

# 钴产业链全球贸易的国家地位与风险传播

郭尧琦<sup>1,2</sup>, 郑茹<sup>1</sup>

(1. 中南大学数学与统计学院, 湖南长沙, 410083;

2. 中南大学金属资源战略研究院, 湖南长沙, 410083)

**摘要:** 随着新能源成为新的经济增长点, 钴作为新能源领域的重要原材料, 其供应保障问题愈发凸显。从全产业链的视角解析钴贸易的风险传播过程, 提出多属性引力中心性(MAGC)算法, 识别 2016—2022 年钴产业链的核心贸易国家, 并选择 SIR 模型进一步刻画核心国家与边缘国家的风险传播效应。研究发现: 钴产业链上中下游整体呈现以德国、中国与美国为核心的贸易格局, 产业链贸易存在同质性; 上游以荷兰、中国和美国为中心传播国家, 各国的 MAGC 值整体偏小, 中下游以中国、美国、德国为核心国家; 当产业链面临风险时, 一般在 5 个时间步以内恢复到风险之前的状态, 下游是产业链中最脆弱的环节, 核心国家仅需要 2 次传播就能将风险扩散给多数国家。

**关键词:** 钴; 产业链; 核心国家; 多属性引力中心性

中图分类号: F416

文献标识码: A

文章编号: 1672-3104(2025)01-0123-13

过去几十年间, 金属资源逐渐成为各国争夺的重要战略资源。钴是一种重要的金属矿物, 是超硬合金、化学催化剂、电池、颜料的关键原材料<sup>[1]</sup>。随着“碳中和”概念日益引起各国重视<sup>[2-3]</sup>, 新能源逐渐成为新的竞争领域<sup>[4]</sup>。该行业的快速发展, 使全球对钴等矿产资源的需求不断增加<sup>[5]</sup>。国际钴协会报告显示, 钴需求量在 2023 年首次接近 20 万吨, 比 2016 年翻了一倍多。然而, 钴的地理分布呈现出明显的差异, 多数国家主要通过贸易满足需求。钴国际贸易中存在不同的体系, 传统观点认为, 全球贸易分为核心国家和边缘国家两大体系, 其中核心国家体系由发达国家构成, 而发展中国家属于边缘国家体系<sup>[6-7]</sup>。尽管全球化对全球经济增长产生了积极的影响, 但它在不同的空间尺度上导致了严重的社会两极分化<sup>[8-11]</sup>, 核心国家和边缘国家在国际贸易中所获的利益是不平等的。随着全球对钴资源的争夺日益加剧, 钴贸易面临诸多风险。一方面, 核心国家对钴贸易格局具有较强的影响力, 一旦其面临风险, 就会对产业链产生深远的影响<sup>[12]</sup>。另一方面, 即使其他国家的贸易风险波及了核心国家, 其恢复能力也比边缘国家强。核心国家与边缘国家在利益与风险方面的不平等性, 驱使各国争相成为钴资源贸易的核心国家。因此, 在模拟钴资源风险之前, 有必要正确且合理地识别钴贸易中的核心国家。对于这个问题, Xia 等<sup>[13]</sup>关注产业链的核心国家, 他们仅采用社区模块度和贸易量两个测度衡量稀土产业链中的国家地位, 采用的模块度的优化是个 NP 难问题(NP-hard problem), 计算复杂度较高, 且会忽略一些小的社区<sup>[14]</sup>, 存在一定的局限性; Yang 和 Chen<sup>[15]</sup>、Liu 等<sup>[16]</sup>与 Shi 等<sup>[17]</sup>都通过

收稿日期: 2024-06-15; 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“大国战略背景下我国优势金属资源价值的全球流转: 影响机制及我国地位提升”(42071260); 国家社会科学基金一般项目“大国竞争背景下的稀有金属全球流动演变与我国供应安全研究”(19BJY076); 湖南省自然科学基金面上项目“我国关键矿产资源全球贸易的地缘政治风险与供应安全评估”(2022JJ30054); 湖南省研究生创新项目“稀有金属价值网络演化的动力学机制研究”(CX20220257)

作者简介: 郭尧琦, 男, 河南焦作人, 中南大学数学与统计学院教授、博士生导师, 主要研究方向: 资源与环境经济学; 郑茹, 女, 山东济宁人, 中南大学数学与统计学院博士研究生, 主要研究方向: 资源产业战略与政策、复杂网络, 联系邮箱: rzheng@csu.edu.cn

度、加权重、中介中心性、特征向量中心性分析钴产业链中国家重要性的演变趋势,得到的排名结果仅依赖于一种属性,未能全面刻画节点的重要性。因此,有必要根据贸易网络的特征,提出一个全面有效识别钴产业链贸易网络核心国家的算法。

钴产业链的每个环节相互依存。具体地,钴矿石、钴中间产品和精制钴等产品之间存在供需关系,相互影响,使各种钴产品贸易网络之间联系也十分紧密<sup>[17]</sup>。同时,风险冲击下钴产业链各环节贸易网络的稳定性也会相互作用。因此,有必要从产业链视角探究钴贸易的风险传播。只有解析谁是钴产业链全局的核心国家与各个环节的核心国家,以及核心国家的风险传播速度与传播规模,才能优化钴产业链布局,实现钴产业链的供应保障,满足国家的发展需求。因此,本文聚焦于钴资源,期望回答以下问题:谁是钴产业链中的核心国家?产业链每个环节分别以哪些国家为核心?核心国家发生危机时,全产业链有什么共同的传播特征,产业链每个环节传播路径是怎样的?在风险传播过程中,哪个环节最为脆弱?

为了回答这些问题,本文基于 Li 和 Huang<sup>[18]</sup>的研究,提出一个改进的多属性引力中心性(multi-attribute gravity centrality, MAGC)算法,以计算钴产业链贸易网络的国家影响力,并以感染—易感—恢复(Susceptible Infected Recovered, SIR)模型模拟风险传播的过程。本文的创新性在于:首先,采用 MAGC 算法计算钴产业链风险传播的重要传播国,综合考虑结构洞、邻居的数量、邻居的影响节点的位置以及节点之间的路径信息,克服了现有研究中仅依赖单一特征评价国家地位的不足,全面合理地衡量国家的重要性。其次,以产业链为视角,全面深入刻画钴产业链全局贸易风险传播特征,比较风险传播的同质性与异质性,弥补了分析单一产业链环节风险传播的不足。最后,以高 MAGC 值的节点为初始风险国,根据网络的物理接触模拟产业链的风险传播,探讨核心国家在钴产业链的风险传播效应,弥补了现有风险传播模拟方法在复杂性、不确定性与缺乏动态模拟上的不足。

## 一、文献综述

已有研究为本文研究钴产业链贸易网络的中心国家识别与风险传播提供了诸多思路,主要包括矿产资源贸易网络、复杂网络中心节点识别与贸易网络风险传播等三个方面。

第一,复杂网络已被广泛地应用于矿产资源贸易的研究中。目前的研究侧重贸易网络格局演变与网络的影响因素分析。在贸易格局演变的研究中, Liu 等<sup>[19]</sup>分析了钴矿贸易网络的特征稳定性,并预测潜在国际贸易关系; Sun 等<sup>[20]</sup>从短期和长期两个维度探讨石油贸易网络的稳定性; Wang 等<sup>[21]</sup>通过分析全球废铜贸易 30 年的演变特征,寻找最大的废铜贸易社区与进口国。此外,学者们还分析了稀土<sup>[22]</sup>、锂<sup>[23]</sup>、铈<sup>[24]</sup>、铝<sup>[25]</sup>、铁<sup>[26]</sup>、铍<sup>[27]</sup>资源的贸易演变。在贸易网络影响因素研究方面,有的学者采用引力模型进行研究,如 Kitamura 和 Managi<sup>[28]</sup>将石油贸易关系分为竞争与合作两类,采用引力模型分析 GDP、和平等因素对石油贸易网络和原油贸易网络的影响程度;还有的学者使用面板分析解析贸易网络中的相关性,如 Zhao 等<sup>[29]</sup>构建了钴矿和精矿贸易依赖网络,揭示了钴贸易依赖网络的结构特征,并利用面板回归分析来量化国家对钴贸易价格的作用。除了上述两种方法,时间指数随机图模型<sup>[30]</sup>也可以从贸易网络结构与国家属性等多个维度探讨贸易网络的影响机制。

第二,对于贸易网络而言,找到国际贸易中最具有影响力的国家是一个重要的问题。在贸易网络中,国家影响力主要采用网络中心节点识别的方法获得,现有的中心性研究主要通过传统的中心性计算方法<sup>[31-33]</sup>,以及基于 Betweenness<sup>[34-36]</sup>、基于 Closeness<sup>[37-39]</sup>与基于分解的方法<sup>[40-41]</sup>进行研究。虽然中心性的理论研究已经取得了较多的成果,但是在矿产资源的贸易网络分析中,仍以第一种方法为主<sup>[42-44]</sup>,即通过单一的经典中心性刻画贸易网络中的特征。同时,这些研究的重点是网络的拓扑特

征,并未明确提出识别贸易网络的核心国家这一研究问题。

第三,国际贸易会受到许多因素的影响,政治、外交、地理、经济等因素都会给国际贸易带来风险。风险能通过贸易关系在国际社会中广泛传播,甚至改变贸易关系,产生深远的影响。因此,研究风险如何在贸易网络中传播是一个重要的问题。级联失效可以模拟矿产资源贸易风险的传播过程,如 Sun 等<sup>[45]</sup>构建了 2019 年钴矿石贸易网络,通过级联失效模型模拟雪崩过程,分析钴贸易网络的风险传播特征,发现当比率  $r \geq 8$  时,主要雪崩规模从 22 个迅速增加到 36 个,间接级联是雪崩规模的主要表现形式。除了级联失效,系统动力学、面板分析和 SIR 模型也可以分析风险的影响,如 Liu 等<sup>[46]</sup>运用系统动力学模型研究了电动汽车地缘政治风险和冲击对钴产业链系统的影响;Shi 等<sup>[12]</sup>构建了钴进出口依赖网络,利用面板回归方法发现钴贸易的依赖模式受到国家风险的显著影响;Huo 等<sup>[47]</sup>通过 SIR 模型分析了产业链风险对企业的影响。

然而,上述矿产资源贸易网络的研究主要针对矿石、精矿、废料等单个产品层面进行分析。实际上,矿产资源国际贸易是一个错综复杂的系统,不仅涉及众多国家,还包括多种产品。国家与国家之间、产品与产品之间“织链成网”,构成复杂的系统。因此,有必要从产业链的视角全面探讨谁是钴产业链中的核心国家以及各个环节的核心国家,并且在产业链的层面比较各环节核心国的同质性与异质性。在矿产资源贸易网络的核心国家研究中,以单一的网络节点特征为主要分析方法,仅考虑单一特征的中心性指标通常无法全面刻画特征。目前,已经有学者尝试用多个特征研究节点重要性<sup>[48-49]</sup>,并证明了多特征比单一特征能够更准确地识别中心节点。因此,本文在基于多个网络特征与路径的基础上,提出一个新的算法以识别钴产业链中的核心国家。此外,关于钴矿产资源贸易网络的风险传播问题,主要从风险对矿产资源贸易网络结构的冲击与破坏的角度进行探讨,即考虑网络负载均衡,一个节点故障会导致另一个相邻或不相邻的节点故障。然而,级联失效仅通过网络的边进行传播,忽略了拓扑信息,而国际贸易的风险传播仍依赖物理接触(边)进行传播,故有必要通过一个依赖网络结构的模型分析钴产业链的风险传播。同时,系统动力学模型存在参数不确定性、模型过于复杂等局限性,面板回归无法模拟风险传播的动态传播。本文选择 SIR 模型,根据网络的依赖物理接触(边)模拟产业链的风险传播。

## 二、数据来源与研究方法

### (一) 数据和网络构建

本文所研究的贸易网络的数据来自 UN Comtrade(联合国商品贸易统计数据库),并选择了 2016—2022 年的钴产业链贸易数据。同时,将产业链分为上游、中游和下游三个部分。其中,上游主要是产业链的初级产品贸易,涉及钴矿与精矿(HS260500);中游主要是钴中间产品的贸易,包括钴氧化物和氢氧化物(HS282200)、硫酸钴(HS283329)、氯化钴(HS282739)、草酸钴(HS291711)、锂镍钴锰氧化物(HS284290)、冰铜(HS810520)等产品;下游位于产业链的后端,主要对精炼的钴制品进行贸易,选择了钴电池(HS850650)与其他钴钨制品(HS810590)<sup>[16-17]</sup>。本文以其中的贸易国家或地区作为节点,存在贸易关系的国家或地区间有一条边,以贸易量为权重,构建钴产业链的贸易网络。

### (二) 网络节点地位测度

国家的贸易伙伴越多,对贸易格局的影响力会越大,度反映了这种特征。除了度,强度在贸易网络中也是一个重要的特征,它反映了钴产品的贸易量,认为贸易量多的国家更重要。K-shell 值是一种基于网络分解的节点排序方法,K-shell 值越高,说明节点在贸易网络中的位置越重要。特征向量中心性是一种既考虑国家节点的直接贸易关系,又考虑贸易伙伴重要性的测度。在网络中,存在一些度并不高的节点,但它们起到了桥梁作用,结构洞系数能够有效测度这种特征。此外,一个节点到其他所

有节点的路径越短, 国家的影响力越大。

本文综合虑了结构洞、邻居的数量、邻居的影响、节点的位置以及节点之间的路径信息, 通过引力方程将上述参数耦合。具体地, 节点  $i$  的 MAGC 值为

$$\text{MAGC}(i) = \sum_{d_{ij} \leq R, j \neq i} e^{-C_i} \frac{m_i m_j}{d_{ij}^2} \quad (1)$$

其中,  $m_i = k_{\text{nor}}(i) + kS_{\text{nor}}(i) + S_{\text{nor}}(i) + x_{\text{nor}}(i)$ , 是多种属性的标准化结果,  $k_{\text{nor}}(i)$ ,  $kS_{\text{nor}}(i)$ ,  $S_{\text{nor}}(i)$ ,  $x_{\text{nor}}(i)$  分别是归一化处理后的节点  $i$  的度、K-shell、强度与特征向量中心性。 $d_{ij}$  是节点  $i$  到  $j$  的最短路径长度,  $C_i$  是节点的结构洞系数<sup>[50]</sup>。由此, 本文构建了同时考虑度、K-shell、强度与特征向量中心性、结构洞以及节点之间的路径信息的 MAGC 算法。

### (三) 风险传播模拟

SIR 是一个经典的传染病模型, 由三种状态组成, 分别是易感态( $S$ )、感染态( $I$ )和恢复态( $R$ ), 其中,  $S$  指健康但有被传染风险的人,  $I$  是已经被感染的人,  $R$  则是感染后成功恢复, 不再受感染的人。在本文的研究问题中, 贸易网络  $S$  状态的节点是处于正常状态, 但可能会被其他国家传播风险的国家,  $I$  是正在遭受风险的国家, 而  $R$  则是曾经受到风险冲击, 已经恢复的国家。

对于总数为  $N$  的 SIR 模型,  $t$  时刻三种状态可以写作:

$$\begin{cases} S(t) = -\beta I(t) \frac{S(t)}{N} \\ I(t) = \beta I(t) \frac{S(t)}{N} - \gamma I(t) \\ R(t) = \gamma I(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\beta$  是  $S$  状态转化成  $I$  状态的概率, 而  $\gamma$  是  $I$  状态恢复为  $R$  状态的概率。所有个体只有三种状态, 即  $S(t) + I(t) + R(t) = N$ 。通过上述公式, 可以计算每次迭代后不同状态的国家数量。SIR 模型可以通过计算基本传染数来判断传染或风险是否能够在网络中传播, 基本传染数可以通过  $\beta$  与  $\gamma$  的比值( $\beta/\gamma$ )获得, 如果  $\beta/\gamma > 1$ , 说明钴贸易网络中风险传播速度大于恢复的速度, 则风险会在网络中扩散, 当  $\beta/\gamma < 1$  时, 意味着风险传播的速度小于风险恢复的速度, 网络会逐渐恢复正常状态。 $\beta/\gamma > 1$  是学者重点关注的情况, 本文研究钴产业链贸易网络风险传播, 也集中分析  $\beta/\gamma > 1$  时, 探究风险会以怎样的速度和方式在国家之间传播, 并进一步提出相应的政策或措施来积极应对风险传播。

## 三、研究结果与分析

### (一) 识别钴产业链中的核心国家

本文首先采用 MAGC 算法, 全面评估钴产业链中的国家影响力排名, 其次, 根据 MAGC 值, 通过 SIR 模型分析钴产业链中上中下游贸易网络的动态风险过程。

表 1~表 3 列举了钴上中下游贸易网络 MAGC 值前 15 名国家在 2016—2022 年的演变情况, 并观察 2016 年钴产业链的核心国家在随后 6 年的地位变化。研究发现, 中国、德国与美国在产业链全局的 MAGC 值排名中都很靠前, 说明这些国家对各种钴产品贸易都具有深远的影响, 钴的整体供应保障能力较强。中国作为世界上最大的发展中国家, 人口众多, 对电池材料、超级耐热合金以及硬质合金的原材料钴矿石需求量巨大, 且中国新能源汽车产业不断发展, 相关市场接近万亿, 对锂电池的需求也逐渐增加, 必须扩展新的贸易伙伴来保障钴产业链供应, 使得中国成为钴产业链的核心国家。

美国与德国都是发达国家,且汽车行业十分发达,近年来新能源汽车行业发展迅速,故对钴的后端产品需求量较大,同时由于技术水平领先全球,它们有能力对钴矿石进行精细加工,提高其产品价值,获得更大的利润,故而在钴的初级产品国际贸易中也是举足轻重。因此,美国和德国在钴的全产业链中发挥重要作用。

表 1 钴产业链上游环节国家排名

国家	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
荷兰	1	1	11	14	14	1	1
中国	2	5	2	4	5	2	2
比利时	3	3	5	16*	26*	25*	6
美国	4	2	4	2	1	5	8
英国	5	6	1	1	2	3	4
南非	6	4	8	7	4	16*	7
日本	7	20*	19*	22*		29*	16*
赞比亚	8	13	7	12	13	18*	20*
刚果(金)	9	11	10	8	11	9	11
西班牙	10	8	31*	29*	26*	14	12
德国	11	10	6	3	3	4	3
巴西	12	9	17*	23*		38*	
韩国	13	12	3	5	12	8	9
斯洛伐克	14	22*	31*			11	38*
马达加斯加	15		31*				

注: \*表示该国家当年的排名跌出前 15 名,缺少数据则表明该国家这一年没有参与钴贸易,下同。

表 2 钴产业链中游环节国家排名

国家	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
德国	1	1	1	1	1	1	2
美国	2	3	3	3	4	3	3
中国	3	2	2	2	2	2	1
印度	4	4	4	4	5	4	4
英国	5	5	9	10	7	7	8
西班牙	6	6	6	7	9	8	7
法国	7	7	8	8	10	10	9
荷兰	8	8	7	5	3	9	5
比利时	9	10	5	6	8	5	6
意大利	10	9	10	9	6	6	10
土耳其	11	11	11	11	11	11	11
巴西	12	17*	16*	18*	18*	20*	19*
日本	13	13	12	12	13	19*	17*
芬兰	14	12	14	16*	15	18*	20*
捷克	15	14	13	13	12	12	12

表3 钴产业链下游环节国家排名

国家	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
德国	1	3	2	2	4	2	5
美国	2	1	3	3	1	3	2
法国	3	2	5	5	6	1	1
瑞士	4	7	7	7	7	5	7
中国	5	4	1	1	2	4	4
英国	6	6	6	4	5	7	3
新加坡	7	8	8	8	10	8	8
荷兰	8	5	4	6	3	6	6
加拿大	9	13	12	12	14	13	15
韩国	10	11	11	10	8	14	12
日本	11	10	10	11	11	11	9
意大利	12	9	9	9	9	10	10
瑞典	13	18*	14	24*	12	15	20*
挪威	14	24*	23*	14	20*	25*	18*
丹麦	15	12	15	13	19*	12	11

钴产业链除了有共同的核心国家,每个环节的核心国家排名也有一定差异。在上游贸易网络中,荷兰在2016—2022年四度成为影响力排名第一的国家,但在2018—2020年发生较大的变化,排名有所下跌;刚果(金)在钴矿石贸易中的地位比较稳定,这可能是由于刚果(金)的钴矿产量很高,根据USGS数据,2022年全球钴资源储量830万吨,其中,刚果(金)的钴资源储量占48.2%;马达加斯加自2016年起在钴矿石国际贸易中处于下滑状态,2019年后该国退出钴矿贸易市场,这可能是由于马达加斯加受新冠疫情影响而曾暂停钴贸易。

中游和下游产业链的核心国家排名的稳定性较为相似。虽然在分析的7年间前10名有所波动,但基本维持了其优势地位。具体而言,巴西自2017年起就在钴中间产品的国际贸易中跌出了前15名,其主要原因在于巴西自2016年出现经济大幅滑坡的现象,2020年经济出现负增长,经济衰退与“去工业化”使巴西对钴中间产品的需求有所下降,影响力也随之降低;日本和芬兰也出现排名下降的情况;捷克反而不断提高了在钴中间产品的影响力。法国作为欧洲的老牌发达国家,在技术水平要求较高的下游环节占据优势地位,相比之下,其中游产品的贸易地位稍逊一筹。

表4列举了2022年钴产业链各环节MAGC值的国家排名,MAGC值越大,表明国家的影响力越大。上游贸易网络的MAGC值普遍较小,主要是由于上游贸易网络节点较少,网络十分稀疏,MAGC值与节点拓扑和邻节点数量成正比。同时,由于边的数量较少,节点之间的路径会更长,也会使钴产业链上游的网络节点的MAGC值更小。中游贸易网络节点的MAGC值和下游MAGC值范围较为接近,这是由产业链分布特征决定的,中下游的钴产品应用广泛,需求量大,贸易网络更加密集,对应环节的MAGC值更大,核心国家对网络的影响力也更大。

## (二) 钴产业链风险传播

上文已经通过MAGC算法识别出钴产业链的核心国家,为了进一步探索这些中心国家面临风险时如何影响其他国家,本文采用SIR模型模拟上中下游贸易网络中发生危机时的风险传播动态。

表 4 2022 年钴产业链各环节 MAGC 值国家排名

上游		中游		下游	
国家	MAGC 值	国家	MAGC 值	国家	MAGC 值
荷兰	22.320	中国	536.889	法国	578.105
中国	19.755	德国	512.578	美国	571.262
德国	16.782	美国	509.962	英国	509.444
英国	12.138	印度	476.349	中国	487.547
法国	11.623	荷兰	450.238	德国	480.723
比利时	9.694	比利时	437.282	荷兰	466.182
南非	9.043	西班牙	405.652	瑞士	388.949
美国	8.762	英国	395.563	新加坡	369.692
韩国	7.246	法国	385.624	日本	349.709
土耳其	4.973	意大利	364.466	意大利	348.604
刚果(金)	3.897	土耳其	293.257	丹麦	336.719
西班牙	3.381	捷克	280.648	韩国	322.928
瑞士	2.190	韩国	269.862	波兰	315.800
意大利	1.842	加拿大	265.238	西班牙	308.691
智利	1.800	瑞士	246.443	加拿大	302.790

1. 风险传播速度

图 1~图 3 分别模拟了钴产业链上、中、下游贸易网络三个环节中风险传播的速度。具体地, 易感态为 S 线, 感染态为 I 线, 恢复态为 R 线, 纵坐标表示某个传播时刻各种状态的国家数量。

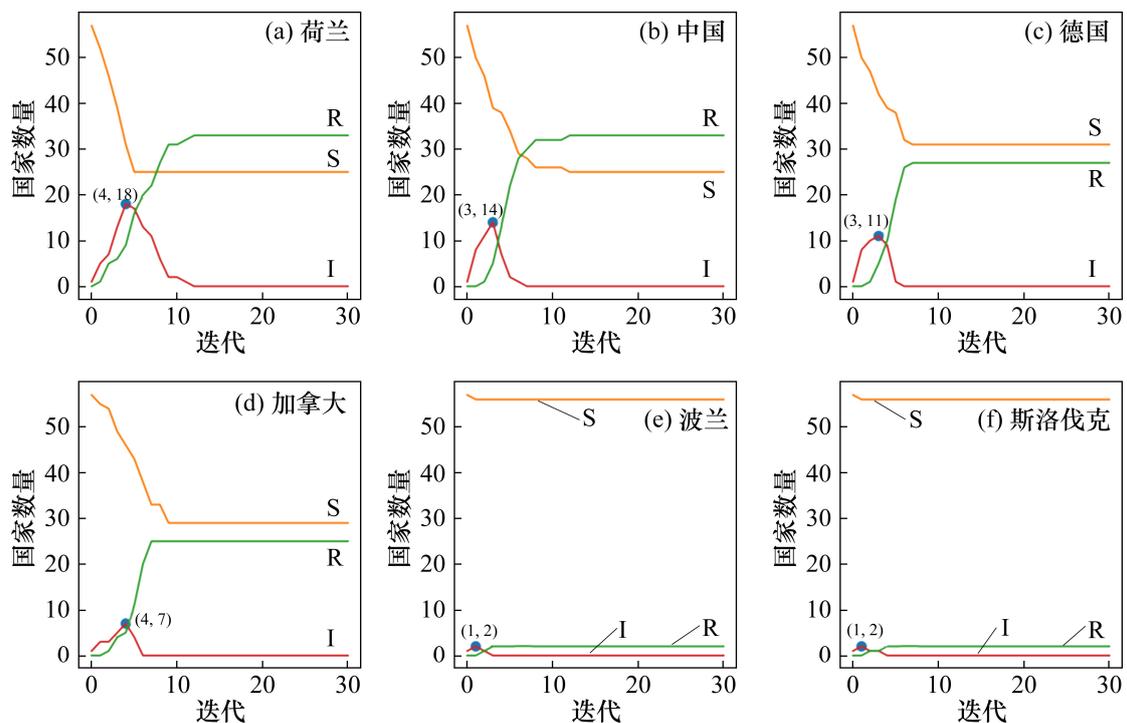


图 1 2022 年钴产业链上游贸易网络风险传播情景仿真

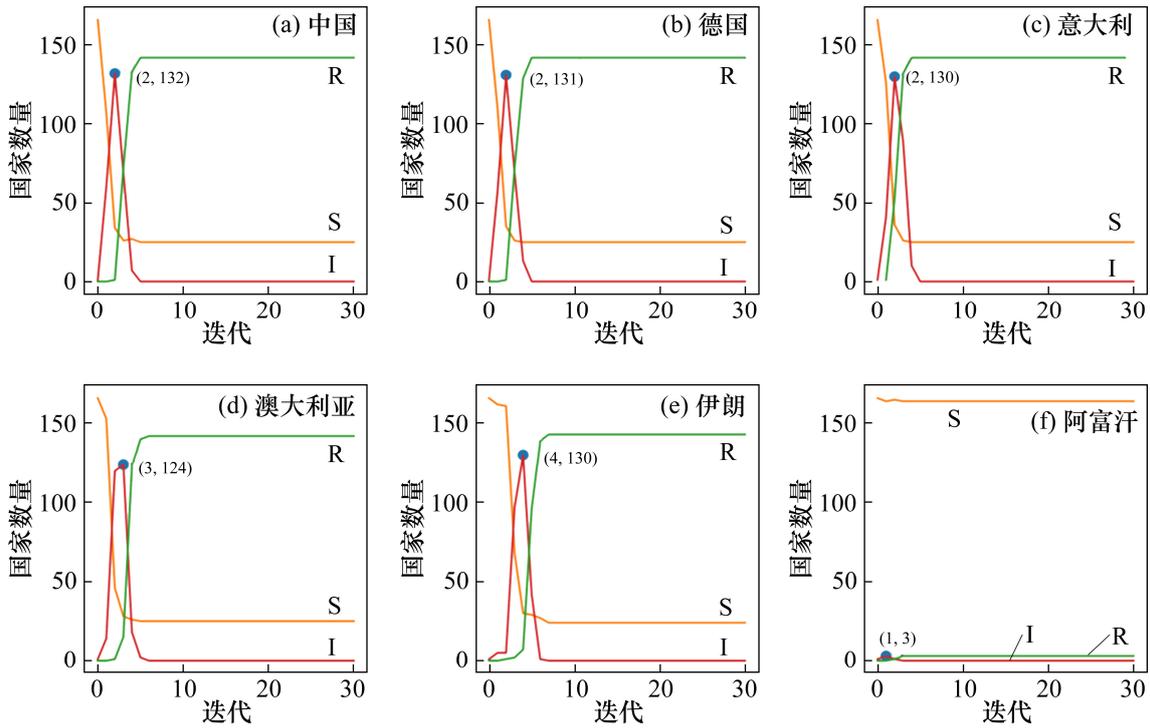


图2 2022年钴产业链中游贸易网络风险传播情景仿真

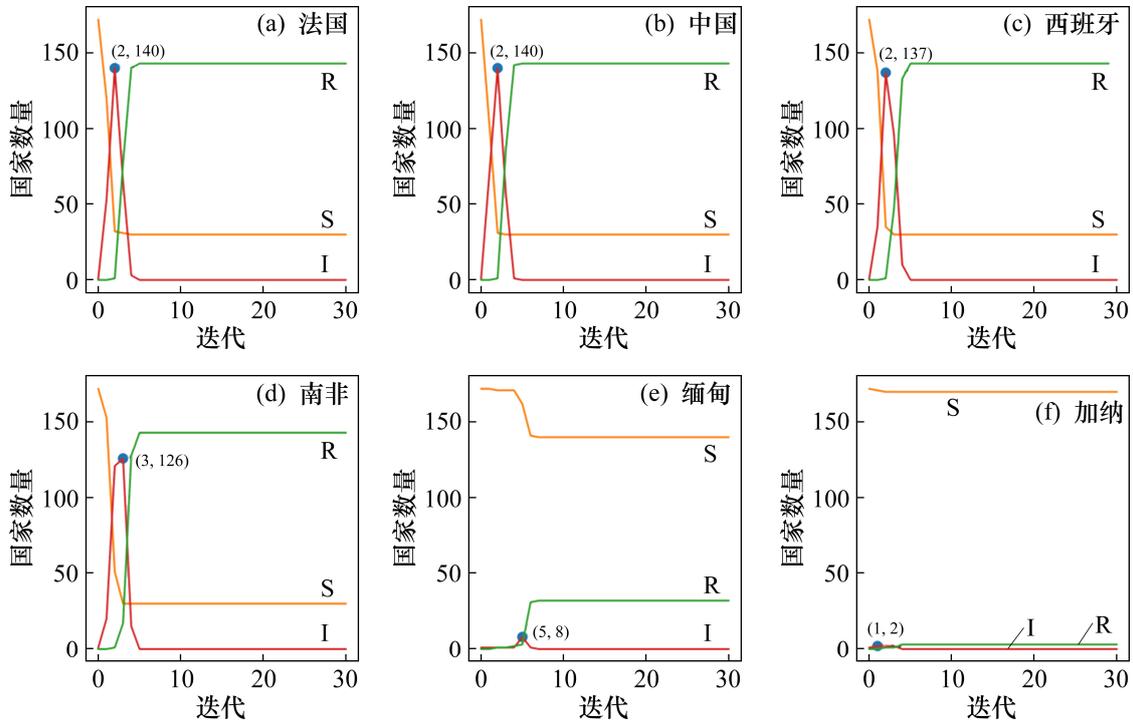


图3 2022年钴产业链下游贸易网络风险传播情景仿真

当上游产品贸易网络的中心国家遭受风险时，风险传播速度比中游与下游贸易网络的风险传播速度稍慢。由图1可知，荷兰作为2022年上游环节MAGC值最大的国家，当发生危机时，风险持续的时间更久。虽然它在第3次传播时，感染的国家数量为13，与中国相差不大，但中国在3次传播后便

已经开始恢复, 而荷兰则会在 4 次传播时才能使得风险感染的国家数量达到最多, 其最大感染状态数为 18, 大于中国的最大感染状态数。荷兰发生风险能在上游网络中持续约 10 个时间步, 而中国仅需要 7 个时间步便可恢复, 说明荷兰对上游的国际贸易影响较大。相比于中国, 德国在钴上游贸易中影响力稍弱, 在  $t=3$  时有 11 个国家处于风险状态。当排名更靠后的加拿大、波兰和斯洛伐克发生危机时, 对钴产业链上游的国际贸易影响较小, 尤其是波兰和斯洛伐克。

图 2 绘制了钴产业链中游贸易网络的动态风险过程。中游产品的国际贸易网络风险的传播速度较快, 中国、德国和意大利都在 2 次传播迭代时影响最多的风险国, 虽然它们的排名不同, 但传播影响力差异较小。这一现象与中游贸易网络的结构有关, 相比于上游贸易网络, 各个国家在中游国际贸易中联系更加紧密, 网络比较密集。澳大利亚在中游贸易网络中的排名比上述三国低, 它需要 3 次传播才达到最大传播数量, 此时处于风险状态的国家为 124 个。伊朗的影响力较弱, 需要更多的时间才能将风险传播到其他国家, 而属于边缘国家的阿富汗在风险状态最强时影响的国家数量也仅为 3 个, 说明阿富汗对中游贸易影响较小, 不会使造成大规模的风险扩散。

由图 3 可知, 产业链下游 MAGC 值较大的法国和中国面临风险时, 传播速度差距很小, 中国基本在 4 次传播后完全恢复, 而法国则需要  $t=5$  时才恢复, 说明法国的风险影响持续时间比中国久。西班牙虽然在  $t=2$  时网络中有 137 个国家处于风险状态, 但多数是在第 2 次传播时影响的国家, 说明西班牙的影响力主要依靠其贸易伙伴传递。南非虽然矿产资源丰富, 但下游产品对技术水平要求较高, 而南非的相关技术水平较落后, 它对网络的影响也主要依赖中国、美国等核心国家。属于边缘国家类型的缅甸和加纳对下游产品的贸易关系影响较小, 尤其是加纳, 在模拟中仅将危机传播给布基纳法索和科特迪瓦两国, 没有和核心国家建立联系。

对比上述 3 图, 发现钴产业链中游和下游环节中的风险传播速度较为相似, 这是因为中游贸易网络和下游贸易网络与上游贸易网络的结构存在差异, 上游的贸易关系比较稀疏, 参与钴矿石贸易的国家数量较少, 而中间产品和精加工产品的用途广泛, 需求较大, 网络结构更密集。通常核心国家只需要 2 次传播过程就能够将风险传播全球, 边缘国家主要依赖核心国家, 风险传播速度较慢, 没有与核心国家建立贸易国家的边缘国家则不会对网络主体产生较大的影响。

## 2. 风险传播路径

为更加清晰地了解风险传播时每个国家的状态, 本文分析了 2022 年钴产业链的上中下游 MCGA 值排名第一的核心国家的传播路径, 三角形表示初始风险国家, 记为 0, 四边形、五边形、六边形与七边形分别表示第 1、2、3 与 4 次风险传播时感染的国家(见图 4)。研究发现, 荷兰首先将风险传播给法国等核心国家, 随后将风险传播到德国、日本、韩国、波兰等国家。可以看出, 钴产业链上游风险 3 次传播的影响数量相差不大。而中游和下游风险主要通过第 1 次和第 2 次传播, 尤其是下游, 传播路径更短, 第 3 次和第 4 次传播只影响到 2 个国家, 而中游会波及 9 个国家。

## 四、结论与建议

本文首先采用多属性引力中心性算法分析了钴产业链中的核心国家, 其次探讨了钴产业链的风险传播速度, 最后分析了钴产业链贸易网络的风险传播路径。研究发现: 首先, 钴产业链上中下游整体呈现出以德国、中国与美国为主导的贸易格局, 产业链贸易存在一定的同质性。其次, 每个产业链环节的中心性国家存在一定的差异, 钴产业链各环节存在异质性。其中, 上游以荷兰、中国和美国为中心传播国家, 上游各国的 MAGC 值整体偏小, 贸易关系简单; 中游的核心国家有中国、美国、德国; 而在下游贸易网络中, 德国、法国、美国与中国的影响力较大。中下游贸易关系错综复杂, MAGC 值



图4 钴产业链贸易网络风险传播路径

更大的国家会对网络产生更大的影响。

在钴产业链风险传播的模拟过程中, 分别模拟了不同 MAGC 值排名国家为风险起源国对钴产业链的动态影响。发现钴的全产业链一般在 5 个时间步以内基本恢复到风险之前的状态。在不同的产业链环节, 风险传播速度略有差异, 中下游传播速度比上游传播速度更快。下游是钴产业链中最为脆弱的环节, 核心国家仅需要 2 次传播就能将风险扩散给多数国家。边缘国家主要依赖核心国家, 其风险传播速度较慢, 没有与核心国家建立贸易关系的边缘国家不会对网络主体产生较大的影响。

通过钴产业链的核心国家识别与风险传播模拟, 我们提出以下建议: 第一, 我国应加强区域合作, 减少对单一或个别国家的资源依赖。我国钴矿资源并不丰富, 却是全球第一大精炼钴生产国和钴资源消费国, 为了满足需求, 需要进口大量的钴矿产资源, 对外依赖极强。因此, 应当通过持续深化与共建“一带一路”国家的关键矿产资源合作, 与东南亚、非洲等资源国共同建设矿产资源加工产业, 提高产能, 加强产业链深度合作, 加大对资源国的矿产资源勘探开发, 为我国的矿产资源供应提供保障。第二, 要强化技术革新, 抓住技术发展的关键节点。对于钴产业链下游, 通过加强对低钴电池新技术的研发, 推进技术转型, 减少钴的需求量。同时, 不断改进勘探开采、生产制造技术, 减少原材料的损失, 降低环境污染, 提高我国钴产业链贸易的市场地位。第三, 我国还需完善风险预警机制, 提升监测预警能力, 系统开展国内外矿产品供需分析和地缘政治、极端气候事件、事故灾难等各类风险对关键矿产供应链的评估, 建立战略性矿产监测预警报告制度, 充实政策池工具箱, 提升应对国际重大冲突的资源安全预警能力。尤其需要关注以钴电池为主要产品的下游国际贸易格局, 增强产业链下游的韧性, 避免因产业链下游环节中的风险的快速传播受到严重的损失。

#### 参考文献:

- [1] GRAEDEL T E, MIATTO A. U.S. cobalt: A cycle of diverse and important uses[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184: 106441.
- [2] MALLAPATY S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. *Nature*, 2020, 586(7830): 482–483.
- [3] SOERGEL B, KRIEGLER E, WEINDL I, et al. A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(8): 656–664.
- [4] GULLEY A L, NASSAR N T, XUN S A. China, the United States, and competition for resources that enable emerging technologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4111–4115.
- [5] FU X K, 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.
- [6] PREBISCH R. Commercial policy in the underdeveloped countries[J]. *The American Economic Review*, 1959, 49(2): 251–273.
- [7] PREBISCH R. The economic development of latin america and its principal problems[M]. New York: United Nations Department of Economic Affairs, Economic Commission for Latin America (ECLA), 1950.
- [8] VAN MEIJL H, VAN RHEENEN T, TABEAU A, et al. The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(1): 21–38.
- [9] TISDELL C. Globalisation and sustainability: Environmental kuznets curve and the WTO[J]. *Ecological Economics*, 2001, 39(2): 185–196.
- [10] HENDERSON J, JEPSON N. Critical transformations and global development: Materials for a new analytical framework[J]. *Area Development and Policy*, 2018, 3(1): 1–23.
- [11] BLOUIN C, CHOPRA M, VAN DER HOEVEN R. Trade and social determinants of health[J]. *The Lancet*, 2009, 373(9662): 502–507.
- [12] SHI S W, SUN Q R, XI Z L, et al. The impact of country risks on the dependence patterns of international cobalt trade: A network analysis method[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 951235.

- [13] XIA Q F, DU D B, CAO W P, et al. Who is the core? Reveal the heterogeneity of global rare earth trade structure from the perspective of industrial chain[J]. *Resources Policy*, 2023, 82: 103532.
- [14] 汪小帆, 刘亚冰. 复杂网络中的社团结构算法综述[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(5): 537-543.
- [15] YANG J L, CHEN W. Unravelling the landscape of global cobalt trade: Patterns, robustness, and supply chain security[J]. *Resources Policy*, 2023, 86: 104277.
- [16] 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, 77: 102691.
- [17] SHI Q, SUN X Q, XU M, et al. The multiplex network structure of global cobalt industry chain[J]. *Resources Policy*, 2022, 76: 102555.
- [18] LI Z, HUANG X Y. Identifying influential spreaders by gravity model considering multi-characteristics of nodes[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 9879.
- [19] LIU S, DONG Z L, DING C, et al. Do you need cobalt ore? Estimating potential trade relations through link prediction[J]. *Resources Policy*, 2020, 66: 101632.
- [20] SUN Q R, GAO X Y, ZHONG W Q, et al. The stability of the international oil trade network from short-term and long-term perspectives[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 482: 345-356.
- [21] WANG C, HUANG X, LIM M K, et al. Mapping the structural evolution in the global scrap copper trade network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 122934.
- [22] HOU W Y, LIU H F, WANG H, et al. Structure and patterns of the international rare earths trade: A complex network analysis[J]. *Resources Policy*, 2018, 55: 133-142.
- [23] TIAN X, GENG Y, SARKIS J, et al. Features of critical resource trade networks of lithium-ion batteries[J]. *Resources Policy*, 2021, 73: 102177.
- [24] WANG C H, ZHONG W Q, WANG A J, et al. Mapping the evolution of international antimony ores trade pattern based on complex network[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102421.
- [25] DI J H, WEN Z G, JIANG M H, et al. Patterns and features of embodied environmental flow networks in the international trade of metal resources: A study of aluminum[J]. *Resources Policy*, 2022, 77: 102767.
- [26] ZHONG W Q, DAI T, WANG G S, et al. Structure of international iron flow: Based on substance flow analysis and complex network[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 136: 345-354.
- [27] 朱学红, 冯慧, 张宏伟. 地缘政治视角下铍资源供应风险分析[J]. *中南大学学报(社会科学版)*, 2023, 29(5): 138-147.
- [28] KITAMURA T, MANAGI S. Driving force and resistance: Network feature in oil trade[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 361-375.
- [29] ZHAO Y R, GAO X Y, AN H Z, et al. The effect of the mined cobalt trade dependence network's structure on trade price[J]. *Resources Policy*, 2020, 65: 101589.
- [30] YU G H, XIONG C, XIAO J X, et al. Evolutionary analysis of the global rare earth trade networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2022, 430: 127249.
- [31] BONACICH P. Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification[J]. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1972, 2(1): 113-120.
- [32] FREEMAN L C. A set of measures of centrality based on betweenness[J]. *Sociometry*, 1977, 40(1): 35-41.
- [33] PAGE L, BRIN S, MOTWANI R, et al. The pagerank citation ranking: Bringing order to the web[R]. *Stanford InfoLab*, 1999.
- [34] FREEMAN L C, BORGATTI S P, WHITE D R. Centrality in valued graphs: A measure of betweenness based on network flow[J]. *Social Networks*, 1991, 13(2): 141-154.
- [35] GIRVAN M, NEWMAN M J. Community structure in social and biological networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [36] NEWMAN M E J. A measure of betweenness centrality based on random walks[J]. *Social Networks*, 2005, 27(1): 39-54.
- [37] STEPHENSON K, ZELEN M. Rethinking centrality: Methods and examples[J]. *Social Networks*, 1989, 11(1): 1-37.
- [38] HAGE P, HARARY F. Eccentricity and centrality in networks[J]. *Social Networks*, 1995, 17(1): 57-63.
- [39] TRAN T D, KWON Y K. Hierarchical closeness efficiently predicts disease genes in a directed signaling network[J]. *Computational Biology and Chemistry*, 2014, 53: 191-197.

- [40] SEIDMAN S B. Network structure and minimum degree[J]. *Social Networks*, 1983, 5(3): 269–287.
- [41] CARMI S, HAVLIN S, KIRKPATRICK S, et al. A model of internet topology using k-shell decomposition[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(27): 11150–11154.
- [42] GUO Y Q, ZHENG R, ZHANG H W. Tantalum trade structural dependencies are what we need: A perspective on the industrial chain[J]. *Resources Policy*, 2023, 82: 103469.
- [43] GUO Y Q, ZHAO B Y, ZHANG H W. The impact of the belt and road initiative on the natural gas trade: A network structure dependence perspective[J]. *Energy*, 2023, 263: 125912.
- [44] ZHENG S X, ZHOU X R, XING W L, et al. Analysis on the evolution characteristics of kaolin international trade pattern based on complex networks[J]. *Resources Policy*, 2022, 77: 102783.
- [45] SUN X Q, SHI Q, HAO X Q. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 179: 106035.
- [46] LIU W, LI X, LIU C Y, et al. Resilience assessment of the cobalt supply chain in China under the impact of electric vehicles and geopolitical supply risks[J]. *Resources Policy*, 2023, 80: 103183.
- [47] HUO L A, GUO H Y, CHENG Y Y. Supply chain risk propagation model considering the herd mentality mechanism and risk preference[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 529: 121400.
- [48] WANG J, LI C, XIA C Y. Improved centrality indicators to characterize the nodal spreading capability in complex networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2018, 334: 388–400.
- [49] MA L L, MA C, ZHANG H F, et al. Identifying influential spreaders in complex networks based on gravity formula[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 451: 205–212.
- [50] BURT R S. Structural holes and good ideas[J]. *American Journal of Sociology*, 2004, 110(2): 349–399.

## The national status and risk transmission of global trade in the cobalt industry chain

GUO Yaoqi<sup>1,2</sup>, ZHENG Ru<sup>1</sup>

- (1. School of Mathematics and Statistics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Research Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** As new energy becomes a new economic growth point, cobalt, as an important raw material in the field of new energy, has become more and more prominent in the problem of supply security. This study analyzes the cobalt trade risk propagation process from the perspective of the whole industry chain, proposes the multi-attribute gravity centrality (MAGC) algorithm to discover the core trading countries of the cobalt industry chain in 2016—2022, and chooses the SIR model to further portray the risk propagation effect of the core countries and the marginal countries. It is found that the upstream, midstream and downstream of the cobalt industry chain as a whole present a trade pattern dominated by Germany, China and the United States, and there is homogeneity in the trade of the industry chain. The upstream takes the Netherlands, China and the United States as the core countries, and the MAGC value of each country is small, while the midstream and downstream take China, the United States and Germany as the core countries. When the industrial chain encounters risks, it generally takes 5 time-steps to restore to its original state prior to the risk, and downstream is the most vulnerable link in the cobalt chain, with core countries needing only 2 propagations to spread the risk to many countries.

**Key words:** cobalt; industry chain; core countries; multi-attribute gravity centrality

[编辑: 陈一奔]