

引用格式:左芝鲤,成金华,詹成,等.全球锂产业链贸易格局演化及脆弱性分析[J].资源科学,2024,46(1):114-129.[Zuo Z L, Cheng J H, Zhan C, et al. Evolution and vulnerability analysis of the global trade pattern in the lithium industry chain[J]. Resources Science, 2024, 46(1): 114-129.] DOI: 10.18402/resci.2024.01.09

# 全球锂产业链贸易格局演化及脆弱性分析

左芝鲤<sup>1</sup>,成金华<sup>2</sup>,詹成<sup>2</sup>,郭海湘<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学管理科学学院,成都 610059;2. 中国地质大学(武汉)经济管理学院,武汉 430074)

**摘要:**【目的】本文旨在模拟贸易中断风险发生时锂产业链贸易网络的脆弱性,以有效识别关键节点和网络的潜在风险,为优化贸易格局和规避风险提供决策支持。【方法】基于贸易流向分析锂产业链2000—2021年的贸易格局演化情况,采用蓄意攻击法模拟2021年PageRank中心度前10%的节点发生贸易中断后锂产业链贸易网络脆弱性动态变化。【结果】研究显示:①锂产业链全球贸易格局正面临深刻的重组与变革,中国在全球贸易网络中的地位凸显;②样本期内锂产业链上游网络抗毁性有所提升,中游和下游网络抵御风险能力相对稳定;③锂产业链脆弱性排名为下游<中游<上游,当全球前10%的关键节点贸易中断后,上游、中游和下游贸易网络的整体性能分别平均下降60%、35%和23.5%。【结论】为维护中国与世界的锂产业安全与稳定,应进一步建立和完善锂产业链安全风险预警与应急保障机制;建立锂产业链各利益主体之间的合作共赢机制,增强产业链与供应链、价值链之间的正向响应能力;提高锂资源国内自主供给保障能力和全球配置能力。

**关键词:**锂产业链;演化格局;脆弱性;核密度估计;贸易中断;PageRank中心度

DOI: 10.18402/resci.2024.01.09

## 1 引言

近年来,资源供应端的突发变故加剧了断供风险,对中国的资源安全和产业发展造成了极大影响。比如,2019年印尼施行镍原矿石出口禁令,中国镍矿石进口受到严重影响导致镍铁产量出现明显下滑<sup>[1]</sup>,2020年南非的边境封锁措施导致全球铬矿、钴矿市场面临供应中断风险。全球资源政治化、价格金融化、政策调整逐利化等问题突出,并叠加突发公共卫生事件、主要资源生产国政治变化等不确定性因素影响,产业链变得更为脆弱<sup>[2]</sup>。当前国际格局和国际体系正在发生深刻调整,维护产业链安全是实现中国经济高质量发展的重要前提,也是国家总体安全观的重要一环<sup>[3]</sup>。锂资源被称为21世纪“绿色高能金属”和“白色石油”,未来一段时间内,世界锂资源消耗将持续增长,“资源决定胜负”已成行业共识。随着欧盟禁售燃油车计划的落

地,各国纷纷布局新能源汽车产业,锂资源已成为各国竞相角逐的重要资源之一。但受资源禀赋、开采条件和提炼技术等影响,中国锂资源的对外依存度一直较高。外部发展环境不确定性日渐增强,使得锂资源产业链供应链面临较大的“断链”风险。因此,在内部经济转型和外部发展环境不确定性增强的双重约束下,厘清锂产业链脆弱性,对优化产业链布局,保障资源安全,实现高质量发展战略目标至关重要<sup>[4]</sup>。

## 2 文献综述

现有的锂产业链相关研究主要追踪了产品材料转化和贸易的连续过程<sup>[5]</sup>,其中,主要聚焦于电池制造对产业链上游关键原材料供需动态的影响。研究通常采用物质流分析<sup>[6,7]</sup>、贸易结构分析<sup>[8]</sup>、供应风险评价<sup>[9]</sup>、全生命周期评价<sup>[10]</sup>和供需格局分析<sup>[11,12]</sup>。锂产业链研究强调了与全球能源转型的总物质需

收稿日期:2023-04-20 修订日期:2023-08-07

基金项目:国家自然科学基金重大项目(71991482);国家社会科学基金重点项目(23AZD072);国家自然科学基金面上项目(72074198);四川省自然科学基金青年项目(24NSFSC4417)。

作者简介:左芝鲤,女,湖南湘乡人,博士,研究员,主要研究方向为战略性关键矿产安全。E-mail: zuozhili@cdut.edu.cn

通讯作者:成金华,男,湖北黄冈人,博士,教授,主要研究方向为资源环境经济学、战略性关键矿产安全。E-mail: chengjinhua100@126.com

2024年1月

求相关的直接、间接和隐藏的物质流<sup>[13]</sup>,以及可再生能源发电、电网和电池存储之间的动态相互作用<sup>[14]</sup>。在锂产业链上游相关的研究中,越来越多的研究关注资源生产的可持续性、公平性和可靠性<sup>[15]</sup>,同时,部分学者关注了资源开采对环境的影响,如 Vande-paer 等<sup>[16]</sup>、Han 等<sup>[17]</sup>、Wang 等<sup>[18]</sup>和 Winslow 等<sup>[19]</sup>运用生命周期评估框架来量化产品或系统在其整个生命周期中可能产生的各种环境影响。在锂产业链下游相关的研究中,研究重点是电池应用造成的供需失衡,包括减少需求策略<sup>[20]</sup>和减少原材料依赖的循环利用策略方面的工作<sup>[21]</sup>。此外,还有部分研究专注于电池循环利用,如 Mrozik 等<sup>[22]</sup>、姚海琳等<sup>[23]</sup>深入探讨了锂离子电池回收机制。

脆弱性是系统的隐性属性,由 Timmermann<sup>[24]</sup>于 1981 年率先提出并用于分析系统对灾害事件的承受能力及从中恢复的能力,早期主要应用在自然灾害领域,用于识别和预测灾害发生影响的潜在区域<sup>[25]</sup>。20 世纪 90 年代以来,脆弱性研究逐渐成为全球环境变化的重要课题之一,研究领域不仅包括灾害管理<sup>[26]</sup>,还包括公共健康<sup>[27]</sup>、气候变化<sup>[28]</sup>、生态环境<sup>[29]</sup>、供应链管理<sup>[30]</sup>等。脆弱性逐渐发展成地理学、资源科学等学科诠释人类活动及人地相互作用机制的重要途径<sup>[31]</sup>。系统脆弱性的评价方法大致归纳为如下 4 类:情景分析法、假定攻击策略法、模拟仿真法和计算模型评估法<sup>[32]</sup>,其中,利用复杂网络理论方法对网络脆弱性进行研究是网络科学领域在运输、城市、信息等方向的广泛实践。网络脆弱性通常定义为网络遭受极端扰动时的敏感程度和失效倾向<sup>[33]</sup>,其往往量化为极端事件造成扰动发生前后的网络结构功能性变化,变化幅度越大,则网络越脆弱<sup>[34]</sup>。网络脆弱性研究主要涉及网络关键节点识别方法及应用研究<sup>[35,36]</sup>,利用网络特征值对网络结构的脆弱性进行分析<sup>[37,38]</sup>,模拟节点失效情景来研究网络对节点和边失效的敏感程度等<sup>[31,39,40]</sup>。

综上,现有的网络脆弱性研究主要集中在交通网络、航运网络、信息网络、创新网络等,对于贸易网络脆弱性,尤其是关键矿产资源贸易网络脆弱性的研究较少。此前,有学者采用指标评价法和系统动力学方法对锂<sup>[41]</sup>、稀土<sup>[42]</sup>、钽<sup>[43]</sup>等资源的脆弱性进行了评估与分析。本文有别于前人的资源视角,以产业链为切入点,侧重于模拟贸易中断风险发生时

锂产业链贸易网络的动态变化,以识别关键节点和贸易网络的潜在风险。此外,现有的网络脆弱性研究成果主要关注单年的静态特征,缺少对多年度网络特征值的动态对比。随着战略性关键矿产对经济增长的贡献逐步提升,对未来全球经济结构和产业结构升级的作用日益凸显,国家对锂产业链的稳定性提出了更高的要求,其脆弱性研究的重要性更是不言自明。因此,本文基于蓄意攻击法模拟了贸易中断情景下锂产业链脆弱性的变化情况;并以 2021 年为案例,深入分析了重要节点退出对锂产业链脆弱性的影响。本文深化了现有的网络脆弱性研究,并为制定合理的政策及预案,以规避风险、优化现有贸易格局提供参考。

### 3 研究方法 with 数据来源

#### 3.1 研究方法

##### 3.1.1 PageRank 中心度

脆弱性分析中的一个关键问题是关键节点的识别,关键节点影响着整个网络的安全性,在确定关键节点之后,可以通过加强与关键节点的联结、或寻求新的替代路径来增强网络稳健性<sup>[44]</sup>。贸易网络中的节点具有 3 类网络特征:中心性、联系强度和网络异质性<sup>[45]</sup>。由于贸易网络是一个高度关联的网络,某些国家(地区)的中心度指标达到或接近 1,不便于模拟节点失效情景。为此,本文引入 PageRank 中心度算法来识别锂产业链贸易网络中的关键节点。近年来,越来越多的学者使用 PageRank 中心度对世界贸易网络格局进行研究,因为该算法不仅可以全面反映贸易网络特征,还进一步强化了贸易关联且弱化了相连节点中心度的影响<sup>[46]</sup>。

PageRank 中心度于 1999 年提出,被 Google 应用于对网页搜索排名进行分析。作为一种综合考虑全局网络关联的迭代算法,既反映各节点“中心枢纽”状态,同时也体现了“近朱者赤”的网络关联特征。PageRank 中心度可以反映国家(地区)对资源的控制能力,并且可以促进一国(地区)在国际分工网络中形成强大的引领能力。其计算公式为:

$$PageRank_{it} = \frac{1-c}{n} + c \sum_{j=1}^n A_{ji} \frac{PageRank_{jt}}{Out_j} \quad (1)$$

式中:  $PageRank_{it}$  表示第  $t$  年节点  $i$  的 PageRank 中心度;  $n$  为贸易网络中节点的个数;  $A_{ji}$  为有向节点转移矩阵;  $Out_j$  为节点  $j$  的出度;  $c$  为每个节点的初始

权重,本文对其取均值,具体结果由幂迭代算法所得。

### 3.1.2 攻击策略

一般而言,网络受到的扰动多源于随机策略和确定性策略,因此,脆弱性评估中的假定攻击策略法主要涉及两种场景:随机攻击和蓄意攻击。其中,随机攻击是指按照一定的概率随机删除网络中的节点,这种评估方式主要适用于随机事件对于网络的影响;蓄意攻击是按照节点的重要程度对网络中的节点进行依次删除,反映到锂产业链贸易网络中,即表现为地缘政治冲突、贸易摩擦、经济制裁等所带来的扰动对网络产生的影响。目前,对于非持续攻击研究较少,原因在于非持续攻击的仿真容易脱离现实需求,其研究结果的现实映射较差。因此,本文采用假定攻击策略法中蓄意攻击的方式模拟了锂产业链贸易网络脆弱性的波动情况,并以2021年为案例,模拟了其PageRank中心度排名前10%节点逐一失效后的网络特征值变化,并列出了基于PageRank中心度前10%节点失效后的变化率,以此反映锂产业链全球贸易网络中重要节点国家(地区)退出对锂产业链网络脆弱性的影响。

### 3.1.3 脆弱性评价指标

为了分析锂产业链贸易网络脆弱性变化,需要选择对其影响最为相关的网络特征值。现有网络脆弱性研究可以细分为基于拓扑结构的脆弱性研究和基于系统的脆弱性研究两类。在基于拓扑结构的脆弱性研究中,网络效率和连通性是两项重要的性能指标<sup>[47]</sup>;基于系统的脆弱性研究更侧重于网络的功能性,网络流是反映网络性能的最佳指标<sup>[48,49]</sup>。本文选取了反映网络聚集程度的集聚系数,反映贸易交互效率高低的平均最短路径,反映节点间互动能力的介数中心性和反映网络中要素流动难易程

度的网络效率来量化锂产业链的网络脆弱性变化情况,指标选取依据如表1所示。

(1)集聚系数( $C$ )在本文中反映了网络集聚性,公式如下:

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \frac{m}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

式中: $k_i$ 为节点 $i$ 的度值; $m$ 为节点 $i$ 的各邻居之间的数量。

(2)平均最短路径( $L$ )在本文中反映了网络传输性,公式如下:

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (3)$$

式中: $d_{ij}$ 为节点 $i$ 和节点 $j$ 之间的最短路径,即最短边数。

(3)介数中心性( $BC$ )在本文中反映了网络互动性,公式如下:

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq l} \frac{g_{sl}^i}{g_{sl}} \quad (4)$$

式中: $g_{sl}^i$ 为这些路径经过节点 $i$ 的次数; $g_{sl}$ 为节点 $s$ 到节点 $l$ 的最短路径的数量。

(4)网络效率( $E$ )在本文中反映了网络效率性,公式如下:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} \quad (5)$$

式中: $h_{ij}$ 为距离 $d_{ij}$ 的倒数。

## 3.2 数据来源

现有对于锂产业链的产品选择尚未统一,但结合Tian等<sup>[55]</sup>、Shao等<sup>[56]</sup>、Chen等<sup>[57]</sup>、Hu等<sup>[58]</sup>、Sun等<sup>[59]</sup>的研究,确定了覆盖锂产业链上游、中游和下游的9种相关产品(表2)。锂广泛应用于电池、陶瓷、玻璃、润滑剂、制冷液、核工业以及光电等行业。随着

表1 锂产业链脆弱性衡量指标及选取依据

Table 1 Measurement indicators and selection criteria for vulnerability in the lithium industrial chain

指标	说明	参考依据
集聚系数( $C$ )	集聚系数指在一个网络中,各个节点聚集在一起的程度。度量一个整体网络的贸易密切性,即该网络中各个节点的聚类系数的平均值	[39]
平均最短路径( $L$ )	平均最短路径指经过网络中两个节点之间路径的平均值,反映节点间的平均分离程度。衡量网络中各节点之间进行贸易交互效率的高低,数值越大说明贸易之间传输需要跨越的边数越多,贸易效率越低	[50,51]
介数中心性( $BC$ )	介数中心性指网络中最短路径穿过该节点的次数。衡量在网络中发挥桥梁作用的节点的中介能力,代表了某节点与其他节点之间的互动程度	[52,53]
网络效率( $E$ )	网络效率指网络所有节点效率的总和,反映要素在网络中流动的难易程度,即效率值越高连通性越好	[54]

2024年1月

表2 本文所涉及的产品海关代码

产业链	海关编码	产品名称	数据覆盖年份
上游	HS280519	锂;其他碱金属及碱土金属	2000—2021
中游	HS282520	氢氧化锂;锂的氧化物	2000—2021
	HS283691	碳酸锂	2000—2021
	HS290433	全氟辛基磺酸锂	2016—2021
	HS282690	六氟磷酸锂	2000—2021
	HS282739	氯化锂	2000—2021
	HS284169	锰酸锂	2000—2021
下游	HS850650	锂的原电池及原电池组	2000—2021
	HS850760	纯电动汽车或插电式混合动力汽车用锂离子蓄电池单体	2011—2021

电脑、数码相机、手机、移动电动工具等电子产品的不断发展,电池行业已经成为锂最大的消费领域。在此,仅考虑锂产业链下游的头部行业作为研究对象。产品数据来源于联合国商品贸易统计数据库(United Nations Commodity Trade Statistic Database, UN Comtrade),基于python收集了2000—2021年9种产品的全球贸易额数据,并根据产业链分类对相应产品贸易额进行了加总。UN Comtrade以其广泛的覆盖面而广受认可,但是由于收集过程和测量标准的差异使得数据存在一些问题,主要包括:①存在某些国家(地区)间的贸易额(量)为0的情况;②*i*国(地区)进(出)口*j*国(地区)的贸易额(量)与*j*国(地区)出(进)口*i*国(地区)的贸易额(量)存在出入<sup>[60]</sup>。对于第一种问题,将这些没有值的国家(地区)间贸易关系进行了剔除;对于第二种问题,可能的原因是各国统计口径的差异,对两者进行了均值处理。

## 4 结果与分析

### 4.1 锂产业链贸易流向分析

基于UN Comtrade中9种相关产品的全球贸易数据绘制2000年和2021年全球贸易流向图发现,锂产业链的上游呈现贸易分散化的特征(图1),由2000年的以美国为核心的亚太区块和以德国为核心的欧洲区块的“两极格局”逐渐裂变为2021年的中国占主导的“多极格局”;随着新能源革命的驱动,锂资源的供需矛盾进一步加剧,虽然中国具有得天独厚的资源优势,锂矿储量位居全球第四,尤

其是盐湖型锂矿储量具有显著优势,但资源总量难以长期支撑中国作为全球最大锂动力电池生产国和出口地的地位,这使得中国锂资源对外依存度较高。随着各国开始追求进口替代国多元化,锂产业链上游的国际贸易呈现分散化的特征。

锂产业链中游呈现贸易集中化的特征(图2),由2000年以美国、日本、欧洲为核心的“三足鼎立”格局逐渐转变为2021年以中国和韩国为核心的“两极格局”。中国凭借其成本优势在锂产业链中游成为不可替代的一部分,作为“世界工厂”、锂盐加工大国,中国掌握了全球绝大多数的锂加工产能,逐渐跻身锂产业链中游全球贸易的核心位置,与韩国形成“两极格局”。

锂产业链下游呈现极化转移现象(图3),由2000年的以日本为核心的“单极格局”转化为2021年以中国为核心的“单极格局”。随着中国新能源汽车产业的急速发展和国家战略布局的深化,其在锂产业链下游的产品需求骤增,推动锂产业链下游的全球贸易格局的深刻变革,逐渐取代日本成为锂产业链下游的核心贸易国家。

锂产业链各端格局的变革是市场和生产双重作用的产物,欧洲市场、北美市场、亚洲市场相互竞争、相互支撑,与此同时,各个区域内要素的供给也相对独立。中国是全球最大的锂矿石加工中心,在动力电池材料、系统和工艺方面正在加快创新,动力电池单体技术、关键材料技术、制造技术、测试评价技术等正在快速提升,已经达到全球领先水平。此外,中国在节能与新能源汽车领域具备良好的基础,是全球第三大锂电池生产国,拥有庞大的产业规模和完善的产业链。在成本最小化的推动下,中国在全球锂产业链贸易网络中的价值日益明显。

### 4.2 节点重要度核密度估计

本文基于Python分别计算出锂产业链2000年、2021年的PageRank中心度,前10%的节点分布如表3所示。锂产业链的上游、中游和下游的贸易网络中PageRank中心度排名前10%的国家(地区)变化较大,这20年间,锂产业链上游和中游的贸易网络呈现收缩趋势,其PageRank中心度排名前10%的国家(地区)分别减少了1个和4个;锂产业链下游的

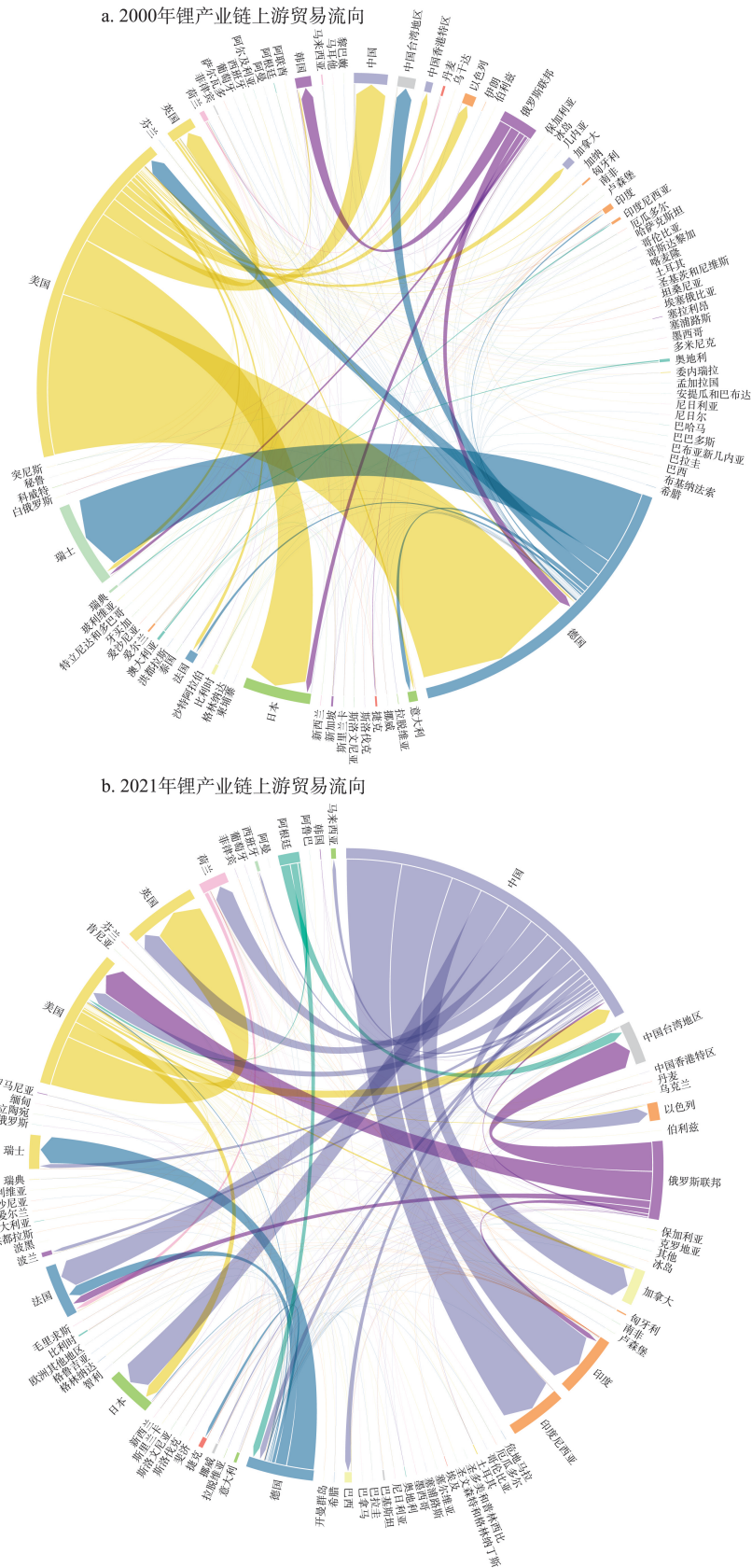


图1 2000和2021年锂产业链上游贸易流向

Figure 1 Trade flows in the upstream of the lithium industrial chain, 2000 and 2021

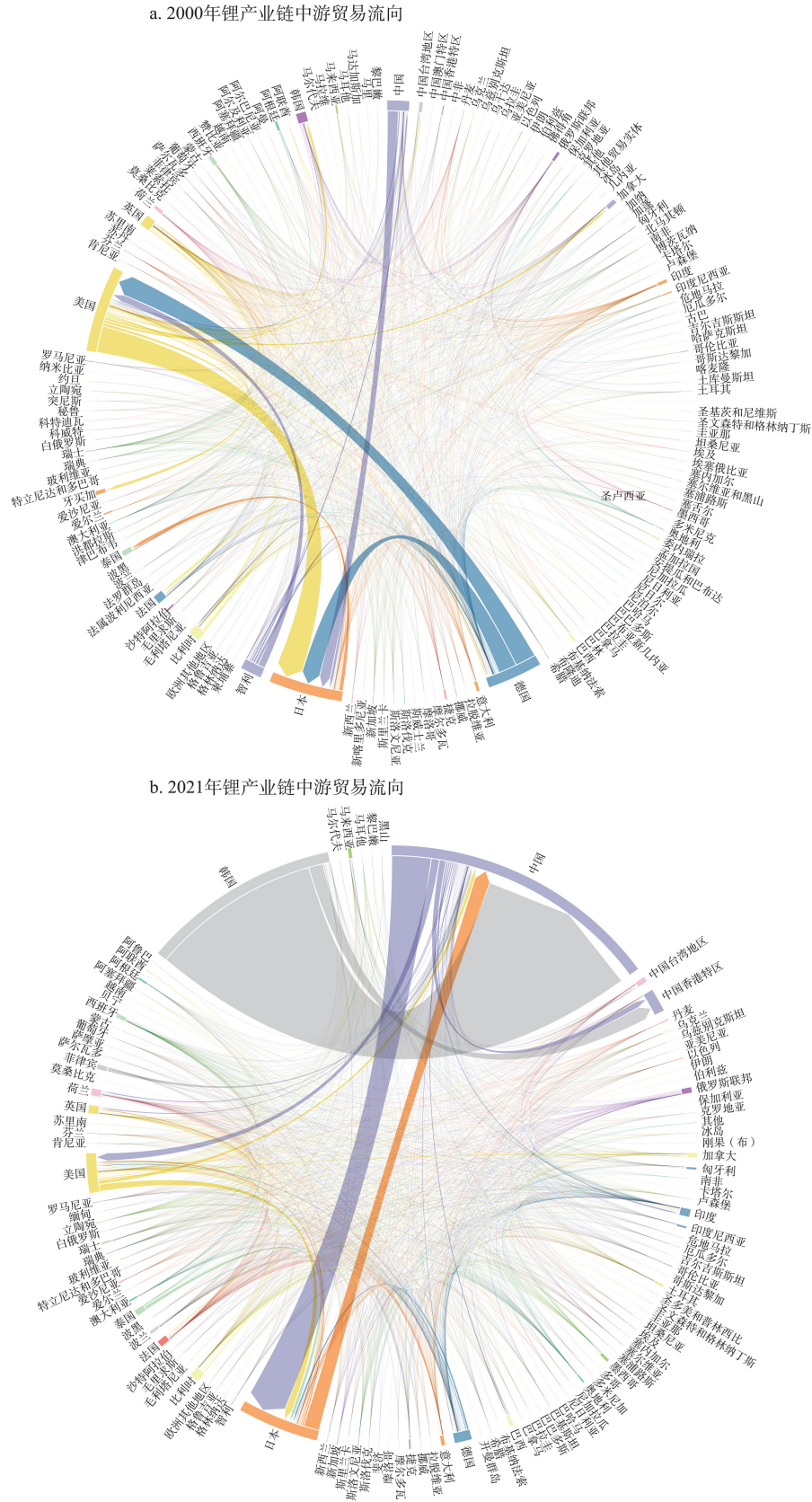
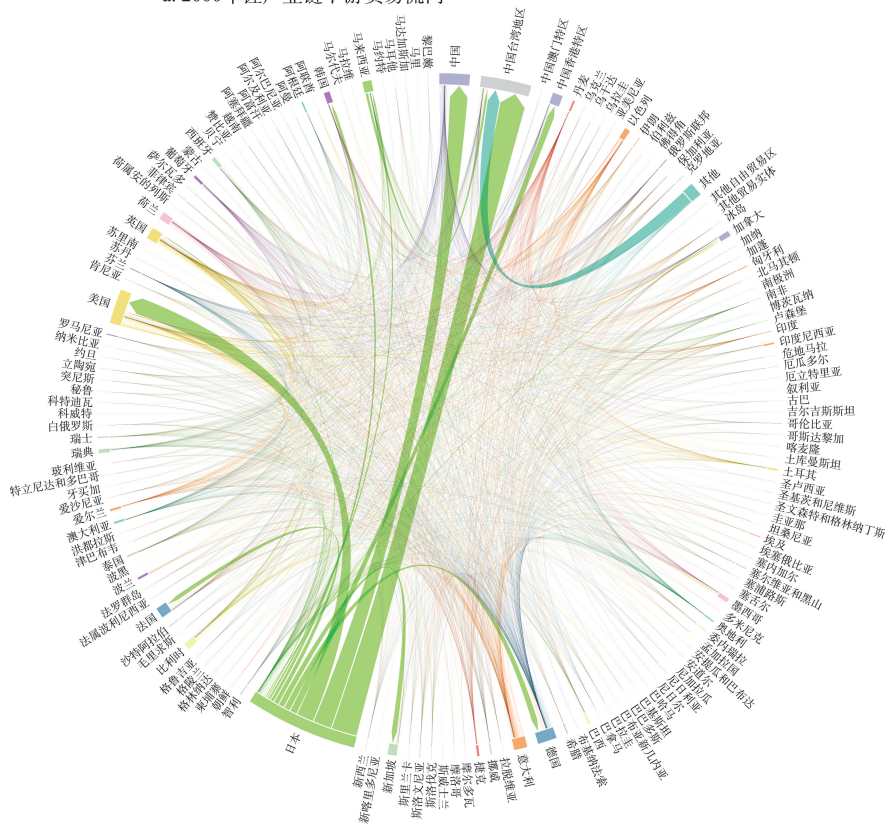


图2 2000和2021年锂产业链中游贸易流向

Figure 2 Trade flows in the midstream of the lithium industrial chain, 2000 and 2021

a. 2000年锂产业链下游贸易流向



b. 2021年锂产业链下游贸易流向

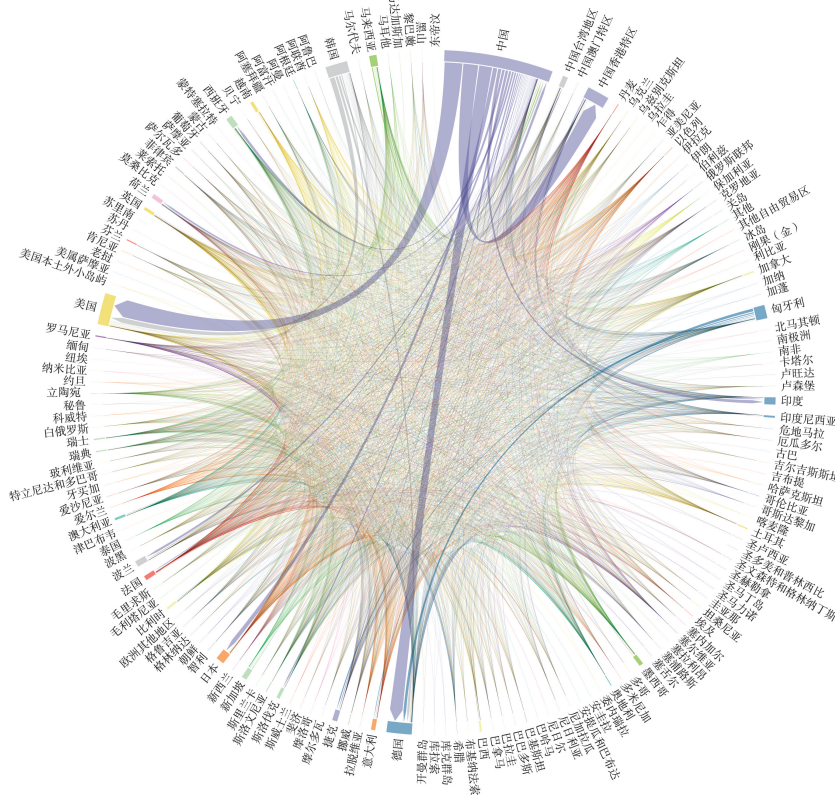


图3 2000和2021年锂产业链下游贸易流向

Figure 3 Trade flows in the downstream of the lithium industrial chain, 2000 and 2021

2024年1月

表3 2000和2021年PageRank中心度前10%的国家(地区)

Table 3 Top 10% of countries or regions based on PageRank centrality, 2000 and 2021

年份	产业链	PageRank中心度前10%的节点
2000	上游(9)	瑞士、德国、埃塞俄比亚、丹麦、厄瓜多尔、科威特、印度、印度尼西亚、日本
	中游(15)	日本、泰国、美国、德国、法国、中国、印度尼西亚、印度、英国、中国台湾地区、捷克、斯洛伐克、比利时、韩国、科威特
	下游(15)	美国、英国、法国、中国、德国、委内瑞拉、拉脱维亚、中国台湾地区、爱沙尼亚、哥伦比亚、新加坡、荷兰、西班牙、加拿大、巴西
2021	上游(8)	法国、荷兰、意大利、印度、德国、巴基斯坦、瑞士、比利时
	中游(11)	日本、中国、美国、德国、荷兰、法国、印度、意大利、丹麦、马来西亚、英国
	下游(16)	美国、德国、荷兰、法国、中国、中国台湾地区、西班牙、意大利、墨西哥、波兰、印度、英国、奥地利、罗马尼亚、中国香港特区、日本

贸易网络呈现扩张趋势,其PageRank中心度排名前10%的国家(地区)增加1个。其中,欧洲在锂产业链上游、中游和下游均占据重要位置;中国在锂产业链中游和下游的重要性逐渐凸显,得益于中国对锂产业链的布局,其下游发展前景较为乐观,但在上游的资源控制力方面仍有待加强。

此外,为了观察锂产业链贸易网络中PageRank中心度分布的动态演进特征,分别作出2000年和2021年的锂产业链全球贸易网络PageRank中心度的核密度估计图(图4)。研究表明:①就共性特征而言,上游、中游和下游的核密度曲线均存在右拖尾特征,表明存在较高PageRank中心度的节点,少部分的核心国家(地区)掌握着绝对的贸易控制权。此外,核密度曲线主峰高度均呈现下降趋势,表明在PageRank中心度的高值区域内一些节点的重要性降低,这可能与网络结构的演变或某些节点失去贸易联结有关,进一步印证了贸易中断发生的可能性;②上游和中游的核密度曲线均向右侧移动,意味着锂产业链上游和中游的节点在PageRank中心度值上有所增加,上游和中游的某些节点在网络中可能具有更大的连接度或重要性。下游的核密度曲线向左侧移动,意味着锂产业链下游节点在

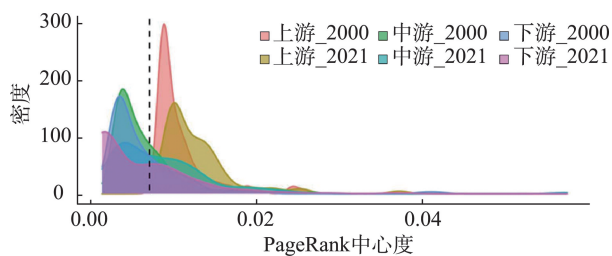


图4 2000和2021年锂产业链贸易网络PageRank中心度核密度估计图

Figure 4 PageRank centrality kernel density estimation plot of the trade network in the lithium industrial chain, 2000 and 2021

PageRank中心度值上有所下降;③2021年上游和中游的核密度曲线呈现收敛趋势,表明其PageRank中心度的分布趋于稳定。此外,在2021年的上游、中游和下游的核密度曲线上均呈现多峰现象,表明锂产业链的全球贸易网络呈现出“多中心”的现象,从一开始的贸易集中于某几个国家(地区),到越来越多的国家(地区)建立了更广泛的贸易关系。

### 4.3 锂产业链贸易网络脆弱性

#### 4.3.1 锂产业链贸易网络脆弱性演化

本文模拟了2000、2005、2010和2020年贸易中断情景下的锂产业链脆弱性演化情况,结果对比如下:

(1)样本期内,锂产业链上游的网络抗毁性有所提升,节点冲击对网络结构的波动减弱(图5)。具体而言,2000和2020年网络集聚性、网络传输性、网络互动性和网络效率性的年平均增长率分别为-43.55%和-6.75%,-30.47%和-16.55%,-26.99%和-13.65%,-31.41%和-18.56%。上游网络集聚性特征值有所增加,表明上游网络紧密度提升。此外,网络集聚性、网络传输性、网络互动性和网络效率性对锂产业链上游网络脆弱性具有负面影响。

(2)锂产业链中游网络较稳定。网络互动性的特征值有所增加,这表明越来越多的节点在网络中充当着“桥梁”的重要位置,节点间的联通度大大提高(图6)。具体而言,2000和2020年网络集聚性、网络传输性、网络互动性和网络效率性的年平均增长率分别为-57.45%和-48.07%,-23.09%和-26.09%,-42.69%和-1.65%,-16.79%和2.48%。其中,网络互动性对锂产业链中游网络脆弱性的具有正面影响,网络集聚性、网络传输性和网络效率性表现为负面影响。

(3)锂产业链下游网络发展稳定,网络集聚性的波动最为显著(图7)。具体而言,2000和2020年网



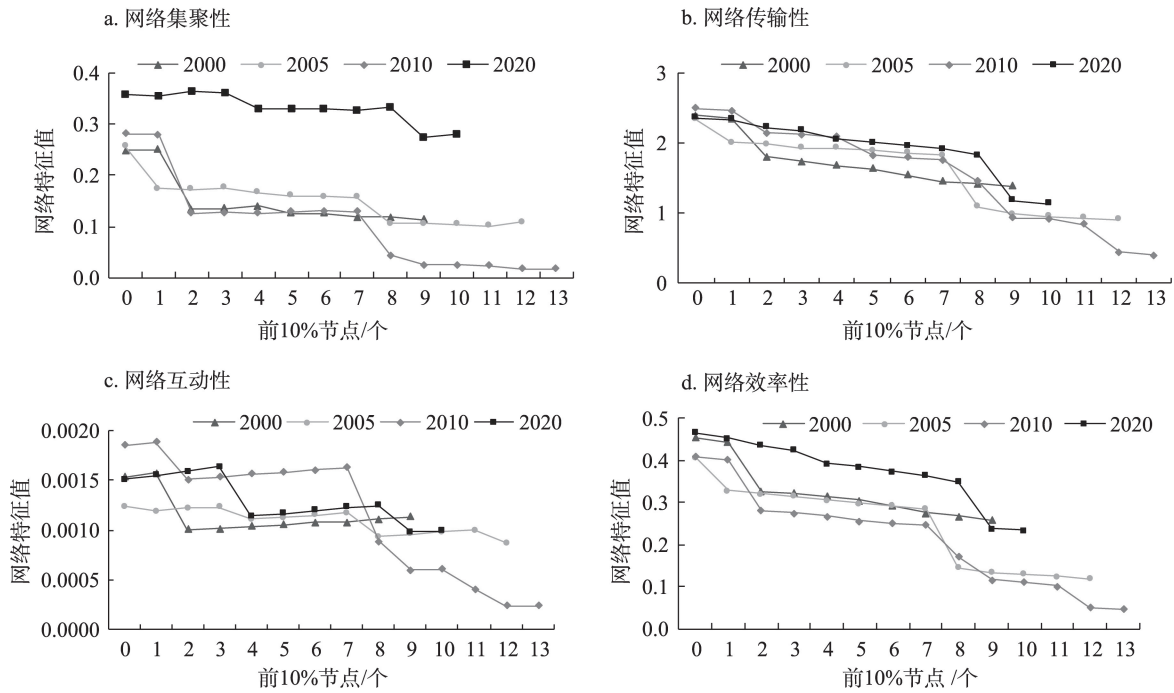


图5 2000、2005、2010和2020年蓄意攻击锂产业链上游前10%节点后网络特征值变化对比

Figure 5 Comparison of network characteristic value changes in the top 10% of intentionally targeted nodes in the upstream of the lithium industrial chain, 2000, 2005, 2010, and 2020

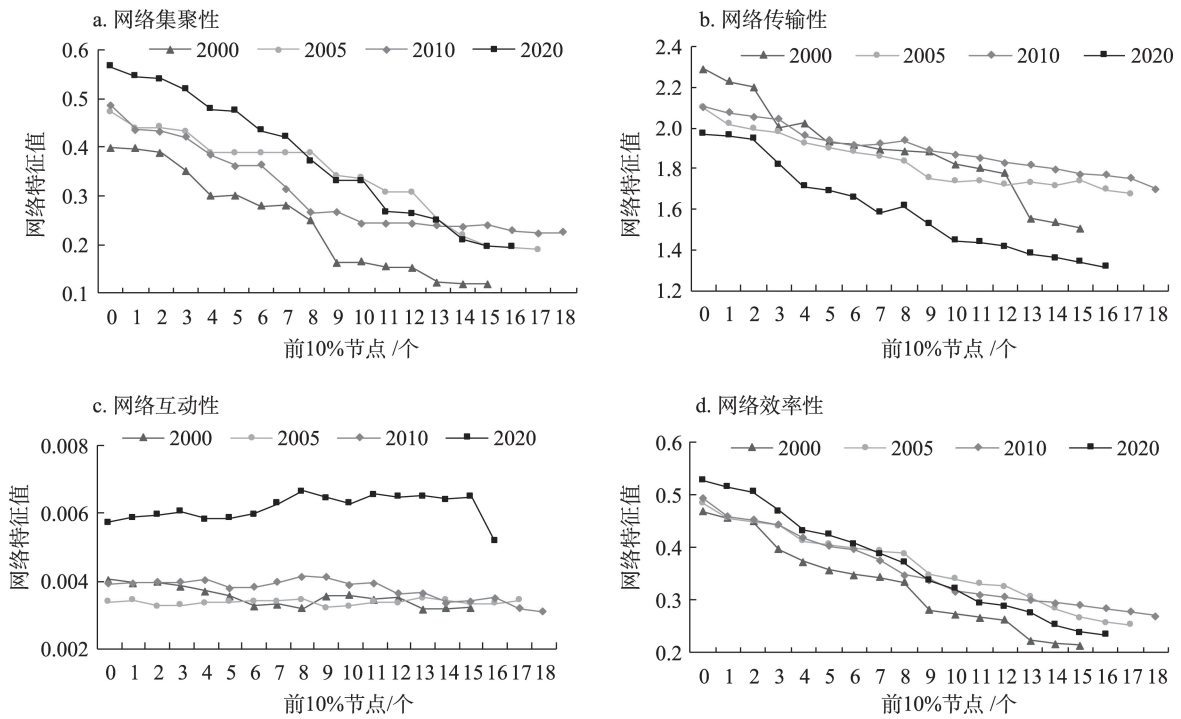


图6 2000、2005、2010和2020年蓄意攻击锂产业链中游前10%节点后网络特征值变化对比

Figure 6 Comparison of network characteristic value changes in the top 10% of intentionally targeted nodes in the midstream of the lithium industrial chain, 2000, 2005, 2010, and 2020

2024年1月

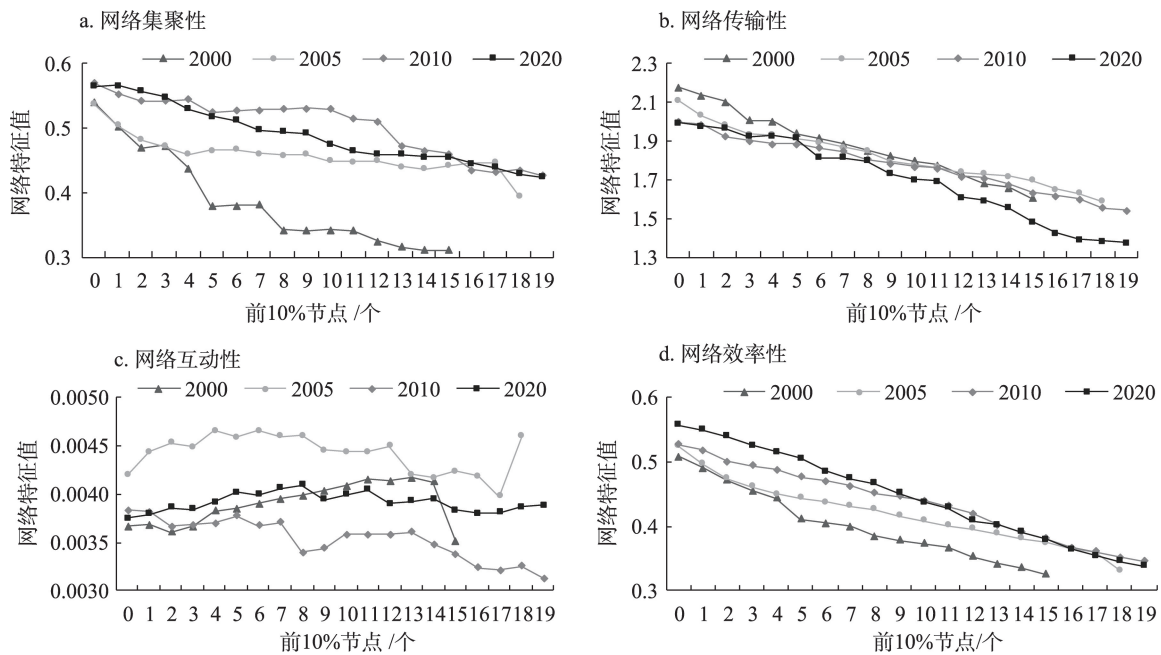


图7 2000、2005、2010和2020年蓄意攻击锂产业链下游前10%节点后网络特征值变化对比

Figure 7 Comparison of network characteristic value changes in the top 10% of intentionally targeted nodes in the downstream of the lithium industrial chain, 2000, 2005, 2010, and 2020

络集聚性、网络传输性、网络互动性和网络效率性的年平均增长率分别为-39.83%和-19.68%，-21.57%和-22.95%，-9.97%和4.16%，-31.08%和-29.80%。其中，网络互动性对锂产业链下游网络脆弱性具有正面影响，网络集聚性、网络传输性和网络效率性表现为负面影响。

总体而言，锂产业链上游网络2020年相对于2000年更加稳定，中游和下游网络的互动性波动较小，说明节点间的贸易联系相对稳定。从网络脆弱性的动态演变来看，锂产业链在过去20年间经历了积极的演变，趋向更为健康和可靠的状态。

#### 4.3.2 节点对锂产业链贸易网络脆弱性的影响

图8-10反映了2021年蓄意攻击下锂产业链脆弱性变化和重要国家(地区)贸易中断后网络特征值的变化率。总体而言，随着节点逐渐退出，锂产业链的网络集聚性、传输性、互动性和效率性均呈现幂律曲线下下降趋势。锂资源的分布和可采程度对上游网络结构具有一定影响，其中，资源垄断现象导致锂产业链上游网络出现锁定效应，进而使得节点失效对网络结构产生较大的波动，增加了网络脆弱性。

集聚系数越大说明网络中的节点联系越紧密，这更有利于网络抱团抵御风险：①当上游前10%节点失效后，锂产业链贸易网络的集聚系数呈阶梯状下降，平均下降幅度约40%。法国、荷兰、意大利和印度的节点失效对网络集聚性影响较小，直到德国节点失效后，网络集聚性开始呈现陡崖式下降，整体抗风险能力明显减弱。②当中游前10%节点失效后，集聚系数呈断点下降，整体下降约50%。日本、中国、美国、德国、荷兰的失效对网络紧密性影响显著。③当下游前10%节点失效后，集聚系数持续下降，整体下降约40%。

当网络具有较高的传输性时，节点能够更迅速地获取和传递关键信息，有利于节点更有效地响应风险，因此，节点间的协调发展和抵御风险的能力也会提升。此外，传输性高的网络更具有灵活性和适应性，节点能够更迅速地调整自身策略以适应变化，这使得网络在面对突发事件或节点失效时能够更高效地做出反应。当锂产业链前10%节点失效后，平均最短路径持续下降，其中，上游网络受影响程度最大，下降约40%；中、下游分别下降约30%。此外，随着法国的退出，下游贸易网络的传输性显

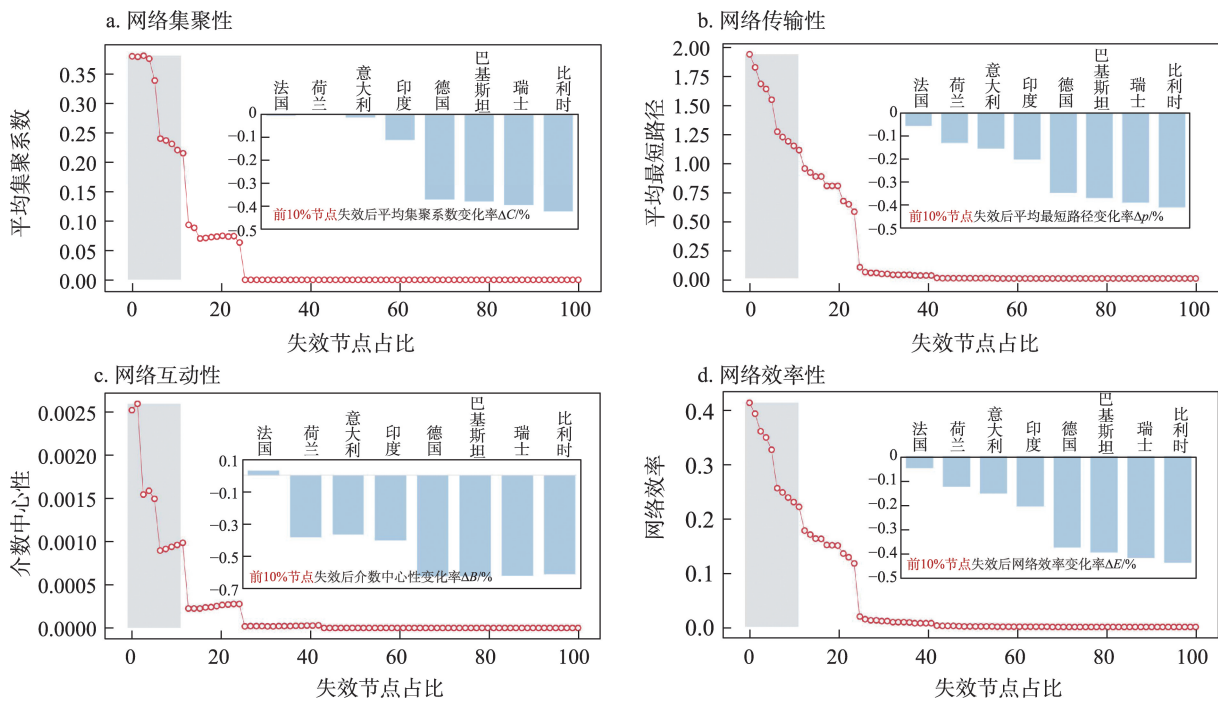


图8 2021年锂产业链上游网络脆弱性分析

Figure 8 Analysis of network vulnerability in the upstream of the lithium industrial chain, 2021

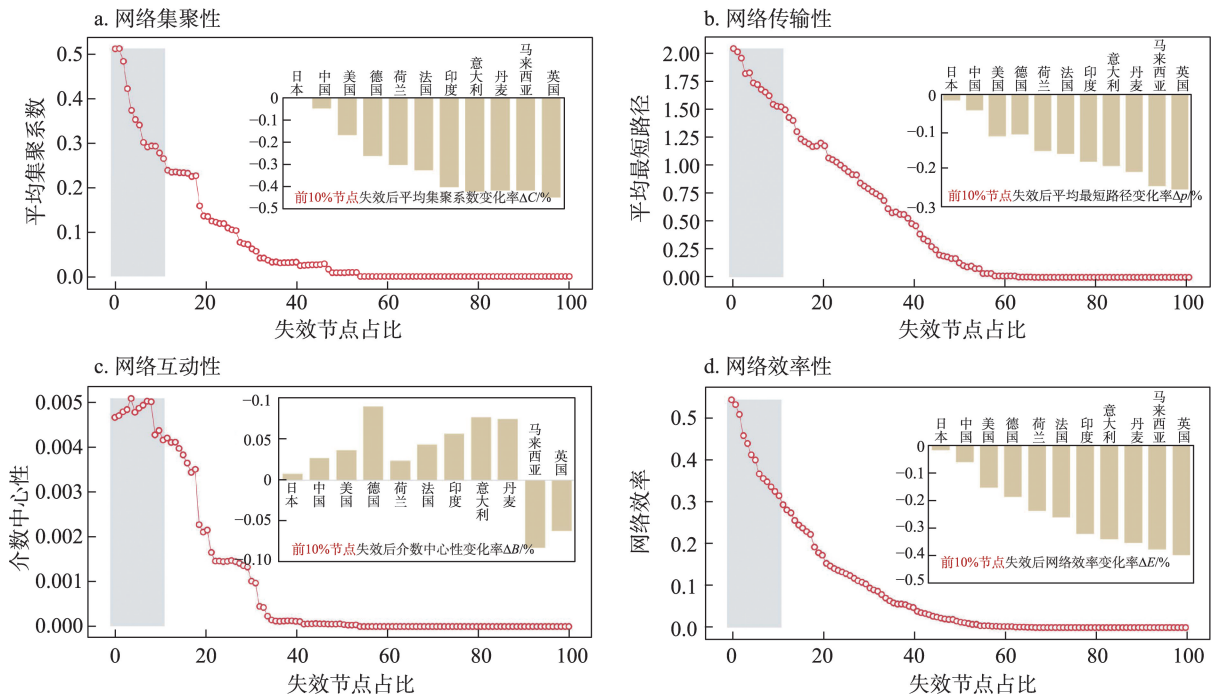


图9 2021年锂产业链中游网络脆弱性分析

Figure 9 Analysis of network vulnerability in the midstream of the lithium industrial chain, 2021

著下降。

就网络互动性而言,当前10%节点失效后,锂产业链上游的介数中心性呈现阶梯式下降态势(约

70%),节点的连续失效使得上游节点间紧密程度迅速下降,这可能是因为随着节点的连续失效,网络内部连接的断裂逐渐扩散,导致网络结构的不稳定

2024年1月

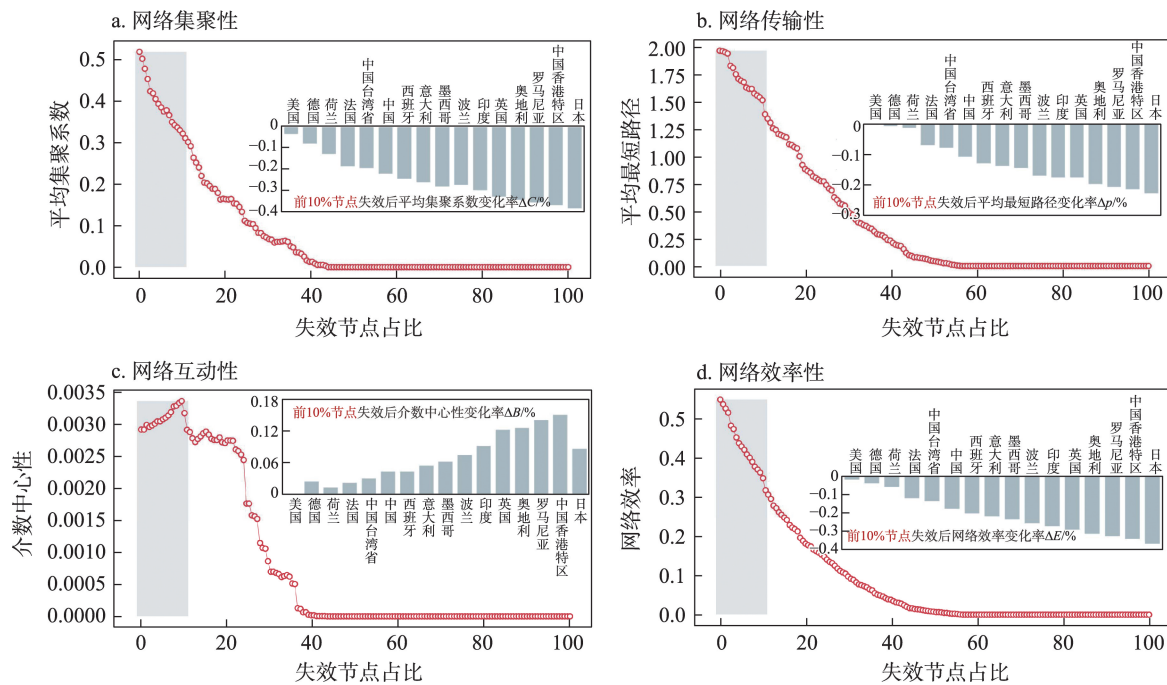


图10 2021年锂产业链下游网络脆弱性分析

Figure 10 Analysis of network vulnerability in the downstream of the lithium industrial chain, 2021

性增加,脆弱性影响逐渐扩大。此外,中游和下游的互动性呈现“倒V”型趋势,说明节点连续失效背景下,中游和下游节点需要更频繁地进行中转和协调,一些节点的中转职能有所提升,提升了互动性。但随着时间的推移,节点采取应对措施后使得增幅在后期有所减缓。

就网络效率性而言,当前10%节点失效后,锂产业链上游的网络效率呈现断点式下降态势(约40%);中游和下游的网络效率下降分别约40%和30%。节点失效后的网络效率对上游和中游影响最大。原因在于,关键节点的集中性使得网络的鲁棒性降低,一旦关键节点失效,可能引起大规模的断裂和信息流阻塞,而其他节点高度依赖于这些节点,失去这些关键节点可能导致信息传递和资源流动的中断,影响整个网络的协同运作,从而降低整个网络的运作效率。

## 5 结论与建议

### 5.1 结论

国家(地区)间的贸易联系与依存关系愈发紧密,世界范围内已架构起一个复杂网络系统,“牵一发而动全身”的连锁反应使全球系统性风险凸显。

本文基于UN Comtrade刻画了锂产业链2000—2021年的全球贸易格局演化,模拟并分析了贸易中断情景下的锂产业链脆弱性动态变化。主要结论如下:

(1)锂产业链贸易格局正在面临重组与变革。锂产业链上游贸易分散化特征明显,逐渐形成“多极格局”;中游转变为以中国和韩国为核心的“两极格局”;中国在中游的主导地位凸显。

(2)锂产业链贸易网络协同水平有所提高,脆弱性呈现减弱趋势。样本期内,上游的网络抗毁性有所提升,节点冲击对其网络结构的波动有所减弱;中游和下游网络发展较稳定,节点冲击对其网络结构的波动影响较小。锂产业链上游和下游的网络集聚性显著提升,网络紧密程度增加;中游网络互动性显著增加,越来越多的节点在网络中充当着“桥梁”的重要位置,节点间的联通度大大提高。

(3)产业链脆弱性排名为:下游<中游<上游。上游网络面临瘫痪的临界点为前20%左右,中游和下游的网络面临瘫痪的临界点在40%~60%之间。当PageRank前10%的节点失效后,上游、中游和下游贸易网络的整体性能分别平均下降60%、35%和23.5%。中国锂资源国内保障程度不足,对外依存

度较高,锂资源产业上游脆弱性明显。

## 5.2 建议

基于以上研究结论,本文提出如下对策建议:

(1)建立和完善锂产业链安全风险预警与应急保障机制。加强对产业链韧性和风险点的监测与评估,精确识别与预测产业链链路中的脆弱环节和可能中断的节点,做好不同风险和产业链中断情形下的应急保障预案。

(2)建立产业链各利益主体之间的合作共赢机制,增强产业链与供应链、价值链之间的正向响应能力,提高锂产业企业之间、上中下游之间、国际国内之间的协同水平。

(3)提高锂资源国内自主供给保障能力和全球配置能力。一方面,要加大中国锂资源的勘探开发力度,提高锂资源的矿产地储备水平,促进锂资源增储上产,建立锂矿产资源数据库,查明家底,夯实资源安全根基。另一方面,要进一步稳定和扩大锂资源进口端的布局,加强锂资源海外基地建设,建立和完善安全运输通道,实施资源来源多元化战略。

本文所模拟的是基于PageRank中心度前10%的节点发生贸易中断情景后全球锂产业链脆弱性的动态变化,对于特定节点退出情景和动态比例退出情景下全球锂产业链贸易网络脆弱性的影响是下一步的研究重点。此外,探究贸易中断产生的风险涟漪效应对具体节点的影响也是值得深入研究的问题之一。

## 参考文献(References):

- [1] 沈曦,郭海湘,成金华. 突发风险下关键矿产供应链网络节点韧性评估:以镍矿产品为例[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 85-96. [Shen X, Guo H X, Cheng J H. The resilience of nodes incritical mineral resources supply chain networks under emergent risk: Take nickel products as an example[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 85-96.]
- [2] 陈甲斌,刘超,冯丹丹,等. 矿产资源安全需要关注的六个风险问题[J]. 中国国土资源经济, 2022, 35(1): 15-21. [Chen J B, Liu C, Feng D D, et al. Six risk problems of mineral resources security need to focus on[J]. Natural Resource Economics of China, 2022, 35(1): 15-21.]
- [3] 张杰, 逯艳. 提升产业链供应链韧性和安全的理论探究与实现路径[J]. 中州学刊, 2023, (7): 37-43. [Zhang J, Lu Y. Theoretical exploration and implementation path of strengthening the resilience and safety of industrial and supply chains[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2023, (7): 37-43.]
- [4] 石建勋, 卢丹宁. 着力提升产业链供应链韧性和安全水平研究[J]. 财经问题研究, 2023, (2): 3-13. [Shi J X, Lu D N. Research on improving the resilience and security level of industrial and supply chains[J]. Research on Financial and Economic Issues, 2023, (2): 3-13.]
- [5] Bridge G, Faigen E. Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains[J]. Energy Research & Social Science, 2022, DOI: 10.1016/j.erss.2022.102659.
- [6] Sun X, Hao H, Zhao F Q, et al. Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 124: 50-61.
- [7] Liu W Q, Liu W, Li X X, et al. Dynamic material flow analysis of critical metals for lithium-ion battery system in China from 2000-2018[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, DOI:10.1016/j.resconrec.2020.105122.
- [8] Zuo Z L, Mclellan B C, Li Y L, et al. Evolution and insights into the network and pattern of the rare earths trade from an industry chain perspective[J]. Resources Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102912.2.
- [9] Zuo Z L, Cheng J H, Guo H X, et al. Catastrophe progression method-path (CPM-PATH) early warning analysis of Chinese rare earths industry security[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102161.
- [10] Liang Y, Su J, Xi B, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for greenhouse gas emissions[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 117: 285-293.
- [11] Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, et al. Global lithium availability[J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(5): 760-775.
- [12] 赵连征, 汪鹏, 汤林彬, 等. 中国锂元素动态物流及关键驱动因素分析[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 100-109. [Zhao L Z, Wang P, Tang L B, et al. Dynamic material flow and key driving factors of lithium in China[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(21): 100-109.]
- [13] Watari T, Mclellan B C, Giurco D, et al. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 148: 91-103.
- [14] Duan J, Van Kooten G C, Liu X. Renewable electricity grids, battery storage and missing money[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105001.
- [15] Barandiarán J. Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia[J]. World Development, 2019, 113(11): 381-391.
- [16] Vandepaer L, Cloutier J, Amor B. Environmental impacts of Lithi-

2024年1月

- um Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 46–60.
- [17] Han X, Liang Y, Ai Y, et al. Economic evaluation of a PV combined energy storage charging station based on cost estimation of second-use batteries[J]. *Energy*, 2018, 165: 326–339.
- [18] Wang F F, Deng Y L, Yuan C. Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121339.
- [19] Winslow K M, Laux S J, Townsend T G. A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 263–277.
- [20] Anable J, Brand C, Tran M, et al. Modelling transport energy demand: A socio-technical approach[J]. *Energy Policy*, 2012, 41: 125–138.
- [21] Wrålsén B, Prieto-Sandoval V, Mejia-Villa A, et al. Circular business models for lithium-ion batteries—Stakeholders, barriers, and drivers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128393.
- [22] Mrozik W, Rajaeifar M A, Heidrich O, et al. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(12): 6099–6121.
- [23] 姚海琳, 王昶, 黄健柏. EPR下我国新能源汽车动力电池回收利用模式研究[J]. *科技管理研究*, 2015, 35(18): 84–89. [Yao H L, Wang C, Huang J B. Mode of new automotive battery reclamation with restriction of extended producer responsibility[J]. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(18): 84–89.]
- [24] Timmermann P. *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Applications*[M]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- [25] 李鹤, 张平宇. 全球变化背景下脆弱性研究进展与应用展望[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 920–929. [Li H, Zhang P Y. Research progress and prospective applications of vulnerability approach under global change[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(7): 920–929.]
- [26] 马恒, 张钢锋, 史培军. 畜牧业雪灾致灾成害过程和风险评估研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(12): 2116–2129. [Ma H, Zhang G F, Shi P J. Advances and prospects of livestock snow disaster mechanism research and risk assessment[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(12): 2116–2129.]
- [27] Benzie K M, Perry R, Cope Williams J. Influence of the COVID-19 pandemic on executive skills in Canadians experiencing social vulnerability: A descriptive study[J]. *Health & Social Care in the Community*, 2022, 30(5): 1853–1861.
- [28] Al-Amin A Q, Nagy G J, Masud M M, et al. Evaluating the impacts of climate disasters and the integration of adaptive flood risk management[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101241.
- [29] 宋小青, 申雅静, 王雄, 等. 耕地利用转型中的生物灾害脆弱性研究[J]. *地理学报*, 2020, 75(11): 2362–2379. [Song X Q, Shen Y J, Wang X, et al. Vulnerability to biological disasters: A novel field of cultivated land use transition research[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2362–2379.]
- [30] 崔晓敏, 熊婉婷, 杨盼盼, 等. 全球供应链脆弱性测度: 基于贸易网络方法的分析[J]. *统计研究*, 2022, 39(8): 38–52. [Cui X M, Xiong W T, Yang P P, et al. Measuring global supply chain fragility: Evidence from trade network analysis[J]. *Statistical Research*, 2022, 39(8): 38–52.]
- [31] 王绍博, 段伟, 秦娅风, 等. 高铁网络空间组织模式及其脆弱性评估: 以长三角为例[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 1079–1089. [Wang S B, Duan W, Qin Y F, et al. Spatial organization model and its vulnerability assessment of high-speed rail network: Taking the Yangtze River Delta as an example[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 1079–1089.]
- [32] 沈吟东, 宫剑. 基于区域划分的地铁网络脆弱性评价方法[J]. *系统工程学报*, 2018, 33(3): 289–297. [Shen Y D, Gong J. Vulnerability assessment of urban metro network based on region partitioning[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(3): 289–297.]
- [33] Berdica K. An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done?[J]. *Transport Policy*, 2002, 9(2): 117–127.
- [34] Gu Y, Fu X, Liu Z, et al. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, DOI: 10.1016/j.tre.2019.11.003.
- [35] 程光权, 陆永中, 张明星, 等. 复杂网络节点重要度评估及网络脆弱性分析[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(1): 120–127. [Cheng G Q, Lu Y Z, Zhang M X, et al. Node importance evaluation and network vulnerability analysis on complex network[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(1): 120–127.]
- [36] 吴迪, 王宇鹏, 盛世杰, 等. “21世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络的脆弱性变化[J]. *地理学报*, 2022, 77(8): 2067–2082. [Wu D, Wang Y P, Sheng S J, et al. Vulnerability changes of the maritime silk road shipping network under intentional attacks[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 2067–2082.]
- [37] 王列辉, 张圣, 陈锐. 南海周边航运网络脆弱性及对中国集装箱运输的影响[J]. *世界地理研究*, 2022, 31(4): 700–712. [Wang L H, Zhang S, Chen R. Network vulnerability of ports around the south China sea and the impact on Chinese maritime transport[J]. *World Regional Studies*, 2022, 31(4): 700–712.]

- [38] 彭澎,程诗奋,刘希亮,等.全球海洋运输网络健壮性评估[J].地理学报,2017,72(12):2241-2251.[Peng P, Cheng S F, Liu X L, et al. The robustness evaluation of global maritime transportation networks[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(12): 2241-2251.]
- [39] 王诺,董玲玲,吴暖,等.蓄意攻击下全球集装箱海运网络脆弱性变化[J].地理学报,2016,71(2):293-303.[Wang N, Dong L L, Wu N, et al. The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 293-303.]
- [40] 何瑶,杨永春,郭建科.中断模拟下的中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性[J].资源科学,2022,44(2):414-424.[He Y, Yang Y C, Guo J K. Vulnerability of the shipping network of China's coastal container ports under disruption simulation[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 414-424.]
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Mancheri N A, Sprecher B, Deetman S, et al. Resilience in the tantalum supply chain[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 56-69.
- [44] Chen B Y, Lam W H K, Sumalee A, et al. Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012, 46(3): 501-516.
- [45] 马述忠,任婉婉,吴国杰.一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响:基于社会网络分析视角[J].管理世界,2016,(3):60-72.[Ma S Z, Ren W W, Wu G J. The characteristics of agricultural trade network and its effects on the global value chain division: A study based on social network analysis[J]. *Journal of Management World*, 2016, (3): 60-72.]
- [46] 蒋雪梅,张少雪.基于PageRank算法的中间品全球贸易网络格局演变分析[J].国际商务研究,2021,42(1):38-49.[Jiang X M, Zhang S X. The evolution of global intermediate trade network based on PageRank algorithm[J]. *International Business Research*, 2021, 42(1): 38-49.]
- [47] Mattsson L G, Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems: A discussion of recent research[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 16-34.
- [48] Jenelius E, Petersen T, Mattsson L G. Importance and exposure in road network vulnerability analysis[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006, 40(7): 537-560.
- [49] 何瑶,杨永春,郭建科.中断模拟下的中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性[J].资源科学,2022,44(2):414-424.[He Y, Yang Y C, Guo J K. Vulnerability of the shipping network of China's coastal container ports under disruption simulation[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 414-424.]
- [50] 田炜,邓贵仕,武佩剑.具有无标度特性的港航系统网络效应分析[J].管理学报,2008,(3):381-384.[Tian W, Deng G S, Wu P J. Analysis of network effect in port and shipping system characterized by scale-free network[J]. *Chinese Journal of Management*, 2008, (3): 381-384.]
- [51] 田炜,邓贵仕,武佩剑,等.世界航运网络复杂性分析[J].大连理工大学学报,2007,(4):605-609.[Tian W, Deng G S, Wu P J, et al. Analysis of complexity in global shipping network[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, (4): 605-609.]
- [52] 于娱,马代鹏,王贤梅.国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J].资源科学,2022,44(10):2006-2021.[Yu Y, Ma D P, Wang X M. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources[J]. *Resources Science*, 2022, 44(10): 2006-2021.]
- [53] Sun L S, Huang Y C, Chen Y Y, et al. Vulnerability assessment of urban rail transit based on multi-static weighted method in Beijing, China[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 108: 12-24.
- [54] 李博,李治政,刘慧甜.基于复杂网络的陕西省高速公路网络脆弱性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(8):86-95.[Li B, Li Z Z, Liu H T. Vulnerability analysis of highway networks in Shaanxi Province based on complex network[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2023, 42(8): 86-95.]
- [55] 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.
- [56] Shao L G, Hu J Y, Zhang H. Evolution of global lithium competition network pattern and its influence factors[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102353.
- [57] Chen G, Kong R, Wang Y X. Research on the evolution of lithium trade communities based on the complex network[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, DOI: 10.1016/j.physa.2019.123002.
- [58] Hu X Q, Wang C, Lim M K, et al. Critical systemic risk sources in global lithium-ion battery supply networks: Static and dynamic network perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2022.113083.
- [59] Sun X, Hao H, Zhao F Q, et al. Global lithium flow 1994-2015: Implications for improving resource efficiency and security[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 2827-2834.
- [60] Chen C K, Jiang Z H, Li N, et al. Advancing UN Comtrade for physical trade flow analysis: Review of data quality issues and solutions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106526.

# Evolution and vulnerability analysis of the global trade pattern in the lithium industry chain

ZUO Zhili<sup>1</sup>, CHENG Jinhua<sup>2</sup>, ZHAN Cheng<sup>2</sup>, GUO Haixiang<sup>2</sup>

(1. College of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract: [Objective]** This study aims to simulate the vulnerability of the lithium industry trade network in the event of interruption risks. The goal is to effectively identify key nodes and potential risks in the network, providing decision support for optimizing trade patterns and avoiding interruption risks. **[Methods]** Analyzing the evolution of the lithium industry trade pattern based on trade flow methods, intentional attack simulations were conducted to assess the vulnerability of the lithium industry trade network after trade interruptions occurred in the top 10% of nodes by PageRank centrality. **[Results]** The research reveals: (1) The global trade pattern of the lithium industry chain is undergoing profound restructuring and transformation, with China's position highlighted in the global trade network. (2) Invulnerability in the upstream network of the lithium industry chain has improved during the sample period, while the risk resistance capabilities of the midstream and downstream networks are relatively stable. (3) The vulnerability ranking of the lithium industry chain is downstream < midstream < upstream. When trade interruptions occur in the top 10% of global key nodes, the overall performance of the upstream, midstream, and downstream trade networks decreases by an average of 60%, 35%, and 23.5%, respectively. **[Conclusion]** To maintain the security and stability of China's and the global lithium industry, the following measures should be implemented: enhance and refine safety risk warning and emergency support mechanisms within the lithium industry chain; establish a cooperative, win-win framework among key stakeholders in the lithium industry chain to bolster positive response capabilities across the industry, supply chain, and value chain; and improve domestic self-sufficiency and global allocation capabilities for lithium resources.

**Key words:** lithium industry chain; evolutionary pattern; vulnerability; kernel density estimation; trade interruption; PageRank centrality