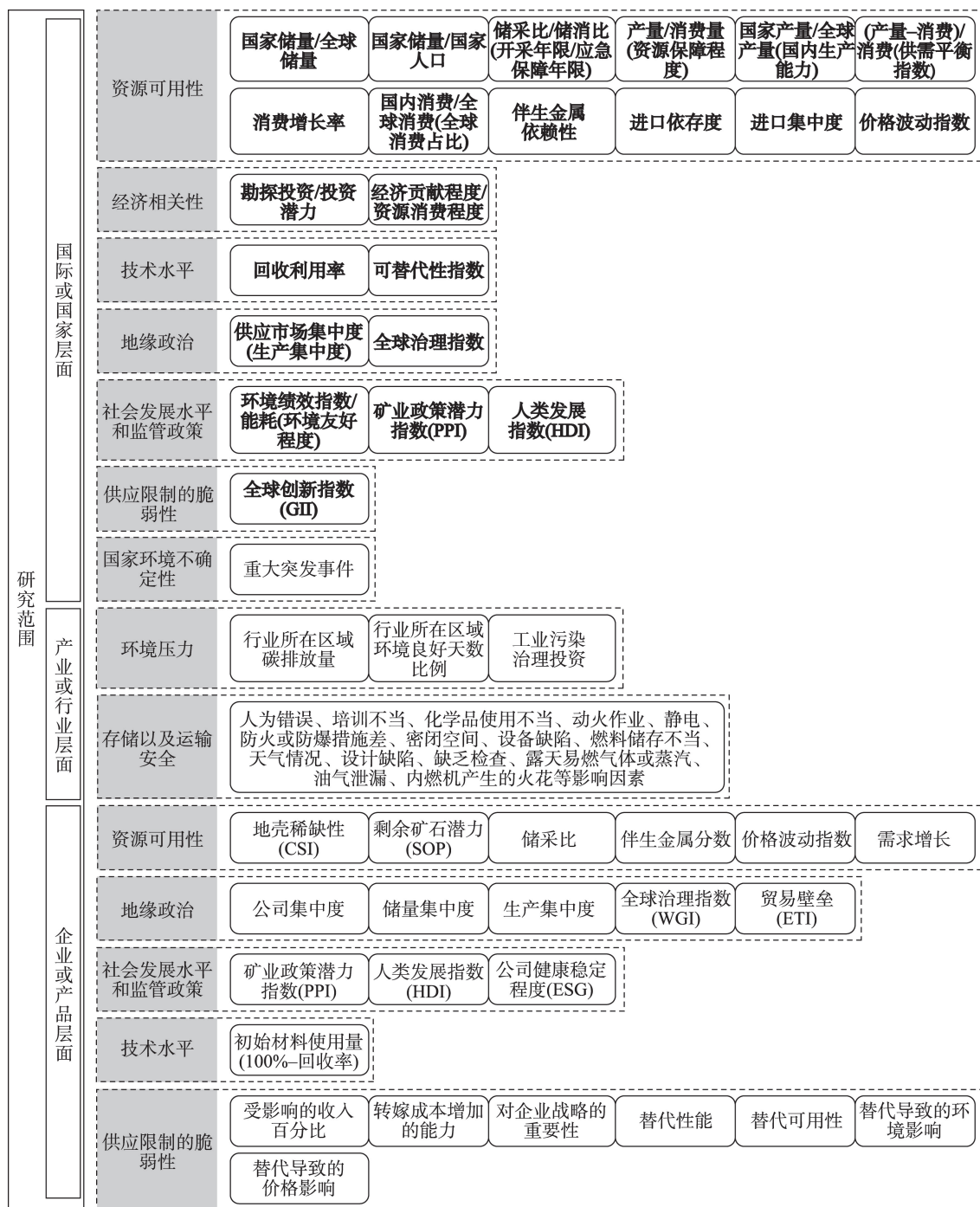


图1 供应风险评估指标

Figure 1 Supply risk assessment indicators

注:作者根据国际/国家层面、产业/行业层面、企业/产品层面的供应风险评估文献整理所得。在国际/国家层面,本表只列出在所选取研究中出现频数在2次及以上的指标,粗黑字体代表当前中国矿产资源供应的主要风险。

2023年9月

管政策、供应限制的脆弱性等成为中国矿产资源供应风险的驱动因素。虽然供应风险和供应限制的脆弱性是矿产资源关键性评估的重要组成部分^[66],但国际/国家层面的供应风险评估研究运用供应风险评估指标和供应限制的脆弱性指标分别衡量了矿产资源的供应风险和国家应对供应风险的能力^[39,45]。供应风险评估结果因影响因素而异,例如,锂因其较长的耗竭时间被归为具有低供应风险的矿产资源,而又因其较高的进口依存度被视为具有高供应风险的矿产资源。因此,建立统一的评估标准成为矿产资源供应风险评估研究亟待解决的问题。在产业/行业层面,矿产资源开发面临产业发展和生态文明建设的“两难选择”。在企业/产品层面,资源可用性、地缘政治、社会发展水平和监管政策、技术水平、供应限制的脆弱性等成为影响微观层面矿产资源供应安全的重要因素。为了全面评估与资源开采和使用相关的影响因素,亟需扩大中观和微观层面的现有评估框架。

3.2 供应风险传播

3.2.1 国际/国家层面

目前供应风险传播研究旨在模拟供应风险在单一贸易环节内的横向传播过程和不同贸易环节间的纵向传播过程,主要以雪崩规模和传播路径作为模拟结果的定量描述。单一贸易环节内的供应风险传播分为上游、中游和下游环节的贸易风险传播,不同贸易环节间的供应风险传播分为自上而下和自下而上的贸易风险传播。

上游贸易风险传播研究大多集中分析国际贸易单层网络贸易出口风险传播机制,很少同时考虑贸易进出口风险。例如,王星星^[67]揭示了供应风险对石墨贸易网络造成的系统性影响。Xia^[68]利用生成树贸易网络对锡资源供应风险的直接和间接传播路径进行了可视化分析。在可视化的基础上,王星星等^[7]和 Wang 等^[8]进一步揭示了矿产资源供应风险传播的网络性质,指出间接链路使得与初始风险源国家没有直接贸易联系的国家发生感染。除上游贸易风险传播研究外,沈曦^[69]针对锂的氧化物和氢氧化物、碳酸锂等基础锂产品,构建贸易网络风险传播模型,量化风险源国家出口减损对其他国家产生的进口损失。在许多情况下,生产一种商品需要两种以上的原材料。例如,碳酸锂、氧化钴、硫酸

镍、硫酸锰等原材料被用于生产锂离子电池正极材料。Tian 等^[70]分别构建了碳酸锂、氧化钴、硫酸镍、硫酸锰等 4 种矿产品国际贸易网络,并分析了不同贸易危机情景下主导国家的影响规模。沈曦^[69]和 Tian 等^[70]的研究丰富了对中游产品贸易进出口风险影响程度的理解。下游贸易风险传播研究揭示了国际锂离子电池贸易网络中贸易国家失效和贸易关系中断引起的系统性风险^[71]和国际光伏电池贸易网络中供应短缺风险和供应过剩风险的传播机制^[72]。

为了扩展研究的系统边界,一些学者基于产业链视角分析了供应风险的级联扩散过程。多层关联网络风险传播研究揭示了供应风险在国际贸易多层网络中自上而下和自下而上的传播机制。例如,郝晓晴^[9]基于双层网络供应风险传播模型,识别了上游供应短缺风险对下游产品国际贸易的影响机理和下游供应过剩风险对上游产品国际贸易的影响机理。Wang 等^[73]进一步将供应风险传播模型由两层扩展至三层,揭示了自上而下的供应风险传播路径。Zhou 等^[74]提出了一种新的基于计量经济学的全球产业链贸易风险传播模型,以弥补级联失效模型的不足。

总结以上内容得出,贸易风险可以通过国际贸易单层网络和多层网络两种渠道进行传播。国际贸易单层网络供应风险传播机制得到了广泛研究,而多层网络供应风险传播研究相对薄弱。单层网络中主体的连接类型较为单一,实际中的复杂系统是由不同部分组成的互动整体,将不同的系统映射为一个网络可能会造成子系统间的联系信息丢失^[75]。增强对矿产资源产业链多层网络结构的了解有利于探索层间关联网络面对风险时的鲁棒性。在风险传播过程中,全球矿产资源及其产品贸易网络呈现出“鲁棒但又脆弱”的特征,即网络对随机冲击具有较强的抵抗力,但是当关键的风险源受到冲击时,将会引发广泛的传播范围。如何提高矿产资源国际贸易网络在贸易冲击下的稳定性,亟待进一步研究。与此同时,当前研究通过部分或全部减少国家或经济体相关的贸易量使伙伴国受到感染,并没有考虑其他剩余国家或经济体面对冲击的响应能力,即研究框架假设在降低国家间的贸易流量或删除国家间的贸易联系时,剩下的网络结构不会改

变^[76]。如何在模拟贸易冲击时考虑网络的动态演化,亟待进一步研究。

3.2.2 产业/行业层面

目前供应风险传播研究分为主观定性分析和客观定量分析,主要集中于探讨供应冲击对行业的直接影响效应,即一阶供应冲击的影响程度,较少考虑行业生产网络对供应冲击的反馈效应。

主观定性分析用于描述供应冲击引发的潜在损失。例如,Ashraf等^[77]指出受全球供应过剩、新冠疫情流行、气候变化等因素影响,油气行业一直难以实现与前几十年相当的投资者回报。Cristine Giese^[78]定性描述了新冠疫情对包含手工和小规模采矿业在内的全球采矿生产的影响,认为新冠疫情导致全球采矿业生产受阻。

客观定量分析主要用于描述劳动力供应冲击、价格冲击、经济政策不确定性冲击对行业的影响效应。

识别出受劳动力供应冲击直接影响和间接影响较大的行业,可以为有针对性地制定不同行业的发展政策提供决策依据。del Rio-Chanona等^[10]使用行业层面各职业的远程劳动力指数来衡量供应冲击的特征,并以美国国会预算办公室的专家估计值作为衡量需求冲击的指标,发现美国采矿业更容易受到由新冠疫情引起的劳动力供应冲击的制约。Brinca等^[79]使用单一数据来源来衡量新冠疫情爆发前后行业层面的劳动力需求冲击和供应冲击,发现工时增长率的2/3下降归因于劳动力供应冲击。劳动力供应冲击的发生导致产量急剧下降,行业因缺少关键投入而进一步减产,即受到劳动力供应冲击直接影响的行业往往会受到生产网络产生的间接影响。因此,Pichler等^[11]在del Rio-Chanona等^[10]的基础上,进一步考虑了生产网络对劳动力供应冲击的反馈效应,研究表明,只考虑一阶劳动力供应冲击会低估新冠疫情流行带来的经济影响。

矿产资源价格波动成为制约矿产资源开采、初级加工、延伸行业可持续发展的关键因素。例如,Yang等^[14]采用向量误差校正模型研究油价波动对石油行业碳排放的影响,该研究发现油价冲击促进了石油行业碳排放的增加。Yang等^[14]的实证研究只考虑油价冲击而没有区分油价冲击的不同来

源。Kilian^[80]将石油实际价格分解为石油供应冲击、石油总需求冲击和石油特定需求冲击,并指出3种结构性冲击对石油实际价格的相对贡献存在重要差异。Kilian^[80]的研究拓展了研究石油价格驱动因素影响效应的新视角。钟美瑞等^[12]依据并拓展Kilian^[80]的研究框架,将战略性金属矿产价格冲击分解为供应冲击、经济需求冲击、战略性金属特定需求冲击和金融投机冲击,考察了4种基本冲击对战略性金属矿采选、冶炼及压延加工行业产出的异质性影响。Claudio-Quiroga等^[13]使用分数积分模型分析了7种金属的价格波动对中国新能源汽车制造业的潜在影响,发现价格时间序列断裂大多与新冠疫情有关。

经济政策不确定性是指政府在决定何时、以何种方向、以何种强度调整经济政策的过程中产生的不确定性,以及实施政策效果的不确定性^[81]。经济政策颁布后,市场参与者的决策会受到经济政策不确定性的影响。例如,Zhu等^[82]使用工业增加值、生产者价格指数、平均全员人数等指标来衡量中国有色金属行业安全水平,分析了经济政策不确定性对中国有色金属采选、冶炼及加工行业的时变影响。Liu等^[83]进一步提出了油价冲击通过经济政策不确定性渠道对行业层面股票市场回报的影响机制,发现石油供应冲击对能源、金融行业的股票回报影响远高于其他行业。

3.2.3 企业/产品层面

目前供应风险传播研究旨在分析供应冲击对企业、企业间供应链和产品间供应链经济指标的影响,主要分为上游、下游和整体供应链的供应风险传播研究。

上游供应风险传播研究大多集中分析石油价格冲击对企业经济绩效的影响。例如,Chen等^[84]依据Kilian^[80]的研究框架,分析了石油供应冲击对能源和非能源企业投资的影响效应,研究表明供应冲击对能源企业投资的促进效应更强。ElFayoumi^[85]考虑了石油市场投机因素对实际工业石油消费的影响,发现油价上涨1%会导致制造企业利润下降1.3%。为了衡量生产网络在风险传播过程中的重要性,Caraiani^[86]探讨了石油供应新闻冲击与企业投资比率之间的关系,发现冲击会通过生产网络被放

2023年9月

大,进而对企业经营产生巨大的间接影响。下游供应风险传播研究相对薄弱。例如,Chhimwal等^[87]将供应风险纳入经济风险,采用贝叶斯网络方法对风险在汽车企业循环供应链网络中的传播机制进行了分析,评估了汽车制造商、零售商、回收商面临的中断风险对供应链绩效的影响,该研究有助于了解风险在供应链网络中的逆向传播过程。

整体供应链供应风险传播研究的关注焦点集中于评价与测度产品供应链弹性,旨在分析矿产资源供应链面对供应中断时的应对能力。Sprecher等^[88]和Mancheri等^[89]分别提出了稀土和钽供应链弹性评估框架。在弹性框架的基础上,已有研究使用商品动力学模型分别构建了锂供应链弹性评估模型^[15,90]和钴供应链弹性评估模型^[91],模拟了供应风险对供应链弹性的影响程度,发现供应风险导致矿产资源价格大幅波动。除基于商品动力学模型的弹性评价与测度研究外,学者还分析了公司层面供应链相关主体在不同中断水平下的经济效益变化^[92]。

由于缺乏对企业间网络复杂性的考虑,企业/产品层面的供应风险传播研究对供应风险在企业层面供应链网络中的传播机制尚不清晰。现有关于企业层面的风险传播研究主要侧重分析外部冲击的传播规模和传播时间。例如,Inoue等^[93]将日本大地震视为外生经济冲击的来源,由于假设企业不具有恢复机制,估计的负面影响可能会高于日本大地震造成的实际损失。Inoue等^[94]在Inoue等^[93]的基础上通过增添企业恢复机制和改进配给机制对模型进行修正。探索供应风险在企业层面矿产资源供应链网络中的传播规律能够理解微观层面的传播效应。

综上所述,供应风险传播研究经历了从国际/国家层面到企业/产品层面的发展历程。本文根据Jin等^[63]提出的材料分类标准,对供应风险传播研究涉及的材料进行梳理。如表3所示,供应风险传播研

表3 供应风险传播研究涵盖的材料类别和详情

Table 3 Material categories and details covered by research on supply risk propagation

材料类别	材料详情
金属(金属矿产品)	镍 ^[7,13,69,70,73,74] 、锰 ^[70] 、锡 ^[13,68] 、铁 ^[9] 、钴 ^[6,13,70,91] 、锂 ^[13,15,69,70,90,98] 、铝 ^[8] 、铜 ^[13,92] 、铅 ^[13] 、锌 ^[13] 等
非金属(非金属矿产品)	石墨 ^[67,95] 等
能源(能源矿产品)	石油 ^[12,14,83-86,97,99] 、天然气 ^[96] 等

究包含的材料类别涉及金属、非金属和能源。虽然供应风险评估研究和供应风险传播研究均集中于金属材料,但是供应风险评估研究涉及的金属种类更为广泛。

如表4所示,与价格冲击相比,宏观层面贸易冲击的传播动力学问题得到了广泛而深入的研究,可能的原因在于:由于进出口数据的完整性,贸易网络成为供应风险传播的常见渠道,并且贸易关系代表了国家之间最直接、最重要的经济相互依存关系。微观层面的风险传播研究主要关注价格冲击,可能的原因在于:企业的财务绩效与价格冲击息息相关。但是受企业链接数据可获得性的限制,企业生产网络的构建变得困难,这导致生产网络视角下的价格冲击传播研究相对较少。

学者们大多使用级联失效模型、自举渗流模型、传染病模型研究矿产资源贸易冲击传播机制。对于级联失效模型,国家的失效会影响贸易流量平衡,导致网络或局部环境中的负载重新分配,若累积减少量超出相邻国家初始负载的某一比例,相邻国家将失效^[6]。Sun等^[6]和Wang等^[95]运用级联失效模型分析了国家失效引起的风险传播过程。自举渗流模型由于可以研究连通图或网络上的级联故障过程^[100-103],因此在国际贸易网络中有所应用^[104]。模型中的国家存在活动和非活动两种状态,非活动状态向活动状态的转变取决于国家的抵抗风险阈值。Chen等^[96]基于改进的自举渗流模型构建了天

表4 供应风险传播研究维度

Table 4 Dimensions of research on supply risk propagation

研究维度	材料
贸易出口冲击	钴矿 ^[6,91] 、镍矿 ^[7,69,70,73,74] 、铝矿 ^[8] 、铁矿 ^[9] 、锡矿 ^[68] 、锰矿 ^[70] 、石墨 ^[67,95] 、天然气 ^[96] 、石油 ^[97] 、锂的氢氧化物 ^[69] 、碳酸锂 ^[69,70,98] 、硫酸锰 ^[70] 、氧化钴 ^[70] 、硫酸镍 ^[70] 、镍硫 ^[73] 、镍铁 ^[74] 、生铁 ^[9] 、粗钢 ^[9] 、钢材 ^[74] 、锂离子电池 ^[71] 、光伏电池 ^[72] 等
贸易进口冲击	镍矿 ^[70] 、锰矿 ^[70] 、硫酸锰 ^[70] 、氧化钴 ^[70] 、碳酸锂 ^[70] 、硫酸镍 ^[70] 、镍铁 ^[74] 、生铁 ^[9] 、粗钢 ^[9] 、钢材 ^[9] 、光伏电池 ^[72] 等
价格冲击	石油 ^[12,14,83-86,99] 、精炼铜 ^[13] 、精炼铝 ^[13] 、精炼镍 ^[13] 、锌合金 ^[13] 、锡锭 ^[13] 、电池级金属锂 ^[13] 等

然气贸易中断传播模型。Chen等^[97]在Chen等^[96]的基础上,将国家传播风险的异质性纳入自举渗流模型构建框架,分析了出口国的传播规模、中转国的传播路径和进口国的供应脆弱性。传染病模型通常用于疾病和信息领域^[105,106],国家间供应风险的扩散主要取决于感染概率^[72]。Hao等^[98]研究了供应短缺情景下的碳酸锂-锂电池双层网络供应风险传播机制。郝晓晴^[9]在供应短缺风险和供应过剩风险情境下揭示了风险在铁矿石-生铁双层贸易网络中自上而下和自下而上的传播路径。

3.3 供应风险形成机制

3.3.1 国际/国家层面

供应风险的诱因、供应风险的形成、供应冲击的发生和风险传播的影响程度是供应风险形成机制的4个基本组成部分,前两者反映了供应风险评估环节,后两者成为供应风险传播环节的组成部分。供应冲击在两个环节中扮演“桥梁角色”,成为引发级联传播过程的主要原因。图2显示了国际/国家层面的供应风险形成机制。在国际/国家层面,供应风险主要来源于贸易风险。作为贸易风险的

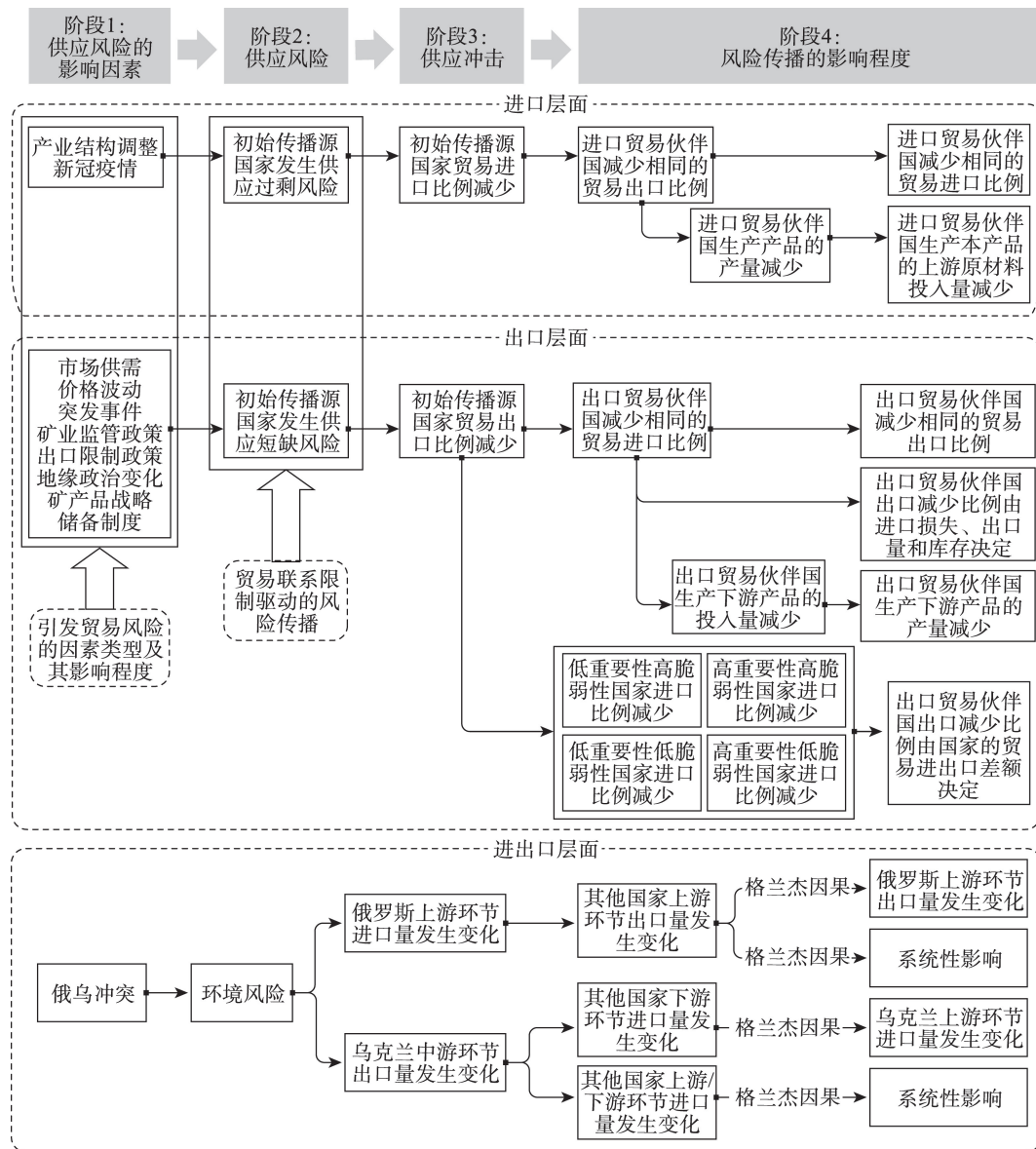


图2 国际/国家层面的供应风险形成机制

Figure 2 Formation mechanism of supply risk at international/national levels

注：出口层面中的虚线框代表目前少有涉及的研究问题。

2023年9月

主要表现形式,供应过剩风险和供应短缺风险会分别沿国际贸易产业链正向传播和逆向传播,进而影响产业链的各个环节,即初始风险传播源国家进出口贸易量的变化将引发系统性风险。

针对单一矿产资源及其材料产品的供应过剩风险,受产业结构调整、新冠疫情等因素^[9,72]影响,国家面临供应过剩风险。为了应对供应过剩风险,供应风险初始传播源国家减少贸易进口比例,贸易进口减少比例成为衡量供应过剩冲击的重要指标。当贸易进口减少量超过了相邻出口国的抵抗风险阈值时,相邻出口国成为新的风险传播源,并减少相同比例的贸易进口量^[9]。针对产业链的供应过剩风险,受产业结构调整、新冠疫情等因素^[9,72]影响,国家面临供应过剩风险。为了应对供应过剩风险,供应风险初始传播源国家减少贸易进口比例,贸易进口比例的减少使得相邻出口国生产产品的产量减少,导致相邻出口国生产本产品的上游原材料投入量减少,此时相邻出口国面临上游原材料供应过剩风险^[9]。

针对单一矿产资源及其材料产品的供应短缺风险,受市场供需、价格波动、出口限制政策、突发事件、矿业监管政策、地缘政治变化、矿产品战略储备制度等因素^[7,9,67,68,72]影响,国家面临供应短缺风险。为了应对供应短缺风险,供应风险初始传播源国家减少贸易出口比例,贸易出口减少比例成为衡量供应短缺冲击的重要指标。当贸易出口减少量超过了相邻进口国的抵抗风险阈值时,相邻进口国成为新的风险传播源,并减少相同比例的贸易出口量^[7,9,95]。针对产业链的供应短缺风险,受市场供需、价格波动、出口限制政策、突发事件、矿业监管政策、地缘政治变化、矿产品战略储备制度等因素^[7,9,67,68,72]影响,国家面临供应短缺风险。为了应对供应短缺风险,供应风险初始传播源国家减少贸易出口比例,贸易出口比例的减少使得相邻进口国生产下游产品的投入量减少,导致相邻进口国生产下游产品的产量减少,此时相邻进口国面临下游产品供应短缺风险^[9]。

传统的供应风险研究一般将风险传播源形成的供应短缺冲击等比例的传播到相邻进口国,即风险传播源国家的贸易出口减少比例与相邻进口国的贸易进出口减少比例相同,并没有将相邻进口国

应对风险和传播风险的异质性考虑在内。鉴于此,王星星^[67]通过考虑国家的重要性和脆弱性,分析了国家应对供应风险的异质性。当风险传播源国家发生供应短缺冲击时,相邻进口国的进口量减少比例随着国家角色中加入重要性、脆弱性等因素的考虑而发生变化。对于传播风险的异质性,相邻进口国的出口减少比例随着国家角色中加入进出口^[67]、库存^[97]等因素的考虑而发生变化。在实际贸易网络中,由供应风险引发的国家功能完全失效或部分传播路径消失的情况较为罕见。鉴于此,Zhou等^[74]通过考虑国家进出口贸易时间序列间的格兰杰因果关系,以确保贸易网络结构和功能的完整性。图2包含了俄乌冲突对全球镍产品贸易的影响机制,但是格兰杰因果关系视角下的供应风险形成机制应取决于具体的矿产资源及其贸易网络。

供应风险在矿产资源及其材料产品贸易网络中产生的影响因传播模式而异^[8],具体而言:一是拥有众多贸易合作伙伴的初始风险传播源国家发生供应冲击时,主要影响矿产资源贸易网络中贸易结构脆弱的关键国家,从而进一步扩大供应风险传播的影响范围。二是拥有众多贸易合作伙伴的初始风险传播源国家发生供应冲击时,无法影响高贸易量国家,矿产资源贸易网络中各个国家间的贸易联系很快趋于稳定。三是拥有较少贸易合作伙伴的初始风险传播源国家发生供应冲击时,直接影响有限,随着迭代次数的增加,受到感染的关键国家增强了供应风险传播效应。不同的传播模式意味着供应风险传播呈现出高度复杂的网络性质,初始风险传播源国家会通过间接渠道感染与其没有直接贸易联系的国家,背后原理是存在一个直接链接和两个间接链接的三元关系^[107]。

虽然矿产资源供应安全因价格波动、地缘政治、自然灾害、国际供应安全事件和下游技术发展等因素而面临风险^[9,40,88,90,108],但是在模拟贸易风险传播情景时,供应风险形成机制研究忽略了引发供应风险的因素类型和不同因素的影响程度^[9,90]。Shao等^[90]指出地缘政治导致的供应中断通常会持续数年,自然灾害对供应的影响是短期和不确定的。如果仅假设存在影响贸易供需格局变化的风险,并且所有风险对贸易网络产生的损失具有一致性,研究无法有效针对具体因素引起的风险提出缓解政策

和措施。与此同时,贸易风险形成机制研究主要集中于国家供应减少/中断驱动的供应短缺冲击,对国家间的贸易联系减少/中断驱动的供应冲击关注较少,贸易联系视角下的供应风险传播机制亟待界定。

3.3.2 产业/行业层面

图3显示了产业/行业层面的供应风险形成机制。与国际/国家层面不同的是,并不是所有的产业/行业层面的研究都会区分供应风险的影响因素。因此,本文对产业/行业层面供应风险形成机制

的描述更加侧重于供应风险传播部分,主要针对劳动力供应冲击、价格冲击和政策不确定性冲击及其影响程度展开分析。

作为环境风险的影响因素,新冠疫情导致行业劳动力供应减少^[10,79],从而对矿产资源相关行业产生直接影响。由新冠疫情导致的劳动力供应冲击会向下游行业传播,行业受到由生产网络引起的间接影响^[11]。油价冲击会对矿产资源开采、初级加工、延伸行业的经济发展产生负面影响。针对矿产资源开采行业,油价上涨会促使石油行业增加生产和

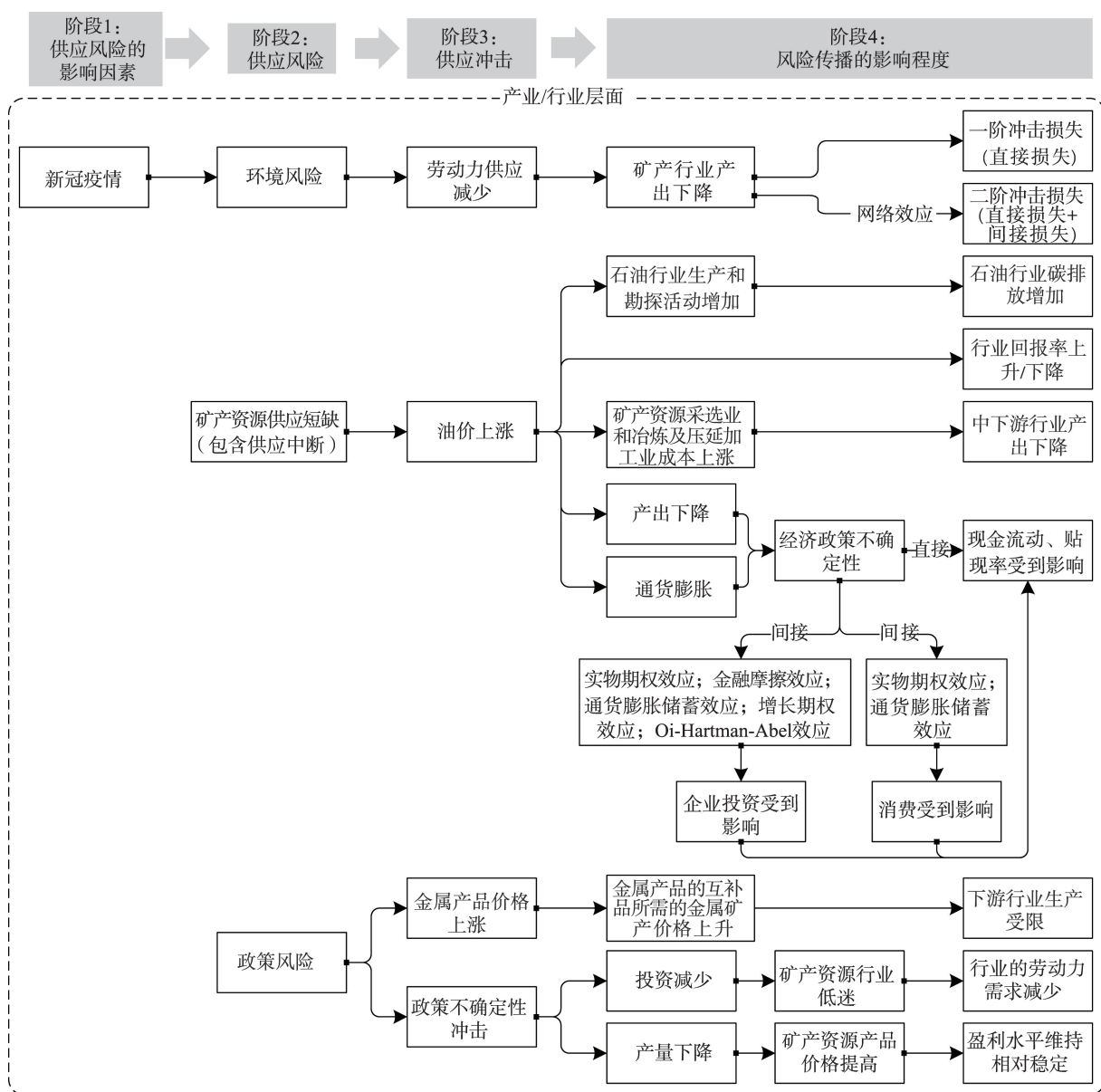


图3 产业/行业层面的供应风险形成机制

Figure 3 Formation mechanism of supply risk at sector/industry levels

2023年9月

勘探活动,从而导致碳排放增加^[14]。针对矿产资源冶炼及加工行业,随着矿产资源价格上涨,矿产资源冶炼及压延加工业的生产成本上升,使得行业的利润降低,进而造成行业产出减少^[12]。油价上涨并不会对所有行业产生负面影响,反而会提高石油、钢铁、化学、机械等行业的回报率^[99]。

经济政策可用于缓解油价上涨带来的经济波动^[109],然而政府在短期内推出紧急政策时,由于缺乏对油价影响的准确判断,造成经济政策的不确定性,从而影响矿产资源行业的产出增长和就业水平^[82]。与此同时,经济政策不确定性成为油价冲击向股票市场传导的重要渠道。油价上涨导致通货膨胀加剧和产量降低^[110,111],稳定通胀和提高产量之间的决策权衡会进一步造成经济政策不确定性。经济政策不确定性在直接影响股票市场的同

时,可以通过消费和企业投资的渠道对股价产生间接影响^[83]。

3.3.3 企业/产品层面

图4显示了企业/产品层面的供应风险形成机制。在企业/产品层面,环境风险主要存在于产品层面,供应短缺风险主要存在于企业层面。

在产品层面,环境风险主要通过影响国内生产^[90]和进口贸易^[15,90,91]两种渠道对矿产资源产品的生产产生影响。对于国内生产,自然灾害和地缘政治变化均会造成国内原材料生产中断,从而扰乱矿产资源市场供需平衡^[90]。对于进口贸易,新冠疫情通过影响矿产资源的供应稳定性和渠道畅通性使锂资源的进口成本上升,从而导致价格上涨^[15]。地缘政治变化引起矿产资源贸易进口量下降,进而打破矿产资源的价格均衡^[91]。

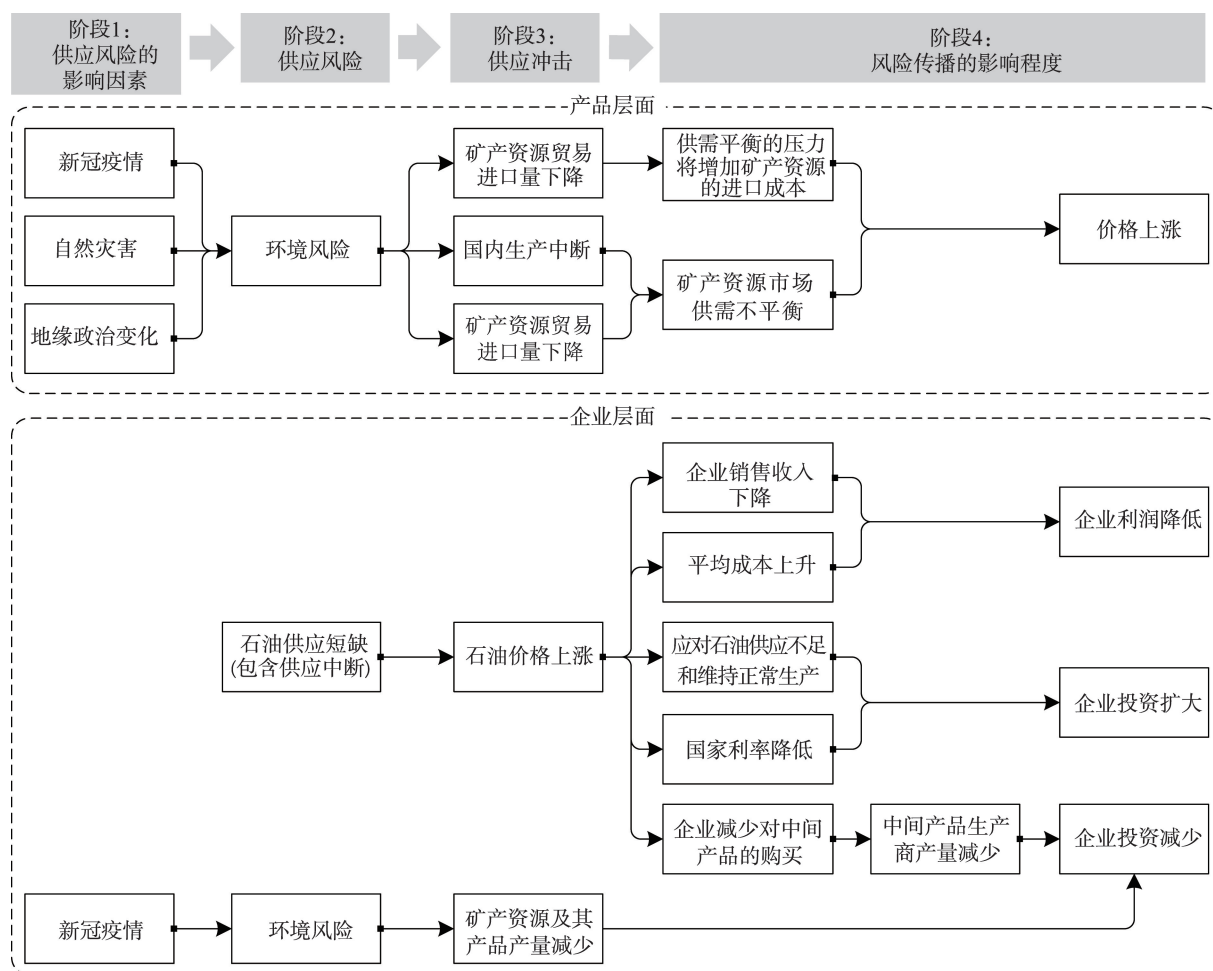


图4 企业/产品层面的供应风险形成机制

Figure 4 Formation mechanism of supply risk at enterprise/product levels

在企业层面,供应短缺风险主要通过提高油价来影响企业营业利润^[85]和投资行为^[84,86]。针对营业利润,价格上涨使得企业销售收入下降和平均生产成本上升,从而造成企业利润降低^[85]。对于投资行为,价格上涨对企业投资的影响具有双刃性^[84,86],这取决于价格冲击是否得到分解,因此在分析油价变化与企业经济指标之间的关系时,将价格变化划分为基本组成部分就变得更加重要。

4 供应风险防范机制框架与研究框架

4.1 供应风险防范机制框架

为了保障国家矿产资源供应安全,本文从供应、技术、环境、价格层面提出了供应风险防范机制框架(图5)。

国内多样化供应和国际多样化供应有助于保障矿产资源稳定供应。在国内多样化供应层面,以锂资源为例,在国内锂资源生产激励政策的作用

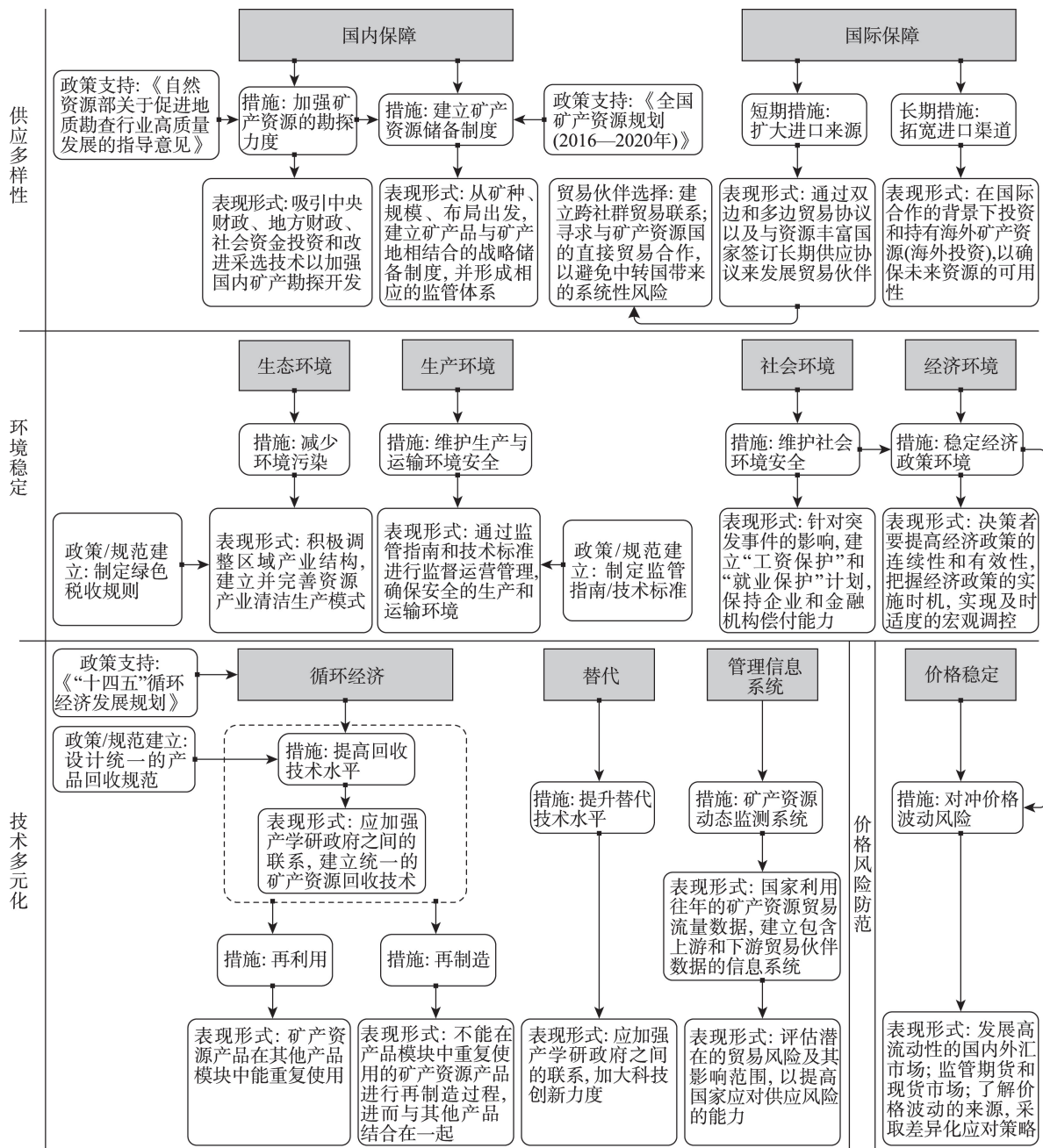


图5 供应风险防范机制框架

Figure 5 A framework for the prevention mechanism of supply risk

2023年9月

下,锂资源的进口依赖性随着锂生产率的提高而降低^[15]。然而,产量的增加需要以增加研究投入为代价,并且高镁锂比盐湖卤水提锂技术在大规模生产方面仍然面临严峻挑战^[112,113]。矿产资源储备制度成为应对国内矿产资源供需失衡的另一个措施。Shao等^[90]的实证研究证明,储量在保证供需稳定增长和缓解价格波动方面具有良好的作用。矿产资源储备体系的建立需要系统考虑矿产资源的价格、储备收集时间、储备释放时间、储备释放地点、储备释放数量等一系列因素。国土资源部在《全国矿产资源规划(2016—2020年)》中,依托矿产资源勘查技术,将深海资源战略储备基地的建设纳入科技创新重大工程。除国内多样化供应外,以扩大进口来源为代表的短期措施和以增强海外投资为代表的长期举措旨在提升国家海外资源进口能力。

建立管理信息系统、应用循环经济和替代技术等措施有助于缓解矿产资源供需压力。管理信息系统旨在评估贸易风险及其影响范围,进而为潜在的系统性供应风险提供预警信息。循环利用技术和替代技术对供应风险的改善效果显著优于国内矿产资源生产激励政策^[15,42]。针对循环利用技术,Li等^[49]的实证研究证明,回收和再利用的稀土元素可以满足钕需求的22.1%~25.9%、镨需求的22.1%~25.9%、镱需求的31.8%~37.1%。Liu等^[91]发现回收技术提升33%,钴供应能力相应提高12.57%,并指出平均浓度低^[114](废旧产品中钴的平均浓度可能低于0.01%)、收集系统不完善、回收技术有限等因素制约了循环经济的发展。针对替代技术,矿产资源替代技术主要通过影响需求渠道来提升矿产资源供应链的响应能力。替代性能的提升依赖于技术进步^[115],当技术发展到一定水平时,替代产品的成本和储量将成为替代潜力开发的制约因素。

本文从生态环境、生产环境、社会环境和经济环境4个维度阐述了环境不确定性的应对措施。其中在社会环境中,供需冲击的正确量化在经济政策的设计和实施的实施中起到了关键作用。在价格层面,价格冲击可以通过经济政策不确定性渠道对股票市场产生间接影响,因此政策制定者不仅要针对不同原因造成的价格冲击采取差异化的应对策略,而且要根据经济形势实施动态调控,降低经济政策的不确

定性。

4.2 供应风险研究框架

通常来说,供应风险研究遵循图6中从右向左橙红色箭头的顺序,最终目标是寻求能够防范和应对供应风险的解决方案。为了实现该目标,需确定供应冲击的传播范围和引发的经济损失。为了估计冲击产生的直接和间接影响,需识别国家/行业/企业发生的不同类型的供应冲击。为了识别供应冲击,需确定矿产资源存在哪些供应风险。为了测定矿产资源的供应风险,需了解哪些因素影响供应风险或不同气候目标情景下的矿产资源需求。

根据以目标为导向的反向思考,本文建立了供应风险研究的逻辑过程。第一个过程是量化矿产资源的供应风险,即矿产资源供应风险影响因素的系统研究或矿产资源的需求分别与储量和产量之间的对比研究。第二个过程是确定矿产资源的供应风险。第三是了解不同类型供应冲击的形成机制,即对外部供应冲击进行界定。第四是模拟供应冲击的动态传播过程。最后一个过程是寻求缓解供应风险和保障供应安全的措施。Li等^[49]认为受技术进步和政策结构影响,提高生产率、应用循环回收和替代技术等措施在短期内无法显著降低稀土资源的供应风险,措施在现实情景中的应用具有不确定性和复杂性。因此,措施的实施效果评估成为潜在的研究问题。从整体供应风险研究框架看,少有研究将供应风险评估和供应风险传播两块研究内容联系起来,即供应风险评估和供应风险传播均被定量研究,进而系统回答存在供应风险的矿产资源对应的产业链供应链应对供应风险的能力。

5 研究前沿与挑战

通过以上文献分析,发现矿产资源供应风险评估相关问题得到了广泛研究,相较之下供应风险传播研究相对薄弱,在国际贸易多层网络的构建理论、行业生产网络的反馈效应和企业生产网络的风险传播机制等方面亟待进一步加强。新一轮科技革命和产业变革将驱使全球矿产资源的供需结构产生变化,进一步增强了全球矿产资源竞争态势。本文基于现有文献的总结归纳,提出供应风险领域三方面的研究前沿与挑战。

(1)如何进一步提高矿产资源的可持续供应

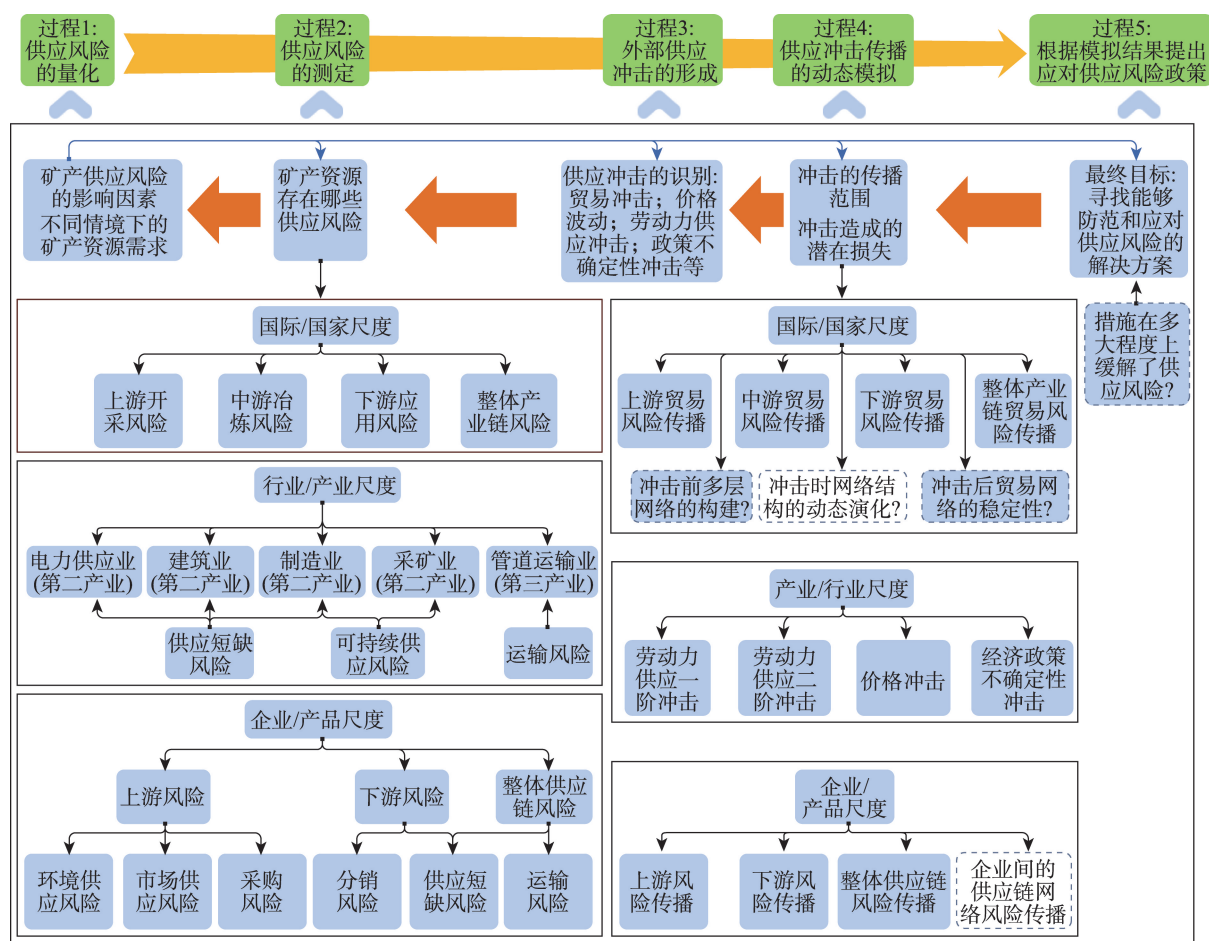


图6 供应风险研究框架

Figure 6 Research framework for supply risk

注:绿色框体代表供应风险评估的逻辑过程(橙黄色箭头),蓝色框体代表一个阶段的主要研究问题,橙红色箭头代表以目标为导向的逆向研究思维,虚线框代表目前少有涉及的研究问题。

能力。

供应风险评估研究主要考虑供应风险评价指标,指标及其所在维度的选择因研究而异。由于评价指标会随着时间的推移而发生变化,供应风险评估研究正逐步建立并完善供应风险动态评估机制,同时矿产资源需求预测研究使政策制定者能够更加深入了解矿产资源供需形势。

随着中国《“十四五”可再生能源发展规划》的提出,能源结构转型背景下如何进一步提高矿产资源的可持续供应能力应成为研究关注的焦点。由采矿对气候变化和矿山周围环境的影响产生的巨大外部开采成本限制了化石能源向可再生能源转型的步伐^[116]。在为数不多的已有研究中,主要运用国内生产激励政策^[15,42]、储备政策^[90,91]、替代和回收利

用技术^[15,42,90,91]等措施改善中国锂、钴等伴生矿的供应风险。围绕供应风险应对措施已有一定研究,但仍存在很多研究难点,如生产增长率、回收率、替代率等技术参数设定的差异化,海外投资和公共政策的量化准则,主矿和伴生矿之间的供需协调机制等。因此,未来的研究应针对具体应对措施,建立统一的量化基准,进而确定措施在现实情境中的实施效果。应对伴生矿供应风险的措施也会影响主矿产的供需结构,因此,在考虑伴生矿供应风险的基础上,未来矿产资源供应链弹性研究还应注意主矿产的产能、价格等因素^[117],从而识别伴生矿和主矿在资源供给和市场需求之间的联动效应。

(2) 如何提升矿产资源产业链韧性。

在供应风险传播研究中,贸易风险传播研究占

2023年9月

据主要地位,通常从单层网络视角进行探讨,主要关注国家供应减少驱动和国家间贸易联系减少驱动的供应冲击。然而,在考虑多层产业链网络时,供应风险的形成机制会发生改变。

党的二十大报告指出要“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”^[118]。产业链韧性是实现产业链在关键资源领域形成控制力和影响力的环节,如何提升矿产资源产业链韧性应成为研究关注的焦点。首先考虑的是矿产资源产业链多层网络的构建方式,其次是要了解清楚贸易风险在多层贸易网络中如何传播。围绕矿产资源多层网络的建立方式已有一定研究^[9,119,120],但仍存在很多研究难点,如多层网络的形成机制,如何建立多层网络风险传播理论框架,如何进行风险传播方法的协同创新,如何考虑网络的动态演化等。针对多层网络形成机制,如果无法识别多层网络的结构特性,可以使用多层网络增长机制^[121]来分析多层网络中层间耦合关系的形成机制和层内主体间的战略关系。针对网络的动态演化,需要突破以往传统静态分析范式,引入适应性强的矿产资源贸易系统。第三,改善贸易结构,重点关注那些在改善贸易稳定性方面发挥有效作用的关键国家,从而提高矿产资源贸易网络的稳定性。

(3)如何衡量冲击对企业级供应链网络造成的宏观经济损失。

微观企业间的供应链是产业链的基础,实现供应链的自主可控是保障产业安全发展的基础。企业/产品层面的已有研究主要分为以下两方面:一是价格冲击对企业经济绩效的影响。二是讨论矿产资源整体供应链面对供应中断时的应对能力。相较之下企业层面供应链网络冲击传播的研究数量少且不深入。

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》指出要“加强国际产业安全合作,形成具有更强创新力、更高附加值、更安全可靠的产业链供应链”^[122],企业层面的产业链供应链安全更加强调企业应对外来冲击的能力。在全球化的驱动下,供应链网络中的企业与其上下游企业密切协作。对于复杂且紧密耦合的供应链系统,冲击产生的影响往往以间接影

响为主。衡量供应冲击对矿产资源供应链造成的宏观经济损失能够帮助理解企业间的网络复杂性如何影响供应链的行为,而其中的难点在于对企业级矿产供应链风险传播模型的构建。为了保证模型的准确性和有效性,首先需要界定不同供应风险导致的供应冲击。其次要引入企业的恢复和配给机制,分析不同特征和复杂程度的冲击在供应链网络中的传播时间和产生的经济损失。第三,模拟冲击在具有不同网络结构的供应链中产生的经济动态,并衡量干预措施对负面影响的改善效果。最后需要对供应链网络结构进行优化。

6 结论

本文从国际/国家、产业/行业与企业/产品3个层面梳理出供应风险评估和供应风险传播的研究现状,提出贸易风险、环境风险等不同类型供应风险形成机制和防范机制框架,在此基础上对供应风险的研究框架进行了总结归纳。主要得出如下结论:

(1)供应风险评估和供应风险传播的研究范围均经历了从国际/国家层面到企业/产品层面的发展历程,研究维度实现了从单一环节到整体产业链、供应链的延伸。在供应风险评估研究中,国际/国家层面和企业/产品层面的资源可用性、地缘政治、技术水平、供应限制的脆弱性、社会发展水平和监管政策等成为影响供应风险的主要因素,供应风险评估指标体系的建立成为供应风险评估研究的主要内容。目前供应风险评估研究正在实现从传统的供应风险动态评估机制到以需求预测为导向的供应风险评估机制的转变,全生命周期评价、投入产出分析、物质流分析、系统动力学成为预测矿产资源需求的主要方法。在供应风险传播研究中,国际/国家层面的贸易进出口冲击是造成贸易风险传播的主要原因,级联失效模型、传染病模型和自举渗流模型是研究贸易风险传播行为的主要方法;价格冲击贯穿产业/行业层面和企业/产品层面。目前供应风险传播研究正在实现从供应风险传播行为揭示到供应链弹性测度的转变,旨在探讨矿产资源供应链面对供应风险时的应对能力和供应风险改善措施对提高供应链应对能力的可行性。

(2)供应风险形成机制由供应风险的诱因、供应风险的形成、供应冲击的发生和风险传播的影响

程度4个环节构成。其中,供应风险的诱因、供应风险的形成反映了供应风险评估环节,供应冲击的发生和风险传播的影响程度是供应风险传播的组成部分。本文根据供应风险评估和供应风险传播研究内容,从国际/国家层面、产业/行业层面和企业/产品层面总结出供应风险形成机制的研究进展。贸易风险主要存在于国际/国家层面,环境风险贯穿产业/行业层面和企业/产品层面。

(3)针对贸易风险、环境风险等不同类型供应风险的防范机制框架涵盖供应、技术、环境、价格4个层面。其中,供应层面包含国内供应和国际供应两项措施,建立管理信息系统、应用循环经济和替代技术有助于从技术层面缓解供需压力,环境层面的举措致力于维护社会环境、经济环境、生产环境和生态环境稳定安全。本文根据供应风险的形成机制和防范机制框架,提出供应风险研究框架,其由五部分组成,即供应风险的量化、供应风险的测定、供应冲击的形成、供应冲击传播的动态模拟和政策建议的提出。

结合新时期矿产资源供应安全形势的变化,未来要进一步探讨如何进一步提高矿产资源的可持续供应能力、如何提升矿产资源产业链韧性、如何衡量供应冲击对企业级供应链网络造成的宏观经济损失等方面的研究,揭示矿产资源供应安全机理,优化矿产资源供应结构,并验证所提出的政策建议的可行性和有效性。

参考文献(References):

- [1] 自然资源部中国地质调查局国际矿业研究中心. 全球矿业发展报告(2020-2021)[R/OL]. (2021-10-22) [2022-11-05]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/202110/t20211022_682639.html. [International Mining Research Center, China Geological Survey, Ministry of Natural Resources. Global Mining Development Report(2020-2021)[R/OL]. (2021-10-22) [2022-11-05]. https://www.cgs.gov.cn/xwl/ddyw/202110/t20211022_682639.html.]
- [2] 马丽, 王力. 俄乌冲突对国际贸易格局的影响及中国应对之策[J]. 价格月刊, 2023, (5): 50-55. [Ma L, Wang L. The impact of the Russia-Ukraine conflict on international trade pattern and China's countermeasures[J]. Prices Monthly, 2023, (5): 50-55.]
- [3] 郑洪强, 熊欣, 赫荣儒. 俄欧天然气关系转变对国际液化天然气贸易的潜在影响[J]. 国际石油经济, 2023, 31(3): 67-75. [Zheng H T, Xiong X, He R R. Potential impact of the shift in Russia-EU gas relations on international LNG trade[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(3): 67-75.]
- [4] 胡卜文. 全球货币政策转向: 特征、影响因素及发展趋势研究[J]. 贺州学院学报, 2023, 39(1): 120-125. [Hu B W. Global monetary policy shift: Features, influencing factors and development trends[J]. Journal of Hezhou University, 2023, 39(1): 120-125.]
- [5] Sun X Q. Supply chain risks of critical metals: Sources, propagation, and responses[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, DOI: 10.3389/fenrg.2022.957884.
- [6] Sun X Q, Shi Q, Hao X Q. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106035.
- [7] 王星星, 钟维琼, 朱德朋. 全球镍矿贸易网络的供应风险传播研究[J]. 地球学报, 2023, 44(2): 361-368. [Wang X X, Zhong W Q, Zhu D P. Research on the supply risk propagation of the global nickel ore trade network[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 361-368.]
- [8] Wang Y, Chen L, Wang X Y, et al. Trade network characteristics, competitive patterns, and potential risk shock propagation in global aluminum ore trade[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, DOI: 10.3389/fenrg.2022.1048186.
- [9] 郝晓晴. 钢铁国际贸易多层网络供给风险传播机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [Hao X Q. Study on Supply Risk Propagation Mechanism in Multi-Layer Network of International Steel Trade[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.]
- [10] del Rio-Chanona R M, Mealy P, Pichler A, et al. Supply and demand shocks in the COVID-19 pandemic: An industry and occupation perspective[J]. Oxford Review of Economic Policy, 2020, DOI:10.1093/oxrep/gra033.
- [11] Pichler A, Pangallo M, Rio-Chanona R M D, et al. Forecasting the propagation of pandemic shocks with a dynamic input-output model[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2022, DOI: 10.1016/j.jedc.2022.104527.
- [12] 钟美瑞, 宋婉婷. 战略性金属矿产价格冲击对行业产出的影响: 基于TVP-FAVAR模型的时变分析[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1580-1591. [Zhong M R, Song W T. Impact of strategic metal price shocks on industrial output: Time-varying analysis based on the TVP-FAVAR model[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1580-1591.]
- [13] Claudio-Quiroga G, Gil-Alana L A, Maiza-Larrarte A. Mineral prices persistence and the development of a new energy vehicle industry in China: A fractional integration approach[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103433.
- [14] Yang J H, Li Y, Sui A N. From black gold to green: Analyzing the consequences of oil price volatility on oil industry finances and carbon footprint[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103615.
- [15] Zhou N, Su H, Wu Q S, et al. China's lithium supply chain: Security dynamics and policy countermeasures[J]. Resources Policy, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103615.

2023年9月

- 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102866.
- [16] 王昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 国家金属资源安全研究回顾与展望[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 805–817. [Wang C, Song H L, Zuo L S, et al. Review and prospects of national metal resource security[J]. Resources Science, 2017, 39(5): 805–817.]
- [17] 张雷. 中国能源安全问题探讨[J]. 中国软科学, 2001, (4): 7–12. [Zhang L. Discussion about the energy security of China[J]. China Soft Science, 2001, (4): 7–12.]
- [18] 吴新春. 中国铁矿石资源供应安全研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011. [Wu X C. The Research of China's Iron Ore Resources Supply Security[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.]
- [19] 罗辉, 宦吉娥. 矿产资源安全研究述评[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2010, 10(3): 43–46. [Luo H, Huan J E. Review on mineral resources security[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2010, 10(3): 43–46.]
- [20] Hao X Q, An H Z. Comparative study on transmission mechanism of supply shortage risk in the international trade of iron ore, pig iron and crude steel[J]. Resources Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103022.
- [21] 葛建平, 刘佳琦. 关键矿产战略国际比较: 历史演进与工具选择[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1464–1476. [Ge J P, Liu J Q. International comparison of critical mineral strategies: Historical evolution and tool selection[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1464–1476.]
- [22] 吴巧生, 周娜, 成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1439–1451. [Wu Q S, Zhou N, Cheng J H. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1439–1451.]
- [23] 汪鹏, 王翹楚, 韩茹茹, 等. 全球关键金属-低碳能源关联研究综述及其启示[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 669–681. [Wang P, Wang Q C, Han R R, et al. Nexus between low-carbon energy and critical metals: Literature review and implications[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 669–681.]
- [24] 朱春华. 我国矿产资源供应风险评价研究: 以铁矿资源为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [Zhu C H. Study on the Risk Evaluation of the Mineral Resources Supply in China: Take the Iron Ore Resource as the Example[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [25] 范松梅, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国铁矿石资源供应风险评价与治理研究[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 507–515. [Fan S M, Sha J H, Yan J J, et al. Risk assessment and management of iron ore resource supply in China[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 507–515.]
- [26] Zhou N, Wu Q S, Hu X P, et al. Synthesized indicator for evaluating security of strategic minerals in China: A case study of lithium[J]. Resources Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101915.
- [27] 马玉芳, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国镍资源供应安全评价与对策研究[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1317–1328. [Ma Y F, Sha J H, Yan J J, et al. Safety assessment and countermeasures of nickel resource supply in China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1317–1328.]
- [28] 范凤岩, 柳群义. 基于改进的熵权层次分析法的中国锡资源供应安全评价研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(10): 77–84. [Fan F Y, Liu Q Y. Study on the supply safety assessment of tin resources in China based on improved entropy weight analytic hierarchy process[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(10): 77–84.]
- [29] 郑明贵, 王萍, 潘天阳. 中国铝资源供应安全预警系统研究[J]. 科技促进发展, 2020, 16(11): 1307–1316. [Zheng M G, Wang P, Pan T Y. Research on security early warning system of aluminum resource supply in China[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(11): 1307–1316.]
- [30] 王珏, 冯宗宪. 基于间接进口成本的中国战略性矿产海外供应风险分析: 以锆为例[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2022, 22(5): 70–87. [Wang J, Feng Z X. Overseas supply risk analysis of China's strategic mineral based on indirect import costs: A case study of zirconium[J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(5): 70–87.]
- [31] Yu S W, Duan H R, Cheng J H. An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101891.
- [32] Zhou Y J, Li J W, Wang G S, et al. Assessing the short-to medium-term supply risks of clean energy minerals for China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 217–225.
- [33] European Commission. Study on the EU's List of Critical Raw Materials: Final Report(2020)[R/OL]. (2020–09–03) [2023–04–28]. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/11619>.
- [34] 黎江峰. 中国战略性能源矿产资源安全评估与调控研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018. [Li J F. Study on the Security Evaluation and Regulation of Strategic Energy Mineral Resources of China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2018.]
- [35] 黄健柏, 孙芳, 宋益. 清洁能源技术关键金属供应风险评估[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1477–1488. [Huang J B, Sun F, Song Y. Supply risk assessment of critical metals in clean energy technology[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1477–1488.]
- [36] Zhang L E, Chen Z Y, Yang C Y, et al. Global supply risk assessment of the metals used in clean energy technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129602.
- [37] 张其仔. 产业链供应链现代化新进展、新挑战、新路径[J]. 山东大学学报(哲学社会科学版), 2022, (1): 131–140. [Zhang Q Z. New progress, new challenges and new path in the modernization of industrial and supply chains[J]. Journal of Shandong University (Philosophy and Social Sciences), 2022, (1): 131–140.]
- [38] Segura S J, Tavares L M. Sustainability in the minerals industry: Seeking a consensus on its meaning[J]. Sustainability, 2018, DOI: 10.3390/su10051429.
- [39] 黄伟军, 龚先政, 高峰, 等. 中国铜产品环境足迹评价和供应风险综合评估[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(5), 1541–1553.

- [Huang W J, Gong X Z, Gao F, et al. Copper products environmental footprint assessment and comprehensive supply risk evaluation for China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(5), 1541–1553.]
- [40] Schnebele E, Jaiswal K, Luco N, et al. Natural hazards and mineral commodity supply: Quantifying risk of earthquake disruption to South American copper supply[J]. *Resources Policy*, 2019, DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101430.
- [41] 王昶, 孙晶, 左绿水, 等. 新能源汽车关键原材料全球供应风险评估[J]. *中国科技论坛*, 2018, (4): 83–93. [Wang C, Sun J, Zuo L S, et al. Evaluation of global supply risk of critical minerals for new energy vehicles[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2018, (4): 83–93.]
- [42] Yan W Y, Cao H B, Zhang Y, et al. Rethinking Chinese supply resilience of critical metals in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120719.
- [43] 卢洋. 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), 2022. [Lu Y. Research on the Risk Evaluation and Early Warning of Critical Mineral Resources for China's Solar PV Industry[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2022.]
- [44] Xun D Y, Sun X, Geng J X, et al. Mapping global fuel cell vehicle industry chain and assessing potential supply risks[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(29): 15097–15109.
- [45] Li B H, Li H J, Dong Z L, et al. The global copper material trade network and risk evaluation: An industry chain perspective[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102275.
- [46] He G, Lin J, Sifuentes F, et al. Rapid cost decrease of renewables and storage accelerates the decarbonization of China's power system[J]. *Nature Communications*, 2020, DOI:10.1038/S41467-020-16184-X.
- [47] Luo X Y, Pan L Y, Yang J. Mineral resource constraints for China's clean energy development under carbon peaking and carbon neutrality targets: Quantitative evaluation and scenario analysis[J]. *Energies*, 2022, DOI: 10.3390/en15197029.
- [48] de Koning A, Kleijn R, Huppel G, et al. Metal supply constraints for a low-carbon economy[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 129: 202–208.
- [49] Li J S, Peng K, Wang P, et al. Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions[J]. *One Earth*, 2020, 3(1): 116–125.
- [50] Wei W D, Ge Z W, Geng Y, et al. Toward carbon neutrality: Uncovering constraints on critical minerals in the Chinese power system[J]. *Fundamental Research*, 2022, 2(3): 367–374.
- [51] Liu M K, Liu C X, Pei X D, et al. Sustainable risk assessment of resource industry at provincial level in China[J]. *Sustainability*, 2021, DOI: 10.3390/su13084191.
- [52] Aydin N, Seker S, Sen C. A new risk assessment framework for safety in oil and gas industry: Application of FMEA and BWM based picture fuzzy MABAC[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111059.
- [53] 经济合作与发展组织. 经济合作与发展组织关于来自受冲突影响和高风险区域的矿石的负责任供应链尽职调查指南(第二版)[R/OL]. (2014–10–13) [2023–03–15]. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264214347-zh>. [Organization for Economic Co-operation and Development. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas (2nd ed.)[R/OL]. (2014–10–13) [2023–03–15]. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264214347-zh>.]
- [54] 闻少博, 陈甲斌, 郝晓晴. 基于复杂网络视角的全球铜资源供应链风险研究[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(9): 171–178. [Wen S B, Chen J B, Hao X Q. Research on the supply chain risk of global copper resource from the perspective of complex network[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(9): 171–178.]
- [55] van den Brink S, Kleijn R, Sprecher B, et al. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104743.
- [56] Li P Y, Liu Q Y, Zhou P, et al. Mapping global platinum supply chain and assessing potential supply risks[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, DOI: 10.3389/fenrg.2023.1033220.
- [57] Fattahi M. Resilient procurement planning for supply chains: A case study for sourcing a critical mineral material[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.10.010.
- [58] Deberdt R, Le Billon P. Green transition mineral supply risks: Comparing artisanal and deep-sea cobalt mining in a time of climate crisis[J]. *The Extractive Industries and Society*, 2023, DOI: 10.1016/j.exis.2023.101232.
- [59] Basiri S K, Sobhani F M, Sadjadi S J. Developing natural-gas-supply security to mitigate distribution disruptions: A case study of the national Iranian gas company[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120066.
- [60] Andr H, Ljunggren M. Short and long-term mineral resource scarcity impacts for a car manufacturer: The case of electric traction motors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132140.
- [61] Sakib N, Hossain N U I, Nur F, et al. An assessment of probabilistic disaster in the oil and gas supply chain leveraging Bayesian belief network[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.ijpe.2021.108107.
- [62] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 矿产资源供应基地评价与供应链调查理论技术方法[J]. *地球学报*, 2021, 42(2): 159–166. [Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Theoretical and technical methods of mineral resource supply base evaluation and supply chain investigation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2021, 42(2): 159–166.]
- [63] Jin Y Y, Kim J, Guillaume B. Review of critical material studies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 113: 77–87.
- [64] 龙如银, 杨家慧. 国家矿产资源安全研究现状及展望[J]. *资源科学*, 2018, 40(3): 465–476. [Long R Y, Yang J H. Research status and prospect of national mineral resource security[J]. *Resources Science*, 2018, 40(3): 465–476.]

2023年9月

- [65] Mermer C, Sengul H. Addressing potential resource scarcity for boron mineral: A system dynamics perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122192.
- [66] Andre H, Ljunggren M. Towards comprehensive assessment of mineral resource availability? Complementary roles of life cycle, life cycle sustainability and criticality assessments[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105396.
- [67] 王星星. 全球天然石墨贸易供应风险评估及贸易重配策略研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020. [Wang X X. Global Natural Graphite Trade Supply Risk Assessment and Trade Re-Allocation Strategy Study[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.]
- [68] Xia L J. Study on the characteristics and evolution of international tin ore trade based on a complex network perspective[J]. *International Journal of Wireless Information Networks*, 2021, 30: 119–128.
- [69] 沈曦. 关键矿产资源贸易网络格局演化和节点韧性研究: 以镍、锂为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2022. [Shen X. Research on the Evolution of Trade Structure and Node Resilience of Critical Mineral Resources Trade Network: Cases of Nickel and Lithium[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2022.]
- [70] Tian X, Geng Y, Sarkis J, et al. Features of critical resource trade networks of lithium-ion batteries[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102177.
- [71] Hu X Q, Wang C, Zhu X Y, et al. Trade structure and risk transmission in the international automotive li-ion batteries trade[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105591.
- [72] Wang C, Huang X, Hu X Q, et al. Trade characteristics, competition patterns and COVID-19 related shock propagation in the global solar photovoltaic cell trade[J]. *Applied Energy*, 2021, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116744.
- [73] Wang X X, Wang A J, Zhu D P. Simulation analysis of supply crisis propagation based on global nickel industry chain[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, DOI: 10.3389/fenrg.2022.919510.
- [74] Zhou X R, Zhang H, Zheng S X, et al. A study on the transmission of trade behavior of global nickel products from the perspective of the industrial chain[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103376.
- [75] 李超. 基于多层网络的京津冀区域大气污染时空关联效应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019. [Li C. Research on the Spatio-Temporal Correlation Effects of Atmospheric Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Multiplex Network[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.]
- [76] Wei N, Xie W J, Zhou W X. Robustness of the international oil trade network under targeted attacks to economies[J]. *Energy*, 2022, DOI: 10.1016/j.energy.2022.123939.
- [77] Ashraf M, Caruso P, Pensado P G G. Reinventing the Oil and Gas Industry: Compounded Disruption[R/OL]. (2020-09-03) [2022-07-01]. <https://www.weforum.org/agenda/2020/09/reinventing-the-oil-and-gas-industry-compounded-disruption/>.
- [78] Cristine Giese E. Strategic minerals: Global challenges post-COVID-19[J]. *The Extractive Industries and Society*, 2022, DOI: 10.1016/j.exis.2022.101113.
- [79] Brinca P, Duarte J B, Faria-e-Castro M. Measuring labor supply and demand shocks during COVID-19[J]. *European Economic Review*, 2021, DOI: 10.1016/j.eurocorev.2021.103901.
- [80] Kilian L. Not all oil price shocks are alike: Disentangling demand and supply shocks in the crude oil market[J]. *American Economic Review*, 2009, 99(3): 1053–1069.
- [81] 张喜艳, 陈乐一. 经济政策不确定性的溢出效应及形成机理研究[J]. *统计研究*, 2019, 36(1): 115–128. [Zhang X Y, Chen L Y. A study on the spillover effect and its formation mechanism of economic policy uncertainty[J]. *Statistical Research*, 2019, 36(1): 115–128.]
- [82] Zhu X H, Liao J H, Chen Y. Time-varying effects of oil price shocks and economic policy uncertainty on the nonferrous metals industry: From the perspective of industrial security[J]. *Energy Economics*, 2021, DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105192.
- [83] Liu Z H, Zhu T T, Duan Z P, et al. Time-varying impacts of oil price shocks on China's stock market under economic policy uncertainty[J]. *Applied Economics*, 2023, 55(9): 963–989.
- [84] Chen X, Li Y, Xiao J H, et al. Oil shocks, competition, and corporate investment: Evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104819.
- [85] Elfayoumi K. The balance sheet effects of oil market shocks: An industry level Analysis[J]. *Journal of Banking and Finance*, 2018, 95: 112–127.
- [86] Caraianni P. The impact of oil supply news shocks on corporate investments and the structure of production network[J]. *Energy Economics*, 2022, DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106011.
- [87] Chhimwal M, Agrawal S, Kumar G. Measuring circular supply chain risk: A Bayesian network methodology[J]. *Sustainability*, 2021, DOI: 10.3390/su13158448.
- [88] Sprecher B, Daigo I, Murakami S, et al. Framework for resilience in material supply chains, with a case study from the 2010 rare earth crisis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(11): 6740–6750.
- [89] Mancheri N A, Sprecher B, Deetman S, et al. Resilience in the tantalum supply chain[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 129: 56–69.
- [90] Shao L G, Jin S Z. Resilience assessment of the lithium supply chain in China under impact of new energy vehicles and supply interruption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119624.
- [91] Liu W, Li X, Liu C Y, et al. Resilience assessment of the cobalt

- supply chain in China under the impact of electric vehicles and geopolitical supply risks[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103183.
- [92] Vimal K E K, Nadeem S P, Ravichandran M, et al. Resilience strategies to recover from the cascading ripple effect in a copper supply chain through project management[J]. *Operations Management Research*, 2022, 15: 440–460.
- [93] Inoue H, Todo Y. Propagation of negative shocks through firm networks: Evidence from simulation on comprehensive supply chain data[J]. *Plos One*, 2017, DOI: 10.2139/ssrn.2932559.
- [94] Inoue H, Todo Y. Firm-level propagation of shocks through supply-chain networks[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(9): 841–847.
- [95] Wang X X, Li H J, Yao H J, et al. Simulation analysis of the spread of a supply crisis based on the global natural graphite trade network[J]. *Resources Policy*, 2018, 59: 200–209.
- [96] Chen Z H, An H Z, An F, et al. Structural risk evaluation of global gas trade by a network-based dynamics simulation model[J]. *Energy*, 2018, 159: 457–471.
- [97] Chen Z H, Wang H, Liu X Y, et al. Risk diffusion of international oil trade cuts: A network-based dynamics model[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 11320–11333.
- [98] Hao H C, Xing W L, Wang A J, et al. Multi-layer networks research on analyzing supply risk transmission of lithium industry chain[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102933.
- [99] Huang D Y, Li J Y, Wu K. The effect of oil supply shocks on industry returns[J]. *Journal of Commodity Markets*, 2021, DOI: 10.1016/j.jcomm.2021.100172.
- [100] Di Muro M A, Valdez L D, Stanley H E, et al. Insights into bootstrap percolation: Its equivalence with k-core percolation and the giant component[J]. *Physical Review E*, 2019, DOI: 10.1103/PhysRevE.99.022311.
- [101] Bhansali R, Schaposnik L P. A trust model for spreading gossip in social networks: A multi-type bootstrap percolation model[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2020, DOI: 10.1098/rspa.2019.0826.
- [102] Li M, Liu R R, Lu L Y, et al. Percolation on complex networks: Theory and application[J]. *Physics Reports*, 2021, 907: 1–68.
- [103] Mahabadi Z, Varga L, Dolan T. Network properties for robust multilayer infrastructure systems: A percolation theory review[J]. *IEEE Access*, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116868.
- [104] Xiao J X, Xiong C, Deng W, et al. Evolution features and robustness of global photovoltaic trade network[J]. *Sustainability*, 2022, DOI: 10.3390/su142114220.
- [105] Tome T, de Oliveira M J. Effect of immunization through vaccination on the SIS epidemic spreading model[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2022, DOI: 10.1088/1751-8121/ac7116.
- [106] Wang Y X, Wang X Y, Yue N X. Multi-information hybrid network spreading model based on competition consciousness[J]. *IEEE Access*, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3057636.
- [107] Lee K M, Yang J S, Kim G, et al. Impact of the topology of global macroeconomic network on the spreading of economic crises[J]. *Plos One*, 2011, DOI: 10.1371/journal.pone.0018443.
- [108] Mancheri N A, Sprecher B, Bailey G, et al. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 101–112.
- [109] 吴姗姗, 单葆国. 国际石油价格波动对宏观经济冲击影响研究[J]. *价格理论与实践*, 2020, (4): 51–55. [Wu S S, Shan B G. A study on the impact of international oil price fluctuation on macro-economy[J]. *Price: Theory & Practice*, 2020, (4): 51–55.]
- [110] Lippi F, Nobili A. Oil and the macroeconomy: A quantitative structural analysis[J]. *Journal of the European Economic Association*, 2012, 10(5): 1059–1083.
- [111] Ji Q, Liu B Y, Zhao W L, et al. Modelling dynamic dependence and risk spillover between all oil price shocks and stock market returns in the BRICS[J]. *International Review of Financial Analysis*, 2020, DOI: 10.1016/j.irfa.2018.08.002.
- [112] Zhang Y, Sun W, Xu R, et al. Lithium extraction from water lithium resources through green electrochemical-battery approaches: A comprehensive review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124905.
- [113] 刘冬福. 碳酸盐型盐湖卤水中锂的选择性提取[D]. 长沙: 中南大学, 2022. [Liu D F. Lithium Selective Extraction from Carbonate-Type Salt Lake Brine[D]. Changsha: Central South University, 2022.]
- [114] Zeng X L, Li J H. Spent rechargeable lithium batteries in e-waste: Composition and its implications[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8: 792–796.
- [115] 董雪松, 黄健柏, 钟美瑞, 等. 技术进步对关键金属矿产需求影响的研究综述[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1592–1603. [Dong X S, Huang J B, Zhong M R, et al. A review on the impact of technological progress on critical metal mineral demand[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1592–1603.]
- [116] Henckens T. Scarce mineral resources: Extraction, consumption and limits of sustainability[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105511.
- [117] 邵留国, 蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1452–1463. [Shao L G, Lan T T. Review of the by-product critical minerals resource security research and prospects[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1452–1463.]
- [118] 中华人民共和国中央人民政府. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗: 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[R/OL]. (2022–10–16) [2023–05–17]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm. [Central People's Government of the People's Republic of China. Hold High the Great Banner of Socialism with

2023年9月

- Chinese Characteristics Unite and Strive for the Comprehensive Construction of a Modern Socialist Country: Report at the 20th National Congress of the Communist Party of China[R/OL]. (2022-10-16) [2023-05-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.]
- [119] Hu X Q, Wang C, Lim M K, et al. Characteristics of the global copper raw materials and scrap trade systems and the policy impacts of China's import ban[J]. *Ecological Economics*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2020.106626.
- [120] Shi Q, Sun X Q, Xu M, et al. The multiplex network structure of global cobalt industry chain[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102555.
- [121] Li G, Sun X C. Evolutionary game on a growing multilayer network[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2021, DOI: 10.1016/j.physa.2021.126110.
- [122] 范保群, 郑世林, 黄晴. 中国制造业外迁: 现状和启示[J]. *浙江工商大学学报*, 2022, (6): 85-99. [Fan B Q, Zheng S L, Huang Q. The transfer of Chinese manufacturing: Status, causes, impacts and recommendations[J]. *Journal of Zhejiang Gongshang University*, 2022, (6): 85-99.]

Progress of research on supply risk of mineral resources and future directions

HAN Shitong¹, LI Huajiao^{1,2}

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The vulnerability of mineral resources supply is constantly increasing due to geopolitical and other factors. Mineral resources are important raw materials and the propagation of supply risks will lead to significant impacts on the economic system. Assessing the supply risks of mineral resources, and predicting the propagation processes, paths, and impacts of supply risks are important research topics that have attracted widespread attention from scholars both in China and internationally. This article summarized the progress of research on the assessment of supply risks and the propagation of supply risks from the international/national levels to the enterprise/product levels and from the single link to the industry chain and supply chain. The assessment of supply risks and the propagation of supply risks are important components of supply risk formation mechanism. This article laid out formation mechanism for different types of supply risks, such as trade risk and environmental risk, and proposed a framework of supply risk prevention mechanism from four perspectives: supply, technology, environment and price. On this basis, we proposed a research framework for supply risks, which consists of five parts: quantification of supply risks, measurement of supply risks, formation of supply shocks, dynamic simulation of supply shock propagation, and formulation of policy recommendations. We further discussed the urgent issues that need to be addressed. Finally, we proposed three frontiers and challenges in the field of supply risk research: “how to further enhance the sustainable supply capacity of mineral resources”, “how to improve the resilience of the mineral industrial chain”, and “how to measure the macroeconomic losses caused by shocks on enterprise-level supply chain networks”.

Key words: mineral resources; supply risk; risk assessment; risk propagation; formation mechanism; prevention mechanism