

引用格式: 于娱, 马代鹏, 王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2006–2021. [Yu Y, Ma D P, Wang X M. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources[J]. Resources Science, 2022, 44(10): 2006–2021.] DOI: 10.18402/resci.2022.10.05

国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性

于 娱, 马代鹏, 王贤梅

(南京审计大学商学院, 南京 211815)

摘 要: 铁矿作为一种重要的战略资源, 其生产和消费对世界经济有着重要的影响, 研究铁矿国际贸易网络韧性对保障未来铁矿供需安全具有重要意义。本文综合考虑铁矿上下游5大类产品, 构建国际贸易网络, 从静态和动态(中断模拟)两方面对网络的韧性进行测度, 并对5类铁矿产品网络中全球20大经济体的抗干扰性水平进行测度和层级划分。结论表明: ①铁矿石和块矿贸易网络综合韧性水平较低, 废钢贸易网络综合韧性水平中等, 钢材和生铁贸易网络综合韧性水平较高, 说明产业链上游的铁矿原材料贸易网络韧性低, 受到外界干扰后网络受到的影响大; 而产业链中下游的铁矿产品贸易网络韧性高, 受到冲击后的影响小。②在铁矿石、块矿、生铁和钢材贸易网络中, 中国的节点抗干扰性水平表现较强, 处于第一层, 但在废钢贸易网络中处于第二层, 因此需加强对废钢产业发展的重视以逐渐提升其抗干扰水平。本文结论对保障全球尤其是中国铁矿产品供需安全、稳定具有现实意义。

关键词: 铁矿; 全产业链; 贸易网络; 静态韧性; 动态韧性; 中断模拟

DOI: 10.18402/resci.2022.10.05

1 引言

铁矿资源是冶炼钢铁的重要原材料, 一方面, 铁矿石加工时会产生生铁, 由于具有高能耗、高污染的特点, 许多国家的生铁产量有限, 需要依赖进口; 另一方面, 生铁加工时会产生废钢, 其循环利用是对铁矿石原料的二次补充, 且对降低环境污染具有重要意义, 因此在各国之间也存在着贸易联系。由于不同的国家(地区)有不同的铁矿资源禀赋和铁矿需求, 全球铁矿供需结构存在较大的地域差异。因此, 资源匮乏的国家主要从其他国家进口铁矿产品, 以保证其国内经济发展, 使铁矿资源贸易流动呈现高度的国际化特征。对中国而言, 钢铁是国民经济的重要基础产业, 是建设现代化强国的重要支撑, 是实现绿色低碳发展的重要领域, 也是工业的“粮食”。由于中国铁矿资源禀赋差、品位低、规模小、生产成本低, 因此对进口铁矿具有高度依

赖性。据海关总署发布的数据显示, 近10年中国的铁矿进口量呈上升趋势, 需求量年增长率约6.5%。“十四五”时期, 新型工业化、城镇化、农业现代化等目标将进一步加剧中国对钢铁资源的需求。目前全球面临着新冠疫情、国际战略冲突、经济制裁等挑战, 对铁矿贸易的稳定、安全、可持续发展造成强烈冲击。因此研究国际贸易中铁矿资源的流动及其结构韧性对保障未来铁矿持续贸易具有重要意义。

USGS(美国地质调查局)统计发布的《Mineral Commodity Summaries 2021》报告显示, 2020年全球铁矿石含铁储量约为840亿t, 其中62%的铁矿主要由澳大利亚、巴西、俄罗斯三大资源国控制, 分布极不均衡。这一现状导致全球贸易国之间对铁矿的进口竞争非常激烈, 外加供应商多元化特点, 相应的铁矿国际贸易网络呈现出复杂的竞争强度以及

收稿日期: 2022-06-10; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(72171122; 71801133); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX22_0985)。

作者简介: 于娱, 男, 江苏响水人, 博士, 副教授, 研究方向为复杂网络韧性评价、复杂系统评价。E-mail: yuyu0801@139.com

通讯作者: 马代鹏, 男, 甘肃瓜州人, 硕士研究生, 研究方向为评价理论与方法。E-mail: ma_daipeng@163.com

多元的进出口网络体系^[1]。近年来,学者用复杂网络理论研究了铁矿贸易的进口竞争格局、区域和主要进口国的总体特征^[2,3],相关国家的贸易影响力、贸易重要性、贸易团体^[4],供需失衡的贸易网络结构^[5]以及网络结构的影响因素^[6]、演变规律^[7,8]等。上述研究通过将国家、地区抽象为节点,将贸易关系抽象为节点之间的联系,以此确定系统的主要参与者和重要关系、演化特征。由此可见,复杂网络理论已成为研究铁矿贸易网络的主要手段之一。

与此同时,在资源供需不均衡、受大变局冲击的背景下,韧性的概念引起了学者的广泛关注,自Holling^[9]将韧性(Resilience)概念从工程学引入到生态系统修复研究以来,该概念内涵得到国内外学者的广泛探索。Resilience一词的翻译是多样的,例如弹性^[10,11]、韧性^[12-14]、复原力^[15]等。词典中的释义为恢复或反弹,物体受到外部的扰动恢复到原来状态的能力^[10]。有学者认为,狭义上,韧性与弹性相同,广义上韧性增加了感知力、学习力和协同力^[14,16]。尽管不同学者对其概念释义不同,但首先要明确的是,弹性和复原力侧重于快速的恢复能力,即指当一个物体或系统受外力发生形变,随着外力消失能快速恢复到原状态的能力。在材料学中,韧性则可以解释为受外力干扰时对破坏的抵抗能力,这种能力与物体硬度相当,若一个系统或物体有足够的硬度,抵抗性就强。但在实际中系统或许会面临一段时间内持续的扰动^[17],在此过程中侧重冲击后恢复的能力或者冲击前抵抗的能力都不能全面地反映系统的韧性。Martin^[18]指出系统可以从经济、社会和政治结构等方面调整自身,以适应频繁发生的冲击扰动,实现长久稳定的发展能力。目前现有的相关研究包括区域韧性^[19]、城市韧性^[20]、经济韧性^[21]等也都强调系统面对外部环境冲击时的抵抗能力和调整适应以恢复到冲击前状态的能力。贸易网络作为复杂网络的一种,国家(地区)之间的经济、政治、文化等因素频繁对贸易网络造成冲击,贸易网络韧性应该具备应对持续性冲击所需要的抵抗性和冲击结束时的恢复性。目前,相关学者对不同领域的网络韧性开展了相关研究,如在城市^[23]、道路^[24]、

供水^[25]等系统网络中,通过仿真模拟^[26]、测度网络自身属性^[27]等评估其韧性。

综上,目前关于铁矿贸易网络的研究主要聚焦在贸易网络格局、结构特征等方面,而少有关于铁矿贸易网络韧性的研究。因此,本文将从产业链视角入手,综合考虑铁矿上下游产品,刻画产业贸易网络来对比产业链上不同产品的国际贸易关系,并从静态和动态两方面对网络韧性进行测度,研究其正常时和受到扰动后各铁矿产品的网络韧性变化特点,并识别关键节点在网络中的抗干扰性,最后提出政策建议。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

一般来说,钢材的生产加工包括铁矿石的开采、洗选、烧结冶炼、中间以及最终产品加工和废钢的回收利用^[28-31],查询相关海关商品HS编码(表1),依据编码分类绘制主要贸易产品(铁矿石、块矿、生铁、废钢、钢材)产业链(图1)。本文使用的贸易数据来源于国际贸易数据库(Trade Map)中2020年207个国家(地区)之间的铁矿产品进出口贸易量^①。需说明的是本文中的中国数据统计中不包含港澳台地区(因数据缺失)。为了分析网络中关键节点的抗干扰性,考虑到5类产品网络丰富程度不同,为更好地统一比较关键节点,本文选取贸易网络中2020年GDP全球排名前20名的全球20大经济体(包括美国、中国、日本、德国、英国、印度、法国、意大利、加拿大、韩国、俄罗斯、澳大利亚、巴西、西班牙、墨西哥、印度尼西亚、荷兰、沙特阿拉伯、瑞士和土耳其)。本文选取20大经济体主要基于以下两方面考虑:①根据USGS数据显示,铁矿储量分布

表1 国际贸易铁产品分类及HS编码

Table 1 Iron products classification and HS code in international trade

大类名称	大类英文名称	HS 编码
铁矿石	iron ore and concentrates	2601
块矿	lump ore	7203
生铁	pig iron	7201、7205
废钢	steel scrap	7204
钢材	steel products	7301-7305

① 国际贸易数据库共包含207个国家(地区),网址为<https://www.trademap.org/Index.aspx>。

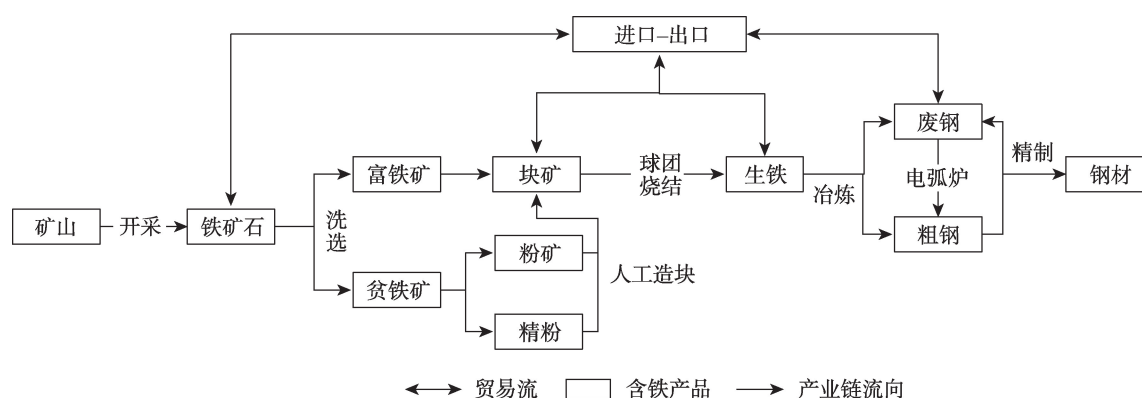


图1 基于产业链的铁矿石资源国际贸易流动

Figure 1 Flow of iron ore resources in international trade based on industrial chain

主要是集中在澳大利亚、巴西、俄罗斯等。这样的资源禀赋差异性,使全球铁矿市场的贸易国相对稳定分布。②世界钢协数据显示,过去10年间,全球铁矿的产量从2011年19.07亿t增至2020年22.21亿t,消耗量和产量比从89%增至95%,主要的进出口国家为中国、德国、日本,澳大利亚、巴西、印度等。这两方面数据表明,全球铁矿石市场的供需格局近10年没有发生较大的变化,且贸易国家都在全球20大经济体中。另外,由于不同国家的统计口径差异,进出口方公布的贸易数据可能会不一致。本文为了更加全面地反映全球含铁产品贸易情况,综合考虑进出口贸易^[32]数据,对同一贸易流进出口方报告不一致时取两者的均值。此外,当同一类含铁产品拥有多个HS编码数据时,对不同编码的同一贸易流取两者之和。根据国际贸易铁产品的5大分类,本文构建了以国家为节点、以贸易量为边权的5类有向加权贸易网络。

2.2 研究方法

复杂网络研究关注的是网络中个体相互关联作用的拓扑结构,是理解复杂系统性质和功能的基础^[33]。换言之,网络结构是衡量网络特点和性能的重要途径。Crespo等^[34]指出网络性能由网络本身属性决定,即网络结构属性的差异会影响网络的功能和韧性。贸易网络是由大量国家(地区)通过贸易关系链接而成的网络,是对复杂系统相互作用的一种本质抽象,因此,贸易网络结构的属性是衡量贸易网络功能和韧性的基础。目前,贸易网络韧性的量化尚且处于初步阶段,从现有的研究来看,学者

通过层级性、匹配性、传输性、集聚性、连通性以及抗干扰力和恢复力等指标^[23,25,26,35,36]来表征城市或扇区网络结构韧性。这些指标能有效地反映静态或动态情况下网络拓扑指标所决定的韧性特征^[37],是衡量并提升整体网络韧性的重要基础。基于此,本文对铁矿贸易网络韧性从网络结构的静态和动态两方面来衡量,静态方面主要利用相关拓扑指标来衡量传输性、集聚性、层级性和匹配性,动态方面主要利用性能变化来衡量抵抗吸收能力和恢复调整能力。

2.2.1 静态网络韧性评估指标

(1) 传输性——平均路径长度

传输性通常用网络的平均路径长度^[38]来衡量,网络的平均路径长度越大,代表从一个节点到另一个节点的资源、信息扩散越慢,传输效率越低,反之则传输效率越强。在相同规模的一般网络和随机网络中,由于随机网络每个节点分布的概率都是相同的,所以随机网络的平均路径长度是较短的,传输效率高。所以将同规模随机网络的平均路径长度作为一个参照,与测度的贸易网络平均路径长度比较,从而评判贸易网络传输效率高低。平均路径长度是指网络中任意两个节点之间的平均最短距离,公式如下:

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

式中: L 为网络平均路径长度; N 为节点数; d_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的加权最短路径。

(2) 集聚性——平均聚类系数

集聚性通常用网络的平均聚类系数衡量,表征网络节点的集聚程度。平均聚类系数越大,说明网络集聚程度越高,节点联系越紧密;反之则集聚程度越低。一般相同规模的随机网络的集聚程度较低,因此在计算分析时,也将考虑与相同规模的随机网络的平均聚类系数进行比较。

平均聚类系数是节点 i 与其相连节点 j 实际存在的连接边数 t_i 与完全连接时总边数的比值之和与总节点的比值,公式如下:

$$AC_i = \frac{t_i}{q_i(q_i - 1)} / N \quad (2)$$

式中: AC_i 为网络的平均聚类系数; t_i 为节点 i 和邻居节点的实际连接边数; q_i 为节点 i 的邻居节点个数。

(3) 层级性——度、度分布

度是网络中最基本的一个特征指标,定义为网络中与节点 i 发生贸易的其他节点 j 的总数。一个节点的度越大,说明网络中该节点与其他节点的联系越多。Crespo 等^[36]认为网络的层级性可以通过度分布来体现,度分布的斜率越大表示节点间的层级性越显著。度分布反映网络整体的分布特征,一般可以理解为网络中节点度的概率分布。

对于铁矿产品贸易网络,根据节点度与位序(将所有节点的度按照从大到小的顺序排列)绘制成幂律曲线,公式如下:

$$K_i = C(K_i^*)^\alpha \quad (3)$$

$$\ln K_i = \ln C + \alpha \ln K_i^* \quad (4)$$

式中: K_i 为网络中节点 i 的度; K_i^* 为节点 i 的度在所有节点度中的排序; C 为比例常数; α 为度分布曲线的斜率,衡量网络层级性, α 值越大,层级性越高。

(4) 匹配性——度关联

由于网络中节点之间度分布不均衡,节点和节点之间存在某种偏好连接关系。一般将网络的匹配性分为同配性(度正关联)和异配性(度负关联):同配性指的是网络中节点的连接倾向于属性相近的节点,异配性指的是网络中节点的连接倾向于属性不相近节点,这里的属性指的是节点的度,属于哪种类型用度关联体现。

在网络中,每个节点都与一定的节点相连,因此根据和节点 i 所直接相连的节点的度平均值与节点 i 的度绘制成曲线,公式如下:

$$AK_i = \frac{\sum_{i \in V} K_i}{V} \quad (5)$$

$$AK_i = C + \beta K_i \quad (6)$$

式中: AK_i 为与节点 i 直接相连所有节点度的平均值; β 为关联系数,衡量节点之间的匹配性。

2.2.2 动态网络韧性评估指标

动态网络韧性评估主要指通过模拟网络受到外部因素干扰时,网络的抗干扰力、以及当扰动停止后网络恢复到初始状态水平的恢复力。这里的动态是中断模拟,即通过编写程序按照一定的规则在每个时间段内持续性地对网络进行扰动,扰动结束之后,按照一定规则再用程序恢复失效的点和边,在这整个过程中网络的性能是动态变化的。外部扰动因素表现为地缘政治冲突、贸易摩擦、经济制裁以及自然灾害对资源的破坏等,这些干扰由于网络中贸易供需的关联性,会产生波及效应,对整个网络的运行效率造成损坏^[26]。本部分借鉴 Nan 等^[22]有关系统韧性的阶段划分及每个阶段对应的韧性能力界定来评估铁矿贸易网络动态韧性。

图2为一般性的系统韧性受扰动后的变化阶段示意图,纵轴 $NE(t)$ 为随时间变化的网络韧性水平函数。本文采用网络效率(Network Efficiency)衡量动态网络的韧性变化水平,对 $NE(t)$ 规范化使其取

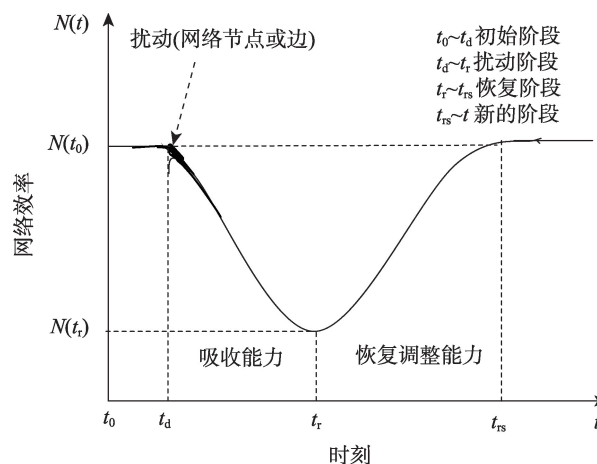


图2 网络损坏和恢复过程

Figure 2 Network corruption and recovery process

值范围在[0, 1]之间动态变化,其中,0表示网络处于完全瘫痪状态,1表示网络处于完全最优状态。

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

式中: NE 表示铁矿贸易网络的效率,表征网络的连通性。

$t_0 < t < t_d$ 阶段为网络初始稳定阶段,代表此阶段网络还未受到外部扰动; $t_d < t < t_r$ 阶段为网络性能受到破坏,扰动阶段(Disturb Stage, DS)。网络在 t_d 时刻受到干扰,性能和效率开始下降,在 t_r 时刻达到最低值。用鲁棒性 R 来表示最低点的含义,表示当网络受到一定因素、参数扰动等情况下,仍然能够保持其基本稳定性的能力以及在扰动期间网络所能承受的外部因素对网络的最大影响。用变化速率 ROC_{DS} 来衡量网络在扰动阶段效率下降的快慢程度,量化为DS阶段离散曲线的斜率。公式如下:

$$R = \min\{NE(t)\}, t_d < t < t_{rs} \quad (8)$$

$$ROC_{DS} = \frac{NE(t_i) - NE(t_i - \Delta t)}{\Delta t} \quad (9)$$

式中: $NE(t)$ 表示随时间变化的网络效率离散函数; t_{rs} 表示网络恢复到初始稳定状态的时刻; Δt 表示时间的变化量。用网络韧性损失 $LONE_{DS}$ 来衡量在扰动阶段的吸收毁坏的能力,将 $LONE_{DS}$ 量化为DS阶段的由 $NE(t)$ 离散曲线与直线 $x=t_d$, $x=t_r$, $y=NE(t_0)$ 所围成的区域面积:

$$LONE_{DS} = \int_{t_d}^{t_r} (NE(t_0) - NE(t)) dt \quad (10)$$

式中: t_0 为网络初始稳定时刻, $NE(t_0)$ 为网络初始韧性水平。为了更好地估算铁矿贸易网络韧性,在扰动阶段引入单位时间韧性损失 $UTLONE_{DS}$ 作为网络韧性损失的风险值,以此来衡量网络的稳定性:

$$UTLONE_{DS} = \frac{LONE_{DS}}{(t_r - t_d)} \quad (11)$$

$t_r < t < t_{rs}$ 阶段为网络恢复阶段(Recovery Stage),随着时间的推移,网络效率恢复到初始状态水平。同扰动阶段相应,引入恢复阶段变化速率 ROC_{RS} 、恢复阶段网络韧性损失 $LONE_{RS}$ 以及恢复阶段单位时间韧性损失 $UTLONE_{RS}$ 评估网络的恢复

调整能力:

$$ROC_{RS} = \frac{NE(t_i) - NE(t_i - \Delta t)}{\Delta t}, t_r < t < t_{rs} \quad (12)$$

$$LONE_{RS} = \int_{t_r}^{t_{rs}} (NE(t_0) - NE(t)) dt \quad (13)$$

$$UTLONE_{RS} = \frac{LONE_{RS}}{(t_{rs} - t_r)} \quad (14)$$

当 $t \geq t_{rs}$ 时刻时,网络基本恢复,此时的网络韧性水平小于、等于或高于初始水平,本文重点分析等于初始水平的情形,认定达到初始为实现百分百复原,在这里将恢复力设定为1。为进一步评估铁矿贸易网络在扰动和恢复整体过程的综合韧性能力,引入 CRA (Comprehensive Resilience Ability) 综合韧性值来衡量:

$$CRA = R \times \frac{ROC_{RS}}{ROC_{DS}} \times \frac{1}{(UTLONE_{DS} + UTLONE_{RS})} \quad (15)$$

2.2.3 关键节点抗干扰性测度

由于不同国家在贸易网络中的贸易关系数量不同,地位也有所不同,相应在网络中所具有的功能力也不同,因此当中断模拟下,某个关键国家节点失效,与该国家节点发生的贸易关系将中断,相应原本与其有联系的国家节点也将寻找和其他国家节点发生贸易关系。节点具有一定的自我调节能力,也即抗干扰性能^[39],换言之,节点在网络稳定时具有的能力值在其他节点中断失效后,产生不同程度的降低或升高。重要的节点失效,对其他节点影响较大,能力值降低节点数较多;相反,不重要的节点失效,能力值降低节点数较少。因此,将节点失效后,能力降低的节点数与节点的比值作为该节点的抗干扰性指数:比值越大,抗干扰性越强;反之越弱。本文从中转能力、扩散能力两方面对其抗干扰性进行测度。

(1) 中转能力——介数中心度

中转能力通常用介数中心度^[40]衡量,以经过某个节点的最短路径数目来刻画节点重要性,指一个节点充当其他两个节点之间最短路的桥梁的次数,介数中心度越大,“中介”次数就越多,在网络中的衔接作用就越强。计算公式如下:

$$B_i = \sum_{j, k \in N} \frac{n_{jk(i)}}{n_{jk}} \quad (16)$$

2022年10月

式中: B_i 为节点的介数中心度; n_{jk} 为节点 j 、 k 之间的最短路径个数; $n_{jk(i)}$ 表示节点 j 、 k 之间的最短路径经过节点 i 的数量。

(2) 扩散能力——特征向量中心度

扩散能力用特征向量中心度表征, 某个节点的特征向量中心性是相邻节点中心性的函数, 也即与某个国家有贸易联系的其他国家越重要, 这个国家就越重要。计算公式如下:

$$\mathbf{x}_b = \frac{1}{\lambda} \sum_{N \times N} \mathbf{A} \mathbf{x}_{b-1} \quad (17)$$

式中: \mathbf{x}_b 为 N 维中心向量, 经过多次迭代达到收敛; \mathbf{A} 为贸易网络的邻接矩阵; λ 为邻接矩阵对应的特征值。

3 结果与分析

3.1 铁矿产品国际贸易网络静态韧性分析

3.1.1 网络传输性和集聚性

依据国际贸易数据库中 200 多个国家(地区)之间的含铁产品进出口贸易量, 计算 5 类铁矿贸易网络参数, 相应指标得分见表 2。

由表 2 的第四列可以看出, 钢材贸易网络的网络密度最大, 其次为生铁和废钢贸易网络, 而铁矿石和块矿网络的网络密度相对最小, 可见有关铁矿石和块矿产品相应的参与国家之间的贸易量联系较少。究其原因, 一方面, 是由于钢材包含的品类较多; 另一方面, 铁矿石和块矿作为相对上游的矿产资源, 受到地域分布不均衡等因素的限制, 贸易往来主要发生在资源大国和需求大国之间, 相应的主要出口国家和进口国家相对于其他产品而言更加固定。从第五列可以看出, 铁矿石和块矿的平均加权度远高于其他 3 类产品, 这表明铁矿石和块矿的贸易量流动是较大的, 究其原因, 铁矿石和块矿

作为产业链上游产品, 由于各国家的铁禀赋, 资源分布的不均衡导致贫瘠的国家拥有巨大的原料需求, 故产业链上游的含铁产品具有较大的贸易量流动。从第六列可以看出, 网络的平均聚类系数得分在 0.224~0.602 之间, 高于相同规模的随机网络的平均聚类系数(0.077~0.143), 表明边缘孤立节点较多, 网络的聚类效应较明显。从第七列可以看出, 含铁产品的贸易网络平均路径长度在 2.254~2.950 之间, 表明经过铁矿资源贸易关系连接 2 个国家的最短平均路径经过 2.254~2.950 个国家, 接近相同规模随机网络的平均最短路径长度(1.876~2.547), 表明铁产品贸易网络的路径传输效率整体较好, 网络中任意两个国家之间可以建立一条路径相对较短的铁资源贸易流。其中, 钢材贸易网络的平均路径长度为 2.254, 在 5 类网络中路径最短, 其区域时效性和传播性相对较强; 生铁网络和废钢网络平均路径长度分别为 2.363 和 2.499, 传输效率居中; 而铁矿石网络和块矿网络分别为 2.739 和 2.950, 节点之间的传输效率相对较弱。

3.1.2 网络层级性

利用式(4)对 5 类铁矿贸易网络的层级性进行测度, 以便掌握 5 类铁矿贸易网络中各参与国家的地位差异情况, 度分布如图 3。

可以发现, 铁矿贸易网络的度分布在双对数坐标下服从幂律分布, 具有无标度网络特征, 即网络的功能由处于核心位置的节点决定。总体看, 拟合曲线斜率差异较大, α 的绝对值在 1.183~2.258, 度分布具有明显的层次, 且最大度值与最小度值之间的较大差异使网络结构层次呈现相对立体的分布。其中, 铁矿石和块矿网络的曲线斜率分别为 1.744、2.258, 表明这两类产品拥有更高的层级性, 贸易网络中核心国家地位更为突出, 这两类铁产品

表 2 铁矿产品贸易网络基本特征及传输性、集聚性结果

Table 2 Basic characteristics of trade networks of iron ore products and results of transportability and agglomeration

贸易网络	节点数	边数	网络密度	平均加权度	平均聚类系数	平均路径长度
铁矿石	126	625	0.040	12958464.143	0.334	2.739
块矿	112	422	0.034	174582.433	0.224	2.950
生铁	128	1077	0.066	100407.742	0.465	2.363
废钢	207	2211	0.052	490742.126	0.458	2.499
钢材	206	2940	0.070	82388.121	0.602	2.254

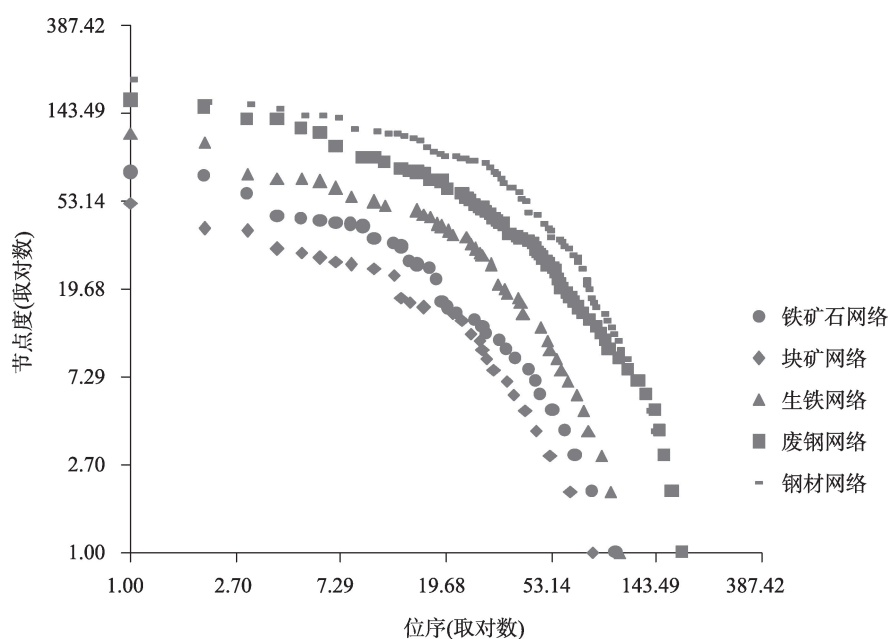


图3 铁矿产品贸易网络度分布

Figure 3 Degree distribution of iron ore products trade network

处于产业链的上游,具有更高的层级性,说明网络的马太效应较强,资源在核心国家中的掌控和流动更强、更频繁。处于产业链下游的钢材网络的斜率为1.183,是5类铁矿网络中最低的,这表明钢材网络中国家之间的地位相对上游产品层级性不是很强,相对扁平,网络贸易联系多的国家分布较多,削弱了马太效应。生铁和废钢网络的层级性处于中间,比上游的铁矿石和块矿网络低,比下游的钢材网络高。

3.1.3 网络匹配性

为了分析网络节点之间的匹配性,即节点间的联系程度。进一步利用式(6)绘制5类铁矿产品贸易网络度关联图,见图4。

一般而言,关联系数 β 的取值可以分为两大类:当 $\beta < 0$ 时,网络负关联,节点之间表现为异配性,即倾向于属性不相近节点间连接较紧密;当 $\beta > 0$ 时,网络正关联,节点之间表现为同配性,即倾向于属性相近节点间连接较紧密。其中, β 的绝对值大小

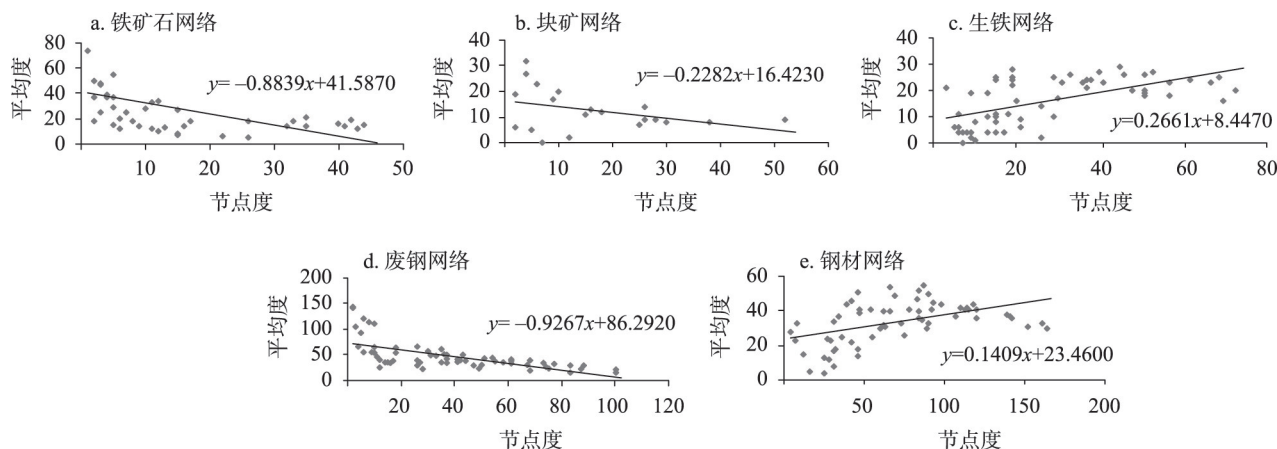


图4 铁矿产品贸易网络度关联

Figure 4 Degree correlation of iron ore products trade network

2022年10月

反映了网络异配或同配的强弱程度;属性在这里指的是节点的度。

从图4中的度关联系数可以看出,5类产品贸易网络在匹配性上存在差异。其中,铁矿石、块矿和废钢网络为异配性,对于单个节点国家而言,与其相邻的节点更多呈现出负关联性,联系路径倾向于异质化和多样化,且异配性强弱表现为废钢>铁矿石>块矿。生铁和钢材网络为同配性,对于单个节点国家而言,与其相邻的节点更多呈现正关联性,联系路径倾向于同质化,且同配性强弱表现为生铁>钢材。

3.2 铁矿产品国际贸易网络动态韧性分析

3.2.1 中断规则设置

一般而言,网络受到的外部扰动多来源于随机性策略和确定性策略^[41]。随机性策略指每个时间段内随机选取一定比例的节点使其损坏,其在铁矿贸易网络中表现为自然灾害对资源的损坏,传染病毒对供应链路的阻断等导致一些国家通行运输政策临时性的改变,以及资源进出口计划等所带来的扰动。确定性策略指的是有目的的,有计划的对某些节点攻击,使其失效,其在铁矿贸易网络中表现为地缘政治冲突、贸易摩擦、经济制裁等^[42,43]所带来的扰动。相关规则如下:

(1)扰动方式为随机性和确定性两种策略:①随机性策略将随机移除节点或移除边,其中,移除节点指对某个国家进行攻击使其失效,移除边指对某两个国家之间的贸易关系攻击使其失效;②确定性策略将按度值或介值大小移除节点。系统恢复

将分别按照随机方式和队列方式(先失效的先恢复)进行。

(2)假设随机性策略下,每个时间段内失效4%的节点或4%的边,直到失效50%的节点或50%的边时扰动结束。确定性策略下,根据网络的丰富程度,网络边数小于1500时,按度值 ≥ 20 、介值 ≥ 0.010 移除节点;网络边数大于1500时,按度值 ≥ 40 、介值 ≥ 0.015 移除节点。使每个时间段内失效1%的节点,直到10%时扰动结束。此处假设随机性策略比确定性策略移除节点比例更大的原因有两个:①认为随机因素的扰动随机性强,波及效应比确定性广;②增加两种策略扰动影响的模糊性,根据前文度分布显示,网络中度分布不均匀,度值小的节点占大多数,若随机与确定性移除相同或相差不多比例的节点数,两种方式对网络韧性的影响预见性较强。当扰动停止,网络开始恢复,直至恢复初始状态水平。

3.2.2 中断模拟结果

根据中断规则,利用Python中的Networks包编写相应的扰动和恢复程序,网络在扰动和恢复时间内性能的变化如图5、图6所示。图5、图6描述了4种不同扰动方式及恢复策略下(随机扰动-恢复点、随机扰动-恢复边、依据度值大小确定性扰动-恢复点、依据介值大小确定性扰动-恢复点)5类铁矿贸易网络效率变化情况。在 $t=0$ 时刻,网络开始受到扰动,网络效率开始下降,5类网络都在 $t=8\sim 15$ 时刻范围内性能下降到最低点。随机扰动节点和确定性策略的两种扰动方式下,网络的性能水平均呈现

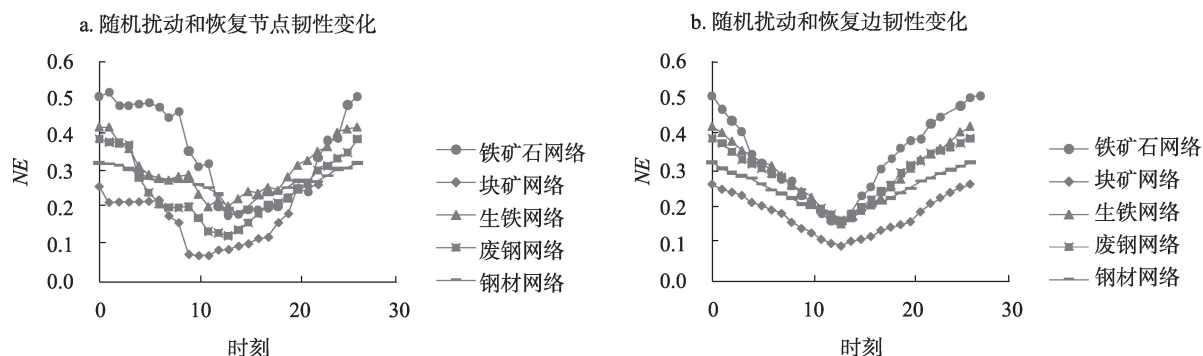


图5 随机策略扰动及恢复下的5类铁矿产品贸易网络效率变化

Figure 5 Network efficiency changes of the five iron ore products under random strategy disruption and recovery

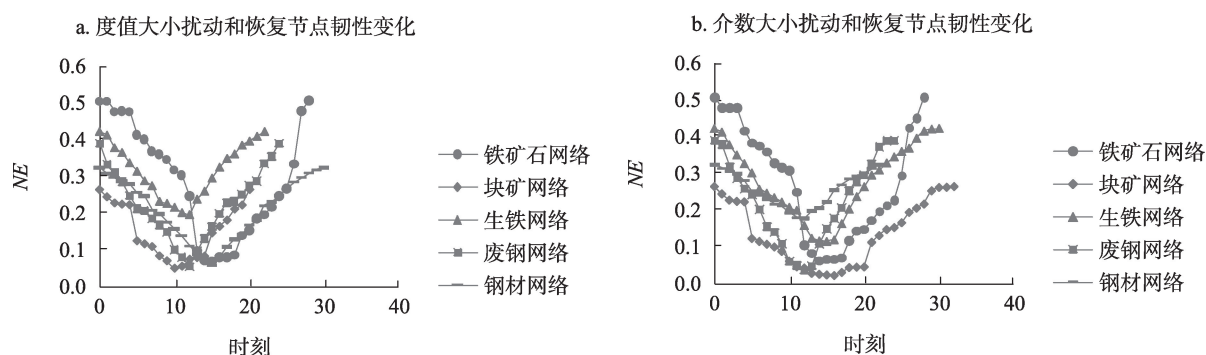


图6 确定性策略扰动及恢复下5类铁矿产品贸易网络效率变化

Figure 6 Network efficiency changes of the five iron ore products under deterministic strategy disruption and recovery

非线性的下降趋势,表明网络中存在一些节点对网络的性能提升具有促进或抑制作用。值得注意的是,块矿网络在随机扰动节点时,网络效率在 $t=8$ 时刻下降到了最低,下降速率是最快的;且在扰动贸易边方式下,块矿网络仍然是5类网络中下降最低的。随机扰动节点时,铁矿石网络在 $t=6$ 时刻之前下降速率较慢,在之后的下降速率几乎和块矿网络呈平行趋势;而生铁、废钢和钢材3类网络下降的速率都是相对缓慢的。当对网络的贸易边进行随机扰动时,下降和恢复都没有太多的波折,接近线性变化。这表明对网络中国家之间的贸易关系进行破坏,会使网络性能与破坏度成正比地变化。图6显示出,确定性策略的两种扰动方式网络性能的下降速率比随机方式更快,且下降到最低点时网络拥有的能力更低。5类网络中,铁矿石、块矿和废钢网络下降速率较快,分别在 $t=12$ 、 $t=10$ 和 $t=11$ 时刻下降到最低点。而生铁网络表现最好,虽然在 $t=10$ 时刻下降到了最低点,但其最低点拥有的能力是最高的。此外,在恢复阶段时,生铁、钢材和废钢3类网络恢复得速率较快,铁矿石和块矿网络恢复速率较慢,且在 $t=20$ 时刻至 $t=25$ 时刻之间恢复呈现第一段集中分布,在 $t=25$ 时刻之后呈现第二段集中分布。

计算5类铁矿贸易网络在不同扰动方式下的量化指标得分,如表3。就网络的鲁棒性 R 而言,确定性策略下的5类网络 R 值普遍较小,表明确定性策略的扰动对网络韧性的影响大于随机性策略的扰动,失效的10%节点基本都处于网络中度值较大或者介值较大的节点,在实际中反映了大国之间的地

缘政治冲突、贸易摩擦等因素对系统的影响是大于随机因素的。 R 能够反映网络在受到扰动后,能够维持基本稳定运行的能力。在随机扰动方式下,铁矿石、生铁和钢材3类网络的 R 值在0.1829~0.2092,比块矿网络和废钢网络的0.0722和0.1264高。而在确定性扰动方式下,生铁网络的 R 值是最高的,两种确定性扰动结果分别为0.2026和0.1167。此外,钢材网络 R 值在度值和介数扰动下差异较大,分别为0.0587和0.1818,说明在钢材网络中贸易联系丰富的国家多,而扮演中转站的国家少,所以度值扰动时,网络受到的影响较大, R 值更低。

在随机扰动-恢复点方式下,铁矿石网络的单位时间性能损失 $UTLONE_{DS}$ 为0.0909(扰动阶段)和0.2268(恢复阶段),表明拥有较强的吸收能力和较弱的适应调整能力,也说明上游原材料网络一旦被破坏,将不易复原。钢材网络的 $UTLONE_{DS}$ 为0.0436(扰动阶段)和0.0653(恢复阶段),表明拥有较强的吸收能力和较强的适应调整能力。块矿、生铁和废钢3类网络的 $UTLONE_{DS}$ 介于0.0839~0.1462(扰动阶段)和0.1163~0.1423(恢复阶段),吸收能力和适应调整能力比铁矿石网络强,比钢材网络差。

在随机扰动-恢复边的方式下,就网络韧性的变化速率而言,铁矿石网络恢复阶段小于扰动阶段,块矿网络恢复阶段等于扰动阶段,生铁、废钢和钢材网络恢复阶段大于扰动。其中,铁矿石网络 $UTLONE_{DS}$ 为0.2014(扰动阶段)和0.1519(恢复阶段),表明拥有较弱的吸收能力和较强的适应调整能力。铁矿石网络吸收能力在5类网络中最低,说

表3 铁矿产品贸易网络动态韧性评估指标结果

Table 3 Dynamic resilience assessment indicator values of iron ore products trade network

随机性策略		扰动阶段			恢复阶段			
		ROC_{DS}	$LONE_{DS}$	$UTLONE_{DS}$	R	ROC_{RS}	$LONE_{RS}$	$UTLONE_{RS}$
随机扰动-恢复点	铁矿石	0.0272	1.1814	0.0909	0.1829	0.0259	2.9479	0.2268
	块矿	0.0155	0.9229	0.0839	0.0722	0.0147	1.2796	0.1163
	生铁	0.0189	1.5966	0.1228	0.2092	0.0155	1.4854	0.1143
	废钢	0.0206	1.9006	0.1462	0.1264	0.0205	1.8469	0.1421
	钢材	0.0106	0.5669	0.0436	0.1993	0.0105	0.8484	0.0653
随机扰动-恢复边	铁矿石	0.0269	2.6177	0.2014	0.1618	0.0261	1.9750	0.1519
	块矿	0.0136	1.0784	0.0830	0.0969	0.0136	1.1916	0.0917
	生铁	0.0201	1.6648	0.1281	0.1590	0.0211	1.7224	0.1325
	废钢	0.0172	1.4364	0.1105	0.1682	0.0180	1.2985	0.0999
	钢材	0.0125	1.0444	0.0803	0.1566	0.0130	1.0051	0.0773
确定性策略		扰动阶段			恢复阶段			
		ROC_{DS}	$LONE_{DS}$	$UTLONE_{DS}$	R	ROC_{RS}	$LONE_{RS}$	$UTLONE_{RS}$
度值大小确定性 扰动-恢复点	铁矿石	0.0325	2.0065	0.1433	0.0733	0.0322	4.2748	0.3053
	块矿	0.0125	1.0658	0.1066	0.0510	0.0133	1.2788	0.1279
	生铁	0.0143	1.2947	0.1177	0.2026	0.0147	1.1092	0.1008
	废钢	0.0239	2.1770	0.1814	0.0564	0.0244	1.9224	0.1602
	钢材	0.0173	1.8377	0.1225	0.0587	0.0173	1.6823	0.1122
介值大小确定性 扰动-恢复点	铁矿石	0.4420	2.4375	0.1741	0.0638	0.4360	4.2394	0.3028
	块矿	0.0207	2.3963	0.1498	0.0256	0.0209	1.7895	0.1118
	生铁	0.0294	2.5330	0.1689	0.1167	0.0292	1.8306	0.1220
	废钢	0.0321	2.2657	0.1888	0.0384	0.0328	1.8672	0.1556
	钢材	0.0123	0.7630	0.0694	0.1818	0.0119	0.7899	0.0718

明铁矿石贸易网络中的贸易关系是最有风险的,当贸易边受到攻击,给网络造成的破坏也最大,侧面反映国家间友好合作的重要性;钢材网络 $UTLONE_{DS}$ 为 0.0803(扰动阶段)和 0.0773(恢复阶段),表明吸收和适应调整能力较强;其他 3 类网络单位时间性能损失介于铁矿石和钢材网络之间,吸收和适应调整能力居中。在两种随机性策略方式下,5 类网络的性能损失变化中铁矿石网络表现最差,说明在面临实际自然因素的干扰时,铁矿石作为原材料,其贸易网络最易受到破坏。

在依据度值大小确定性扰动-恢复点的方式下,块矿网络、生铁网络和钢材网络 $UTLONE_{DS}$ 介于 0.1008~0.1177(扰动阶段)和 0.1122~0.1279(恢复阶段),表明 3 类网络的吸收能力和适应调整能力相

当,且高于铁矿石和块矿网络。在生铁和钢材网络中,首先是贸易关系丰富,接着是网络中贸易多元化明显,资源的流动是分散化的,多样化的。废钢网络、铁矿石网络 $UTLONE_{DS}$ 为 0.1814、0.1433(扰动阶段)和 0.1602、0.3053(恢复阶段),表明吸收和适应调整能力较弱,且铁矿石网络恢复阶段单位时间内性能损失为 0.3053 远高于其他下游产品贸易网络,说明受到扰动之后不易恢复到初始水平。这是由于依据前文静态韧性测度,上游的铁矿石网络中马太效应明显,网络具有很强的层级性,当对这些少数的度值大的节点攻击时,网络会快速瘫痪,并且难以恢复。

在依据介值大小确定性扰动-恢复点的方式下,钢材网络 $UTLONE_{DS}$ 为 0.0694(扰动阶段)和

0.0718)(恢复阶段),表明吸收和适应调整能力较强,且相比较在度值扰动方式下,钢材网络的下降速率和性能损失都低,进一步说明钢材网络中拥有贸易关系丰富的国家多,而多元化的贸易联系使得部分国家的介值相当,对网络的影响没有度值扰动方式强。其他4类网络单位 $UTLONE_{DS}$ 介于0.1498~0.1888(扰动阶段)和0.1118~0.3028(恢复阶段),表明吸收能力和适应调整能力较弱,且铁矿石网络恢复阶段 $UTLONE_{DS}$ 0.3028,与在度值扰动方式下的性能损失相当,且高于其他4类网络,说明铁矿石网络的恢复能力在确定性策略扰动下较差,其作为上游原材料,若发生经济、地缘政治摩擦等,极易受到相应的风险挑战,受到扰动恢复到初始状态较慢。此外,值得注意的是,铁矿石网络在扰动阶段和恢复阶段的速率都超过了0.4,远高于度值扰动方式下的速率,这说明铁矿石网络与钢材网络具有相反特点,由于铁矿石网络的层级性,资源流动掌控在少数的国家之中,因此,网络中高需求的国家桥梁链接作用突出,当这些国家受到攻击时,网络也将更快瘫痪和难以恢复。

进一步比较4种扰动方式下网络在整个过程中的整体韧性,根据式(8)计算得到5类网络的 CRA (综合韧性值)如表4所示。

由表4第二列可知,在随机扰动-恢复点方式下,钢材网络和生铁网络 CRA 分别为1.8129何0.7236),说明整体韧性水平较好,表明在外界的干扰下,钢材网络和生铁网络不易受到破坏;而铁矿石、块矿和废钢3类网络 CRA 较低,说明韧性水平较低。由表第三列可知,随机扰动-恢复边方式下,钢材、废钢和生铁3类网络的 $CRA>0.6$,韧性水平较

好。由第四列随机策略两种方式的 CRA 均值可知,铁矿石和块矿网络的 $CRA<0.5$,韧性较差,其他3类网络 $CRA>0.6$,韧性较好。由表第七列可知,确定性策略扰动方式下,铁矿石、块矿和废钢网络的 CRA 均值均较低,分别为0.1469、0.1651和0.1412,表明它们的韧性较差。在产业链中,铁矿石和块矿属于一次加工原材料,废钢属于二次加工原材料,生铁和钢材属于中间和最终产品。由此表明,在随机性和确定性策略下,含铁的一次原材料产品贸易网络韧性水平低,而含铁制品贸易网络的韧性水平高;对于二次加工原料而言,在随机性策略扰动下韧性水平高,在确定性策略扰动下韧性低。在实际中,原材料易受到外界各种因素的冲击和影响,以及一次原材料的不可再生等原因,且在开发过程中资源的量逐渐匮乏,当受到扰动后网络可能面临恢复不到初始水平的风险,而制品处于下游,产品种类多,贸易流可替代性较强。

3.3 铁矿产品国际贸易网络中关键节点抗干扰分析

3.3.1 节点抗干扰性水平指数分布特征

从图5、图6中断模拟网络动态韧性变化趋势发现,网络性能下降的幅度有快有慢,说明网络中存在一些同类节点受到干扰时,对网络影响的强度有差异;在此基础上,依据式(16)–(17)分析全球20大经济体节点的抗干扰性水平(图7)。

图7表明,20大经济体节点的抗干扰性指数分布特征,总体趋势为:网络中节点的两种抗干扰性指数同步升降,且下游网络较上游网络的两种抗干扰性指数波动较平缓。在块矿网络中,节点的扩散能力指数的变化幅度较大,幅度差值为0.3035;铁矿石、生铁和废钢3类网络中的差值介于0.1762~

表4 铁矿产品贸易网络综合韧性水平

Table 4 Comprehensive resilience level of iron ore products trade network

网络	随机扰动-恢复点	随机扰动-恢复边	均值	度值扰动-恢复点	介值扰动-恢复点	均值
铁矿石	0.5482	0.4443	0.4963	0.1619	0.1320	0.1469
块矿	0.3420	0.5547	0.4483	0.2314	0.0988	0.1651
生铁	0.7236	0.6405	0.6820	0.9532	0.3984	0.6758
废钢	0.4363	0.8366	0.6365	0.1686	0.1139	0.1412
钢材	1.8129	1.0334	1.4231	0.2501	1.2457	0.7479

2022年10月

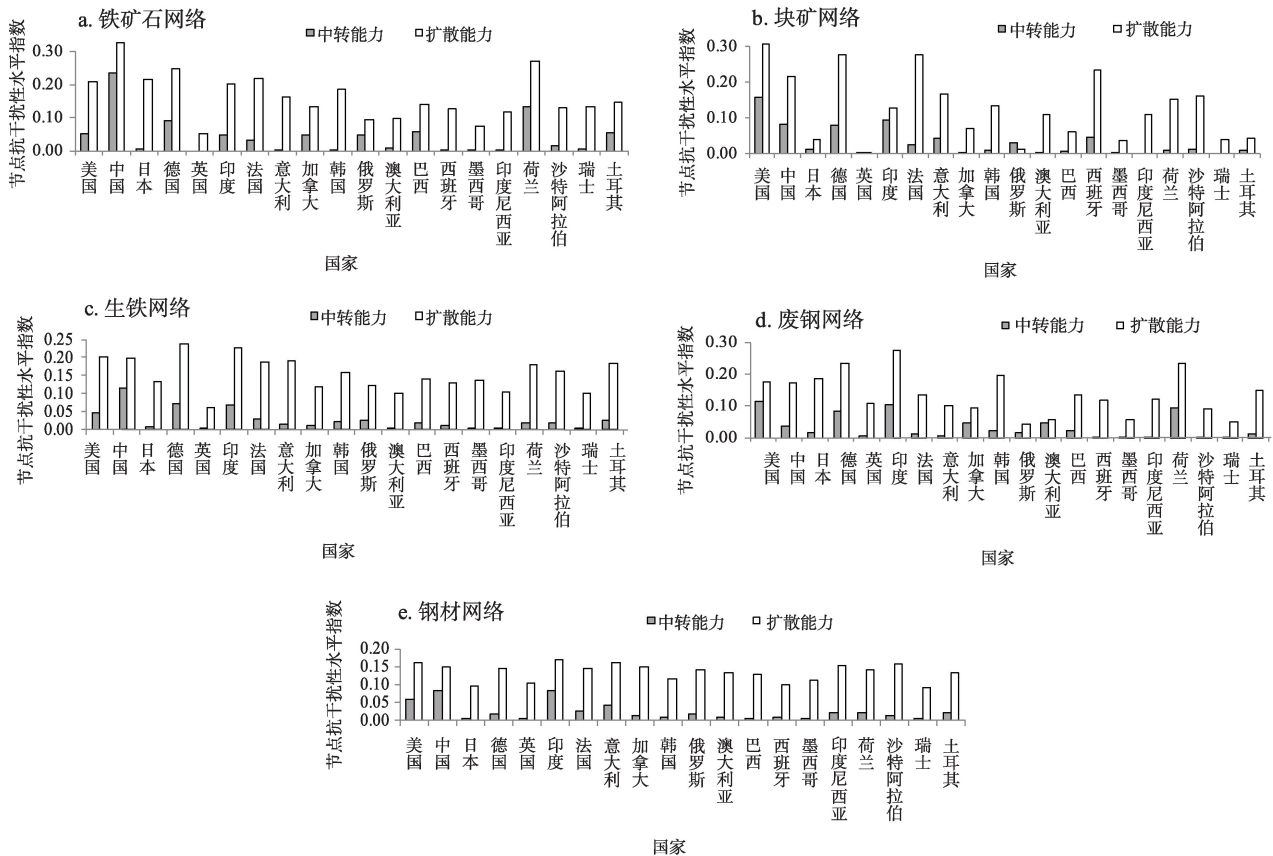


图7 节点抗干扰性指数分布

Figure 7 Distribution of node immunity index

0.2763; 钢材网络中差值为0.0745, 这表明就节点的扩散力而言, 钢材网络中节点影响力趋近, 差异不大。在5类网络中, 节点的中转能力指数分布都落于扩散能力指数下方, 这表明节点的中转能力相较于扩散能力差异小, 且变化幅度不大。在铁矿石网络中, 中转能力指数和扩散能力指数最大值分别为0.2369和0.3275, 高于其他4类网络; 而钢材网络的中转能力指数和扩散能力指数是5类网络中最小的。以上表明在产业链上游贸易网络中, 20大经济体国家桥梁链接作用和影响力作用凸显, 而在产业链下游产品贸易网络中, 由于更多节点的参与加入, 分散削弱其链接和影响力, 使得节点中中转能力和扩散能力指数随着产业链向均衡化方向发展, 也相应使得20大经济体节点的抗干扰性随着上游差异化向下游均衡化方向发展。

3.3.2 节点不同抗干扰性水平表现层级划分

测度全球20大经济体节点在5类网络中的抗

干扰性水平, 并划分层级如表5。在5类网络的节点中转力和扩散力测度中, 中国始终处于第一层或第二层的位置, 这表明中国在铁矿贸易网络中的链接作用和影响力突出, 主要由于中国在网络中对铁的巨大需求, 与网络中其他节点之间形成众多的贸易流联系, 使得自身的地位处于网络核心位置, 抗干扰性较强; 随着产业链的流向, 铁矿产品贸易网络中节点的抗干扰性水平由差异化向扁平化发展, 下游一层和二层的节点数较上游明显增多, 而上游主要以美国、中国、德国、荷兰、印度等节点处于第一层, 这些节点的共同点在于都是铁矿贸易网络中的需求主体, 对铁矿石等原材料的进口依赖使其与其他节点之间联系的深度、传递性等增强, 所以当这些节点受到扰动时会对网络造成强烈的冲击, 网络的连通或其余节点间的联系紧密程度都将受到较大影响。此外, 对于澳大利亚、巴西等铁矿资源大国, 其链接作用和影响力反而较低, 这是由于虽然

表5 节点抗干扰性水平表现分层

Table 5 Node resistance level performance stratification

	铁矿石网络		块矿网络		生铁网络	
	中转能力	扩散能力	中转能力	扩散能力	中转能力	扩散能力
第一层	中国、德国、荷兰	中国、德国、荷兰	美国、中国、德国、印度	美国、中国、德国、法国、西班牙	美国、中国、德国、印度	美国、中国、德国、印度、法国、意大利、韩国、荷兰、沙特阿拉伯、土耳其
第二层	美国、印度 加拿大、俄罗斯、巴西、土耳其、法国	美国、日本、印度、法国 意大利、韩国、加拿大、巴西、土耳其、俄罗斯、澳大利亚	日本、法国、意大利、俄罗斯、西班牙	印度、意大利、加拿大、韩国、澳大利亚、巴西、印度尼西亚、荷兰、沙特阿拉伯	法国、意大利、韩国、俄罗斯、荷兰、土耳其、加拿大、巴西、西班牙、沙特阿拉伯	日本、加拿大、俄罗斯、巴西、西班牙、墨西哥
第三层	日本、英国、意大利、澳大利亚、韩国、墨西哥、印度尼西亚、西班牙、沙特阿拉伯、瑞士	英国、墨西哥	英国、澳大利亚、加拿大、韩国、巴西、墨西哥、印度尼西亚、沙特阿拉伯、荷兰、瑞士、土耳其	日本、英国、俄罗斯、墨西哥、瑞士、土耳其	日本、英国、澳大利亚、墨西哥、印度尼西亚、瑞士	英国、澳大利亚、瑞士、印度尼西亚

	废钢网络		钢材网络	
	中转能力	扩散能力	中转能力	扩散能力
第一层	美国、德国、印度、荷兰	德国、印度、荷兰	美国、中国、印度	美国、中国、德国、印度、法国、意大利、加拿大、印度尼西亚、沙特阿拉伯
第二层	中国、日本、加拿大、韩国、俄罗斯、澳大利亚、巴西、法国、土耳其	美国、中国、日本、英国、法国、韩国、巴西、西班牙、印度尼西亚、土耳其、意大利	法国、意大利、印度尼西亚、荷兰、德国、土耳其、日本、英国、加拿大、韩国、巴西、西班牙	英国、韩国、俄罗斯、澳大利亚、巴西、西班牙、墨西哥、荷兰、土耳其
第三层	英国、意大利、西班牙、墨西哥、印度尼西亚、沙特阿拉伯、瑞士	加拿大、澳大利亚、俄罗斯、墨西哥、瑞士、沙特阿拉伯	澳大利亚、俄罗斯、墨西哥、沙特阿拉伯、瑞士	日本、瑞士

资源储量丰富,也是出口大国,但是主要的贸易联系数量相对较少,因此当受到扰动时,对网络以及其他节点的影响较低。

4 结论

本文基于产业链视角,借助复杂网络理论对国际铁矿产品贸易网络韧性进行测度,主要结论如下:

(1)相较于产业链中下游的生铁、废钢和钢材网络,上游铁矿石和块矿网络的平均聚类系数较低,平均路径长度较长。这说明在铁矿原材料贸易中,国家之间的联系紧密程度一般,且国家之间的通信、传输效率一般。由于受上游资源禀赋的影响,铁矿石的贸易流动比较集中,根据无标度网络特性,网络的功能由关键节点的决定,所以铁矿石网络可以被认为是“英雄式领导”网络,资源禀赋和

需求差异使贸易的交流主要围绕在少数大国之间;而中下游可以被认为是“园丁式领导”网络,下游产品贸易相对分散紧密化,进出口来源国数量较多,贸易联系也多且网络稳定性较强。

(2)铁矿原材料贸易网络相比下游产品贸易网络受到冲击后网络的性能下降更快。一方面,大部分国家对原材料的加工技术受限于资金、产品能耗等因素,导致了上游的铁矿石和块矿网络国家之间贸易关系紧密程度低,若上游原材料遭受冲击,那对于下游产品的贸易也将紧缩,对整条产业链的影响较大,尤其对资源禀赋差且需求强盛国家有很大的供应中断风险。另一方面,下游产品的需求能够刺激上游铁矿石和块矿的需求,若下游需求旺盛,在一定程度上能保障铁矿石和块矿贸易市场稳定。此外,在50%比例的随机性扰动和10%比例的

2022年10月

确定性扰动下,确定性策略仍表现出对网络韧性的影响大于随机性策略,表明大国(地区)之间要使铁矿资源能够朝着稳定、安全、持续的方向发展,则必须秉持互惠互利的贸易原则,摒弃政治冲突、贸易摩擦等思想。

(3)相较产业链5类网络关键节点的抗干扰性,上游铁矿石和块矿网络中节点的抗干扰性相对集中,生铁、废钢和钢材网络中相对分散。这表明,中下游贸易网络的丰富度较大,分散了节点的功能,抗干扰性较均衡化。中国在铁矿石、块矿,生铁和钢材网络中的抗干扰性较强,这主要是由于对原材料的巨大需求和制品的出口使得中国有较多贸易联系的国家,在网络中处于核心位置,从而提升了抗干扰性,但在废钢网络中则表现一般。

参考文献(References):

- [1] 朱学红, 彭婷, 谌金字. 战略性关键金属贸易网络特征及其对产业结构升级的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1489–1503. [Zhu X H, Peng T, Chen J Y. Impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1489–1503.]
- [2] Fagiolo G, Reyes J, Schiavo S. The evolution of the world trade web: A weighted-network analysis[J]. Journal of Evolutionary Economics, 2010, 20(4): 479–514.
- [3] Hao X Q, An H Z, Sun X Q, et al. The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: From network perspective[J]. Resources Policy, 2018, 57: 45–54.
- [4] 李萌, 刘正阳, 王建平. 复杂网络背景下国际铁矿石贸易规律研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(4): 45–52. [Li M, Liu Z Y, Wang J P. The international iron ore trade law under the background of complex network[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(4): 45–52.]
- [5] Song Y T, Wang N, Yu A Q. Temporal and spatial evolution of global iron ore supply-demand and trade structure[J]. Resources Policy, 2019, DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101506.
- [6] 邱语, 刘春学, 马建. “一带一路”沿线国家铁矿石贸易的空间结构及影响因素研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(11): 35–40. [Qiu Y, Liu C X, Ma J. Research on the spatial structure and influencing factors of iron ore trade in “the Belt and Road” countries[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11): 35–40.]
- [7] 赵素彦, 董志良, 刘森. 复杂网络视角下铬铁矿国际贸易时空格局及其演化特征研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 65–71. [Zhao S Y, Dong Z L, Liu S. Study on spatial temporal pattern and evolution characteristics of international chromite trade from the perspective of complex network[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(5): 65–71.]
- [8] Li Q F, Zhong W Q, Wang G S, et al. Material and value flows of iron in Chinese international trade from 2010 to 2016[J]. Resources Policy, 2018, 59: 139–147.
- [9] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1–23.
- [10] 韩增林, 朱文超, 李博. 区域弹性研究热点与前沿的可视化[J]. 热带地理, 2021, 41(1): 206–215. [Han Z L, Zhu W C, Li B. Research hotspots of regional resilience and the visualization of research frontiers[J]. Tropical Geography, 2021, 41(1): 206–215.]
- [11] 袁茵. 供应链中断情境下供应链弹性研究综述[J]. 中国储运, 2022, (6): 195–196. [Yuan Y. A review of supply chain resilience research in the context of supply chain disruption[J]. China Storage & Transport, 2022, (6): 195–196.]
- [12] 汪辉, 徐蕴雪, 卢思琪, 等. 恢复力、弹性或韧性: 社会: 生态系统及其相关研究领域中“Resilience”一词翻译之辨析[J]. 国际城市规划, 2017, 32(4): 29–39. [Wang H, Xu Y X, Lu S Q, et al. A comparative study of Chinese translation of resilience terminology in socio-ecological system and its related research fields[J]. Urban Planning International, 2017, 32(4): 29–39.]
- [13] 王妍, 路兰. “一带一路”国家贸易网络结构特征及韧性研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2021, 37(4): 40–47. [Wang Y, Lu L. Research on structural resilience of trade networks of the countries along the Belt and Road[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2021, 37(4): 40–47.]
- [14] 揭础铭. 中国出口贸易韧性影响因素研究[J]. 中国物价, 2022, (1): 40–42. [Jie C M. Research on the influencing factors of China's export resilience[J]. China Price, 2022, (1): 40–42.]
- [15] 廖敬文, 张可云. 区域经济复原力: 国外研究及对中国老工业基地振兴的启示[J]. 经济学家, 2019, (8): 48–61. [Liao J W, Zhang K Y. Regional economic resilience: Foreign studies and implication for the revitalization of China's old industrial bases[J]. Economist, 2019, (8): 48–61.]
- [16] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773–6784. [Ruan Q T, Xie W, Xu Y, et al. Concept and key features of resilient grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773–6784.]
- [17] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 1–7. [Ju P, Wang C, Xin H H, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 1–7.]
- [18] Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks[J]. Journal of Economic Geography, 2012, 12(1): 1–32.
- [19] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1–7. [Li L G, Zhang P Y, Tan J T, et al. Review on the evolution of resilience concept and re-

- search progress on regional economic resilience[J]. *Human Geography*, 2019, 34(2): 1–7.]
- [20] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 488–502. [Wei Y, Xiu C L. Study on the concept and analytical framework of city network resilience[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(3): 488–502.]
- [21] 韩爱华, 李梦莲, 高子恒. 疫情冲击下经济韧性测度及影响因素分析[J]. *统计与决策*, 2021, 37(18): 85–89. [Han A H, Li M L, Gao Z H, et al. Measurement on economic resilience under epidemic impact and analysis on the influencing factors[J]. *Statistics & Decision*, 2021, 37(18): 85–89.]
- [22] Nan C, Sansavini G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157: 35–53.
- [23] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J]. *地理研究*, 2018, 37(6): 1193–1207. [Peng C, Lin Y Z, Gu C L. Evaluation and optimization strategy of city network structural resilience in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1193–1207.]
- [24] 吕彪, 高自强, 管心怡, 等. 基于日变交通配流的城市道路网络韧性评估[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(6): 1181–1190. [Lv B, Gao Z Q, Guan X Y, et al. Resilience assessment of urban road networks based on day-to-day traffic assignment[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(6): 1181–1190.]
- [25] 韩林, 赵旭东, 陈志龙, 等. 地震灾害下城市供水网络韧性评估及优化研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(2): 135–142. [Han L, Zhao X D, Chen Z L, et al. Seismic resilience assessment and optimization of urban water distribution network[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(2): 135–142.]
- [26] 王兴隆, 苗尚飞. 空域扇区网络结构特性分析及韧性评估[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(5): 904–911. [Wang X L, Miao S F. Structural characteristics analysis and resilience assessment of airspace sector network[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(5): 904–911.]
- [27] 宗会明, 张嘉敏, 刘绘敏. COVID-19疫情冲击下的中国对外贸易韧性格局及影响因素[J]. *地理研究*, 2021, 40(12): 3349–3363. [Zong H M, Zhang J M, Liu H M. Spatial pattern and influencing factors of China's foreign trade resilience under the COVID-19 pandemic[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(12): 3349–3363.]
- [28] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000–2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1515–1526. [Hao M, Chen W Q, Ma Z J, et al. Benefits and risks of China's copper waste and scrap trade during 2000–2015[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1515–1526.]
- [29] 李华姣, 安海忠, 齐亚杰, 等. 基于产业链国际贸易网络的中国优势矿产资源全球贸易格局和竞争力: 以钨为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1504–1514. [Li H J, An H Z, Qi Y J, et al. Trade and competitiveness structure of China's advantageous mineral resources based on the international trade network of industrial chain: A case study of Tungsten[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1504–1514.]
- [30] 牛建英, 周进生, 胡小明, 等. 河北省铁矿资源产业链存在的问题及优化路径研究[J]. *河北地质大学学报*, 2020, 43(1): 70–74. [Niu J Y, Zhou J S, Hu X M, et al. The problems and optimization routes of the iron resource industry chain in Hebei Province[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 2020, 43(1): 70–74.]
- [31] 张招崇, 李厚民, 李建威, 等. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(6): 827–852. [Zhang Z C, Li H M, Li J W, et al. Geological settings and metallogenesis of high-grade iron deposits in China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(6): 827–852.]
- [32] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁, 等. 基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1431–1443. [Liu L T, Shen L, Liu X J, et al. Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1431–1443.]
- [33] Newman M E J. The structure and function of complex networks [J]. *SIAM review*, 2003, 45(2): 167–256.
- [34] Crespo J, Suire R, Vicente J. Lock-in or lock-out: How structural properties of knowledge networks affect regional resilience[J]. *Journal of Economic Geography*, 2014, 14(1): 199–219.
- [35] 谢永顺, 王成金, 韩增林, 等. 哈大城市带网络结构韧性演化研究[J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1619–1631. [Xie Y S, Wang C J, Han Z L, et al. Structural resilience evolution of multiple urban networks in the Harbin–Dalian urban belt[J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(10): 1619–1631.]
- [36] 魏石梅, 潘竟虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度[J]. *地理学报*, 2021, 76(6): 1394–1407. [Wei S M, Pan J H. Network structure resilience of cities at the prefectural level and above in China[J]. *Acta Geographical Sinica*, 2021, 76(6): 1394–1407.]
- [37] 郭卫东, 钟业喜, 冯兴华. 基于脆弱性视角的中国高铁城市网络韧性研究[J]. *地理研究*, 2022, 41(5): 1371–1387. [Guo W D, Zhong Y X, Feng X H. Research on the resilience of China's high-speed rail urban network from the perspective of vulnerability[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(5): 1371–1387.]
- [38] 郭建科, 郭姝, 秦娅风, 等. 中非集装箱航运网络演化及其对经贸联系的支撑能力[J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2145–2157. [Guo J K, Guo S, Qin Y F, et al. Change of China–Africa container shipping network and its ability to support economic and trade ties [J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2145–2157.]
- [39] 何瑶, 杨永春, 郭建科. 中断模拟下的中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性[J]. *资源科学*, 2022, 44(2): 414–424. [He Y, Yang Y C, Guo J K. Vulnerability of the shipping network of China's

- coastal container ports under disruption simulation[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 414–424.]
- [40] 汪艺晗, 杨瑾, 刘其芸, 等. “一带一路”国家粮食贸易下虚拟水和隐含能源流动[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 974–986. [Wang Y H, Yang J, Liu Q Y, et al. Virtual water and embodied energy transfer in grain trade across the countries along the “Belt and Road”[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 974–986.]
- [41] 颜文涛, 卢江林, 李子豪, 等. 城市街道网络的韧性测度与空间解析: 五大全球城市比较研究[J]. *国际城市规划*, 2021, 36(5): 1–12. [Yan W T, Lu J L, Li Z H, et al. Implications of measuring resilience of urban street networks: Comparative study of five global cities [J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(5): 1–12.]
- [42] 刘建, 姚纹倩, 陈妙莲. 贸易摩擦冲击下深化“一带一路”贸易合作研究[J]. *国际贸易*, 2021, (8): 78–88. [Liu J, Yao W Q, Chen M L. Research on deepening trade cooperation of the Belt and Road under the impact of trade conflicts[J]. *Intertrade*, 2021, (8): 78–88.]
- [43] 卢全莹, 柴建, 曹蒲菊, 等. 世界原油供给阻滞对中国宏观经济的冲击效应测算: 以美国对伊朗实施石油制裁为例[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(7): 1735–1754. [Lu Q Y, Chai J, Cao P J, et al. Analysis of the impact of world crude oil supply block on China’s economy: A case study of US oil sanctions against Iran[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2022, 42(7): 1735–1754.]

International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources

YU Yu, MA Daipeng, WANG Xianmei

(School of Business, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

Abstract: As an important strategic resource, the production and consumption of iron ore has significant impacts on the world economy, and it is important to study the resilience of the international trade network of iron ore to ensure the future security of iron ore supply and demand. This study constructed international trade networks by considering five major categories of upstream and downstream products of iron ore, measured the resilience of the networks from both static and dynamic (disruption simulation) aspects, and measured and classified the level of disruption resistance of the top 20 global economies in the networks of the five categories of products. The results show that: (1) The combined resilience levels of the iron ore and lump ore networks are low, the scrap network is average, and the steel and pig iron networks are high, indicating that the iron raw material trade network, which is at the upstream, has low resilience and is severely affected by external disruptions, while the iron product trade networks, which are at the midstream and downstream, have high resilience and are not as severely affected by shocks. (2) In the iron ore, lump ore, pig iron, and steel networks, China’s node resilience level is strong and is positioned in the first tier, but in the second tier in the scrap network, indicating that the development of the scrap industry needs to be emphasized and improved. This paper is of guidance to ensure the security and stability of supply and demand of iron ore products in China.

Key words: iron ore; whole industrial chain; trade network; static resilience; dynamic resilience; disruption simulation