

# 基于产业复杂网络的中国隐含 钴消费结构特征及关键路径研究

朱学红<sup>1,3</sup>, 刘瑾睿<sup>1</sup>, 曾安琪<sup>2,3</sup>, 谌金宇<sup>1,3</sup>

- (1. 中南大学商学院, 湖南长沙, 410083;  
2. 中南大学马克思主义学院, 湖南长沙, 410083;  
3. 中南大学金属资源战略研究院, 湖南长沙, 410083)

**摘要:** 为增强中国钴资源相关产业链的安全性、协同性和高效性, 全面解析我国产业间钴消费的特征及演变规律, 构建中国 2007 年和 2017 年环境拓展投入产出表, 核算产业间隐含钴消费量, 在此基础上建立 2007 年和 2017 年中国隐含钴消费产业关联网络(ECIN)。结果表明, 2017 年中国隐含钴消费结构较 2007 年更加紧密, 呈现出向部分战略性新兴产业集聚的趋势; 电池部门的关键性大幅提高, 占据了 ECIN 中 40% 的钴输出; 关键隐含钴消费路径由建筑业需求驱动转变为交通运输和消费电子产品行业需求驱动, 且二者所引致的关键路径贡献率分别为 13.9% 和 10.1%。建议针对钴产业链不同部门采取差异化措施, 尽量防范和化解核心部门可能的钴供给短缺问题, 同时采取联动措施加强对关键路径上各部门的协同管理。

**关键词:** 隐含钴消费; 产业网络; 主导部门; 关键消费路径

**中图分类号:** F062.9; F062.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-3104(2022)03-0068-14

## 一、引言

金属资源是国民经济发展和工业化进程的重要物质保障, 不同工业化阶段对金属资源的需求具有显著差异性<sup>[1]</sup>。工业化初期主要依赖铁矿等大宗矿产; 工业化中后期对基本有色金属的需求逐渐增加, 如铜、铝等; 后工业化时期, 新技术革命的蓬勃兴起极大拉动了对稀有金属的需求, 导致其消费结构转型, 这些稀有金属也往往依据其战略性、重要性、稀缺性被不同国家或地

区认定为关键金属<sup>[2]</sup>。钴被广泛运用于航天军工、化工、电子、新能源汽车等战略领域, 被中国、美国、欧盟、日本等国家或地区视为最具战略性的关键金属之一。技术进步驱动了新一代信息技术、新能源汽车等战略性新兴产业高速发展, 导致中国钴消费量迅速增加, 消费结构也随之转变, 钴在电池领域的消费占比从 2002 年的 45% 提升至 2017 年的 79%, 而在硬质合金、陶瓷釉和磁性材料等传统应用领域的消费占比显著下降<sup>[3]</sup>。

2018 年中国的钴消费量已占据全球的 50%, 但储量仅占世界的 1.1%, 导致我国钴资源高度依

**收稿日期:** 2022-02-28; **修回日期:** 2022-04-27

**基金项目:** 国家社会科学基金重大项目“自然资源高效利用与经济安全 and 高质量发展机制研究”(21&ZD103); 国家自然科学基金面上项目“绿色发展下战略性金属资源效率全生命周期评估与提升路径研究”(72074228); 国家自然科学基金青年项目“清洁能源转型背景下战略性关键金属可持续供应机制及保障路径研究”(72104253)

**作者简介:** 朱学红, 女, 湖南长沙人, 中南大学商学院研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 资源经济与管理; 刘瑾睿, 女, 四川泸州人, 中南大学商学院硕士研究生, 主要研究方向: 金属产业关联; 曾安琪, 女, 湖南湘潭人, 中南大学马克思主义学院讲师, 主要研究方向: 资源与环境经济学、马克思主义政治经济学, 联系邮箱: zenganqi@csu.edu.cn; 谌金宇, 男, 湖南益阳人, 中南大学商学院副教授, 主要研究方向: 资源与环境经济学

赖进口<sup>[4-5]</sup>。因此,无论是供给国的政局动荡,还是新型冠状病毒肺炎疫情等全球公共突发卫生事件导致的钴矿石生产收缩、供应中断,都可能对我国钴产业链上游的矿采选和冶炼加工部门造成巨大冲击,这种冲击会随着产业关联关系传导到高度依赖钴产品的中下游产业,进而扩散至整个产业网络系统。2020年召开的中央经济工作会议和2021年党的十九届六中全会都指出要增强我国供应链、产业链的自主性和闭环性,而钴是新能源汽车等战略性新兴产业的关键金属,精确刻画其在我国产业间的消费结构,明晰各产业部门在消费链条上的地位,是定向制定产业、资源政策,防范潜在钴供应风险的基础。

产业系统内各部门通过一定的投入产出比例形成错综复杂的关联关系,即使某部门的生产活动不直接使用钴,也可能通过使用其上游部门提供的含钴中间产品而间接消费钴。因此,为全面、准确地剖析行业内的钴消费结构,本文引入“隐含钴消费”这一概念进行深入探究<sup>[6]</sup>。本文基于投入产出关联理论核算出2007年和2017年我国产业部门间的隐含钴消费量,并引入复杂网络分析方法,刻画隐含钴消费结构在时间跨度上的演变规律,揭示隐含钴消费在跨部门尺度上的转移特征,进而明晰重点消费部门和关键消费路径。这不仅可以为识别我国钴产业系统内的优势点和薄弱点提供现实基础与科学依据,对实现产业部门间的协同增效、保障钴产业链安全及促进产业结构的持续优化转型也具有重要现实意义。

## 二、文献综述

“隐含”资源是指产业链内直接和间接使用的资源总和,Brown和Herendeen等认为“隐含”一词可用于形容任何自然资源<sup>[7-8]</sup>,隐含能源消费和隐含碳排放是受关注最早也是被研究最多的两个领域<sup>[9-10]</sup>。随着“隐含”这一名词的流行和其定义的拓展,隐含水资源<sup>[11]</sup>、隐含生态足迹<sup>[12]</sup>和隐含环境流<sup>[13]</sup>等领域被逐渐开发,隐含金属资源也开始受到国内外学者的关注,如Wang

等对稀土进行的初步研究<sup>[14-15]</sup>。

现有文献对于钴资源的关注主要集中于两个领域:(1)国家尺度上的历史钴消费核算。物质流方法的兴起使得大量学者开始研究单种金属或元素在社会经济系统内的生产、消费和循环过程<sup>[16-18]</sup>,而运用物质流方法对历史钴消费进行核算的文献主要可分为两类:一类是基于全生命周期内流量和存量核算的物质循环研究,刻画钴从生产、消费到废弃物回收环节的使用情况<sup>[19-21]</sup>;另一类是基于国际贸易流分析含钴产品的消费情况,探讨钴贸易网络特征及全球钴产业链的国际分工<sup>[22-24]</sup>。(2)全球或国家尺度上的未来钴需求预测。清洁能源技术对关键金属的依赖逐步加深,全球交通领域电动化转型也促使人类社会对钴资源的消费与日俱增,于是众多学者开始预测未来钴供需情景,为保障钴供需均衡建言献策<sup>[25-28]</sup>。总体而言,现有文献侧重于对钴的直接消费或需求进行历史刻画或预测,且主要局限于国家尺度,少有研究从产业层面探究包含间接消费的隐含钴消费特征与规律。

投入产出模型能够对产业部门间的关联关系进行定量分析<sup>[29-30]</sup>,但难以直观、全面地解析各要素地位及系统结构特征,而复杂网络分析法可有效填补这一缺陷。鉴于此,近年来众多学者开始将复杂网络思想融入产业关联分析中,能源和碳排放是应用最广的领域<sup>[31-34]</sup>。如An等<sup>[35]</sup>、Sun等<sup>[36]</sup>基于投入产出表构建中国产业部门间的有向加权能源网络,并通过度和度中心性、特征向量中心性和中介中心度确定了网络中的关键部门;郭守前等<sup>[29]</sup>构建了产业碳值的投入产出复杂网络模型,并使用中心-边缘理论和改进的Dematel模型探究各部门的影响力;杨传明<sup>[37]</sup>则在测算产业全碳足迹的基础上,利用WT指数法搭建并比较了新旧常态下中国产业全碳足迹的复杂网络。

随着国际社会对金属资源的关注度不断提高,相关学者也构建了产业间金属消费网络。Nuss等<sup>[38]</sup>分别基于整体经济和单个部门的视角,在构建实物投入产出表(PIOT)的基础上,运用网络指标与可视化技术比较了美国11种金属的产业网络特征。基于同种方法,Nuss等<sup>[39]</sup>还探究了



2007年美国铝消费产业网络的拓扑结构及关键部门。Wang等<sup>[40]</sup>运用环境拓展投入产出理论计算了2010年中国产业间隐含稀土消费量,并构建稀土产业网络,分析了中国经济社会对稀土资源的间接使用结构。

综上,目前有关产业层面的隐含钴消费研究相对匮乏,且关于资源产业复杂网络的研究大多局限于网络整体或个体特征分析,较少关注资源消费的产业链关键路径,少有探讨多部门之间的联动特征。鉴于此,本文以产业部门为研究对象测算中国隐含钴消费量,以复杂网络形式展现产业系统内的隐含钴消费结构,在运用网络个体特征确定主导消费部门后,进一步识别关键跨部门消费路径,为实现钴密集型产业部门协同增效与保障钴产业链安全提供参考。

### 三、模型构建与数据处理

本文的数据来源于国家统计局公布的竞争型投入产出表,该表未区分国内产品投入和进口产品投入,即默认所有中间投入品均由国内生产。但进口中间投入品的生产过程所导致的资源消耗、总产出和增加值属于国外,如果将进口投入纳入计算,将导致所核算的国内资源消费量偏高<sup>[41-43]</sup>。因此,本文为避免进口投入所导致的误差,根据Ou<sup>[44]</sup>的做法构建了非竞争型投入产出表。同时,为体现部门之间的资源投入关系,本文采用Hong<sup>[34]</sup>的方法将价值型投入产出表延伸为包含直接钴资源投入的环境拓展投入产出表,后续计算均基于本文构建的非竞争型环境拓展投入产出模型。

#### (一) 产业部门隐含钴消费强度测算

隐含钴消费强度是指产业部门每单位总产出的隐含钴消费量,隐含钴消费量则表示产业部门整个生产活动中直接和间接消费钴的总和。

$$M_i + \sum_{j=1}^n \delta_j * z_{ji} = \delta_i * (\sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i) \quad (1)$$

公式(1)展示了环境拓展投入产出模型中部门*i*的钴资源投入和产出关系,其中, $M_i$ 表示部门*i*的直接钴消费量, $\delta_{j(i)}$ 代表部门*j*(*i*)的隐含钴

消费强度, $z_{ji}$ 表示部门*j*对*i*的中间投入(国内), $z_{ij}$ 表示部门*i*对*j*的中间投入(国内), $\sum_{j=1}^n \delta_j * z_{ji}$ 则表示其他部门向部门*i*投入的隐含钴消耗量(其他部门向部门*i*提供中间产品或服务时所携带), $y_i$ 是部门*i*的最终需求。 $\sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i$ 为部门*i*的总产出,而 $\delta_i * (\sum_{j=1}^n z_{ij} + y_i)$ 则表示部门*i*的隐含钴消费总量。因此,公式(1)左侧表示部门*i*的隐含钴消费量一部分来源于直接消费,另一部分来源于其他部门提供的间接消费。

公式(1)为单个部门的钴资源平衡关系,那么整个环境拓展投入产出表的平衡关系可以由矩阵表示为:

$$M^T + Z^T * (EI)^T = X * (EI)^T \quad (2)$$

其中:

$$M^T = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \dots \\ M_n \end{bmatrix}; (EI)^T = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_n \end{bmatrix}; Z^T = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{n1} \\ \dots & \ddots & \dots \\ z_{1n} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n z_{1j} + y_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \dots & 0 & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{j=1}^n z_{nj} + y_n \end{bmatrix}$$

$M^T$ 是由*n*个部门的直接钴消费量构成的列向量, $(EI)^T$ 是由*n*个部门的隐含钴消费强度构成的列向量, $Z^T=(AX)^T$ 是国内中间投入矩阵, $X$ 是对角化的总产出向量。对公式(2)进行矩阵运算,可得隐含钴消费强度矩阵*EI*如:

$$EI = M * (X - Z)^{-1} \quad (3)$$

非竞争性投入产出模型的基本表达式为:总产出=中间投入(国内)+最终需求,见公式(4):

$$X=AX+Y \text{ 或 } X=(I-A)^{-1}Y \quad (4)$$

其中, $I$ 为单位矩阵, $A$ 为直接消耗系数矩阵, $Y$ 为最终需求矩阵,由居民消费、政府消费、资本形成总额及出口列向量组成, $(I-A)^{-1}$ 为里昂惕夫

逆矩阵, 表示投入产出模型的完全消耗系数。

直接钴消费强度表示部门每单位产出的直接钴消费量, 其计算公式为:

$$DI = \frac{M}{X} = MX^{-1} \quad (5)$$

而由公式(4)可将直接消耗系数矩阵转化为:  $A=ZX^{-1}$ , 可将隐含钴消费强度矩阵  $EI$  的计算公式转化为:

$$EI = M * (X - Z)^{-1} = DI * (I - A)^{-1} \quad (6)$$

其中,  $DI$  为直接钴消费强度向量。即隐含钴消费强度等于直接钴消费强度与非竞争型投入产出模型中完全消耗系数的乘积。

## (二) 产业部门间隐含钴消费量测算

基于公式(6)所得的隐含钴消费强度矩阵  $EI$ , 可测算产业部门间的隐含钴消费量。部门  $i$  在使用部门  $j$  提供的中间产品时产生的隐含钴消费量测算方法如:

$$w_{ji} = \delta_j * z_{ji} \quad (7)$$

其中,  $w_{ji}$  是部门  $j$  流向部门  $i$  的隐含钴消费量,  $z_{ji}$  表示部门  $j$  对  $i$  的中间投入(国内),  $w_{ji}$  的单位为吨, 隐含钴消费强度( $\delta_j$ )的单位为吨/万元。因此,  $n$  个产业部门间的隐含钴消费矩阵( $W$ )可用下式表示为:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1n} \\ \dots & \ddots & \dots \\ w_{n1} & \dots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

## (三) 隐含钴消费产业关联网络模型

基于上节所求得的产业部门间隐含钴消费量, 本文构建 2007 年和 2017 年有向加权隐含钴消费产业关联网络模型(下文简称为 ECIN)。ECIN 的节点为 48 个产业部门( $S$ ), 在本文中  $S=S(S1, S2, \dots, S3)$ , 即 48 个产业部门表示 48 个网络节点。产业部门间隐含钴消费的流向为复杂网络的边( $F$ ), 隐含钴消费量即为各边的权重。

### 1. 整体特征

(1) 网络密度。网络密度是节点间关联紧密程度的表征, 密度越大, 网络越紧凑, 关键部门的改变更易引起整个产业网络的动荡。本文中的网络密度是指各部门之间实际存在的隐含钴消费关系数(网络中权重大于 0 的边的条数)与理论

上最多存在的隐含钴消费关系数(假设所有部门均存在权重大于 0 的连边)的比值。其计算公式如下:

$$\rho = \frac{M_0}{N * (N - 1)} \quad (9)$$

其中,  $\rho$  为网络密度,  $M_0$  为实际存在的隐含钴消费关系数,  $N$  为网络的部门数。

(2) 平均最短路径长度。复杂网络的任意一对节点间可能存在多条物质交换通路, 其中包含最短路径。整个网络的平均最短路径长度等同于任意节点间最短路径的平均值。ECIN 的平均最短路径等于任意两个部门间最短通路的平均值, 它表征网络通达性与物质传输效率, 其计算公式如下:

$$AL = \frac{\sum_{i \neq j} s_{ij}}{N * (N - 1)} \quad (10)$$

其中,  $AL$  为网络的平均最短路径长度,  $s_{ij}$  为部门  $i$  和部门  $j$  之间的最短路径,  $N$  为网络中的部门节点数。

(3) 聚集系数。聚集系数是用于衡量网络节点“抱团”程度的参数, 若网络中与多个节点相关联的节点集内也存在彼此连接的关系, 则该网络集聚成团的程度就高。节点  $i$  的聚集系数为:

$$E_i = \frac{P_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (11)$$

其中,  $E_i$  为部门  $i$  的聚集系数(假设与  $i$  相邻的节点有  $k_i$  个),  $P_i$  为这  $k_i$  个邻接节点间客观存在的连接数,  $k_i(k_i - 1)$  表示  $k_i$  个邻接节点间可能存在的最大连接数。整个网络的平均聚集系数  $TE_i$  可由以下公式计算:

$$TE_i = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (12)$$

平均聚集系数和平均最短路径可以共同度量网络的“小世界”特征。如果一个网络的平均聚集系数高但平均路径长度短, 那么可以称之为“小世界网络”。“小世界网络”具有高度集聚的性质, 表现为节点间信息传播和物质交换的速度快, 少数节点或边的变动都会引起网络整体性发生转变。

## 2. 个体特征

(1)部门点强度(加权重)。部门加权重越高,则它对产业系统的影响强度越大。点强度分为点入度和点出度,前者是流向某一部门的所有边权之和,后者是从某一部门流出的所有边权之和。部门点强度高,说明该部门承接了大量钴输入或钴输出,其计算公式如:

$$wd_i = \sum_{j \in C_i} w_{ij} \quad (13)$$

其中,  $wd_i$  为部门  $i$  的点强度之和,  $C_i$  为与部门  $i$  连接的所有部门的集合。与加权重相对应的参数是度,同样也分为出度与入度,部门的出度为其他部门指向该部门的边数,入度为该部门指向其他部门的边数。

(2)中介中心度。产业网络模型中,可利用中介中心度来识别 ECIN 中的重要媒介部门。该特征值高的部门对其周围部门的控制程度高,因为它占据着许多部门间资源和信息流通的最短“桥梁”。部门  $q$  的中介中心度等于另一对经过部门  $q$  的最短路径条数除以这对部门间的最短路径数量。其计算公式如:

$$bc_q = \sum_{q \neq i \neq j} \frac{s_{ij(q)}}{s_{ij}} \quad (14)$$

其中,  $bc_q$  为部门  $q$  的中介中心度,  $s_{ij}$  为部门  $i$  和部门  $j$  之间最短路径的数量,  $s_{ij(q)}$  为部门  $i$  和部门  $j$  之间的最短路径中经过部门  $q$  的次数。

(3)接近中心度。接近中心度从几何意义上(即节点与其他节点的距离远近)度量节点重要性。在本文中,该特征值被用于度量隐含钴消费在部门间的传导效率,部门的接近中心度越高,则该部门越容易“靠近”其他部门,物质传输效率越高。其计算公式如:

$$nc_q = \sum_{q \neq i \neq j} \frac{N-1}{s_{ij}} \quad (15)$$

## (四) 数据来源与处理

本文选取了 2007 年和 2017 年两个年份的数据进行研究,以对比分析新能源汽车等战略性新兴产业的发展对中国隐含钴消费结构的影响。本文所使用的投入产出表来自中国国家统计局。投入产出表每 5 年发布一次,在编制不同年份的投

入产出表时会受到当年价格的影响。为消除价格影响可能带来的偏误,本文选取了对应的价格指数来对各个行业进行平减。这些指数包括农产品生产者价格指数、建筑安装工程价格指数、第三产业国内生产总值指数、行业分工业品出厂价格指数、进出口商品价格指数等,均来自中国国家统计局。为保证各年份的部门口径一致,将 2007 年和 2017 年的投入产出表归并为 48 个部门,包括 7 个钴资源直接消费部门,其中电池生产包含于其他电气机械和器材部门(S33)中,具体见表 1。中国各部门的直接钴消费数据来自中国钴消费协会。

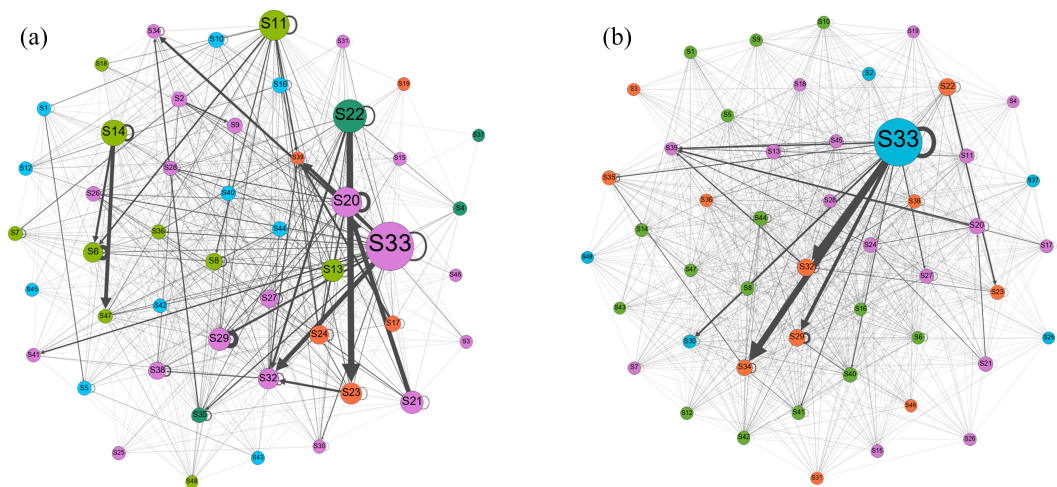
## 四、实证结果与分析

### (一) 中国隐含钴消费产业关联网络整体结构特征

图 1 展示了 2007 年和 2017 年中国产业部门间隐含钴消费的网络结构,其中节点大小表示部门点出度高低;节点颜色表示部门所属模块;边的厚度表示部门间的隐含钴消费量(边权)。在 gephi 软件内计算可得网络的网络密度、平均路径长度和平均聚类系数。2007 年和 2017 年的网络密度分别为 0.562 和 0.693,说明 ECIN 内部较为紧密,各部门间存在较高的协同性。2007 年和 2017 年的网络平均最短路径长度均小于 1.4,说明部门间的通达性较高,能较为高效地实现钴产品交换。两个网络的平均聚集系数分别为 0.721 和 0.751,表明与任意产业部门相连接产业群内,70%以上的产业部门间均存在含钴产品的消费关系,网络聚集成团的程度高。2007 年和 2017 年 ECIN 均具有节点连接路径短、聚集系数高的特性,可视为“小世界网络”,其部门协同性和连通性较高,资源关联性较强。此外,2017 年 ECIN 呈现出更高的紧密性和集聚性,更具备“牵一发而动全身”的特质,核心部门的变化会迅速扩散到其他部门以至网络性能发生改变。因此,关键消费部门和产业路径的识别是实现钴利用效率提高、产业部门协同降耗最为直接和高效的方式。

表 1 部门名称及编号

部门名称	编号	部门名称	编号
农林牧渔产品和服务	S1	锅炉及原动设备	S25
煤炭、黑色金属矿采选及石油、天然气开采产品	S2	金属加工机械	S26
有色金属矿采选产品	S3	其他通用设备	S27
非金属矿和其他矿采选产品	S4	专用设备	S28
食品和烟酒	S5	汽车整车及零部件、配件	S29
纺织品、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	S6	其他交通运输设备和相关装置	S30
木材加工品和家具	S7	电机	S31
造纸印刷和文教体育用品	S8	家用电器、电气机械和器材	S32
石油、炼焦产品和核燃料加工品	S9	其他电气机械和器材	S33
基础化学原料、化肥和农药	S10	计算机、通信设备及其他电子设备	S34
涂料、油墨、颜料及类似产品	S11	广播电视设备和雷达及配套设备、	S35
合成材料	S12	视听设备、电子元器件	S36
专用化学产品和炸药、火工、焰火产品	S13	仪器仪表及其他制造产品	S37
日用化学产品、医药制品、化学纤维制品	S14	废弃资源和废旧材料回收加工品	S38
橡胶制品	S15	电力、热力、燃气、水的生产和供应	S39
塑料制品	S16	建筑业	S40
水泥、石膏和砖瓦等建筑材料	S17	交通运输、仓储和邮政业	S41
玻璃和陶瓷制品	S18	电子通信、计算机服务和软件业	S42
耐火材料、石墨及其他非金属矿物制品	S19	批发和零售业	S43
钢及钢压延加工品	S20	住宿和餐饮业	S44
铁及铁合金产品	S21	金融和保险业、固定资产和商业服务	S45
有色金属及其合金	S22	科学研究和技术服务业	S46
有色金属压延加工品	S23	生态保护和公共基础设施管理	S47
金属制品	S24	居民服务、卫生和社会工作	S48
		文娱和公共管理、公共组织	S48



(a) 2007 年; (b) 2017 年

图 1 中国隐含钴消费产业关联网络图

从图1可以看出,某些节点携带了一条环形边,表示从该部门流出的钴资源被“同一部门”所消耗,这是部门的自我消费现象,通常被称为自环。比如在2007年,汽车整车及零部件、配件(S29),纺织品、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品(S6),钢及钢压延加工品(S20)等部门的自环程度较高,2017年其他电气机械和器材(S33),汽车整车及零部件、配件(S29)等部门的自环程度较高。这是由于这些部门内包含着许多细分的、相似的行业,这些行业可以消费来自同一部门下属的其他细分行业的产品,导致产业部门自环现象发生。

## (二) 基于不同个体特征的关键部门识别

### 1. 基于影响强度的关键部门分析

在整体网络系统中,部门入强度和部门出强度的总和相等。2007年和2017年的平均部门入(出)强度分别为545吨及1949吨,即10年内部门间隐含钴消费量增加了3倍以上。表2展示了2007年和2017年部门入强度和部门出强度占比最大的10个部门。

表2 2007年和2017年点强度排名前十的部门

加权入度/吨				加权出度/吨			
部门 编号	2007 年	部门 编号	2017 年	部门 编号	2007 年	部门 编号	2017 年
S39	2 337	S34	9 913	S33	3 961	S33	34 747
S32	1 785	S39	9 682	S22	2 316	S32	5 089
S20	1 699	S29	8 581	S11	1 968	S22	5 029
S29	1 549	S32	8 570	S20	1 953	S29	4 242
S6	1 493	S33	5 723	S14	1 516	S20	3 824
S47	1 091	S27	3 216	S21	1 158	S34	3 190
S23	1 067	S30	3 140	S29	1 115	S21	2 519
S24	1 000	S40	2 994	S13	1 100	S13	2 407
S34	852	S35	2 972	S23	994	S24	2 250
S27	733	S24	2 784	S32	910	S40	2 167

就部门出强度而言,前10个占比最高的部门在2007年和2017年分别向其他部门贡献了65%和70%的隐含钴消费量,说明网络中少数关键部门占据了大部分隐含钴供应。2007年,其他电气机械和器材(S33),有色金属及其合金(S22),

涂料、油墨、颜料及类似产品(S11),钢及钢压延加工品(S20),日用化学产品、医药制品、化学纤维制品(S14)等直接钴消费部门是主要输出者。一方面是由于这些部门的直接钴消费强度较高,即大量钴资源以这些部门为起点流入整个产业网络;另一方面,这些部门向其他部门输出中间投入品,带动了隐含钴消费在产业部门间的转移。2017年出强度的集中度更高,主要体现在包含电池的其他电气机械和器材部门(S33)占据了近40%的隐含钴输出,比2007年增加了23%,这与2009年后电池应用市场的迅速扩张相关。且S11、S20和S22等钴传统应用部门的出强度占比均有所下降,而与电池部门关联密切的家用电器、电气机械和器材(S32),汽车整车及零部件、配件(S29)部门的出强度占比上升。

就部门入强度而言,前十大部门贡献率之和分别为52%和62%。建筑业(S39)是2007年入强度最大的部门,建筑供应链所涉及的产业部门十分繁杂,它通过大规模使用来自众多行业的材料或工具而间接消费钴资源,如电池(S33)、钢铁合金(S20)、金属制品(S24)及涂料(S11)等出强度高的部门。中国的城镇化进程推动了基础设施和房屋住宅的高速建设,导致大量钴资源流入建筑业。计算机、通信设备及其他电子设备(S34)在2017年超过建筑业(S39)成为入强度最大的部门,汽车整车及零部件、配件(S29),家用电器、电气机械和器材(S32),其他电气机械和器材(S33)等部门的入强度占比也有所增加。随着经济社会对新能源汽车和新兴电子消费品的需求上升,S29、S32和S34等新能源汽车或电子产品的产出部门需要更多的锂离子电池作为中间投入品,导致这些部门成为隐含钴消费的新聚集中心。

S29、S33和S32等部门在2017年的出、入强度均较大,表明其具备较强的供应能力和接收能力。结合图1来看,S29和S33的“自环”程度高,即产业部门自我消费能力强;而S32涉及了众多电力装置的生产和消耗,其生产活动的复杂性决定了它既是中间钴消费品的传输者,又是最终钴消费品的承接者。

### 2. 基于媒介作用的关键部门分析

中介中心度表征ECIN中部门的媒介作用,

它衡量的是部门成为消费“中转站”的能力。表3展示了2007年和2017年中介中心度最高的前10个部门,它们均具有较高度值而非加权重值,表明网络中钴消费量少的部门也可能通过在上下游部门间起承接作用,控制隐含钴消费的转移。2007年,钢及钢压延加工品(S20),其他通用设备(S27),金属制品(S24),电力、热力、燃气、水的生产和供应(S38)和造纸印刷、文教体育用品(S8)等部门在ECIN中的控制作用较强,可能是因为这些部门投入和产出所需产品的通用性导致它们与大量部门都存在供需关系;2017年各部门的中介中心度远小于0.1且普遍低于2007年,表明隐含钴消费结构在往均衡化方向发展,没有产生控制性极强的中心产业部门。这可能是一些技术含量较高的部门逐渐成为隐含钴消费的重点部门,导致产业部门在进行资源交换时路径缩短、效率提高,从而削弱了上述部门的控制力。

3. 基于传输效率的关键部门分析

接近中心度可用于衡量网络的资源或产品传输效率,部门的接近中心度越高,则该部门越容易与其他部门形成直接、高效的钴资源消费关系。通过对ECIN中各部门的接近中心度进行计算,包含电池的其他电力机械和器材部门(S33)在这两年间的接近中心度都为1,说明它能与另外47个部门之间迅速建立消费关系,在网络中的独立程度最大,钴产品的传递效率最高,这也

与部门点强度的分析结果一致。值得注意的是,在2017年有4个属于第三产业的部门的接近中心度均为1,随着第三产业对中国经济的引擎作用愈发显著,第三产业部门的隐含钴消费强度有所增加,表明产业的变革使这些与居民生活息息相关的部门在隐含钴消费结构中占据了越来越高的地位,同时这些部门也影响着ECIN中的资源传输效率。

(三) 基于边权比重的钴消费关键路径分析

为进一步明晰各关键部门在产业网络中的地位,探究产业链中隐含钴消费的重点路径,本文采用Sun等<sup>[36]</sup>的做法,基于部门间的隐含钴消费量(网络中加权边的权重)来识别关键消费路径。

表4和表5分别展示了2007年和2017年网络中排名前15的边权及边权比重。这15条边权比重之和在2007年和2017年分别为28%和42%,表明网络中极少数边搭建了隐含钴消费结构的核心框架,且这一特征在2017年更加凸显。不考虑部门自环现象,2007年前三大加权边分别为“有色金属及其合金(S22)→有色金属压延加工品(S23)”“铁及铁合金产品(S21)→钢及钢压延加工品(S20)”以及“其他电气机械和器材(S33)→家用电器、电气机械和器材(S32)”,比重分别为3.54%、2.46%和2.43%。S20、S21、S22和S23是生产高温合金、硬质合金以及磁性材料等传统含钴制品的部门,在新能源汽车兴起之前

表3 2007年和2017年中介中心度排名前十的部门

2007年					2017年				
部门编号	入度	出度	度	中介中心度	部门编号	入度	出度	度	中介中心度
S20	39	42	81	0.024	S24	43	47	90	0.018
S27	39	47	86	0.023	S38	37	47	84	0.015
S47	43	43	86	0.021	S28	43	44	87	0.015
S24	39	47	86	0.021	S32	41	46	87	0.014
S8	40	43	83	0.016	S8	44	42	86	0.013
S38	34	47	81	0.015	S27	41	48	89	0.013
S36	40	45	85	0.015	S13	36	45	81	0.012
S13	34	45	79	0.014	S44	34	48	82	0.012
S40	32	47	79	0.014	S45	40	45	85	0.011
S32	38	43	81	0.014	S40	36	48	84	0.011

表4 2007年边权最大的前15个部门

投入部门编号	接收部门编号	边权	边权比重(%)
S22	S23	927	3.54
S29	S29	697	2.66
S21	S20	645	2.46
S33	S32	635	2.43
S6	S6	619	2.36
S14	S47	556	2.12
S20	S20	534	2.04
S20	S39	479	1.83
S33	S39	364	1.39
S33	S34	348	1.33
S14	S14	333	1.27
S23	S32	328	1.25
S22	S32	323	1.23
S14	S6	320	1.22
S17	S39	303	1.16
总计		7411	28.31

表5 2017年边权最大的前15个部门

投入部门编号	接收部门编号	边权	边权比重(%)
S33	S34	7 423	7.94
S33	S32	5 744	6.15
S33	S33	5 179	5.54
S33	S29	4 097	4.38
S29	S29	2 755	2.95
S33	S30	2 092	2.24
S33	S39	1 729	1.85
S22	S23	1 721	1.84
S20	S39	1 709	1.83
S32	S39	1 351	1.45
S33	S27	1 193	1.28
S34	S34	1 117	1.20
S33	S40	1 037	1.11
S33	S35	1 010	1.08
S33	S41	974	1.04
总计		39 131	41.88

是传递和承接钴资源的核心部门。但在2017年,“其他电气机械和器材(S33)→计算机、通信设备及其他电子设备(S34)”“其他电气机械和器材(S33)→家用电器、电气机械和器材(S32)”以及

“其他电气机械和器材(S33)→汽车整车及零部件、配件(S29)”是权重最高的三条边,贡献率分别为7.94%、6.15%和4.38%。另外,这三条加权边的投入部门均为S33,接受对象分别为生产电子信息产品、电力器材和新能源汽车等产品的部门,表明消费电子产品及新能源汽车等市场扩张增加了对锂离子电池部门的需求,且钴密集型部门已经由一些传统行业转向新兴行业。

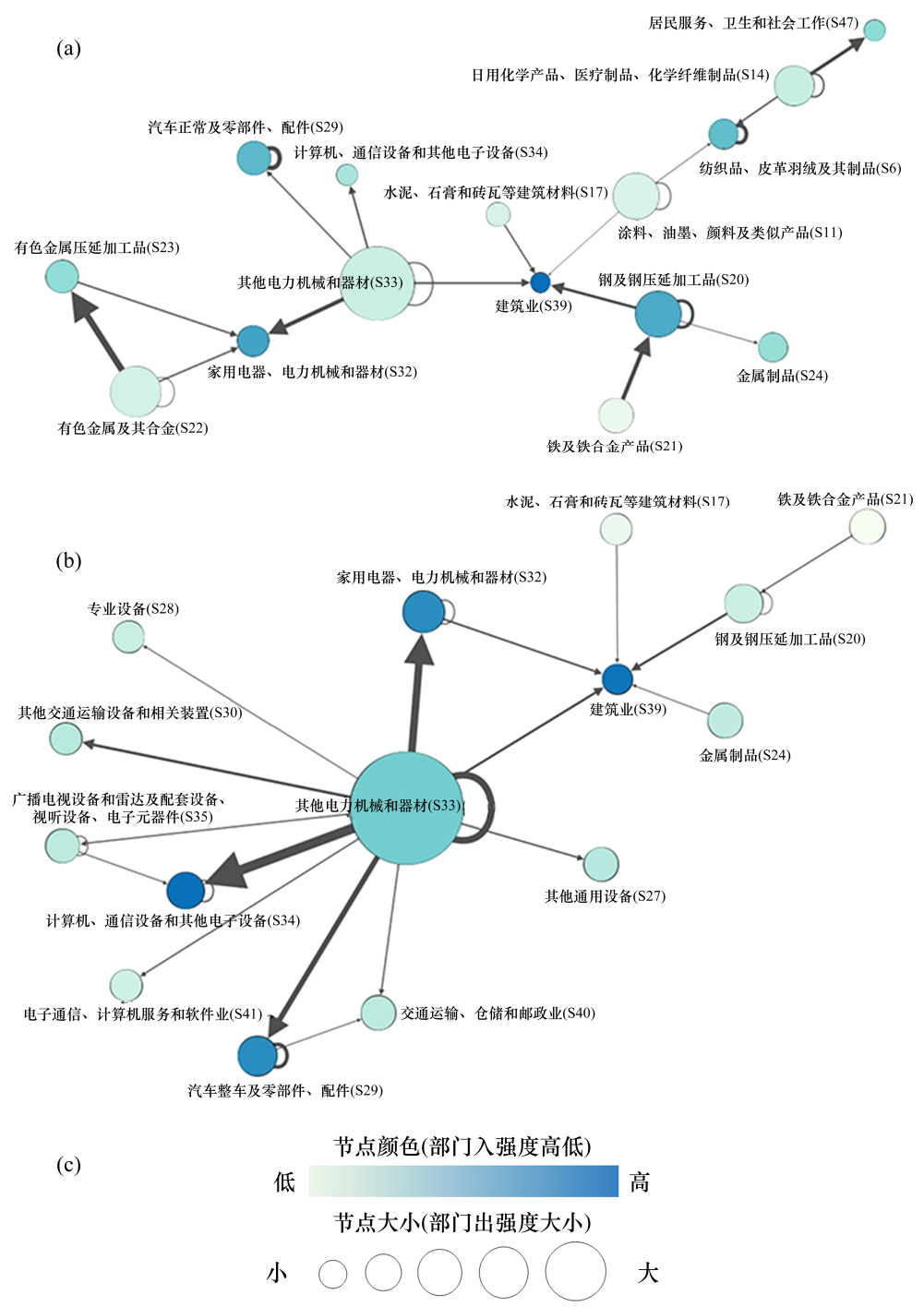
本文为明晰钴消费结构的核心框架,仅保留ECIN中前25条加权边<sup>[45]</sup>,此时,2007年和2017年的ECIN被简化为图2。图中的圆形大小表示部门出强度高低,颜色深浅代表入强度高低,颜色越深,表示该部门的入强度越大,箭头粗细表示边权大小。

基于以上对边权的梳理,本文进一步确定了关键跨部门消费路径。首先以前10条核心加权边的投入部门为起点,截取与该投入部门具备最大消费关系的部门,再以此部门作为投入部门去截取下一个与其有最大消费关系的部门,依此类推直到这条路径中断<sup>[36]</sup>。表6展示了2007年和2017年的关键跨部门消费路径。本文将贡献率大于1.5%的跨部门路径定义为关键消费路径<sup>[46-47]</sup>,为避免冗余并凸显关键部门,本文只提取了这些完整路径中的前3个部门。

2007年贡献率高于1.5%的隐含钴消费关键路径有4条,前两条为“铁及铁合金产品→钢及钢压延加工品→建筑业”“有色金属及其合金→有色金属压延加工品→家用电器,电气机械和器材→建筑业”,占比分别为6.3%和5.5%。2007年,中国城镇化和工业化的需求促使大量钴在流入钢铁合金及有色金属加工等部门后,生成了硬质合金(如焊丝和切割刀具)、磁性材料(如变压器和电动机内的铁心材料)等产品,随后进入了建筑行业。而且,建筑业规模庞大、发展迅速、工艺流程繁杂,需要大量来自上述部门生产的含钴产品,这也是2007年建筑业的入强度最高的原因。

2017年贡献率高于1.5%的隐含钴消费路径增加至8条,其中有6条的起始部门都是包含电池的其他电气机械和器材(S33),说明大多数钴都是通过该部门进入产业系统内的,进一步解释了





(a) 2007 年; (b) 2017 年; (c) 图(a)和图(b)的图例

图 2 主要边权构成的 ECIN 简化网络图

S33 的出强度最高。权重最高的两条为“其他电气机械和器材→汽车整车及零部件、配件→交通运输、仓储和邮政业”“其他电气机械和器材→计算机、通信设备及其他电子设备→电子通信、计算机服务和软件业”，分别为 13.9%和 10.1%。这两条路径代表了在绿色低碳发展要求以及技

术不断革新经济背景下，由新能源汽车行业及信息技术行业发展所引致的对动力电池、便携电池的需求，是消耗钴的核心路径。但由路径 5 和路径 6 为代表的传输途径说明仍有较大体量的钴资源应用在硬质合金、磁性材料及催化剂等传统领域。



表6 2007年和2017年的关键跨部门消费路径

排序	2007年	消费量/吨	贡献率(%)
1	铁及铁合金产品→钢及钢压延加工品→建筑业	1 658	6.3
2	有色金属及其合金→有色金属压延加工品→家用电器、电气机械和器材→建筑业	1 430	5.5
3	其他电气机械和器材→家用电器、电气机械和器材→电力、热力、燃气、水的生产和供应	900	3.4
4	其他电气机械和器材→计算机、通信设备及其他电子设备→金融和保险业、固定资产和商业服务	482	1.8
排序	2017年	消费量/吨	贡献率(%)
1	其他电气机械和器材→汽车整车及零部件、配件→交通运输、仓储和邮政业	13 033	13.9
2	其他电气机械和器材→计算机、通信设备及其他电子设备→电子通信、计算机服务和软件业	9 413	10.1
3	其他电气机械和器材→家用电器、电气机械和器材→建筑业	7 403	7.9
4	其他电气机械和器材→其他交通运输设备和相关装置→交通运输、仓储和邮政业→批发和零售业	2 996	3.2
5	有色金属及其合金→有色金属压延加工品→家用电器、电气机械和器材→计算机、通信设备及其他电子设备→科学研究和技术服务业	2 866	3.1
6	铁及铁合金产品→钢及钢压延加工品→金属制品	2 475	2.6
7	其他电气机械和器材→其他通用设备→专用设备	1 937	2.1
8	其他电气机械和器材→交通运输、仓储和邮政业→批发和零售业	1 538	1.6

## 五、结论与政策建议

本文在编制2007年和2017年中国非竞争性环境拓展投入产出表的基础上,引入各年份的部门直接钴消费数据,测算了中国各部门隐含钴消费强度以及部门间的隐含钴消费量,然后结合复杂网络模型构建中国隐含钴消费产业关联网,探究隐含钴消费结构特征在时间序列上的演变,并利用不同网络个体特征参数识别隐含钴消费的主要部门和关键路径。主要研究结论如下:

(1)就隐含钴消费整体结构特征而言,2007年和2017年的ECIN均具备小世界性,且2017年的平均最短路径为1.283,平均聚类系数为0.751,隐含钴消费结构更加紧密和集聚。因此,由外界因素导致的钴供给短缺或钴价上涨极易通过核心部门蔓延到整个产业系统,同时核心部门的效率提升也能迅速改善网络的整体性能。

(2)就钴产业链上各部门的地位而言,2007年电池、高温合金和陶瓷色釉等传统钴制品部门是主要隐含钴输出者,位于钴产业链上游,下游的建筑业是最大的隐含钴接收者;而2017年仅电池部门就占据了40%的钴输出,其他传统钴制品部门的贡献率大幅下降,下游的消费电子品业超越建筑业成为最大的隐含钴承接者,紧接着是汽车行业。金属制品业、电热水生产与供应业以及专用设备业的中介中心度最高,在钴产业链中担任“桥梁”角色,但2017年的中介中心度普遍低于2007年,意味着我国产业结构的转型优化致使部门间资源交换效率提升,同时削弱了非核心部门在整体结构中的控制能力。

(3)ECIN呈现以电池产业为中心的集聚趋势。2007年的前25条边权贡献了36%的隐含钴消费量,而2017年这一贡献率上升至49%,且以电池部门为起点的边权大大提升。从跨部门视角出发,2007年建筑业对合金产品的需求是最为关键的隐含钴消费路径,贡献率为6.3%;而2017

年交通运输行业对电池部门的需求则驱动了13.9%的钴消费, 紧随其后的是电子通信行业对电池部门的需求, 贡献率为10.1%。这些与战略性产业有关的传输路径承载了更多钴资源, 而隐含钴消费结构的转变实质折射出产业部门的战略性升级。

基于上述研究结论, 可以得到以下政策启示:

(1) ECIN 存在小世界性, 所以为促进隐含钴消费结构稳中向优发展, 首先要尽量防范和化解核心部门的钴供给短缺问题。中国需拓宽钴的来源渠道, 一方面要加大国内钴矿的勘探和开采, 拓展钴矿石多元化进口渠道, 提高原生矿供给; 另一方面要加大对再生钴的循环利用。此外, 要构建国家钴资源战略储备体系, 保障突发事件下钴供应链的稳定。

(2) 针对钴产业链不同位置的部门采取差异化措施。如电池部门是直接利用钴的重点部门, 因此低钴或无钴电池技术的提升有助于节约钴资源, 提高钴利用效率, 保障隐含钴消费结构的稳定性; 对网络中的“中介”部门, 要引导其进行设备改造更新, 降低中间产品的钴损耗率, 同时要保证它们与其他部门之间的通达性, 防止供应链中断。

(3) 要注意提高关键消费路径上的部门协同性, 采取联动措施来优化路径结构并进一步推动产业链布局一体化。同时, 应加强评估下游产业(如新能源汽车和信息技术行业)投资的有效性, 降低关键路径上的无效钴需求。另外, 流经传统钴制品部门的消费路径比重虽相对较低, 但这些路径仍然携带了绝对体量较大的隐含钴消费, 所以制定措施时也要注重对这些部门的协同管理。

本文虽然在投入产出表中区分了直接消费钴的部门, 但受到数据可获性和技术水平的限制, 没有进一步拆分这些部门中重点消费钴的行业, 可能导致研究结果不够精细。此外, 限于研究视角和研究篇幅, 本文未对隐含钴消费产业关联网络的模块化(即聚类特征)进行深入剖析。对此, 未来的研究可以从以下视角出发: ①进一步收集或通过运算获取细分行业的数据, 然后通过拆分关键的钴密集型行业部门以测算更为精准

的钴消费量; ②引入多区域投入产出表, 从国际贸易和产业部门两个层面出发, 深入探究国际和国内钴产业链的特征及关联。

## 参考文献:

- [1] 陈其慎, 于汶加, 张艳飞, 等. 矿业发展周期理论与中国矿业发展趋势[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 891-899.
- [2] 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.
- [3] 周艳晶, 李颖, 柳群义, 等. 中国钴需求趋势及供应问题浅析[J]. 中国矿业, 2014, 23(12): 16-19, 41.
- [4] WANG Y B, GE J P. Potential of urban cobalt mines in China: An estimation of dynamic material flow from 2007 to 2016[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, 161: 104955.
- [5] U S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2021[R]. U S. Geological Survey, 2021, <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2021>.
- [6] HUANG J B, CHEN X, SONG Y. What drives embodied metal consumption in China's imports and exports[J]. Resources Policy, 2020, 69: 101862.
- [7] ROBERT H. System-level indicators in dynamic ecosystems: Comparison based on energy and nutrient flows[J]. Journal of Theoretical Biology, 1990, 143(4): 523-553.
- [8] BROWN M T, HERENDEEN R A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: A comparative view[J]. Ecological Economics, 1996, 19(3): 219-235.
- [9] LI W, XU D, LI G M, et al. Structural path and decomposition analysis of aggregate embodied energy intensities in China, from 2012 to 2017[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 124185.
- [10] 兰天, 夏晓艳. 全球价值链下的中欧制造业贸易隐含碳研究[J]. 中南大学学报(社会科学版), 2020, 26(4): 111-123.
- [11] 檀勤良, 韩健, 刘源. 基于投入产出模型的省际虚拟水流动关联分析与风险传递[J]. 中国软科学, 2021(6): 144-152.
- [12] 黄永明, 陈小飞. 中国贸易隐含污染转移研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 112-120.
- [13] 邸敬涵, 温宗国. 资源产品贸易的环境影响及隐含环境流分析——以铜资源为例[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 612-625.

- [14] WANG X B, YAO M T, LI J S, et al. Global embodied rare earths flows and the outflow paths of China's embodied rare earths: Combining multi-regional input-output analysis with the complex network approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 216: 435–445.
- [15] ZHANG H M, FENG T T, YANG Y S. Influencing factors and critical path of inter-sector embodied heavy rare earth consumption in China[J]. *Resources Policy*, 2022, 75: 102492.
- [16] 王俊博, 范蕾, 李新, 等. 基于物质流方法的中国铜资源社会存量研究[J]. *资源科学*, 2016, 38(5): 939–947.
- [17] MATTHIAS P, SIMON G C, LOTHAR C, et al. Resource efficiency in the German copper cycle: Analysis of stock and flow dynamics resulting from different efficiency measures[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 139: 205–218.
- [18] TIAN X, WU Y F, QU S, et al. Deriving hazardous material flow networks: A case study of lead in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018(199): 391–399.
- [19] ZENG X, Li J. On the sustainability of cobalt utilization in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015(104): 12–18.
- [20] 文博杰, 韩中奎. 2015年中国钴物质流研究[J]. *中国矿业*, 2018, 27(1): 73–77.
- [21] HARPER E M, KAVLAK G, GRAEDEL T E. Tracking the metal of the goblins: Cobalt's cycle of use[J]. *Environmental science & technology*, 2012, 46(2): 1079–1086.
- [22] SUN X, HAO H, LIU Z W, et al. Tracing global cobalt flow: 1995 — 2015[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 149: 45–55.
- [23] 徐美娟, 许礼刚, 袁梦洁. 双循环格局下中国关键有色金属资源贸易格局和竞争力分析——以钴为例[J/OL]. *世界地理研究*. [2022-02-12] (2022-02-16). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20210820.1408.002.html>.
- [24] 余慧, 丁颖辉. 网络视角下全球钴中间产品贸易时空关联关系研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(1): 40–47.
- [25] TISSERANT A, PAULIUK S. Matching global cobalt demand under different scenarios for co-production and mining attractiveness[J]. *Journal of Economic Structures*, 2016, 5(1): 1–19.
- [26] ELSHKAKI A. Long-term analysis of critical materials in future vehicles electrification in China and their national and global implications[J]. *Energy*, 2020, 202: 117697.
- [27] 周艳晶, 梁海峰, 李建武, 等. 钴资源供需格局及全球布局研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(7): 65–69, 80.
- [28] ZENG A Q, CHEN W, RASMUSSEN K D, et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages[J]. *Nature communications*, 2022, 13(1): 1341.
- [29] 郭守前, 陈吟珊, 马珍珍. 基于复杂网络的产业碳值投入产出分析[J]. *经济与管理*, 2016, 30(3): 84–89.
- [30] 孙启明, 王浩宇. 基于复杂网络的京津冀产业关联对比[J]. *经济管理*, 2016, 38(4): 24–35.
- [31] 赵小曼, 张帅, 袁长伟. 基于 SNA 的产业碳排放关联及传导网络分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(10): 229–236.
- [32] BU Y, WANG E D, BAI J H, et al. Spatial pattern and driving factors for interprovincial natural gas consumption in China: Based on SNA and LMDI[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 263: 121392.
- [33] 安琪儿, 安海忠, 王朗. 中国产业间隐含能源流动网络分析[J]. *系统工程学报*, 2014, 29(6): 754–762.
- [34] HONG S Y, WANG H R, CHENG T. Circulation characteristic analysis of implied water flow based on a complex network: A case study for Beijing, China[J]. *Water*, 2018, 10(7): 834.
- [35] AN Q E, AN H Z, WANG L, et al. Analysis of embodied exergy flow between Chinese industries based on network theory[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 26–35.
- [36] SUN X Q, AN H Z, GAO X Y, et al. Indirect energy flow between industrial sectors in China: A complex network approach[J]. *Energy*, 2016: 94: 195–205.
- [37] 杨传明. 新旧常态中国产业全碳足迹复杂网络比较[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 313–328.
- [38] NUSS P, OHNO H, CHEN W Q, et al. Comparative analysis of metals use in the United States economy[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 145: 448–456.
- [39] NUSS P, CHEN W Q, OHNO H, et al. Structural investigation of aluminum in the U.S. economy using network analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 4091–4101.
- [40] WANG X B, WEI W D, GE J P, et al. Embodied rare earths flow between industrial sectors in China: A complex network approach[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 125: 363–374.
- [41] 彭水军, 刘安平. 中国对外贸易的环境影响效应: 基于环境投入-产出模型的经验研究[J]. *世界经济*, 2010, 33(5): 140–160.
- [42] 李虹, 王帅. 中国行业隐含能源消费及其强度的变动与影响因素[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(5):

- 47–57.
- [43] 李虹, 王帅. 需求侧视角下中国隐含能源消费量及强度的影响因素[J]. 资源科学, 2021, 43(9): 1728–1742.
- [44] OU J M, MENG J, ZHENG J Y, et al. Demand-driven air pollutant emissions for a fast-developing region in China[J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 131–142.
- [45] 赵炳新, 肖雯雯, 佟仁城, 等. 产业网络视角的蓝色经济内涵及其关联结构效应研究——以山东省为例[J]. 中国软科学, 2015(8): 135–147.
- [46] 宋金昭, 邸小龙, 王晓平. 中国产业部门间隐含碳排放流动结构分析——基于复杂网络的视角[J]. 统计与信息论坛, 2020, 35(3): 49–58.
- [47] REN B, LI H J, SHI J L, et al. Identifying the key sectors and paths of the embodied energy in BRICS nations: A weighted multilayer network approach[J]. *Energy*, 2022, 239: 122091.

## Analysis of China's embodied cobalt consumption structure characteristics and key paths based on industrial complex networks

ZHU Xuehong<sup>1,2</sup>, LIU Jinrui<sup>1</sup>, ZENG Anqi<sup>2,3</sup>, CHEN Jinyu<sup>1,3</sup>

(1. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Institute of Marxism, Central South University, Changsha 410083, China

3. Metal Resources Strategic Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To enhance the safety, synergy and efficiency of the industrial chain related to cobalt in China, this study comprehensively analyzes the characteristics and evolution pattern of inter-industry cobalt consumption in China, constructs China's environmental expansion input-output tables in 2007 and 2017, calculates the embodied intersectoral cobalt consumption, and based on this, establishes the embodied cobalt consumption industrial networks (ECIN) in 2007 and 2017. The results show that the structure of ECIN in 2017 was tighter than that in 2007, showing a trend of concentration toward some strategic emerging industries, that the criticality of the battery sector has increased significantly, accounting for 40% of the cobalt output in ECIN, and that key consumption paths changed from demand-driven by the construction industry to demand-driven by the transportation and consumer electronics sectors, and the contribution caused by these two key paths were 13.9% and 10.1%, respectively. It is suggested that differentiated measures should be taken for different sectors to prevent and resolve possible cobalt supply shortages, and at the same time comprehensive measures need to be taken to strengthen the synergistic management of various sectors on the key paths.

**Key Words:** embodied cobalt consumption; industrial complex network; dominant sectors; key consumption paths

[编辑: 谭晓萍]