

“一带一路”稀土产业链网络演化特征及脆弱性研究

赵军产, 邓涛, 万子健

湖南工商大学 数学与统计学院, 湖南 长沙 410205

DOI:10.61369/ASDS.2025100013

摘 要： 稀土在国防建设、航空航天以及新能源、新材料等新兴领域，起着不可或缺的作用，为准确把握“一带一路”稀土产业链情况，本文运用复杂网络理论以及蒙特卡洛模拟，对“一带一路”稀土产业链的上、中、下游产品展开研究。研究结果表明：“一带一路”稀土产业链发展态势日益向好；下游稀土产品在贸易额上占据主导地位，且聚类系数更大；整个稀土网络具备小世界网络特性，有较高的网络连通性和凝聚力；中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯为稀土产业链中的枢纽国家；中国在“一带一路”稀土产业链中的影响力越来越大，且有着不可替代的关键作用。

关 键 词： 稀土产业链；“一带一路”；复杂网络；结构脆弱性

On Evolution Characteristics and Vulnerability of the Rare Earth Industry Chain Network Along the Belt and Road

Zhao Junchan, Deng Tao, Wan Zijian

School of Mathematics and Statistics, Hunan University of Technology and Business, Changsha, Hunan 410205

Abstract： Rare earth plays an indispensable and important role in emerging fields such as new energy, new materials, aerospace and national defense construction. In order to accurately grasp the rare earth industry chain of the Belt and Road, this paper uses complex network theory and Monte Carlo simulation to study the upstream, midstream and downstream products of the rare earth industry chain of the Belt and Road. The research results show that the development trend of the rare earth industry chain of the Belt and Road is getting better and better; downstream rare earth products occupy a dominant position in trade volume, and the clustering coefficient is larger; the entire rare earth network has the characteristics of a small world network, with high network connectivity and cohesion; China, India, Turkey, the United Arab Emirates, and Russia are hub countries in the rare earth industry chain; China's influence in the rare earth industry chain of the Belt and Road is increasing, and it plays an irreplaceable and key role.

Keywords： rare earth industry chain; the Belt and Road; complex network; structural fragility

引言

稀土素来被称为“工业味精”，它在新能源、新材料、航空航天等尖端科技领域与国防建设中，均发挥着不可或缺的基础材料作用。近年来，随着中国、美国和欧盟等国家相继将稀土矿产列为战略关键清单，稀土作为战略性新兴产业发展的基础资源，成为各国抢占全球经济制高点、提升创新能力的竞争砝码。

关于稀土的研究，在稀土价格方面，Hurst 等^[1]和 Looney 等^[2]认为中国实施的稀土出口配额政策会导致稀土国际市场价格上涨。郑书青等^[3]与罗翔等^[4]发现当地缘政治不确定性增加时，人们对稀土的需求减少，稀土价格降低、交易量减少，稀土收益率的波动减弱，因此认为地缘政治是影响稀土国际价格的重要影响因素。杨斌清等^[5]基于时间序列模型对稀土氧化物进行预测，发现稀土价格数据具有高度的非平稳性、非线性和噪声的特性。

复杂网络方法是近年来的研究热点，随着 Serrano 等^[6]发现全球贸易网络具有复杂网络的“小世界”、“无标度”等特性，复杂网络被广泛应用在各类贸易网络中，如：农产品、石油、天然气、煤炭等贸易网络中^[7-10]。在稀土网络方面，陈健等^[11]认为中国的稀土出口依存度偏高，需要加强对稀土出口配额的控制。Rybak A 等^[12]对考虑稀土金属影响下的欧盟27国能源安全进行了研究，研究结果表

基金项目：国家社会科学基金（24BTJ033）；长沙市自然科学基金项目（kq2402103）。

作者简介：

赵军产（第一作者），男，博士，教授，研究方向为复杂理论及应用；

邓涛，男，硕士，研究方向为贸易安全测度；

万子健，男，硕士，研究方向为贸易网络。

明欧盟27国的能源可及性、可用性、可接受性、可负担性均低于平均水平。Yu G等^[13]基于全球稀土贸易网络,采用Moran指数进行空间相关性分析,结果表明全球稀土产业具有集聚效应,倾向于与周边国家进行贸易。Hu X等^[14]对稀土初级产品贸易网络进行了研究,研究结果表明经济规模、邻接性、测地线、经济距离和制度距离是国家间稀土初级产品贸易的主要驱动力。

然而,上述研究对稀土产业链上、中、下游的韧性缺乏量化分析,尤其是对产业链关键路径未能进行有效识别。鉴于此,本文以复杂网络理论为基础,构建稀土产业链上、中、下游复杂网络模型,通过网络密度、聚类系数、鲁棒性等特征指标,研究“一带一路”稀土产业链网络以及各枢纽国之间贸易的紧密程度与连通性,量化国家间的战略博弈,为我国资源安全、地缘政治和产业政策提供了多维度的分析框架。

一、数据与方法

(一) 稀土产业链网络构建

本文是基于“一带一路”倡议提出后的稀土产业相关数据,运用有向有权图的构造方法构建“一带一路”沿线国家的稀土产业链上、中、下游复杂网络。稀土三大类产品见表1,数据主要来源于联合国数据库,时间跨度为2012年–2020年。

表1: 稀土产业划分
Table 1 Classification of rare earth industry

层级	大类名称	HS 编码
上游产品	稀土矿	253090
	稀土金属矿	280530
	稀土氯 / 氧化物	284690
中游产品	稀土盐类	284610
	稀土铁合金	720299
	稀土肥料	310590
下游产品	稀土发光体	320650
	稀土磁体	850511、850519

本文用有向有权图 $G = w_{ij}$ 表示国家 i 对国家 j 的稀土产品关系,矩阵元素为 $w_{ij} = 0$ 表示不存在关系, $w_{ij} = 1$ 表示存在国家 i 对国家 j 的稀土产品 x 有需求,但国家 j 对国家 i 的产品不一定有需求,也就是说矩阵不是一个对称矩阵,即网络是有向的。由于国家之间不存在负贸易,因此矩阵中所有的值都大于等于0,为了区分国家之间的贸易密切程度,引入稀土贸易总额作为各个国家之间的连接权重,即网络是有权的。

(二) 网络指标说明

1. 点强度指标

点强度是点入度与点出度的和。点入度是指 i 国家对其他国家稀土相关产品的需求,值越大说明自身需求大,对其他国家越依赖。点出度是指 i 国家对其他国家稀土相关产品的供给,值越大说明自身存量越大,对其他国家依赖小。点强度可以表示节点国家在产业链网络中的重要性。点强度的计算公式为:

$$S_i^{in} = \sum_{j=1}^N w_{ji}, S_i^{out} = \sum_{j=1}^N w_{ij}, k_i = S_i^{in} + S_i^{out}$$

其中, k_i, S_i^{in}, S_i^{out} 分别表示节点国家 i 的点强度、点入度与点出度。 w_{ij} 与 w_{ji} 为有向有权网络的邻接矩阵 G 的元素。

2. 中心性指标

中心度指标主要包括度数中心性、中介中心性及接近中心性。

(1) 度数中心性

度数中心度分为入度中心性与出度中心性,入度中心性是指 i 国家稀土相关产品的其他需求国家占总数的比值,出度中心性是指 i 国家稀土相关产品的其他供给国家占总数的比值。度数中心度,反映的是国家之间的稀土产业链影响力,数值越大说明影响力越大。计算公式如下:

$$DC_i^{in} = \frac{\sum_{j=1}^N w_{ji}^0}{N-1}, DC_i^{out} = \frac{\sum_{j=1}^N w_{ij}^0}{N-1}$$

其中, DC_i^{in} 与 DC_i^{out} 分别表示节点国家 i 的入度中心性与出度中心性, N 表示“一带一路”沿线国家的国家总数, w_{ij}^0 与 w_{ji}^0 是邻接矩阵中有向无权重的元素值。

(2) 接近中心性

接近中心性表示当前国家与其他国家的总路径长短,接近中心性越大表示网络的越集中,在产业链网络中也表示与其他节点国家有更多产业往来,可以形容国家在网络中的稳定程度。计算公式如下:

$$CC_i = \frac{1}{(N-1) \sum_{j=1}^N d_{ij}}$$

其中, CC_i 表示节点国家 i 的接近中心性, N 表示“一带一路”沿线国家的国家总数, d_{ij} 表示从节点国家 i 到节点国家 j 的路径数量,当无法到达时,取无穷大。

(3) 中介中心性

中介中心性表示节点国家与其他国家间稀土相关产品的周转能力和控制程度,数值越高说明周转与控制能力越强。计算公式如下:

$$BC_i = \frac{\sum_{j \neq k \neq i}^N \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}}{(N-1)(N-2)}$$

其中, BC_i 表示节点国家 i 的中介中心性, N 表示“一带一路”沿线国家的国家总数, g_{jk} 表示国家 j 与国家 k 之间的所有路

径, $g_{jk}(i)$ 表示国家 j 与国家 k 之间的所有路径中经过国家 i 的路径数量。

3. 网络整体指标

网络整体指标包括网络密度、平均聚类系数与平均路径长度。

(1) 网络密度

网络密度是形容网络中各个节点的联系紧密程度, 越接近 1 说明稀土产业链网络联系越紧密; 相反越接近于 0, 说明网络中联系越少。计算公式如下:

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

式中, E 为“一带一路”稀土产业链网络中实际存在的节点连边数。

(2) 平均聚类系数

平均聚类系数代表着稀土产业链网络中的连通水平, 平均聚类系数越高, 表示网络中各个节点连通性越好。计算公式如下:

$$M = \frac{\sum_i^N \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}}{N}$$

其中, k_i 表示国家 i 的点强度, E_i 是网络图中国家 i 与周边国家的连边总数。

(3) 平均路径长度

在“一带一路”稀土产业链网络中, 平均路径长度越短, 表示各国间稀土产品交易效率越高。平均路径长度的计算公式为:

$$L = \frac{2\sum d_{ij}}{N(N-1)}$$

其中, L 为贸易网络的平均路径长度, 即“一带一路”稀土产业链网络中的节点平均距离。

4. 网络结构脆弱性度量指标

Xu X^[15] 提出结构脆弱性下界的度量指标 V , 其定义为节点按照某种最优顺序被逐个移除时, 网络性能变化情况, 计算公式如下:

$$V = 1 - \frac{S(f)}{N}, S(f) = \frac{1}{(1-f)N} \max_{1 \leq k \leq n_f} |G_f|$$

其中, $S(f)$ 表示移除 f 比例节点后的网络最大子群规模, G_f 表示移除 f 比例节点后的网络图, V 表示网络结构脆弱性度量指标, N 表示网络节点数量。

二、网络演化特征及规律

(一) 稀土网络演化过程

在图 1 中, 2012 年的核心节点为中国、土耳其、印度、俄罗斯、波兰与捷克, 次核心国家共有 21 个。2020 年主要领导国家

仍为六个, 其中中国地位仍稳固居于第一, 不参与上游产品链的“一带一路”国家更少。从上游稀土产品供需关系来看, 从 2012 年至 2020 年中国一直是“一带一路”沿线国家最大的上游稀土产品需求国与供给国, 2020 年的需求甚至高达 31.5%, 供给为 18.3%。另外俄罗斯则是主要的稀土矿等上游稀土产品的主要供给国, 2020 年供给占“一带一路”总占比的 18.8%。

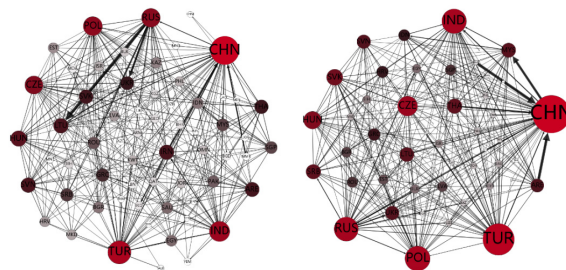


图 1: 上游稀土产品网络对比图 (左为 2012, 右为 2020)

Figure 1: Comparison of upstream rare earth product networks (left for 2012, right for 2020)

在图 2 中, 2012 年核心节点国家为中国、印度, 次核心国家为俄罗斯、波兰、斯洛文尼亚、土耳其、新加坡、泰国、阿联酋和捷克。2020 年核心节点国家增加五个, 13 年的次核心国家成为新的核心国家, 次核心节点国家也有一定幅度的增多。从中游稀土产业链供需关系来看, 中国在“一带一路”中从主要供给国家, 变为主要的需求国家, 印度则借助“一带一路”倡议与更多国家形成了中游稀土产业链供需关系。

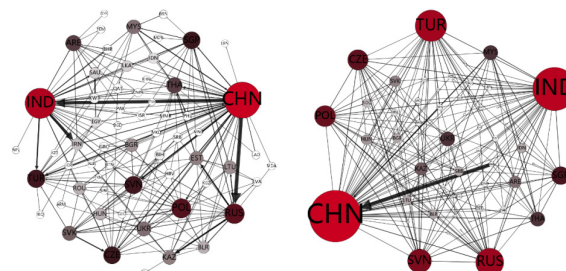


图 2: 中游稀土产品网络对比图 (左为 2012, 右为 2020)

Figure 2: Comparison of midstream rare earth product networks (left for 2012, right for 2020)

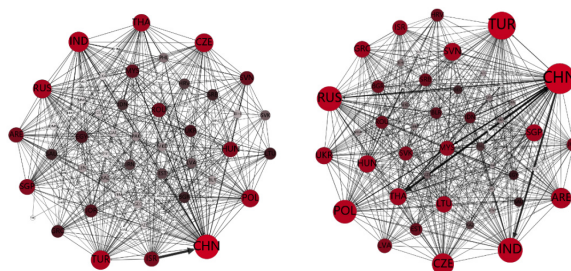


图 3: 下游稀土产品网络对比图 (左为 2012, 右为 2020)

Figure 3: Comparison of downstream rare earth product networks (left for 2012, right for 2020)

在图 3 中, 下游产品本身就是稀土产业链贸易中最重要的一部分, 从 2012 年至 2020 年, 下游稀土产业链在“一带一路”沿线国家中的供需关系也最为错综复杂, 2012 年 26 个国家为产业链网络中的核心、次核心节点国家, 2020 年 42 个“一带一路”国家成为核心、次核心节点国家, 说明“一带一路”倡议作用明显, 沿

线国家交通、贸易政策更为便捷，这都直接促进了国家之间的稀土贸易网络更加紧密，稀土贸易量也更多。

可以发现，“一带一路”稀土产品网络关系较为复杂，但整体分布规律较为明显，处于稀土产品网络重要地位的国家，其节点更大，颜色更红，连边更密集。从稀土产品网络图的节点位置来分析，中国、俄罗斯和印度始终占据核心或重要位置，这种核心地位不仅体现了它们在稀土资源储备、生产和出口方面的实力，也反映了这些国家在稀土供应链中的重要作用。从整体上看，中国在“一带一路”沿线国家的影响力逐渐增大，图中表现为节点更大更红，连边更多。另外，中国从2012年三大稀土产品的需求者变为2020年三大稀土产业链的主要供给与需求者，这是我国稀土产业链的不断完善、稀土加工出口能力的不断提高的表现。

（二）稀土贸易网络整体性分析

1. 上、中、下游产品总贸易量与贸易额

从图4中可以看出，“一带一路”沿线国家的稀土产品贸易量主要为上游和下游稀土产品，稀土贸易额主要是下游稀土产品，这是因为经过精加工后的下游稀土产品包括稀土铁合金、稀土磁体等，能够应用于许多高精技术行业的产品，普遍价值很高。而稀土上游产品为稀土矿和稀土金属矿，在贸易中的价值不高。

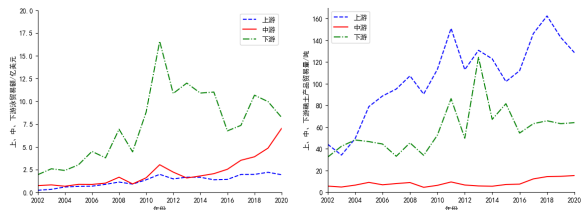


图4：“一带一路”上、中、下游稀土产品贸易（左为贸易额，右为贸易量）

Figure 4: Trade of rare earth products in the upstream, midstream, and downstream of the Belt and Road (left: trade value, right: trade volume)

另外，可以发现2011年下游稀土产品到达峰值，为21.7亿美元，此时的下游稀土贸易量并不是最高的，下游稀土贸易量于2013年到达顶峰，这也对应了2011年稀土精加工产品的全球价格暴涨，该事件一方面是因为作为稀土下游产品最大出口国的中国，对稀土下游产品出口配额的调低，导致了国际稀土市场的恐慌；另一方面是由于全球大宗商品对稀土产品价格的调整，部分稀土贸易商对稀土产品的囤货行为。这两个原因导致2011年国际稀土市场供小于求，全球稀土价格上升。但随着稀土价格的暴涨，也引起了全球的稀土开采与投资的热情，随着各国稀土开采，国际稀土产量增加，供大于求，稀土价格也由此下跌。此外2010年至2016年期间稀土产品贸易量波动大的原因也源于此事件。

2. 网络拓扑指标

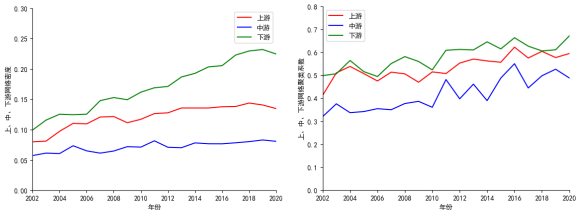
“一带一路”稀土产业网络特征如下表2，从表中可以看出2012年至2020年期间，平均入度、入度中心性呈现上升的趋势，说明“一带一路”稀土国家的平均贸易伙伴数量变多，且关系较为稳定。

表2：“一带一路”稀土产业网络特征
Table 2: Characteristics of the “the Belt and Road” rare earth industry network

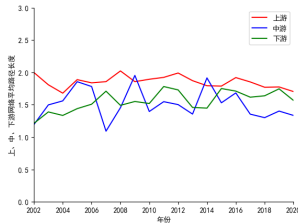
年份	平均入度	入度中心性	接近中心性	网络密度	平均路径长度	平均聚类系数
2012	13.68	0.21	0.50	0.21	1.89	0.64
2013	14.28	0.22	0.49	0.22	1.71	0.66
2014	14.65	0.23	0.51	0.23	1.74	0.66
2015	15.02	0.23	0.51	0.23	1.82	0.64
2016	15.00	0.23	0.52	0.23	1.78	0.66
2017	16.40	0.26	0.53	0.26	1.69	0.65
2018	16.94	0.26	0.54	0.26	1.72	0.65
2019	16.95	0.26	0.53	0.26	1.69	0.67
2020	16.32	0.26	0.52	0.26	1.66	0.70

另外，接近中心性、网络密度、平均聚类系数也呈现上升趋势，说明稀土网络各国家的贸易变得越来越紧密。平均路径长度呈现逐年下降的趋势，说明国家之间的稀土贸易所周转次数减少，贸易效率提高。

如图5中a所示，“一带一路”稀土上、中、下游产品的网络密度整体水平较低，差别较大，但整体上呈现上涨的趋势。65个“一带一路”沿线国家在2002—2020年间都参与了“一带一路”稀土贸易活动，2006年中国将41种稀土金属列入《加工贸易禁止类商品目录》，因此稀土中游产品网络密度在此期间有较大幅度下降。另外，受经济危机、疫情影响，网络密度在2008、2020年出现明显下降，2014年WTO“稀土案”针对中国稀土出口政策进行制裁，导致“一带一路”沿线国家稀土产业链上、中、下游产品网络密度趋于平稳或略有下降。



a. 网络密度 b. 网络平均聚类系数



c. 网络平均路径长度

图5：网络特性指标图

Figure 5: Network characteristic index diagram

从图5中b可以看出，稀土产业链产品的平均聚类系数在2002—2020年间呈现波动上升状态，下游稀土产品的平均聚类系数始终位于三大类产品的首位，说明“一带一路”稀土产业链三大产品中下游产品的贸易网络非常密切。另外，中游产品的聚类系数在2010年至2017年期间波动大，这一时期也是国际稀土政策不断更新的时期，说明“一带一路”沿线国家中的中游稀土产

品贸易不密切，整个中游产品网络易受到影响。

从图5中c可以看出，“一带一路”稀土产品的平均路径长度均在区间[1,2]内，一个国家与另外一个国家稀土产品的贸易关系平均只需要不高于两次的中转，说明稀土上、中、下游产品的网络符合小世界网络特性，具有较高的连通性和网络凝聚力。

（三）贸易枢纽国分析

中介中心性表示节点国家与其他国家间稀土相关产品的周转能力和控制程度，数值越高说明周转与控制能力越强。

如表3所示，可知2012年-2020年间中国始终位于首位，说明中国在“一带一路”稀土贸易中周转与控制能力强，属于网络中的核心枢纽位置。这9年间，印度有5次排名第二，土耳其有4次排名第二，说明印度、土耳其对稀土的控制能力仅次于中国，在网络中也属于非常重要的枢纽位置。阿联酋、俄罗斯在网络中地位较为稳定，基本处于第四、五，在稀土网络中有一定的控制能力。因此认为稀土网络中的贸易枢纽国为中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯。

表3：“一带一路”稀土网络中介中心性排名前五
Table 3 Top five intermediary centrality rankings of the “the Belt and Road” rare earth network

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国
印度	印度	土耳其	土耳其	土耳其	印度	印度	印度	土耳其
土耳其	土耳其	印度	印度	捷克	阿联酋	阿联酋	俄罗斯	印度
俄罗斯	阿联酋	阿联酋	阿联酋	印度	土耳其	土耳其	土耳其	阿联酋
阿联酋	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	阿联酋	俄罗斯	新加坡	新加坡	俄罗斯

（四）结构脆弱性分析

在对静态网络结构进行研究时，网络的结构脆弱性主要体现在网络遭受外部冲击之后所具备的网络稳定性，这些外部冲击通常为：网络关键节点的移除、网络传播路径的改变、网络新入节点的增加，在稀土产业链网络中的具体体现为：国家间贸易制裁、重大突发疾病与自然灾害情况、本国稀土政策变化、稀土采集与加工技术突破、新型稀土贸易组织涌现。

表4：去除五大枢纽国后的网络结构脆弱性表
Table 4: Network structural vulnerability table after removing the five hub countries

年份	稀土行业	上游产品	中游产品	下游产品
2012	0.17	0.48	0.59	0.32
2013	0.28	0.37	0.73	0.37
2014	0.28	0.41	0.63	0.41
2015	0.17	0.43	0.57	0.31
2016	0.18	0.32	0.75	0.32
2017	0.23	0.34	0.66	0.32
2018	0.20	0.33	0.61	0.30
2019	0.20	0.44	0.60	0.24
2020	0.22	0.39	0.63	0.33
平均	0.21	0.39	0.64	0.32

为了研究上述情况发生时稀土网络的变化，本文采用了蒙特

卡洛方法来模拟在不同贸易枢纽国家缺失时的稀土网络，并计算网络的脆弱性指标，该指标可以评估各个枢纽国的缺失对稀土网络结构和功能的影响。去除中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯五大贸易枢纽国之后的稀土网络脆弱性如表4所示，从中可以发现，去除五大稀土贸易枢纽国家后，整个稀土行业的平均结构脆弱性为0.21，较为稳定；在稀土上、中、下游产品中，中游产品结构脆弱性指标最高，为0.64，说明五大枢纽国在稀土中游贸易中起着重要作用。

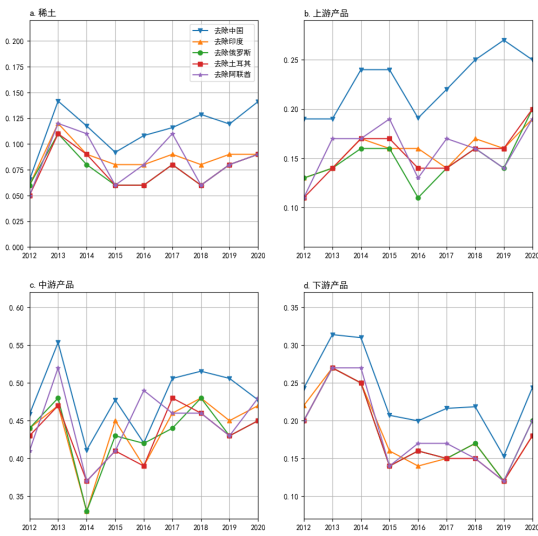


图6：去除单个枢纽国家后的结构脆弱性变化图

Figure 6: Change in structural vulnerability after removing a single hub country

为进一步研究单个国家在网络中的重要性程度，模拟了去除单个国家后稀土网络的结构脆弱性变化情况，研究结果如图6。图中可以看出，去除中国之后的“一带一路”稀土行业及三大产品网络结构脆弱性指标高于其余四个国家，分别平均多0.03、0.07、0.04、0.05。其中，五大枢纽国对稀土中游产品影响最大，去除中国后的中游产品网络的结构脆弱性最大，为0.5535，说明中国与其他国家在中游产品中有着难以替代的贸易地位。另外，在“一带一路”稀土网络中，去除单个枢纽国家后的结构脆弱性指标在[0.05,0.15]之间波动，对整个网络的结构脆弱性影响不大；在上游与下游产品网络中，去除中国后的稀土网络结构脆弱性显著高于其余枢纽国家，其中上游产品平均高出0.07，下游产品平均高出0.05。

三、结论与展望

本文针对“一带一路”沿线主要国家，按照稀土产业链上、中、下游产品构建了稀土产业链网络，并对比“一带一路”倡议提出前后的稀土产业链网络结构差异以及网络的脆弱性，结果表明：“一带一路”稀土产业链发展态势日益向好。“一带一路”稀土产业链中，国家之间的贸易更加紧密，平均贸易伙伴数量变多且较为稳定，稀土贸易的周转次数减少、贸易效率提高。在“一带一路”稀土上、中、下游产品贸易中，下游稀土产品在贸易额上占据主导地位，且聚类系数更大。三大类稀土产品的网络密度

层次间差异明显,但均呈现出逐步上升的趋势。此外,三大类稀土产品网络的平均路径长度均维持在1至2的区间内,网络符合小世界网络特性,具有较高的网络连通性和凝聚力。中国、印度、土耳其、阿联酋、俄罗斯为“一带一路”稀土产业链中的枢纽国家,与其余各国稀土贸易联系多,对稀土产品控制能力强。中国在“一带一路”稀土产业链中的影响力越来越大,在稀土中游产品具备其他国家不可替代的关键作用。

本文研究样本只考虑了稀土产业链,未来的研究还可以适当跨越产业类别,比如研究“一带一路”稀土产业与新能源产业链之间的网络关系,或者将新兴战略行业的基础产业链供应作为研究方向。受限于数据可得性,本文未讨论疫情过后的稀土产业链情况。未来的研究可以进一步探讨疫情前后的“一带一路”稀土产业链网络特征以及核心路径情况。

参考文献

- [1]Hurst C. China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?[R]. Washington: Institute for the Analysis of Global Security, 2010.
- [2]Looney R. Recent developments on the rare earth Front: Evidence of a new technocratic mercantilism emerging in China[J]. World Economics, 2011, 12(1): 78.
- [3] 郑书青, 刘雨斐. 基于 GRACH-MIDAS 模型的地缘政治不确定性对国际稀土价格波动影响的理论与政策研究 [J]. 中国商论, 2022(20): 40-42.
- [4] 罗翔, 李政, 赖丹. 中国稀土矿产品价格波动的经济后果及影响因素研究 [J]. 价格月刊, 2023(08): 8-17.
- [5] 杨斌清, 张希琳. 基于 ARIMA 时间序列模型的稀土氧化物价格预测研究 [J]. 中国稀土学报, 2017, 35(05): 680-686.
- [6]Serrano M A, Boguna M. Topology of the World Trade Web[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2003, 68(2): 015101.
- [7] 马述忠, 任婉婉, 吴国杰. 一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响——基于社会网络分析视角 [J]. 管理世界, 2016(03): 60-72.
- [8]Zhang, Chi, Jiasha Fu, and Zhengning Pu. A study of the petroleum trade network of countries along "The Belt and Road Initiative" [J]. Journal of Cleaner Production 222 (2019): 593-605.
- [9]Guo, Yaoqi, Boya Zhao, and Hongwei Zhang. The impact of the Belt and Road Initiative on the natural gas trade: A network structure dependence perspective[J]. Energy 263 (2023): 125912.
- [10] 蒋培祥, 董志良, 张翠芝, 等. 常规能源国际贸易网络演化特征研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2021, 18(04): 66-73.
- [11] 陈健, 吴楠. 世界稀土资源现状分析与我国稀土资源可持续发展对策 [J]. 农业现代化研究, 2012, 33(01): 74-77.
- [12]Rybak A, Kolev S D. A synthetic measure of energy security taking into account the influence of rare earth metals. The case of Poland[J]. Energy Reports, 2023, 10: 1474-1484.
- [13]Yu G. Evolutionary analysis of the global rare earth trade networks[J]. Applied Mathematics and Computation, 2022, 430: 127249.
- [14]Hu X, Sun B, Wang C. Impacts of China's exports decline in rare earth primary materials from a trade network-based perspective[J]. Resources Policy, 2023, 81: 103321.
- [15]Xu X, Zhu Y, Xu M, et al. Vulnerability analysis of the global liner shipping network: from static structure to cascading failure dynamics [J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 229: 106325.