

引用格式: 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.] DOI: 10.18402/resci.2024.01.08

# 全球钴资源贸易网络演化及其启示

赵晞泉<sup>1,2</sup>, 陈伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院区域可持续发展分析与模拟实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:**【目的】研究全球钴资源贸易网络演化, 对于理解全球钴市场和钴供应态势具有重要意义。【方法】从产业链视角出发, 本文构建了钴矿石、钴化合物和钴及其制品的全球贸易网络, 综合运用多种网络分析方法, 刻画全球钴贸易规模时序变化, 揭示不同产品类型钴贸易网络的空间格局与拓扑结构, 以期为保障中国钴供应安全提供参考。【结果】①全球钴贸易规模在波动中上升, 不同钴产品的贸易发展态势具有明显差异, 钴及其制品成为全球钴资源贸易的主要形式。②全球钴贸易网络呈现出空间分异特征, 钴贸易向少数国家(地区)集聚趋势明显, 不同产品类型钴贸易网络的空间组织形态具有较大差异。③钴矿石和钴化合物贸易网络日渐松散, 钴及其制品贸易网络稠密化程度显著提升, 3类钴产品贸易网络的传输效率均随时间增强。④全球钴贸易网络均具有显著的核心—边缘结构特征, 核心结构和边缘结构层级界限清晰, 各国(地区)在网络中的角色仍处于动态调整中。⑤中国、英国、美国、德国和荷兰等国家(地区)长期处于贸易网络的中心位置, 韩国、法国和芬兰等国是其中两类钴产品贸易网络的关键国家(地区), 奥地利和斯洛伐克、西班牙和意大利、加拿大和日本等国分别在3类钴产品贸易网络中占据重要地位, 刚果(金)对钴产品链的整体运行具有较强控制力。【结论】在厘清全球钴贸易网络结构演化特征基础上, 中国需对钴产品链各环节制定差异化政策, 有针对性地实施贸易策略, 从而保障中国钴供应安全和稳定。

**关键词:** 钴资源; 钴贸易; 产业链; 贸易网络; 拓扑结构

DOI: 10.18402/resci.2024.01.08

## 1 引言

作为重要的战略性矿产资源, 钴具有延展性、柔韧性、耐磨性、耐腐蚀性和高硬度等特性, 被广泛运用于电气、机械、化学、航空航天和军事等领域<sup>[1]</sup>。特别是近年来新能源汽车的兴起以及智能手机和平板电脑的普及, 锂离子电池等可充电电池成为钴最重要的消费领域之一<sup>[2]</sup>。同时, 钴还被应用于制作催化剂、干燥剂、颜料、高温合金、硬质合金和磁性材料等<sup>[3]</sup>。随着电子信息和新能源产业快速发展, 各类钴产品的需求和消费迅猛增长, 钴金属被列入欧盟和美国的关键性矿产资源名录, 成为世界各国和跨国公司博弈的新“战场”。根据国际钴业协会(Cobalt Institute)统计, 2022年全球钴需求量为

18.7万t, 较上年增长约13%<sup>[4]</sup>。然而, 全球钴资源的分布具有明显的非均衡特征, 导致钴资源面临突出的供需矛盾。在产量方面, 2022年刚果(金)约占全球钴产量的70%, 其次是印度尼西亚、俄罗斯和澳大利亚; 在储量方面, 刚果(金)占比约48.2%, 澳大利亚、印度尼西亚和古巴的钴资源也相对丰富, 而中国作为全球最大的精炼钴生产国和消费国之一, 其钴储量仅占约1.7%<sup>[5]</sup>。此外, 钴在地壳中含量低, 且多为伴生矿, 开采难度较大<sup>[6]</sup>, 也限制了钴的大规模开发利用。正是由于钴资源的上述特性, 国际贸易成为世界各国维持钴供应、满足钴需求的普遍方式。因此, 深入剖析全球钴资源贸易时空演化, 对于全面认知全球钴资源供应态势及应对潜在供应

收稿日期: 2023-08-13 修订日期: 2023-11-30

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK1007); 国家自然科学基金项目(42130508; 42230406)。

作者简介: 赵晞泉, 女, 江苏常熟人, 硕士研究生, 研究方向为经济地理与区域发展。E-mail: zhaoxiquan0029@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 陈伟, 男, 安徽淮南人, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为经济地理、城市与区域发展。E-mail: chenw@igsnrr.ac.cn

2024年1月

风险具有重要意义。

传统钴贸易的文献多聚焦于特定国家(地区),围绕钴的来源、生产和消费情况<sup>[7]</sup>,对主要贸易国、钴产品供应关系等方面开展初步分析<sup>[8-11]</sup>,并通过构建指标体系对钴的产业链供应链安全进行评价<sup>[12-14]</sup>。由于贸易是国家(地区)间钴资源流动的主要方式,相关研究大多利用各国的钴资源进出口贸易存量数据开展钴资源安全等议题的研究<sup>[15,16]</sup>。近年来,随着国家(地区)间钴贸易联系的不断强化,逐步形成了复杂的全球钴资源贸易网络体系,因此,从网络视角辨识全球钴资源的流动和消费格局变迁,有利于全面揭示钴资源贸易演化规律。伴随网络科学的兴起,网络成为透视国际贸易关系的重要视角,也为探究全球钴资源贸易网络提供了前沿方法<sup>[17,18]</sup>。相较于其他方法,网络分析方法能够定量揭示国家(地区)间钴贸易关系。部分学者开始借助网络分析方法对一类或多类钴产品的贸易网络展开研究,研究议题包括钴物质流<sup>[19,20]</sup>、钴供应风险<sup>[21]</sup>以及钴贸易关系和依赖模式<sup>[22]</sup>等。Sun等<sup>[23]</sup>构建2019年钴矿石全球贸易有向加权网络,发现中国、摩洛哥等进口国和刚果(金)、印度尼西亚等出口国在全球钴贸易网络中发挥重要作用。Liu等<sup>[24]</sup>对2016、2018和2020年产业链各阶段的钴贸易网络进行分析,发现上游贸易市场以刚果(金)等资源禀赋良好的国家(地区)为主导,中下游贸易市场由中国、日本、韩国、美国以及部分欧盟国家(地区)主导。Shi等<sup>[25]</sup>构建多重网络模型对钴产业链各环节的网络结构进行分析,发现上中下游贸易网络相互影响、依赖和连通,仅少数国家(地区)拥有完整的钴产业链。

总体上,现有文献对钴物质流、产业链关联、贸易风险和贸易依赖模式等开展了初步探究,均不同程度显示出全球钴贸易具有复杂网络特征。然而,目前尚未有文献从产品链视角对全球钴资源贸易网络结构开展深入研究,仍缺乏单独针对全球钴资源贸易网络时空演化及其拓扑结构的系统性剖析,全球钴贸易网络格局演化产生的潜在影响未能得到全面评估。

为弥补上述研究不足,从产品链视角出发,本文综合运用中心性、网络密度、全局集聚系数、全局

效率和核心—边缘轮廓等网络分析方法,刻画2000—2021年全球钴贸易规模的时序变化,揭示不同产品类型钴贸易网络格局,从宏观、中观和微观层面探究全球不同钴产品贸易网络拓扑特征,以期能全面认知全球钴资源贸易发展态势、为保障中国钴供应链安全稳定提供有益参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

作为重要的金属资源,含钴商品类型复杂多样,尤其是钴产业链下游商品仍处在动态变化中,较难追踪到完整的下游产品目录。因此,本文选择钴产业链上游的钴矿石(HS2605)以及钴产业链中游的钴化合物(HS2822)和钴及其制品(HS8105)作为研究对象,其中,后两者是钴产业链中游含钴量最大、最纯净的钴产品。3类钴产品共同构成全球钴贸易的主体内容。国家(地区)间双边贸易数据来源于联合国商品贸易统计数据库(UN Comtrade Database),包括报关国(地区)、伙伴国(地区)、贸易额、商品重量以及贸易流向等信息。一般而言,世界各国(地区)对进口贸易的监管更为严格,因此本文主要采用进口口径获取商品贸易数据,并通过数据清洗和转换来消除数据缺失问题对研究结果的潜在影响<sup>[26]</sup>。钴兼具商品属性和金属属性,大量金融资本进入钴市场可能对其价格产生影响<sup>[27]</sup>,为避免不同年份钴产品价格变动对研究结果产生影响,本文同时考虑钴贸易额和贸易重量的时序变化,并主要以贸易重量衡量国家(地区)间钴贸易关系以及钴资源在全球范围内的流动情况。最终,本文构建2000—2021年全球216个国家(地区)间的钴贸易数据集,以国家(地区)为节点,国家(地区)间钴贸易关系为连边,贸易重量为权重构建全球钴产品贸易网络,以此刻画全球钴贸易网络。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 网络连通性

本文采用网络密度、全局集聚系数和全局效率表征3类钴产品贸易网络的连通性,考察钴贸易网络的宏观特征演变趋势。①网络密度用于衡量网络联系的紧密程度,可用网络中实际存在的边数与最大可能的边数之比来表示。网络密度越大,则网

络联系越紧密<sup>[28]</sup>。②集聚系数是衡量网络节点集聚程度的参数。单个节点的集聚系数定义为其所有邻接节点之间连边的数目与可能的最大连边数目的比值<sup>[29]</sup>。网络的全局集聚系数为所有节点集聚系数的平均值,全局集聚系数越大,表示网络中各节点之间的集聚程度越大,节点间形成短距离联系的程度越大。③全局效率是所有节点对之间效率的平均值,用于衡量网络的全局传输能力。网络中各节点间的最短路径越短,则网络的全局效率越高,网络节点间传递速率就越快<sup>[30]</sup>。

### 2.2.2 网络中心性

网络中心性用于测度节点在网络中的位置和角色,主要体现网络的微观拓扑特征。本文采用度中心性和PageRank中心性衡量国家(地区)在全球钴贸易网络中的影响力和重要程度。①度中心性用节点度的大小衡量,是刻画某一特定节点与其他节点联系强度的指标。一般来说,某节点的度中心性越大,表明网络中其他节点与该节点建立的联系越多,该节点在网络中的地位越重要<sup>[31]</sup>。②PageRank中心性是特征向量中心性的一种变体,适用于有向网络。在钴贸易网络研究中,PageRank中心性可用于衡量每个国家(地区)在网络中的重要程度和潜在控制能力<sup>[32]</sup>。

### 2.2.3 核心—边缘轮廓

核心—边缘结构是由网络中紧密联系的核心节点与稀疏联系的边缘节点共同构成的一种网络存在形式<sup>[33]</sup>。随着网络科学发展,多种核心—边缘结构的识别算法被提出,但大多数算法仍只关注网络的基本属性或拓扑关系,而没有考虑网络复杂的结构特征,且这些算法的稳健性仍有待检验。在此背景下,Rossa等<sup>[34]</sup>提出了核心—边缘轮廓算法(Core-periphery profile),该算法不依赖于任何距离参数,适用于一般性分析框架,能够处理有向、加权网络,通过模拟随机游走的行为来刻画核心—边缘结构,获取核心—边缘结构的描述性曲线和度量指标,提供一种全局性的拓扑描述,并用核心度指标来描述每一个节点在网络中的位置和角色。

在核心—边缘轮廓算法中,定义网络的核心—边缘轮廓 $\alpha_k(k=1,2,\dots,n)$ ,具体公式为:

$$\alpha_k = \min_{h \in NP_{k-1}} \frac{\sum_{i,j \in P_{k-1} \cup \{h\}} \pi_i m_{ij}}{\sum_{i \in P_{k-1} \cup \{h\}} \pi_i} \quad (1)$$

$$= \min_{h \in NP_{k-1}} \frac{\sum_{i,j \in P_{k-1}} \pi_i m_{ij} + \sum_{i \in P_{k-1}} (\pi_i m_{ih} + \pi_h m_{hi})}{\sum_{i \in P_{k-1}} \pi_i + \pi_h}$$

式中: $\alpha_k$ 为网络中第 $k$ 个节点的核心—边缘描述; $N$ 为网络中所有节点构成的集合; $m_{ij}$ 为随机游走从节点 $i$ 转移到节点 $j$ 的概率, $m_{ih}$ 和 $m_{hi}$ 同理; $\pi_i$ 是随机游走过程中访问节点 $i$ 的渐进概率; $P_{k-1}$ 是运算过程中,根据每一步持续概率的最小增量,逐次添加具有最小权重的节点,形成的由 $k-1$ 个点构成的点集。

同时,核心—边缘轮廓算法还提供了集中系数(Centralization coefficient)和核心度(Coreness)两个度量指标。集中系数具体表达式为:

$$C = 1 - \frac{2}{n-2} \sum_{k=1}^{n-1} \alpha_k \quad (2)$$

式中: $C$ 是网络的核心度,反映网络结构的集中程度; $n$ 为网络中的节点数量。当一个网络表现出明显的核心—边缘结构时,具有序列特征的 $\alpha_k$ 将为每个节点提供在第 $k$ 步时的核心度。节点的核心度越接近于1,则该节点在网络中的位置和角色越重要;反之,该节点越处于边缘化位置。

## 3 结果与分析

### 3.1 全球钴贸易规模时序变化

作为锂电池的重要原材料,钴资源在全球范围内形成了以少数国家(地区)为引领的贸易体系<sup>[35]</sup>。为系统刻画不同钴产品贸易的动态变化过程,本文统计了2000—2021年全球钴矿石、钴及其制品和钴化合物贸易额和贸易量的整体变化情况(图1)。2000年以来,全球钴贸易规模在波动中上升,不同钴产品的贸易发展态势具有明显差异,钴及其制品成为全球钴资源贸易的主要形式。

就贸易量而言,钴矿石和钴及其制品贸易量此消彼长,可以2011年为分界线将全球钴贸易划分为两个阶段。第一阶段是贸易总量快速增长阶段(2000—2011年),第二阶段是贸易量平稳发展阶段(2012—2021年)。在第一阶段中,全球钴贸易总量在波动中快速增长,由18.18万t提升至65.51万t,增长近4倍,反映出世界经济发展对钴资源需求的巨



2024年1月

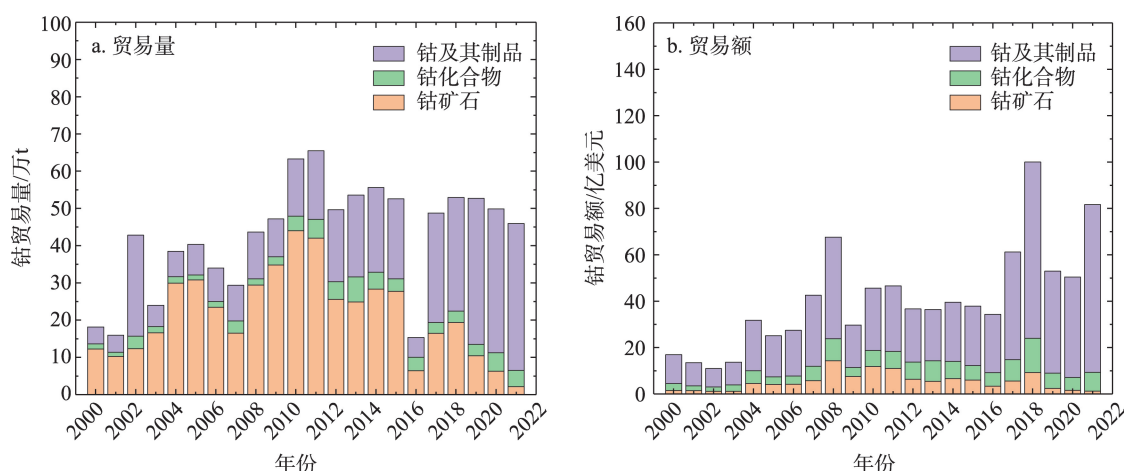


图1 2000—2021年全球钴产品贸易规模时序变化

Figure 1 Changes in global cobalt products trade volume, 2000-2021

大推动。其中,钴矿石的贸易量增长较快,由12.21万t增长至42.01万t。钴及其制品和钴化合物的贸易规模也在波动中增长,但贸易量和增长规模普遍小于钴矿石。2012年,欧债危机爆发对欧美钴企业造成冲击,全球钴贸易量显著下滑,使得全球钴贸易态势发生较大转变。在第二阶段中,除2016年,全球钴贸易总量处于平稳发展态势。其中,钴及其制品的贸易量快速增长并成为全球钴贸易的主要形式,钴化合物的贸易量较为稳定,而钴矿石的贸易量显著减小。2013年前后,刚果(金)禁止精矿出口以鼓励钴矿企业在当地加工和冶炼矿石,这一政策使得刚果(金)的钴贸易向产品链中游转移,由钴矿石出口为主导转变为氢氧化钴等钴化合物和钴粉等钴制品出口为主导,并促使全球范围内钴矿石和钴及其制品贸易量此消彼长。金融危机后,国际钴价持续走低,并在2016年前后达到最低谷,刚果(金)受价格因素减产,加上该年度刚果(金)国内政治局势动荡<sup>[36]</sup>,使得2016年全球钴贸易量快速下跌至15.30万t,成为2000年以来的历史最低点。随后,全球钴贸易量随着国际钴价的回升迅速增长,新能源汽车需求的持续增高对钴需求产生带动作用,使得钴及其制品的贸易量保持在高位稳定状态。

在贸易额上,全球钴贸易额呈现波动式增长,不同钴产品贸易额与贸易量的变动态势整体趋于一致。受全球钴需求增长的影响,钴贸易额整体呈

现先快速增长、后波动上升的态势,并于2018年达到顶峰,超过100亿美元。其中,钴及其制品的贸易额随时间快速增长,由2000年的12.52亿美元增长至2021年的72.29亿美元,增长近6倍。与贸易量不同,钴及其制品的贸易额始终位列3类钴产品的首位,占贸易总额的比重始终在50%以上,其价格远高于钴矿石,且拥有较高的市场需求。钴矿石的贸易额总体较小,变动态势与贸易量相一致,经历快速增长后波动减小,其2021年的贸易额与2000年相近,但贸易量显著减小,说明钴矿石价格随着国际钴产品价格的整体上涨而有所升高。受贸易形态和使用场景等影响,钴化合物的贸易额占比稳定在10%~25%之间,虽然贸易规模逐年提升,但其所占比重始终相对较低。

### 3.2 全球钴贸易网络格局分异

为刻画全球钴贸易网络的空间格局特征,本文提取2021年全球不同钴产品贸易流量数据,以国家(地区)为节点,双边贸易流为连边,双边贸易规模为连边权重,构建不同产品类型的全球钴贸易网络,并对其进行空间可视化,结果如图2所示。全球钴贸易网络呈现出空间分异特征,钴贸易向少数国家(地区)集聚,不同产品类型钴贸易网络的空间组织形态具有较大差异。

全球钴矿石贸易网络相对松散,少数贸易流较为突出,刚果(金)等钴矿石生产大国和中国等精炼钴生产大国成为贸易网络的核心。2021年,刚果



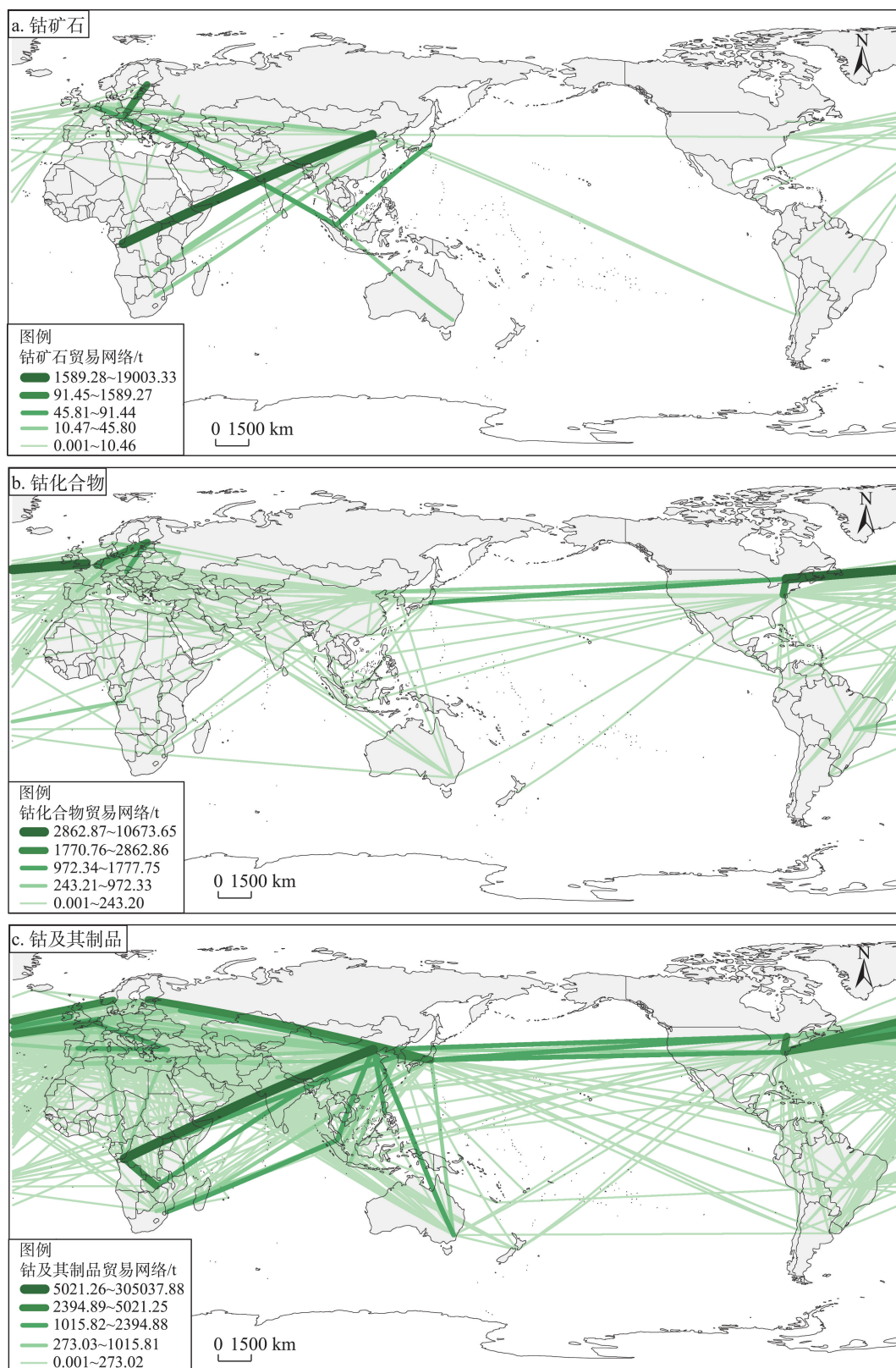


图2 2021年全球钴贸易网络空间分异

Figure 2 Spatial heterogeneity of the global cobalt trade networks, 2021

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1666号的标准地图制作,底图边界无修改。

2024年1月

(金)和中国之间的贸易流是全球钴矿石贸易网络中最为显著的连边,两国钴矿石贸易规模达到1.9万t,占据全球钴矿石贸易总量的比重达到90.47%。其中,刚果(金)由于工业化水平有限,电力等基础设施较为薄弱,且缺乏下游产业支撑,难以完成全部钴矿石的加工和冶炼,与中国形成了钴矿石生产和精炼的稳定分工。2021年,芬兰和奥地利之间的钴矿石贸易规模为1589.27t,位列全球第二。其中,芬兰是欧洲最大的钴矿石存储国和生产国之一,也是除中国外的全球第二大精炼钴生产国,已成为欧洲的区域性钴矿石贸易核心和枢纽<sup>[37]</sup>。其他钴矿石贸易流的规模均在100t以下,主要分布在中国、欧洲、东南亚、非洲和北美洲等全球少数区域之间,而大量国家(地区)尚未融入全球钴矿石贸易网络中。

钴化合物贸易主要集中在欧洲和北美,并在全球其他区域分散布局,形成整体稀疏、局部聚集的贸易网络形态。2021年,英国和加拿大间的钴化合物贸易规模位居全球首位,贸易量为1.07万t,占全球的比重约为44.45%。其次是芬兰—比利时、美国—加拿大、日本—加拿大、芬兰—奥地利和芬兰—德国,在钴化合物贸易网络中处于前三层级,双边贸易规模占比均在4%以上。近年来,为加强关键矿产安全和应对潜在的钴供应风险,美国、加拿大、日本和欧盟国家(地区)致力于加强彼此间矿产贸易合作,以降低大国博弈背景下供应中断的可能性,逐渐形成以欧洲和北美为双核心,日本等国家(地区)为重要节点的贸易网络格局。

与钴矿石和钴化合物相比,参与钴及其制品贸易的国家(地区)数量明显增多,贸易网络更加稠密,形成了以中国和刚果(金)之间的贸易流为核心连边,东亚、欧洲和北美为热点区域,非洲部分国家

(地区)为重要节点的贸易网络格局。刚果(金)和中国的双边钴及其制品贸易在网络中占有最高的份额,占2021年全球贸易总量的78.70%。2000年以来,中国企业对刚果(金)开展大量对外直接投资以保障钴资源的海外供应<sup>[38]</sup>,并随着刚果(金)对钴精矿出口的限制,两国间的钴及其制品贸易规模逐渐提升,目前已成为钴及其制品对外贸易规模最大的两个国家。除此以外,2021年日本和芬兰之间的钴及其制品贸易规模也达到了5000t以上,位居全球第二位。美国、比利时、挪威、加拿大、韩国和赞比亚等国家(地区)也具有较高的钴及其制品贸易规模,是贸易网络中的关键节点。

### 3.3 全球钴贸易网络宏观特征

基于图规模、网络密度、全局集聚系数和全局效率等网络指标,本文进一步刻画全球钴贸易网络的连通性演化趋势,结果如表1所示。随时间演化,全球钴矿石和钴化合物贸易网络日渐松散,钴及其制品贸易网络稠密化程度显著提升,3种钴产品贸易网络的传输效率均有所增强,钴贸易具有向少数国家(地区)和产业链特定环节集聚的趋势。

具体而言,2000—2021年,钴矿石和钴化合物贸易网络的图规模、网络密度和全局集聚系数均有所减小,表明钴矿石和钴化合物的贸易往来呈减弱趋势,贸易网络逐渐稀疏,全球范围内钴矿石和钴化合物的贸易联系逐渐分散。这一方面可能是由于刚果(金)等主要钴矿石出口国贸易政策的变化,部分国家(地区)不再直接出口钴矿石。另一方面,钴矿石和钴化合物的贸易和生产集中度日益提升,使得贸易网络的不稳定程度相应增加。2000—2021年,钴矿石和钴化合物贸易网络中规模最大的贸易流占比均有显著提升,分别由44.94%和22.45%提升至90.47%和44.45%,说明钴贸易日益向特定国

表1 2000、2021年全球钴贸易网络宏观特征描述

Table 1 Macro characteristics description of global cobalt trade networks, 2000 and 2021

网络指标	钴矿石		钴化合物		钴及其制品	
	2000年	2021年	2000年	2021年	2000年	2021年
图规模	99	75	398	229	645	887
网络密度	0.0043	0.0032	0.0171	0.0099	0.0278	0.0382
全局集聚系数	0.2235	0.1738	0.3582	0.2611	0.4228	0.4379
全局效率	0.0001	0.0005	0.0021	0.0052	0.0027	0.0166

家(地区)集聚,逐步形成少数国家(地区)垄断的态势。因此,为规避潜在贸易风险,部分国家(地区)选择将钴贸易的重心向产业链中下游特定环节转移<sup>[21]</sup>。与其他指标相反,2000年以来钴矿石和钴化合物贸易网络的全局效率有所增大,说明网络的连通性和传输效率逐渐提升,主要国家(地区)间的钴贸易合作持续深入,网络结构有所优化。

钴及其制品贸易网络的规模、密度、全局集聚系数和全局效率均有明显上升,网络稠密化程度显著提升。随着各国(地区)工业化进程的深入及相关下游产业的蓬勃发展,世界各国(地区)的钴需求量普遍提升,越来越多国家(地区)间建立了钴及其制品贸易联系,网络规模持续扩大。此外,伴随钴产业链中下游集约化加工技术的逐渐成熟,各国(地区)的钴资源供给正在逐渐摆脱对资源禀赋型国家(地区)的依赖,使得全球钴贸易的重心向钴及其制品等产业链特定环节移动<sup>[24]</sup>。近年来,中国企业在全球范围内对外直接投资规模的扩大以及欧美电动汽车市场的良好发展<sup>[38]</sup>,使得钴及其制品贸易网络逐渐展现向中国、欧洲和北美等特定国家和地区集聚的态势,表现为全局集聚系数的持续增大。而钴及其制品贸易网络的逐渐扩张也使得其连通性、可达性和传输效率相应提升,在日趋复杂化的同时实现网络结构优化。

### 3.4 全球钴贸易网络中观特征

为揭示全球钴贸易网络中观特征,本文进一步采用核心—边缘轮廓算法测度全球钴贸易的核心—边缘结构,并使用集中系数和核心度指标对节点角色开展定量评估。参照以往研究,本文将核心度 $\geq 0.3$ 、 $\geq 0.1$ 且 $< 0.3$ 、 $\geq 0.01$ 且 $< 0.10$ 、 $< 0.01$ 的节点分别划分为核心国家(地区)、次核心国家(地区)、次边缘国家(地区)和边缘国家(地区)<sup>[39]</sup>。根据计算结果,以国家(地区)为节点、双边贸易流为连边,进一步构建全球钴产品贸易核心—边缘拓扑网络(图3),其中,节点大小代表节点度,节点颜色代表核心度等级。

总体上,全球3类钴产品贸易网络均具有显著的核心—边缘结构特征,核心结构和边缘结构层级界限清晰,各国(地区)在网络中的角色处于动态调整中。从计算结果上看,钴矿石、钴化合物和钴及

其制品贸易网络的集中系数分别由2000年的0.985、0.962和0.949上升至2021年的0.998、0.970和0.985,表明全球钴产品贸易网络的极化程度略有增加,核心国家(地区)和边缘国家(地区)间的分化程度具有扩大趋势,少数核心国家(地区)在全球钴贸易体系中发挥着日益重要的控制作用。

在全球钴矿石贸易网络中,核心度高的国家(地区)数量逐年减少,钴矿石贸易具有向少数国家(地区)集中的趋势,大量国家(地区)尚未参与到钴矿石贸易网络中。2000—2021年,核心、次核心和次边缘国家(地区)分别由3个、2个和4个减少为各1个,而处于边缘位置的国家(地区)始终居于大多数,且数量相应增多,核心国家(地区)和边缘国家(地区)间的分化程度有所扩大。其中,刚果(金)和英国由核心国家分别转变为边缘国家和次边缘国家,芬兰和南非由次核心国家分别转变为次边缘和边缘国家。刚果(金)钴矿石产量大但对外贸易关系逐渐单一化,从与芬兰等核心国家(地区)和赞比亚等边缘国家(地区)均建立较强贸易联系转变为仅与中国等极少数核心国家(地区)拥有贸易联系。英国和芬兰曾与刚果(金)和印度尼西亚等钴矿石生产大国建立了紧密的贸易联系,但随着全球钴矿石贸易向极少数国家(地区)集聚,英国和芬兰及其主要贸易伙伴在网络中的地位逐渐下降。部分国家(地区)在核心—边缘结构中保持较为稳定的地位。2000年以来,中国始终属于核心国家的范畴,在钴产业链中占据突出地位,全球一半以上的成品钴和锂电池生产所需钴元素由中国生产<sup>[40]</sup>。然而,值得注意的是,中国始终是钴矿石需求大国,高核心度意味着网络中的各种冲击均可能对中国产生影响,分散钴矿石供应来源及提升对供应端的控制能力依然是中国保障钴供应安全的重要方向。此外,截至2021年,仍有大量国家(地区)并未或者较少参与到全球钴矿石贸易中。

钴化合物贸易网络的核心—边缘结构特征同样显著,但核心国家(地区)数量相对较多且较为稳定,部分国家(地区)随时间发生等级突变。2000年以来,比利时、英国、中国和芬兰始终属于核心国家。其中,比利时、英国、芬兰和其他欧美国家(地区)间拥有较为频繁的钴化合物贸易往来,共同构



2024年1月

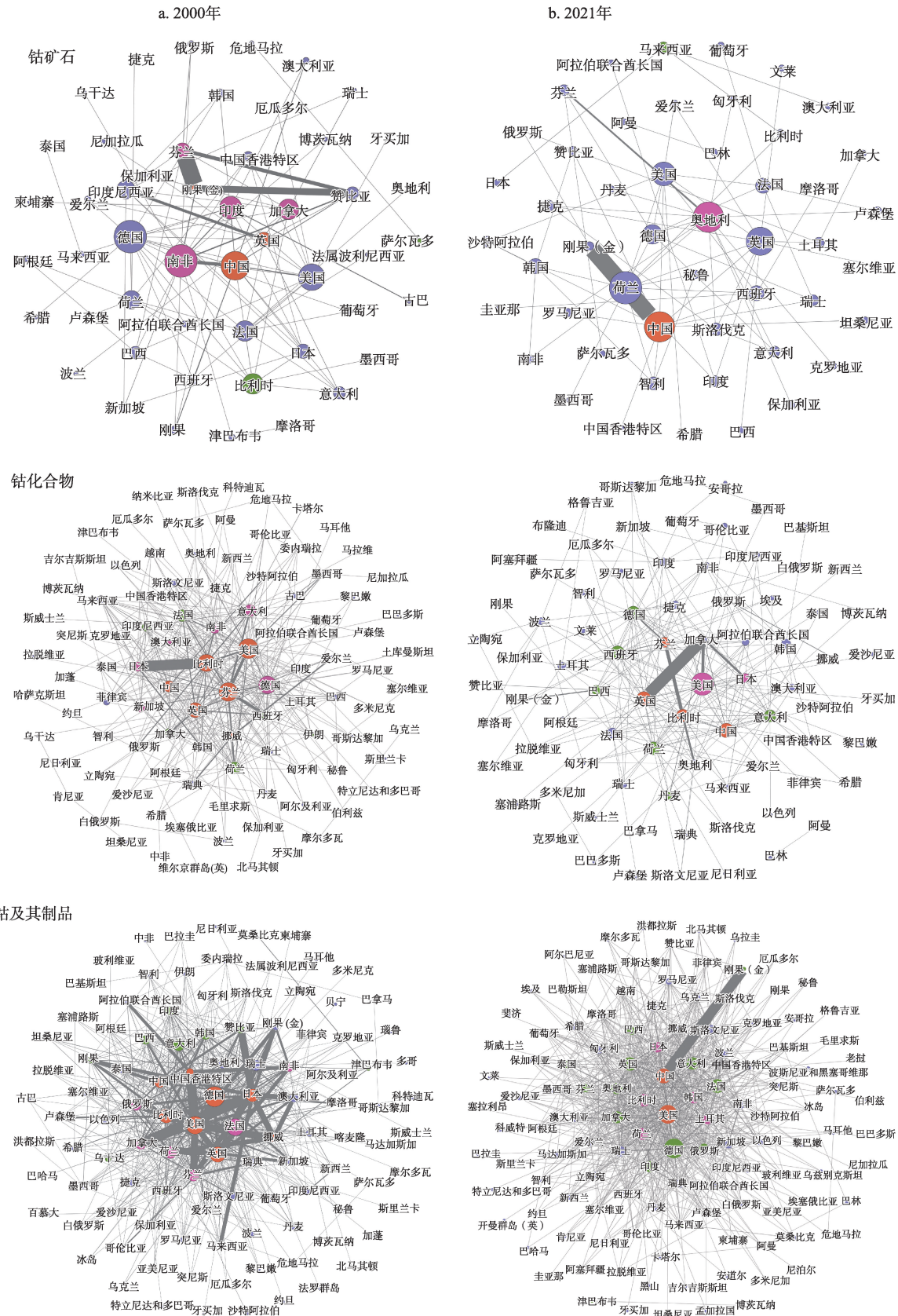


图3 2000、2021年全球钴贸易网络核心—边缘结构演化

Figure 3 Core-periphery evolution of the global cobalt trade networks, 2000 and 2021

成了欧洲和北美两大贸易热点区域。而中国的钴化合物贸易规模相对较小,但贸易伙伴较为多元,2000年和2021年的伙伴国(地区)数量分别为25和22个,使得中国成为贸易网络的区域性核心国家和枢纽节点,并在钴氧化物等产品的出口方面拥有较高的寡占能力<sup>[35]</sup>。在拓展钴化合物贸易合作广度的同时,中国需进一步提升与其他国家(地区)的贸易合作深度和规模。2000—2021年,挪威的贸易伙伴数量急剧减少,由12个减少为2个,使得其由核心国家转为边缘国家。美国、意大利、德国和新加坡等国家(地区)在核心—边缘结构中的等级均有所下降。

钴及其制品贸易网络的核心—边缘结构随时间发生重构,各层级间贸易联系相对紧密,逐渐形成亚洲和欧美两大贸易集聚区辐射带动次边缘和边缘国家(地区)的网络结构。2000年,核心和次核心国家(地区)分别为8个和6个,主要分布于亚洲、欧洲和北美,形成以日本、中国和中国香港为核心的亚洲贸易集聚区,以及以美国、英国、德国和比利时等为核心,加拿大、芬兰和法国等为次核心的欧美贸易集聚区,各核心和次核心国家(地区)间贸易往来密切。2000—2021年,核心国家(地区)逐渐减

少,仅剩中国和美国,使得亚洲和欧美的钴及其制品贸易集聚区均由多核心向单核心、多节点转变。其中,中国的钴矿石冶炼和钴制品生产等产业日益成熟,与刚果(金)等国(地区)建立了稳定的上游产品贸易合作和产业分工关系。美国是下游含钴产品的生产大国,对钴及其制品等钴材料具有较大需求和较高的对外依存度<sup>[10]</sup>。近年来,为规避复杂国际形势下钴供应中断的风险,美国的钴及其制品进口来源日趋多元化,贸易伙伴国(地区)由2000年的64个提升至2021年的85个,涉及亚洲、美洲、欧洲等各层级国家(地区),在钴及其制品贸易网络中占据较为稳定的核心地位。

3.5 全球钴贸易网络微观特征

为剖析全球钴贸易网络微观特征,识别网络中具有影响力的节点,本文提取了2021年钴矿石、钴化合物和钴及其制品3类贸易网络的度中心性和PageRank中心性排名前15位的国家(地区)及其中心性值,具体结果如表2所示。从各项指标来看,中国、英国、美国、德国和荷兰在3类钴产品贸易网络中均拥有重要的全球影响力,韩国、法国、比利时和芬兰等国是其中两类钴产品贸易网络的关键国家(地区),奥地利和斯洛伐克、西班牙和意大利、加拿

表2 2021年全球钴贸易网络中心性指标排名前15位国家(地区)

Table. 2 Top 15 countries (regions) of centrality indicators of global cobalt trade network, 2021

钴矿石				钴化合物				钴及其制品			
国家(地区)	度中心性	国家(地区)	PageRank中心性	国家(地区)	度中心性	国家(地区)	PageRank中心性	国家(地区)	度中心性	国家(地区)	PageRank中心性
荷兰	13	中国	0.0593	中国	52	芬兰	0.1431	德国	136	美国	0.1139
奥地利	13	刚果(金)	0.0591	美国	51	比利时	0.1025	美国	118	德国	0.0901
中国	12	英国	0.0397	比利时	51	中国	0.0570	中国	91	加拿大	0.0540
英国	11	荷兰	0.0292	德国	46	意大利	0.0217	英国	89	挪威	0.0501
美国	9	德国	0.0226	英国	43	英国	0.0200	法国	84	英国	0.0478
德国	7	赞比亚	0.0126	芬兰	39	印度	0.0180	意大利	73	比利时	0.0365
西班牙	5	奥地利	0.0119	意大利	37	西班牙	0.0165	荷兰	70	芬兰	0.0345
法国	5	印度	0.0112	西班牙	34	刚果(金)	0.0155	加拿大	69	刚果(金)	0.0326
韩国	5	韩国	0.0106	荷兰	32	美国	0.0152	比利时	68	法国	0.0298
智利	4	美国	0.0103	法国	30	德国	0.0133	印度	63	日本	0.0287
斯洛伐克	4	斯洛伐克	0.0072	韩国	27	荷兰	0.0093	韩国	60	荷兰	0.0246
瑞士	3	法国	0.0069	印度	25	韩国	0.0086	瑞士	60	中国	0.0225
捷克	3	芬兰	0.0064	日本	25	波兰	0.0083	日本	58	俄罗斯	0.0202
芬兰	3	巴林	0.0064	巴西	18	澳大利亚	0.0083	奥地利	56	土耳其	0.0170
印度	3	俄罗斯	0.0064	捷克	17	土耳其	0.0081	俄罗斯	51	瑞士	0.0167



2024年1月

大和日本等国分别在钴矿石、钴化合物和钴及其制品贸易网络中占据重要地位,而刚果(金)对网络的整体运行具有较强的潜在控制力。

在3类钴产品贸易网络中,中国、英国、美国、德国和荷兰的度中心性和PageRank中心性均位居前列,对整体网络结构具有显著控制力。在3类钴产品贸易网络中,上述国家不仅拥有数量众多的贸易伙伴,并且与其他具有重要贸易地位的国家(地区)建立了较为普遍的联系。其中,英国、美国、德国和荷兰自2000年以来在各网络中始终拥有较高的中心性值,对于当前全球钴产品贸易格局的塑造发挥了较大作用。中国在2000年时已有较高的度中心性,但PageRank中心性尚不突出。近年来,为保障钴产业链的整体安全,中国的钴矿石和钴及其制品等钴产品贸易兼具集中性和多元化特征,在进口来源日益向刚果(金)等主要钴生产国集中的同时,进出口贸易伙伴也呈现多元化趋势,从而在贸易网络中的重要性和控制力均随时间有所上升,PageRank中心性由2000年的第60位、10位和21位提升至2021年的第1位、3位和13位。

部分国家(地区)在其中一类或两类钴产品贸易网络中拥有较高中心性,在钴产业链特定环节发挥关键作用。奥地利和斯洛伐克均有钴矿资源分布,是欧洲的钴矿石生产大国<sup>[37]</sup>,在钴矿石贸易网络中拥有较强影响力;西班牙和意大利在钴化合物贸易网络中具有较高地位;加拿大、日本、俄罗斯和瑞士等国则在钴及其制品贸易网络中拥有高中心性。韩国、芬兰和印度在钴矿石和钴化合物贸易网络中拥有较高的度中心性和PageRank中心性,法国是钴矿石和钴及其制品网络中的高影响力国家(地区)之一,而比利时在全球钴及其制品和钴化合物贸易中具有重要作用。其中,2000年以来法国钴化合物贸易伙伴逐渐减少,与芬兰和韩国等主要国家(地区)间的双边贸易规模有所减小,使得法国在钴化合物贸易网络中的PageRank中心性排名由2000年的第12位降至2021年的第21位。与之类似的是比利时,目前比利时的精炼钴年产量超过1300 t,是全球重要的钴矿石等原材料进口国<sup>[41]</sup>,2000年比利时在钴矿石贸易网络中的度中心性和PageRank中心性分别位列第5和第1位,但随着与中国、法国和

德国间的贸易联系日趋松散,在钴矿石贸易网络中的地位有所下降。刚果(金)较为特殊,2021年在3类钴产品贸易网络中PageRank中心性分别位列第2位、9位和9位,但度中心性排名都较低。该国的钴产品贸易具有高度集中性,与中国的贸易占据其钴矿石和钴及其制品贸易的大部分,而钴化合物贸易则集中在巴西和俄罗斯。刚果(金)控制着主要钴产品生产国的钴资源供应<sup>[42]</sup>,对于钴产业链的稳定运行具有决定作用。

## 4 讨论与启示

随着新能源等产业快速发展以及钴产品生产的全球布局,有关钴流动及贸易的研究逐渐兴起。与已有文献相比,在研究对象上,本文选择钴矿石、钴化合物和钴及其制品作为研究对象,从产品链视角对全球钴产品贸易网络演化开展深入探究,与已有研究有所不同、互为补充<sup>[16,20-22,24,25]</sup>。在研究结论上,已有研究发现,中国、美国和欧盟分别在钴原材料和钴产业链下游贸易中占据较大份额<sup>[7,8,10,11,22]</sup>,与本文识别出的全球主要钴产品贸易国(地区)相一致,并且本文对钴贸易网络中的核心和边缘国家(地区)识别更为精细,是对已有研究结论的延伸。同时,已有研究多聚焦于特定国家(地区)的对外钴贸易情况,仅展现全球钴贸易的局部特征,并对主要贸易国(地区)的识别相对单一。而本文着眼于全球钴贸易网络,对全球钴贸易网络的时空格局、拓扑属性和等级结构特征进行探究,多维度识别全球不同钴产品贸易的关键国家(地区),揭示主要钴贸易国(地区)对产品链上游和中游环节的控制作用,研究内容有所细化和拓展,研究结论也对已有研究构成补充和完善。

基于研究结论可知,目前全球钴产品贸易初步形成了复杂网络关系,并处于动态演化中。在3类钴产品贸易网络中,中国长期占据中心位置,对全球钴贸易格局和国家(地区)间钴贸易合作态势均具有较强控制优势,但也面临着钴产品进口过于集中等潜在风险。为筑牢优势、防范风险,中国应着力优化国际钴贸易合作态势,对钴产品链各环节制定差异化政策,有针对性地实施钴贸易和投资策略。具体而言,未来应注意以下几方面:

(1)对于钴矿石等产品链上游环节,可通过加



强国家(地区)间贸易合作、建立多元化供应体系的方式保障供应稳定和安全。本文分析发现,中国是全球最大的钴矿石进口国,中国的进口钴矿石来源高度集中于刚果(金)。在国际钴资源日益紧俏、钴价格整体波动和大国博弈日趋紧张的形势下,一方面,中国应持续关注刚果(金)等主要贸易伙伴的贸易政策和国内局势,在“一带一路”框架下通过政府间和企业间的项目合作以及中国企业对外投资来降低钴贸易的不确定性和潜在风险;另一方面,中国应建立多元化的海外钴资源供应体系,加强与各类钴产品贸易网络的核心国家(地区)和高中心性国家(地区)间的贸易联系,拓展印度尼西亚和澳大利亚等钴矿石生产国的供应渠道,促进贸易伙伴多元化。

(2)在钴化合物贸易网络中,通过核心—边缘轮廓分析发现,虽然中国属于核心国家,对外贸易联系数量较多,但贸易规模相对有限,尤其与英国、加拿大和芬兰等贸易大国间的贸易规模较小,影响中国企业在全球钴化合物贸易网络中的市场份额和控制力。因此,中国应进一步加强与美国、比利时、英国等重点国家(地区)的贸易合作,通过连接高等级的贸易伙伴,进一步提升自身在钴化合物贸易网络中的地位及对供应链相关环节的掌控能力。此外,中国还应抓住“一带一路”建设契机,加强与沿线国家(地区)在关键矿产资源领域的战略合作,通过推动签署国家(地区)间相关钴产品贸易协定,增强钴关键产品资源配置能力。

(3)由钴及其制品贸易网络分析发现,中国需加强钴资源的回收再利用,提高钴资源利用效率。包含冶炼钴时所得中间产品及钴废碎料在内的全球钴及其制品贸易量和贸易额均呈现逐年增大趋势,但网络的极化程度日益增大。中国虽是钴及其制品贸易的核心国家,但对外贸易向刚果(金)等少数国家(地区)集聚的趋势明显,从而使全球范围内越来越多国家(地区)沦为边缘性国家(地区)。全球范围内钴中间产品及钴废料的回收存在以发达国家(地区)为主、部分国家(地区)参与不足、再利用程度有限的问题。未来,结合国内新能源产业发展趋势,中国需发挥作为钴及其制品贸易网络核心国家的作用,扩大与比利时、英国和芬兰等精炼钴

生产大国以及广大发展中国家(地区)的贸易往来,提升钴冶炼中间产品及钴废碎料的贸易、回收和再利用规模,提升钴资源回收再利用技术,大力发展钴循环经济,提高钴资源利用率。

## 5 结论

本文构建了2000—2021年钴矿石、钴化合物和钴及其制品的全球贸易网络,以2021年为重点研究年份,综合运用中心性、网络密度、集聚系数和核心—边缘轮廓等网络分析方法,描绘不同产品类型钴贸易网络的空间格局,试图从宏观、中观和微观视角揭示全球钴贸易网络的拓扑结构特征,以期通过刻画不同产品类型钴贸易格局和流动态势,为全面了解全球钴贸易市场动态变化、维护中国钴供应安全提供参考。主要结论如下:

(1)从时序变化看,全球钴贸易规模在波动中上升,不同钴产品的贸易发展态势具有明显差异,钴及其制品成为全球钴资源贸易的主要形式。就贸易量而言,可以2011年为分界线将全球钴贸易划分为贸易总量快速增长阶段(2000—2011年)和贸易量平稳发展阶段(2012—2021年)两个阶段。在贸易额上,全球钴贸易额呈现波动式增长,不同钴产品贸易额与贸易量的变动态势整体趋于一致。

(2)全球钴贸易网络呈现出空间分异特征,钴贸易向少数国家(地区)集聚的特征明显。不同产品类型钴贸易网络的空间组织形态具有较大差异,钴矿石贸易网络相对松散,刚果(金)和中国之间的贸易流成为网络的核心连边;钴化合物贸易集中在欧洲和北美,并在全球其他区域分散布局;钴及其制品贸易网络较为稠密,东亚、欧洲和北美成为贸易热点区域。

(3)从宏观拓扑特征看,钴矿石和钴化合物贸易网络日渐松散,钴及其制品贸易网络稠密化程度显著提升,3类钴产品贸易网络的传输效率均随时间增强。从中观拓扑特征看,全球3类钴产品贸易网络均具有显著的核心—边缘结构特征,核心结构和边缘结构层级界限清晰,各国(地区)在网络中的角色仍处于动态调整中。从钴贸易网络的微观拓扑特征看,中国、英国、美国、德国和荷兰等国家(地区)长期处于3类钴产品贸易网络的中心位置,韩国、法国和芬兰等国家(地区)是其中两类钴产品贸

2024年1月

易网络的关键国家(地区),奥地利和斯洛伐克、西班牙和意大利、加拿大和日本等国家(地区)分别在上述3类钴产品贸易网络中占据重要地位,刚果(金)对钴产品链的整体运行具有较强控制力。

本文重点探讨全球钴产品贸易网络的时序变化、空间格局及拓扑结构,为理解全球钴资源贸易态势和供应安全提供参考依据。然而,本文仍存在一些研究不足,有待于今后进一步完善。一是本文从产品链角度分析全球钴贸易网络格局,仅涉及钴矿石、钴化合物和钴及其制品3类产品,而未对钴产业链下游产品展开研究,更多钴产品的贸易网络有待进一步研究。二是本文对钴产品贸易网络的研究侧重于对贸易规模和关系的刻画,而对于钴物质流动和驱动机制的探究相对较浅。三是受逆全球化浪潮、欧美对华“脱钩”、俄乌冲突以及全球经济低迷等不确定性因素影响,全球钴产品贸易发展态势也不可避免地需要更多维度考量。未来,需继续深化包含新近年份在内的长时序钴贸易网络时空格局及影响因素研究,为中国保障钴供应安全、促进钴产业链高质量发展提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] Tkaczyk A H, Bartl A, Amato A, et al. Sustainability evaluation of essential critical raw materials: Cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, DOI: 10.1088/1361-6463/aaba99.
- [2] Graedel T E, Miatto A. US cobalt: A cycle of diverse and important uses[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106441.
- [3] Fu X, Beatty D N, Gaustad G G, et al. Perspectives on cobalt supply through 2030 in the face of changing demand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(5): 2985-2993.
- [4] Cobalt Institute. Cobalt Market Report 2022[R/OL]. (2023-05-10) [2023-06-14]. <https://www.cobaltinstitute.org/resource/cobalt-market-report-2022>.
- [5] U. S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2023[R]. Reston: USGS Publications Warehouse, 2023.
- [6] Campbell G A. The cobalt market revisited[J]. *Mineral Economics*, 2020, 33(1): 21-28.
- [7] Qiao D H, Dai T, Wang G S, et al. Exploring potential opportunities for the efficient development of the cobalt industry in China by quantitatively tracking cobalt flows during the entire life cycle from 2000 to 2021[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115599.
- [8] Chen Z Y, Zhang L G, Xu Z M. Tracking and quantifying the cobalt flows in mainland China during 1994-2016: Insights into use, trade and prospective demand[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 752-762.
- [9] 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 T, et al. Evolution of cobalt material flow in Japan from 2000 to 2020[J]. *Resources Science*, 2023, 45(11): 2264-2275.]
- [10] 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.]
- [11] León M F G, Matos C T, Georgitzikis K, et al. Material system analysis: Functional and nonfunctional cobalt in the EU, 2012-2016 [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2022, DOI: 10.1111/jiec.13281.
- [12] 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.]
- [13] 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.]
- [14] Dou S Q, Xu D Y, Zhu Y G, et al. Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance[J]. *Futures*, 2023, DOI: 10.1016/j.futures.2023.103101.
- [15] 刘全文,沙景华,闫晶晶,等. 中国钴资源供应风险评价与治理研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(1): 50-56. [Liu Q W, Sha J H, Yan J J, et al. Risk assessment and governance of cobalt resources supply in China[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(1): 50-56.]
- [16] 周艳晶,李建武,王高尚,等. 中国钴资源进口安全分析[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5): 50-55. [Zhou Y J, Li J W, Wang G S, et al. Analysis on import security of China's cobalt resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5): 50-55.]
- [17] Chen W, Zhang H P. Characterizing the structural evolution of cereal trade networks in the Belt and Road regions: A network analysis approach[J]. *Foods*, 2022, DOI: 10.3390/foods11101468.
- [18] Niu X Y, Chen W, Wang N Y. Spatiotemporal dynamics and topological evolution of the global crude oil trade network[J]. *Energies*, 2023, DOI: 10.3390/en16041728.
- [19] Nansai K, Nakajima K, Kagawa S, et al. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: The case of neodymium, cobalt, and platinum[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 1391-1400.

- [20] Sun X, Hao H, Liu Z W, et al. Tracing global cobalt flow: 1995–2015[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 149: 45–55.
- [21] 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.
- [22] 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.]
- [23] Sun X Q, Shi Q, Hao X Q. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106035.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 陈伟, 赵晞泉, 刘卫东, 等. “一带一路”贸易网络演化与贸易门户国家识别[J]. *地理学报*, 2023, 78(10): 2465–2483. [Chen W, Zhao X Q, Liu W D, et al. The trade network evolution and identification of gateway countries in the Belt and Road region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(10): 2465–2483.]
- [27] 计启迪, 刘卫东, 陈伟, 等. 基于产业链的全球铜贸易网络结构研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(1): 44–54. [Ji Q D, Liu W D, Chen W, et al. Structure of global copper-containing products trade network based on industrial chain perspective[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(1): 44–54.]
- [28] Fischer C S, Shavit Y. National differences in network density: Israel and the United States[J]. *Social Networks*, 1995, 17(2): 129–145.
- [29] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. *Nature*, 1998, doi: 10.1038/30918. PMID: 9623998.
- [30] Bryan E K, VerSchneider C, Narayan D A. Global efficiency of graphs[J]. *AKCE International Journal of Graphs and Combinatorics*, 2015, 12(1): 1–13.
- [31] 刘志高, 王涛, 陈伟. 中国崛起与世界贸易网络演化: 1980–2018年[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(10): 1596–1606. [Liu Z G, Wang T, Chen W. The rise of China and change of the global trade network during 1980–2018[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(10): 1596–1606.]
- [32] Brin S, Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine[J]. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1998, 30(1): 107–117.
- [33] Chen W. Delineating the spatial boundaries of megaregions in China: A city network perspective[J]. *Complexity*, 2021, DOI: 10.1155/2021/2574025.
- [34] Rossa F D, Dercole F, Piccardi C. Profiling core-periphery network structure by random walkers[J]. *Scientific Reports*, 2013, DOI: 10.1038/srep01467.
- [35] 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.]
- [36] 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*, 2023, DOI: 10.1073/pnas.2212037120.
- [37] Horn S, Gunn A G, Petavratzi E, et al. Cobalt resources in Europe and the potential for new discoveries[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103915.
- [38] Gulley A L, McCullough E A, Shedd K B. China’s domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain[J]. *Resources Policy*, 2019, 62: 317–323.
- [39] 钮潇雨, 陈伟, 俞肇元. “一带一路”贸易网络连通性演化[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(6): 1069–1081. [Niu X Y, Chen W, Yu Z Y. Evolution of “the Belt and Road” trade network connectivity[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(6): 1069–1081.]
- [40] 崔守军, 蔡宇, 姜墨骞. 重大技术变革与能源地缘政治转型[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(11): 2585–2595. [Cui S J, Cai Y, Jiang M Q. Critical technology change and energy geopolitics transition [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(11): 2585–2595.]
- [41] Idoine N E, Raycraft E R, Hobbs S F, et al. *World Mineral Production 2017–21*[M]. Nottingham: British Geological Survey, 2023.
- [42] 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 risks and control of China’s cobalt supply chain [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(2): 351–360.]



# Changes of global cobalt trade network and implications

ZHAO Xiquan<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] Examining the change of the global cobalt trade network is significant for understanding the global cobalt market and supply situation. [Methods] From the perspective of the product chain, this study constructed a global trade network for cobalt ores, cobalt compound, and cobalt and its products. Multiple network analysis methods were used to depict the temporal change in the scale of global cobalt trade, revealing the spatial pattern and topological structure of cobalt trade networks of different product types, to provide a reference for ensuring China's cobalt supply security. [Results] (1) The scale of global cobalt trade is increasing with fluctuations, and the trade development trends of different cobalt products have obvious differences. Cobalt and its products have become the main form of global cobalt trade. (2) The global cobalt trade networks exhibit spatial differentiation characteristics, with a clear trend of cobalt trade agglomeration towards a few countries and regions. The spatial organization of cobalt trade networks for different product types have significant differences. (3) The trade networks of cobalt ores and cobalt compound are becoming increasingly loose, and the density of the trade network of cobalt and its products has significantly increased. The transmission efficiencies of the three types of cobalt product trade networks have increased over time. (4) The global cobalt trade networks have significant core-periphery structural characteristics, with clear hierarchical boundaries between core and periphery structures. The roles of countries in the networks are dynamically adjusted. (5) Countries such as China, the United Kingdom, the United States, Germany, and the Netherlands have long been at the center of trade networks. South Korea, France, and Finland are key countries in two types of cobalt trade networks, while Austria and Slovakia, Spain and Italy, Canada and Japan respectively occupy important positions in the three types of cobalt trade networks. The Democratic Republic of Congo has strong control over the overall operation of the cobalt product chain. [Conclusion] On the basis of clarifying the structural change characteristics of the global cobalt trade networks, China needs to make differentiated policies and adopt targeted trade strategies for different cobalt product types, to ensure the security and stability of its cobalt supply. **Key words:** cobalt resources; cobalt trade; product chain; trade network; topological structure