

全球锂电池产业链贸易格局演化、趋势研判及韧性分析

李帅威^{1,2}, 王文军¹

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510650;
2. 沈阳化工大学经济与管理学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要:近年来,全球产业链正加速重构,系统性风险日益突出,通过整合全球锂电池产业上游、中游及下游的全链条贸易数据,构建覆盖“资源开采—材料加工—终端应用—回收再生”闭环的动态复杂网络模型和锂电池全产业链网络的五维韧性综合评价体系,对 2001—2023 年全球锂电池贸易网络演变特征进行分析刻画,仿真其韧性变化,提出“技术突破—资源多元化—生态闭环”三位一体策略。研究发现:2001—2023 年,锂电池全产业链网络的连通性、贸易紧密性以及传输效率均在上升,贸易网络整体向全球化、复杂化方向演变,特别是自 2019 年以来,锂电池全产业链的不稳定性增加,贸易逐渐向区域化、多极化方向转移。2001—2023 年,锂电池全产业链具有高度异质性,产业链在效率提升的同时,脆弱性也在增加;锂电池产业链的韧性从高到低依次为下游、中游、上游。基于此,提出建议:实施资源供应链产业链战略转移;从资源加工优势转向关键技术溢出;强化电池回收,构建锂电池闭环生态韧性供应链。

关键词:锂电池;国际贸易;复杂网络;产业链韧性

中图分类号:F746. 2/. 9 文献标识码:A 文章编号:1005 - 0566(2025)04 - 0026 - 15

Evolution of the global lithium battery industry chain trade structure, trend assessment, and resilience analysis

LI Shuaiwei^{1,2}, WANG Wenjun¹

(1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;*
2. *School of Economic and Management, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China*)

Abstract: In recent years, the global industrial chain has been accelerating its restructuring, with systemic risks becoming increasingly prominent. This study integrates the full chain international trade data from the upstream, midstream, and downstream of the global lithium battery industry to construct a dynamic complex network model that covers the closed-loop process of “resource extraction-material processing-end application-recycling.” Additionally, a five-dimensional comprehensive evaluation system for assessing the resilience of the entire lithium battery industrial chain network has been developed. The research analyzes and characterizes the evolution characteristics of the global lithium battery trade network from 2001 to 2023, simulating changes in its resilience. Based on the findings, a trinity strategy of “technological breakthrough-resource diversification-ecological closed-loop” is proposed. The study reveals that, from

收稿日期:2025-03-12 修回日期:2025-04-22

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金项目(2025A1515012990);中国科学院战略性先导科技专项项目(29010500)。

作者简介:李帅威(2000—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为能源经济管理。通信作者:王文军。

2001 to 2023, the connectivity, trade closeness, and transmission efficiency of the entire lithium battery industrial chain network have consistently increased, indicating that the overall trade network is evolving toward globalization and complexity. Notably, since 2019, the instability of the entire lithium battery industrial chain has risen, with trade shifting gradually toward regionalization and multi-polarization. During the study period, the entire lithium battery industrial chain exhibited high heterogeneity. While the efficiency of the industrial chain has improved, its vulnerability has also increased. The resilience of the lithium battery industrial chain, in descending order, is downstream, midstream, and upstream. The study suggests implementing the strategic transfer of the resource supply chain industrial chain, shifting from the advantage of resource processing to the spillover of key technologies, and strengthening battery recycling to build a closed-loop ecological-resilient supply chain for lithium batteries.

Key words: lithium batteries; international trade; complex networks; supply chain resilience

当今世界政治经济形势错综复杂,新一轮科技革命和产业变革持续深入,新技术、新业态、新产业层出不穷,国际贸易格局正在经历深刻变革,全球产业链重构加速演进,逐渐朝着本土化、区域化、多极化的趋势演变^[1-2]。在此背景下,产业链的安全和稳定备受各国政府重视,尤其对于经济依赖全球化供应链的国家而言,科学研判本国支柱产业在全球产业贸易网络中的韧性水平,有的放矢采取抗风险措施,增强产业的安全性与自主性,是保障国家经济安全的重要任务。

在全球经济向零碳迈进的过程中,可再生能源与新能源替代化石能源是大势所趋,随着风能、太阳能资源开发利用速率不断加快,与之相配套的储能产业迅猛发展。2023年,全球新型储能^①累计装机规模达到91.3 GW,年增长率高达90.3%,中国、北美、欧洲三分全球储能市场,新增装机规模合计占比88%^[3]。随着新型储能、新能源汽车的快速发展,锂电池生产所需的锂、钴、镍等关键矿产资源的需求不断增加。鉴于全球资源分布不均,部分资源供应国政策不稳定的现实,在地缘政治紧张局势加剧的背景下,一些国家(地区)陆续将锂、钴、镍列为战略性关键矿产^[4],以加强对这些矿产资源的管制,全球锂电池产业链供应链风险持续上升^[5]。中国既是关键矿产资源的储量大国、生产大国和出口大国,也是资源消费大国及进口

大国,消费需求大的矿产均超过45种^[6]。截至2023年年底,中国新型储能累计装机/运行规模达31.39 GW/66.87 GWh,其中锂电储能产品占比达97.4%^②,储能型锂电池产量达到185 GWh^③,同比增长85%。随着新能源产业的持续壮大,锂电池的生产规模将长期保持高位,其所需的关键矿产资源需求亦将不断上升。为保障我国新能源产业的持续稳定发展,科学研判全球锂电池产业链的贸易格局演变趋势,评估我国锂电池产业面临的主要风险及其韧性水平,对于新型储能产业的稳健发展乃至零碳电力目标的实现至关重要。

本文以“锂电池”“产业链”“贸易网络”“韧性”为关键词,在中国知网、Web of Science、Elsevier等网站上进行了文献检索,整理发现,从研究对象和内容来看,以锂电池为对象的研究多侧重于制造技术的创新发展,如短期内现有材料体系的迭代升级和电池结构革新^[7-9],长期内固态锂离子电池^[10]、磷酸锰铁锂电池^[11]、锰基储能锂离子电池^[12]等新型锂电池技术的开发。对于锂电池产业链的研究,大部分文献侧重于产业链上游关键矿产资源的物质流动及贸易演化,如基于全生命周期采用动态物质流方法追踪锂、钴、镍等资源在特定时间内的流动^[13-16],以及对钨、磷、铬等单一矿产资源的国际贸易演化趋势分析^[17-19]。由于产业链具备系统特性,其呈现出整体性、复杂性、层

① 新型储能是指除抽水蓄能外,以输出电力为主要形式,并对外提供服务的储能技术。

② 国家能源局. 边广琦:截至2023年底,全国已建成投运新型储能项目累计装机规模达3 139万千瓦/6 687万千瓦时[EB/OL]. (2024-01-25)[2024-12-09]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/25/c_1310761952.htm.

③ 新华社. 2023年我国锂离子电池产量同比增长25%[EB/OL]. (2024-03-04)[2024-12-09]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202403/content_6936063.htm.

次性以及动态性特点^[20],仅从关键矿产出发不足以体现全球锂电池产业链的整体态势,越来越多的学者尝试从产业链角度出发分析锂电池产业的全球贸易格局演变特征,对产业链节点的不同划分导致研究结果迥异,如吴巧生等^[21]将锂产业链划分为上下游,使用社会网络分析方法分析了全球锂产品贸易特征,发现全球锂产品贸易呈现集中化趋势,尤其是上游更加明显;左芝鲤等^[22]将锂产业链分为上中下游开展分析,以复杂网络分析方法探究其贸易格局演化,发现锂产业链的上游呈现贸易分散化、中游呈现贸易集中化、下游呈现极化转移等特征。同时,矿产资源贸易网络的韧性问题逐渐受到关注,相关研究也在不断丰富^[23-24]。有学者认为,新型储能快速发展对锂电池产业链的抗风险能力提出了更高要求,急需开展其全产业链贸易网络韧性研究^[22]。

目前学术界对锂电池产业链、贸易网络、韧性水平等方面的研究成果丰硕,但仍存在两点不足:一是现有锂电池全产业链分析中未将电池回收产业纳入研究范畴,产业链不完整,未形成研究闭环。根据本文搜索到的文献,现有研究在定义锂电池产业链下游时,侧重于锂的应用产品即锂离子电池,未将电池回收产业纳入考量,而原电池、原电池组及蓄电池废物、废料等回收作为锂电池产业链的重要一环,也是锂电池产业贸易网络的组成部分,因此为更全面地评估锂电池全产业链的贸易格局和韧性水平,必须将其纳入研究范畴,以形成完整的产业链闭环。二是现有研究对锂电池核心链产品^④的选择侧重于富含锂的相关产品如碳酸锂、氢氧化锂,但对于锂电池生产所必不可少的其他关键矿产如锰、钴、镍等产品并未纳入分析,随着锂电池生产规模的扩大,这些矿产资源产品的贸易流向不可忽视。因此,本文尝试在现有研究基础上,将电池回收产业以及其他关键矿产纳入分析范畴,聚焦锂电池全生命周期产业链构建动态贸易网络,深入探究锂电池产业在全球贸易网络中的发展演变特征,并通过“假定攻击策略

法”对锂电池产业链重要节点进行冲击模拟,评估全产业链及其核心链产品的韧性水平,识别薄弱环节,提出有针对性的产业链强化策略。

本文的创新之处在于:第一,构建全生命周期视角下的动态贸易网络分析框架,拓展了锂电池产业链研究的系统性边界,通过整合上游、中游及下游的全链条数据,构建了覆盖“资源开采—材料加工—终端应用—回收再生”闭环的动态复杂网络模型,实现对锂电池产业链整体性与复杂性的系统性刻画,同时为资源密集型产业的贸易网络分析提供了新的研究范式;第二,构建起锂电池全产业链网络的五维韧性综合评价体系,从网络抗毁性出发,结合连接冗余性、结构紧凑性、局部容错性、传输效率性,构建产业链韧性评价体系,精准识别上中下游环节的潜在风险差异,这个评价体系不仅涵盖了锂电池产业链的整体韧性评估,还深入到各个环节,对潜在风险点的细致剖析,实现了研究方法的创新。

一、锂电池全生命周期产业链贸易网络韧性研究方法构建

借鉴和拓展现有研究对锂电池产业链的划分及核心链产品的界定,构建了从关键矿产到电池回收全生命周期锂电池产业链(以下简称“锂电池全产业链”),在此基础上采用复杂网络分析方法建立锂电池全产业链的全球贸易网络,并分析其上游、中游、下游产业的贸易网络特征;构建衡量贸易网络韧性的核心指标和计算方法,通过仿真节点失效冲击,分别对锂电池全产业链、上游、中游、下游产业的贸易韧性进行测算,模拟锂电池全产业链在不同冲击下的抗风险能力变化,在此基础上提出增强我国锂电池全产业链贸易韧性的对策建议。

(一)锂电池全产业链及核心链产品界定

基于不同的研究视角,学者对锂电池产业链中的产品归类并不统一,如基于开采、制造、应用分类选品^[22,25]抑或是利用辅助算法提取上中下游重要关键词进行选品^[26]。参考现有研究,本文立足资源流动和产业分工视角,从锂电池所需的主

④ 核心链产品是指各产业链层级中具有战略意义或高附加值的关键产品。

要关键矿产资源出发^[27],将锂电池全产业链细分为三大产业类别:上游产业为核心矿产资源开发,包括锂(锂辉石、盐湖提锂等)、钴、镍、锰等关键矿产的勘探、开采及初步加工(如锂盐、三元前驱体)。中游产业为电池材料与组件制造产业,涵盖正极材料(磷酸铁锂、三元材料等)、电解液等核心

材料的研发与生产。下游产业主要为终端应用产品(储能系统、新能源汽车、3C 电子产品等)以及电池回收。图1展示了本文界定的锂电池全产业链结构及其核心链产品。图1中HS为海关编码,6位数字则代表商品对应的海关编号,即为本文所选取的核心链产品。

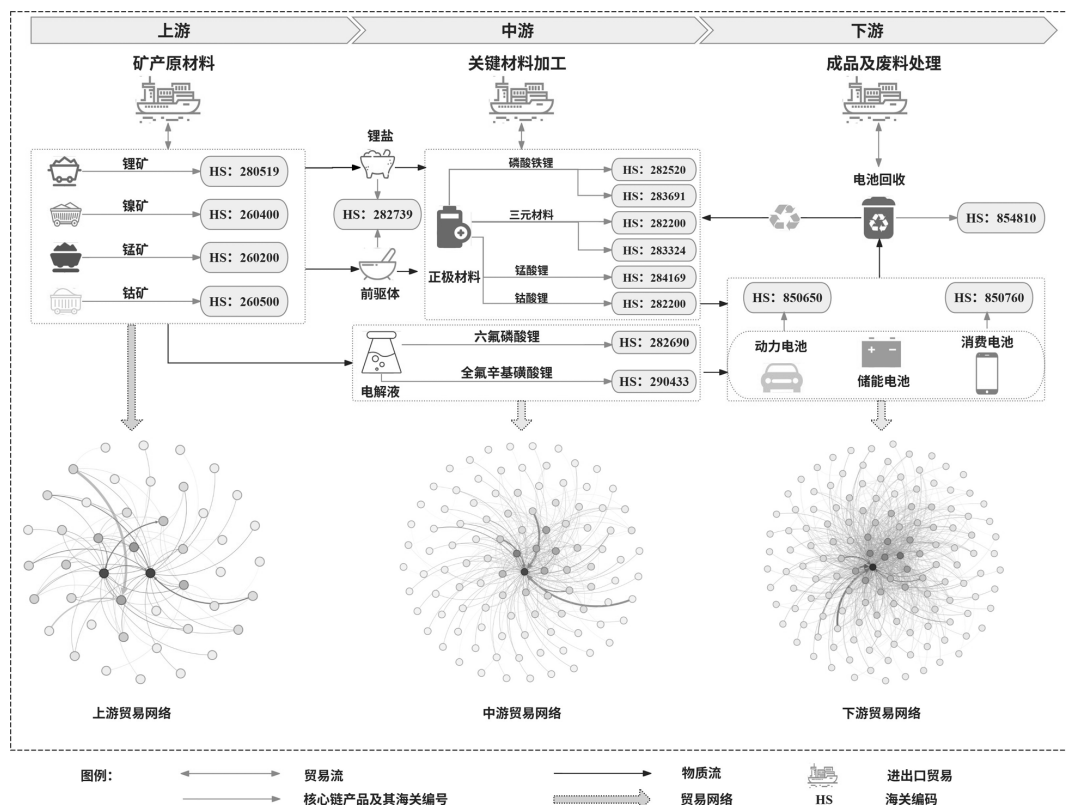


图1 锂电池全产业链结构、核心链产品及贸易网络

(二)锂电池全产业链全球贸易网络构建

本文基于复杂网络分析方法,在联合国商品贸易统计数据库(UN Comtrade Database)采集了参与锂电池产品贸易的217个国家(地区)2001—2023年的贸易数据,构建锂电池全产业链的全球贸易网络。为清楚地说明产业链全球贸易网络结构,以锂电池全产业链2023年贸易数据为例,使用Gephi软件,绘制全球贸易网络示意图,见图1。如图1所示,圆形符号为贸易节点,一个贸易节点代表一个参与贸易的国家或地区,节点颜色越深代表节点的度越大,即与节点开展贸易连接的国家(地区)的数量越多,反之则少;图1中连接各节点的线条称为连边,表示国家(地区)间存在贸易关系,线条箭头表示商品的进出口方向,连边的粗细

代表贸易额的大小。

(三)评估锂电池产业链贸易网络韧性的关键指标筛选及分析方法构建

“韧性”概念最早源于工程领域,指系统受到冲击后恢复到原始状态的能力^[28]。在复杂网络中,学者将“网络韧性”界定为个体通过彼此在社会、经济等领域的协作互补,形成的能够响应、适应外部急性冲击和慢性压力并从中恢复或转化的能力^[29]。在贸易网络韧性中,学者多从节点级别如度、加权重、中心性^[29-30]等,网络整体级别如聚类系数、网络效率、平均最短路径^[22-31]等,以及子结构级别如网络密度、社群结构^[32-33]等衡量网络结构和特性的指标出发对韧性进行衡量。

在参考以上研究的基础上,考虑到全生命周

期产业链的特征,本文以蓄意攻击方式从网络连接冗余性、结构紧凑性、局部容错性、传输效率性、网络抗毁性五个维度对锂电池全产业链的韧性进行评估。表1对评估的方法进行了说明。蓄意攻击属于“假定攻击策略法”中的一种方式,本文中的“蓄意攻击”指代贸易网络中关键节点(国家或地区)因政策干预、地缘冲突或技术封锁等外部冲击导致的贸易关系中断或节点失效。如一国通过出口管制(如限制锂矿出口)、加征关税或技术禁运等手段,主动削弱其在全球贸易网络中的参与度,均可视为对网络的蓄意攻击。具体而言,本文以锂电池全产业链 PageRank 中心度^⑤前 10 位的国家(地区)作为被攻击对象,将中断其国际贸易作为蓄意攻击方式,衡量贸易韧性并识别潜在的风险源。

表 1 锂电池全产业链韧性评估维度和方法说明

韧性维度	韧性评估方法
连接冗余性	通过计算贸易网络中每个节点连接数的平均值(即平均度),衡量网络中节点的平均连通程度,其值越大表明网络的整体连通水平越高
结构紧凑性	通过计算贸易网络中实际存在的边数占所有潜在边数的比例(即网络密度),衡量网络中各节点之间联系的疏密程度,其值越大表明网络整体间的贸易关系越紧密
局部容错性	指在贸易网络中与相同节点相连的两个节点之间相互连接的平均概率(即平均聚类系数),衡量节点和近邻节点之间的聚集程度,其值越大表明局部接线性越强
传输效率性	指两个节点之间的平均贸易距离(即平均路径长度),衡量节点之间的贸易效率,其值越大表明网络传输效率越高
网络抗毁性	指贸易网络的异质性水平,其值越大表明网络在蓄意攻击下的脆弱性越高,网络抗毁能力越弱 ^[29]

本文主要指标计算公式如下。

(1)连接冗余性:

$$K = \frac{1}{N} \sum_i K_i \quad (1)$$

式(1)中, K 的大小表示网络连接的冗余性; N 为网络中的总节点数; K_i 为第 i 个节点的度,即该节点的连接数。

(2)结构紧凑性:

$$\rho = \frac{E}{N(N-1)} \quad (2)$$

式(2)中, ρ 反映网络的结构紧凑性; E 为网络中的实际边数; N 为网络中的总节点数。

(3)局部容错性:

$$C = \frac{\sum_i \frac{2 E_i}{k_i(k_i-1)}}{N} \quad (3)$$

式(3)中, C 衡量网络的局部容错性; E_i 为节点 i 的邻居之间实际连接的边数; K_i 为第 i 个节点的度; N 为网络中的总节点数。

(4)传输效率性:

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{ij} d_{ij} \quad (4)$$

式(4)中, L 值的大小表示网络传输效率的高低; N 为网络中的总节点数; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 之间的最短路径长度。

(5)网络抗毁性:

$$G = \frac{1}{2 N^2 u} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |Y_j - Y_i| \quad (5)$$

式(5)中, G 表示网络异质性水平,也即是基尼系数,以衡量网络韧性中的抗毁能力; N 为网络中的总节点数; u 为节点强度的均值,用于量化贸易规模的差异,节点强度计算公式为 $\sum_{j \in N} w_{ij}$, w_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的连接权重,本文权重为贸易额; $|Y_j - Y_i|$ 表示节点强度差的绝对值。

(6)PageRank 中心度:

$$PageRank_{it} = \frac{1-d}{N} + d \sum_{j=1}^n A_{ji} \frac{PageRank_{jt}}{Out_{jt}} \quad (6)$$

式(6)中, $PageRank_{it}$ 为第 t 年节点 i 的中心度值,表示节点对于资源的控制能力,并且可以促进节点在贸易网络中形成强大的引领力^[22]; N 为网络中的总节点数; d 为阻尼因子,本文取 0.85; A_{ji} 为有向节点转移矩阵; Out_{jt} 为第 t 年节点 j 的出度。

(四)数据来源

本文数据来源于 UN Comtrade Database,并统一使用进口国报告数据,对于缺失的数据以贸易

⑤ PageRank 中心度是指贸易节点(参与贸易的国家或地区)对于资源的控制能力以及在网络中的引领力。

伙伴对该国的出口数据进行补充。本文以海关编号确定锂电池产业链核心链产品,收集其 2001—2023 年 217 个国家(地区)的贸易数据。具体如表 2 所示。

表 2 锂电池全产业链核心链产品

产业链环节	海关编号	产品名称
上游	280519	锂;其他碱金属及碱土金属
	260200	锰矿砂及其精矿
	260400	镍矿砂及其精矿
	260500	钴矿砂及其精矿
中游	282520	氢氧化锂;锂的氧化物
	283691	碳酸锂
	290433	全氟辛基磺酸锂
	282690	六氟磷酸锂
	282739	氯化锂
	284169	锰酸锂
	282200	钴的氧化物及氢氧化物
	283324	镍的硫酸盐
下游	850650	锂的原电池及原电池组
	850760	锂离子蓄电池
	854810	原电池、原电池组及蓄电池废物、废料

二、全球锂电池产业链贸易网络特征分析结果

根据上文收集到的 217 个国家(地区)2001—2023 年的贸易数据,本文构建了锂电池全产业链贸易网络,并根据式(1)~式(5)计算并分析锂电池全产业链以及上中下游产业的特征。

(一)全产业链贸易网络整体呈扩张趋势

全球参与锂电池贸易的国家(地区)数量和贸易网络演变情况如表 3 所示。整体来看,锂电池全产业链的贸易网络在 2001—2023 年呈现出扩张趋势,节点数、平均度、网络密度、平均聚类系数分别增长 24%、66%、33%、6%,边数增长一倍之多,平

均路径长度下降 16%。说明锂电池全球化贸易水平和贸易密度持续提升,同时贸易距离有所缩短。

(二)上中下游产品贸易网络特征分析

1. 处于不同产业链的产品贸易网络节点数与边数呈现显著时空差异

本文分别对锂电池上中下游产品在 2001—2023 年的贸易网络节点和连边数量进行分析,发现上中下游产品贸易网络特征出现较为显著的时空差异,见图 2。其中,上游产品贸易的参与国家数量平均约有 150 个,贸易连边虽有增加但增幅较小,整体变化较为平稳,表明上游基础矿产资源主

表 3 2001—2023 年锂电池全产业链各项网络指标值

年份	节点数	边数	平均度	网络密度	平均聚类系数	平均路径长度
2001	171	2 755	16.111	0.095	0.556	2.346
2002	180	2 869	15.939	0.089	0.526	2.315
2003	183	2 992	16.35	0.09	0.558	2.29
2004	186	3 205	17.231	0.093	0.551	2.301
2005	191	3 243	16.979	0.089	0.571	2.292
2006	190	3 416	17.979	0.095	0.571	2.283
2007	198	3 729	18.833	0.096	0.559	2.288
2008	201	3 789	18.851	0.094	0.544	2.205
2009	200	3 788	18.94	0.095	0.532	2.228
2010	200	4 077	20.385	0.102	0.562	2.159
2011	204	4 227	20.721	0.102	0.559	2.14
2012	205	4 792	23.376	0.115	0.602	2.062
2013	213	5 045	23.685	0.112	0.59	2.046
2014	208	5 248	25.231	0.122	0.625	2.013
2015	214	5 541	25.893	0.122	0.626	1.979
2016	212	5 470	25.802	0.122	0.623	2.014
2017	217	5 611	25.857	0.12	0.624	2.025
2018	215	5 736	26.679	0.125	0.641	1.99
2019	212	5 878	27.726	0.131	0.613	1.971
2020	211	5 723	27.123	0.129	0.611	1.997
2021	213	6 102	28.648	0.135	0.632	1.939
2022	203	5 760	28.374	0.14	0.611	1.965
2023	212	5 656	26.679	0.126	0.59	1.966

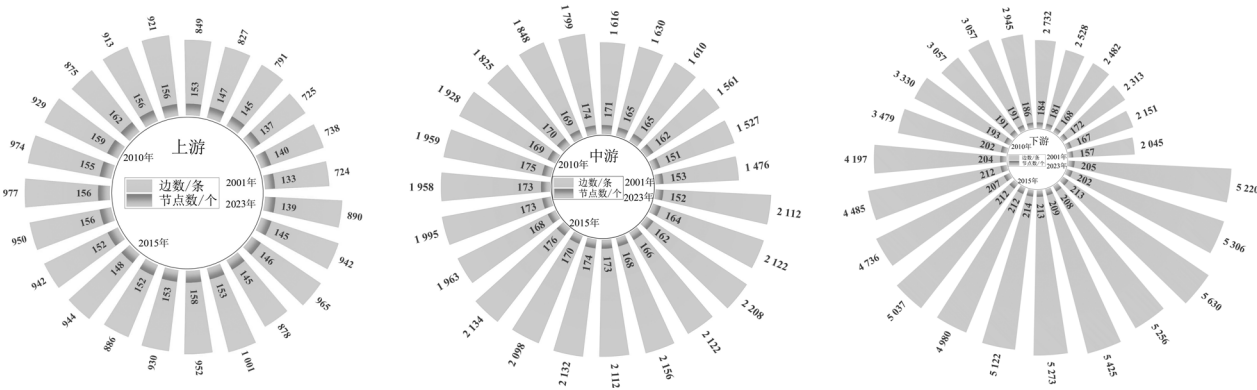


图 2 2001—2023 年全球锂电池产业链贸易网络节点和连边数量

要集中在少数国家,市场集中度较高。中游产品贸易参与国数量变化整体呈倒“U”型特征,从2001年的153个增长至2015年达到峰值176个,并逐渐下降至2023年的152个,而贸易连边数持续增长,增幅超过40%,表明随着全球产业链的优化,部分中游加工环节转移到生产效率更高或成本更低的国家,如中国、智利等,使得其他国家逐步退出该领域,同时少数国家在中游加工领域的主导地位进一步巩固,贸易呈现出区域化特征。下游产品贸易参与国及连边数量2013年后均呈爆发式增长,贸易网络复杂性进一步增加,同时随着废旧电池回收及再利用成为新的贸易增长点,国家间贸易互动进一步深化。

2. 上中下游产品贸易网络平均度与网络密度均呈上升态势

锂电池上中下游产品贸易网络平均度和网络密度在2001—2023年均出现不同程度的上升,其中下游贸易网络的连通性与紧密程度最高且增长最快,中游次之,上游最低且最慢,见图3。随着全球新能源产业快速发展,终端产品需求推动下游产品贸易网络覆盖广泛且高度紧密。作为上游资源与下游终端产品的桥梁,中游产品技术门槛高、贸易扩展快,成为全球化程度提升的关键环节。矿产资源分布的集中性限制了上游贸易网络的广度和密度,但随着新能源材料需求增长,连通性有所提升。

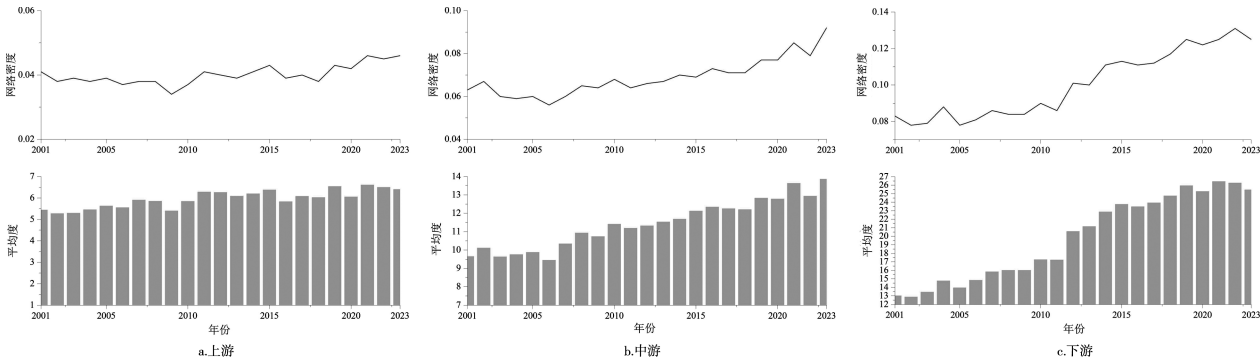


图3 2001—2023年锂电池全产业链贸易网络平均度和网络密度

3. 贸易网络平均聚类系数与平均路径长度均出现差异

为了进一步分析锂电池产业链全球贸易的聚集程度和各国贸易的传输效率,本文进一步计算了平均聚类系数与平均路径长度,如图4所示。从聚集性来看,上游波动趋势明显,对于地缘政治、供需冲突等影响较为敏感,并且其网络局部群组化程度一般,贸易仍以区域性为主;中游总体较

高,说明材料加工阶段贸易网络中国家协作关系逐步加强;下游增速最快且聚集值较高,市场需求的驱动性尤为明显,网络结构全球化趋势显著。从传输效率来看,上游变化最小,贸易的网络效率提升有限;中游具有下降趋势,但波动明显,因锂电池中游产业更新迭代快,随着部分国家或地区产业的快速升级以及新经济体的加入,贸易网络节点重构现象明显;下游下降最快,其贸易只需经

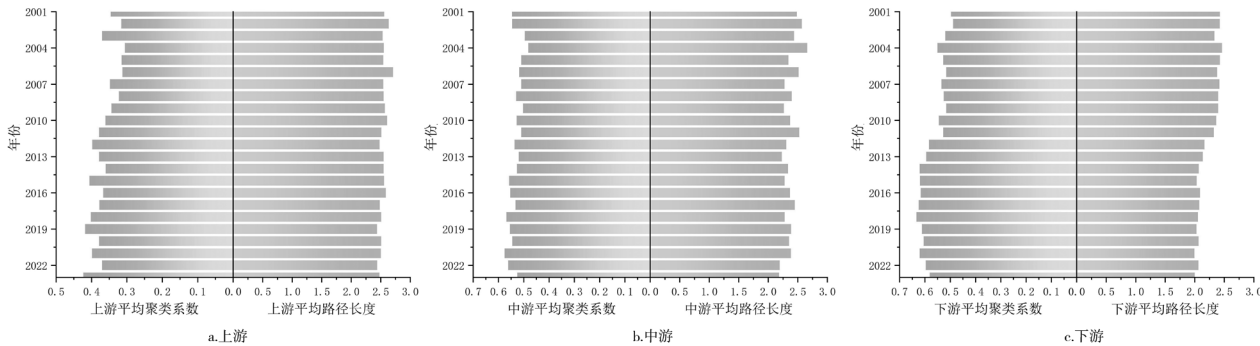


图4 2001—2023年锂电池全产业链贸易网络平均聚类系数和平均路径长度

过1~2个中介国家或地区就可完成,具有高度的全球化和直接性。除此之外,锂电池下游产业链总体呈现出高聚集性、低路径长度特征,以中国为核心的“小世界”特性显著。

(三)全球锂电池产业链贸易格局的时空演变特征

本文选择代表性年份开展全球锂电池产业链贸易格局的时空特征分析。经研判,2001年、2010年、2015年、2023年具有代表性。2001年中国正式加入(世界贸易组织 WTO),自此显著改变了世界经贸格局^[29],因此本文以2001年作为研究的起始年份;2010年前后网络节点和连边数量由小幅度稳步增长转变为宽幅震荡态势,锂电池贸易网络特征出现显著改变,故选择2010年作为前后对比时间节点;数据显示,自2015年起锂离子电池下游贸易连边呈现出爆发式增长,在锂消费量中占比高达39%^[21],锂电池产业链

贸易格局出现重要变化,故2015年是一个具有代表性的时点;2023年是可获得本文分析所需数据的最新年份。图5~图7展示锂电池全产业链的空间关联特征及贸易流向趋势。

上游产业链呈现出从松散向紧凑演变的整体趋势,从出口贸易结构来看,呈现出由多极向单极演变趋势,少数国家成为矿产资源出口大国,如2023年南非、菲律宾、澳大利亚的锂、钴、镍、锰矿出口额分别约占全球贸易总额的25%、17%、13%;从进口贸易结构来看,由2001年日本、芬兰、中国的“三足鼎立”逐渐演变为中国的“一家独大”。值得注意的是,2023年中国矿产原材料进口约占全球贸易总额的70%,对外资源依赖度极高。

中游产业链的贸易网络呈现极化转移现象,出口国由发达国家向资源型发展中国家转移、进口国由欧美主导逐渐发展为亚洲国家崛起的趋势。具体来看,2001年,中游产品出口主要集中在

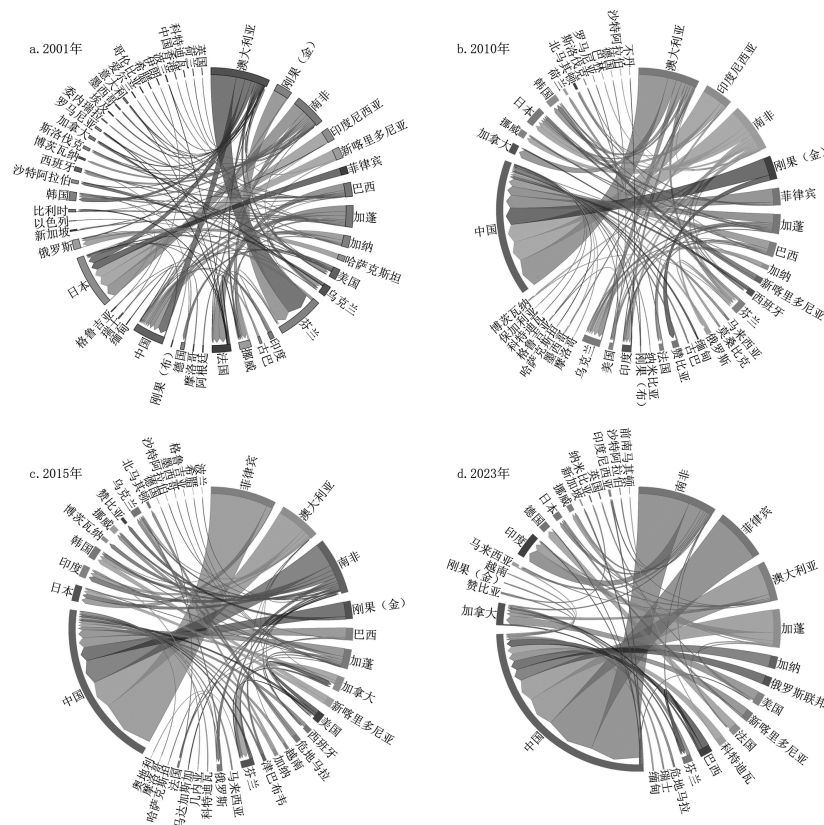


图5 锂电池产业链上游国际贸易流向^⑥

⑥ 为更清晰地展示锂电池全产业链的国际贸易流向,本文只对占贸易总额前95%的国家进行可视化表达。

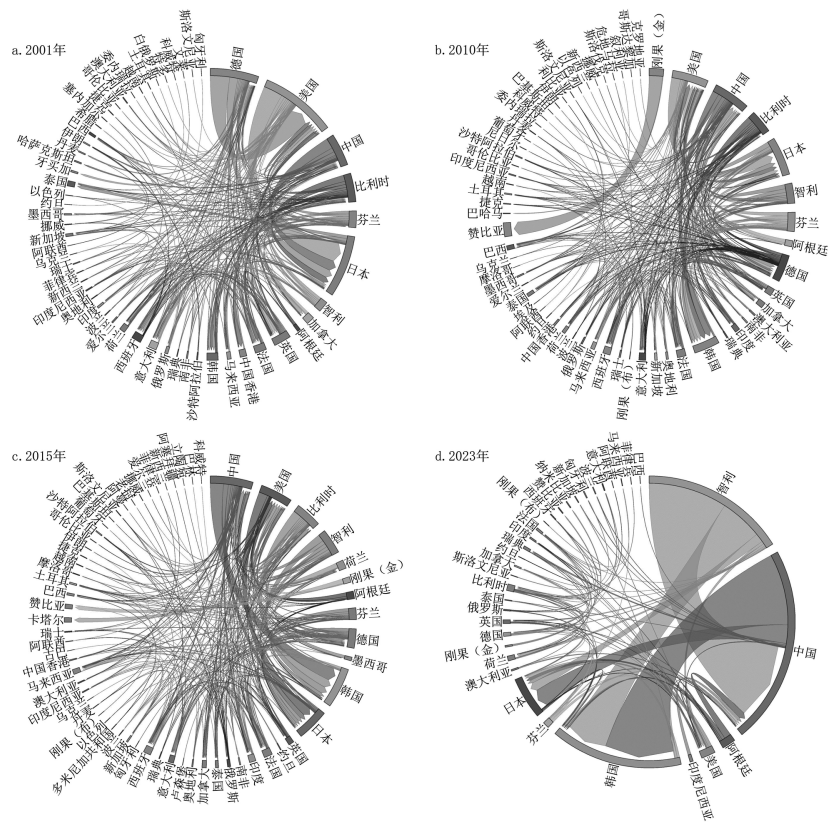


图6 锂电池产业链中游国际贸易流向

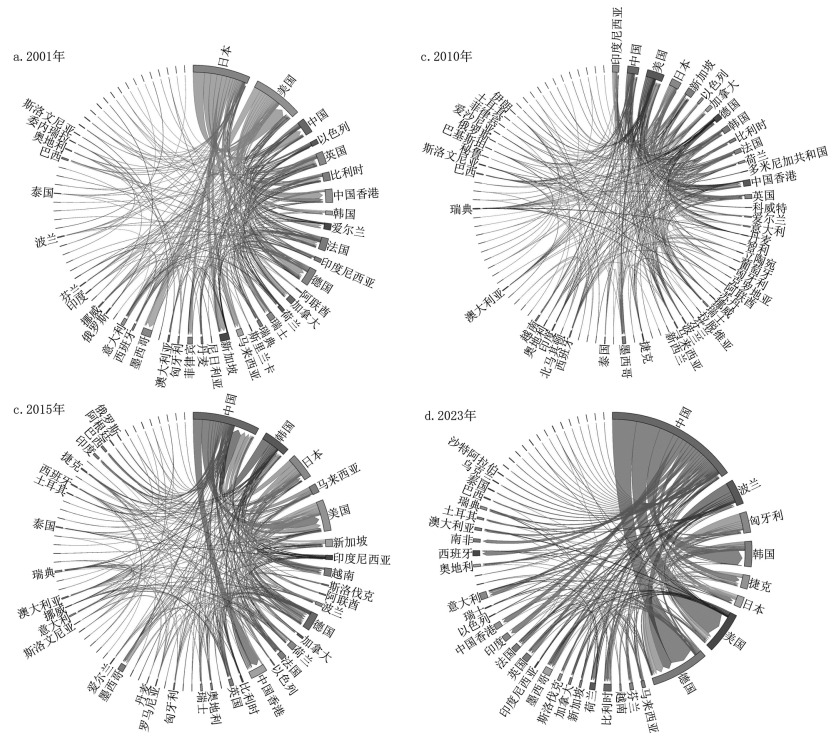


图7 锂电池产业链下游国际贸易流向^⑦

^⑦ 下游贸易参与主体较多,本文为显示主要贸易关系,隐藏了贸易额占比小于1%的国家(地区)名称。

德国、美国等技术、产业体系成熟的发达国家,占据了锂电池中游产业链的主导地位。随着新兴经济体在全球中游产业链中的崛起,贸易格局逐渐向资源富集国与加工能力强国并存的方向转移,如刚果(金)、中国、智利。到2023年,智利和中国的出口额分别约占据全球贸易总额的46%、32%,成为全球最主要的中游产品出口国,其中智利凭借其盐湖型锂资源的显著优势跃居第一,而中国则依托强大的技术创新与成本优势,稳固其全球领先地位。

下游成品及废料处理呈现出贸易多样化、高度全球化趋势,同时也由美国、日本为核心的“两极格局”转变为以中国为核心的“单极格局”,贸易连边逐渐遍布产业链下游网络。随着新质生产力赋能中国新能源产业高质量布局,新能源汽车、新型储能急剧发展,其产业规模不断壮大、效率不断提升、成本不断下降,逐步强化了中国在全球锂电池下游产业链中的核心地位。但同时中国锂电池下游产业链的国际市场依存度也相对变高,如出口比例较高的美国(19%)、德国(19%),近年来实施《通胀削减法案》《新电池法》等,将使产业链不稳定性进一步加剧。

三、全球锂电池产业链贸易网络韧性分析

(一) 锂电池全产业链网络抗毁性分析

本文采用基尼系数来量化网络异质性^[34]对锂电池全产业链网络抗毁性进行分析。相较于熵、变异系数等指标,基尼系数对节点强度分布的尾部集中现象更敏感^[35],可有效反映枢纽节点对网络抗毁性的主导作用。理论研究表明,高基尼系数网络因依赖少数枢纽节点,对随机攻击具有鲁棒性(枢纽节点被随机移除概率低),但对蓄意攻击(基于某种网络拓扑特性,有针对性地移除网络中的节点)高度脆弱^[36]。为了进一步说明基尼系数与蓄意攻击下网络抗毁性的关系,本文使用2023年锂电池产业链下游贸易数据,计算基尼系数与移除下游 PageRank 中心度前10位的国家(地区)后的网络密度数据进行相关性分析,由于样本量较小,本文进行了 Kendall's Tau 相关性检验,结果显示基尼系数与蓄意攻击下网络效率显

著负相关($r = -0.600, \rho < 0.01$),进一步验证了其对网络抗毁性效应的刻画能力。

计算结果如图8所示。在研究期内,锂电池全产业链的基尼系数均在0.86、0.96波动,高水平的基尼系数反映了锂电池各产业链贸易网络高度异质化的结构特征,即全球锂电池资源和技术的掌控主要集中在少数关键国家和企业手中,极化现象显著:自2020年以来,锂电池全产业链的基尼系数仍然在稳步增长,其中中游产业链增速最快,2023年达到0.955,过度的集聚对全球贸易网络的健康发展构成了结构性风险。一旦贸易枢纽节点遭受冲击,贸易风险会通过产业链传导放大至整个贸易体系,导致全球锂电池产业链遭受重创。

2001—2023年锂电池全产业链基尼系数的变化揭示了全球能源结构转型背景下,贸易网络在效率与风险之间的权衡关系。在贸易全球化、技术升级、产业转型的推动下,资源(上游)、技术和材料(中游)、终端制造和消费市场(下游)形成了高度垂直化、异质化的贸易结构。这种结构在促进产业链效率提升的同时,也增加了产业链的脆弱性,对枢纽节点的依赖性不断增强。

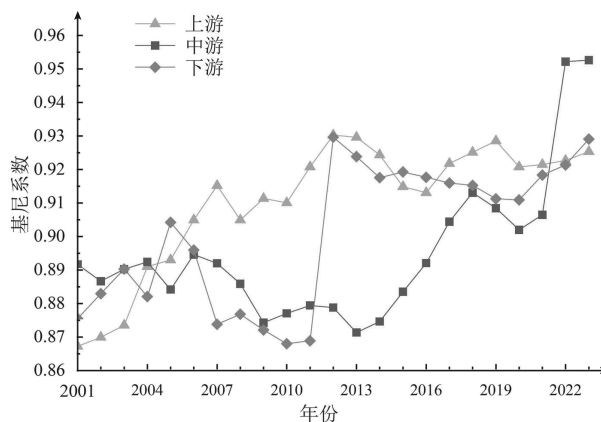


图8 2001—2023年锂电池全产业链基尼系数

(二) 蓄意攻击下锂电池全产业链韧性特征变化

全球锂电池产业链的高基尼系数,凸显了特定国家或地区若因政策干预、地缘冲突或技术封锁等内外部冲击导致贸易关系中断或节点失效,则会加剧供应链断裂风险,进一步削弱产业链的韧性与稳定性。图9展示了锂电池全产业链 PageRank 中心

度前 10 位的国家(地区)在产业链不同环节中的排名,显示出不同国家在上游、中游、下游产业链的资源控制能力及引领力。

图 10~图 12 反映了 2023 年锂电池全产业链在蓄意攻击下各项韧性衡量指标的变化趋势。总体而言,锂电池各产业链的贸易网络在被蓄意攻击下,网络连接冗余性、结构紧凑性、局部容错性、传输效率性均呈现出不同程度的下降趋势。

平均度的值越大表明网络的整体连通水平越高,贸易连边的冗余性也就越好,即使在网络局部故障或节点失效情况下,更多的连接能够使得网

络中资源的替代路径增加,从而增加网络的抗风险能力。①当锂电池上游产业链节点逐个失效后,平均度下降约 50%,下降速率明显高于锂电池中、下游产业链,表明锂电池基础矿产资源高度集中于 PageRank 中心度前 10 位的国家,上游网络的连通性对核心国家高度依赖,抗风险能力较为脆弱、韧性较低。特别是德国、荷兰两个国家退出后,上游网络平均度快速下降,这也表明一旦其节点失效,将导致锂资源的供应链网络出现断裂效应,其他节点无法有效填补空缺,进而显著削弱锂电池上游网络的连通性。②锂电池中游产业链节

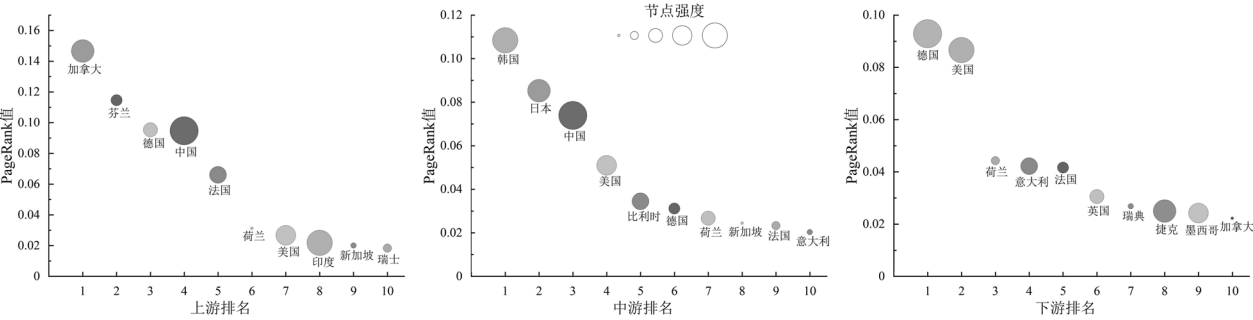


图 9 2023 年锂电池全产业链 PageRank 中心度前 10 位的国家(地区)

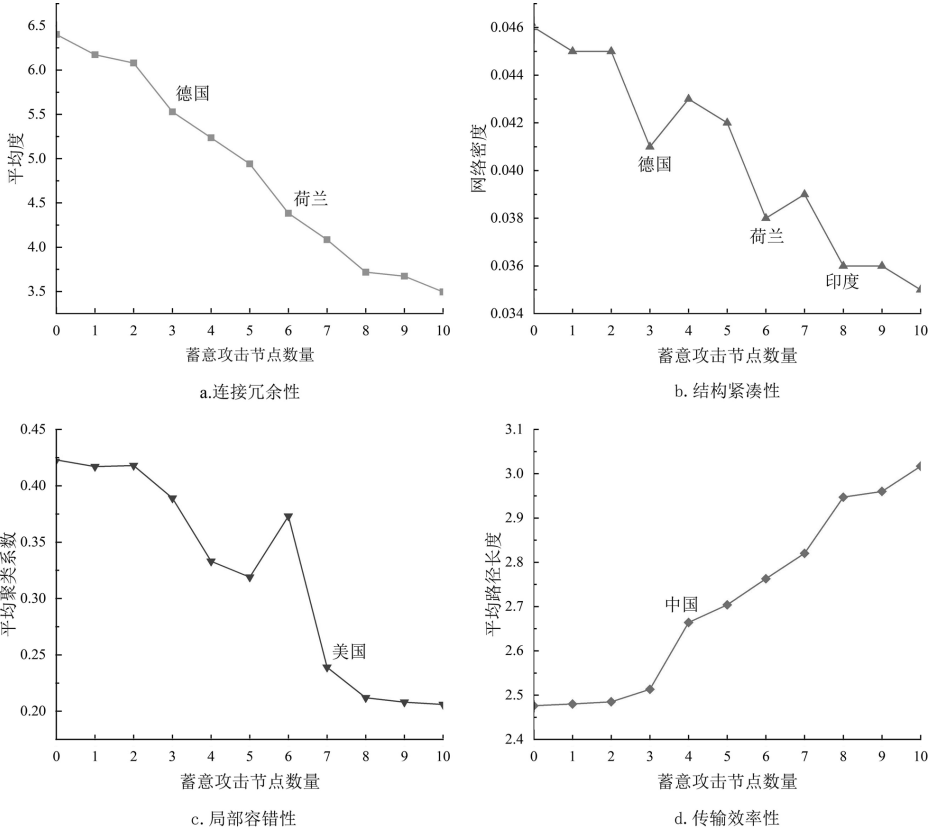


图 10 蓄意攻击锂电池产业链上游后各项韧性指标变化趋势

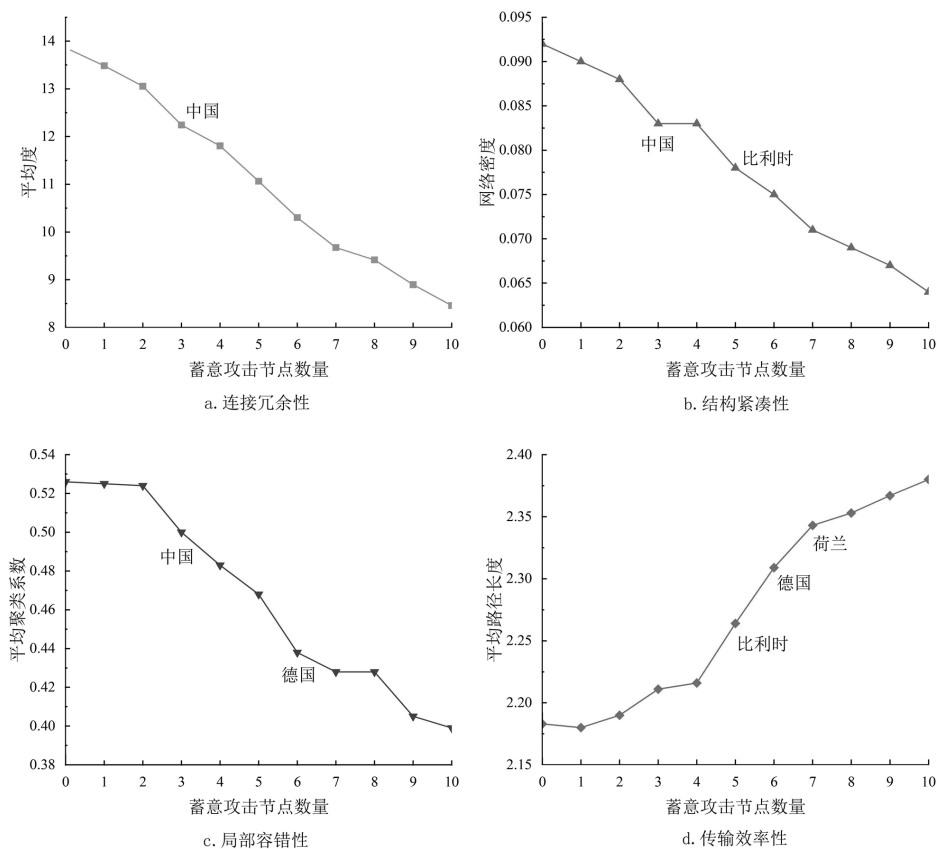


图 11 蓄意攻击锂电池产业链中游后各项韧性指标变化趋势

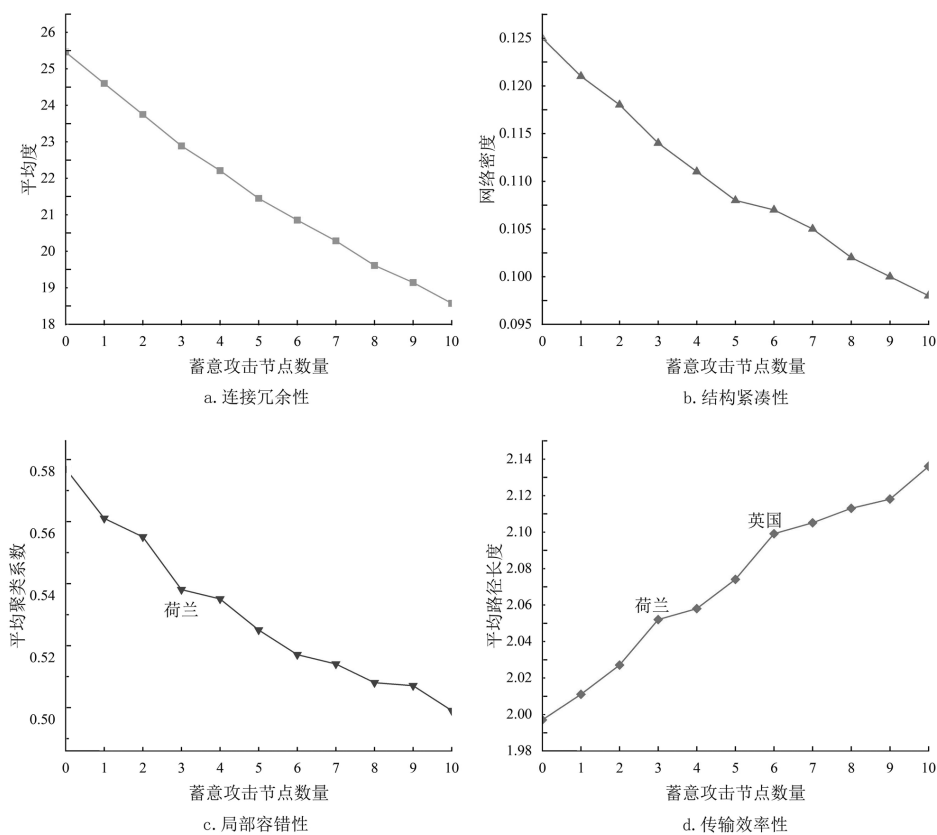


图 12 蓄意攻击锂电池产业链下游后各项韧性指标变化趋势

点失效后,平均度下降约 40%,与上游相比下降趋势较为稳定,存在一定的冗余结构。不过当中国节点退出后,中游产业链的平均度明显下降,说明中国在锂电池材料加工领域全球化程度较高、供应链协作性密切,其节点的稳定对于锂电池中游产业链的韧性至关重要。③在节点连续移除后,锂电池下游产业链的平均度持续下降,但变化相对平缓,显示出下游网络的连通性具有较强的鲁棒性。

网络密度越大,节点间的贸易关系越紧密,网络整体结构也越紧凑,故在遭受攻击或故障后整体的抗冲击能力较强。①当锂电池上游产业链节点逐个失效后,网络密度下降约 24%,下降幅度较小,但波动性较为明显,尤其是德国、荷兰、印度节点退出后,网络密度显著下降,使得上游产业链脆弱性明显增加。②锂电池中游产业链的网络密度呈阶梯式下降趋势,即自中国节点退出后,网络密度由原先的 0.092 下降到 0.083,随后缓慢下降至 0.064,减幅约 30%,在锂电池全产业链中下降最快,一方面说明中国参与锂电池中游产业链贸易使得全球互动紧密,另一方面也表明中国贸易遭受冲击,将直接影响全球锂产业链的效率和稳定性。③下游产业链在节点移除后,呈现出平稳下降的趋势,同时下降幅度也最小,说明锂电池下游贸易网络结构较为紧凑,即便部分核心消费国退出,其他国家的市场需求仍然能够支撑网络的基本运转。

不同于网络密度对产业链整体结构紧凑性的度量,平均聚类系数强调了产业链网络的局部容错能力,其高值意味着网络中存在着强连通的社区结构,这些社区在局部攻击下可以独立运作,对风险抵御能力较强。①在蓄意攻击锂电池上游产业链的网络后,其平均聚类系数明显下降,从原先的 0.432 下降到 0.206,下降幅度超过 50%,尤其在移除美国后,平均聚类系数大幅度下降,表明美国在锂电池上游产业链中局部风险传导效应强,进一步削弱了其他节点和社区的连通性,导致平均聚类系数的整体下降。同时也表明,锂电池上游产业链的局部容错性最差,韧性最低。②锂电池中游产业链的平均聚类系数与网络密度下降形式相同,均呈阶梯式下降,在移除韩国、日本后,平

均聚类系数基本没变化,但在移除中国后,其值随着攻击节点数量增加而持续下降,局部脆弱性逐渐显现。③随着节点的移除,锂电池下游产业链的平均聚类系数下降幅度较小,从 0.581 减少至 0.503,表明其社区结构更加稳定,局部容错性较高、韧性较强。

当网络遭遇蓄意攻击时,其平均路径长度越小,传输效率就越高,节点间信息与资源快速共享,整个网络的动态响应能力就越强。节点间高效的传输能力不仅提升了网络的协调合作水平,还增强了各节点在面对不确定性时的适应力,从而提高网络在突发事件或关键节点失效情况下的恢复能力和整体韧性。①锂电池上游产业链的平均路径长度随着蓄意攻击节点数量的增加而快速上升,从原先的 2.467 增加至 3.017,在整个锂电池产业链中增幅最大(22%),贸易的传输效率大幅下降。尤其是在中国节点移除后,产业链平均路径长度的值明显上升,这意味着中国在锂电池上游产业链中普遍起着桥梁中介作用,提高了网络整体效率,若节点被攻击或者失效,将会导致供应链的延迟以及贸易成本增加等,同时网络的韧性也进一步降低。②锂电池中、下游产业链的平均路径长度增幅相对较小(9%、6%),表明在遭受蓄意攻击时,中、下游产业链整体的传输效率较高,在恢复层面的韧性表现较好。

四、研究结论、对策建议及讨论

(一) 研究结论

在全球产业链重构以及系统性风险日益突出的背景下,本文以锂电池全产业链视角构建复杂贸易网络,研判其全球格局演变趋势,并仿真其在蓄意攻击下的韧性变化,主要得到以下结论:①2001—2023 年,锂电池全产业链贸易网络的连通性、紧密性以及传输效率均有所提升,其中下游增速最快、中游次之、上游最慢,印证了资源密集型产业链韧性的普遍衰减规律;②全球锂电池产业链网络受地区技术扩散与地缘风险的双重影响,在研究期内网络整体向全球化、复杂化方向演变,自 2019 年以来,受疫情、关税、经济下滑等多方面影响,锂电池产业链全球贸易不稳定性增加,贸易格局逐渐向区域化、多极化方向转移,其中上游少数国家占据

主要矿产资源,中国进口地位“一家独大”,中游呈现极化转移现象,贸易由发达国家转向以中国、智利、韩国为核心的新兴经济体国家,产业链下游逐渐形成以中国为核心的“单极格局”;③锂电池全产业链具有高度垂直化、异质化的特征,研究期内,全产业链的效率以及网络对随机攻击的抗毁性不断上升,不过对于蓄意攻击的脆弱性也在上升,通过模拟仿真锂电池全产业链遭受蓄意攻击的情境下,得到锂电池产业链的韧性排名为下游>中游>上游,其中下游的连通性、整体紧凑性、局部容错性以及传输效率均具有较强的鲁棒性,中国对中游网络的稳健性影响最大,蓄意攻击该节点将会使网络的各项韧性指标大幅下降,上游产业链本身具有脆弱性,特别是德国、荷兰节点中断后,对网络整体结构破坏较大,致使连通性快速下降,同时美国的局部风险传导效应最强,攻击中国节点将使网络传输效率大幅下降。

(二) 对策建议

(1) 启动资源供应链产业链战略转移工作。中国锂电池产业链上游对外依存度极高,与德国、荷兰、美国的集中贸易意味着潜在风险的增加,尤其是作为局部风险传导效应较强的美国,其激进的贸易关税政策,将进一步加剧锂电池产业链上游贸易网络的不稳定性,因此可以适当推进海外资源布局与多元化供应,以“一带一路”倡议为契机,加强对共建国家的产业输出与合作,以多极节点分散风险,打造区域性资源供应韧性供应链。

(2) 从资源加工优势转向关键技术溢出。中国在锂电池产业链中游始终保有加工优势,不过也容易陷入他国技术与产能的“区域化”锁定,一旦风险发生将对中国锂电池产业链造成巨大冲击。所以可以加大对新型电池正负极材料、电解质配方、固态电池等关键前沿领域的研发投入,以形成自主可控、覆盖广泛的专利池。同时,对关键技术可实行“以市场换技术”与合作研发相结合的战略,持续深化与国际领先科研机构的合作。同样,对于稀土^[24]、半导体^[33]等战略性新兴产业而言,提升其中游产业链的自主创新水平,亦是打破中国在全球价值链中“低端锁定”的关键路径。

(3) 强化电池回收,构建锂电池闭环生态韧

性供应链。在锂电池下游产业链 PageRank 中心度前 10 位的国家(地区)中,发现并未出现中国,这一现象说明虽然中国在锂电池制造和国际贸易中规模较大,但其主要流向新兴市场国家,这导致在 PageRank 算法中与高权重国家的链接较少。同时,通过观测中国锂电池回收贸易发现,相较于欧美等国家,其贸易金额较少,贸易国家数量明显下降,也说明中国在废旧电池回收领域技术能力仍存在较大差距^[37],所以中国一方面要在锂电池贸易中保有竞争优势,拓宽与新兴经济体国家的贸易关系,另一方面把握全球废旧电池回收新型贸易增长点,提高资源循环利用率,推动锂电池产业链下游闭环生态韧性建设。

(三) 讨论

本文基于贸易参与国家(地区)退出的特定假设对锂电池全产业链韧性进行评估,在后续研究中,将进一步考虑贸易关税、地缘冲突等特定风险下,锂电池等资源密集型产业链韧性的影响因素与提升路径,为构建中国安全、韧性产业链供应链提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 余振,崔洁. 后发经济体在全球产业链重构中的弯道超车:历史经验及对中国的启示[J]. 国际展望, 2024, 16(4): 21-36, 165-166.
- [2] 张辽,胡忠博,陈松. 全球产业链重构下保障中国产业链安全的逻辑思维与战略取向[J]. 经济学家, 2024(3): 35-44.
- [3] 陈志勇,朱清,武海炜,等. 新型储能发展下钒资源需求趋势分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(12): 99-110.
- [4] 佚名.《全球矿业发展报告 2024》显示:全球矿业产业链格局调整矿业发展进入新周期[J]. 黄金科学技术, 2024, 32(6): 1067.
- [5] 王安建,袁小晶. 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, 2022, 37(11): 1550-1559.
- [6] 梅燕雄,裴荣富,魏然,等. 关键矿产与能源资源安全[J]. 中国矿业, 2022, 31(11): 1-8.
- [7] ZHANG R, WANG C Y, ZOU P C, et al. Long-life lithium-ion batteries realized by low-Ni, Co-free cathode chemistry[J]. Nature energy, 2023, 8(7): 695-702.
- [8] FU A, ZHANG Z F, LIN J D, et al. Highly stable operation of LiCoO₂ at cut-off ≥ 4.6 V enabled by synergistic

- structural and interfacial manipulation [J]. *Energy storage materials*, 2022(46): 406-416.
- [9] DRESSLER A R, DAHN R J. Optimization of Si-containing and SiO based anodes with single-walled carbon nanotubes for high energy density applications[J]. *Journal of the electrochemical society*, 2024, 171(3): 030520.
- [10] SONG Z Y, WANG T R, YANG H, et al. Promoting high-voltage stability through local lattice distortion of halide solid electrolytes [J]. *Nature communications*, 2024, 15(1): 1481.
- [11] YANG Y Z, YANG Z, LI Z L, et al. Rational electrolyte design for interfacial chemistry modulation to enable long-term cycling Si anode[J]. *Advanced energy materials*, 2023, 13(41): 2302068.
- [12] XU Z, GUO X Z, SONG W J, et al. Sulfur-assisted surface modification of lithium-rich manganese-based oxide toward high anionic redox reversibility[J]. *Advanced materials (dearfield beach, fla.)*, 2023, 36(1): e2303612.
- [13] SUN X, HAO H, ZHAO F Q, et al. Tracing global lithium flow: a trade-linked material flow analysis [J]. *Resources, conservation & recycling*, 2017, 124:50-61.
- [14] YANG P, GAO X Y, ZHAO Y R, et al. Lithium resource allocation optimization of the lithium trading network based on material flow[J]. *Resources policy*, 2021(74): 102356.
- [15] 邢欣然, 汤林彬, 汪鹏, 等. 基于物质流分析的中国钴资源供需形势[J]. *科技导报*, 2022, 40(21): 120-128.
- [16] 黄亚伟, 汤林彬, 王鹤鸣, 等. 能源转型背景下的中国镍动态物质流分析[J]. *科技导报*, 2022, 40(21): 110-119.
- [17] 李华蛟, 安海忠, 齐亚杰, 等. 基于产业链国际贸易网络的中国优势矿产资源全球贸易格局和竞争力:以钨为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1504-1514.
- [18] 陈雨然, 陈敏鹏. 全球磷产品贸易格局演变及中国磷安全[J]. *资源科学*, 2024, 46(1): 85-99.
- [19] 李静远, 周娜, 胡珮琪, 等. 全球铬矿贸易网络格局演化及竞争力分析[J]. *中国矿业*, 2024, 33(7): 48-58.
- [20] 刘贵富, 赵英才. 产业链:内涵、特性及其表现形式[J]. *财经理论与实践*, 2006(3): 114-117.
- [21] 吴巧生, 周娜, 成金华, 等. 全产业链锂产品贸易格局演化与中国地位[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2023, 29(3): 102-112.
- [22] 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.
- [23] LI B, NG S J, HAN J C, et al. Network evolution and risk assessment of the global phosphorus trade [J]. *The science of the total environment*, 2022, 860:160433.
- [24] 周美静, 王甫园, 邵留国. 中国境外国家(地区)稀土供应链韧性评估:以钕铁硼永磁体为例[J]. *资源科学*, 2023, 45(9): 1746-1760.
- [25] 况新亮, 刘垂祥, 熊朋. 锂离子电池产业分析及市场展望[J]. *无机盐工业*, 2022, 54(8): 12-19, 32.
- [26] 王革, 郭思妙, 石小丽. 产业链创新视角下战略性新兴产业技术转移网络演化研究:以锂离子动力电池产业为例[J]. *中国科技论坛*, 2024(11): 81-90.
- [27] 应雄, 汪寿阳, 杨宇瑶. 能源转型下的锂、钴、镍资源需求及回收潜力分析:基于电动汽车的视角[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(7): 1226-1234.
- [28] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 488-502.
- [29] 陈伟, 王芯芮, 龙燕, 等. “一带一路”沿线地区贸易网络韧性研究[J]. *经济地理*, 2024, 44(1): 22-31.
- [30] SUN X, WEI Y, JIN Y, et al. The evolution of structural resilience of global oil and gas resources trade network[J]. *Global networks*, 2023, 23(2): 391-411.
- [31] 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.
- [32] YANG J, CHEN W. Unravelling the landscape of global cobalt trade: patterns, robustness, and supply chain security [J]. *Resources policy*, 2023, 86: 104277.
- [33] 王华, 李龙. 全球半导体贸易网络的结构演进及稳定性分析[J]. *科学学研究*, 2025, 43(3): 462-476.
- [34] GAO J X, BARZEL B, BARABÁS I. Universal resilience patterns in complex networks [J]. *Nature*, 2016, 530(7590): 307-12.
- [35] BARRAT A, BARTHÉLEMY M, PASTOR-SATORRAS R, et al. The architecture of complex weighted networks[J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the united states of america*, 2004, 101(11): 3747-3752.
- [36] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A. Error and attack tolerance of complex networks [J]. *Nature: international weekly journal of science*, 2000, 406(6794): 378-382.
- [37] 陈雨阳, 刘勇, 周成乾, 等. 废旧锂电池综合回收利用技术研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2024, 52(5): 103-108.

(本文责编:润 泽)