

引用格式: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. The resilience of nodes in critical mineral resources supply chain networks under emergent risk: Take nickel products as an example[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 85-96.] DOI: 10.18402/resci.2022.01.07

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

沈曦,郭海湘,成金华

(中国地质大学(武汉)经济管理学院,武汉 430074)

摘要:关键矿产资源作为国家产业发展的重要物质基础,其全球贸易网络频繁受到突发风险的冲击,对进口依赖型国家的资源供给安全造成威胁。本文从关键矿产资源全球贸易网络和产业链投入产出角度出发,基于多层复杂网络理论构建关键矿产资源全球贸易模型,并提出风险传导机制对贸易网络突发风险进行仿真分析,最后运用多风险场景仿真结果对网络节点的风险韧性进行评价。以镍矿资源产业链中6种产品为例,运用2018年全球贸易数据进行实证分析。研究表明:①中国镍矿资源进口结构极不均衡,对供给安全造成了极大的隐患。相对下游产品,中国对镍矿石、镍铈等产业链上游产品需求更为刚性,价格敏感度小。②风险所造成的价格波动对中国进口损失影响并不显著,而对风险韧性影响最大的因素是资源竞争能力,这与进口结构、占风险源出口份额、以及国家产业对于额外成本的转嫁能力有直接的关系。③同一国家在面对不同风险源时表现出不同的风险韧性。当风险源分别为印度尼西亚和菲律宾时,其风险规模每上升1%,中国因此而承受的镍矿资源进口损失规模将分别上升1.74%和1.77%,中国在面对来自菲律宾的突发风险时韧性较低。评价节点国家在关键矿产资源供应链网络中的风险韧性,对把控资源供给宏观形势,提高资源政策针对性具有重要意义。

关键词:多层复杂网络理论;关键矿产;供应链;风险;韧性;镍矿产品

DOI: 10.18402/resci.2022.01.07

1 引言

随着资源安全理论体系的发展,资源安全内涵的维度不断扩充,学者们对资源安全供给的定义逐渐形成一定的共识:一个国家或地区可以稳定、适时、持续地控制和获取保障经济产业当前和可预见的未来持续发展所需要的资源^[1-3]。而对资源安全评价工作的关注重点也从早期的定性研究资源供给的可持续性,逐渐深入到借助量化评估框架测度资源安全影响因素、影响机制和风险程度上^[4-6]。随着关键矿产资源概念的兴起,关键矿产资源普遍存在的时空分布严重不均衡、储量相对较小、难以替代等特点使其供给安全问题更加复杂和严峻^[7,8]。特别是

供给风险、技术突破、政策调整等对关键矿产资源供需平衡的冲击引起了国内外学者的重点关注^[9-12]。

对比各国已提出的关键矿产目录可以发现,多个本就稀有的矿种重复出现在各国关键矿产目录中,造成全球关键矿产资源的争夺不断加剧^[13,14]。同时,囿于资源禀赋、产业发展以及资源陷阱等问题,多数种类关键矿产的主要出产国往往不是主要消费国^[15],因此国际贸易成为许多国家非优势矿种的主要供给来源。而当今世界正经历百年未有之大变局,金融危机、地缘政治、大规模公共卫生事件等突发风险的频繁发生,对参与并依赖矿产资源国际贸易的国家带来了极大的供给安全风险^[16]。如

收稿日期:2021-06-18;修订日期:2021-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(71991482;71874165;72074198)。

作者简介:沈曦,男,湖北黄石人,博士研究生,研究方向为复杂网络建模与仿真、资源管理。E-mail: senseme@yeah.net

通讯作者:郭海湘,男,湖南湘乡人,教授,博士生导师,研究方向为复杂系统模拟与仿真。E-mail: faterdumk0732@sina.com

2019年印尼第一次施行镍原矿石出口禁令,中国镍矿石进口受到严重影响导致镍铁产量出现明显下滑;再如2020年全球最大的铬铁生产商之一南非萨曼科铬业公司宣布,由于南非长达21天的新冠病毒封锁措施,导致了全球铬矿资源的供应进一步中断。突发风险对关键矿产资源全球供应链网络的冲击带来的经济和社会影响愈见严峻。

以系统的视角看待关键矿产资源的全球供应链网络,各种突发风险可以视为外界因素对系统稳态的冲击,而系统以及系统中的个体在面对风险冲击时,保持自身稳态并从风险冲击中恢复的能力被称为“韧性”^[17,18]。通过对韧性的评估来衡量抗风险能力的研究方法受到了多学科科学者的广泛采用^[19-22]。运用系统科学的研究方法对关键矿产供应链网络突发风险进行仿真分析,并基于仿真结果对网络中节点的韧性进行评价的研究架构为应对资源供给中的不确定风险提供了新视角。

镍作为锂电池三元材料中占比超过钴2.5倍的元素,因其全球资源储量是钴的十几倍而相对较少受到研究关注。全球72%的镍产量集中在印度尼西亚、菲律宾等6个国家,中国是全球最大的镍消费国,但却不是镍矿资源的储备大国,目前探明的镍矿资源储量仅占全球总量的3.7%,严重依赖镍矿资源进口来满足国内供应。随着全球新能源汽车产业的发展,中国新能源电池产业在全球产量比重逐渐超过70%,镍矿资源的供给安全形势将随着新能源的快速发展变得更加严峻。本文以镍作为研究对象,通过对全球镍矿资源供应链网络进行建模和风险仿真,对中国在全球镍矿供应链网络中的风险韧性进行评价,以期为进一步深入研究关键矿产资源供给突发风险问题提供一种新思路。

2 研究方法

2.1 关键矿产资源多层复杂供应链网络的构建

为准确描述关键矿产资源的国际贸易网络,本文综合考虑贸易链与产业链之间的协同关系,提出多层供应链网络模型。该模型综合考虑产品供需关系、价格因素和产业链投入产出关系,采用三层网络对关键矿产资源的国际贸易网络进行建模,即基于关键矿产资源现实国际贸易网络关系的贸易

层网络 G^T 、基于不同级别矿产资源产品竞争购买关系的信息层网络 G^I 和不同级别产品的综合价格指数层网络 G^P ,同时每层网络根据供应链中产品的投入产出关系又分为多级,从而将矿产资源各级产品的生产和国际贸易进行综合考虑,力求准确描述关键矿产资源国际供应链网络。

2.1.1 贸易层网络

基于关键矿产资源国际贸易数据构建贸易层网络模型 G^T 如下:

$$G^T = (V^T, E^T, W^T) \quad (1)$$

式中: $V^T = \{v_1^T, v_2^T, v_3^T, \dots, v_n^T\}$ 代表参与某种矿产贸易活动国家的集合; $E^T = \{e_{ij}^T | i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 为节点间边的集合, e_{ij}^T 代表节点 v_i^T 和 v_j^T 间的贸易关系,是一个包含 q 个0或 ± 1 元素的向量,其中 q 为供应链中产品的种类数量,0表示无贸易关系,1和-1分别代表出口和进口。贸易层连边为有向连边,箭头方向表示产品流动方向; $W^T = \{w_{ij}^T | i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 为边权重,其中 w_{ij}^T 同 e_{ij}^T 一样为包含 q 个元素的向量,各元素的值分别代表各种产品的实际贸易量。

2.1.2 信息层网络

关键矿产资源区别于普通矿产,多数与稀土类似呈现稀有稀散的特征,其中多个矿种开采集中于少数几个国家。本文通过构建信息层网络来描述贸易网络中节点的异质性。信息层网络 G^I 构建为

$$G^I = (V^I, E^I, C^I) \quad (2)$$

式中: $V^I = \{v_1^I, v_2^I, v_3^I, \dots, v_n^I\}$ 为节点的集合,代表参与关键矿产资源贸易活动的国家,与贸易层网络相同; $E^I = \{e_{ij}^I | i, j = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 为边的集合,其中 e_{ij}^I 是一个包含 q 个0或1元素的向量,其中 q 为供应链中产品的种类数量,0表示节点 v_i^I 和节点 v_j^I 之间无某种产品的进口竞争关系,1表示存在某种商品的进口竞争关系,即在某种关键矿产需求大于供给的背景下,供应链中某种产品的各进口国之间存在竞争关系,信息层为无向连边; $C^I = \{c_1^I, c_2^I, c_3^I, \dots, c_n^I\}$ 为节点贸易竞争能力的集合, c_i^I 表示节点 v_i^I 的贸易竞争能力,用于决定在整体供给水平不足时,各个节点的分流比例; c_i^I 是一个包含 q 个元素的向量, q 为供应链中产品的种类数。

2022年1月

在关键矿产资源全球争夺的背景下,其价格势必呈现长期上涨趋势,进口国家对关键矿产资源进口价格的敏感度不仅反映了需求的刚性程度,也反映了该国相关产业是否具有优势竞争力^[23-25]。优势的产业竞争力令进口国家通过转嫁额外成本获得持续发展,而价格敏感度较高的国家则相应缺乏关键矿产资源竞争能力和竞争意愿。因此本文在此处运用节点国家对产品的需求价格弹性系数和原始进口数量来决定节点国家对各种产品的进口竞争能力 c_i^I 。

对各国需求价格弹性系数的计算采用双对数线性回归模型,其基本模型为:

$$\ln Y_i = \ln A + \beta_2 \ln X_i \quad (3)$$

式中: Y_i 为国家 v_i 某种矿产品的进口量; A 为常数项; X_i 为进口价格; β_2 为国家 v_i 对某种矿产品的需求价格弹性。考虑到经济增长的因素,引入该国当年国内生产总值(GDP)作为控制变量以完善模型,同时为了尽可能地减少经济增长、通货膨胀等因素对价格的影响,用商品进口价格除以当年居民消费价格指数(CPI)来进行修正。

改进之后的模型为:

$$\ln Y_i = \ln A + \beta_2 \ln(X_i/CPI) + \beta_3 \ln(GDP) \quad (4)$$

式中: β_2 即为国家 v_i 对于某产品的需求价格弹性系数; β_3 为控制变量GDP的回归系数。

2.1.3 价格指数层网络

多层供应链网络模型的第三层为价格指数层。在全球贸易高度发展的今天,关键矿产的供需问题很大程度上受价格因素的影响,供应链网络中的突发风险通常首先通过价格波动的形式传递给整个供应链上的节点^[26-29]。根据所选矿种的各级产品分类,每一级产品对应本级综合价格指数,价格指数的变动会影响相关节点国家的需求,影响的大小通过节点对于相应产品的需求价格弹性计算。价格指数层网络 G^P 可表达为:

$$G^P = (PI, E^P) \quad (5)$$

式中: $PI = \{pi_1, pi_2, pi_3, \dots, pi_n\}$ 为各级产品综合价格指数的集合,代表该级产品的价格变化指数,原始状态其取值均为1; $E^P = \{e_{ij}^P | i, j = 1, 2, \dots, n; e_{ij}^P \in \{0, 1\}\}$ 为边的集合,代表不同级别的价格变化指

数之间的影响关系,为无向连边。

2.1.4 网络层间映射关系

关键矿产资源全球供应链多层关联网络由贸易层、信息层、价格指数层构成,除了对各层网络的构建,还需要进一步将三层网络进行联系。根据实际研究需要,在贸易层 G^T 与信息层 G^I 之间采用“一对一”的节点映射关系 Φ^I ,在信息层 G^I 与价格指数层 G^P 之间采用“多对一(一对多)”的节点映射关系 Φ^P (图1)。

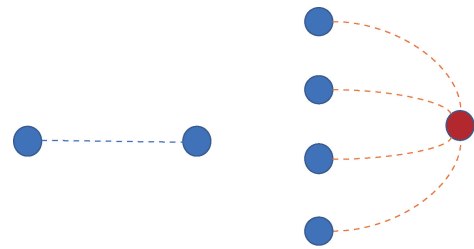


图1 节点的“一对一”和“多对一(一对多)”映射关系

Figure 1 “One-to-one” and “many-to-one (one-to-many)” mapping between nodes

由此,本文所构建的关键矿产资源多层供应链网络模型 A 为:

$$A = \{G^T, G^I, G^P, \Phi^I, \Phi^P\} \quad (6)$$

使用图2示例更直观地描述所构建的模型。假设某种关键矿产资源全球供应链网络包括9个主要参与国家,产业链中简化为原矿石级、中间产品级和最终产品级3种产品。这9个国家构成了贸易层网络 G^T 和信息层网络 G^I 的9个节点,其中2个节点

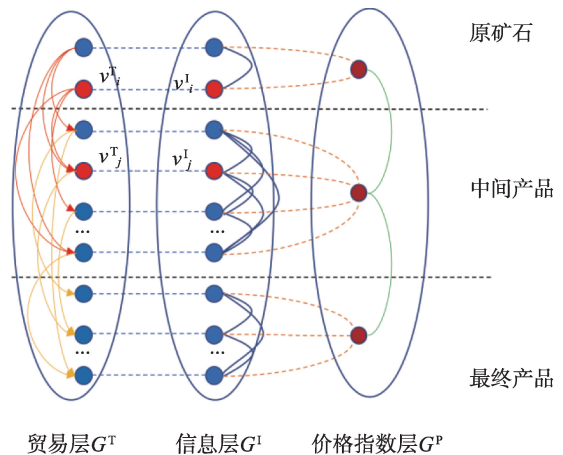


图2 供应链多层网络模型示例图

Figure 2 Illustration of a multilayer supply chain network model

主要产出原矿石产品,4个节点主要产出中间产品,3个节点主要产出最终产品,贸易层中红色和黄色的边分别代表两种不同产品的流动方向。价格指数层节点为各级产品的综合价格指数,各层节点之间的连边关系如图2所示,各层网络节点之间的映射关系如上文描述的方法构成。

2.2 风险传导机制与节点风险韧性度量

2.2.1 基于多层复杂网络的风险传导机制

区别于一般产品供应链风险,关键矿产资源安全供给问题在于其产品的难以替代以及在国家未来产业发展中所处的特殊地位。在这种需求背景下,设定原矿石产品级的某节点 v_i^T 因自然灾害、突发公共卫生事件等突发风险而降低 ΔL (风险程度) 比例的所有种类商品出口。设定其各级产品主要为卖方市场,当出现进口缺额时,为优先保障节点国内需求,各节点进口缺额的影响体现在出口产品的相应减少。风险的传导以贸易周期为单位进行仿真,值得注意的是在构建贸易层网络 G^T 时,其边权重 w_{ij}^T (贸易量) 所对应的时间尺度,与此处贸易周期的时间尺度一致。风险传导机制构建如下:

第一阶段:风险发生后的第一个贸易周期 $t=1$,风险随着贸易层网络 G^T 连边进行自上而下的传播,根据风险源与各节点直接和间接联系的差异性,节点受到影响的顺序也不同。将第一批直接受风险源节点 v_i^T 出口减少影响的节点存入集合 D_1 ,每个节点所承担的各种产品的进口缺额存入有 q 个元素的节点损失向量 $Dam_{D_{1j}}^t$ 中:

$$Dam_{D_{1j}}^t = \Delta L \times import_{D_{1j}}^{v_i} \quad (7)$$

式中: $import_{D_{1j}}^{v_i}$ 表示节点 D_{1j} 在原始状态从风险源节点 v_i 进口的各种产品数量,为包含 q 个元素的向量,分别代表供应链中 q 种商品。

因进口缺额的存在,根据各产品的投入产出依赖关系, D_1 中节点相应减少各种产品的出口,各产品的出口减少量相应存入第二批受影响的节点集合 D_2 的对应节点损失向量 $Dam_{D_{2k}}^t$ 。依此类推,风险传播到供应链最下游节点。因供应链节点之间复杂的贸易联系,一个节点可能同时被包含于多个 D_n 中,此时将对应的多个损失向量相叠加,即为节点 v_j 在此贸易周期的总进口损失 $Dam_j^{t=1}$ 。

以镍产业链中上游产品为例,该产业链中共有 $q=6$ 种产品,各产品投入产出依赖关系如图3所示,以各种产品的含镍量计,将这种依赖关系量化,用以计算上游产品进口缺额对于下游产品出口数量影响的大小。使用包含6个元素的向量 Dam 来存储每个节点6种商品的进口损失。当风险源的矿石产品出产降低时,基于产品链的投入产出关系,会以一定比例(含镍量)影响其他5种产品的出口。以此类推,根据6种产品在产业链中的位置,确定可能受影响的出口产品种类。如果一个国家仅进口上游产品而没有出口下游产品,则这部分风险将无法传递出去,完全由该国承担。

考虑到矿产资源产业链中节点对于各种产品可能同时存在进口、出口以及再出口贸易活动,而原料再出口对于该节点国家产业发展的贡献很少,设定节点某种产品的进口缺额首先通过减少同种产品的再出口进行部分转嫁,剩余进口缺额再转化为产业链下游其他出口产品的出口减量。

因为供应链市场供求状况的改变, G^I 信息层节点 v_i^I 映射的该级别产品综合价格指数 pi_k 的取值因需求大于供给而从1变为 $1+h\%$,即该级产品综合价格指数上升 $h\%$,并通过 G^P 价格指数层无向网络向上下游产品价格综合指数节点同时传播,引起各级产品综合价格指数的相应波动,第一个贸易周期结束。

第二阶段:从第二个贸易周期 $t=2$ 开始,除原始风险节点 v_i^T 之外的其他主要矿石出产国节点在价格指数 pi_k 呈上涨情况下,为抢占市场采取扩大投资、提高生产和管理效率等方法提高产品出口量比例 α ,风险源节点 v_i^T 在风险发生后也将采取相应的风险补救措施,每期恢复出口量比例 β 。根据贸易网络的结构以及 D_1 中节点在供应链网络中与其他

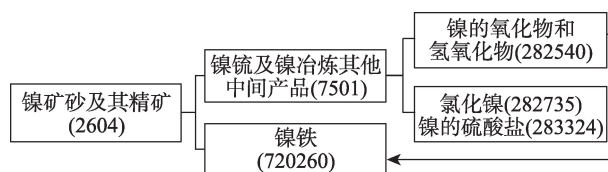


图3 镍产业链上游和中游产品投入产出关系示意图

Figure 3 Input-output relationship between the upstream and midstream of nickel industrial chain

2022年1月

节点的贸易联系,其他主要矿石出产国节点的出口增额按照各节点的贸易竞争能力分配给 D_i 中节点, D_{ij} 节点所分配到的份额 $Q_{D_{ij}}$ 为:

$$Q_{D_{ij}} = \frac{S \times \text{import}_{D_{ij}} \times (1 + h\% \times c_j^1)}{\left(\sum_{j=1}^n \text{import}_{D_{ij}} \times (1 + h\% \times c_j^1) \right)} \quad (8)$$

式中: S 为除风险源节点 v_i^t 之外的主要矿产出产国各种产品的总增产量; h 为价格指数上升百分比; $\text{import}_{D_{ij}}$ 为节点 D_{ij} 原始状态各种商品的总进口量; c_j^1 为节点 D_{ij} 的需求价格弹性系数; $Q_{D_{ij}}$ 、 S 、 $\text{import}_{D_{ij}}$ 、 c_j^1 均为包含 q 个元素的向量。

第二个周期中 D_i 的各节点进口缺额 $E_{D_{ij}}^t$ 因分流份额 $Q_{D_{ij}}$ 的存在有所减少:

$$\Delta E_{D_{ij}}^t = Q_{D_{ij}} \quad (9)$$

根据第一阶段中相同的风险传播策略, $E_{D_{ij}}^t$ 通过供应链网络结构向下游各节点传播,得到下游节点的进口缺额 $E_{D_{2j}}^t$ 、 $E_{D_{3j}}^t$ 、 $E_{D_{4j}}^t$ 、 \dots 。随着产量的逐渐恢复,经过一个贸易周期的产量提升,价格指数由 $1+h\%$ 下降至 $1+h\%-z\%$ 。为简化计算,令 $z\%=(\alpha+\beta)/5$,第二个贸易周期结束。

第三阶段:重复第二阶段,直到经历 t 个贸易周期,供应链中主要矿产资源出产国各种产品的总出口量恢复到原始状态水平,突发风险传播结束,将各节点在各贸易周期所积累的进口缺额占其原始状态进口量的比例进行叠加,即为节点 V_j 在此次突发供应风险中的总损失 Loss_j :

$$\text{Loss}_j = (E_j^1 + E_j^2 + \dots + E_j^t) / \text{import}_j \quad (10)$$

式中: import_j 为节点 v_j 在原始状态的总进口量, Loss_j 和 import_j 为含有 q 个元素的向量。

2.2.2 节点风险韧性的计算

借鉴需求价格弹性的概念定义,在获取不同风

险情景下节点的损失情况后,同样采用双对数线性回归模型,对相同风险源不同风险程度的特定节点损失情况进行分析,计算风险程度每上升1%,节点总进口损失随之变化的程度,以之作为该节点相对特定风险源韧性的度量。节点风险韧性值计算模型如下:

$$\ln(\Delta E_j^{\text{Ni}}) = \ln A + \beta_2 \ln(\Delta L_{\text{Ni}}) + \beta_3 \ln h \quad (11)$$

式中: ΔE_j^{Ni} 为以含镍量计的节点 v_j 进口损失量; ΔL_{Ni} 为风险源以含镍量计的出口减量; h 为价格指数变化百分比; A 为常数项;此时取 $-\beta_2$ 为节点 v_j 风险韧性值,其值一般为负,且越接近0表示来自该风险源的风险程度变化对节点的影响越小。

2.3 数据来源及参数设计

镍矿石主要分为硫化矿和红土矿,其冶炼工艺主要分为湿法和火法,根据其冶炼工艺流程以及联合国贸易数据库(UN Comtrade)中关于镍矿产品的统计名目,选取如表1所示的HS海关编码商品的统计名目,选取如表1所示的HS海关编码商品2018年的国际贸易数据,产业链中各产品之间的投入产出依赖关系根据镍冶炼工艺进行确定(图3)。通过整理各主要贸易国家的贸易关系,选取全球60个主要贸易国家作为贸易层和信息层网络节点。选择中国最大的两个镍矿资源进口来源印度尼西亚和菲律宾分别作为风险源节点。通过搜集评估近年关于镍矿资源突发风险相关的新闻,分别设定风险等级 ΔL 为35%、50%和65%,价格指数变化分别为15%、20%和25%,设计构建如表2所示的18种风险情景,通过Matlab2016b进行编程实现。

对于供应链中各节点进口镍矿产品的需求价格弹性系数的计算,采用评价对象节点(2018年度单种产品进口量500 t以上的国家)2009—2018年贸易数据,使用Eviews10.0进行双对数线性回归分析,数据来源为联合国商品贸易统计数据库(UN Com-

表1 镍矿产业链上游及中游产品列表

Table 1 Upstream and midstream products in nickel industrial chain

HS 海关编码	商品名称	含镍量/%	HS 海关编码	商品名称	含镍量/%
2604	镍矿砂及其精矿	5	283324	镍的硫酸盐	21
7501	镍铈及镍冶炼其他中间产品	32	720260	镍铁	30
282540	镍的氧化物和氢氧化物	80	282735	氯化镍	24

表2 仿真情景参数设计

Table 2 Scenario parameter setting for risk simulation

情景	风险来源	风险程度 $\Delta L/\%$	价格指数 上涨幅度 $h\%$	其他参数
1/10	印度尼西亚/ 菲律宾	35	15	扩产速率 $\alpha=5\%$ 产量恢复速 率 $\beta=10\%$
2/11		35	20	
3/12		35	25	
4/13		50	15	
5/14		50	20	
6/15		50	25	
7/16		65	15	
8/17		65	20	
9/18		65	25	

注:情景1-9表示风险来源于印度尼西亚,情景10-18表示风险来源于印度尼西亚。

trade)和ESP数据平台,中国各进口产品的需求价格弹性系数见表2。

3 结果与分析

3.1 全球镍矿产品供应链网络的基本特征

在6种镍矿产品的全球供应链网络中(图4),少数几个国家占据了进口贸易的主要份额,6种镍矿产品的生产和消费较为集中。图4中节点越大表示进口数量相应比例越大,箭头颜色及粗细相应表示不同的贸易量。可以看出,中国作为世界上最大的镍矿资源进口国,各产品的进口规模有较大差异,主要进口产品是镍矿石、镍铈和镍铁,均处于镍矿资源产业链上游,属于进一步工业化应用的主要原材料,其中镍矿石和镍铁的进口严重依赖印度尼西亚,具有较高的资源供给风险。中国对各种镍矿产品的需求价格弹性有较大差异(表3),对于上游产品镍矿石、镍铈的需求价格弹性系数为正,价格的上升不仅不会对中国这两种产品的需求造成负面影响,反而会促进相关需求的提升,说明中国对于镍矿产业链上游产品的需求较为刚性,相关产业具有明显优势,使其能够通过下游产品将额外成本转嫁分摊。日本在镍矿资源的供给上同样严重依赖进口,但与中国镍矿产业需求结构不同的是其进口产品主要为镍铈和镍的硫酸盐,同时日本是镍氧化物主要进口国——韩国的主要进口来源。亚洲国家中的中国、日本和韩国是全球最大的3个镍矿资源进口国,占据了世界主要进口份额,从图4中可以

看出,这3个国家进口产品有所差异,却同时存在进口结构严重不均衡的问题,相关产品的进口严重依赖个别国家,具有较高的资源供给风险。

3.2 突发风险对中国镍矿资源进口的影响

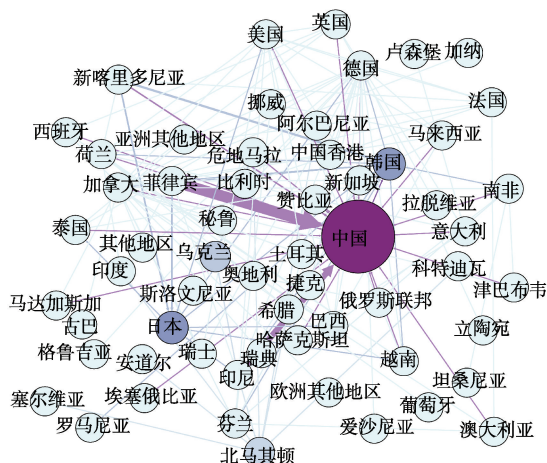
3.2.1 风险源与风险等级对中国镍矿资源供给的影响

通过不同风险情景的突发风险仿真,中国镍矿资源进口损失随不同的风险源、风险等级出现较大差异(图5),供给不足所带来的价格波动对于中国镍矿资源进口的影响并不显著,波动幅度在0.01%以内,这与中国对镍矿资源需求价格弹性较高的情况相符,较为刚性的需求不会因短期价格波动而出现显著变化。在突发风险传导过程中庞大的进口规模和较为刚性的需求令中国在供给短缺情景下具备更高的资源竞争能力和意愿,从而增强了自身风险韧性,缓解了风险带来的资源供给损失。

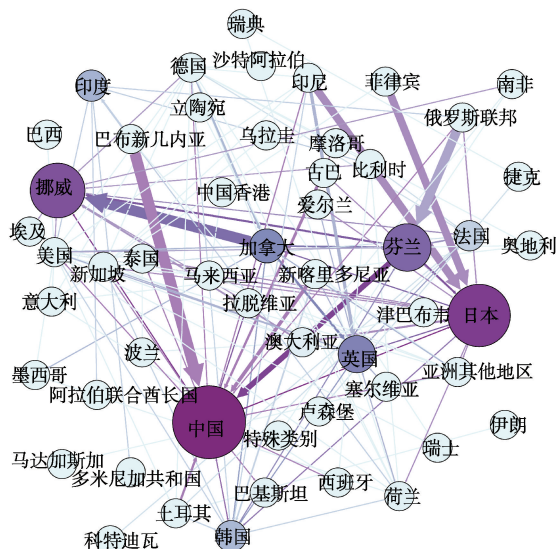
在图5a风险源为印度尼西亚的仿真结果中,印度尼西亚镍矿资源出口因突发风险减少35%时,中国镍矿资源进口相应减少16.04%,当价格指数上涨程度相同时,中国镍矿资源进口损失均随风险等级的提升呈现阶梯上升趋势,上升程度与风险等级的变化程度线性相关。在菲律宾作为风险源节点的情境下,中国镍矿资源进口损失变化趋势与图5a类似,呈现随风险程度阶梯上升(图5b),且在多个周期的传播中累计进口损失比例叠加的最终结果最高超过了单个周期原始进口量的103%。

在仿真结果的横向对比中(图6),比较不同风险源、相同情景参数的仿真结果显示:来自菲律宾的突发风险相比印度尼西亚对中国镍矿资源的进口有更大的威胁。不仅是因为菲律宾是中国主要的镍矿资源进口来源国,更多的原因在于中国占据了印度尼西亚镍矿资源出口的绝对优势份额,因此获得了优势的资源竞争能力和风险韧性,减缓了突发风险对进口的影响,而在菲律宾各种产品的出口结构中,中国占据份额相对较小,在贸易竞争中缺乏优势,相比之下所受进口损失较大。通过对比各风险情景中突发风险从开始到结束所经历的周期数可以发现,相同风险等级下,当菲律宾为风险源节点时所经历的周期数明显高于印度尼西亚作为

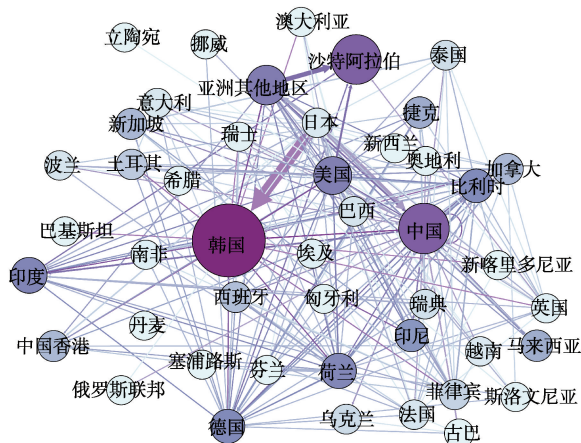
a. 2604镍矿砂及其精矿国际贸易网络



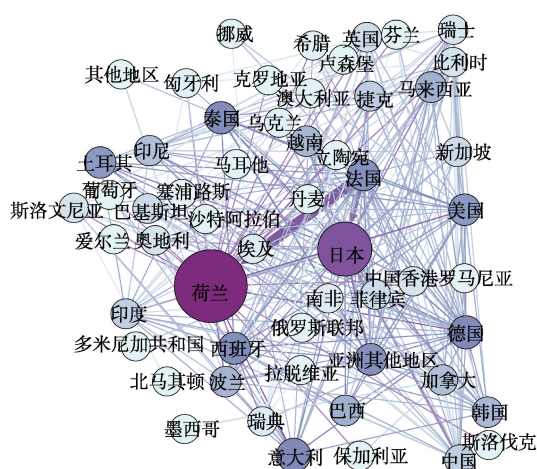
b. 7501镍钼及镍冶炼其他中间产品贸易网络



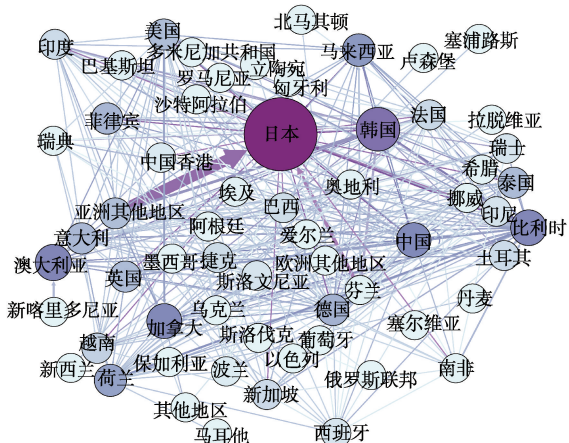
c. 282540镍的氧化物和氢氧化物国际贸易网络



d. 282735氯化镍国际贸易网络



e. 282735氯化镍国际贸易网络



f. 720260镍铁国际贸易网络

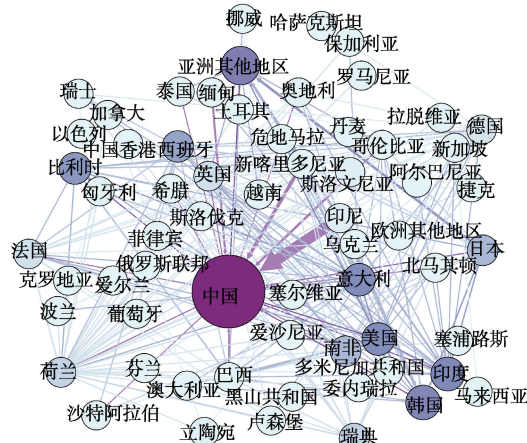


图4 各镍矿产品全球贸易网络图

Figure 4 Global trade networks of different nickel products

表3 中国镍矿产品需求价格弹性系数

商品 HS 编码	2604	7501	282540	282735	283324	720760
中国对外进口价格弹性系数	1.094638	2.462913	-0.89876	0(无进口)	-1.71805	-1.39661

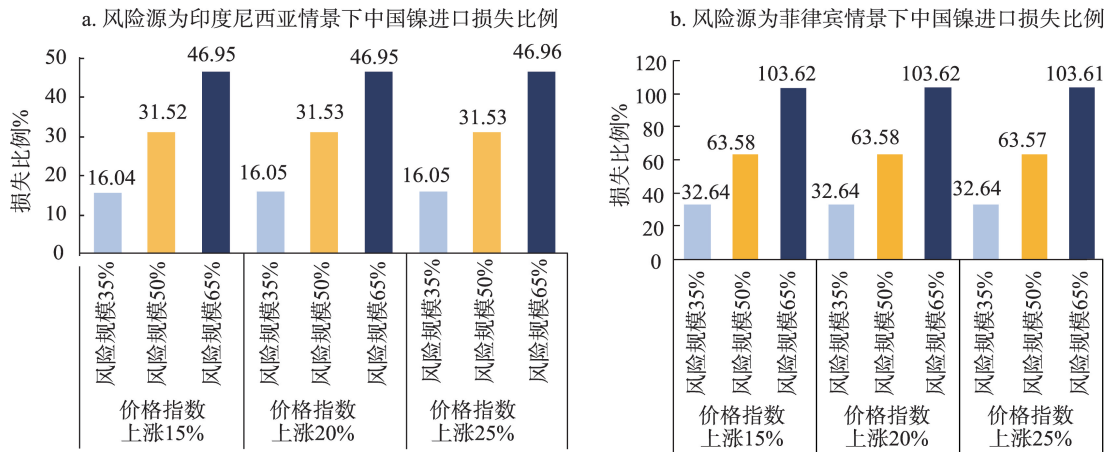


图5 不同风险源情景下中国镍进口损失比例
Figure 5 Nickel import loss ratio in China under different risk scenarios

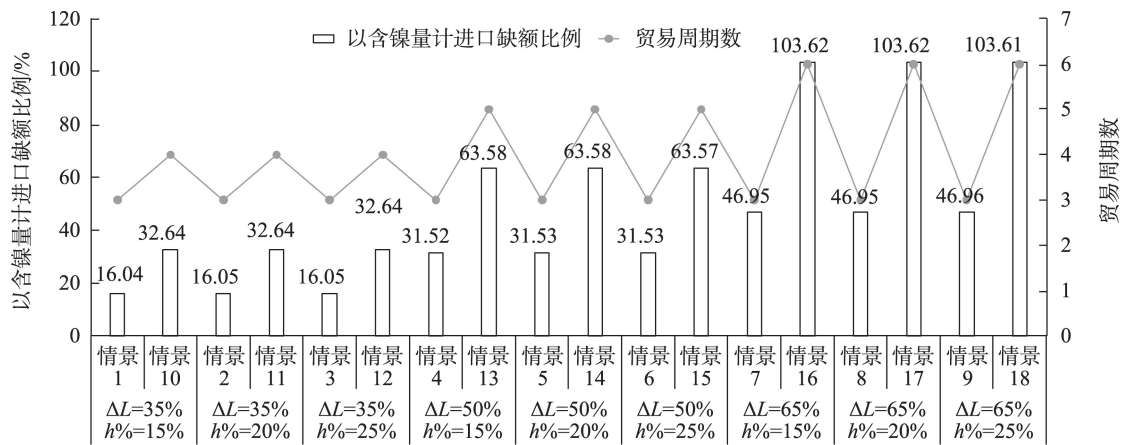


图6 各风险情景下中国镍元素进口缺额比例仿真结果(相同风险级别及价格指数变化,不同风险来源的风险情景将在一起比较)
Figure 6 Simulation results of nickel element import deficit ratio in China under different risk scenarios (the risk scenarios of different risk sources are compared under the same risk level and change of price index)

风险源的情景,印度尼西亚作为全球最大的镍矿资源产出国,其产能扩充潜力较大,能够更加快速地填补因菲律宾供给缺口带来的市场差额,有利于缩短突发风险传导进程。

3.2.2 风险对中国各种镍矿产品进口的影响

图7展示了价格指数上升幅度均为15%,风险程度分别为35%、50%、65%时,中国在情景1/4/7/10/13/16中6种产品各贸易周期的进口损失情况。因

中国从两个风险源进口的主要产品种类不同,风险源为印度尼西亚的情景1/4/7中,各产品进口损失最大的商品为镍铁(HS: 720260)和镍的氧化物或氢氧化物(HS: 282540),而在镍矿石的损失上相较于其他产品较小,说明中国在对印尼镍矿石的贸易竞争中具有明显优势。中国没有进口氯化镍产品的需求,故其风险损失在各情景中均为0。在情景1中,当风险演进到第3周期,2604/7501/282540产品的进

2022年1月

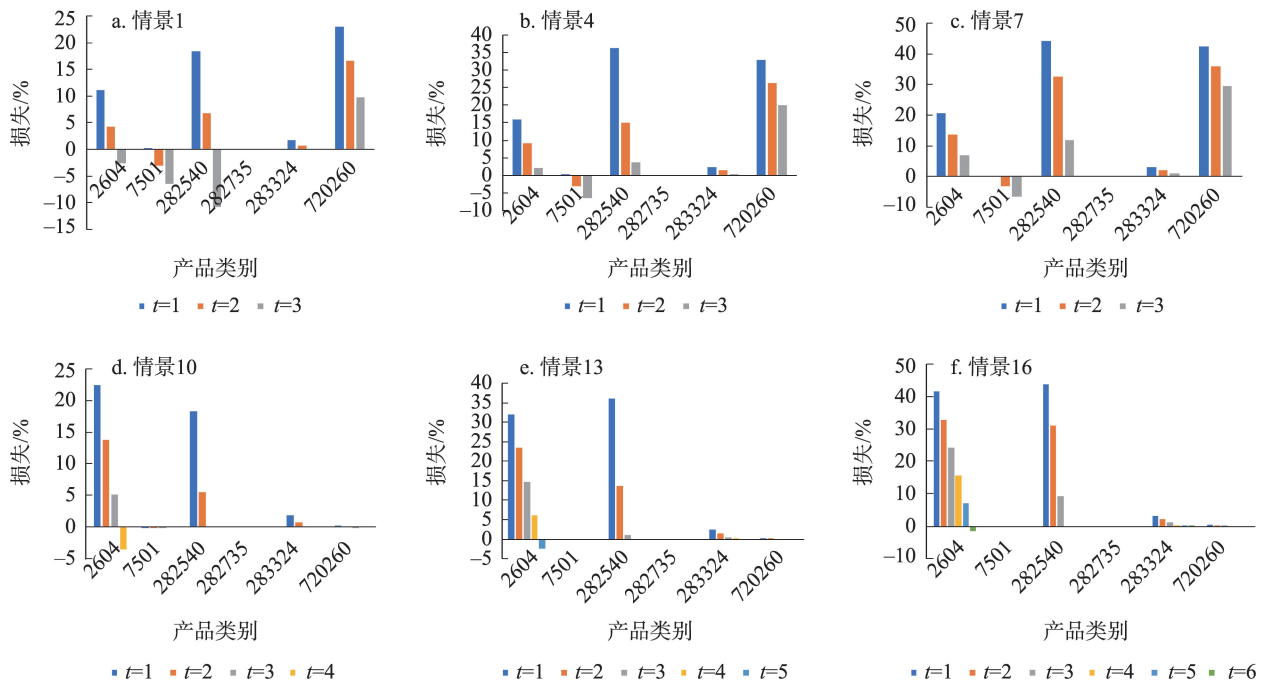


图7 风险情景中分产品类别的中国各仿真周期进口损失情况

Figure 7 Import losses of various simulation periods in China by product category under different risk scenarios

口缺额比例已经小于0,说明在该贸易周期中国从其他镍主要出产地所获得的扩产份额已经超过该周期的风险损失,并且部分弥补了前两个贸易周期中积累的缺额。风险源为菲律宾的情景10/13/16中进口损失最大的产品为镍矿石(HS: 720260)和镍的氧化物或氢氧化物(HS: 282540),其他产品的损失因进口的规模较小而未受较大影响。到风险演进后期除镍矿石(HS: 720260)外,中国各种产品的周期进口量仍然没有恢复到风险发生前水平。

3.2.3 不同风险源情景下中国镍矿资源风险韧性的评价

表4为运用以上情景1-9(风险源:印度尼西亚)和情景10-18(风险源:菲律宾)的仿真结果和韧性度量方法分别回归获得的中国在突发风险中的风险韧性值。在1%的显著性水平下,虽然印度尼西亚回归结果 $D.W$ 值落在 d_l 和 d_u 之间,不能确定误

差项是否自相关,但菲律宾回归结果的 $D.W$ 值大于 d_u 小于 $4-d_u$,表明误差项无自相关性,且两次回归 R^2 值及调整 R^2 的值均在0.98以上,一定程度上说明回归模型的有效性。当风险源为印度尼西亚时,风险程度每上升1%,中国因此遭受的镍进口损失将上升1.74%;而当风险源为菲律宾时,该值为1.77%,中国镍产品进口贸易在面对来自菲律宾的供应风险时,其风险抵抗能力相对更弱。

4 结论与建议

4.1 结论

本文运用仿真推演分析研究框架,建立基于多层复杂网络的关键矿产资源供应链网络模型及风险传导模型,对原网络稳态被突发风险打破之后关键矿产资源供应链网络的再平衡过程进行仿真,基于多风险场景仿真结果提出了新的节点风险韧性度量方法,并对全球镍矿产品供应链网络突发风险

表4 不同风险源下中国风险韧性值计算结果

Table 4 Results of China's risk resilience under different risk sources

风险源	显著水平	n	k (解释变量个数)	$D.W$ 值	d_l	d_u	R 方	调整 R 方	风险韧性值($-\beta_2$)
印度尼西亚	1%	9	2	0.989	0.408	1.389	0.996	0.995	-1.74
菲律宾	1%	9	2	1.570	0.408	1.389	0.988	0.984	-1.77

进行了仿真分析。主要结论如下:

(1)运用仿真推演的研究框架分析关键矿产资源供应链网络风险问题不仅适用性强、应用范围广,能够对各种关键矿产资源贸易网络节点在风险传导中的损失过程和规模进行较为完整的刻画,而且规避了相关资源安全评价方法对于数据完整性、多样性的较高要求。在多风险场景仿真结果的基础上,以节点国家损失规模对风险源、风险规模和价格波动的敏感程度作为其韧性评估结果较为直观和易于理解。

(2)面对不同的风险来源,相同国家表现出不同的风险韧性。在镍矿资源贸易网络突发风险仿真中,当风险源分别为中国最大的两个镍矿资源进口来源印度尼西亚和菲律宾时,其风险规模每上升1%,中国因此而承受的镍进口损失规模将分别上升1.74%和1.77%。中国镍矿产品进口贸易在面对来自菲律宾的供应风险时韧性更低,这主要是因为中国在菲律宾镍矿资源出口结构中所占份额明显低于在印度尼西亚出口中所占份额,在供给短缺情景中缺乏资源竞争优势。

(3)对中国镍矿产品进口损失规模影响最大的因素是风险来源、风险规模、进口规模及需求价格弹性。中国对于镍矿石、镍铈和镍铁3种产品的需求不仅规模大,而且较为刚性,因此风险所造成的价格波动对于中国进口损失影响并不显著。而对韧性影响最大的因素是中国在风险源国家所有贸易对象中的相对资源竞争能力,这与进口结构、占风险源出口份额以及国家产业对于额外成本的转嫁能力有直接的关系。

4.2 建议

中国作为世界最大的镍矿资源消费国,长期依赖进口贸易保障镍矿资源供给,必须不断提高自身资源竞争能力以提升风险韧性,保障和提升国家资源安全。应从以下几个方面入手:

(1)增加与主要资源出产国的贸易连通性。关键矿产资源的开发往往集中于少数国家,而突发风险不同于系统性风险难以提前预判,供应链网络下游国家应通过增加与上游出口国家的连通率,拓宽进口渠道以分散供应中断风险,摆脱单一化进口来源的约束,规避地缘政治、公共卫生事件等非贸易

因素所造成的进口限制。

(2)优化国家进口结构。在增加来源的基础上,均衡化各个进口来源国在本国进口总额中的比重,避免进口过于依赖某单一来源所带来的风险韧性过低。同时应缩短与风险少发的资源出口国之间最短连接距离,减少连通路径中其他国家所带来的中间风险。着力通过海外投资入股矿山、购买采矿权的方式,提高与风险频发的进口来源国家的连接可靠性。

(3)提高本国在关键矿产资源贸易中的议价能力。在面对突发风险所造成的市场波动时,更强的议价能力代表着供应链中更高的市场掌控能力,对转嫁风险、提高资源安全具有重要意义。中国在全球镍矿资源贸易中占据了重要的份额,应积极利用好自身的市场掌控能力、规模优势和技术优势,整合全产业链资源,争取更高的进出口议价能力和产业竞争能力。

参考文献(References):

- [1] 沈镭,何贤杰,张新安,等.我国矿产资源安全战略研究[J].矿业研究与开发,2004,24(5):6-12. [Shen L, He X J, Zhang X A, et al. Study on mineral resources security strategy of China[J]. Mining Research and Development, 2004, 24(5): 6-12.]
- [2] 张新安,张迎新.把“三稀”金属等高新技术矿产的开发利用提高到战略高度[J].国土资源情报,2011,(6):2-7. [Zhang X A, Zhang Y X. Raise the development and utilization of high-tech minerals such as “three rare” metals to a strategic height[J]. Land and Resources Information, 2011, (6): 2-7.]
- [3] 李鹏飞,杨丹辉,渠慎宁,等.稀有矿产资源的战略性评估:基于战略性新兴产业发展的视角[J].中国工业经济,2014,(7):44-57. [Li P F, Yang D H, Qu S N, et al. A strategic assessment of rare minerals: Based on the perspective of strategic emerging industries development[J]. China Industrial Economics, 2014, (7): 44-57.]
- [4] 程欣,帅传敏,严良,等.中国铁矿石进口市场结构与需求价格弹性分析[J].资源科学,2014,36(9):1915-1924. [Cheng X, Shuai C M, Yan L, et al. Market structure and price elasticity of China's iron ore imports[J]. Resources Science, 2014, 36(9): 1915-1924.]
- [5] 徐德义,朱永光.能源转型过程中关键矿产资源安全:回顾与展望[J].资源与产业,2020,22(4):1-11. [Xu D Y, Zhu Y G. Review and outlook of key minerals security during energy transformation [J]. Resources & Industries, 2020, 22(4): 1-11.]

2022年1月

- [6] 李璇,倪旭,张海亮.金属资源产业对外直接投资对中国与东道国全球价值链地位的影响[J].资源科学,2021,43(10):1976-1989. [Li X, Ni X, Zhang H L. Impacts of metal resource industry outward foreign direct investments on positions of China and the host countries in the global value chain[J]. Resources Science, 2021, 43(10): 1976-1989.]
- [7] 李晓峰,朱艺婷,徐净.关键矿产资源研究进展[J].科学通报,2020,65(33):3678-3687. [Li X F, Zhu Y T, Xu J. Indium as a critical mineral: A research progress report[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3678-3687]
- [8] 高天明,陈其慎,于汶加,等.中国天然石墨未来需求与发展展望[J].资源科学,2015,37(5):1059-1067. [Gao T M, Chen Q S, Yu W J, et al. Project of China's graphite demand and development prospects[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 1059-1067.]
- [9] 钟美瑞,宋婉婷.战略性金属矿产价格冲击对行业产出的影响:基于TVP-FAVAR模型的时变分析[J].资源科学,2020,42(8):1580-1591. [Zhong M R, Song W T. Impact of strategic metal price shocks on industrial output: Time-varying analysis based on the TVP-FAVAR model[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1580-1591.]
- [10] 郭晓茜,李建武.国外研究机构关键矿产评价方法综述[J].中国矿业,2017,26(9):25-32. [Guo X Q, Li J W. An overview of critical mineral resource evaluation by foreign institutions[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(9): 25-32.]
- [11] 董雪松,黄健柏,钟美瑞,等.技术进步对关键金属矿产需求影响的研究综述[J].资源科学,2020,42(8):1592-1603. [Dong X S, Huang J B, Zhong M R, et al. A review on the impact of technological progress on critical metal mineral demand[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1592-1603.]
- [12] 左绿水,王昶.面向新能源汽车的关键高技术矿产循环利用潜力评估与开发策略[J].国土资源情报,2020(10):12-20. [Zuo L S, Wang C. Recycling potential evaluation and development strategies of high-tech minerals for new energy vehicles[J]. Land and Resources Information, 2020(10): 12-20.]
- [13] 翟明国,吴福元,胡瑞忠,等.战略性关键金属矿产资源:现状与问题[J].中国科学基金,2019,33(2):106-111. [Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 106-111.]
- [14] 龙如银,杨家慧.国家矿产资源安全研究现状及展望[J].资源科学,2018,40(3):465-476. [Long R Y, Yang J H. Research status and prospect of national mineral resource security[J]. Resources Science, 2018, 40(3): 465-476.]
- [15] 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.]
- [16] 陈其慎,张艳飞,邢佳韵,等.国内外战略性矿产厘定理论与方法[J].地球学报,2021,42(2):137-144. [Chen Q S, Zhang Y F, Xing J Y, et al. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2): 137-144.]
- [17] 彭翀,郭祖源,彭仲仁.国外社区韧性的理论与实践进展[J].国际城市规划,2017,32(4):60-66. [Peng C, Guo Z Y, Peng Z R. Research progress on the theory and practice of foreign community resilience[J]. Urban Planning International, 2017, 32(4): 60-66.]
- [18] 刘逸,纪捷韩,许汀汀,等.战略耦合对区域经济韧性的影响研究:以广东省为例[J].地理研究,2021,40(12):3382-3398. [Liu Y, Ji J H, X T T, et al. The impact of strategic coupling on regional economic resilience under globalization: A case study of Guangdong province[J]. Geographical Research, 2021, 40(12): 3382-3398.]
- [19] 李彤羽.韧性城市研究新进展[J].国际城市规划,2017,32(5):15-25. [Li T Y. New progress in study on resilient cities[J]. urban planning international, 2017, 32(5): 15-25.]
- [20] 孙久文,孙翔宇.区域经济韧性研究进展和在中国应用的探索[J].经济地理,2017,37(10):1-9. [Sun J W, Sun X Y. Research progress of regional economic resilience and exploration of its application in China[J]. Economic Geography, 2017, 37(10): 1-9.]
- [21] Sensier M, Artis M. The resilience of employment in Wales: Through recession and into recovery[J]. Regional Studies, 2016, 50(4):586-599.
- [22] 唐亮,何杰,靖可.关联供应链网络级联失效机理及鲁棒性研究[J].管理科学学报,2016,19(11):33-44. [Tang L, He J, Jing K. Cascading failure mechanism and robustness of interdependent supply chain networks[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(11): 33-44.]
- [23] 张文朗,罗得恩.中国食品价格上涨因素及其对总体通货膨胀的影响[J].金融研究,2010(9):1-18. [Zhang W L, Luo D E. Dynamic Analysis on Demand and Supply Function of Chinese Real Estate Market[J]. Journal of Financial Research, 2010(9): 1-18.]
- [24] 王东波,宋金波,戴大双,等.弹性需求下交通BOT项目特许期决策[J].管理工程学报,2011,25(3):116-122. [Wang D B, Song J B, Dai D S, et al. Decision-making on concession period for traffic bot project under elastic demand[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2011, 25(3): 116-122.]
- [25] 王金明,高铁梅.对我国房地产市场需求和供给函数的动态分析[J].中国软科学,2004(4):69-74. [Wang J M, Gao T M. Dynamic analysis on demand and supply function of Chinese real estate market[J]. China Soft Science, 2004(4): 69-74.]
- [26] 刘家国,周粤湘,卢斌,等.基于突发事件风险的供应链脆弱性削减机制[J].系统工程理论与实践,2015,35(3):556-566. [Liu

- J G, Zhou Y X, Lu B, et al. The reduction mechanism of supply chain vulnerability based on supply chain disruption risk[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(3): 608–615.]
- [27] 朱永光. 战略性关键矿产可供性影响因素及其作用机制研究[D]. 中国地质大学, 2021. [Zhu Y G. Influencing Factors and Theoretical Mechanism of Strategic Critical mineral Resources Availability[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 2021.]
- [28] 邵留国, 蓝婷婷. 伴生性关键矿产资源安全研究综述与展望[J]. *资源科学*, 2020, 42(8): 1452–1463. [Shao L G, Lan T T. Review of the by-product critical minerals resource security research and prospects[J]. *Resources Science*, 2020, 42(8): 1452–1463.]
- [29] 闫卫东, 孙春强, 郭娟, 等. 2020年全球矿业展望[J]. *中国矿业*, 2020, 29(1): 6–12. [Yan W D, Sun C Q, Guo J, et al. Global mining outlook in 2020[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(1): 6–12.]

The resilience of nodes in critical mineral resources supply chain networks under emergent risk: Take nickel products as an example

SHEN Xi, GUO Haixiang, CHENG Jinhua

(School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: As an important material basis for national industrial development, critical mineral resources global trade network is frequently impacted by emergent risks, which pose a threat to the resource supply security of import-dependent countries. From the perspective of the global trade network and the input-output relationships of the industrial chain and based on the multi-layer complex network theory, this study modeled the global trade network of critical mineral resources as well as the risk transmission mechanism for emergent risk simulation, and proposed a resilience measurement for nodes in the network using the results obtained from multiple risk scenarios simulation. Taking six products in the nickel mineral resource industrial chain as example, using the global trade data of 2018 for empirical analysis. The research shows that: (1) The import structure of Nickel resources in China is extremely unbalanced, causing great potential risk to the supply security of nickel resources in China. China's demand for nickel ore, nickel matte and other upstream industrial chain products is rigid, and the price sensitivity is low. (2) The price fluctuation caused by risk has no significant affect on China's import loss, while the most influential factor on risk resilience is resource competitiveness, which is directly related to import structure, export share of risk sources, and the ability of national industry to transfer additional costs. Due to the difference in competitiveness, the Philippines will cause greater supply risk of nickel resources to China than Indonesia. (3) The same country has different risk resilience in the face of different sources of risk. When the sources of risk are Indonesia and the Philippines, the loss of nickel resource imports to China will increase by 1.74% and 1.77% when the risk scale increases by 1%. China is less resilient in the face of emergent risks from the Philippines. The evaluation of single country's risk resilience in critical mineral resource supply chain network is of significance to the control of macroscopical resource supply situation and the pertinence of resource policies.

Key words: multi-layer complex network; critical mineral resources; supply chain; risk; resilience; nickel products