

引用格式: 张宏伟, 黄希宇, 张杨, 等. 全球钨产业链贸易多层网络需求短缺风险传播机制[J]. 资源科学, 2024, 46(5): 948-959.
[Zhang H W, Huang X Y, Zhang Y, et al. Mechanisms of demand shortage risk propagation in the multi-layer trade network of global tungsten industry chain[J]. Resources Science, 2024, 46(5): 948-959.] DOI: 10.18402/resci.2024.05.08

全球钨产业链贸易多层网络需求短缺风险传播机制

张宏伟^{1,2}, 黄希宇¹, 张 杨³, 王心怡¹

(1. 中南大学数学与统计学院, 长沙 410083; 2. 中南大学金属资源战略研究院, 长沙 410083;

3. 湖南工商大学工商管理学院, 长沙 410205)

摘要:【目的】钨在新能源、智能制造以及国防军事中具有不可替代的作用, 全球突发事件频发导致各国(地区)对钨矿需求减少, 厘清贸易需求短缺风险在钨产业链贸易中的动态传播机制可为规避风险和保障中国钨资源供应安全提供决策支持。【方法】本文基于复杂网络分析方法, 结合传染病模型, 构建了全球钨产业链贸易网络风险传播模型, 模拟了与中国出口贸易依赖度排名前5的国家(地区)在发生贸易需求短缺风险时, 风险在钨产业链贸易多层网络中的影响程度和传播路径。【结果】①在不同的需求风险冲击下, 钨产业链贸易网络雪崩规模差别较大, 但整体呈阶梯式下降趋势。且随着需求冲击的加剧, 危机影响逐渐向上游转移, 受影响国家(地区)数量逐渐增加。②钨产业链贸易网络风险传播属于一种“少数影响”现象, 表现出“既稳健又脆弱”的特点。即当美国、英国(上游)、德国(中游)、泰国(下游)等关键贸易国家(地区)出现需求短缺时, 网络是脆弱的, 而非关键贸易国家(地区)出现需求短缺则对其他国家影响不大。③对中国而言, 钨上游主要受到英国(层内传播)、美国和德国(层间传播)的直接影响以及日本、韩国和荷兰(层间传播)的间接影响, 中游主要受到日本(层内传播)的直接影响, 美国和德国(层内传播)的间接影响以及美国、印度尼西亚和泰国(层间传播)的间接影响, 下游主要受到美国(层内传播)的间接影响。【结论】因此, 努力推动中国钨资源出口贸易多元化, 在关注重要贸易国家(地区)政策和供需异动情况的同时注重产业链各环节之间的内在联系, 不断完善钨资源供应链安全审查与风险评估并深化全球供应链合作, 是促进中国钨产业可持续发展和实施精准化风险管理的有效途径。

关键词: 钨产业链; 需求短缺; 贸易依赖关系; 复杂网络; 风险传播; 全球贸易

DOI: 10.18402/resci.2024.05.08

1 引言

钨是一种不可再生的关键金属资源, 钨的主要产品——硬质合金被广泛应用于军工、航空航天、机械加工和电子通讯等领域, 被誉为“工业牙齿”。随着钨在战略性新兴产业中的应用价值不断被发掘, 主要发达国家(地区)纷纷将钨列为关键原材料^[1]。然而, 这种战略金属在地理上的分布是极不均衡的, 根据美国地质调查局^[2]显示, 全球钨矿主要集中在中国、刚果和俄罗斯等少数国家。特别地, 中国

的钨储量占世界钨储量的58%, 居世界首位, 而且供应量达到全球钨产量的85%左右。大多数钨资源匮乏国(地区)需从国际市场进口钨矿或其产品以满足自身的发展需求, 因此, 国际贸易是钨消费国(地区)获得足够资源供应的主要渠道。当今国际贸易环境错综复杂, 2019年以来受新冠疫情反复、俄乌冲突局势、贸易摩擦以及全球通货膨胀与海外主要经济体货币紧缩措施等因素的影响, 钨市场需求持续低迷, 中国钨出口量大幅下降。而当今

收稿日期: 2023-05-15; 修订日期: 2024-03-01

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(72204273); 湖南省教育厅重点项目(22A0454); 湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30709; 2023JJ30205)。

作者简介: 张宏伟, 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 研究方向为资源环境经济学、战略性矿产资源安全。E-mail: hongwei@csu.edu.cn

通讯作者: 张杨, 男, 山东济宁人, 博士, 讲师, 研究方向为技术创新与管理。E-mail: ambition.007@163.com

2024年5月

全球钨贸易格局依然是由进口国(地区)主导,中国作为钨资源主要出口国,对外贸易依赖度较高,国外需求不足对中国供应产生的风险不可小觑^[3]。随着贸易关系的持续复杂化,一个国家(地区)的贸易风险可能会通过国家(地区)之间的贸易关系蔓延到其他国家(地区)甚至全球^[4]。因此研究全球钨贸易网络中需求短缺风险的动态传播机制,对保障未来钨贸易持续发展和构建中国更具韧性的钨贸易体系具有重要意义。

“贸易风险”通常被理解为在贸易过程中由于突然的情况造成的经济和金融上的困难^[5]。目前常用来评估贸易网络风险的指标主要有赫芬达尔-赫希曼指数(HHI)、全球治理指标(WGI)和可替代性指数等^[6],很多学者在此基础上完善指标评估体系,进而评估钴、镍、锂、稀土、铬、锰和锌等矿产的贸易网络风险^[7-11]。这些矿产资源贸易网络风险的研究主要聚焦于静态分析视角,强调评估贸易活动中某个国家(地区)或某个环节的风险程度,缺乏风险的动态传播过程的分析。随着对贸易风险的研究不断深化,部分学者开始关注风险在矿产资源贸易网络中的动态传播效应,即单个国家或少数国家(地区)产生的风险可能会影响其他国家(地区)甚至波及整个贸易网络。

已有研究揭示了全球钴^[12]、石墨^[13]和锂^[14]等贸易网络中的隐藏的系统性风险,模拟分析了风险在贸易网络中的传播过程和影响程度,然而这些研究主要聚焦于风险在单层贸易网络上的动态传播,忽略了风险在产业链不同环节产品贸易网络之间的动态传播过程。近年来,随着新冠疫情、环境污染、政治纠纷等潜在风险的加剧,一些学者开始关注由此引起的供应中断风险在铜产业链^[15]、镍产业链^[16,17]以及锂产业链^[18]贸易多层网络以及锂和钴贸易关联网络^[19]之间的风险传播过程。

本文在以往研究的基础上,探讨了新冠疫情造成的贸易需求短缺风险在钨产业链贸易中的动态传播机制。首先,基于出口贸易依赖关系,识别中国在钨产业链各环节产品的主要出口贸易依赖国家(地区);其次,结合传染病模型与复杂网络理论,动态模拟与中国出口贸易依赖度排名前5的国家(地区)在发生贸易需求短缺风险时,风险在钨产业链多层贸易网络中的传播程度和传播路径,揭示风

险传播的特点;最终提出更有针对性的钨资源风险管理的政策建议。相关结论为优化中国贸易结构,实施精准化的风险管理策略进而保障我国钨资源产业链供应链安全提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文选取全球2021年的钨贸易数据,该数据来自联合国商品贸易数据库(UN Comtrade)。由于难以获取所有细分钨产品的贸易数据,本文选择钨精矿(HS:261100)作为采矿阶段的代表性材料,即钨产业链上游产品;选择仲钨酸铵(HS:284180)、钨粉(HS:810110)、碳化钨粉末(HS:284990)和钨铁(HS:720280)作为冶炼阶段的代表性材料,即钨产业链中游产品,选择钨材制品(HS:810194,810196,810199)、硬质合金(HS:820900)和钨钢合金(HS:722540,722599,722620,722710,722810,722990)作为精加工后的代表性产品,即钨产业链下游产品。

由于不同国家(地区)的钨产品的质量和等级存在很大差异,为了增加数据的可比性,使用货币单位的贸易价值来表示国家(地区)之间的贸易关系。参考Shao等^[20]的研究,中下游阶段的贸易数据是相应类别贸易值的总和。由于不同国家(地区)统计口径的差异,进口国家(地区)和出口国家(地区)公布的贸易数据可能不一致,对此本文统一使用进出口值的最大值作为国家(地区)之间的贸易值。此外,由于国际代码为“其他地区”的贸易流仅占全球贸易量的极少部分,本文在构建钨全球贸易网络时,将“其他地区”从国家(地区)节点集里剔除^[21]。

2.2 贸易依赖关系测度

本文通过贸易依赖关系识别可能影响中国钨贸易的潜在初始风险传播源国家(地区)。贸易依赖度可以刻画不同贸易国(地区)之间的出口和进口贸易依赖关系的程度,与贸易伙伴之间实际的进出口量不同,该指标综合考虑了第三方贸易国(地区)对两国(地区)贸易关系的影响,为贸易伙伴之间的贸易关系提供更综合精确的测度,因此,在需求短缺风险爆发源的选取上,结合中国是主要的钨资源出口国,本文选取与中国出口贸易依赖度排名前5的国家作为初始风险传播源。

基于Emerson对依赖关系的定义^[22],结合资源依赖理论,并参考刘林青等^[23]对贸易依赖关系的测

度,定义 ETD_{ij} 为国家(地区) i 对国家(地区) j 的出口贸易依赖度。出口贸易依赖度 ETD_{ij} 可以利用下列公式计算:

$$ETD_{ij} = P_{ij}^2 (C_{pi}/C_{qj}) \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为国家(地区) i 对国家(地区) j 的出口占 i 的总出口比重; C_{pi} 为国家(地区) i 的出口集中度; C_{qj} 为国家(地区) j 的进口集中度。 P_{ij} 的计算公式为:

$$P_{ij} = E_{ij}/E_i \quad (2)$$

式中: E_{ij} 为国家(地区) i 对国家(地区) j 的出口量; E_i 为国家(地区) i 的总出口量。

出口集中度 C_{pi} 和进口集中度 C_{qj} 的计算公式如下:

$$C_{pi} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{E_{ki}}{E_i} \right)} - \sqrt{\frac{1}{n}}}{1 - \sqrt{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

$$C_{qj} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{I_{kj}}{I_j} \right)} - \sqrt{\frac{1}{n}}}{1 - \sqrt{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

式中: n 为总的进/出口国(地区)数量; E_{ki} 为第三方贸易国(地区) k 向国家(地区) i 出口量; I_{kj} 为第三方贸易国(地区) k 从国家(地区) j 的进口量; I_j 为国家(地区) j 的总进口量。

2.3 产业链贸易多层网络构建

钨产业链贸易多层网络由横向的全球贸易网络和纵向的产业链层间网络构成,采用赋权法构建有向加权网络 $G=(N, E_1, E_2)$ 。 N 为参与全球钨贸易的国家(地区)组成的节点集, E_1 为全球钨上游、中游和下游产品贸易网络中节点之间的层内连边集,层内连边表示国家(地区)之间的贸易关系,连边的方向与贸易方向相对应,连边的权重为贸易价值; E_2 为上层网络和下层网络节点之间的层间连边集,层间连边表示国家(地区)的产业链上下游之间的投入产出关系,权重为上下层产品之间的转化率;结合横向的全球贸易关系和纵向的各层产品间的投入产出关系,形成了完整的全球钨产业链贸易多层网络。

2.4 产业链贸易网络风险传播模型构建

重大突发事件发生时,各贸易国(地区)往往会调整贸易策略以应对危机。各经济体处于错综复杂的网络中,一个国家(地区)发生危机,可能会对

其他国家(地区)产生影响,导致风险在全球贸易网络中传播。新冠疫情等突发事件导致的需求短缺风险能够在上、中、下游贸易网络层内进行传播,也能沿着产业链向上一层贸易网络传播(上游贸易网络除外)。举例说明:假设与中国有钨贸易关系的某国(地区)由于疫情的影响,对钨粉的需求大幅度下降,该国(地区)成为需求短缺风险的初始传播源,一方面,与该国(地区)存在贸易关系的中国无法顺利将本国的钨粉出口到该国(地区),使得钨粉在中国囤积,发生供应过剩情况,造成经济损失,而且由于供应过剩,中国对于钨粉的需求也会下降,即中国成为新的传播源国家,将影响其他国家(地区)对中国出口钨粉,进而引发需求短缺风险在全球钨粉贸易网络中传播。另一方面,由于钨产品上下游之间存在投入产出关系,中国将减少钨粉的上游产品——钨精矿的生产投入量,以降低钨粉产量,防止其继续囤积,当钨精矿的生产投入量减少到一定程度时,钨精矿将发生囤积,中国对钨精矿的需求将减少,从而成为钨精矿贸易网络的需求短缺风险传播源。

构建风险传播模型时,作出如下假设:面对冲击,国家(地区)只对产品贸易进行调整,而不改变产业链上各层产品的投入产出关系;在风险传播前后,各国(地区)的产品存量保持不变;若风险源国家(地区)的产品出口量减少,则该国(地区)将同步减少进口量和产量;每个国家(地区)上下游产品之间的投入产出关系一致。

2.4.1 产业链贸易网络风险层内传播规则

从理论角度来看,钨需求短缺风险的蔓延可以被定义为有向加权贸易网络上的雪崩过程,具体传播规则如下:

(1)网络中所有节点状态均正常,定义 S_j^{out} 为节点 j 的总出口强度,即国家(地区) j 的产品总出口量, w_{ji} 为节点 j 到 i 的出口量(图1a)。

(2)定义冲击系数 α 为受影响的国家(地区)进口量减少的比例,代表贸易风险的大小。设节点 i 为初始的风险传播源,其状态设为异常,即国家(地区) i 的产品进口量减少 α ,会导致向该国(地区)出口产品的国家(地区) j 的出口量相应减少 αw_{ji} 。其中, $\alpha \in [0,1]$,是一个可调参数。所有向国家(地区) i 出口的连边的权重 w 都减少 α (图1b)。

2024年5月

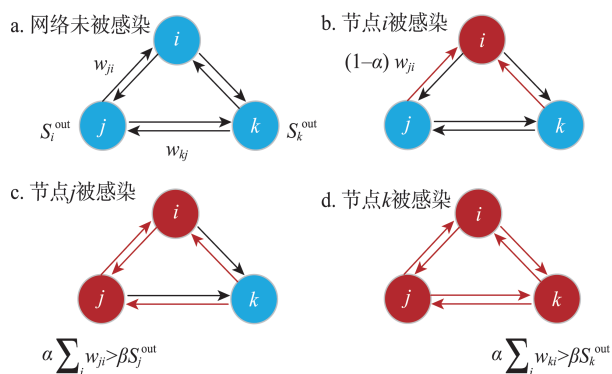


图1 需求短缺下单层贸易网络风险传播模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of risk propagation model for single-layer trade network under demand shortage

(3)定义感染阈值 β ,代表贸易国家(地区)的抗风险能力。当国家(地区) j 的累积出口损失值 $\alpha \sum_i w_{ji}$ 超过国家(地区)总出口强度 S_j^{out} 的 β 倍,即 $\alpha \sum_i w_{ji} > \beta S_j^{\text{out}}$,则国家(地区) j 成为新的风险传播源。其中, $\beta \in [0,1]$, β 也是一个可调参数(图1c)。

(4)沿着产品贸易关系,重复上述步骤,直到贸易网络中没有新增的风险源,模拟过程终止(图1d)。

2.4.2 产业链贸易网络风险层间传播规则

基于产业链上下游产品之间的投入产出关系,一国(地区)对于某产品的需求出现短缺,即该国(地区)成为该产品贸易网络的初始风险源,风险不仅会在该层贸易网络的贸易伙伴国(地区)之间传播,也会影响该层贸易网络对应的上层贸易网络(全球钨上游产品贸易网络除外),最终影响全球钨产业链贸易多层网络,具体传播原理如下:

(1)定义 $S_{j,l-1}^{\text{out}}$ 为国家(地区) j 在 $l-1$ 层的总出口强度, $w_{j,j}^{l,l-1}$ 为国家(地区) j 生产 l 层产品对应的 $l-1$ 层产品投入量, $w_{j,m,l-1}$ 为 $l-1$ 层国家(地区) j 向国家(地区) m 的出口量。

(2)在贸易多层网络中,设 l 层的国家(地区) i 为风险的初始传播源,则风险在 l 层的传播过程与上述单层贸易网络风险传播一致。

(3)当 l 层的国家(地区) j 受影响成为新的传播源时,为保持 l 层产品存量 Q_j^l 稳定,国家(地区) j 会相应减少 $l-1$ 层产品的投入量 $\Delta w_{j,j}^{l,l-1}$,以降低 l 层产品的产量。

(4)如果国家(地区) j 在 $l-1$ 层产品的投入减少量超出一定比例,即 $\Delta w_{j,j}^{l,l-1} > \beta(w_{j,j}^{l,l-1} + S_{j,l-1}^{\text{out}})$,则国

家(地区) j 成为 $l-1$ 层网络中的风险传播源。

(5)如果国家(地区) j 在 $l-1$ 层产品的投入减少量不满足上述条件,即 $\Delta w_{j,j}^{l,l-1} < \beta(w_{j,j}^{l,l-1} + S_{j,l-1}^{\text{out}})$;而国家(地区) j 在 $l-1$ 层产品贸易网络中受风险源国家(地区) m 的影响,其 $l-1$ 层产品的出口量减少 $\alpha w_{j,m,l-1}$,同时累积出口损失值 $\alpha \sum_m w_{j,m,l-1}$ 未超出一定比例,即 $\alpha \sum_m w_{j,m,l-1} < \beta(w_{j,j}^{l,l-1} + S_{j,l-1}^{\text{out}})$;但两者之和满足: $\alpha \sum_m w_{j,m,l-1} + \Delta w_{j,j}^{l,l-1} > \beta(w_{j,j}^{l,l-1} + S_{j,l-1}^{\text{out}})$,那么国家(地区) j 也将成为 $l-1$ 层网络中新的风险传播源。

(6)沿着产品贸易关系和产业链,重复上述步骤,一直到贸易多层网络中没有新增风险源,则风险传播停止。

3 结果与分析

3.1 全球钨贸易多层网络初始风险源确定

基于出口贸易依赖关系对2021年中国出口依赖国家(地区)进行了排名,发现与中国钨上游产品出口贸易依赖度排名前5的国家(地区)是英国、印度尼西亚、美国、意大利和老挝;与中国钨中游产品出口贸易依赖度排名前5的国家(地区)是日本、美国、韩国、德国和荷兰;与中国钨下游产品出口贸易依赖度排名前5的国家(地区)是泰国、印度尼西亚、韩国、美国和越南,这些国家的钨资源需求对中国钨产业供需平衡有着不可忽视的影响,若这些国家的需求减少,极有可能导致中国产生供应危机。因此,分别选择与中国钨上、中、下游产品贸易出口依赖度排名前5的国家(地区)作为全球钨上、中、下游产品贸易网络的初始风险源。由风险源导致的失效国家(地区)的个数称为雪崩规模,其占网络中国家(地区)总数的比例为雪崩率,雪崩率可以用于观察需求短缺风险在网络中的传播范围。定义风险脆弱指数 k 为冲击系数 α 与感染阈值 β 之比。 k 值越大,表示贸易网络在面对风险时越脆弱。按照0.05的步长在(0.05, 1)范围内逐步增加 α 和 β 的取值,模拟不同风险脆弱指数 k 下风险在钨产业链贸易网络中的传播过程,探究风险传播对全球钨贸易多层网络的冲击并重点讨论风险对中国的影响。

3.2 全球钨上游产品贸易网络风险传播

如图2所示,横轴为贸易网络中的每个国家(地

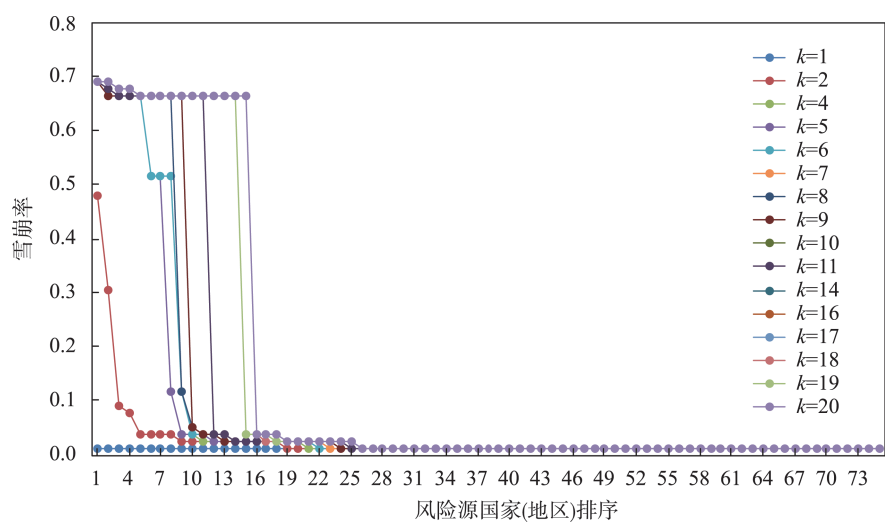


图2 全球钨上游贸易网络中风险源需求减少导致的该层网络雪崩率

Figure 2 Avalanche ratio of the global upstream tungsten trade network caused by the demand reduction by risky sources in this layer of the network

区)作为初始风险传播源引发的雪崩率从高到低的排名,纵轴为雪崩率,该图展示了不同风险脆弱指数 k 值下,各国(地区)减少钨上游产品进口时引发的全球钨上游产品贸易网络风险传播情况。可以发现,对于不同的风险传播源,钨上游产品贸易网络雪崩规模差别较大,整体呈阶梯式下降趋势。当 $k=1$ 时,各贸易国(地区)需求减少对贸易网络中的其他国家(地区)没有影响,表明钨上游产品贸易的出口国(地区)基本上不依赖单一进口国(地区)。当风险脆弱指数 $k=2$ 时,钨上游产品贸易网络的最大雪崩率接近50%,当 $k=4$ 时,对贸易网络影响最大的几个国家(地区)需求减少将影响70%的参与国(地区),此后随着 k 的增大,网络最大雪崩率不再显著增加,即当 k 增至某个值时,贸易网络的雪崩率就趋近于最大值,该 k 值就定义为特定风险脆弱指数。可见全球钨上游网络风险传播的特定风险脆弱指数为4。

以英国、印度尼西亚、美国、意大利和老挝作为钨上游产品贸易网络的初始风险源,在特定风险脆弱指数 k 为4的情况下,钨上游产品贸易风险传播的雪崩规模和传播步长如表1所示。可以发现,意大利不会对网络中的其他国家(地区)产生影响。印度尼西亚和老挝只会影响与其贸易最密切的伙伴国(地区)。图3展示了 $k=4$ 时,英国作为初始风险源的风险传播路径。经过4轮迭代,风险扩散到网络中65%以上的参与国(地区),主要传播过程发生

表1 风险脆弱指数为4时钨上游产品风险传播情况

Table 1 Risk propagation of tungsten upstream products with a risk vulnerability index of 4

传播源头	风险脆弱指数	雪崩规模/个	传播步长/步	每步传播影响的国家(地区)数量(N_i)/个			
				N_1	N_2	N_3	N_{4+}
英国	$k=4$	49	4	3*	19	19	8
印度尼西亚	$k=4$	1	1	1			
美国	$k=4$	8	2	7	1		
意大利	$k=4$	0	0				
老挝	$k=4$	1	1	1			

注: N_{4+} 列表示步长 ≥ 4 之后的影响国家数量之和;*号标注表示该轮传播中国为新的风险传播源。传播步长为受风险源影响,一直到传播过程结束的风险传播时间。下同。

在第二和第三次迭代中。风险将首先传播到与英国具有最大钨矿贸易关系的以色列、中国和奥地利。然后,这些国家将风险传播到澳大利亚、玻利维亚和缅甸等国(地区),随后,风险波及荷兰、美国 and 秘鲁等国家(地区),最后传播至卢森堡、巴西等国(地区)。此外,英国作为钨上游产品贸易网络初始风险传播源主要影响亚洲、北美洲和澳大利亚,对欧洲和非洲的国家(地区)的钨上游产品贸易影响并不显著。

3.3 全球钨中游产品贸易网络风险传播

当全球钨中游产品贸易网络发生需求短缺风险时,风险不仅会在该层网络传播,还会沿着产业链向上一层网络传播,即风险会传播到全球钨上游产品贸易网络。

2024年5月

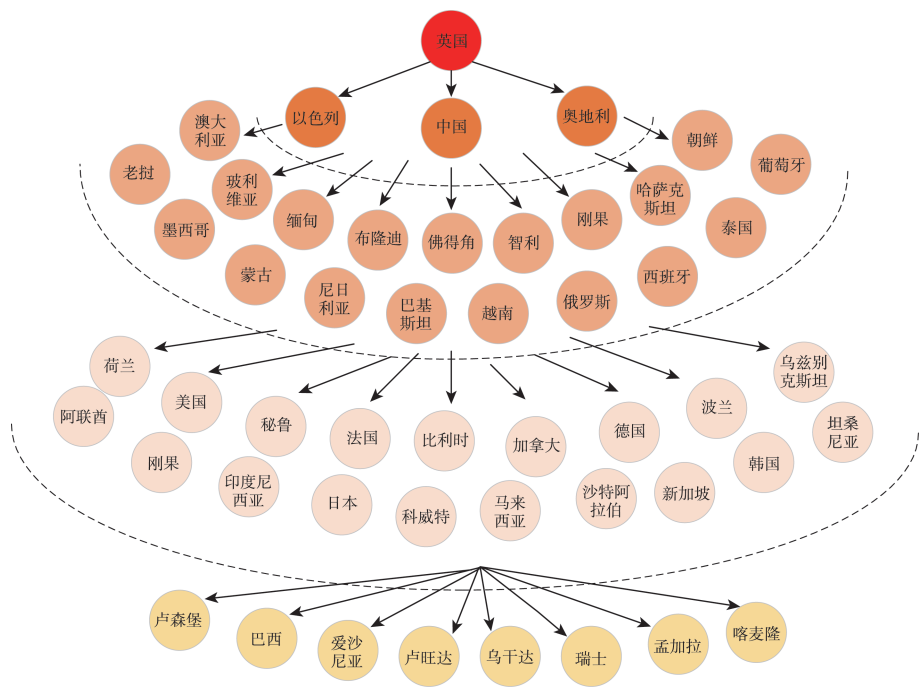


图3 英国作为风险传播源时钨上游产品贸易风险传播路径

Figure 3 Risk propagation path of tungsten upstream products trade when the UK serves as a risk propagation source
注:英国钨上游产品进口减少40%,网络中所有贸易国家的感染阈值为10%,通过4轮迭代后的贸易风险传播路径图。

3.3.1 全球钨中游产品贸易网络风险层内传播

由图4可知,当风险脆弱指数 $k=1$ 时,各贸易国(地区)钨需求减少对贸易网络中的其他国家(地区)几乎没有影响。当 k 增加到5时,对贸易网络影响最大的几个国家(地区)需求减少将影响贸易网络中超过40%的国家(地区),随着 k 值增大,网络的最大雪崩率基本维持在同一水平,故定义 $k=5$ 为中游网络风险传播的特定风险脆弱指数。当 $k=20$ 时,对

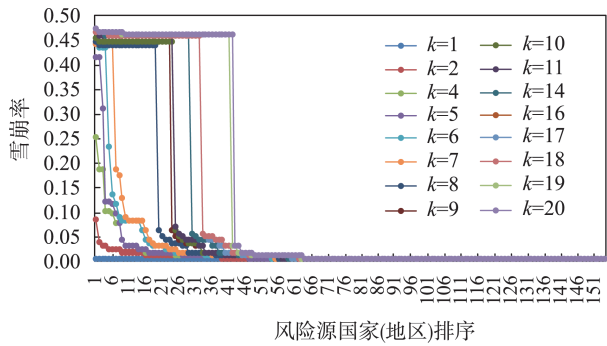


图4 全球钨中游贸易网络中风险源需求减少导致的该层网络雪崩率

Figure 4 Avalanche ratio of the global midstream tungsten trade network caused by the demand reduction by risky sources in this layer of the network

网络影响最大的42个国家(地区)作为风险源,能够导致贸易网络中的大部分国家(地区)受影响。

以日本、美国、韩国、德国和荷兰作为钨中游产品贸易网络的初始风险源,在特定风险脆弱指数 $k=5$ 的情景下,钨中游产品贸易风险传播情况如表2所示。日本作为初始风险源时,风险传播共经历3步,影响11个国家(地区),如图5所示。日本的风险传播路径主要聚集在欧洲和亚洲地区。日本首先影响中国和印度尼西亚,之后将风险传播到菲律宾、西班牙和爱尔兰等地,最后影响泰国、葡萄牙、丹麦和新西兰;美国能够影响63个国家(地区),而且在风险传播第三轮影响中国;韩国作为初始风险源则

表2 风险脆弱指数为5时钨中游产品风险传播情况

传播源头	风险脆弱指数	雪崩规模/个	传播步长/步	每步传播影响的国家(地区)数量(N_i)/个			
				N_1	N_2	N_3	N_{4+}
日本	$k=5$	11	3	2*	5	4	
美国	$k=5$	63	6	10	23	19*	11
韩国	$k=5$	0	0				
德国	$k=5$	47	6	13	12	13	8*
荷兰	$k=5$	14	3	8	5	1	

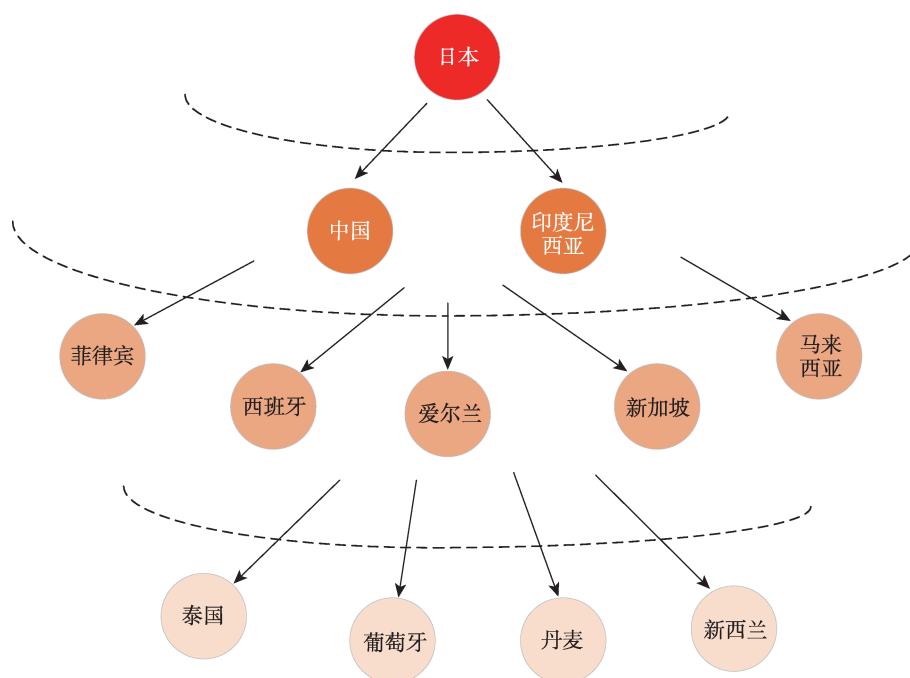


图5 日本作为风险传播源时钨中游产品贸易风险传播路径

Figure 5 Risk propagation path of tungsten midstream products trade when Japan serves as a risk propagation source

注:日本钨中游产品进口减少50%,网络中所有贸易国家的感染阈值为10%,通过3轮迭代后的贸易风险传播图。

不会对网络中的其他国家(地区)产生影响;德国和荷兰作为初始风险源,经历6次和3次风险迭代,分别影响47和14个国家(地区)。

3.3.2 全球钨中游产品贸易网络风险层间传播

参考 Leal-Ayala 等^[24]的研究,得出上游钨矿石至中游产品的平均转化率为0.73,模拟不同风险脆弱指数 k 值的情景下,钨中游产品需求减少时,全球钨上游产品贸易网络的风险传播情况。

图6展示了不同风险脆弱指数 k 值下,钨中游产品需求减少引发的钨上游产品全球贸易网络风险传播情况。可以发现,在不同的钨中游产品风险冲击下,钨上游产品贸易网络雪崩规模差别较大,整体呈阶梯式下降趋势。当 $k=1$ 时,各贸易国(地区)需求减少不会对上游产品全球贸易产生影响。当 $k=2$ 时,对贸易网络影响最大的几个国家(地区)作为中游网络初始风险传播源可导致钨上游产品贸易网络中最多有12%的贸易国(地区)受到影响。当 k 增至6时,影响力最大的几个国家(地区)需求减少,将最多影响到上游网络88%的参与国(地区)。此后,随着风险脆弱指数 k 的增加,网络最大雪崩率不再上升,故定义 $k=6$ 为中游网络贸易风险影响上游网络的特定风险脆弱指数。

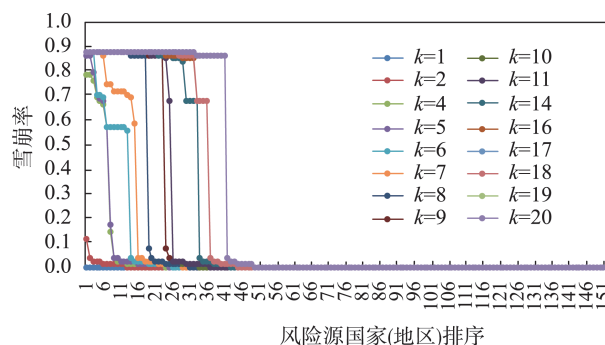


图6 全球钨中游贸易网络中风险源需求减少导致的上游贸易网络雪崩率

Figure 6 Avalanche ratio of the global upstream tungsten trade network caused by the demand reduction by risky sources in midstream tungsten trade network

以日本、美国、韩国、德国和荷兰为钨中游产品贸易网络的初始风险源,在特定风险脆弱指数 k 为6的情况下,钨上游产品贸易网络的雪崩规模和风险传播步长如表3所示。美国和德国分别作为钨中游产品贸易网络初始风险源时,能在第一轮风险传播中影响中国的上游产品贸易。图7展示了 $k=6$ 时日本中游产品需求减少对上游产品贸易网络的风险传播路径。经过4轮迭代,风险扩散到网络中50%

2024年5月

表3 风险脆弱指数为6时钨中游产品风险传播影响上游国家(地区)情况

传播源头	风险脆弱指数	雪崩规模/个	传播步长/步	每步传播影响的国家(地区)数量(N_i)/个			
				N_1	N_2	N_3	N_{4+}
日本	$k=6$	43	4	20	16*	6	1
美国	$k=6$	66	5	24*	34	5	3
韩国	$k=6$	43	6	17	18*	6	2
德国	$k=6$	66	6	30*	25	8	3
荷兰	$k=6$	52	5	23	14*	12	3

以上的上游参与国(地区)。具体的传播路径是,风险将首先传播到比利时、德国、法国等20个国家(地区),在第二轮传播中,受影响国包括中国、加拿大、刚果等16个国家(地区),第三轮传播至澳大利亚、日本等6个国家(地区),最后传播至尼日利亚停止。韩国与荷兰作为钨中游产品贸易初始风险源时,分别能够影响43和52个上游国家(地区)。

3.4 全球钨下游产品贸易网络风险传播

当全球钨下游产品贸易网络发生需求短缺风险时,风险不仅会在该层网络传播,还会沿着产业链向上一层网络传播,即风险会传播到全球钨中游

产品贸易网络。

3.4.1 全球钨下游产品贸易网络风险层内传播

由图8所示,与上游和中游网络风险传播影响类似,当风险脆弱指数 k 为1时,贸易国(地区)需求减少对其他国家(地区)几乎没有影响。随着风险脆弱指数 k 的增加,受到下游产品需求减少风险影响的国家数逐渐增加。 k 增加到8时,对贸易网络影响最大的几个国家(地区)作为初始风险源,网络中超过70%的贸易国(地区)会受到影响,且随着 k 值增大,最大雪崩率稳定在70%左右,故定义下游网络风险传播的特定风险脆弱指数为8。其他非关键国家(地区)需求减少时,雪崩率迅速下降。

以泰国、印度尼西亚、韩国、美国和越南作为钨下游产品贸易网络的初始风险源,当 $k=8$ 时,钨下游产品贸易网络的雪崩规模和风险传播步长如表4所示。泰国、印度尼西亚分别作为初始风险源,经历5次和4次风险迭代,影响14个国家(地区);韩国作为初始风险源只影响1个国家;美国作为初始风险源时,风险经过7次风险迭代,共影响152个国家(地区),而且在第二轮迭代中影响中国,紧接着风险传播至欧洲和美洲;越南作为初始风险源则不会

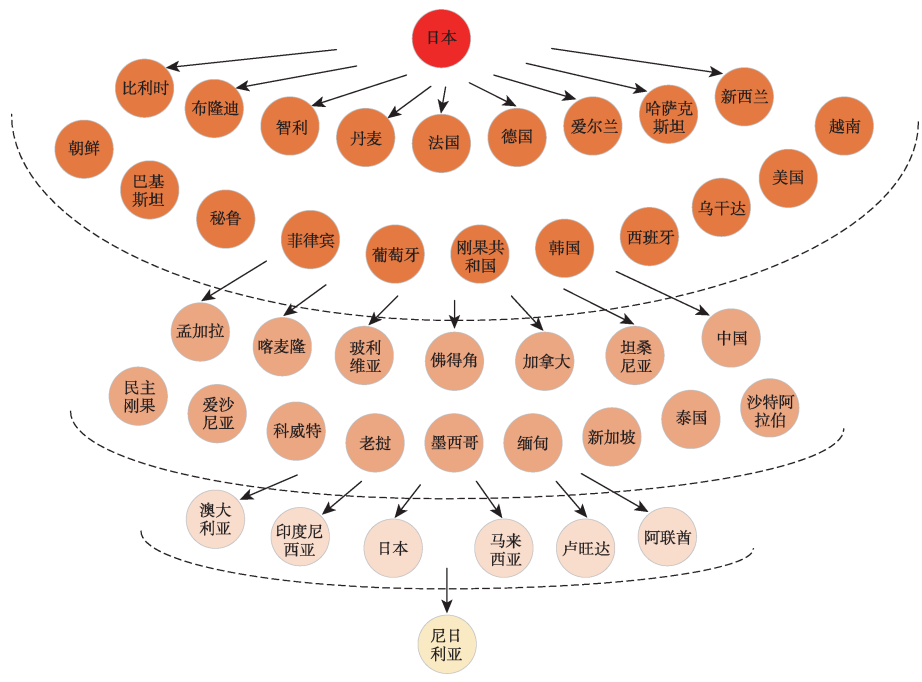


图7 日本作为中游风险传播源时钨上游产品贸易风险传播路径

Figure 7 Risk propagation path of tungsten upstream products trade when Japan serves as a midstream risk propagation source
注:日本钨中游产品进口减少60%,网络中所有贸易国家的感染阈值为10%,通过4轮迭代后的上游产品贸易风险传播路径图。

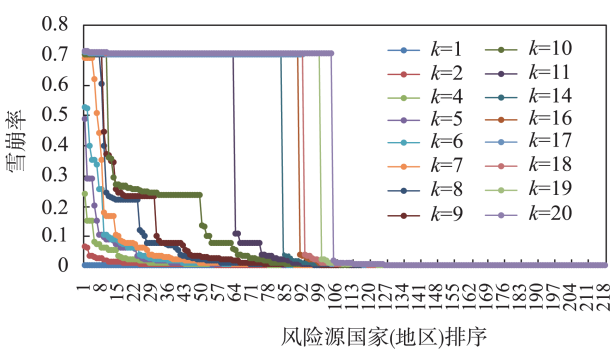


图8 全球钨下游贸易网络中风险源需求减少导致的该层网络雪崩率

Figure 8 Avalanche ratio of the global downstream tungsten trade network caused by the demand reduction by risky sources in this layer of the network

对网络中的其他国家(地区)产生影响。

3.4.2 全球钨下游产品贸易网络风险层间传播

参考 Leal-Ayala 等^[24]的研究,得出中游产品至下游产品的平均转化率为0.95,模拟不同风险脆弱指数 k 值的情景下,钨下游产品需求减少时,全球钨中游产品贸易网络的风险传播情况。

由图9可知,当 $k=1$ 时,各贸易国(地区)的钨下游产品需求减少不会对中游产品贸易网络产生影响。随着 k 的增加,最大雪崩率不断增加。当 k 增加到7时,对贸易网络影响最大的几个国家(地区)需求减少对钨中游产品贸易网络的影响超过85%,并且当 k 继续增大,雪崩率不再显著增大,故定义 $k=7$ 为下游网络风险影响中游网络的特定风险脆弱指数。

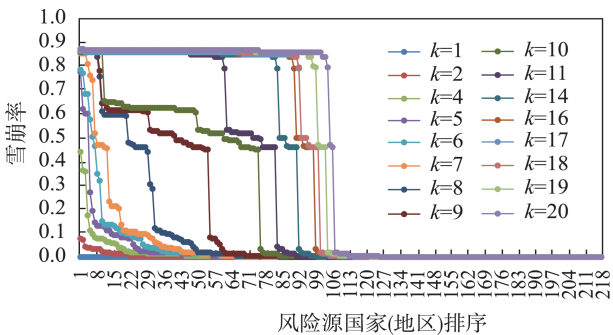


图9 全球钨下游贸易网络中风险源需求减少导致的中游贸易网络雪崩率

Figure 9 Avalanche ratio of the global midstream tungsten trade network caused by the demand reduction by risky sources in downstream tungsten trade network

表4 风险脆弱指数为8时钨下游产品风险传播情况

Table 4 Risk propagation of tungsten downstream products with a risk vulnerability index of 8

传播源头	风险脆弱指数	雪崩规模/个	传播步长/步	每步传播影响的国家(地区)数量(N_i)/个			
				N_1	N_2	N_3	N_{4+}
泰国	$k=8$	14	5	2	4	4	4
印度尼西亚	$k=8$	14	4	4	5	3	2
韩国	$k=8$	1	1	1			
美国	$k=8$	152	7	18	26*	40	68
越南	$k=8$	0	0				

以泰国、印度尼西亚、韩国、美国和越南为钨下游产品贸易网络的初始风险源,在特定风险脆弱指数 $k=7$ 的情景下,钨中游产品贸易网络的雪崩规模和风险传播步长如表5所示。泰国作为钨下游产品贸易网络初始风险源,风险传播经过7轮迭代,共影响71个国家(地区),印度尼西亚作为钨下游产品贸易网络初始风险源,风险传播经过5轮迭代,影响到中游网络中16个参与国(地区),这些国家(地区)主要聚集在亚洲、欧洲和澳洲,韩国和越南分别作为全球钨下游产品贸易网络的初始风险源,不会对中游网络中的其他国家(地区)产生影响。美国作为钨下游产品贸易网络初始风险源,能够影响131个中游国家(地区),并且在风险传播的第二轮影响到中国。

表5 风险脆弱指数为7时钨下游产品风险传播影响中游国家(地区)情况

Table 5 Risk propagation of tungsten downstream products affecting midstream countries (regions) with a risk vulnerability index of 7

传播源头	风险脆弱指数	雪崩规模/个	传播步长/步	每步传播影响的国家(地区)数量(N_i)/个			
				N_1	N_2	N_3	N_{4+}
泰国	$k=7$	71	7	5	6	6	54*
印度尼西亚	$k=7$	16	5	5	2	3	6*
韩国	$k=7$	0	0				
美国	$k=7$	131	7	26	34*	26	45
越南	$k=7$	0	0				

4 结论和政策建议

4.1 结论

本文以2021年钨资源全球贸易数据为基础,运用复杂网络分析方法结合传染病模型,构建了钨产业链贸易网络风险传播模型,揭示了与中国出口贸

2024年5月

易依赖度排名前5的国家(地区)发生需求短缺冲击时,风险在全球钨产业链上、中、下游贸易网络层内和层间传播规律。主要结论如下:

(1)在不同的需求风险冲击下,无论是层内传播还是层间传播,钨产业链贸易网络雪崩规模差别较大,但整体呈阶梯式下降趋势。且随着需求冲击的加剧,危机影响逐渐向上游转移,受影响国家(地区)数量逐渐增加。

(2)钨产业链贸易网络风险传播属于一种“少数影响”现象,表现出“既稳健又脆弱”的特点。即当美国、英国(上游),德国(中游),泰国(下游)等关键贸易国家(地区)出现需求短缺时,网络是脆弱的,而非关键贸易国家(地区)出现需求短缺则对其他国家影响不大。

(3)对中国而言,钨上游主要受到英国(层内传播),美国和德国(层间传播)的直接影响以及日本、韩国和荷兰(层间传播)的间接影响,中游主要受到日本(层内传播)的直接影响,美国和德国(层内传播)的间接影响以及美国、印度尼西亚和泰国(层间传播)的间接影响,下游主要受到美国(层内传播)的间接影响。

4.2 政策建议

中国作为世界上最大的钨矿资源出口国,钨产业具有较高的出口依赖,故中国应该不断提高应对外国需求减少带来的需求风险冲击的能力,保障国家贸易安全。因此本文提出以下相关的政策建议:

(1)努力推动中国钨资源出口贸易多元化。在全球经济一体化的背景下,寻求进出口贸易多元化是应对贸易风险的有效手段。除了与中国主要钨产品出口依赖国家(地区)保持良好的贸易关系外,中国应拓宽钨产品出口渠道以分散需求减少的风险,摆脱单一化出口来源的约束,而且还需要关注贸易环境,及时发现贸易依赖网络中的重要经济体,如关注美国、德国等国家(地区)的资源供需情形、贸易状态和相关政策的变化。此外,中国还应坚持完善和发展钨产业,增强相关技术创新能力,提升产品的竞争力,巩固在钨资源国际贸易中的地位。

(2)应持续关注重要贸易国家(地区)政策和供需异动情况,在防范贸易风险的同时,要注重产业

链之间各环节的内在联系。例如,从层内风险传播角度,中国的上游产品贸易需重点关注英国、美国等国家(地区),中游产品贸易需重点关注日本、美国 and 德国等国家(地区),下游产品贸易需重点关注美国等国家(地区);从层间网络风险传播角度,中国的上游产品出口贸易特别需要防范来自美国 and 德国中游产品需求减少的风险;中国的中游产品出口贸易特别需要防范来自美国、印度尼西亚和泰国的下游产品需求减少的风险。同时,间接链路在风险的传播中起着关键作用,为了更好地管理钨需求短缺风险,建议政府和钨等相关协会特别监测间接风险源。

(3)不断完善钨资源供应链安全审查与风险评估,深化全球供应链合作。实时动态监测钨资源的全生命周期物质流动,预警钨资源高端领域的供需缺口,减少其低端应用,通过各部门的协同行动来实现对钨资源供应链的全面把控,完善对钨等战略性矿产资源供应链的审查环节,系统评估钨等战略性矿产供需和价格变动对国家安全与经济发展的风险;积极推进与全球钨等战略性矿产资源大国的战略合作,打造稳固的战略性矿产资源国际合作体系,不断优化钨等战略性矿产资源的全球供应链布局,完善钨资源战略储备制度,以防范未来钨资源供应不稳定的风险。

参考文献(References):

- [1] British Geological Survey. Risk List 2015[R/OL]. (2016-04-19) [2023-05-27]. https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/statistics/risk_list_2015.pdf.
- [2] United States Geological Survey (USGS). Mineral Commodity Summaries 2023[R/OL]. (2023-01-31) [2023-05-27]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>.
- [3] 朱文兴,殷莲甜,刘道林,等.全球钨制品贸易格局及中国钨制品贸易结构优化研究[J].当代财经,2022,(8):112-123. [Zhu W X, Yin L T, Liu D L, et al. Research on the global trade pattern of tungsten products and the optimization of China's tungsten products trade structure[J]. Contemporary Finance and Economics, 2022, (8): 112-123.]
- [4] Burkholz R, Schweitzer F. International crop trade networks: The impact of shocks and cascades[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(11): 114013.
- [5] Fang F X, Mei Z W. Risk Analysis and Countermeasures for Interna-

- tional Trade under the Economic Downturn Pressure[C]. Amstelkade: Atlantis Press, 2016.
- [6] Van Den Brink S, Kleijn R, Sprecher B, et al. Identifying supply risks by mapping the cobalt supply chain[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104743.
- [7] 王昶, 孙晶, 左绿水, 等. 新能源汽车关键原材料全球供应风险评估[J]. 中国科技论坛, 2018, (4): 83–93. [Wang C, Sun J, Zuo L S, et al. Evaluation of global supply risk of critical minerals for new energy vehicles[J]. Forum on Science and Technology in China, 2018, (4): 83–93.]
- [8] Zhang L G, Chen Z Y, Yang C Y, et al. Global supply risk assessment of the metals used in clean energy technologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129602.
- [9] Koyamparambath A, Santillán-Saldivar J, Mclellan B, et al. Supply risk evolution of raw materials for batteries and fossil fuels for selected OECD countries (2000–2018) [J]. Resources Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102465.
- [10] 王东方, 陈伟强. 中国铝土矿贸易与供应安全研究[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 498–506. [Wang D F, Chen W Q. Trade and supply security of bauxite in China[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 498–506.]
- [11] Yousaf I. Risk transmission from the COVID-19 to metals and energy markets[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102156.
- [12] Sun X Q, Shi Q, Hao X Q. Supply crisis propagation in the global cobalt trade network[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106035.
- [13] Wang X X, Li H J, Yao H J, et al. Simulation analysis of the spread of a supply crisis based on the global natural graphite trade network[J]. Resources Policy, 2018, 59: 200–209.
- [14] Hu X, Wang C, Zhu X, et al. Trade structure and risk transmission in the international automotive Li-ion batteries trade[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 170: 105591.
- [15] Kang X, Wang M, Chen L, et al. Supply risk propagation of global copper industry chain based on multi-layer complex network[J]. Resources Policy, 2023, 85: 103797.
- [16] Wang X, Wang A, Zhong W, et al. Analysis of international nickel flow based on the industrial chain[J]. Resources Policy, 2022, 77: 102729.
- [17] 沈曦, 郭海湘, 成金华. 突发风险下关键矿产供应链网络节点韧性评估: 以镍矿产品为例[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 85–96. [Shen X, Guo H X, Cheng J H. Resilience assessment of key mineral supply Chain network nodes under unexpected risks: A case study of nickel mineral products[J]. Resource Science, 2022, 44(1): 85–96.]
- [18] Hao H, Ma Z, Wang A, et al. Multi-layer networks research on analyzing supply risk transmission of lithium industry chain[J]. Resources Policy, 2022, 79: 102933.
- [19] Shao L, Kou W, Zhang H. The evolution of the global cobalt and lithium trade pattern and the impacts of the low-cobalt technology of lithium batteries based on multiplex network[J]. Resources Policy, 2022, 76: 102550.
- [20] Shao L G, Hu J Y, Zhang H. Evolution of global lithium competition network pattern and its influence factors[J]. Resources Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.102353.
- [21] An Q, Wang L, Qu D B, et al. Dependency network of international oil trade before and after oil price drop[J]. Energy, 2018, 165: 1021–1033.
- [22] Emerson R M. Power-dependence relations[J]. American Sociological Review, 1962, DOI:10.2307/2089716.
- [23] 刘林青, 闫小斐, 杨理斯, 等. 国际贸易依赖网络的演化及内生机制研究[J]. 中国工业经济, 2021, (2): 98–116. [Liu L Q, Yan X F, Yang L S, et al. Research on the evolution and endogenous mechanism of international trade dependence network[J]. China Industrial Economics, 2021, (2): 98–116.]
- [24] Leal-Ayala D R, Allwood J M, Petavratzi E, et al. Mapping the global flow of tungsten to identify key material efficiency and supply security opportunities[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 103: 19–28.

Mechanisms of demand shortage risk propagation in the multi-layer trade network of global tungsten industry chain

ZHANG Hongwei^{1,2}, HUANG Xiyu¹, ZHANG Yang³, WANG Xinyi¹

(1. School of Mathematics and Statistics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Business Administration, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: [Objective] Tungsten plays an irreplaceable role in new energy, intelligent manufacturing and national defense and military. The novel coronavirus outbreak and other emergencies have led to a reduction in the demand for tungsten ore in various countries (regions). Clarifying the dynamic transmission mechanism of the risk of trade demand shortage in the tungsten industry chain trade provides decision-making support to avoid risks and ensure the security of tungsten resource supply in China. [Methods] Based on the complex network analysis method and the infectious disease model, this paper constructs the global tungsten industry chain trade network risk transmission model, and simulates the risk impact degree and transmission path in the multi-layer trade of tungsten industry chain when the risk of trade demand shortage occurs in the top 5 countries with China's export trade dependence. [Results] (1) Under the impact of different demand risks, the avalanche scale of the tungsten industry chain trade network is quite different, but the overall trend is a step downward. With the intensification of the demand shock, the impact of the crisis gradually shifted upstream, and the number of affected countries gradually increased. (2) Tungsten industry chain trade network risk communication belongs to a "minority impact" phenomenon, showing the characteristics of "both robust and fragile". That is, when key trading countries such as the United States, the United Kingdom (upstream), Germany (midstream), and Thailand (downstream) are affected by demand shocks, the network is vulnerable, while non-key trading countries are affected by demand shocks, which have little impact on other countries. (3) For China, tungsten upstream is mainly affected by the direct impact of the United Kingdom (intra-layer transmission), the United States and Germany (inter-layer transmission) and the indirect impact of Japan, Korea and the Netherlands (inter-layer transmission). Tungsten middle is mainly affected by the direct impact of Japan (intra-layer transmission) and the indirect impact of the United States and Germany (intra-layer transmission), the United States, Indonesia and Thailand (inter-layer transmission). The downstream is mainly influenced indirectly by the United States (intra-layer transmission). [Conclusion] In summary, strive to promote the diversification of China's tungsten resource export trade, pay attention to the policies of important trading countries and the changes in supply and demand, and pay attention to the internal links between the industrial chain, constantly improve the safety review and risk assessment of tungsten resource supply chain, deepen global supply chain cooperation and improve the strategic reserve system of tungsten resources, are effective ways to promote the sustainable development of China's tungsten industry and implement precise risk management.

Key words: tungsten industrial chain; demand shortage; trade dependence; complex network; risk propagation; global trade