

庄德林, 李嘉豪, 陈紫若, 等. 全球稀土贸易网络的动态演变与影响机制——基于产业链的视角 [J]. 地理科学, 2022, 42(11): 1900-1911. [Zhuang Delin, Li Jiahao, Chen Ziruo et al. The dynamic change of global rare earth trade network and its impact mechanism: From the perspective of industrial chain. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(11): 1900-1911.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.11.005

全球稀土贸易网络的动态演变与影响机制 ——基于产业链的视角

庄德林, 李嘉豪, 陈紫若, 刘雨晨

(合肥工业大学经济学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 基于稀土产业链视角, 通过依赖关系构建稀土初级加工品、中级加工品和制成品贸易网络, 运用社会网络分析法和动态指数随机图模型对稀土贸易网络结构演变特征及其影响机制进行对比分析。结果表明: ① 3 个环节稀土贸易网络均呈现向复杂网络演变的趋势, 且稀土中级加工品贸易网络的变化趋势依次领先于稀土制成品和初级加工品贸易网络; ② 从主干结构看, 3 个环节稀土贸易网络依次由欧洲主导向欧美并立演变、由中国主导向欧亚并立演变、由欧美亚三足鼎立向亚洲主导演变; ③ 中国在 3 个环节稀土贸易网络中均发展成为直接影响力前三甲国家(地区), 但其领先优势逐渐缩小, 而间接影响力仅在初级加工品和制成品网络进入前三甲行列, 且增幅较小; ④ 互惠、三角形、星形辐射和星形扩张结构效应对 3 个环节稀土贸易网络动态演变具有显著的异质性影响。

关键词: 产业链; 稀土贸易网络; 依赖关系; 网络结构效应; 动态指数随机图模型

中图分类号: F742 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)11-1900-12

中美贸易摩擦和新冠肺炎疫情的双重冲击加速了全球供应链的重塑, 政府与学界专家普遍认为构建附加值高和安全可靠性的产业链体系已经成为中国建设贸易强国的必由之路^[1,2]。稀土对发展芯片和机器人等战略性新兴产业具有关键作用, 它已成为世界各国重塑本国制造业和抢占全球产业制高点而竞相争夺的战略性资源^[3]。稀土贸易研究也因此成为贸易领域的研究热点, 学者们对稀土金属等稀土中级加工品贸易的结构以及定价权等进行了大量研究^[4,5]。然而, 根据 UN Comtrade 数据库(<https://comtrade.un.org/>)显示, 2002—2018 年稀土中级加工品年均贸易额仅占全产业链年均贸易额的 27%, 以稀土矿石为代表的稀土产业链上游贸易和以稀土磁性材料为代表的稀土产业链下游贸易的结构演变情况没有得到足够的重视。在全球产业链体系加速重塑的背景下, 稀土的“战略价值”已经远远超出了“经济收益”的范畴^[6], 迫切需要从全球产业链的角

度来优化中国的稀土贸易政策。经过 20 多年的发展, 中国稀土产品的出口规模连续多年位居世界第一并且提供了世界稀土中级加工品市场 90% 的供给量^[5], 但是与美国和日本等稀土贸易强国相比, 存在着上游原材料进口依赖程度大幅提高以及下游稀土制成品出口被锁定在中低端等突出问题, 失衡的稀土贸易结构严重阻碍了中国稀土产业价值链的地位与安全性的提升^[5]。因此, 准确把握稀土产业链各环节全球贸易格局的演变规律及其影响机制, 将为中国构建附加值高、安全性强的稀土产业链提供科学参考。

目前, 对稀土贸易网络的研究主要聚焦于稀土金属等中级加工品贸易, 并且稀土贸易网络的构建主要以国家间的稀土贸易额或投入产出关系等流量关系为联系媒介^[7,8]。这一类研究侧重反映稀土的“贸易价值”, 容易忽视贸易依赖性带来的“卡脖子”性贸易风险^[9], 难以准确刻画各国在稀土产业链

收稿日期: 2022-01-04; **修订日期:** 2022-06-10

基金项目: 国家社会科学基金项目(15BGL210)、安徽省社会科学创新发展研究课题重大项目(2019ZD007)资助。[Foundation: National Social Science Foundation of China (15BGL210), Major Program of the Social Science Innovation and Development Research of Anhui Province (2019ZD007).]

作者简介: 庄德林(1976-), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 硕导, 主要研究方向为区域创新发展。E-mail: qddlzhuang@126.com

通讯作者: 陈紫若。E-mail: czzr1225646899@163.com

各环节贸易网络中的战略地位^[6]。贸易依赖关系则反映了贸易参与国之间的“战略关系”,它既可能促使各国间相互合作,也可能由于过度依赖而威胁到参与国的产业安全,近年来天然气、原油等战略资源贸易的研究开始将它作为构建贸易网络的新型联系媒介^[10,11]。现有关于稀土贸易网络的研究未能揭示不同稀土产业链环节贸易网络结构特征及其演变趋势的差异性。近年来,已有学者基于产业链视角,通过贸易流等关系型数据分析了钨、铜等矿产资源产业链视角下的贸易复杂结构^[12,13],取得了富有价值的成果。遗憾的是这些研究更关注不同部门间的物质流动联系或经济体间的贸易金额联系,对不同环节贸易网络结构差异性的研究相对不足^[14-16],另外也缺乏对网络结构演变影响机制的实证检验^[17,18]。鉴于上述问题,本文拟从3个方面拓展:第一,由产业链单环节研究向由稀土初级加工品、中级加工品和制成品组成的产业链全环节分析拓展,以明晰不同稀土产业链环节贸易网络演变特征和影响机制。第二,由基于流量关系构建贸易网络转向基于贸易依赖关系构建网络,以准确反映稀土贸易网络中国家间战略关系结构^[10]。第三,将内生网络结构效应引入到贸易网络演变影响机制中,并通过动态指数随机图模型进行实证检验^[19,20],弥补传统影响因素研究仅关注地理和文化距离等外生网络因素的局限^[21]。

1 研究数据与方法创新

1.1 数据来源

本文参考2019年包头稀土产品交易所与新华社发布的《中国稀土产业景气指数报告》(<https://repe.com.cn/static/upload/file>),按照稀土加工流程及其附加值将稀土产业链划分为以稀土矿石为代表的初级加工品、以稀土金属及其化合物为代表的中级加工品和以稀土磁性材料为代表的制成品。参考何欢浪等学者^[22]的做法,按照HS2002六位编码选取稀土矿石(HS253090)、稀土金属及其化合物(HS284610、HS284690和HS280530)和稀土永磁体(HS850511)作为研究对象,数据源于UN Comtrade数据库(<https://comtrade.un.org/>)中2002—2018年全球稀土进口贸易数据。控制变量数据来源于世界银行数据库(<https://data.worldbank.org/cn/>)、CEPII数据库(<http://www.cepii.fr/>)和UNCTAD数据库

(<http://unctadstat.unctad.org/>)。文中中国数据未包含港澳台数据。

1.2 基于依赖关系的贸易网络构建

本文基于国家间的稀土贸易依赖关系构建贸易网络,并借鉴Kharrazi和Fath^[10]的做法,利用稀土贸易网络中*i*国指向*j*国的点交互信息指数(PMI_{ij})反映*i*国对*j*国的依赖关系强度。该指数源自信息交互理论,能够准确刻画在整体结构或第三方节点影响下,两个主体间的贸易依赖度^[10]。具体而言,在*t*年稀土产业链特定环节*k*的贸易网络中,每个国家代表一个节点,任意国家间如果存在依赖关系,则节点间存在联系,节点和联系组成的集合构成了稀土贸易网络。*t*年*k*环节的稀土贸易网络由 $N_{tk} \times N_{tk}$ 的邻接矩阵 G_{tk} 表示,对应初级加工品、中级加工品和制成品,其中 $t=2002, 2003 \cdots 2018$; N_{tk} 表示*t*年*k*环节参与稀土贸易的国家数量。矩阵 G_{tk} 中的元素 g_{ij} 表示在*t*年*k*环节的稀土贸易网络中*i*国是否依赖于*j*国,若依赖则 g_{ij} 等于 PMI_{ij} ,反之等于0。 PMI_{ij} 表示*i*国对*j*国的依赖关系强度,数值越大则说明*i*国对*j*国的依赖程度越强(仅保留依赖关系强度大于0的联系)。 y_{ij} 表示*i*国从*j*国进口的数额(美元); y_i 和 x_j 分别表示*i*国进口和*j*国出口的总数(美元); y_w 和 x_w 分别表示全球所有国家进口和出口的总数(美元)。则有:

$$\begin{cases} g_{ij} = \max(PMI_{ij}, 0) \\ PMI_{ij} = \frac{y_{ij}}{y_w} - \frac{y_i}{y_w} \cdot \frac{x_j}{x_w} \end{cases}$$

1.3 网络分析指标选取

社会网络分析是一种专门针对关系型数据的研究范式^[23],近年来学者们运用社会网络分析法对基于特定产品贸易额构建的全球贸易网络结构演变进行了研究,它已经成为国际贸易研究领域的重要方法。本文将采用社会网络分析中的网络密度、网络等级度、网络中心势、优势流分析法、PageRank中心度和中介中心度分析产业链视角下3个环节全球稀土贸易网络的整体拓扑结构、主干结构和中国的网络中心地位演变,上述指标和方法均通过Python手动编程实现。需要指出的是,文献一般采用优势流方法来分析贸易网络的主干结构(Top1贸易网络)^[17],然而3个环节稀土贸易网络的子群内部节点数量众多、结构复杂,现有做法难以充分刻画贸易网络的主干结构。因此,本文采用改进的

优势流方法刻画子群的内部结构状态,该方法的主要思想是对稀土贸易网络的主干结构进行迭代赋权,每次迭代时剔除仅发出依赖关系的节点及联系,并根据这些节点所处的迭代层数进行赋权,层数越高意味着节点在该子群中的核心地位越高。在求得每个节点在各自子群的核心地位后,本文基于精简数据和保留最大网络信息的原则,按照节点核心地位从高到低提取子群的核心链条。

2 全球稀土贸易网络的动态演变分析

2.1 稀土贸易网络拓扑特征演变分析

使用 Python 计算各社会网络分析指标,对产业链 3 个环节全球稀土贸易网络整体结构演变分析后发现主要呈现出 4 个方面的特征。

1) 产业链视角下稀土贸易的网络化程度始终处于较低水平,但呈现明显上升趋势。首先,3 个环节稀土贸易网络的密度均低于 0.055。比较而言,制成品贸易网络的密度始终最高,除 2003 和 2015 年以外稀土中级加工品贸易网络的密度则一直处于最低水平(图 1)。其次,2002—2018 年 3 个环节稀土贸易的网络化程度均呈现明显上升趋势,与 2002 年相比,中级加工品贸易网络的密度提升幅度最大,提高了 40%,而制成品贸易网络虽然提升幅度最小但是也提高了 21%。值得注意的是,全球金融危机以及中国对稀土贸易的管控趋严引发了全球稀土产品供给量的下降,导致 3 个环节稀土贸易的网络化程度在 2009—2011 年均跌至历史低位。

2) 产业链视角下稀土贸易网络的等级化程度

处于较高水平,但总体呈现波动下降趋势。首先,2002—2018 年中级加工品贸易网络的等级度始终高于 0.549,且一直远远高于制成品和初级品贸易网络,另外两个环节的等级度也一直介于 0.311~0.677 的高位区间。其次,中级加工品和制成品稀土贸易网络的等级化程度呈现波动下降趋势,其网络等级度分别下降了 17.6% 和 4.4%;初级加工品贸易网络的等级度在经历多轮波动后又恢复到初始水平。此外,3 个环节稀土贸易网络的等级化程度均在 2013—2018 年达到最低水平,这主要是因为各国政府为减小单向过度依赖所带来的战略风险制订了多元化的稀土贸易政策以提升与其他国家间贸易联系的对称可达性。

3) 产业链视角下稀土初级加工品贸易网络的中心集聚程度始终处于最低水平,但是 3 个环节均呈现波动上升的趋势。首先,2002—2018 年稀土初级加工品贸易网络入中心势的最高值为 0.242,且其入中心势始终低于其他两个环节(图 2),表明初级加工品贸易网络中贸易依赖关系的中心集聚程度始终处于最低水平。已有研究表明碳和液化天然气全球贸易网络^[24,25]具有显著的中心集聚化趋势,其入中心势一般高于 0.4,显然,稀土初级加工品贸易网络的中心集聚程度显著低于前者,而稀土制成品和中级加工品贸易的中心集聚最大值高于碳、液化天然气等贸易网络。其次,3 个环节稀土贸易网络的中心集聚程度均呈现出波动上升趋势,其中稀土中级加工品贸易网络的入中心势的总体增幅最大,而制成品贸易网络最小。具体而言,与 2002 年相比,2018 年的中级加工品贸易、初级加工品贸易和制成品贸易的入中心势分别提高了 19.3%, 14.6%

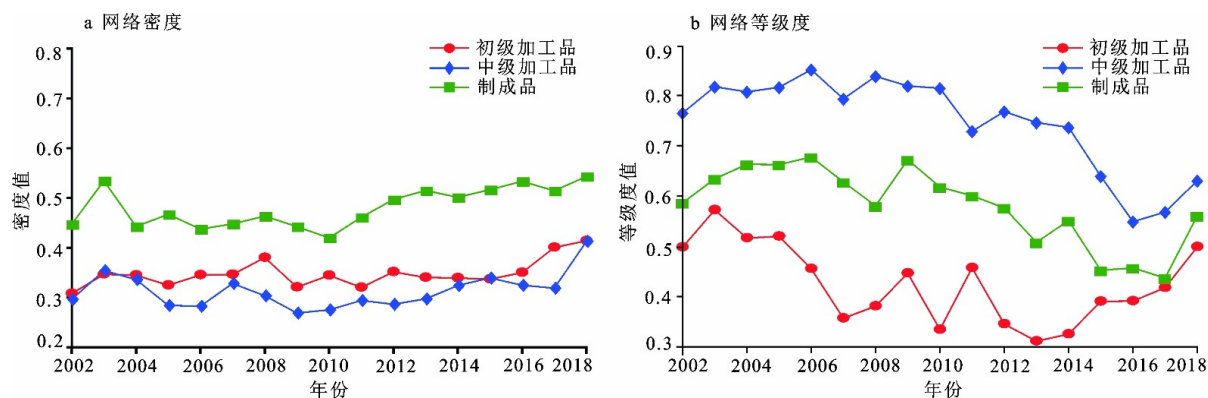


图 1 2002—2018 年 3 个环节稀土贸易网络密度和等级度演变情况

Fig.1 Density and hierarchy evolution of the three types of rare earth trade networks from 2002 to 2018

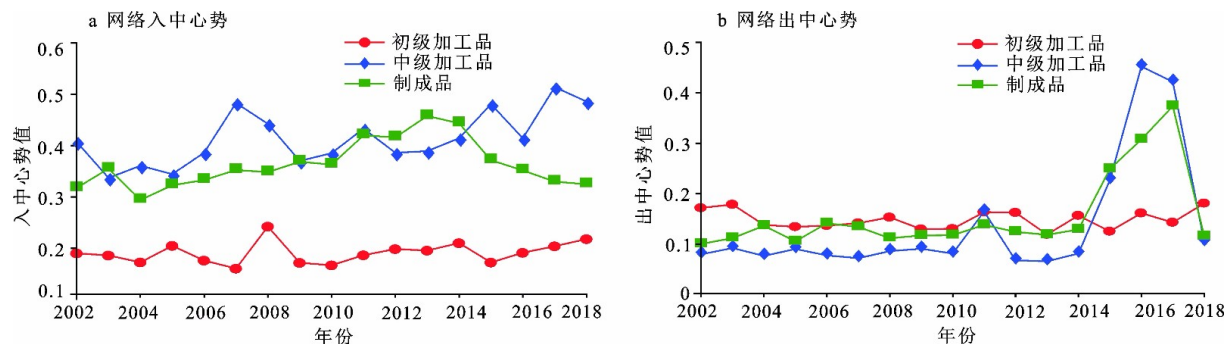


图2 2002—2018年3个环节稀土贸易网络入(出)中心势演变情况

Fig.2 Evolution of three types of rare earth trade networks in(out)-potential from 2002 to 2018

和2.3%。

4) 产业链视角下稀土贸易网络的中心辐射程度均处于较低水平,但是后面两个环节于2014年后呈现出剧烈波动趋势。首先,2002—2018年3个环节稀土贸易网络的出中心势除了2015—2017年外均低于0.181(图2),而碳、液化天然气等中心辐射力强的资源型全球贸易网络的出中心势水平则普遍高于0.35,因此,稀土贸易网络的出中心势处于较低的水平,说明稀土贸易网络中发出贸易依赖关系的节点国家非常分散。相比较而言,除了2006年和2011年,2014年以前的初级加工品贸易网络的中心辐射程度则始终高于另外两个环节,2014年以后的中级加工品贸易和制成品贸易的中心辐射程度发生了剧烈波动,并且前者波动更大。与2014年相比,2018年中级加工品贸易和制成品贸易网络的出中心势分别扩大了5.57倍和2.9倍(图2)。这主要与稀土中级加工品贸易中关键节点国家为降低对中国的过度依赖在短期内采取了大幅增加进口来源的多元化供给保障策略有关,这不仅导致稀土中级加工品贸易网络的中心辐射程度发生剧烈波动,还对下游稀土制成品贸易网络造成了连带影响。

2.2 稀土贸易网络主干结构演变分析

使用改进的优势流方法,对产业链3个环节全球稀土贸易网络主干结构演变分析后发现主要呈现出3个方面的特征。学界一般采用优势流方法分析贸易网络的主干结构(Top1贸易网络),然而3个环节稀土贸易网络的子群内部节点数量众多、结构复杂,为了更好的刻画稀土贸易网络主干结构的演变规律,本文借鉴计启迪等的做法^[7],采用改进的优势流方法刻画子群的内部结构状态,对产业链3个环节全球稀土贸易网络主干结构演变分析

后发现主要呈现出3个方面的特征。该方法的主要思想是对稀土贸易网络的主干结构进行迭代,每次迭代时剔除仅发出依赖关系的节点及联系,同时对这些将被剔除的节点按照当前的迭代层数赋权,层数越高意味着节点在该子群中的核心地位越高。在求得每个节点在各自子群的核心地位后,本文基于精简数据和保留最大网络信息的原则,按照节点核心地位从高到低提取子群的核心链条。

1) 稀土初级加工品贸易网络的主干结构由欧洲主导向欧美并立演变。首先,欧洲国家始终处于稀土初级加工品Top1贸易网络中的核心位置,并且形成了以欧洲国家为核心的欧洲子群。从表1可以看出,2002—2018年欧洲子群的节点数量占比均高于47%,其始终是Top1贸易网络中规模最大的子群。其次,欧洲子群的主导地位呈下降趋势。2002—2018年稀土初级加工品贸易网络的节点数量由141个下降为127个,子群数量反而由3个增加为6个,其中欧洲子群的节点数量占比更是由89%下降为47%。欧洲子群的核心链条由“挪威←德国←西班牙←法国←摩洛哥←美国←澳大利亚←中国”缩短为“西班牙←德国←意大利←西班牙”,核心链条的缩短不仅意味着处于链条顶端的西班牙、德国和意大利等欧洲国家的影响力下降,更意味着欧洲子群影响力的减弱。同时,以美国为核心的亚太国家在稀土初级加工品Top1贸易网络中愈发重要。2002年亚太国家属于欧洲子群的一部分,且亚太国家中核心地位较高的美国、澳大利亚和中国等均处于欧洲子群核心链条的中下端。而在2018年,以美国为核心的亚太国家形成了独立的亚太子群,涵盖48个节点,其核心链条为“美国←澳大利亚←中国←阿联酋←印度”(表1),亚太子群发展成稀土

表 1 2002 年和 2018 年 3 个环节稀土贸易主干网络核心链条

Table 1 Core chain of three types of rare earth trade top1 networks in 2002 and 2018

稀土产业链	年份	主要子群(节点占比)	核心链条构成
初级加工品	2002	欧洲子群(89%)	挪威←德国←西班牙←法国←摩洛哥 ←美国←澳大利亚←中国
	2018	欧洲子群(47%) 亚太子群(38%)	西班牙←德国←意大利←西班牙 美国←澳大利亚←中国←阿联酋←印度
中级加工品	2002	亚欧美子群(93%)	中国←奥地利←德国, 中国←法国←英国 中国←→日本←美国
	2018	亚欧美子群(74%) 日本子群(15%) 英国子群(7%)	德国←澳大利亚←马来西亚←中国←美国 越南←→日本←印度←西班牙 英国←→意大利
制成品	2002	亚洲子群(26%) 美洲子群(21%) 欧洲子群(44%)	日本←中国 墨西哥←→美国 英国←德国
	2018	亚欧美共同体(100%)	日本←中国←美国, 日本←中国←德国 日本←中国←荷兰, 日本←泰国←法国

注: “A←B”表示 B 国依赖于 A 国; “←→”表示节点之间存在直接依赖关系; 中国数据未包含中国港澳台数据。

初级加工品 Top1 贸易网络的第二大子群, 形成与欧洲子群“分庭抗礼”的态势。

2) 稀土中级加工品贸易网络的主干结构由中国主导向欧亚并立演变。首先, 中国始终处于稀土中级加工品 Top1 贸易网络的核心位置。2002—2018 年稀土中级加工品 Top1 贸易网络中依赖于中国的节点数量占比均高于 52%。其次, 中国的主导地位呈下降趋势。2002 年稀土中级加工品 Top1 贸易网络共涉及 118 个节点, 包含 3 个子群, 其中以中国为核心的子群包括 110 个节点, 这意味着有多达 93% 的节点首要依赖于中国; 同时, 此 Top1 贸易网络的核心链条由“中国←奥地利←德国”“中国←法国←英国”和“中国←→日本←美国”3 条支链汇聚而成, 而中国均处于核心位置(表 1)。2018 年稀土中级加工品 Top1 贸易网络则涉及 107 个节点, 并分化为 5 个子群。而中国所处子群的节点数量下降为 79 个, 依赖于中国的节点数下降为 52%; 该子群的核心链条演变为“德国←澳大利亚←马来西亚←中国←美国”, 中国仅处于核心链条的中游位置(表 1)。最后, 日本以及英国、德国等欧洲国家的核心地位呈上升趋势。2002 年上述国家均处于以中国为主导的 3 条核心子链中, 但 2018 年日本和英国分别形成了独立的子群, 德国更是取代中国成为了所处子群的核心节点。在稀土中级加工品贸易中, 中国采取了严格的贸易政策和环境政策以控制稀土中级加工品的过度无序出口^[22], 核心链条上的其它国家则制定了多元化供给保障政

策以避免对中国的过度依赖, 这导致了稀土中级加工品贸易网络主干结构呈现出显著的分化趋势。

3) 稀土制成品贸易网络的主干结构由欧美亚三足鼎立向亚洲主导演变。首先, 以日本和中国为核心的亚洲国家始终在稀土制成品 Top1 贸易网络中占据重要地位。2002—2018 年亚洲国家占主导的子群中节点数量占比始终高于 26%(表 1)。其次, 在稀土制成品贸易网络的主干结构中, 亚洲子群中节点国家的核心地位呈上升趋势。2002 年稀土制成品 Top1 贸易网络涉及 133 个节点, 共有 6 个子群, 其中以德国和英国为核心的欧洲子群包括 59 个节点, 以日本和中国为核心的亚洲子群包括 34 个节点, 以美国为核心的美洲子群包括 28 个节点, 3 个子群覆盖了 91% 的节点。2018 年稀土制成品贸易网络由 131 个节点共同构成了以日本等亚洲国家为核心的亚欧美共同体, 而 2002 年稀土制成品 Top1 贸易网络中欧洲和美洲子群中的节点国家均被纳入其中。2018 年稀土制成品 Top1 贸易网络的核心链条可分为 4 条支链, 分别为“日本←中国←美国”“日本←中国←德国”“日本←中国←荷兰”和“日本←泰国←法国”, 日本成为其中的绝对核心(表 1)。

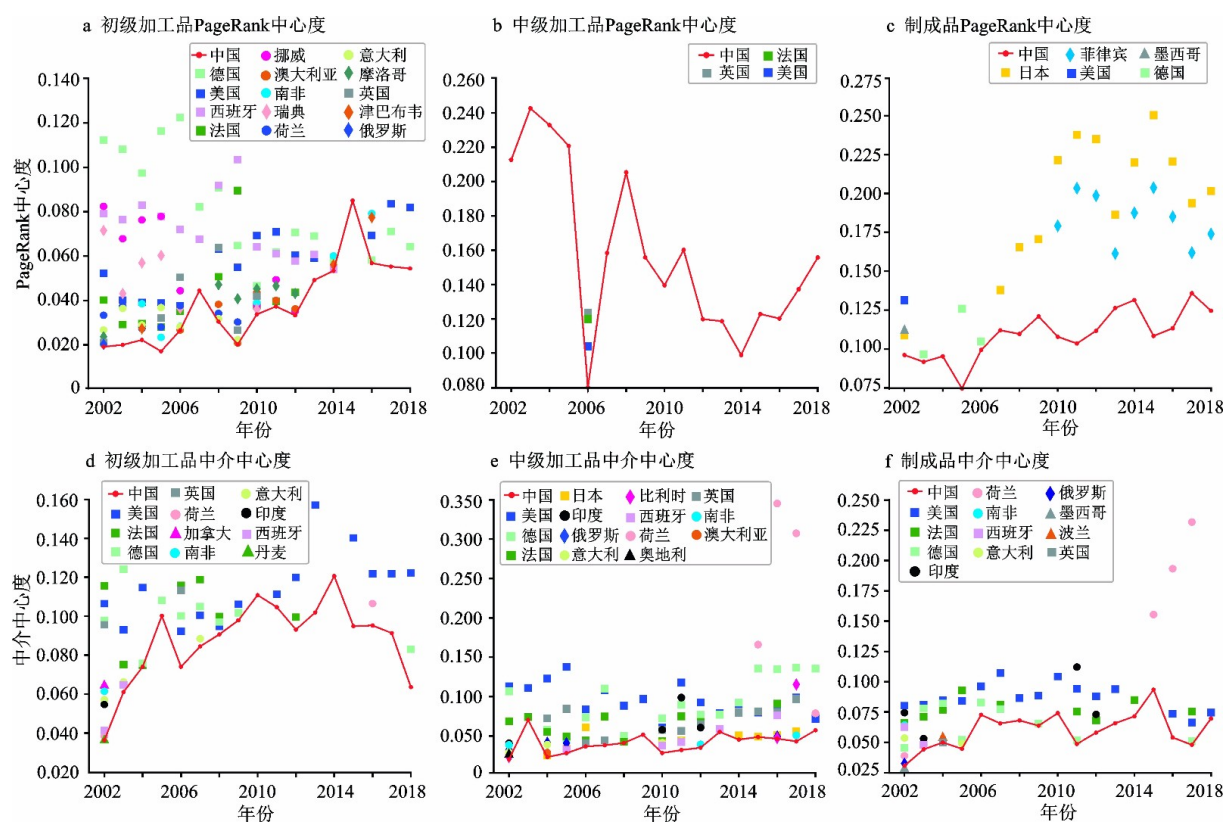
2.3 中国在稀土贸易网络中的角色地位演变分析

为进一步研判中国在 3 个环节稀土贸易网络中的角色地位演变情况, 本文运用 PageRank 中心度和中介中心度指标分别衡量节点国家在稀土贸易网络中的直接和间接影响力。

1) 中国在 3 个环节稀土贸易网络中均发展成为直接影响力前三甲国家,但在稀土中级加工品贸易网络中的领先优势逐渐减弱,在制成品贸易网络中与领先国家的差距未能有效缩小。首先,从 PageRank 中心度排名看,中国在 3 个环节稀土贸易网络中由“位序不一”演变为“稳居前三”(图 3)。2002 年中国在稀土初级加工品、中级加工品和制成品贸易网络中分别位列第 13、1 和 4 名。2002—2018 年,中国作为全球稀土储量最大和少数拥有稀土全产业链的国家,其直接影响力在初级加工品贸易网络中实现了质的飞跃,PageRank 中心度的排名跃升至 2015 年第 1 名,且之后一直稳居前 5;中国除了 2006 年在中级加工品贸易网络中的排名始终位居首位;而在制成品网络中的排名除 2002 年外始终稳居前 3。其次,中国在稀土制成品贸易网络中未能缩小与排名前二的日本和菲律宾之间的差距,这主要是因为日本始终拥有该领域 50% 以上的专利技术,而菲律宾是日本在该领域主要的生产加工伙伴国。虽然直接依赖于中国的节点数远超依赖于

日本或菲律宾的节点数,但中国未能提升对日本和菲律宾等关键节点的直接影响力,也未能摆脱对日本和菲律宾的贸易依赖,2002—2018 年日本或菲律宾(2011 年)始终是中国的首要进口依赖国。最后,中国在稀土中级加工品贸易网络中的领先优势呈现减弱趋势。2002—2018 年中国的 PageRank 中心度由 2002 年的 0.213 下降至 2018 年的 0.156,意味着中国对其它关键节点的直接影响力呈下降趋势。

2) 中国的间接影响力虽然有待加强,但仍呈现上升趋势。首先,中国仅在稀土初级加工品贸易网络中的个别年份成为间接影响力首位度国家,但是在其他两个环节从未成为首位度国家。中国在 2010 年和 2014 年成为稀土初级加工品贸易网络中间接影响力首位国家,在中级加工品和制成品贸易网络中,中国的中介中心度排名进入前三甲的次数分别为 2 次和 9 次。其次,2002—2018 年中国的间接影响力在 3 个环节稀土贸易网络中均呈现出上升趋势,并且上升幅度快于间接影响力领先国家。具体而言,与 2002 年相比,2018 年中国的中介中



中国数据未包含中国港澳台数据

图 3 2002—2018 年中国 PageRank 中心度和中介中心度演变

Fig.3 Evolution of pagerank and betweenness centrality of China from 2002 to 2018

心度在稀土中级加工品、制成品和初级加工品贸易网络中分别扩大了 2.837 倍、2.276 倍和 1.754 倍。美国和德国作为 3 个环节稀土贸易网络中间接影响力领先国家, 2002—2018 年美国(德国)在稀土初级加工品、中级加工品和制成品贸易网络中的中介中心度指标分别超过中国 14(9)次、17(15)次和 15(9)次。但是, 与 2002 年相比, 2018 年美国(德国)的中介中心度仅在稀土初级加工品贸易网络中增长了 14.87%, 德国仅在中级加工品贸易网络中增长了 26.87%, 美国和德国在间接影响力上的领先优势呈缩小趋势。

3 全球稀土贸易网络演变的内生网络结构影响机制

3.1 基于内生网络结构效应的动态指数随机图模型建构

世界各国是贸易网络构建的主要行动者, 它们在进行稀土贸易过程中形成了非对称的依赖关系, 并以此为联系介质形成了稀土贸易网络。稀土贸易网络的形成及演变主要受外生机制和内生机制的双重影响, 以地理和文化等多维邻近性为代表的外生机制和内生机制中的行动者-关系效应对贸易网络演化的影响在很多研究中得到了验证^[26,27]。内生网络结构效应作为最重要的内生机制尚缺乏实证检验, 它反映了在贸易联系存在相互依赖性的情境下, 特定网络结构对贸易网络演变的影响^[19]。具体而言, 网络节点国家出于提升自身在贸易网络中战略地位的目的而主动谋求与其它节点建立双向互惠的贸易联系, 同时也会积极强化其它节点对自身的直接或间接依赖; 另外, 网络节点国家出于产业链安全性的考虑, 亦会选择疏远与其它节点国家的贸易联系, 或是通过建立更多依赖联系以避免对少数国家的过度依赖。本文将运用动态指数随机图模型(TERGM)实证检验互惠、星形和三角形三类内生网络结构效应对稀土贸易网络动态演变的影响。

1) 互惠结构效应。对于仅存在单向贸易联系的“节点对”而言, 依赖方与被依赖方地位的非平等性是影响它们进一步深化彼此联系的影响因素, 而互惠结构效应则可以帮助依赖方从被依赖方处获取其所需的资源, 有效弱化节点对之间的等级关系, 进而能够促进更多的互惠性贸易联系的构建^[21]。本文以互惠结构变量(*Mutual*)作为互惠结构效应的代理变量。

2) 星形结构效应。星形结构效应包括星形聚敛结构效应和星形扩张结构效应, 前者对稀土贸易网络动态演变的影响取决于贸易网络的中心化程度, 在中心化程度较高的贸易网络中, 星形聚敛结构效应主要通过“马太效应”促使节点依附于被广泛依赖的“明星节点”, 抑制一般节点建立新的贸易联系^[19]; 而在中心化程度较低的贸易网络中, 星形聚敛结构效应则主要通过“竞争效应”促使节点积极谋求其它节点的依赖, 以提升网络地位。星形扩张结构效应对稀土贸易网络动态演变的影响表现为抑制与促进作用并存, 这是由于节点虽然可以通过增加依赖对象数量的方式达到分散贸易风险的目的, 但是同时自身在贸易网络中的影响力也会随之分散, 因此为了避免与其他节点建立贸易依赖关系时处于相对弱势的位置, 节点也会控制自身依赖对象的数量。本文以几何加权入度分布(*Gwdeg*)和几何加权出度分布(*Gwodeg*)作为衡量星形结构效应的代理变量。

3) 三角形结构效应。三角形结构效应是指不存在贸易联系的潜在“节点对”的间接贸易联系能够促进“节点对”间贸易联系的建立。对不存在贸易联系的潜在“节点对”而言, 信息不对称性是影响它们之间建立贸易联系的重要因素, 而三角形结构效应则往往通过为它们提供众多的建立间接贸易联系的路径, 有效降低潜在稀土贸易“节点对”之间的信息不对称性, 进而促进新贸易联系的构建和推动贸易网络结构的演变^[19]。本文以三角形结构变量(*Gwesp*)作为衡量三角形结构效应的代理变量。

本文选取外生网络结构效应变量以及行动者-关系效应变量作为控制变量, 同时还控制了模型的时间效应。具体而言, ① 在时间效应方面控制了稳定性(*stability*)和变异性(*variability*), 前者表示贸易网络结构特征在稀土贸易网络演变的过程中不会骤然出现或消失, 后者表示贸易联系随着时间的推移重要性不断增强^[26]。② 选取节点国家经济发展水平(GDP 和人均 GDP)以及对应稀土产品的进出口贸易额作为刻画行动者-关系效应的代理变量(均取对数), 以控制节点的特定属性对其建立依赖关系倾向的影响。③ 选取地理邻近性、文化邻近性和制度邻近性作为刻画外生机制的代理变量, 其中地理邻近性是指国界接壤网络以及国家距离网络, 文化邻近性为殖民关系和语言关系网络, 制度邻近性为双边投资协定关系网络。

3.2 TERGM 实证结果

本文对全球稀土初级加工品、中级加工品和制成品贸易网络进行了 TERGM 的估计与拟合(表 2), 表内各变量均来自于 CEPII 数据库(<https://data.worldbank.org.cn/>)和 UNCTAD 数据库(<http://unctadstat.unctad.org/>), 具体结果如表 2 所示。

首先, 模型 1~3 主要检验在双边联系存在依赖性的情境下, 行动者-关系效应、外生网络结构效应以及互惠结构效应对贸易网络演变的影响, 其中互惠结构(*mutual*)是作用于双边贸易联系的基本内生结构变量。在行动者-关系效应上, GDP、人均 GDP、稀土产品贸易规模均显著为正, 说明贸易参

表 2 TERGM 的回归结果

Table 2 Regression results of the TERGM

变量名称	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
<i>edges</i>	-13.639*** (0.1784)	-21.0627*** (0.5332)	-16.4082*** (0.3184)	-8.9069*** (0.188)	-14.6377*** (0.3808)	-10.4578*** (0.3337)
<i>mutual</i>	0.9821*** (0.0324)	0.1614*** (0.0451)	0.644*** (0.0407)	0.5547*** (0.0418)	-0.0869** (0.059)	0.3681*** (0.0357)
<i>gwideg</i>				1.1957*** (0.0972)	0.4278** (0.1734)	0.4663*** (0.1064)
<i>gwodeg</i>				-0.4415** (0.1839)	-0.134** (0.1616)	-2.0273*** (0.2061)
<i>gwesp</i>				0.2369*** (0.0161)	0.1501*** (0.0264)	0.3215*** (0.0189)
<i>stability</i>				1.8776*** (0.0167)	1.6335*** (0.0268)	1.4864*** (0.0139)
<i>variability</i>				-0.0039** (0.0054)	-0.0236 (0.0078)	-0.0107 (0.0033)
<i>lnimport</i>	0.2244*** (0.004)	0.1915*** (0.007)	0.1697*** (0.0033)	0.176*** (0.0065)	0.1564*** (0.0094)	0.0778*** (0.0046)
<i>lngdp_sender</i>	0.0004** (0.0037)	0.0489*** (0.0094)	-0.014 (0.0043)	-0.0152 (0.006)	0.0215 (0.0082)	-0.0043** (0.0044)
<i>lngdp_per_sender</i>	0.0432*** (0.0124)	-0.0292** (0.0211)	0.0633*** (0.0086)	0.0398*** (0.0097)	-0.0197** (0.0218)	0.0545*** (0.0094)
<i>lnexport</i>	0.1694*** (0.0043)	0.1658*** (0.0094)	0.1643*** (0.0049)	0.1736*** (0.0057)	0.1596*** (0.0089)	0.1544*** (0.0082)
<i>lngdp_receiver</i>	0.1766*** (0.0069)	0.3841*** (0.0137)	0.2778*** (0.0133)	0.0829*** (0.0078)	0.2508*** (0.014)	0.1487*** (0.0155)
<i>lngdp_per_receiver</i>	0.0141** (0.0066)	0.2634*** (0.0158)	0.1979*** (0.0126)	-0.0144** (0.0114)	0.1892*** (0.015)	0.1276*** (0.0128)
<i>colony_mat</i>	0.7799*** (0.0559)	0.382*** (0.0337)	0.7739*** (0.0236)	0.4976*** (0.0631)	0.1917 (0.0595)	0.5284*** (0.0439)
<i>contig_mat</i>	2.2624*** (0.0284)	1.9769*** (0.0399)	2.0688*** (0.0303)	1.3839*** (0.0722)	1.477*** (0.0719)	1.4098*** (0.0452)
<i>dist_mat</i>	-0.3888*** (0.0556)	-0.6372*** (0.0803)	-0.4545*** (0.0618)	-0.3632*** (0.066)	-0.5471*** (0.0698)	-0.3594*** (0.0629)
<i>language_mat</i>	0.9783*** (0.032)	0.8824*** (0.071)	0.9612*** (0.0244)	0.7792*** (0.0412)	0.7625*** (0.0706)	0.7545*** (0.0319)
<i>bit_mat</i>	0.3401*** (0.0211)	0.2021*** (0.0218)	0.3933*** (0.0247)	0.2424*** (0.0279)	0.2114*** (0.0276)	0.2771*** (0.0333)

注: 括号内为稳健性标准差; **、* 和 * 分别表示在 1%、5% 和 10% 的显著性水平上显著; *edges* 为常数项; *mutual* 为互惠结构变量; *gwideg* 为几何加权入度分布; *gwodeg* 为几何加权出度分布; *gwesp* 为三角形结构变量; *stability* 为稳定性; *variability* 为变异性; *import*(*export*)、*gdp_sender*(*receiver*)和*gdp_per_sender*(*receiver*)表示节点国家的稀土对应产品进(出)口额、国内生产总值(GDP)和人均生产总值(人均GDP)对其发出(接收)依赖关系的影响效应变量; *colony_mat*为历史殖民; *contig_mat*为地理相邻; *dist_mat*为地理距离; *language_mat*为语言; *bit_mat*为双边投资协定; 空白项表示该变量未纳入模型。

与国的发展水平以及稀土相关产品的出口额对依赖关系的建立显著为正,节点国家的发展水平越高、稀土产品贸易规模越大均有助于节点国家发出或接收依赖关系。其次,在外生网络结构效应上,地理距离(*dist_mat*)的系数显著为负,地理相邻(*contig_mat*)的系数显著为正,这意味着节点国家在地理方面的邻近性有助于建立贸易依赖联系;历史殖民关系(*colony_mat*)、语言(*language_mat*)以及双边投资协定(*bit_mat*)的系数均显著为正,说明节点国家在文化和制度方面的邻近性均有助于彼此建立贸易依赖联系。在内生网络结构效应方面,互惠结构变量(*mutual*)的系数显著为正,说明互惠结构效应对依赖关系的建立具有显著的促进作用。模型 1~3 表明,网络中具有特定属性的节点国家在外部邻近性的影响下与其他节点国家建立了贸易联系,并在互惠机制的作用下逐步发展为双向贸易联系。

为了进一步揭示在多边贸易联系存在依赖性的情境下内生网络结构效应的影响机制,本文在模型 4~6 中加入星形结构和三角形结构两类内生网络结构变量以及时间效应变量。首先,在时间效应上,稳定性(*stability*)显著为正,变异性(*variability*)不显著,这说明稀土贸易网络在演变过程中相对稳定。其次,内生网络结构效应是贸易网络结构演变的重要机制。模型 4~6 结果表明,几何加权出度分布(*Gwodeg*)变量的系数显著为负,说明网络中绝大多数节点国家会严格控制自身发出依赖关系的数量。几何加权入度分布(*Gwideg*)和三角形结构变量(*Gwesp*)的系数显著为正,表明稀土贸易网络中的节点国家会积极谋求其他节点对自身的依赖,同时伴随以第三方为中介构成的间接依赖关系的不断深化,节点间直接建立依赖关系的概率也将显著提升。此外,互惠结构变量的系数仍然十分显著,但是系数均有所下降,甚至在稀土中级加工品贸易网络中,互惠结构变量的系数由正转负,这表明网络中节点不再仅依靠双边机制建立贸易联系。

相比而言,星形扩张结构效应在 3 个环节稀土贸易网络中均发挥了负向抑制作用,且在制成品网络(模型 6)中最强,初级加工品网络(模型 4)次之,中级加工品网络(模型 5)最弱。对于网络中大多数节点而言,发展多元化的依赖关系结构意味着自己在贸易网络中影响力的分散,但网络中一些核心节点则不仅可以避免对单一国家的过度依赖,还能够增强自身在网络中的间接影响力。因此,在贸易摩

擦最为剧烈的稀土中级加工品贸易网络中星形扩张结构效应负向作用最小,网络中的节点具有更强的建立多元化依赖关系以分散贸易风险的倾向。星形聚敛结构效应的正向促进作用在 3 个环节稀土贸易网络中均排名第一,且在初级加工品网络(模型 4)中最强,制成品网络(模型 6)次之,中级加工品网络(模型 5)最弱。在稀土产业链 3 个环节稀土贸易网络均未呈现中心集聚的情境下,各国都积极地谋求接收更多国家的依赖关系,实现网络地位的提升,而且国家依赖关系集聚程度的提升还会刺激稀土贸易网络中的其他国家,从而在网络中形成竞争效应。需要特别指出的是,随着稀土贸易网络中心集聚程度的不断提高,竞争效应将会逐渐减弱,并且在马太效应的作用下拉大“明星节点”与普通节点之间的差距,因此在中心集聚程度最高的稀土中级加工品贸易网络中星形聚敛结构效应的正向效应相对较弱。三角形结构效应在 3 个环节稀土贸易网络中均发挥着正向促进作用,且在制成品网络(模型 6)中最强,在中级加工品网络(模型 5)中最弱。三角形结构效应揭示了不存在直接贸易联系的节点对是如何通过间接联通降低信息不对称性从而建立直接贸易联系的过程,因此稀土贸易网络的网络化程度越高、节点间越是对称可达,三角形结构效应的作用也就越大,故三角形结构效应在网络化程度低、等级化程度高的稀土中级加工品贸易网络中正向效应最弱。

3.3 稳健性检验与拟合优度检验

为了保证估计结果的稳健性,本文采取两种替换被解释变量的策略进行稳健性检验。首先,考虑到时点选择对网络结构效应的影响,本文以 2 a 和 3 a 为间隔分别对筛选后的贸易网络进行回归。结果显示,初级加工品和制成品贸易网络中的内生网络结构变量的系数符号与显著性没有发生变化,仅中级加工品网络的内生网络结构变量的显著性有所下降,但系数符号依然保持不变。其次,本文基于贸易流量关系建立的贸易网络进行回归,以检验不同的网络构建方式对结果的影响。结果显示,互惠、三角形和星形聚敛结构变量的系数符号与显著性均未发生改变,仅星形扩张结构变量在初级加工品和中级加工品网络中符号由负转正。

本文还通过仿真网络模型与真实网络对比的方法进一步考察模型 4~6 的拟合优度。结果显示,模型的拟合程度较好。模型 4~6 的二元共享伙伴数

(dsp)、共享边伙伴数(esp)、点入度(indegree)、点出度(outdegree)、三元组普查(triad census)这五类结构特征均接近于仿真网络的 95% 置信区间,同时 ROC 曲线也均接近左上角。

4 结论启示与展望

4.1 结论

本文基于贸易依赖关系构建了稀土贸易网络,并运用社会网络分析法对比分析了全球稀土初级加工品、中级加工品和制成品贸易网络的演变规律,同时从内生网络结构效应角度对贸易网络结构演变的影响机制进行了实证分析,得出以下结论:

1) 在稀土贸易网络拓扑结构特征演变方面,3 个环节稀土贸易网络均呈现低网络化、高等级化以及低中心辐射的特征。其中,制成品贸易网络的网络化程度以及中级加工品贸易网络的等级化程度和中心集聚程度均位居 3 个环节稀土贸易网络的首位。中级加工品贸易网络的网络化和中心集聚程度的上升趋势以及等级化程度的下降趋势始终最强,同时中级加工品和制成品网络的中心辐射程度在 2014 年以后呈现出“过山车式”先涨后跌的特征。

2) 在稀土贸易网络主干结构特征演变方面,稀土初级加工品贸易网络的主干结构由欧洲主导向欧美并立转变。以挪威、德国、西班牙等欧洲国家为核心的欧洲子群始终在稀土初级加工品 Top1 贸易网络占据着核心位置,但其影响力呈下降趋势,同时以美国、澳大利亚和中国为核心的亚太子群的核心地位则呈现持续上升趋势。稀土中级加工品贸易网络的主干结构由中国主导向欧亚并立演变。中国在其所处的子群中始终占据着核心位置,但其核心地位呈下降趋势,同时德国、英国和日本的核心地位则呈现明显的上升趋势。稀土制成品贸易网络的主干结构由欧美亚三足鼎立向亚洲主导演变。

3) 在中国角色地位的演变方面,中国在 3 个环节稀土贸易网络中均发展成直接影响力前三甲国家。在初级加工品和制成品网络中,中国的直接影响力均呈波动上升趋势;在中级加工品网络中,中国的直接影响力则呈现下降趋势。中国在 3 个环节稀土贸易网络中的间接影响力大部分年份都没有进入前三甲,但是其间接影响力均呈快速上升趋势。

4) 在网络结构演变的影响机制方面,内生网络结构效应对稀土贸易网络的动态演变具有显著影响。星形扩张结构效应是唯一对 3 个环节稀土贸易网

络中依赖关系的建立均产生抑制作用的内生网络结构效应,且对制成品网络最强,对中级加工品网络最弱;星形聚敛结构效应和三角形结构效应均显著促进了 3 个环节稀土贸易网络中依赖关系的建立,互惠结构效应对中级加工品网络以外的网络均呈现显著促进作用。

4.2 启示

本研究得出以下启示:① 明晰稀土产业链各环节贸易网络整体结构差异,全面提升中国在 3 个环节稀土贸易网络中的资源配置能级。目前 3 个环节稀土贸易网络不断趋于复杂,但仍然呈现无标度网络特征,特别是稀土中级加工品和制成品贸易网络。因此,中国应坚持稀土初中级加工品环节集约化发展和制成品环节高端化发展的原则,全面提升自身在稀土贸易网络中的能级地位。② 深入推进与亚太国家稀土贸易的合作共赢,重点突破当前稀土产业链低端封锁的瓶颈。目前亚太国家在 3 个环节稀土贸易网络主干结构中的核心地位均呈现上升趋势,特别是在制成品贸易网络和初级加工品贸易网络中更是如此。因此,中国应依托中国-东盟矿业合作论坛、亚太经合组织等平台以及 RCEP 协定,加强与东盟国家在地质矿产调查等方面的合作,同时还应鼓励日本和美国一些稀土技术和咨询服务公司等在中国执业经营,引进先进适用的稀土材料加工工艺、技术和设备。③ 构建积极有效的双边和多边对接机制,打造全方位、多层次的稀土对外贸易多元格局。目前世界各国普遍倾向于采取多元化供给保障政策以期管控稀土贸易风险,但是集中自身权力资源提升网络地位仍然是各国的主要目标。因此,中国应鼓励本地稀土企业和研发机构“走出去”,积极推进境外矿产资源开发、稀土产品统一标准的制订以及技术研发等方面合作,争当互惠结构和三角形结构的发起者和主要参与者。同时,中国也应重视对稀土产业链各环节贸易风险的管控,引导国内大型稀土集团优化国际贸易和投资的多元化布局。

虽然本文运用社会网络分析法从产业链的视角对比分析了全球稀土初级加工品、中级加工品和制成品贸易网络的演变规律,但是限于数据可得性,未能进一步展示稀土各种元素之间的差异性,这些将是未来研究需要完善的重点。

参考文献(References):

[1] 汤铎铎,刘学良,倪红福,等. 全球经济大变局、中国潜在增长率

- 与后疫情时期高质量发展[J]. 经济研究, 2020, 55(8): 4-23. [Tang Duoduo, Liu Xueliang, Ni Hongfu et al. The Changing global economic landscape and China's potential growth rate and high-quality development in the post-epidemic era. *Economic Research Journal*, 2020, 55(8): 4-23.]
- [2] 裴长洪, 刘洪槐. 中国外贸高质量发展: 基于习近平百年大变局重要论断的思考[J]. 经济研究, 2020, 55(5): 4-20. [Pei Changhong, Liu Honghui. The high-quality development of Chinese foreign trade enlightened by Xi Jinping's important judgment on the profound Changes in a century. *Economic Research Journal*, 2020, 55(5): 4-20.]
- [3] 李鹏飞, 杨丹辉, 渠慎宁, 等. 稀有矿产资源的全球供应风险分析——基于战略性新兴产业发展的视角[J]. 世界经济研究, 2015, 34(2): 96-104. [Li Pengfei, Yang Danhui, Qu Shenning et al. Analysis on global supply risk of rare minerals: From the perspective of strategic emerging industry development. *World Economy Studies*, 2015, 34(2): 96-104.]
- [4] 袁中许. 资源异质性视角下中国稀土定价权缺失本真研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 157-167. [Yuan Zhongxu. Authenticity study on the lack of pricing power in China's rare earth from the perspective of resource heterogeneity China. *Population, Resources and Environment*, 2019, 29(4): 157-167.]
- [5] 平新乔, 安然. 我国稀土出口总量与结构变化: 1999-2014年[J]. 改革, 2016, 32(3): 94-101. [Ping Xinqiao, An Ran. The total export volume and structural changes of China's rare earth export: 1999-2014. *Reform*, 2016, 32(3): 94-101.]
- [6] 高风平, 张璞, 刘大成, 等. 国际稀土市场新格局与中国稀土产业战略选择[J]. 国际贸易问题, 2019, 45(7): 63-81. [Gao Fengping, Zhang Pu, Liu Dacheng et al. The rare earths global market updates and the rare earths industry master plan of the United States and its allies. *Journal of International Trade*, 2019, 45(7): 63-81.]
- [7] Hou W, Liu H, Wang H et al. Structure and patterns of the international rare earths trade: A complex network analysis[J]. *Resources Policy*, 2018, 55: 133-142.
- [8] Wang X, Yao M, Li J et al. Global embodied rare earths flows and the outflow paths of China's embodied rare earths: Combining multi-regional input-output analysis with the complex network approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 216: 435-445.
- [9] 夏启繁, 杜德斌, 段德忠, 等. 中国稀土对外贸易格局演化及影响因素[J]. 地理学报, 2022, 77(4): 976-995. [Xia Qifan, Du Debin, Duan Dezhong et al. Evolution and influencing factors of China's foreign trade in rare earth metals. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 976-995.]
- [10] Kharrazi A, Fath B D. Measuring global oil trade dependencies: An application of the point-wise mutual information method[J]. *Energy Policy*, 2016, 86(1): 271-277.
- [11] An Q, Wang L, Qu D et al. Dependency network of international oil trade before and after oil price drop[J]. *Energy*, 2018, 165: 1021-1033.
- [12] Huang J B, Qian D, Ying W et al. The evolution and influencing factors of international tungsten competition from the industrial chain perspective[J]. *Resources Policy*, 2021, 73: 1-12.
- [13] Li B H, Li H J, Dong Z L et al. The global copper material trade network and risk evaluation: A industry chain perspective[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102275.
- [14] Yang P, Gao X Y, Zhao Y R et al. Lithium resource allocation optimization of the lithium trading network based on material flow[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102356.
- [15] Li Q, Zhong W, Wang G et al. Material and value flows of iron in Chinese international trade from 2010 to 2016[J]. *Resources Policy*, 2018, 59: 139-147.
- [16] Xin S, Han H, Zhao F et al. Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2017, 124: 50-61.
- [17] 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 Qidi, Liu Weidong, Chen Wei et al. Structure of global copper-containing products trade network based on industrial chain perspective. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(1): 44-54.]
- [18] Shuai J, Peng X, Zhao Y et al. A dynamic evaluation on the international competitiveness of China's rare earth products: An industrial chain and tech-innovation perspective[J]. *Resources Policy*, 2022, 75: 1-15.
- [19] 刘林青, 闫小斐, 杨理斯, 等. 国际贸易依赖网络的演变及内生机制研究[J]. 中国工业经济, 2021, 38(2): 98-116. [Liu Linqing, Yan Xiaofei, Yang Lisi et al. Research on the evolution and endogenous mechanism of international trade dependence network. *China Industrial Economics*, 2021, 38(2): 98-116.]
- [20] Lusher D, Koskinen J, Robins G. Exponential random graph models for social networks: Theory, methods and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [21] 许和连, 孙天阳, 成丽红. “一带一路”高端制造业贸易格局及影响因素研究——基于复杂网络的指数随机图分析[J]. 财贸经济, 2015, 36(12): 74-88. [Xu Helian, Sun Tianyang, Cheng Lihong. Trade pattern and influence factors of high-end manufacturing on “One Belt and One Road”: A study based on the exponential random graph models. *Finance & Trade Economics*, 2015, 36(12): 74-88.]
- [22] 何欢浪, 冯美珍. 我国稀土产品出口政策效果评估的实证检验[J]. 世界经济研究, 2017, 36(11): 88-99. [He Huanlang, Feng Meizhen. An empirical study of the evaluation for China's rare earth exporting. *World Economy Studies*, 2017, 36(11): 88-99.]
- [23] 庄德林, 王鹏鹏, 许基兰, 等. 中国创业投资城市网络空间结构演变研究——基于四大投资阶段的分析视角[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1256-1265. [Zhuang Delin, Wang Pengpeng, Xu Jilan et al. Spatial structure evolution of China's venture capital city network: Based on the analysis perspective of four investment stages. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1256-1265.]
- [24] 刘劲松. 基于社会网络分析的世界天然气贸易格局演化[J]. 经济地理, 2016, 36(12): 89-95. [Liu Jinsong. Evolution of world

- natural gas trade pattern based on social network analysis. *Economic Geography*, 2016, 36(12): 89-95.]
- [25] 余娟娟, 龚同. 全球碳转移网络的解构与影响因素分析[J] *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(8): 21-30. [Yu Juanjuan, Gong Tong. Analyzing the deconstruction and influencing factors of the global carbon transfer network. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(8): 21-30.]
- [26] 唐晓彬, 崔茂生. “一带一路”货物贸易网络结构动态变化及其影响机制[J]. *财经研究*, 2020, 46(7): 138-153. [Tang Xiaobin, Cui Maosheng. Research on the dynamic change of goods trade network structure and its impact mechanism of countries along the Belt and Road. *Journal of Finance and Economics*, 2020, 46(7): 138-153.]
- [27] 杨文龙, 杜德斌, 马亚华, 等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性[J]. *地理研究*, 2018, 37(11): 2218-2235. [Yang Wenlong, Du Debin, Ma Yahua et al. Network structure and proximity of the trade network in the Belt and Road region. *Geographical Research*, 2018, 37(11): 2218-2235.]

The Dynamic Change of Global Rare Earth Trade Network and Its Impact Mechanism: From the Perspective of Industrial Chain

Zhuang Delin, Li Jiahao, Chen Ziruo, Liu Yuchen

(School of Economics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: From the perspective of rare earth industrial chain, this article successively constructed the rare earth primary processed products, intermediate processed products and finished products trade network according to the trade dependence, and empirical test on the dynamic change of rare earth trade network structure and its influencing mechanism by using social network analysis method and Temporal Exponential Random Graph Model. The following conclusions are drawn. The three types of rare earth trade network are evolving into a complex network, and the trend of the intermediate processed products goods network ahead of the finished products and primary processed goods network in turn. From the perspective of backbone structure, three types of rare earth trade network have evolved from Europe to Europe and the United States, from China to Europe and the United States, and from Europe, the United States and Asia to Asia. China evolves into the top three countries with direct influence in all networks, but its leading edge has gradually narrowed, while its indirect influence has only entered the top three countries in the network of primary processed products and finished products, with a small increase. Mutual, triangle, star-radiation and star-expansion structure effects have significant heterogeneous effects on the dynamic evolution of the three types of rare earth trade network.

Key words: industrial chain; rare earth trade network; dependencies; network structure effect; temporal exponential random graph model