

引用格式:李浩然,徐文杰,姬强,等.产业链视角下全球钴物质贸易网络格局与风险特征[J].资源科学,2025,47(7):1562-1575.[Li H R, Xu W J, Ji Q, et al. Network pattern and risk characteristics of global cobalt material trade from the perspective of industry chain[J]. Resources Science, 2025, 47(7): 1562-1575.] DOI: 10.18402/resci.2025.07.13

产业链视角下全球钴物质贸易网络格局与风险特征

李浩然^{1,2},徐文杰^{1,2},姬 强^{1,2},孙晓蕾^{1,2}

(1. 中国科学院科技战略咨询研究院,北京 100190;
2. 中国科学院大学公共政策与管理学院,北京 100049)

摘要:【目的】钴作为关键战略资源,其供需格局高度地理分离,贸易安全问题日益凸显。系统识别钴贸易格局与风险演化,对维护产业链稳定和优化资源安全政策具有重要意义。【方法】立足钴物质贸易,选择开采、生产、制造和废弃物管理4个产业链阶段共29种钴产品,构建全球钴物质贸易网络,基于2012—2022年的网络拓扑结构,从进口集中度、贸易中介性和资源获取难度三方面构造全球钴物质贸易网络的贸易风险指数。【结果】①钴物质贸易格局的地理分布呈现核心集聚趋势,开采和制造阶段异质性减弱,生产阶段异质性增强,废弃物管理阶段无明显演变趋势。②主要进口国(地区)贸易风险制约全球钴贸易网络的稳定性。高风险国家(地区)的中介控制能力和资源获取能力虽有所提升,但进口集中度仍是决定风险的主导因素。③国家(地区)间贸易依赖关系在钴开采、生产、制造和废弃物管理阶段差异明显,且影响贸易依赖关系的驱动力也存在差异。开采阶段的依赖关系主要集中在亚非地区;生产阶段的依赖关系开始向全球扩散;在制造阶段中,亚洲国家(地区)间的依赖关系显著增强;在废弃物管理阶段,北美洲和欧洲国家(地区)之间贸易依赖关系尤为紧密。【结论】全球钴物质贸易网络稳定性取决于主要进口国(地区)。中国作为主要进口国,应加强钴资源供应多元化布局,同时推动技术创新与产业升级,加快布局废料资源回收体系,健全风险预警与应对体系,以保障供应链安全、巩固战略地位、掌握循环利用主动权。

关键词:钴物质;贸易网络;贸易风险;产业链;循环利用;全球

DOI: 10.18402/resci.2025.07.13

1 引言

钴作为一种重要的战略性资源,广泛应用于电池、高温合金、硬质合金、磁性材料和催化剂等多个关键领域,在新型高端产品制造^[1-3]、清洁能源结构转型^[4]以及技术优化^[5]等方面发挥着重要作用,这极大地推动了全球钴资源需求的快速增长。根据国际能源署(IEA)测算,2020—2040年,全球钴资源需求预计将增长21倍^[6]。然而,全球钴资源的空间分布极不均衡,呈现明显的供需分离特性。截至2023年底,刚果(金)和澳大利亚两国的钴资源储量合计占全球总储量的70%,其中刚果(金)独占全球55%

的钴储量,并贡献了约74%的全球钴产量^[7]。与此同时,钴的消费端主要集中在中国、日本以及韩国等亚洲国家^[8]。这种资源和需求的高度地理集中性,使得全球钴贸易成为缓解供需失衡与产销空间错配的关键手段。然而,随着全球对钴资源依赖度的持续加深,资源国政策调整、价格波动和大国竞争等风险愈发显著,给全球钴资源贸易格局带来了诸多不确定性。

除了市场供需矛盾外,全球钴资源的地理分布还使得钴资源的地缘政治属性愈加突出。主要经济体在争夺矿产资源控制权和权益空间方面的竞

收稿日期:2024-09-02;修订日期:2025-03-06

基金项目:国家社会科学基金重点项目(23AZD071);国家社会科学基金重大项目(23&ZD093)

作者简介:李浩然,女,河北邢台人,博士生,研究方向为关键矿产风险。E-mail: lihaoran23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:孙晓蕾,女,山东烟台人,研究员,研究方向为能源与关键矿产安全。E-mail: sxltracy@163.com

争愈加激烈,钴逐渐成为大国地缘政治博弈的焦点之一。中国在2016年发布的《全国矿产资源规划(2016—2020年)》中将钴列为战略性矿产,美国与欧盟早在2011年便已将钴纳入关键矿产清单^[9],并明确指出钴及其他关键矿产与中国在全球供应链中存在竞争关系。刚果(金)和澳大利亚作为全球最主要的钴资源国家,已成为美国推动其关键矿产战略从“效率优先”向“安全优先”转变的重要合作伙伴。然而,刚果(金)国内政治环境的不稳定性以及手工采矿等问题,增加了全球钴供应链的不确定性^[10-12]。为应对这一挑战,美国提出了扩大的战略性矿产计划,并发布《能源资源治理倡议》,通过建立“矿产安全伙伴关系”等去风险化政策工具,加速推动全球资源治理的集团化趋势。简而言之,钴等关键矿产正日益成为重塑国际经贸联系和地缘政治格局的重要因素,这将加速全球钴贸易格局的演变进程,还将推动相关风险的进一步集聚。因此,研究钴贸易风险对于保障中国资源安全与供应链稳定性具有重要现实意义。

为系统解析钴贸易格局及其风险特征,现有研究主要采用物质流和贸易网络两种研究范式。从全生命周期视角来看,物质流方法覆盖了“资源开采—生产加工—材料制造—废弃物管理”全产业链,能够有效追踪钴资源在上中下游的流动过程^[2,13-15]。这一方法在揭示资源流向方面具有独特优势,但在描述贸易模式和复杂关系时存在局限。为了弥补这一不足,复杂网络方法被引入到钴贸易格局研究中,且逐渐成为主流研究手段^[3,16-20]。当前钴贸易网络研究多集中于产品贸易层面^[16,21],然而钴产品种类繁多,且不同产品的贸易量级差异显著,传统的产品贸易分析难以直观揭示钴资源在全产业链上的实际分布与流动。为此,学者尝试结合物质流与复杂网络方法,通过将产品贸易量与物质含量相乘,构建起新的物质贸易网络。如Shi等^[16]结合各产品的钴物质含量,研究了开采、化工生产和产品制造3个阶段的依赖关系。值得注意的是,现有研究对钴产品的钴物质含量选择标准缺乏统一性,常将多种钴产品的钴物质含量简化为相同的值。而Houssini等^[22]则对钴氧化物和氢氧化物等产品的钴物质含量给出了不同的数值。这种不一致性使得研究结果缺乏较好的可比性和准确性。因此,在

构建钴物质贸易网络过程中,识别并确定统一的钴物质含量系数是首要解决的数据标准化问题。

随着复杂网络方法在钴贸易研究中的深入应用,学者针对不同尺度的钴贸易网络,从密度、群落等网络拓扑结构^[16,17],到资源依赖度^[23]、供应链控制力^[24,25]与竞争力^[26]等风险特征展开了多维度的研究工作。这些研究主要聚焦于钴贸易网络的拓扑结构分析^[3,16,21],对风险的量化研究多侧重于特定国家的贸易风险^[12,17,24],对全球钴贸易网络中出口国与进口国(地区)间的风险相关性的量化探讨尚显不足,这限制了对全球钴贸易中“风险因素-国家依赖”的深入分析。

随着全球对资源可持续利用的共识日益深化,钴资源的废弃物管理阶段贸易将成为未来国际竞争的关键领域。然而,现有研究多侧重钴产业链的上中下游环节,尤其是资源的开采、生产加工和材料制造,对废弃物管理阶段的关注较少^[13,14]。此外,现有研究主要集中于锂电池产业链^[3,16,17],而对钴在高温合金、磁性材料、催化剂、染料、合金等其他重要领域的应用关注较少。这种研究视角的局限性难以全面揭示钴物质贸易的复杂特性和潜在风险。尽管已有研究在一定程度上推动了对钴产业链的认知,但仍有诸多局限。例如,赵晞泉等^[3]和Shi等^[16]分别在钴产业链的上中下游环节识别、贸易空间格局和拓扑结构上取得了重要进展,但其研究范围主要集中于特定领域或阶段。

综上,本文从全产业链视角出发,选取开采、生产、制造和废弃物管理4个阶段共29种钴产品,构建全球钴物质贸易网络,系统刻画钴贸易格局及其演变特征。同时,基于网络拓扑结构,量化分析进口集中度、资源获取难度与贸易中介性,综合评估全球钴贸易的多维风险。本文的主要边际贡献可概括为以下两个方面:①将研究对象聚焦于“钴物质”这一微观层面。通过引入钴物质含量系数校准,实现了研究重心从钴产品贸易向钴物质贸易的转变,避免因产品种类及贸易量级差异所导致的信息偏差。②将研究边界拓展至钴资源全产业链,从“横向”和“纵向”两维度入手,更系统全面地解析全球钴产业链的贸易特征。具体而言,纵向维度覆盖钴产业链从资源开采到最终废弃物管理的全生命周期;横向维度扩展至钴在多元领域应用中的贸易

特征,涵盖锂电池之外的高温合金、磁性材料、催化剂等其他高技术领域。通过突破单一领域和阶段的限制,本文有助于系统揭示全球钴物质贸易格局的动态演变及其潜在风险,为战略资源治理和供应链风险决策提供更全面的理论支持。

2 研究方法

基于复杂网络方法,针对钴产业链的开采、生产、制造和废弃物管理阶段,构建钴物质贸易网络 $G = (V, E)$, 其中节点 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示国家(地区)集合,边 $E = \{w_{ij}\}$ 表示贸易关系集合,公式如下:

$$w_{ij} = \sum_{p \in S} c^p \times w_{ij}^p \quad (1)$$

式中: i, j 分别表示不同国家(地区)($i \neq j$), v_i 表示进口国(地区), v_j 表示出口国(地区); w_{ij} 表示从国家(地区) v_j 出口到国家(地区) v_i 的钴物质的贸易流量^[21]; w_{ij}^p 表示从国家(地区) v_j 出口到国家(地区) v_i 的钴产品 p 的贸易量(kg); c^p 表示钴产品 p 中的钴物质含量; S 表示开采、生产、制造、废弃物管理阶段包含的产品集合。

2.1 网络格局

计算网络平均聚集系数、平均最短路径和度分布,从集聚性、传输性、异质性3个维度刻画钴物质贸易网络格局。

(1) 平均聚集系数公式为:

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

式中: C 为平均聚集系数; N 为网络中参与贸易的国家(地区)节点个数; E_i 为国家(地区) v_i 和有贸易关系的国家(地区)的实际连接边数; k_i 为国家(地区) v_i 的贸易边数。该系数反映的是单个国家(地区)与贸易国家(地区)之间实际贸易关系数与所有可能贸易关系数之比的平均值。平均聚集系数反映了网络中节点的邻居之间相互连接的紧密程度,平均聚集系数越大则表示国家(地区)之间贸易往来越密切。

(2) 平均最短路径公式为:

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij} \quad (3)$$

式中: L 为平均最短路径; d_{ij} 表示国家(地区) v_i 和国家(地区) v_j 之间的最短路径长度。 L 反映了任意两

个国家(地区)之间最短通路的平均值。网络的平均最短路径越大,代表从一个国家(地区)到另一个国家(地区)的资源运输需要经过更多的中间国家(地区),运输效率越低;反之,平均最短路径越小,则运输效率越高。

(3) 度分布计算公式如下:

$$P(k) = \frac{N_k}{N} \quad (4)$$

式中: $P(k)$ 为度数为 k 的概率,即网络中随机选择一个节点,其度数恰好为 k 的概率; N_k 代表连接数为 k 的节点个数。度分布用于描述网络节点连接数的分布特征,以考察网络节点的异质性。若度分布服从幂分布 $P(k) = k^{-r}$, 则表明节点之间存在显著的异质性,即网络中存在极少的“核心节点”和大量的“末梢节点”,且各节点的重要性存在明显差异。

2.2 贸易风险

从进口国视角出发,基于所构建的钴物质贸易网络,可从获取资源多样性、获取资源难易程度和控制资源流动三方面测度钴物质贸易风险:

$$RISK_i = HHI_i \times CC_i \times BC_i \quad (5)$$

式中: $RISK_i$ 表示进口国(地区) v_i 的贸易风险; HHI_i 表示进口国(地区) v_i 的进口集中度,公式为:

$$HHI_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{w_{ij}}{w_i} \right)^2 \quad (6)$$

式中: w_i 表示进口国家(地区) v_i 进口的钴物质总量。该指数采取赫芬达尔-赫希曼指数进行衡量^[23,27,28],取值范围为 $(1/N) \sim 1$,该指数越大代表一个国家(地区)的进口多样性越少,进口越集中。

CC_i 表示资源获取难度衡量国家(地区)获取资源的难度^[29],公式为:

$$CC_i = 1 - \frac{N-1}{\sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}} \quad (7)$$

进口国家(地区) v_i 与其他国家(地区)贸易最短路径越长,获取资源越难,因此 CC_i 值越大,资源获取难度越高。

BC_i 表示贸易中介性,公式为:

$$BC_i = 1 - \sum_{s=1}^N \sum_{u=1, u \neq i \neq s}^N \frac{\sigma_{su}(i)}{\sigma_{su}} \quad (8)$$

式中: $\sum_{s=1}^N \sum_{u=1, u \neq i \neq s}^N \frac{\sigma_{su}(i)}{\sigma_{su}}$ 表示国家(地区) v_i 在贸易网络中的位置和资源控制能力^[30],贸易中介性值越大,

表示国家(地区) v_i 对资源的控制能力越弱; σ_{su} 表示是国家(地区) v_s 与国家(地区) v_u 之间最短路径的总数量; $\sigma_{su}(i)$ 是通过国家(地区) v_i 连接国家(地区) v_s 与国家(地区) v_u 之间的最短路径数量。

在贸易网络中去除国家(地区) v_j 对国家(地区) v_i 的出口后, 进口国家(地区) v_i 的贸易风险指标变化表示出口国家(地区) v_j 对进口国家(地区) v_i 的影响, 即进口国家(地区) v_i 对出口国家(地区) v_j 的依赖度, 具体公式如下:

$$M_j^{(i)} = |RISK_i - RISK_i^j| \quad (9)$$

式中: $M_j^{(i)}$ 表示进口国家(地区) v_i 对出口国家 v_j 的依赖度; $RISK_i^j$ 表示去除出口国家(地区) v_j 后进口国家(地区) v_i 的风险。

3 样本与数据

本文参考现有研究^[1,13,22,31-34], 围绕钴资源开采、生产、制造与废弃物管理4个关键环节, 遴选出29种钴产品作为研究对象(表1)。具体包括: 开采阶段的钴矿、生产阶段钴的氧化物等6种产品, 制造阶段的有机颜料等21种产品, 以及废弃物管理阶段的钴废料。由于走私等因素可能导致出口数据无法全面反映实际贸易情况, 相较之下, 进口数据能够有效减少出口数据中的误差^[35], 因此本文采用了2012—2022年的全球钴进口贸易数据进行分析, 数据来源于联合国商品贸易统计数据库(<https://comtradeplus.un.org/>)。鉴于同一产品在不同国家(地区)或不同时期的实际钴物质含量可能存在显著差异, 本文系统梳理了现有文献中的钴物质含量研究, 基于数据时效性、准确性与共识性等遴选原则, 确定了本文所使用的钴物质含量参数。

4 结果与分析

4.1 全球钴物质贸易网络演化

全球化进程中的地缘政治变动和供应链调整, 加速了钴等关键矿产产业链从全球化向局部化、区域化、短链化转变^[36]。图1统计了2012—2022年钴产业链在开采、生产、制造和废弃物管理阶段的钴物质贸易量, 可以看出不同阶段的全球贸易态势差异显著。

(1) 开采阶段的钴贸易量总体呈下降趋势, 这主要受到刚果(金)国内政策调整的影响。2013年12月31日起, 刚果(金)实施了禁止精矿出口的政策, 以鼓励钴矿企业在当地开展加工和冶炼活动。

表1 钴产业链各阶段涉及产品、HS码及钴物质含量

Table 1 Products, HS codes, and cobalt content at different stages of cobalt industry chain

产业阶段	HS码	产品名称	钴物质含量/%
开采	260500	钴矿石和精矿	7.60 ^{[1,13,31](a)}
生产	282200	钴的氧化物, 钴的氢氧化物, 商用氧化钴	67.50 ^{[1,13,31](b)}
	284190	金属氯酸盐或过氧金属酸盐	59.00 ^[13,22]
	283329	硫酸盐	20.50 ^{[13](c)}
	283699	碳酸盐, 过碳酸盐	49.60 ^[1,13,31]
	810520	钴粉及颗粒	99.00 ^[1,13,22,31]
	810590	其他钴制品	99.00 ^[1,13,31]
制造	320417	有机颜料及其制品	25.50 ^[13]
	850730	镍镉蓄电池	0.60 ^[1,13,22,31]
	850750	镍氢蓄电池	3.00 ^[22,33]
	850760	锂离子蓄电池	6.85 ^[22,33]
	847130	便携式自动数据处理设备	0.46 ^{[1,13,31](d)}
	851711	有线电话机	0.02 ^[31,33]
	851712	移动电话	2.88 ^[31,33]
	381511	以镍或镍化合物为活性物质的负载催化剂	1.50 ^{[1,13,31](e)}
	381512	以贵金属或贵金属化合物为活性物质的负载催化剂	1.50 ^[1]
	840710	航空器用点燃往复式或旋转式活塞内燃机	2.75 ^[1,13,22,31,34]
	845921	数控钻床	2.50 ^{[1,13,31](f)}
	845929	其他钻床	2.50 ^{[1,13,31](f)}
	845931	数控镗铣床	5.00 ^{[1,13,31](f)}
	845939	其他镗铣床	5.00 ^[1,13,31]
	845940	金属切削用镗床	5.00 ^[1,13,31]
	845951	升降台式数控铣床	5.00 ^{[1,13,31](f)}
	845959	其他升降台式铣床	5.00 ^{[1,13,31](f)}
	845961	其他数控铣床	5.00 ^{[1,13,31](f)}
	845969	其他铣床	5.00 ^{[1,13,31](f)}
	845970	其他攻丝机床	2.50 ^{[1,13,31](f)}
	846130	拉床	5.00 ^{[1,13,31](f)}
废弃物管理	810530	钴废料	68.00 ^[1,22]

注: (a) Houssini等^[22]对HS 260500设定的钴含量为0.10%~2.50%的均值, 本文未采用; (b) British Geological Survey^[32]未给出HS 282200的具体数据, 本文未采用Houssini等^[22]假设值; (c) Houssini等^[22]的HS 283329数据仅来源于First Cobalt公司, 本文未采用; (d) Houssini等^[22]和Song等^[34]将HS 847130按笔记本与台式机钴含量区分, 与贸易数据不符, 本文未采用; (e) Houssini等^[22]对HS 381511产品钴含量假设值缺乏共识, 未采用; (f) Houssini等^[22]将多种机床产品钴含量统一设定为0.15%, 考虑准确性, 本文未采用。

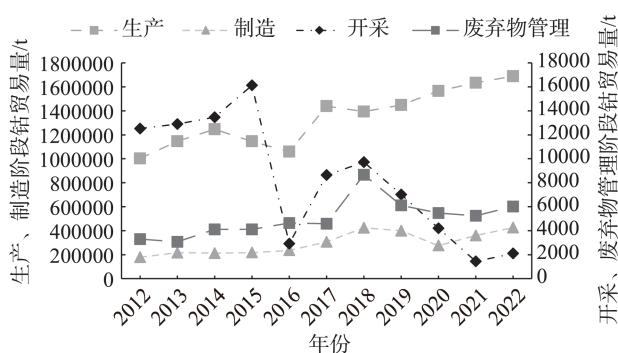


图1 2012—2022年钴产业链开采、生产、制造和废弃物管理阶段钴物质贸易量

Figure 1 Trade volume of cobalt materials in mining, production, manufacturing, and waste management stages of cobalt industry chain, 2012-2022

尽管禁令的正式实施一度多次推迟,但当地企业和国际买家已逐渐接受这一“潜在禁令”,推动刚果(金)的钴贸易重心从开采阶段的原材料出口转向生产阶段的加工产品贸易。同时,中国(全球最大进口国)的精炼系统更倾向于直接采购钴中间品以降低加工成本。这些因素共同促成了全球范围内钴产业链开采阶段和生产阶段产品贸易量此消彼长的趋势。

(2)生产阶段的钴贸易量自2018年起稳步增长,成为全球钴贸易的主要环节。中国在该阶段既是最大进口国,也是最大出口国,显示出其在精炼加工领域的全球竞争力。这一优势与中国企业对刚果(金)的资金支持和技术合作密不可分^[10,37],促进了刚果(金)资源开发和贸易量的稳定增长。

(3)制造阶段的钴贸易量在2012—2015年保持

平稳,2016—2018年迅速增长,2019—2022年则呈现“V”型波动。贸易波动主要由新能源汽车行业的发展及疫情冲击共同驱动。2015年《巴黎协定》提出的1.5 °C控温目标促使新能源汽车等产业的迅速发展,推动了制造阶段的贸易扩张,而新冠疫情则造成供应链短期中断。

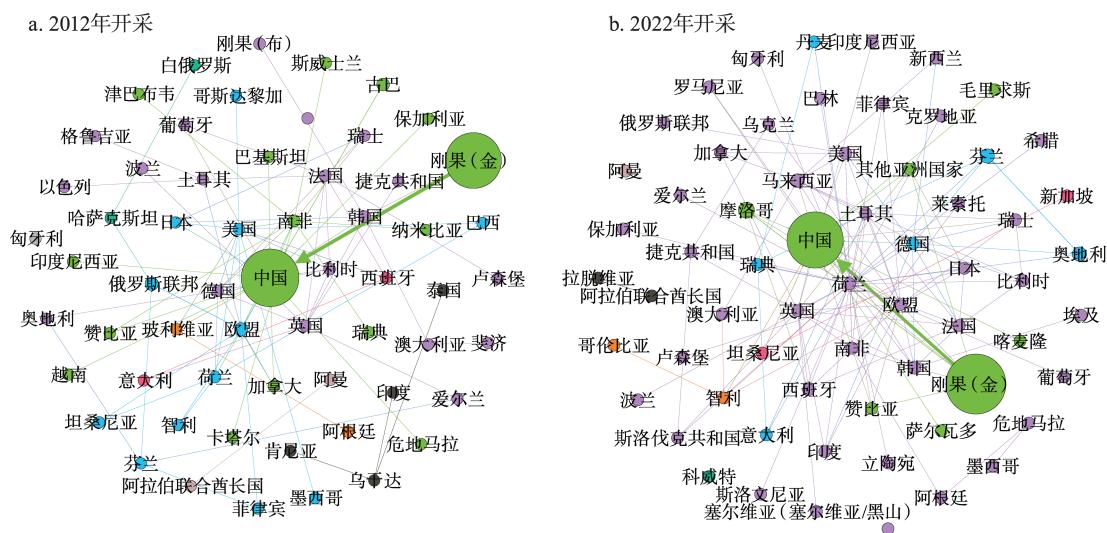
(4)废弃物管理阶段的钴资源回收贸易呈现增长趋势,钴贸易流量在2018年达到峰值,随后因疫情影响有所下降。在该阶段,美国在全球废料资源贸易中占据核心地位。相比之下,中国在废弃物管理阶段的贸易活动较少,这与其废料资源回收体系尚未完善有关。随着全球钴资源循环利用潜力的进一步挖掘,中国亟需加快废料资源回收的技术布局,以应对未来可能的资源短缺风险。

4.2 全球钴物质贸易网络格局

4.2.1 各阶段网络格局特征

对比2012年和2022年全球钴物质贸易网络发现,各阶段的贸易格局和核心驱动力呈现显著差异。

(1)开采阶段的全球钴物质贸易网络呈现出以刚果(金)-中国为核心的垄断格局(图2a,b)。刚果(金)凭借丰富的资源禀赋,成为全球钴资源的主要出口国。而中国则因其强大的生产加工能力,成为最大进口国。这种优势互补的关系使刚果(金)与中国在网络中形成了紧密联系,共同主导了全球贸易格局。与此同时,在生产阶段,网络的集中化进一步加强。2012年形成的中国-刚果(金)-美国-德国为核心的格局,至2022年演变为由中国-刚果



续图

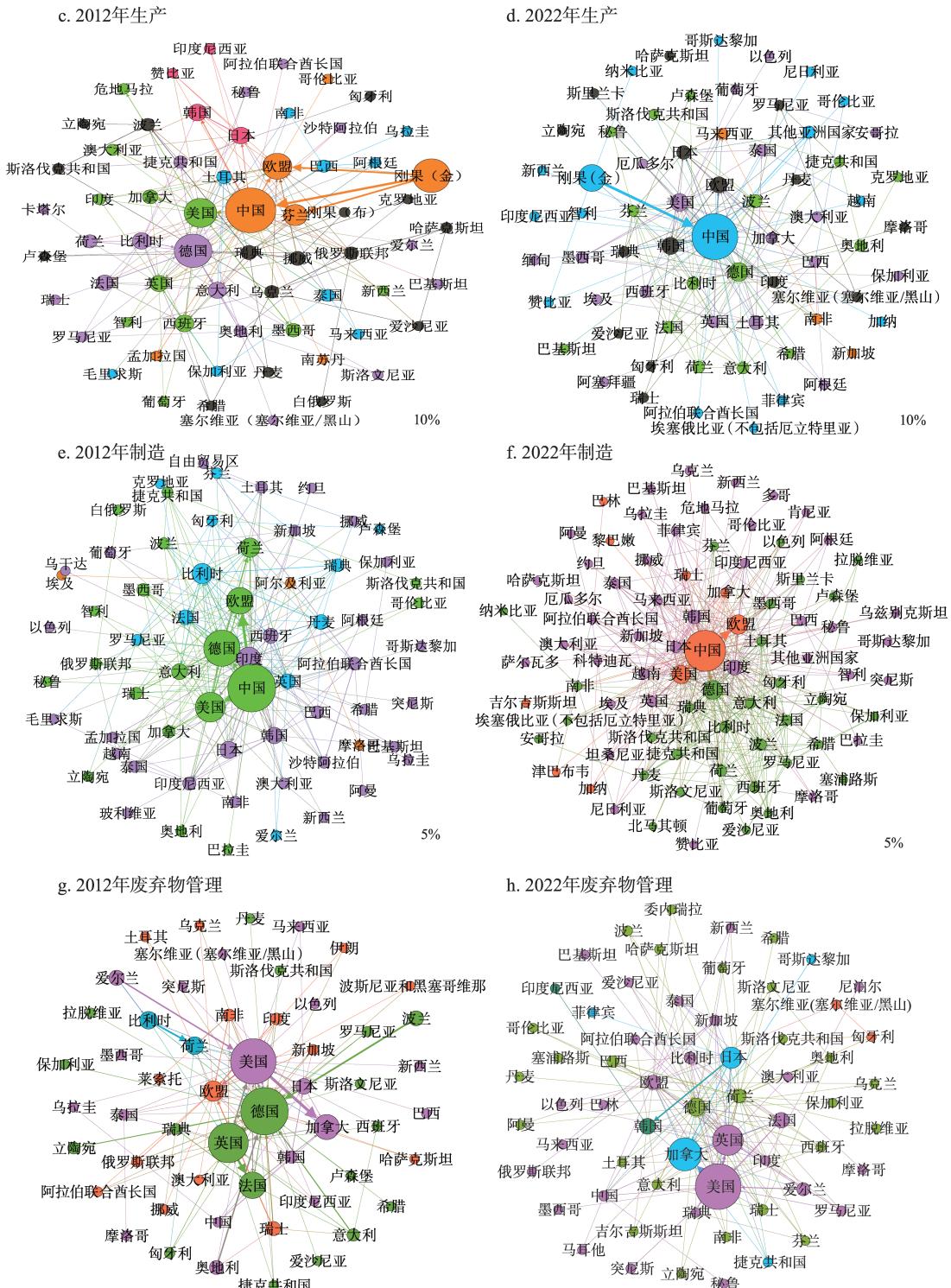


图2 2012年和2022年全球钴物质贸易网络

Figure 2 Global trade networks of cobalt materials, 2012 and 2022

注:网络中节点的大小代表国家(地区)的钴物质的进出口总量,节点颜色表示社区的分类,贸易边粗细表示钴物质贸易量大小。10%(5%)表示只展示贸易边前10%(5%)的贸易情况。

(金)双核主导的局面,显示出中国在生产环节中的显著竞争力(图2c、d)。相较于中国,美国的贸易网络更倾向于与北美洲和欧洲国家建立紧密的进出口关系,特别是与加拿大、西班牙、德国和挪威等国家。这一选择倾向主要受其贸易关系和地缘政治策略的影响。美国与加拿大、挪威和德国等国家建立了矿产安全伙伴关系,这进一步巩固了它们之间的经济合作和贸易往来。

(2)制造阶段的贸易格局从2012年以中国-美国-欧盟-德国为核心,演变为2022年美国、德国及欧盟的核心地位相对减弱,而东亚国家的核心地位显著提升的网络结构(图2e、f)。中国的显著地位不仅体现在其与美欧形成的紧密贸易联系中,也表现为其主导东亚内部的制造业供应链。这一阶段的核心驱动力主要来自电池、磁性材料和合金等高附加值产品,这些产品与新能源和国防领域的快速发展密切相关。此外,美欧对中国供应链依赖的担忧加剧,进一步推动其加强资源供应的本地化与多元化布局。

(3)废弃物管理阶段的贸易格局以北美和欧洲为主导,2012年以美国-英国-德国为核心,2022则演化为以美国-加拿大-英国为核心(图2g、h)。2012年,美国作为主要的净进口国,其废料资源回收技术较为滞后;到2022年,通过政策激励与技术创新,美国成功转型为净出口国且净出口量持续增加^[2],并在网络中处于核心位置,对维护贸易稳定发挥关键作用。与此同时,加拿大和英国借助区域合

作机制,提升了废料资源的贸易参与度。然而,中国在这一阶段的参与度依然有限,主要受制于技术短板和政策支持不足,这使得其在废料网络中的地位更趋于边缘化。从网络结构来看,废弃物管理阶段的集聚性远高于开采阶段,显示出其在区域化、局部化发展中的高度依赖性。随着全球对资源可持续利用的重视,废弃物管理阶段的贸易潜力巨大,预计未来将显著影响钴产业链的整体格局。

4.2.2 网络结构特性与传输效率

钴物质贸易网络的集聚性和传输效率在不同阶段表现出显著差异(表2)。开采阶段的物质网络集中在46~63个国家(地区),网络集聚性较低,表明资源分布相对分散,贸易集中度不高。相比之下,生产和制造阶段网络的集聚性相比开采阶段增长了约10倍,反映出中下游贸易环节的高度集中化和协同性,显示全球化进程对中下游产业链的强劲推动作用。而废弃物管理阶段尽管覆盖的国家(地区)数量和开采阶段相近,但网络集聚性约是开采阶段的5倍,废料资源的贸易更倾向于区域化发展,集中于少数技术先进的国家(地区)。

从网络平均最短路径来看,不同阶段的网络传输效率也有显著差异。制造阶段的平均最短路径最短(1.80~1.93),而开采阶段的平均最短路径最大(1.90~3.11),显示了开采环节中由于资源产地的地理集中和需求端的多样化分布,导致的较低传输效率。开采和废弃物管理阶段的传输效率较低,凸显了其在资源获取和回收利用中的结构性限制。开

表2 钴产业链物质网络的集聚性与传输性

Table 2 Agglomeration and transmission of material networks in cobalt industry chain

年份	开采			生产			制造			废弃物管理		
	节点数	平均聚集系数	平均最短路径	节点数	平均聚集系数	平均最短路径	节点数	平均聚集系数	平均最短路径	节点数	平均聚集系数	平均最短路径
2012	59	0.05	2.41	130	0.53	1.99	218	0.60	1.93	55	0.27	2.20
2013	61	0.09	2.32	148	0.53	2.02	224	0.62	1.90	59	0.32	2.25
2014	59	0.07	2.64	155	0.55	2.04	225	0.61	1.85	64	0.28	2.16
2015	62	0.05	1.93	182	0.55	2.06	226	0.62	1.86	56	0.25	2.11
2016	54	0.08	2.73	170	0.57	2.02	229	0.60	1.84	59	0.30	2.12
2017	63	0.12	1.94	169	0.57	2.01	227	0.64	1.84	57	0.35	2.23
2018	57	0.08	2.57	165	0.59	1.96	228	0.63	1.83	55	0.42	2.27
2019	54	0.08	3.11	171	0.58	2.01	225	0.64	1.81	61	0.23	2.38
2020	46	0.08	2.64	167	0.59	1.99	228	0.62	1.81	61	0.28	2.41
2021	53	0.07	2.52	169	0.60	1.98	227	0.64	1.80	61	0.28	2.37
2022	62	0.12	2.36	163	0.53	2.00	229	0.62	1.84	62	0.33	2.30

采阶段集中于少数资源富集国家(地区),国际贸易依赖于核心出口国(地区)的资源禀赋;而废弃物管理阶段尽管参与国家(地区)数量有限,但由于技术门槛和回收能力的差异,资源流动更多集中于少数发达国家(地区)。相较之下,生产和制造阶段的高效率不仅得益于全球化的贸易网络,也反映出核心生产国(地区)的主导作用。这种网络特性揭示了钴资源从原材料开采到最终利用的复杂流动机制,也提示决策者需因地制宜地优化不同阶段的资源配置和流通策略。

4.2.3 节点异质性与资源分布动态

钴产业链各阶段贸易网络度的分布表现出显著的异质性特征(图3)。在2012年,开采和制造阶段的贸易网络呈现出明显的幂率特性,符合无标度网络的异质性规律(图3a、c)。这反映了资源和贸易的高度集中,少数国家(地区)主导了钴资源的开采和制造环节。例如,刚果(金)在开采阶段的资源禀赋地位突出,而中国则凭借强大的制造能力成为主要节点。这一特点凸显了钴资源在全球供应链中的垄断性,导致网络中节点的重要性差异显著。随着时间推移,2017年和2022年网络幂率特性逐渐

减弱。显示出节点间连接的分布趋于均衡。这一变化表明,开采和制造阶段的资源分布集中性有所缓解,更多国家(地区)参与到全球钴产业链中,促进了资源的多元化流动。尤其是在制造阶段,马来西亚、越南、印度等国家的参与度提高,打破了原有少数核心节点的垄断格局。

生产阶段的网络幂率特性呈现“先增强后减弱”的趋势(图3b)。在网络幂律特性增强阶段,越来越多的国家(地区)因资源稀缺性和国际贸易需求选择优先与资源禀赋丰富、贸易能力强的国家(地区)进行合作,导致资源分布的不均进一步加剧。随后,幂率特性逐渐弱化,发达国家对钴资源的需求趋于下降,同时发展中国家的需求快速增长,使得全球贸易网络的集中性有所缓和。这种动态变化反映了国际需求重心从发达国家向发展中国家转移的趋势,也凸显了生产阶段对全球钴贸易网络的结构性调整作用。

4.3 全球钴物质贸易网络风险

4.3.1 钴产业链各阶段贸易风险

钴物质在开采、生产、制造和废弃物管理各个阶段呈现出显著的贸易风险差异(图4)。其中,开

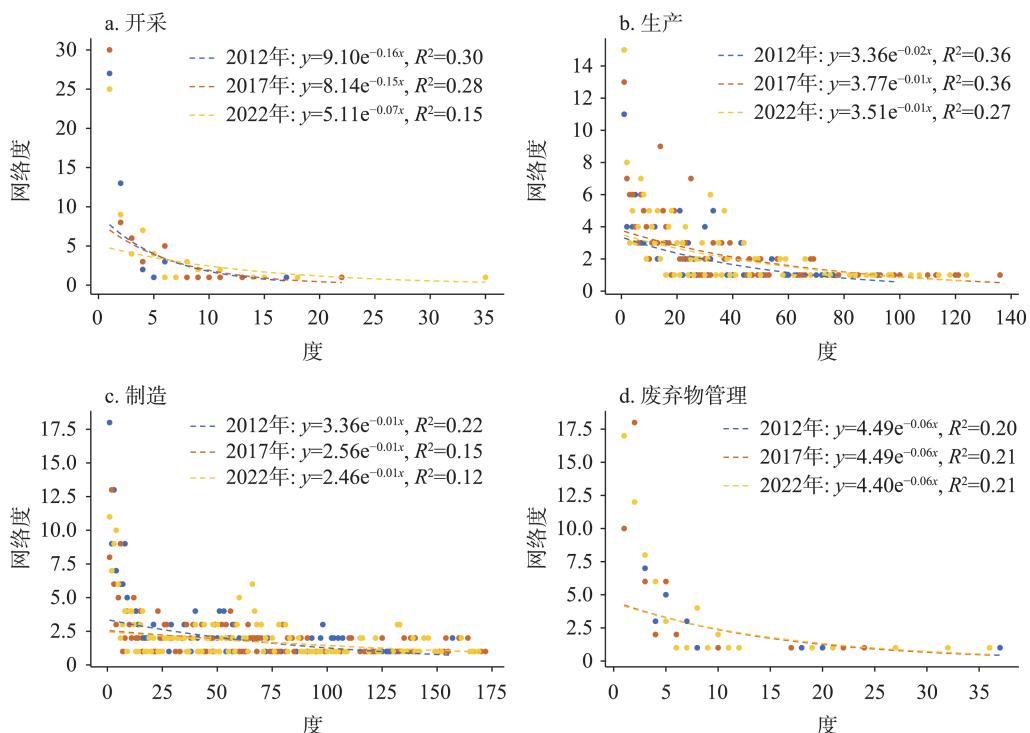


图3 2012、2017和2022年钴产业链开采、生产、制造和废弃物管理阶段网络度的分布

Figure 3 Distribution of network degree in mining, production, manufacturing, and waste management stages of cobalt industry chain, 2012, 2017 and 2022

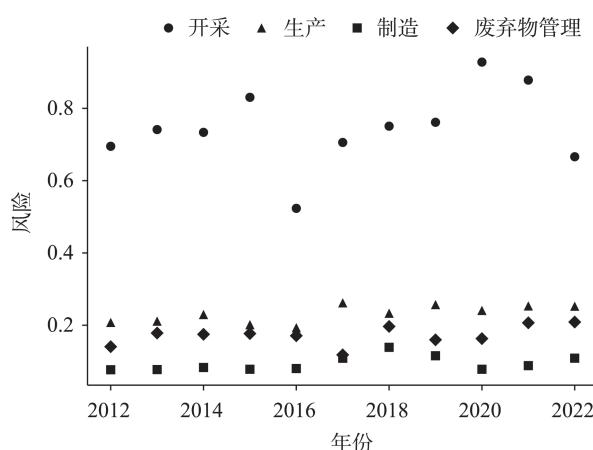


图4 2012—2022年钴产业链各阶段贸易风险

Figure 4 Trade risks at different stages of cobalt industry chain, 2012–2022

采阶段风险最高,主要受资源集中分布和出口国(地区)地缘政治影响。相比之下,生产阶段和废弃物管理阶段的贸易风险相对较低,而制造阶段的贸易风险最低。从动态趋势来看,各阶段的贸易风险总体呈波动上升态势,但个别年份存在例外。例如,2016年开采阶段的贸易风险却降至近年来的最

低水平,这一变化与当时钴物质的贸易量趋势相吻合。然而,2017—2020年,尽管开采阶段的贸易量明显下降,贸易风险却持续攀升。这种现象主要由于电动汽车等产业对钴矿需求的急剧增加,供需关系失衡加剧市场竞争和风险。相比之下,生产、制造和废弃物管理阶段的贸易风险波动幅度较小,且相对稳定。制造阶段由于进口来源更加多元化,风险分散效应显著。例如,美国通过实施多元化的进口策略有效降低了该阶段的贸易风险^[3]。然而,废弃物管理阶段的风险管理策略尚未完善,需引起进一步关注。

4.3.2 主要进口国贸易风险

为深入剖析主要进口国的贸易风险的演化路径,揭示不同阶段风险水平及其结构的变化特征。本文分析了2012年、2017年和2022年主要进口国的相对风险及其构成因素(图5)。结果表明,中国在开采阶段的贸易风险较高,主要归因于进口来源的高度集中性。此外,中国获取资源的难度也在逐年增加,进一步加剧了风险。在生产阶段,中国的高贸易风险同样归因于进口的高度集中性。与此

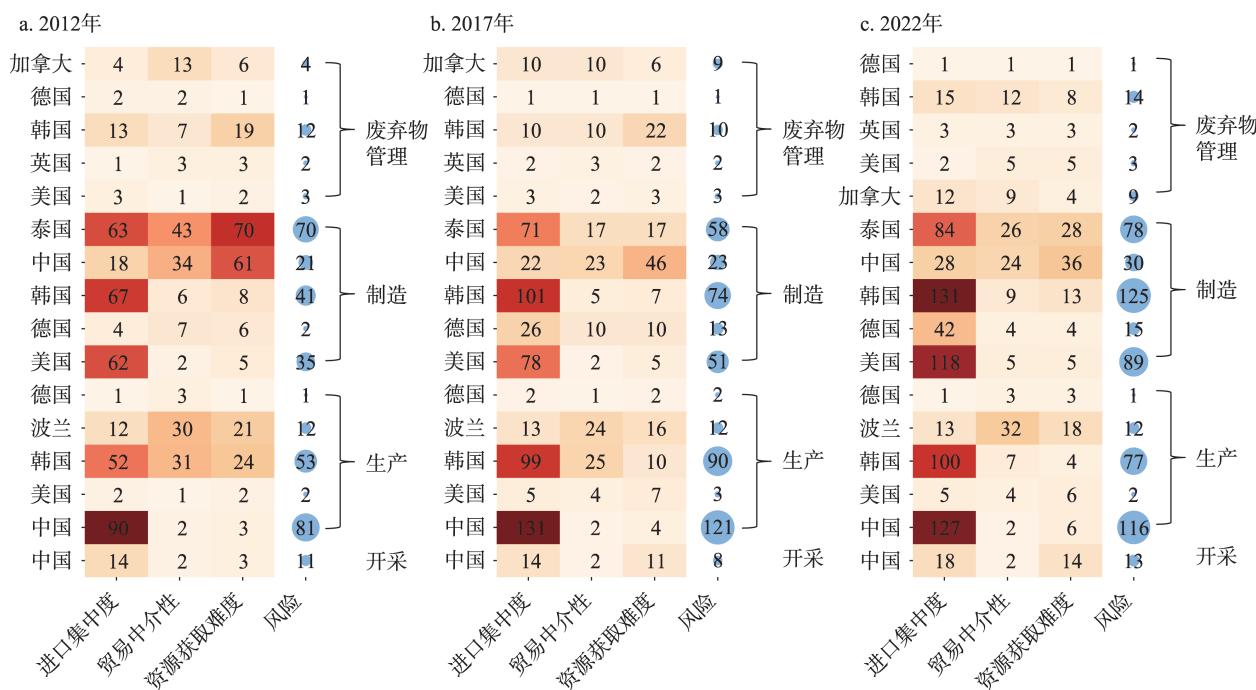


图5 2012、2017和2022年主要进口国相对风险

Figure 5 Relative risks of major importing countries, 2012, 2017, and 2022

注:相对风险数值越大表明风险越高,相对进口集中度数值越大表明进口越集中,相对贸易中介性数值越大表明控制

资源的能力越弱,相对资源获取难度数值越大表明获取资源的能力越弱。开采阶段由于中国进口比例大于80%,因此开采阶段只选取中国、生产、制造和废弃物管理阶段选取进口前5的国家(地区)。

同时,韩国的进口集中度、贸易中介性以及资源获取难度指标均表现出较高的风险水平。

在制造阶段,泰国的贸易风险尤为突出,主要受进口集中度过高、资源获取难度高及贸易中介性较低的综合影响。韩国和美国在制造阶段的贸易风险也较高,主要归因于对少数出口国(地区)的过度依赖。在废弃物管理阶段,主要进口国所面临的贸易风险普遍较低。这可能是由于废弃物管理阶段涉及的中间环节较少且交易频率较低。随着废弃物管理阶段贸易的逐步发展,各国需要持续关注并优化其风险管理策略,以确保长期的贸易稳定性和可持续性。

从风险演变的角度来看,2012—2022年部分高

风险国家的贸易风险进一步加剧。中国和韩国在开采阶段的贸易风险有所增强,而制造阶段韩国的贸易风险甚至超过泰国。尽管高风险国家在资源的控制能力和获取能力方面有所提升,但进口集中度的快速增加仍是导致风险上升的关键因素,进口来源的多元化依旧是降低贸易风险的核心策略。

4.3.3 主要进口国与出口国间依赖关系

如前文所示,贸易风险的高低与进口国对出口国的依赖关系密切相关。为进一步揭示当前此种依赖关系特征,本文选取了2022年贸易数据,绘制了4个阶段中主要进口国最依赖的前5个出口国的分布情况(图6)。

在生产阶段,与开采阶段贸易集中于亚洲和非



图6 2022年各阶段主要进口国的进口依赖国

Figure 6 Import dependence of major importing countries at different stages, 2022

注:节点大小表示进口国对出口国的依赖程度,箭头源点表示进口国,目标节点表示依赖的出口国,线的粗细表示依赖程度。

洲不同,生产阶段的贸易模式呈现全球化趋势,特别是欧洲地区内部以及亚洲之间的贸易联系日益增强(图6a、b)。例如,欧洲国家如波兰和德国在生产阶段主要依赖中国以及其他欧洲国家的出口。与此同时,中国在生产阶段的贸易依赖则集中在刚果(金)和韩国的出口上。韩国同样依赖中国的出口,体现了相互依存的贸易特点。中国凭借钴湿法冶炼技术的领先地位^[38],已经成为全球多个主要经济体的重要贸易伙伴。

制造阶段的贸易依赖呈现出亚洲内部强化的趋势(图6c)。亚洲在全球制造产业链中的地位日益提升,反映出区域经济一体化进程的加速,产业协同发展趋势明显。韩国、泰国和美国在制造阶段对出口国的依赖较强,其中美国在生产阶段更多依赖欧洲国家,但在制造阶段则转向对亚洲国家的依赖。韩国主要依赖中国、印度和日本的出口,泰国依赖马来西亚和日本的出口。这一转变反映了亚洲国家在全球供应链中的关键作用,以及全球制造业重心向亚洲转移的趋势。值得关注的是,中国已经成为这些主要进口国的关键供应国之一。在全球贸易中,中国扮演着不可或缺的角色,特别是在制造领域。中国凭借其雄厚的生产实力,对于维护全球贸易的连续性和稳定性起到了至关重要的作用。

在废弃物管理阶段,北美和欧洲之间的贸易依赖尤为紧密(图6d)。加拿大对美国的依赖以及韩国对日本的依赖性显著。这表明,废料资源回收领域的国际合作与竞争将成为未来贸易的重要方向。美国作为全球废弃材料贸易中的核心节点,不仅是加拿大和韩国的主要依赖国,还凭借其技术优势和政策支持^[2],在废料材料的回收与再利用领域占据主导地位。

5 结论与对策建议

5.1 结论

本文构建了2012—2022年钴产业链在开采、生产、制造和废弃物管理4个阶段钴物质贸易网络,围绕获取资源多样性、获取资源难易程度和控制资源流动3个维度,构造了进口国(地区)贸易风险指数。旨在系统识别钴产业链不同阶段的贸易格局与风险特征,为大国博弈格局下的钴产业链风险管控与

政策制定提供参考。主要结论如下:

(1) 钴物质贸易格局的地理分布呈现核心集聚趋势,开采和制造阶段异质性减弱,生产阶段异质性增强,废弃物管理阶段无明显演变趋势。开采和生产阶段逐渐形成以刚果(金)和中国为核心的垄断格局,刚果(金)主导资源出口,中国主导资源加工。制造阶段呈现多极化趋势,由中国、美国、欧盟和德国为主导,东亚国家的影响力日益增强。中国从开采阶段的最大进口国转变为生产和制造阶段的最大出口国,但是在废弃物管理阶段处于边缘地位,亟需加强资源回收体系建设。

(2) 主要进口国(地区)贸易风险制约全球钴贸易网络稳定性。中国在生产阶段贸易风险极高,主要原因是进口高度集中;制造阶段风险逐渐上升。韩国、泰国、美国等国在不同阶段面临高风险,进口集中度过高成为关键风险因素。尽管高风险国家(地区)中介控制能力和资源获取能力有所提升,但进口来源单一仍是主要风险来源。

(3) 国家(地区)间的贸易依赖关系在钴开采、生产、制造和废弃物管理阶段的差异明显,且影响贸易依赖关系的驱动力也不尽相同。开采阶段的依赖关系主要集中在亚非地区,生产阶段的依赖关系开始向全球扩散,欧洲内部与亚洲间贸易联系增强,中国凭借技术优势成为多国重要贸易伙伴。在制造阶段中,亚洲国家间的依赖关系显著增强,这反映出亚洲内部经济一体化进程加快,产业协同发展趋势明显。在废弃物管理阶段,北美和欧洲之间贸易依赖密切,加拿大对美国、韩国对日本的依赖尤为突出,跨洲贸易趋势逐步显现。

5.2 对策建议

通过对各阶段贸易格局及主要进口国(地区)贸易风险演化的系统分析,本文提出了加强钴资源供应多元化布局、深化国际合作与多边机制建设、推动技术创新与产业升级、加快布局废料钴资源回收体系、健全风险预警和应对体系这五方面的对策建议。

(1) 加强钴资源供应多元化布局。针对钴资源地理分布高度集中且供应格局受制于单一国家(地区)的现状,中国作为高对外依赖国家,应充分运用外交和贸易政策工具,拓宽钴资源进口渠道,分散

供应来源,降低单一依赖带来的贸易风险。在产业链的不同阶段,应结合出口国(地区)对中国供应链的重要性,精准施策,深化贸易合作,提升合作效能与抗风险能力,为供应链安全提供有力保障。

(2)深化国际合作与多边机制建设。面对全球钴资源贸易格局和区域间贸易依存关系的变化,中国应积极通过多边贸易机制和国际合作平台(如“一带一路”倡议)深化与钴资源富集国家(地区)的开发协作。同时,应加快继续推动亚洲经济一体化进程,强化区域内贸易和产业协同,促进贸易和投资便利化,进一步巩固在全球钴资源产业链中的战略地位。

(3)推动技术创新与产业升级。中国在钴资源的生产加工和制造阶段已占据关键地位,应持续加大技术创新力度,提升钴资源的利用效率和产品附加值推动产业向新材料和新能源高端领域延伸发展。通过优化技术路径,形成资源利用效率高、竞争力强的现代产业体系,进一步巩固在全球市场的技术优势。

(4)加快布局废料钴资源回收体系。针对废料钴资源贸易格局尚处于初步发展阶段的现状,中国应抢占先机,前瞻性地布局废料钴资源回收利用产业,重点加强技术研发与产业化推进,提升资源回收率和循环利用效率。同时,应构建跨地区合作机制,在废料资源领域实现协同创新,为未来钴资源循环利用掌握主动权。

(5)健全风险预警和应对体系。为有效应对全球钴资源市场波动及潜在风险,应建立健全钴产业链贸易风险预警和应对体系,动态评估全球市场趋势与主要出口国政策变化,研判产业链潜在风险。通过优化贸易策略和供应链管理,确保钴资源供应的稳定性和安全性,构筑更加稳固的产业链韧性。

参考文献(References):

- [1] Harper E M, Kavlak G, Graedel T E. Tracking the metal of the gob-lins: Cobalt's cycle of use[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 46(2): 1079–1086.
- [2] 刘立涛,赵慧兰,刘晓洁,等. 1995–2015年美国钴物质流演变[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 524–534. [Liu L T, Zhao H L, Liu X J, et al. Cobalt material flow in the United States from 1995 to 2015 [J]. Resources Science, 2021, 43(3): 524–534.]
- [3] 赵晞泉,陈伟. 全球钴资源贸易网络演化及其启示[J]. 资源科学, 2024, 46(1): 100–113. [Zhao X Q, Chen W. Changes of global cobalt trade network and implications[J]. Resources Science, 2024, 46(1): 100–113.]
- [4] Junne T, Wulff N, Breyer C, et al. Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt[J]. Energy, 2020, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118532.
- [5] Zeng A Q, Chen W, Rasmussen K D, et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. Nature Communications, 2022, DOI: 10.1038/s41467-022-29022-z.
- [6] International Energy Agency. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions[R]. Paris: IEA, 2021.
- [7] U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2024[R]. Reston: USGS, 2024.
- [8] Tan J, Keiding J K. Mapping the cobalt and lithium supply chains for e-mobility transition: Significance of overseas investments and vertical integration in evaluating mineral supply risks[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107788.
- [9] 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. [Wang A J, Yuan X J. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(11): 1550–1559.]
- [10] Gulley A L. China, the Democratic Republic of the Congo, and artisanal cobalt mining from 2000 through 2020[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2023, DOI: 10.1073/pnas.2212037120.
- [11] Savinova E, Evans C, Lèbre É, et al. Will global cobalt supply meet demand? The geological, mineral processing, production and geographic risk profile of cobalt[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106855.
- [12] Sun X, Shi Q, Hao X. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106035.
- [13] Liu M, Li H J, Zhou J S, et al. Analysis of material flow among multiple phases of cobalt industrial chain based on a complex network[J]. Resources Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102691.
- [14] Sun X, Hao H, Liu Z W, et al. Tracing global cobalt flow: 1995–2015[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 149: 45–55.
- [15] 徐大兴,代涛,刘立涛,等. 2000–2020年日本钴物质流演变特征[J]. 资源科学, 2023, 45(11): 2264–2275. [Xu D X, Dai T, Liu L, et al. Evolution characteristics of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020 [J]. Resources Science, 2023, 45(11): 2264–2275.]

- T, et al. Evolution of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020[J]. *Resources Science*, 2023, 45(11): 2264–2275.]
- [16] 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.
- [17] Yu Y, Ma D P, Zhu W W. Resilience assessment of international cobalt trade network[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103636.
- [18] Song Y, Zhang Z, Cheng J, et al. Effects of technical advance on cobalt supply and its supply trends: A perspective of the whole industrial chains[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107760.
- [19] Xu L G, Guo X, Xu M J, et al. Evaluation and impact factors of international competitiveness of China's cobalt industry from the perspective of trade networks[J]. *Scientific Reports*, 2024, DOI: 10.1038/s41598-024-63104-w.
- [20] 赵怡然, 高湘昀, 孙晓奇, 等. 产业链视角下贸易依赖网络结构变动对钴价格的影响[J]. *资源科学*, 2022, 44(7): 1344–1357.
[Zhao Y R, Gao X Y, Sun X Q, et al. The impact of structural changes of trade dependence network on cobalt price from the perspective of industrial chain[J]. *Resources Science*, 2022, 44(7): 1344–1357.]
- [21] Guo Y Q, Li Y L, Liu Y C, et al. The impact of geopolitical relations on the evolution of cobalt trade network from the perspective of industrial chain[J]. *Resources Policy*, 2023, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103778.
- [22] Houssini K, Geng Y, Taha Y, et al. Uncovering the CO₂ emissions embodied in the anthropogenic global cobalt flows[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138627.
- [23] Liu H, Li H, Qi Y, et al. Identification of high-risk agents and relationships in nickel, cobalt, and lithium trade based on resource-dependent networks[J]. *Resources Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102370.
- [24] 袁小晶, 马哲, 王安建, 等. 中国钴供应链风险与控制力评价[J]. *地球学报*, 2023, 44(2): 351–360. [Yuan X J, Ma Z, Wang A J, et al. Evaluation of risk and control of China's cobalt supply chain [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(2): 351–360.]
- [25] van Den Brink S, Kleijn R, Sprecher B, et al. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104743.
- [26] 徐美娟, 许礼刚, 袁梦洁. 双循环格局下中国关键有色金属资源贸易格局和竞争力分析: 以钴为例[J]. *世界地理研究*, 2023, 32(6): 14–27. [Xu M J, Xu L G, Yuan M J. Trade network and competitiveness of China's critical nonferrous metal resources under dual circulation pattern: A case study of cobalt[J]. *World Regional Studies*, 2023, 32(6): 14–27.]
- [27] Zhang W K, Yan I K M, Cheung Y W. The COVID-19 pandemics and import demand elasticities: Evidence from China's customs data[J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2023, DOI: 10.1057/s41599-023-02406-2.
- [28] Kim J, Jaumotte F, Panton A J, et al. Energy security and the green transition[J]. *Energy Policy*, 2025, DOI: 10.1016/j.enpol.2024.114409.
- [29] Chang L, Taghizadeh-Hesary F, Mohsin M. Role of mineral resources trade in renewable energy development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, DOI: 10.1016/j.rser.2023.113321.
- [30] Cardoso F M, Gracia-Lázaro C, Moisan F, et al. Effect of network topology and node centrality on trading[J]. *Scientific Reports*, 2020, DOI: 10.1038/s41598-020-68094-z.
- [31] Chen Z Y, Zhang L G, Xu Z M. Tracking and quantifying the cobalt flows in China's mainland during 1994–2016: Insights into use, trade and prospective demand[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 752–762.
- [32] British Geological Survey. Commodity Review: Cobalt[R]. Nottingham: British Geological Survey, 2019.
- [33] Olivetti E A, Ceder G, Gaustad G G, et al. Lithium-ion battery supply chain considerations: Analysis of potential bottlenecks in critical metals[J]. *Joule*, 2017, 1(2): 229–243.
- [34] Song J L, Yan W Y, Cao H B, et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 570–581.
- [35] Li Y, Huang J, Zhang H. The impact of country risks on cobalt trade patterns from the perspective of the industrial chain[J]. *Resources Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.102641.
- [36] García-Herrero A, Grabbe H, Kaellenius A. DE-Risking and Decarbonising a Green Tech Partnership to Reduce Reliance on China[R]. Brussels: Bruegel, 2023.
- [37] Zhao S B, Wang X P, Li K C, et al. Evolution and influencing factors of the transnational investment network of China–Africa international cooperation parks[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(11): 2205–2228.
- [38] Chen Z Y, Zhang L G, Xu Z M. Analysis of cobalt flows in China's mainland: Exploring the potential opportunities for improving resource efficiency and supply security[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122841.

Network pattern and risk characteristics of global cobalt material trade from the perspective of industry chain

LI Haoran^{1, 2}, XU Wenjie^{1, 2}, JI Qiang^{1, 2}, SUN Xiaolei^{1, 2}

(1. Institutes of Science and Development, CAS, Beijing 100190, China; 2. School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Cobalt, as a key strategic resource, shows a pronounced geographical separation between supply and demand, with growing concerns over trade security. Systematically identifying cobalt trade patterns and their evolving risks is crucial for maintaining the stability of industry chains and optimizing resource security policies. [Methods] Focusing on cobalt material trade, this study selected 29 cobalt products across four stages of the industry chain—mining, production, manufacturing, and waste management—to construct a global cobalt material trade network. Based on the network topology from 2012 to 2022, trade risk indices for the global cobalt material trade network are developed from three dimensions: import concentration, resource acquisition difficulty, and trade intermediation. [Results] (1) The geographical distribution of cobalt material trade patterns showed a core clustering trend. The heterogeneity in the mining and manufacturing stages weakened, while that in the production stage increased, with no significant evolutionary trend observed in the waste management stage. (2) The trade risks of major importing countries (regions) constrained the stability of the global cobalt trade network. Although high-risk countries (regions) have improved their intermediary control and resource acquisition capabilities, import concentration remained the dominant factor influencing trade risks. (3) Trade dependency relationships among countries (regions) differed significantly across the mining, production, manufacturing, and waste management stages, and the driving forces influencing these dependencies varied as well. In the mining stage, dependencies were primarily concentrated in Asia and Africa. In the production stage, trade dependencies began to spread globally. In the manufacturing stage, dependencies among Asian countries strengthened significantly. In the waste management stage, trade dependencies between North American and European countries were notably close. [Conclusion] The stability of the global cobalt material trade network depends on major importing countries (regions). As a major importer, China should strengthen the diversification of its cobalt source supply, promote technological innovation and industrial upgrading, accelerate the development of waste resource recycling systems, and improve risk warning and response mechanisms to ensure supply chain security, consolidate its strategic position, and gain initiative in recycling.

Key words: cobalt material; trade network; trade risks; industry chain; recycling; global