

引用格式:赵怡然,高湘昀,孙晓奇,等. 产业链视角下贸易依赖网络结构变动对钴价格的影响[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1344-1357. [Zhao Y R, Gao X Y, Sun X Q, et al. The impact of structural changes of trade dependence network on cobalt price from the perspective of industrial chain[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1344-1357.] DOI: 10.18402/resci.2022.07.04

# 产业链视角下贸易依赖网络结构变动对钴价格的影响

赵怡然<sup>1</sup>,高湘昀<sup>1,2</sup>,孙晓奇<sup>3</sup>,司景舰<sup>1</sup>,孙笑甜<sup>1</sup>,伍 涛<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)经济管理学院,北京 100083;2. 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室,北京 100083;3. 深圳大学中国海外利益研究院,深圳 518060)

**摘要:**战略性矿产资源产业链产品的贸易网络结构变动可能会对各环节产品价格波动造成影响。本文以钴为例,选取2007—2020年上游钴矿、中游钴酸锂、下游锂电池的贸易数据,构建了钴产业链的贸易依赖网络,并分析了相应网络的结构特征;结合LASSO-PVAR模型及脉冲响应函数,分析了贸易依赖网络结构变动对产业链上中下游产品价格波动的动态影响。结果表明:①钴产业链贸易依赖网络结构呈现出上游钴矿贸易受资源禀赋国主导,中游钴酸锂贸易以少数发达国家为中心形成网络集团,下游锂电池贸易以荷兰、德国、美国、中国等国家为主要伙伴国的特征。②上游钴矿价格主要受到上游和下游贸易依赖强度的影响,中游钴酸锂价格主要受到中游和下游中介控制优势的影响,下游锂电池受到上游和中游贸易伙伴数量以及下游贸易集团化程度影响。③产业链下游锂电池价格受到贸易网络结构变化影响较大,最大波动幅度超过20%;上游钴矿价格受到贸易网络结构变化影响次之,均在10%之内;中游钴酸锂价格受到贸易网络结构变化影响最小,均不超过5%。贸易依赖网络结构变动对价格的冲击影响在第3年之后逐渐消退。本文为探究资源价格影响因素提供了新的研究视角,为战略性矿产资源价格监测工作提供了相关建议。

**关键词:**贸易依赖;网络结构;价格;钴资源;产业链;脉冲响应函数

DOI:10.18402/resci.2022.07.04

## 1 引言

战略性矿产资源已然成为支撑中国第二个百年目标和经济高质量发展的重要物质保障,在新兴产业和国防军工工业具有不可替代的作用。随着新兴产业的迅猛发展及电动汽车的大力推广,市场对钴资源的需求和消费激增,钴资源的战略重要性也日益提升<sup>[1-3]</sup>。中国是全球最大的钴矿石进口国<sup>[4]</sup>,进口量占世界贸易进口总量的75%以上;中国钴矿石的对外依赖度高,导致钴资源产业链产品的供给安全受到影响<sup>[5,6]</sup>,因此明晰钴产业链产品价格的影响因素对于钴资源产业链平稳健康发展具有重要意义。

由于钴产业链产品的供应中心和消费中心分布在不同地理区域<sup>[7,8]</sup>,地缘政治<sup>[9]</sup>会对钴产业链产品的国际贸易关系产生影响,而贸易关系<sup>[10]</sup>会进一步对贸易价格产生影响。一方面,基于供给角度,拥有钴资源的国家供应骤减甚至中断可能直接导致双边和多边贸易发生重大变化,促使原有的贸易结构变动甚至贸易格局被重塑进而对钴产业链产品贸易价格产生影响<sup>[11]</sup>。另一方面,基于需求角度,各国电子产业和新能源汽车产业的发展会增加对钴资源的需求<sup>[12]</sup>,使得原有的供需平衡情形发生变化,促使国际贸易格局产生变动,进而对国际钴产业链产品贸易价格产生影响。此外,产品价格不仅

收稿日期:2021-09-18 修订日期:2022-02-22

基金项目:国家自然科学基金重大项目(71991481);国家自然科学基金项目(42001242;41901246)。

作者简介:赵怡然,女,河北石家庄人,博士研究生,研究方向为资源环境经济与管理。E-mail: yiran\_zhao0815@163.com

通讯作者:高湘昀,男,山西平遥人,博士,教授,博导,研究方向为矿产资源经济复杂系统管理。E-mail: gxy5669777@126.com

2022年7月

受供给量和需求量的影响,还会受供需之间的关联关系及其结构变动的影响。由于参与国际贸易的国家数量众多,贸易依赖关系错综复杂,呈现出网络化的结构特征<sup>[13]</sup>,贸易依赖网络结构随时间发生演化,同样会对价格产生影响。以往的资源价格研究主要关注市场供给量和需求量对价格的影响,而忽视了供需主体间依赖关系变动及贸易依赖网络结构变动对价格的影响。为了更好地应对国际市场外部价格冲击<sup>[14]</sup>,有必要从依赖网络结构视角出发,识别表征网络结构的国家贸易伙伴数量、贸易依赖程度、中介控制优势、集团化程度等特征,从供需主体间的贸易关系变动及其造成的贸易网络结构变动角度深入研究资源价格的影响因素。

矿产资源产业链各环节产品价格受到上中下游产品供需关系的影响<sup>[15]</sup>。以往学者的研究发现价格的影响因素存在成本推动和需求拉动效应<sup>[16]</sup>;谌金字等<sup>[17]</sup>的研究发现战略性金属矿产产业链的价格影响因素可以细分为供给、预防性需求和经济需求等方面;朱含蓄等<sup>[18]</sup>分析了上中下游价格指数之间的传导机制并且揭示了不同价格指数波动的驱动效应,结果表明不同环节的价格通过生产链条最终会传导至消费者价格。前人的研究对探究产业链价格的传导机制<sup>[19]</sup>、影响因素提供了有益的思路<sup>[20]</sup>,然而缺乏从产业链视角分析矿产资源各个阶段的贸易结构变动对价格的影响。

根据资源依赖理论,若一个国家依赖某种资源,则资源国的相关政策及各种变动会对资源依赖国的进口及贸易结构产生影响<sup>[13,21]</sup>。贸易依赖度可以对贸易国之间的资源依赖关系进行刻画<sup>[22]</sup>,一些学者利用互信息(PMI)指标对石油<sup>[23]</sup>、钴矿石等产品的贸易依赖问题进行了分析。PMI作为衡量贸易依赖度的指标,考虑了贸易出口国的综合供应能力以及进口国的需求水平,突破了简单对两个国家贸易总量的考察<sup>[24]</sup>。近年来,运用复杂网络表征国家的角色和地位<sup>[25]</sup>来研究贸易网络结构的思路逐渐得到了认可<sup>[26]</sup>。因此,本文将资源依赖理论和复杂网络分析方法结合,对比分析钴产业链国际贸易中的典型国家在贸易依赖网络中的结构特征;结合最小绝对收缩和选择算子的面板向量自回归(LASSO-PVAR)模型,研究钴资源上、中、下游产品贸易依赖网络结构对各环节产品贸易价格的影响。在此基

础上,结合脉冲响应函数研究产业链不同环节中钴资源贸易依赖网络结构指标受到1个单位外部冲击时,产品贸易价格的响应程度,包括影响大小、传导速度和影响持续时间。由此,综合探讨基于产业链的钴资源贸易依赖网络结构对产品贸易价格的影响机制,为探究钴资源价格的影响因素提供了新的研究视角。

## 2 数据来源、研究思路与研究方法

### 2.1 数据来源

为分析产业链视角下钴资源贸易依赖网络结构对其价格的影响,以2007—2020年联合国商品贸易数据库(United Nations Comtrade Database)公布的含“钴(Cobalt)”关键词的商品为对象,分别获取钴矿和钴精矿(HS2605)、钴酸锂(HS284190)等贸易数据,这2种产品对应的终端应用为锂电池(HS850650),3种贸易产品具有产业链上完整的对应关系。受数据统计来源的限制,无法获取钴资源产业链上催化剂、硬质合金等下游细分产品的详细数据,因此将这3种贸易产品分别作为产业链上、中、下游的代表产品进行研究。由于参与不同类别产品国际贸易的国家变动情况较大,因此选取研究期内稳定参与国际贸易排名前20位国家的贸易数据作为研究样本,这20个国家涵盖了钴资源产业链上的主要国家,这些国家的贸易量分别占上、中、下游贸易总量的80.9%、78.6%和71.0%。基于贸易量(单位为kg)对国家间的依赖关系进行计算和表征,通过计算贸易总价值(单位为美元)和贸易总量之比得到贸易价格。

### 2.2 研究思路

本文总体的研究思路是,首先静态分析整个样本期内不同钴资源贸易产品的贸易依赖网络结构特征;其次分析钴资源的贸易依赖网络结构对产品贸易价格的影响,并分析这种影响在时间维度上的动态演化趋势,进而研究基于产业链的钴资源贸易依赖网络结构对产品贸易价格的影响(图1)。

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 贸易依赖网络构建与分析

PMI方法用于衡量2个国家之间的相互依赖关系,该方法通过考虑系统中所有国家之间的贸易量来描述国家之间的贸易偏好。换言之,系统级别的更改将影响每对国家之间贸易互动依赖关系的总

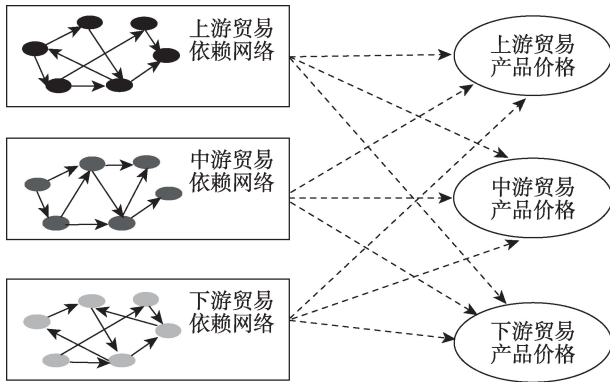


图1 研究思路示意图

Figure 1 Schematic diagram of the research framework

体平衡,这些改变都通过PMI有所反映。在商品贸易流动过程中,可以使用式(1)来探究网络中的供给需求变动造成的贸易依赖程度的变动。

$$PMI_{ij} = \log \left( \frac{T_{ij} T_{..}}{T_{i.} T_{.j}} \right) \quad (1)$$

式中:  $PMI_{ij}$  为  $i$  国家和  $j$  国家之间原始的贸易依赖程度;  $T_{ij}$  为  $i$  和  $j$  之间的贸易交易量;  $T_{..}$  是参与国际贸易的所有贸易量的总和;  $T_{i.}$  是  $i$  国家当年所有的贸易进口量;  $T_{.j}$  是  $j$  国家当年所有的贸易出口量。

在此基础上,为了更好地呈现国家之间的相互依赖关系,构建了有向加权贸易依赖网络。节点代表国家,边代表国家之间的贸易关系,对两国之间的依赖程度指标  $PMI$  进行如式(2)的修正之后,作为边的权重。由此构建的贸易依赖网络不仅包含了国家之间直接的贸易进出口关系信息,也涵盖了国家之间的供给和需求关系信息。

$$\omega_{ij} = \frac{PMI_{ij} - \text{Min}(PMI_{..})}{\text{Max}(PMI_{..}) - \text{Min}(PMI_{..})} \quad (2)$$

式中:  $\omega_{ij}$  是归一化后的依赖网络边的权重;  $\text{Min}(PMI_{..})$  为钴资源贸易市场中最小的  $PMI$ ;  $\text{Max}(PMI_{..})$  为最大的  $PMI$ 。

### 2.3.2 网络结构的分析指标

#### (1) 节点度

节点度是指贸易网络中与某个特定节点有直接联系的节点数目,用以衡量该节点在贸易网络中与之发生贸易的节点数量。节点度越大,表示与该国发生贸易的国家数量越多。有向网络中出度表示一个国家出口贸易伙伴数量,入度表示进口贸易

伙伴数量。分别表示为:

$$K_i^{\text{out}}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(t) \quad (3)$$

$$K_i^{\text{in}}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ji}(t) \quad (4)$$

式中:若  $i$  国在  $t$  年与  $j$  国存在贸易关系,则  $a_{ij}(t)=1$ ,  $k_i^{\text{out}}(t)$  表示  $t$  年  $i$  国的  $a_{ij}(t)$  的总和,即该国家所有出口贸易伙伴数量;若  $i$  国与  $j$  国不存在贸易关系,则  $a_{ij}(t)=0$ 。  $k_i^{\text{in}}(t)$  表示  $t$  年  $i$  国的  $a_{ji}(t)$  的和,即该国家所有进口贸易伙伴数量。

#### (2) 节点强度

全球钴资源贸易依赖网络中,各节点之间依赖程度存在显著差异。节点强度是指节点  $i$  的所有连边加权值的总和。在该网络中,加权重描述了一个节点同所有与之相连的节点的依赖关系。当一个节点的加权重越高,表示该国家对其贸易伙伴的依赖性越强,用  $S$  表示。有向网络的节点强度分为加权出度  $S_i^{\text{out}}$  与加权入度  $S_i^{\text{in}}$ ,计算公式为:

$$S_i^{\text{out}}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_{ij} \quad (5)$$

$$S_i^{\text{in}}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ji} w_{ji} \quad (6)$$

式中:  $S_i^{\text{out}}(t)$  为  $i$  国作为出口国,其贸易出口依赖程度的总和;  $w_{ij}$  表示  $a_{ij}$  的权重,即从  $i$  国对  $j$  国的贸易依赖度;  $S_i^{\text{in}}(t)$  为  $i$  国作为进口国,其贸易进口依赖程度的总和;  $w_{ji}$  表示  $a_{ji}$  的权重,即从  $j$  国对  $i$  国的贸易依赖度。

#### (3) 中介中心性

该指标表征某一节点控制其他节点之间关系的程度,中介中心性等于网络中经过某个节点并连接这2个节点的最短路径占这2个节点之间的所有最短路径总数之比。在贸易依赖网络中,该指标可以反映一个国家中介控制性的强弱,即该国家作为贸易中转国对其他贸易国的中转和桥接作用,由式(7)计算<sup>[27]</sup>:

$$BC_i = \sum_{s \neq i \neq u} \frac{\sigma_{su}(i)}{\sigma_{su}} \quad (7)$$

式中:  $BC_i$  是节点  $i$  中介中心性的程度;  $\sigma_{su}$  是节点  $s$  与节点  $u$  之间最短路径的总数量;  $\sigma_{su}(i)$  是通过节点  $i$  连接节点  $s$  与节点  $u$  之间的最短路径数量。

#### (4) 接近中心性



2022年7月

接近中心性由与之有连接的网络中其他所有节点最短路径的平均长度的倒数来定义。在贸易网络中,一个国家的接近中心性越高,表示该国家与其他国家贸易关系的接近性和方便性就越高,即该国家掌握贸易主动优势的能力更强,计算如下:

$$CC_i = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i} d(j,i) \right]^{-1} \quad (8)$$

式中:  $CC_i$  是节点  $i$  的接近中心性;  $N$  是节点数;  $d(j,i)$  代表  $j$  和  $i$  之间的最短路径长度。

#### (5) 集聚系数

网络的集聚系数用以度量一个复杂网络的集团化程度,网络的集聚系数越大,说明网络中国家间的集团化程度越高,国家之间的关系越紧密。加权集聚系数计算公式为:

$$CW_i = \frac{1}{s_i(k_i-1)} \sum_{j,k} \frac{(w_{ij} + w_{ik})}{2} a_{ij} a_{jk} a_{ki} \quad (9)$$

式中:  $CW_i$  是节点  $i$  的集聚系数;  $s_i$  为节点  $i$  的点强度;  $k_i$  为节点  $i$  的度;  $w_{ij}$ 、 $w_{ik}$  分别表示与节点  $i$  相连的两条边的权重;  $a_{ij}$ 、 $a_{jk}$  和  $a_{ki}$  是无权网络邻接矩阵中的值。

#### 2.3.3 LASSO-PVAR 模型的构建

本文将钴资源国际贸易依赖网络结构的表征指标及钴资源贸易价格作为内生变量。此时,  $N$  元  $p$  阶的 VAR 模型可以表示为:

$$Y_t = \alpha + \sum_{m=1}^p \beta_m Y_{t-m} + \varepsilon_t, \quad t=1, 2, \dots, p \quad (10)$$

式中:  $Y_t$  包含主要的 20 个参与钴资源贸易国家的钴资源价格;  $\alpha$  为  $20 \times 1$  维的截距向量;  $\beta_m$  是待估计的系数矩阵;  $\varepsilon_t$  表示  $k$  维的扰动列向量。

本文估计 PVAR (Panel Vector Autoregression, 面板向量自回归) 模型时采用最小绝对收缩和选择算子回归 (Least Absolute Shrinkage And Selection Operator, LASSO) 方法。将两者结合有以下的优越性<sup>[28]</sup>: ①利用 LASSO 方法避免了密集型的计算和穷举,有效解决了 PVAR 模型中变量太多造成的“维度诅咒”问题; ②LASSO 通过高效率的计算实现对模型中变量的筛选,在此基础上筛选出 PVAR 模型的变量具有鲁棒性。

LASSO 回归方法立足于最小二乘法的基础上,对系数施加约束,增加惩罚项。可同时实现对

参数的估计和变量的选择。假设所有观测值间是相互独立的,则 LASSO 回归方法的表达式如下<sup>[29]</sup>:

$$\min \sum_{t=1}^T \left\| Y_t - \alpha - \sum_{m=1}^p \beta_m Y_{t-m} \right\|_F^2 + \lambda_m \|\beta_m\|_1 \quad (11)$$

$$\|\beta_m\|_1 = \sum_{q=1}^N |\beta_{m,q}| \quad (12)$$

式中:  $\left\| Y_t - \alpha - \sum_{m=1}^p \beta_m Y_{t-m} \right\|_F$  为估计误差矩阵的弗罗

贝尼乌斯范数 (Frobenius norm), 其表示 PVAR 模型误差程度的绝对值平方的总和,也是传统 PVAR 模型基于最小二乘法进行估计时的目标函数,而  $\lambda_m \|\beta_m\|_1$  是增加的对最小二乘法估计的回归参数惩罚项。  $\lambda_m$  是惩罚参数,通过连续交叉验证法进行估计,  $\|\beta_m\|_1$  表示  $20 \times 20$  维回归参数向量  $\beta_m$  中回归参数绝对值之和,通过将弱相关系数压缩,使模型满足稀疏性。

#### 2.3.4 LASSO-PVAR 模型的检验

##### (1) 单位根检验

建立 PVAR 模型之前,采用插值法增补个别遗漏数据,同时,为了将变量统一到同一个单位以及消除变量异方差,对一些变量采用自然对数进行处理。为了避免模型出现伪回归等现象,在建立分析模型之前,通常采用单位根检验的方法来检验序列的平稳性。对原始序列进行一阶差分后,均为平稳序列,其可以表征所构建模型中网络结构指标及各环节价格的变动率。同时为了克服一种单位根检验方式可能存在的偏差,分别进行了 LLC 检验、IPS 检验、ADF 检验、PP 检验等 4 种检验方式,检验的具体结果如表 1 所示。根据表 1,大部分变量都能通过 LLC、ADF 和 PP 检验,证明数据是平稳的,可以进行面板向量自回归分析。

##### (2) 滞后阶数选择

在正式估计面板 VAR 模型系数矩阵之前,需要首先确定模型的滞后阶数。在考虑了脉冲响应函数 (Impulse Response Function, IRF) 收敛性的基础上,按照信息准则中 AIC、BIC 和 HQIC 三大原则选取滞后阶数,结果如表 2 所示。3 个模型经过验证,确定了最优滞后阶数均为 1 阶。从 PVAR 模型的估计结果来看,上游钴矿价格会受到往期价格的变动影响;中游钴酸锂价格主要受到该环节往



表1 面板单位根检验结果

Table 1 Panel unit root test results

| 检验方法 | $\Delta \ln(up\_indegree)$ | $\Delta \ln(up\_outstrength)$ | $\Delta \ln(up\_bc)$           | $\Delta \ln(mid\_indegree)$     | $\Delta \ln(mid\_cc)$  |
|------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| LLC  | -11.06***                  | -5.73***                      | -8.13***                       | -25.95***                       | -5.17***               |
| IPS  | -8.63***                   | -6.91***                      | -8.66***                       | -13.01***                       | -7.92***               |
| ADF  | 139.24***                  | 125.83***                     | 127.72***                      | 149.79***                       | 133.95***              |
| PP   | 245.20***                  | 297.87***                     | 223.19***                      | 313.41***                       | 306.28***              |
| 检验方法 | $\Delta \ln(mid\_c)$       | $\Delta \ln(down\_outdegree)$ | $\Delta \ln(down\_instrength)$ | $\Delta \ln(down\_outstrength)$ | $\Delta \ln(down\_cc)$ |
| LLC  | -9.94***                   | 0.27                          | -0.46                          | -7.14***                        | -6.00***               |
| IPS  | -8.25***                   | -4.08***                      | -6.36***                       | -9.78***                        | 8.66***                |
| ADF  | 136.85***                  | 82.26***                      | 116.72***                      | 164.26***                       | 164.22***              |
| PP   | 282.82***                  | 190.26***                     | 342.11***                      | 356.38***                       | 342.48***              |
| 检验方法 | $\Delta \ln(down\_c)$      | $\Delta \ln(up\_price)$       | $\Delta \ln(mid\_price)$       | $\Delta \ln(down\_price)$       |                        |
| LLC  | -5.62***                   | -12.01***                     | -6.65***                       | 8.20                            |                        |
| IPS  | -6.04***                   | -1.06***                      | -7.89***                       | -5.43***                        |                        |
| ADF  | 109.00                     | 175.09***                     | 132.10***                      | 103.01***                       |                        |
| PP   | 240.16***                  | 367.50***                     | 323.58***                      | 317.18***                       |                        |

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示在10%、5%、1%的水平上显著。

表2 模型滞后阶数的确定

Table 2 Determination of the model lag order

| 滞后阶数   | AIC    | BIC    | HQIC   |
|--------|--------|--------|--------|
| 模型1-上游 |        |        |        |
| 1      | 30.24* | 35.22* | 32.25* |
| 2      | 125.75 | 132.90 | 128.61 |
| 3      | 156.37 | 166.12 | 160.32 |
| 4      | 141.60 | 154.33 | 146.77 |
| 5      | 173.35 | 189.62 | 179.96 |
| 模型2-中游 |        |        |        |
| 1      | 27.74* | 31.55* | 29.27* |
| 2      | 30.29  | 35.61  | 32.43  |
| 3      | 136.35 | 143.42 | 139.21 |
| 4      | 119.89 | 129.00 | 123.58 |
| 5      | 128.42 | 139.96 | 133.11 |
| 模型3-下游 |        |        |        |
| 1      | 34.72* | 38.53* | 36.26* |
| 2      | 39.13  | 44.46  | 41.28  |
| 3      | 124.85 | 131.93 | 127.71 |
| 4      | 137.70 | 146.81 | 141.40 |
| 5      | 138.22 | 149.76 | 142.91 |

注: \*代表各准则对应的最优阶数选择。

期价格变动的影响;下游锂电池的价格会受到下游价格往期变动、下游网络中贸易国家的出口伙伴数量多寡和下游国家间贸易凝聚力强弱变动的影响。

### (3) 变量筛选及模型建立

为了分析基于产业链的钴资源贸易依赖网络结构对贸易价格的影响,选取上、中、下游每个环节的出入度、加权出入度、中介中心性、接近中心性和集聚系数,共计21个指标作为表征依赖网络结构的变量。首先,基于LASSO回归方法提炼筛选拓扑指标,上游钴矿贸易价格构建的模型中,自变量数量由21个减少为5个,保留的变量分别为:上游贸易依赖网络的加权出度( $up_{outstrength}$ )和中介中心性( $up_{bc}$ ),中游贸易依赖网络的接近中心性( $mid_{cc}$ ),下游贸易依赖网络中的加权入度( $down_{instrength}$ )和集聚系数( $down_c$ )。中游钴酸锂贸易价格构建的模型中,自变量数量由21个减少为5个,保留的变量分别为:中游贸易依赖网络中的接近中心性( $mid_{cc}$ )和集聚系数( $mid_c$ ),下游贸易依赖网络中的出度( $down_{outdegree}$ )、加权出度( $down_{outstrength}$ )和接近中心性( $down_{cc}$ )。下游锂电池贸易价格构建的模型中,自变量数量由21个减少为7个,保留的变量分别为:上游贸易依赖网络中的入度( $up_{indegree}$ ),中游贸易依赖网络中的入度( $mid_{indegree}$ )、接近中心性( $mid_{cc}$ )和集聚系数( $mid_c$ ),下游贸易依赖网络中的出度( $down_{outdegree}$ )、接近中心性( $down_{cc}$ )和集聚系数( $down_c$ )。

2022年7月

根据上文中通过LASSO回归筛选出的变量,后构建面板VAR模型如下:

$$\left\{ \begin{aligned} up_{price_{it}} &= \alpha_0 + \sum_{m=1}^n \alpha_{1m} up_{outstrength_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \alpha_{2m} up_{bc_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \alpha_{3m} mid_{cc_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \alpha_{4m} down_{instrength_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \alpha_{5m} down_{c_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \alpha_{6m} up_{price_{it-m}} \\ mid_{price_{it}} &= \gamma_0 + \sum_{m=1}^n \gamma_{1m} mid_{cc_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \gamma_{2m} mid_{c_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \gamma_{3m} down_{outdegree_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \gamma_{4m} down_{outstrength_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \gamma_{5m} down_{cc_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \gamma_{6m} mid_{price_{it-m}} \\ down_{price_{it}} &= \delta_0 + \sum_{m=1}^n \delta_{1m} up_{indegree_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \delta_{2m} mid_{indegree_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \delta_{3m} mid_{cc_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \delta_{4m} mid_{c_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \delta_{5m} down_{outdegree_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \delta_{6m} down_{cc_{it-m}} + \sum_{m=1}^n \delta_{7m} down_{c_{it-m}} + \\ &\quad \sum_{m=1}^n \delta_{8m} down_{price_{it-m}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中:  $up_{price_{it}}$ 、 $mid_{price_{it}}$ 、 $down_{price_{it}}$  分别代表  $i$  国家第  $t$  年上、中、下游钴资源贸易产品价格;  $\alpha_0$ 、 $\gamma_0$ 、 $\delta_0$  分别代表3个环节模型中的截距项;  $\alpha_{1m}$ — $\alpha_{6m}$ ;  $\gamma_{1m}$ — $\gamma_{6m}$ ;  $\delta_{1m}$ — $\delta_{8m}$  分别代表3个环节模型中滞后  $m$  期对应的变量系数;  $up_{outstrength_{it-m}}$  等变量是基于上文LASSO回归模型中筛选出的表征贸易依赖网络结构的滞后  $m$  期变量。

### 2.3.5 脉冲响应函数

在PVAR模型的基础上构建了脉冲响应函数,用以衡量当给定随机误差项1单位正向冲击时,对钴贸易产品价格当期值和未来值所产生的影响程度<sup>[30]</sup>。以此反映产业链不同环节的钴资源贸易结构受到外界冲击时,贸易依赖网络结构变动对贸易价格的影响。

假定我们在  $t=0$  时刻给  $y_1$  一个标准差的冲击,

因此,当  $y_i$  受到外部冲击时,  $y_j$  的响应为  $\Phi_{ij}^{(0)}$ ,

$\Phi_{ij}^{(1)}$ ,  $\Phi_{ij}^{(2)}$  ..., 如式(14)所示:

$$\Phi_{ij}^{(q)} = \frac{\partial y_{i,t+q}}{\partial \varepsilon_{jt}}, q=0,1,2,\dots,N, t=1,2,\dots,T \quad (14)$$

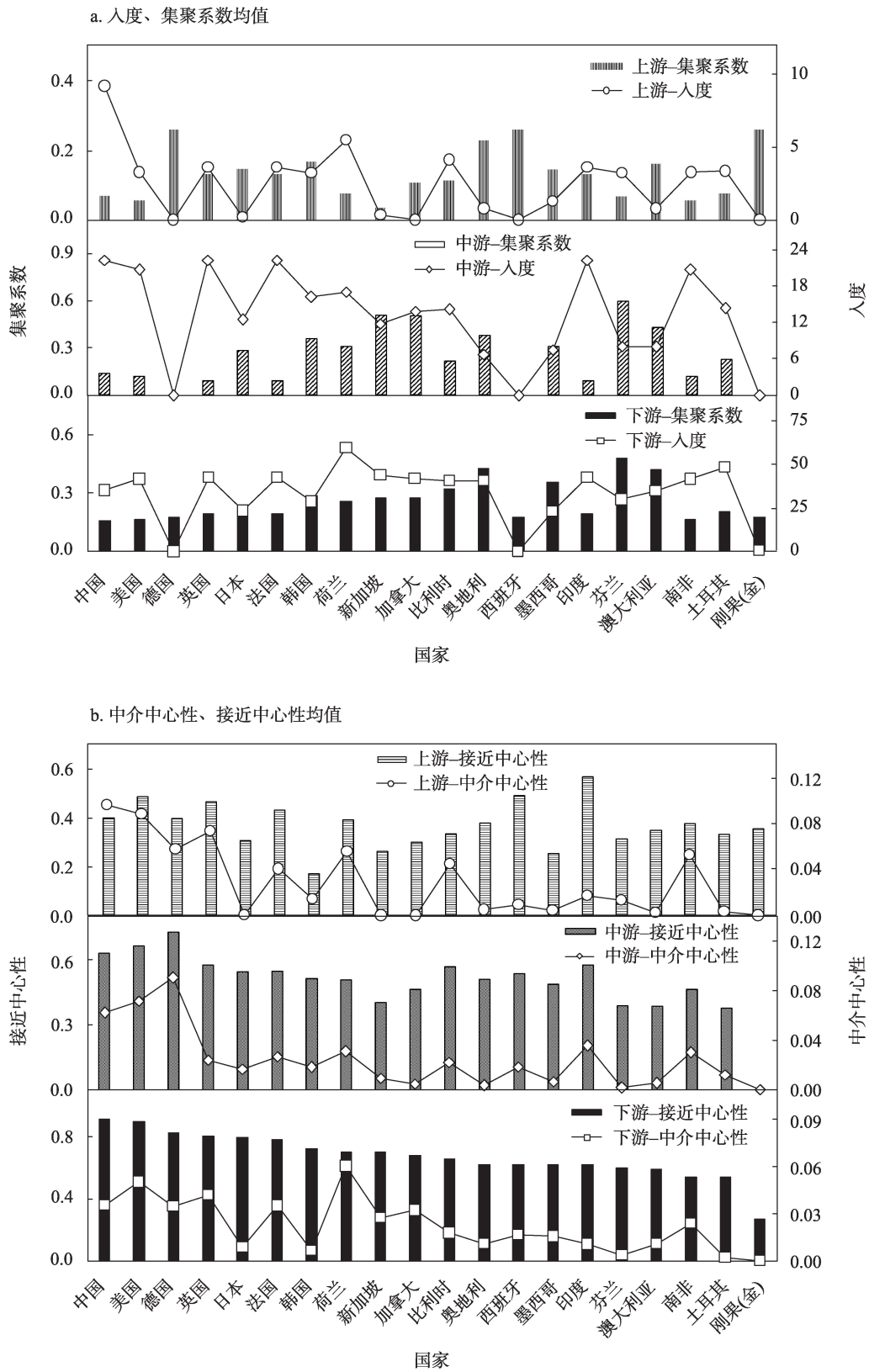
式中:作为滞后期  $q$  的函数,  $\Phi_{ij}^{(q)}$  表示令其他误差项在任何时期都不变的条件下,当第  $j$  个变量对应的误差项  $\varepsilon_{jt}$  在  $t$  期受到1个单位的冲击后,对第  $i$  个内生变量  $y_i$  在  $t+q$  期造成的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 钴资源贸易产品的贸易依赖网络结构

为了对比不同国家在产业链各环节产品贸易依赖网络中的角色,识别不同环节的贸易依赖网络结构特征,对每个国家在2007—2020年的贸易网络拓扑指标进行均值化处理,结果如图2所示。上游钴矿国际贸易依赖网络中各国的入度普遍低于中游和下游贸易依赖网络中各国的入度,钴矿贸易被少数国家主导的特征明显(图2a)。其中,中国贸易进口伙伴数量最多,由于中国是钴冶炼大国,但资源储量不足,因此每年需要进口大量的钴矿,必须积极拓展进口贸易伙伴渠道。对于中游钴酸锂国际贸易依赖网络,英国、中国、法国、美国、印度等国家的进口贸易伙伴数量位于前列,且数量相差不大。中、美、欧以及东南亚是钴酸锂的重要市场,这些国家在国际贸易领域积极拓展进口贸易伙伴来满足产业发展需求。对于下游锂电池国际贸易依赖网络,荷兰锂电池贸易进口伙伴数量最多,一方面由于从2016年开始,欧洲多个国家提议禁止出售燃油车,该政策加速了电动汽车的发展进度。荷兰在制造业方面有着较好的基础和优势,包括平板电脑、混合动力汽车的发展带动了荷兰制造业优势的发挥,使得荷兰在短时间内增大了对锂电池的贸易需求量;另一方面,荷兰作为传统的贸易枢纽和外向型经济占据主导地位的国家,与欧盟内外的国家都有紧密的联系,贸易表现活跃,进口伙伴数量众多。

在贸易依赖网络中,将不同环节上的国家对其进口伙伴的依赖程度进行对比(图2c),结果表明主要国家对上游钴矿产品的依赖程度整体低于中游和下游。其中,荷兰钴矿加权入度的平均水平比较高;对于中游钴酸锂产品而言,中国、美国和德国对进口伙伴的依赖度较强;下游锂电池产品中,荷兰的加权入度比较强。这些国家在加权入度方面的表现与其入度的表现基本保持一致,说明这些国家





续图2

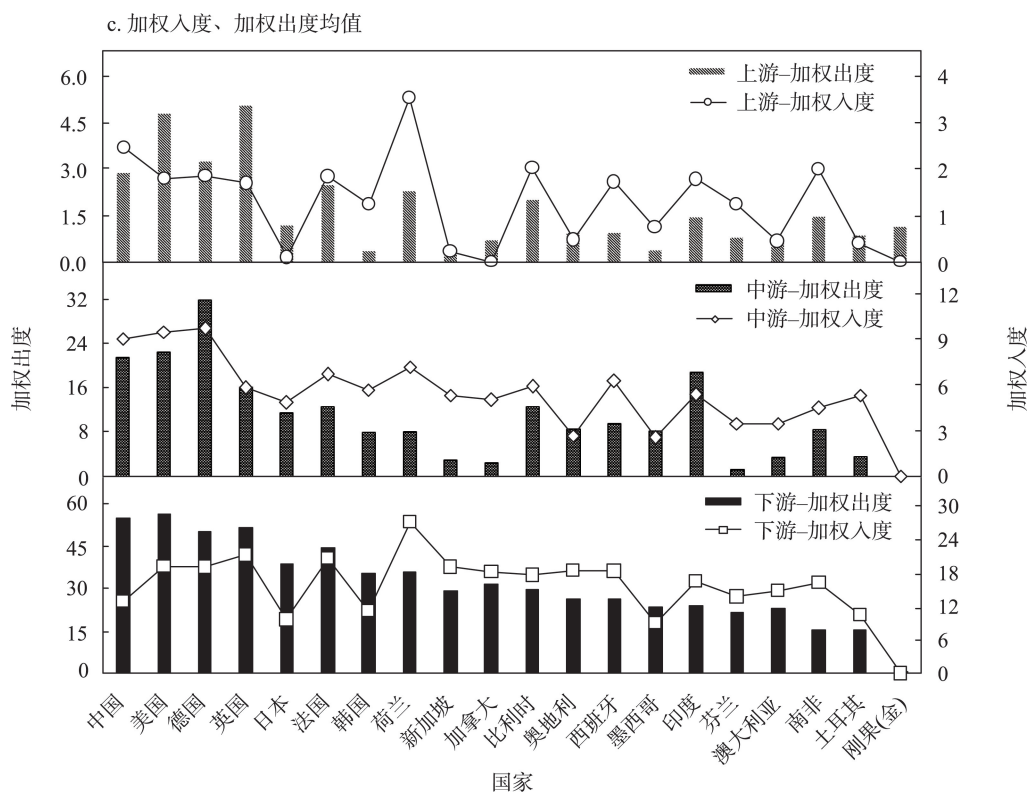


图2 钴资源产品的关键国家及贸易依赖网络结构

Figure 2 Key countries and trade dependent network structure for cobalt resources products

通过拓展自身的贸易进口渠道来试图分散供应风险。但是在国际贸易过程中,由于其贸易伙伴数量较多,且需要依靠多个国家的贸易中转和桥接才能完成资源的流动,在这个过程中部分贸易伙伴的供给能力并不充分,因此受制于部分贸易国家的供应水平,这些国家表现出更高的贸易依赖程度。国家对其出口伙伴的依赖程度结果显示,上游钴矿国际贸易依赖网络中,美国和英国的加权出度较高;中游钴酸锂国际贸易依赖网络中,德国的加权出度较高;下游锂电池国际贸易依赖网络中,中国、美国对出口贸易伙伴的依赖水平更加突出。

对比钴产业链3个环节贸易依赖网络中国家的中介控制优势结果(图2b),中国、美国、英国在上游钴矿贸易中的中介中心性较高;德国、美国、中国在中游钴酸锂贸易中的中介中心性较高;荷兰、美国、英国在下游锂电池贸易中的中介中心性较高。例如,中国钴矿贸易桥接从刚果(金)、澳大利亚等钴矿原产地的进口关系与向美国、英国等国的出口贸

易互动,这意味着中国在受到进口伙伴的贸易依赖度变化之后,将相应的供需形势变动转移到中国的出口贸易伙伴。

典型国家掌握贸易主动优势的结果显示(图2b),上游钴矿国际贸易依赖网络中,印度、西班牙、美国等国的接近中心性较高;中游钴酸锂国际贸易依赖网络中,德国、美国、中国表现突出;下游锂电池国际贸易依赖网络中,中国、美国、德国的接近中心性位居前列。这些国家涵盖了中、美、欧以及印度等具有钴资源产业链产品技术加工优势的国家,同时,这些国家的国际影响力强,它们的贸易政策可能会对其他国家较快地产生影响。

对比钴产业链3个环节贸易依赖网络的集团化程度(图2a),从整体来看,中游钴酸锂贸易的集团化程度高于上游钴矿及下游锂电池。上游钴矿国际贸易依赖网络中,刚果(金)、西班牙等国的集聚系数较高,说明与其具有贸易合作国家的互动较为密切,刚果(金)作为全球主要的钴矿出口国,其主

要的贸易合作伙伴包括中国、南非等国,而这些国家间贸易关系也十分紧密;中游钴酸锂贸易以少数发达国家为中心形成网络集团,芬兰、加拿大、新加坡等国对其周围的贸易伙伴贸易凝聚力强;下游锂电池国际贸易依赖网络中,芬兰、奥地利、澳大利亚等国在贸易中拥有较高的集聚系数。

### 3.2 贸易依赖网络结构对贸易价格的影响

#### 3.2.1 上游价格动态响应结果分析

为了深入剖析钴产业链贸易相关产品贸易依赖网络结构对产品价格的影响,本文分别对钴产业链上游钴矿、中游钴酸锂和下游锂电池的价格及其影响因素构建了PVAR模型,结合脉冲响应函数,分析了钴产业链产品价格受到本环节贸易价格波动以及各环节贸易依赖网络结构变动的外部冲击之后,动态的影响程度和持续时间。如图3所示,横轴表示脉冲响应的时间,设置为6年,纵轴是受到自变量冲击的因变量的响应程度,中间的曲线表示脉冲响应曲线,直线为水平值0;上下两条曲线表示95%的置信区间。

在给定上游产品价格变动1个标准差的冲击后(图3a),上游产品价格的响应过程经历了先减小后逐渐增大再衰减的过程,上游产品价格在第1年的

脉冲响应数值为-29.12%,第2年的响应值为4.97%,此后冲击的影响波动逐渐减小,低于1%。因此可以推断,钴矿贸易价格上涨会通过影响市场供需对1年后的价格产生影响,当钴矿贸易的价格受到外部冲击时,1年之后该产品的贸易价格的下降幅度超过29%,且作用在此时最为明显,此后影响逐渐减弱,且呈现正负交替的响应结果。

对于上游贸易依赖网络,国家的加权出度即出口贸易依赖强度变动受到1单位的正向冲击(图3b),价格在当期并没有明显的变化,但是在第1年上游价格变动也是正向的,响应值为3.70%,第2年为-1.30%,在第3年之后响应值逐渐降低至1%以下。贸易国家对其出口伙伴的依赖度升高说明此时市场上呈现供不应求的局面,在卖方市场下会促使上游钴矿价格在1年之后呈现上涨趋势,变动幅度超过3%,然而这种影响持续的时间比较短。拥有资源禀赋的国家或是掌握加工、中转优势的国家,其中介控制优势的变动会对与其有贸易互动关系的国家产生很大的影响(图3c)。上游产品价格对上游关键国家的中介中心性变化冲击响应在第1年为1.61%,第2年为-1.11%,而后降低至1%以下。变动趋势与上游出口贸易强度的冲击影响类

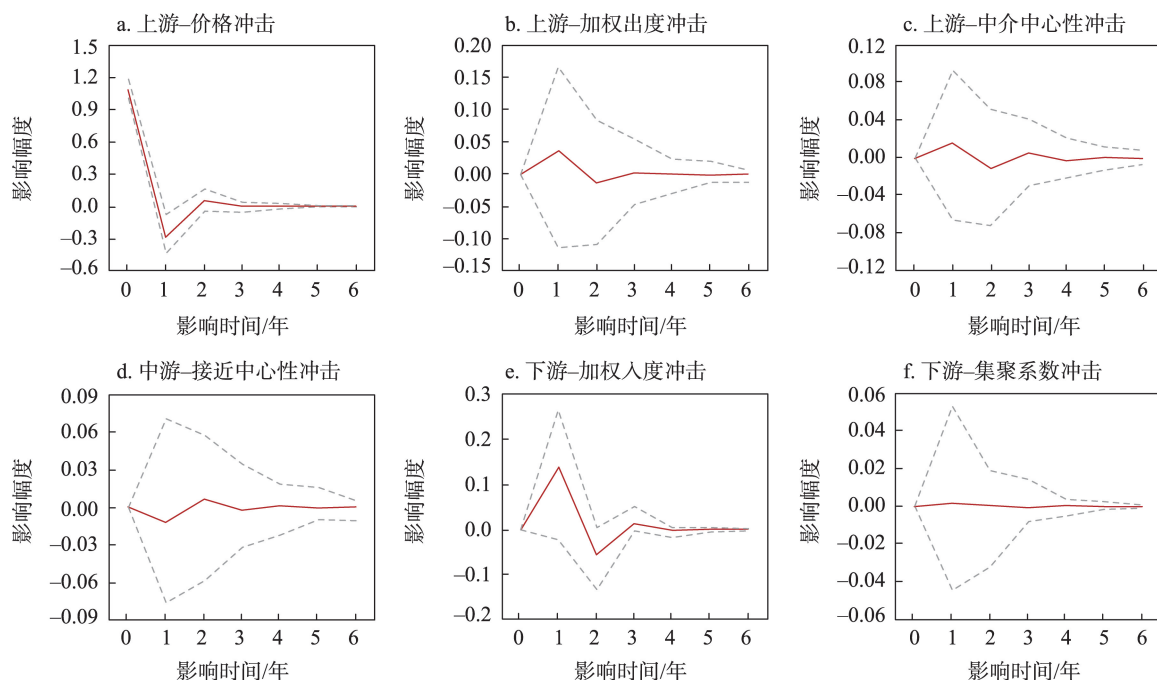


图3 上游产品钴矿价格受到的脉冲响应结果

Figure 3 Impulse response of upstream product cobalt prices

2022年7月

似,从短期看,这意味着某些参与上游钴矿贸易的国家在依赖网络中角色作用得到强化,对于控制其他国家的贸易依赖性能力加强,此时上游贸易市场处于更为活跃的状态,会推高钴矿贸易的价格。

产品贸易价格在受到中游贸易依赖网络接近中心性的冲击后(图3d),价格对其的响应在第1年为1.25%,第2年为0.65%,而后下降较快,影响甚微。中游钴酸锂贸易中国家掌握资源主动优势的能力升高,通过产业链的生产环节传导,会对上游钴矿价格有大约1%正向影响的增幅。

上游价格对下游贸易依赖网络中加权入度(图3e)和集聚系数(图3f)变动的响应结果表明,第1年的响应值分别为1.38%和0.20%。一方面下游锂电池贸易中加权入度表示的是贸易国家对其进口伙伴的依赖度升高,这意味着贸易国家的进口需求增强,可能会推高下游锂电池的贸易价格;另一方面,下游中一些具有较强贸易依赖凝聚能力的国家会使得整体贸易网络结构呈现更加紧密的状态,贸易国家之间的依赖强度提升,此时意味着下游锂电池贸易更加活跃,贸易互动促使下游贸易价格上升,下游价格上涨会传递至上游原材料的价格表现上,促使钴矿贸易价格也会呈现上涨趋势。

### 3.2.2 中游价格动态响应结果分析

在给定中游贸易依赖网络价格变动的1个标准差的冲击后(图4a),中游产品价格的响应过程经历了先减小后逐渐增大再衰减的过程,在第1年响应程度为-16.30%,第2年迅速变化到5.67%,与上游产品贸易价格的响应程度相比,中游钴酸锂贸易在短期内响应幅度较小。

中游产品贸易价格受到中游贸易依赖网络中接近中心性(图4b)和集聚系数(图4c)的影响结果表明,在1~6年之间一直表现出在0附近波动的状态,脉冲响应函数值也处在-1.23%~1.57%这一区间。可见,中游贸易依赖网络结构变动对该环节价格变动影响较为有限。下游贸易依赖网络中出度(图4d)和加权出度(图4e)对中游价格1个标准差的冲击所产生的累积响应函数值结果表明,下游锂电池贸易的出口国家数量在第1年影响很小,但在第2年达到峰值0.36%。下游锂电池中贸易国家对出口伙伴的依赖强度在第1年影响为0.15%,第2年达到谷值-0.53%。这2个结构指标的变动对中游产品价格的影响均显示出明显的滞后效应,说明下游贸易中供给需求的变动情形通过产业链反馈传导至中游需要一定的时间,滞后时间为2年。

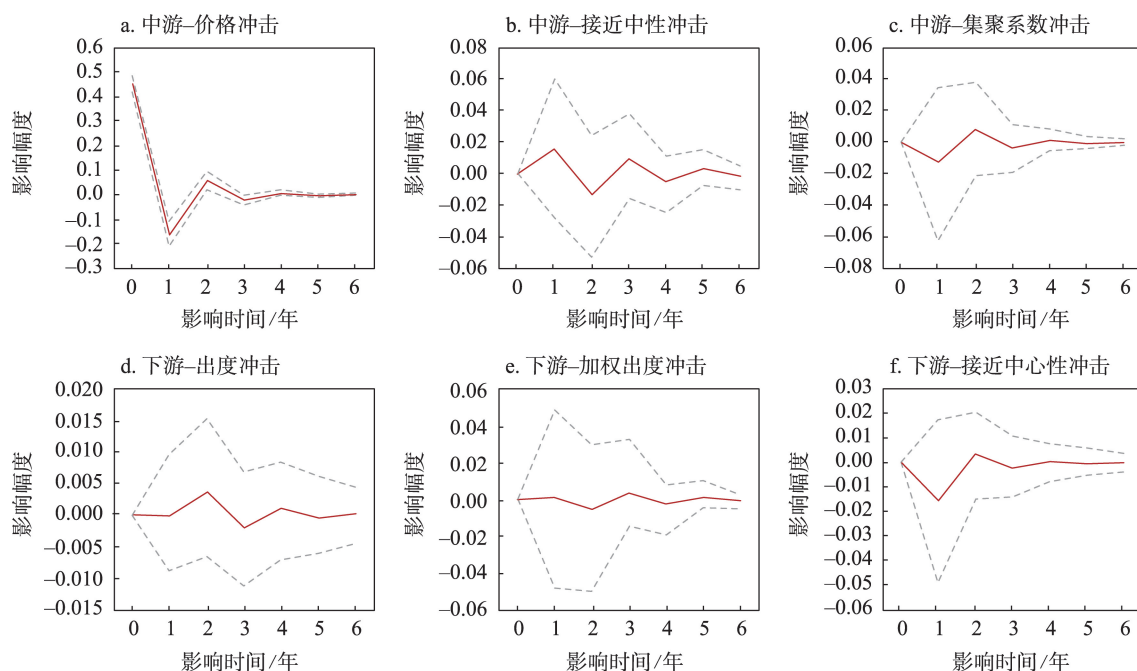


图4 中游产品钴酸锂价格受到的脉冲响应结果

Figure 4 Impulse response of midstream product lithium cobalt oxide prices



下游接近中心性对中游产品价格1个标准差的冲击所产生的累积响应函数表明(图4f),贸易中国家掌握资源的主动优势的增强,在第1年对中游价格的影响即为谷值-1.55%,第2年变化至0.37%。这表明下游锂电池贸易网络中该指标能够更快速地反映市场价格波动信息,从而反馈至中游价格。钴酸锂作为中游原材料钴矿的重要加工分类,在产业链中游起着起承转合的作用,相对上游钴矿的价格,钴酸锂的价格波动也较为平稳,主要受到中游贸易和下游贸易供需格局的影响,而鲜有受到上游价格的影响。下游锂电池作为钴资源的一个重要应用分支,市场供需情形的变化是行业发展的重要晴雨表,供需关系的变动会向上传导至中游,直接在价格上有所反应。除此之外,中游钴酸锂价格受到网络结构影响的冲击产生的变动较为有限,与钴资源中游产品种类较多且分散有关,相对上游钴矿的价格,钴酸锂的价格波动也较为平稳,说明中游钴酸锂不易受到某些关键国家角色变动的影响,因而价格相对具有更高的稳健性。

### 3.2.3 下游价格动态响应结果分析

下游产品的贸易价格其波动受到的因素较多,图5显示的是下游锂电池价格的脉冲响应图。可以看到,在给定中游贸易依赖网络价格变动的1个标准差的冲击后下游产品价格波动的冲击(图5a),第1年的响应值为-6.57%,第2年迅速回升至-0.3%。

上游网络中入度的冲击对下游产品价格的影响表明(图5b),在第1年价格响应为3.84%,第2年变为0.24%。上游钴矿的稀缺性和分布集中性特点突出,上游贸易网络中多数国家供给能力有限,因此,贸易伙伴数量的变动一定程度上可以表征市场的供需情形和活跃程度。通过对上游贸易网络结构变动的信息提炼,可以明晰下游贸易产品的价格变动趋势。分别对中游入度(图5c)、接近中心性(图5d)和集聚系数(图5e)对下游产品价格的冲击结果进行分析发现,冲击在第1年波动变化最为明显,分别为-8.35%、-1.73%和-2.51%,在第3年后逐渐趋于平稳。这印证了中游钴酸锂作为生产锂电池的重要环节,这3个网络结构的正向变动意味着进口需求的上升,中游贸易产品供过于求的局面促使中游产品价格下降,通过产业链的传导,使得下游价格呈现下降效果,例如,中游产品的贸易进口国家数量上升,下游产品的价格会下降8%左右。下游出度(图5f)、接近中心性(图5g)和集聚系数(图5h)对下游价格的冲击结果表明,同样在第1年波动变化最为明显,响应值分别为-12.89%、13.55%和22.28%。下游作为面向市场的终端环节,其变化不仅受到自身环节网络结构变化的影响,同样也会受到上、中游原材料供需变动造成的结构变化影响,这种影响是通过影响各环节的价格实现传导的,相对而言,下游产品价格受到中、下游网络结构的影

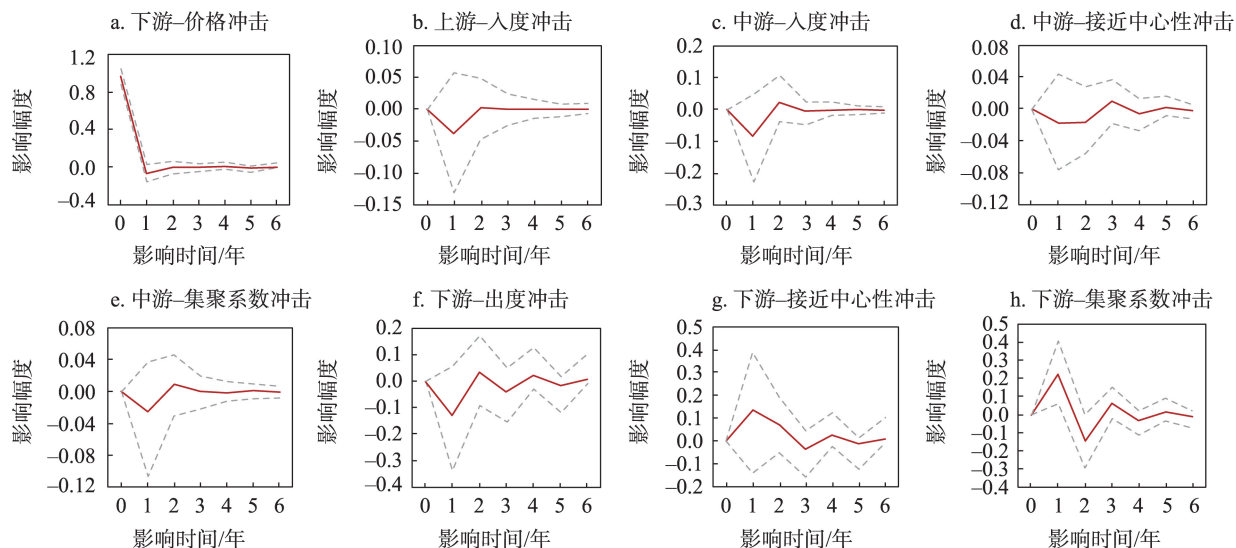


图5 下游产品锂电池价格受到的脉冲响应结果

Figure 5 Impulse response of downstream product lithium battery price

2022年7月

响要比上游网络结构的影响更为显著。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文基于资源依赖理论对产业链各环节中钴资源国际贸易依赖度进行计算和评估,并应用复杂网络理论构建钴资源产业链不同环节产品的国际贸易依赖网络。分析了钴资源贸易产品的依赖网络结构特征,结合LASSO-PVAR分析方法探究产业链上、中、下游钴资源贸易依赖网络结构对各环节产品贸易价格的影响机制。主要结论如下:

(1)钴产业链贸易依赖网络结构呈现出上游钴矿贸易受资源禀赋国主导,中游钴酸锂贸易在以少数发达国家为中心形成网络集团,下游锂电池贸易以荷兰、德国、美国、中国等国家为主要伙伴国的特征。贸易依赖网络结构中反映贸易伙伴数量、贸易依赖强度、中介控制优势、贸易集团化程度的拓扑特征是影响产品价格的因素。

(2)基于产业链上、中、下游视角,上游钴矿价格主要受到上游贸易出口依赖强度和下游进口贸易依赖强度的影响;中游钴酸锂价格主要受到中游和下游贸易中介控制优势的影响;下游锂电池价格受到上游和中游进口贸易伙伴数量以及下游贸易集团化程度影响。

(3)产业链下游锂电池价格受到贸易网络结构变化影响较大,最大波动幅度超过20%;上游钴矿价格受到贸易网络结构变化影响次之,均在10%之内;中游钴酸锂价格受到贸易网络结构变化影响最小,均不超过5%。贸易依赖网络结构变动对价格的冲击影响在第3年之后逐渐消退。这表明上游、下游受到贸易结构变化的影响较大,对市场信息的反应更为敏感;而由于价格传导的黏滞作用,中游贸易产品的价格受到供需影响传导的效果并不顺畅,贸易网络结构的变动对中游贸易价格的冲击比较弱。

### 4.2 讨论

基于以上的研究结论,对产业链中产品的价格监测不应“一刀切”,需要密切关注产业链上各环节产品间的内在联系,尤其关注对价格具有显著影响的贸易依赖结构特征及其联动影响。在国际市场上钴资源日益紧俏、价格波动剧烈的整体形势下,建立多元化的海外钴资源供应体系,持续关注局部

贸易国家政策和供需的异动情况,关注贸易的结构性调整;同时加强我国国内的战略性钴资源储备体系建设,提高资源利用率。

相关的政策制定者应采取差异化策略,对于中游产品的主要参与者而言,对供给需求的预防性预判更为重要,短期内国际供应形势的变化对价格趋势的预测意义最为明显;对于上、下游环节的主要参与者而言,不仅需要关注该贸易产品的供给需求情形,亦需关注产业链上各环节的全局情况;通过借助往期贸易结构的信息可以预判钴资源的产业链上各环节的价格趋势,从而做出合理化决策。此外,在本文构建的贸易依赖网络的框架下,一些表征网络拓扑结构的指标,无论是否加权,由于这些指标能够反映供给需求之间的关联关系以及国家在贸易中的角色和地位,都会对价格产生影响,因此启示我们制定国际贸易政策的过程中,不仅要关心本国家的贸易伙伴,还要关心贸易伙伴之间的关联关系;不仅要关心贸易数量对价格的影响,还要关注贸易关系网络结构对价格的影响。

## 参考文献(References):

- [1] Liu F F, Zhang Z W, Ye S F, et al. Challenges and improvement strategies progress of lithium metal anode[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2021, DOI: 10.3866/PKU.WHXB202006021.
- [2] Sun X, Hao H, Zhao F Q, et al. Global lithium flow 1994–2015: Implications for improving resource efficiency and security[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(5): 2827–2834.
- [3] 韩佳欢, 也贞, 方朝合, 等. 中国锂资源供需现状分析[J]. *无机盐工业*, 2021, 53(12): 61–66. [Han J H, Nie Z, Fang C H, et al. Analysis of existing circumstance of supply and demand on China's lithium resources[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2021, 53(12): 61–66.]
- [4] 余韵, 杨建锋. 中国战略性矿产地位和作用的变化: 以钴为例[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(12): 177–183. [Yu Y, Yang J F. Changes in the status and role of strategic minerals in China: A case of cobalt[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(12): 177–183.]
- [5] Helbig C, Bradshaw A M, Wietschel L, et al. Supply risks associated with lithium-ion battery materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 274–286.
- [6] Nguyen R T, Eggert R G, Severson M H, et al. Global electrification of vehicles and intertwined material supply chains of cobalt, copper and nickel[J]. *Resources Conservation and Recycling*,

- 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105198.
- [7] Zhao Y R, Gao X Y, An H Z, et al. The effect of the mined cobalt trade dependence network's structure on trade price[J]. Resources Policy, 2020, DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101589.
- [8] 刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 等. 1995–2015年美国钴物质流演变[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 524–534. [Liu L T, Zhao H L, Liu X J, et al. Cobalt material flow in the United States from 1995 to 2015 [J]. Resources Science, 2021, 43(3): 524–534.]
- [9] 葛建平, 刘佳琦. 关键矿产战略国际比较: 历史演进与工具选择[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1464–1476. [Ge J P, Liu J Q. International comparison of critical mineral strategies: Historical evolution and tool selection[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1464–1476.]
- [10] 安海忠, 李华姣. 战略性矿产资源全产业链理论和研究前沿[J]. 资源与产业, 2022, 24(1): 8–14. [An H Z, Li H J. Theory and research advances in whole industrial chain of strategic mineral resources[J]. Resources & Industries, 2022, 24(1): 8–14.]
- [11] 马玉芳, 沙景华, 闫晶晶, 等. 中国镍资源供应安全评价与对策研究[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1317–1328. [Ma Y F, Sha J H, Yan J J, et al. Safety assessment and countermeasures of nickel resource supply in China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1317–1328.]
- [12] Deetman S, Pauliuk S, van Vuuren D P, et al. Scenarios for demand growth of metals in electricity generation technologies, cars, and electronic appliances[J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(8): 4950–4959.
- [13] Dong D, Gao X Y, Sun X Q, et al. Factors affecting the formation of copper international trade community: Based on resource dependence and network theory[J]. Resources Policy, 2018, 57: 167–185.
- [14] Nykvist B, Sprei F, Nilsson M J E P. Assessing the progress toward lower priced long range battery electric vehicles[J]. Energy Policy, 2019, 124: 144–155.
- [15] Liu Y X, Li H J, Guan J H, et al. Influence of different factors on prices of upstream, middle and downstream products in China's whole steel industry chain: Based on adaptive neural fuzzy inference system[J]. Resources Policy, 2019, 60: 134–142.
- [16] 钱浩祺, 吴力波, 汤维祺. 成本效应与需求效应: 原油价格冲击的行业传导机制研究[J]. 世界经济文汇, 2014, (3): 69–83. [Qian H Q, Wu L B, Tang W Q. Cost effect and demand effect: Study on industry transmission mechanism of crude oil price shock [J]. World Economic Papers, 2014, (3): 69–83.]
- [17] 湛金宇, 朱学红. 产业链视角下结构性有色金属价格冲击的行业传导效应[J]. 运筹与管理, 2018, 27(11): 95–104. [Chen J Y, Zhu X H. Research on the industrial transmission effects of structural nonferrous metal price shocks in the perspective of industry chain[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(11): 95–104.]
- [18] 朱含蓄, 贺本岚. 中国上中下游价格传导机制研究: 基于细分行业数据的实证分析[J]. 经济理论与经济管理, 2015, (5): 40–50. [Zhu H X, He B L. On price transmission mechanism of different stages in China: An empirical analysis based on industrial data in China[J]. Economic Theory and Business Management, 2015, (5): 40–50.]
- [19] Bergholt D, Larsen V H, Seneca M. Business cycles in an oil economy[J]. Journal of International Money and Finance, 2019, 96: 283–303.
- [20] 徐鹏, 刘强. 国际原油价格的驱动因素: 需求, 供给还是金融: 基于历史分解法的分析[J]. 宏观经济研究, 2019, (7): 84–97. [Xu P, Liu Q. Drivers of international crude oil price: Demand, supply, or finance: An analysis based on historical decomposition[J]. Scientific Management Research, 2019, (7): 84–97.]
- [21] 马迎贤. 组织间关系: 资源依赖视角的研究综述[J]. 管理评论, 2005, (2): 55–62. [Ma Y X. Inter-organizational relations: A survey of resource dependence perspective[J]. Management Review, 2005, (2): 55–62.]
- [22] 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.]
- [23] 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.
- [24] Kharrazi A, Fath B D. Measuring global oil trade dependencies: An application of the point-wise mutual information method[J]. Energy Policy, 2016, 88: 271–277.
- [25] 蔡宏波, 遆慧颖, 雷聪. “一带一路”倡议如何推动民族地区贸易发展: 基于复杂网络视角[J]. 管理世界, 2021, 37(10): 73–85. [Cai H B, Ti H Y, Lei C. How does the Belt and Road initiative promote trade development in ethnic regions: From the perspective of complex network[J]. Management World, 2021, 37(10): 73–85.]
- [26] 刘清, 杨永春, 蒋小荣, 等. 手机全球贸易网络演化及供需匹配关系: 基于复杂网络的社团分析[J]. 经济地理, 2021, 41(3): 113–125. [Liu Q, Yang Y C, Jiang X R, et al. Trade network evolution of global mobile phone and its supply-demand relationship: Based on community analysis of complex networks[J]. Economic Geography, 2021, 41(3): 113–125.]
- [27] Lee J, Lee Y, Oh S M, et al. Betweenness centrality of teams in social networks[J]. Chaos, 2021, DOI: 10.1063/5.0056683.
- [28] Messner J W, Pinson P. Online adaptive lasso estimation in vector autoregressive models for high dimensional wind power forecasting [J]. International Journal of Forecasting, 2019, 35(4): 1485–1498.
- [29] Hsu N J, Hung H L, Chang Y M. Subset selection for vector autore-



gressive processes using lasso[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2008, 52(7): 3645–3657.

[30] Sun Q R, Gao X Y, Wen S B, et al. Modeling the impulse response

complex network for studying the fluctuation transmission of price indices[J]. Journal of Economic Interaction and Coordination, 2019, 14(4): 835–858.

## The impact of structural changes of trade dependence network on cobalt price from the perspective of industrial chain

ZHAO Yiran<sup>1</sup>, GAO Xiangyun<sup>1,2</sup>, SUN Xiaoqi<sup>3</sup>, SI Jingjian<sup>1</sup>, SUN Xiaotian<sup>1</sup>, WU Tao<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China;

3. The Institute for China's Overseas Interests, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Changes in the structure of the trade network for products in the strategic mineral resources chain may have an impact on the price fluctuations of products in each link. Taking cobalt as an example, this paper selects the trade data of cobalt ore in the upstream, lithium cobaltate in the midstream and lithium battery in the downstream from 2007 to 2020, constructs a trade dependence network of the cobalt industry chain and analyzes the structural characteristics of the corresponding network. Combining the LASSO-PVAR model and impulse response function, the dynamic effects of changes in trade dependence network structure on the price fluctuations of upstream, midstream and downstream products in the industry chain are analyzed. The results indicate that: (1) The trade dependence network structure of the cobalt industry chain shows that the upstream cobalt ore trade is dominated by resource endowment countries, the midstream lithium cobaltate trade forms a network group among a few developed countries, and the downstream lithium battery trade is characterized by countries such as the Netherlands, Germany, the United States and China as major partner countries. (2) Upstream cobalt ore prices are mainly influenced by the intensity of upstream and downstream trade dependence, midstream lithium cobaltate prices are mainly influenced by the dominance of midstream and downstream intermediary control, and downstream lithium batteries are influenced by the number of upstream and midstream trade partners and the degree of downstream trade conglomeration. (3) The downstream lithium battery price of the industry chain is greatly affected by the change of trade network structure, with the maximum fluctuation of more than 20%; the upstream cobalt ore price is the second most affected, all within 10%; the midstream lithium cobaltate price is the least affected, all not exceeding 5%. The impact of trade dependence network structure changes on prices gradually fades after the third year. This study provides a new research perspective for exploring the influencing factors of resource prices, and provides relevant suggestions for monitoring the price of strategic mineral resources.

**Key words:** trade dependence; network structure; price; cobalt resources; industrial chain; impulse response function