

引用格式:朱学红,彭婷,谌金宇. 战略性关键金属贸易网络特征及其对产业结构升级的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1489-1503. [Zhu X H, Peng T, Chen J Y. Impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1489-1503.] DOI: 10.18402/resci.2020.08.05

# 战略性关键金属贸易网络特征及其对产业结构升级的影响

朱学红<sup>1,2</sup>, 彭婷<sup>1</sup>, 谌金宇<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 中南大学金属资源战略研究院, 长沙 410083)

**摘要:** 为了考察战略性关键金属贸易网络特征对产业结构升级的影响, 本文基于复杂网络分析方法, 以1996—2017年7种战略性关键金属贸易数据为基础, 定量刻画了全球战略性关键金属贸易网络的拓扑特征, 并从入度中心度、出度中心度、接近中心度、中间中心度和特征向量中心度, 5个维度全新解构各国在贸易网络中的角色和地位, 以此并构建面板回归模型, 实证分析贸易网络特征对产业结构升级的影响。研究表明: ①1996—2017年期间全球战略性关键金属贸易网络具有松散性和异质性, 并呈现“小世界”特征; ②就个体而言, 中国、美国和德国是全球战略性关键金属贸易的重要参与者, 在贸易网络中占据中心地位; ③接近中心度和中间中心度对一国产业结构升级具有显著的促进作用, 且这种影响在低收入国家表现更为突出, 而出入度和特征向量中心度的影响则不显著。中国应采取更加开放的贸易政策, 并提升在全球价值链中的分工地位, 促进产业结构优化升级。

**关键词:** 战略性关键金属; 贸易网络特征; 复杂网络理论; 产业结构升级; 中心性; “小世界特征”

DOI: 10.18402/resci.2020.08.05

## 1 引言

关键金属通常包含两层含义: 地理储备的稀缺性和经济价值的不可或缺性。2016年, 中国发布的《全国矿产资源规划(2016—2020年)》<sup>[1]</sup>中, 战略性矿产名录涵盖了7种战略性关键金属: 钨、锆、钼、钴、锂、铈和稀土。战略性关键金属被广泛用于一系列战略性新兴产业与高新技术领域, 是维系国民经济高质量发展的重要矿种, 也是未来全球经济结构调整和产业结构升级的关键。然而, 战略性关键金属具有资源禀赋分布不均衡的特征, 导致各国在战略性关键金属供给和需求上呈现地理分野。在经济全球化背景下, 国际贸易使得资源在全球范围内重新配置, 形成了复杂的贸易网络。随着战略性关键金属地位的凸显, 全球战略性关键金属贸易格局也发生深刻变化, 一个国家在贸易网络中的地位决定了其对战略性关键金属的掌控力与影响力, 而

战略性关键金属在一国产业结构升级中发挥着不可替代的作用。因此, 在大国竞争背景下, 全面认识全球战略性关键金属贸易的网络结构特征, 研判一国贸易地位, 并从战略性关键金属贸易网络特征出发考察其对产业结构升级的影响, 对维护中国新时代资源安全与经济安全, 推动中国经济高质量发展与产业结构升级具有重大的现实意义<sup>[2,3]</sup>。

近年来, 学者们逐渐摆脱研究单个国家贸易的传统模式, 将复杂网络理论引入全球贸易关系的研究中。最先被关注的是化石能源贸易的研究, 关于石油贸易方面, Du等<sup>[4]</sup>、Yang等<sup>[5]</sup>、Sun等<sup>[6]</sup>和程淑佳等<sup>[7]</sup>构建世界原油贸易网络, 研究全球原油流动的地理格局及其演变, 检验国际石油贸易网络的稳定性; Kitamura等<sup>[8]</sup>和Xi等<sup>[9]</sup>分别探究石油贸易的驱动力和阻力以及原油贸易方式变化对每个国家GDP的影响。关于煤炭贸易方面, Wang等<sup>[10,11]</sup>对全球煤

收稿日期: 2020-02-19; 修订日期: 2020-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874210); 湖南省教育厅创新平台开放基金项目(17K103); 湖南省智库专项委托课题项目(18ZWA07)。

作者简介: 朱学红, 女, 湖南长沙人, 教授, 研究方向为资源经济与管理。E-mail: zhxh@csu.edu.cn

通讯作者: 谌金宇, 男, 湖南益阳人, 副教授, 研究方向为资源经济与管理。E-mail: cjq2014@csu.edu.cn

炭贸易网络和中国区域间煤炭贸易网络的演变进行了全面的探索和讨论;Xia等<sup>[12]</sup>通过多区域投入产出模型确定了全球煤炭供应链中的中心枢纽。关于天然气贸易方面,Geng等<sup>[13]</sup>分析了国际天然气贸易结构的演变特征和国际天然气市场的整合;Chen等<sup>[14,15]</sup>研究了全球液化天然气贸易的贸易竞争格局,并开发了贸易破裂扩散的仿真模型,观察天然气贸易参与者在风险传递过程中的作用。随后,一些学者也引入复杂网络,刻画了多品种化石能源贸易的网络特征,Gao等<sup>[16]</sup>、Hao等<sup>[17]</sup>和Zhong等<sup>[18]</sup>通过定量分析化石燃料国际贸易的特征和演变,刻画了网络的总体结构、社区结构和主要贸易国家的演化趋势;Zhong等<sup>[19,20]</sup>设计3类标准化交互信息来衡量社区演化的特征,还分析了国家在国际化石燃料贸易网络中的作用。也有学者在单一金属矿石贸易的研究中引入复杂网络的方法,在大宗金属矿产方面,Zhong等<sup>[21]</sup>通过物质流分析和复杂网络理论,定量分析了国际铁流特征和结构的演变;Hao等<sup>[22]</sup>构建铁矿石进口竞争网络,分析铁矿石进口竞争格局,进口竞争区域和主要进口国的总体特征;Dong等<sup>[23]</sup>结合资源依赖和网络理论,分析2007—2015年铜精矿和废铜国际贸易共同体的形成过程;董迪等<sup>[24]</sup>构建国际铜贸易网络并发现其存在“小世界”特征;史超亚等<sup>[25]</sup>构建复杂网络模型,研究了2002—2015年铝土矿的国际贸易格局。此外,越来越多文献涉及到战略性关键金属的研究,Hou等<sup>[26]</sup>基于复杂网络理论构建了国际稀土贸易网络,分析贸易国家的分布、贸易的总体结构以及网络的主要国家和社区;Wang等<sup>[27,28]</sup>基于全球多区域投入产出分析框架和复杂网络理论,构建一个具体化的稀土流网络,对社区结构和小世界性质进行了分析,并在对网络的度数中心度、强度中心度、中间中心度和特征向量中心度进行综合分析的基础上,发现中国、德国和美国在全球稀土贸易中是3个是最重要的经济体。

除了刻画贸易网络的特征及其演变趋势外,学者们还探究了贸易网络演变的驱动因素。马远等<sup>[29]</sup>构建“一带一路”沿线国家天然气贸易网络,发现人均碳排放、领土相邻对天然气贸易存在促进作用;城镇化水平、人口数量及语言相同对天然气贸易的影响在无权网络表现为正,在加权网络中表现为

负。Dong等<sup>[23]</sup>在铜贸易网络中发现,一个国家的网络位置和资源依赖都对社区形成具有积极影响,并且相互补充,各国可以根据其主要影响因素选择合适的贸易伙伴。Wang等<sup>[30]</sup>使用扩展引力模型分析了石墨贸易网络竞争强度的影响因素,一个国家的国内生产总值,技术进步和石墨消费量可以驱动国家之间的竞争强度,而距离则阻碍了它们之间的竞争。目前,一些学者也开始关注贸易网络与其他经济变量之间的关系。马述忠等<sup>[31]</sup>从复杂网络视角,实证研究了一国农产品贸易网络特征与其农业价值链分工地位的关系,结果表明网络中心性、网络联系强度和网络异质性对一国的农业价值链分工地位表现为稳健、显著的促进作用。Xi等<sup>[9]</sup>研究“一带一路”沿线国家原油贸易方式变化对每个国家GDP的影响,发现国家在贸易网络中的中心地位对GDP产生了重大的影响,这种影响对于经济水平不同的国家表现出异质性。许和连等<sup>[32]</sup>研究了一国在离岸服务外包网络中的网络特征及其对服务业全球价值链地位的影响。Aller等<sup>[33]</sup>分析世界贸易网络对环境的影响,发现网络效应对高收入国家的环境质量有负面影响,却会改善低收入国家的环境。

综上所述,现有研究关于战略性关键金属贸易网络的文献较少,并且相关研究也主要集中在单品种战略性关键金属,缺乏多金属组合研究,无法完整反映战略性关键金属的全貌。此外,现有研究集中在网络特征刻画上,而没有从战略性关键金属的核心属性出发,探讨其与经济变量如产业结构升级的内在关联。本文的贡献主要体现在以下两个方面:首先,本文基于整体视角,聚焦7种战略性关键金属,使全球战略性关键金属贸易网络的基本形式、结构属性及内部关联得到更为准确与完整的呈现。其次,本文将复杂网络分析方法与计量经济模型相结合,探究贸易网络特征对产业结构升级的影响机理,揭示战略性关键金属贸易网络的个体特征与产业结构升级之间的内在关联机制,为各国政府更好地制定贸易政策,谋求更高的贸易地位,促进本国产业结构升级提供依据。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 全球战略性关键金属贸易网络的构建

基于复杂网络理论,本文构建了一个加权的战

2020年8月

略性关键金属贸易网络,  $G=(V, W)$ 。式中:  $V$ 表示所有节点;  $W$ 表示节点之间的所有边。本文将出口国确定为初始节点, 用向量  $V_i=[v_i]$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 表示, 将进口国确定为最终节点, 用向量  $V_j=[v_j]$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 表示。在加权网络中, 边不仅表明贸易的流向, 而且还表征贸易强度, 两者共同描述贸易国之间的关系。

### 2.1.2 贸易网络整体特征指标的构建

本文使用4种测量指标来刻画贸易网络的整体特征: 网络直径、平均路径长度、网络密度和平均聚类系数。

#### (1) 网络直径和平均路径长度

网络直径是网络中任意两节点最短路径的最大值。平均路径长度则是任意两节点最短路径的平均值。因此, 网络直径和平均路径长度衡量的是网络的传输性能与效率, 在贸易网络中反映贸易畅通程度和贸易效率。本文参考刘立涛等<sup>[34]</sup>的研究, 将平均路径长度定义为:

$$K_{apl} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

式中:  $K_{apl}$  表示平均路径长度;  $d_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间的最短路径;  $n$  表示节点总数。

#### (2) 网络密度

网络密度用于测量网络中节点之间关系的紧密度。密度越大, 网络中个体之间的关系越紧密。网络密度测度网络的规模, 在贸易网络中反映贸易规模。依据刘立涛等<sup>[34]</sup>的研究, 将网络密度定义为:

$$K_{gd} = \frac{m}{n(n-1)} \quad (2)$$

式中:  $K_{gd}$  表示网络密度;  $m$  表示网络中存在关系的数量。

#### (3) 平均聚类系数

节点的聚类系数指一个节点的所有相邻节点之间的关系强度。基于此, 平均聚类系数为所有节点聚类系数的均值, 反映网络节点的聚集程度。平均聚类系数和平均路径长度通常综合起来考虑网络是否存在“小世界”特征, 参考刘艳等<sup>[35]</sup>的研究, 将平均聚类系数定义为:

$$K_{acc} = \frac{1}{n} \sum \frac{n_i}{e_i(e_i-1)} \quad (3)$$

式中:  $n_i$  是节点  $i$  的所有相邻的节点数;  $e_i$  是节点  $i$

所有相邻节点之间存在的连接数。

### 2.1.3 贸易网络个体特征指标的构建

为表征一个国家在贸易网络中的地位, 本文测量了5种类型的中心度指标: 入度中心度、出度中心度、接近中心度、中间中心度和特征向量中心度。

#### (1) 入度中心度与出度中心度

度数中心度是反映节点在网络上中心性最直观指标, 在有向网络中可以分解为入度中心度和出度中心度。入度中心度计算输入边的数量, 而出度中心度则测度输出边的数量, 这两个指标有助于更详细描述度数中心度。为了同时考虑贸易强度, 本文对上述指标进行加权处理, 在贸易网络中, 入度中心度测度进口的双边贸易关系的数量, 而出度中心度则测度出口的双边贸易关系的数量。参考Freeman等<sup>[36]</sup>和Zhong等<sup>[21]</sup>的研究, 它们被分别定义为:

$$C_{(d)i} = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_{ji} \quad (4)$$

$$C_{(d)i}^{in} = \sum_{j=1}^n a_{ji} w_{ji} \quad (5)$$

$$C_{(d)i}^{out} = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_{ij} \quad (6)$$

式中:  $C_{(d)i}$ 、 $C_{(d)i}^{in}$  和  $C_{(d)i}^{out}$  分别表示节点  $i$  的度数中心度、入度中心度和出度中心度。如果节点  $i$  和  $j$  之间存在直接的贸易关系, 那么  $a_{ij}=1$ , 否则  $a_{ij}=0$ ;  $w_{ij}$  代表节点  $i$  和  $j$  之间边的权重。

#### (2) 接近中心度

考虑到最短路径的概念, 即两节点间的距离, 接近中心度从拓扑网络的角度表征节点的位置。接近中心度为节点  $i$  和所有其他节点之间的最短路径长度之和的倒数。节点接近中心度越大, 其贸易路径越短, 在贸易网络中对其他节点依赖性越低, 越不易受别国的限制, 贸易越顺畅。参考刘艳等<sup>[35]</sup>的研究, 将接近中心度定义为:

$$C_{(c)i} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}} \quad (7)$$

式中:  $C_{(c)i}$  表示节点  $i$  的接近中心度;  $d_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间的最短路径; 并在加权网络中加权。

#### (3) 中间中心度

中间中心度是另一个中心性指标, 捕获节点作

为中介的重要性。中间中心度可以理解为某个节点处于其他两个节点中最短路径中的概率。该指标度量了网络中节点的连接性特征,在贸易网络中表明了节点在控制贸易流中的中介作用,具有高中间中心度的国家具有很强的讨价还价能力,有更多获利的机会。参考Ge等<sup>[37]</sup>的研究,将中间中心度定义为:

$$C_{(b)i} = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n g_{pq(i)} / g_{pq}, \quad (8)$$

( $i \neq p \neq q; p=1, 2, 3, \dots, n; q=1, 2, 3, \dots, n$ )

式中:  $C_{(b)i}$  表示节点  $i$  的中间中心度;  $g_{pq}$  表示节点  $p$  和  $q$  之间的最短路径;  $g_{pq(i)}$  表示经过节点  $i$  的从节点  $p$  到  $q$  的最短路径。

#### (4) 特征向量中心度

特征向量中心度可视为以相邻节点的影响力为权的权重中心度,是从邻国的影响力来衡量一国的重要程度。基本假设是,具有高特征向量的节点意味着它已连接到许多本身具有高特征向量的节点。特征值中心性越大,参与者在整个网络中的影响就越大。参考Ge等<sup>[37]</sup>研究,本文将特征向量中心度定义为:

$$AX = \lambda X \quad (9)$$

$$\lambda_i x_i = a_{1i} x_1 + a_{2i} x_2 + \dots + a_{ii} x_i + \dots + a_{ni} x_n, \quad (i \neq t) \quad (10)$$

$$C_{(e)i} = \lambda_i \quad (11)$$

式中:  $A$  是由  $a_{ij}$  组成的一个  $n \times n$  的邻接矩阵;  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$ , 分别表示各节点的度数中心度;  $\lambda_i$  即为特征向量中心度值; 而  $a_{ij}$  表示节点  $i$  对节点  $j$  地位的贡献度;  $C_{(e)i}$  表示节点  $i$  的特征向量中心度。

#### 2.1.4 模型设定

为了探究一国(地区)战略性关键金属贸易特征对其产业结构升级的影响,本文选取1996—2017年期间每年均参与战略性关键金属贸易的64个国家(地区)为样本,对数据进行单位根检验与协整检验后,关于具体模型的选取通过Hausman检验来确定,根据Hausman检验结果拒绝了“存在随机效应”的假设,即应选择固定效应模型。借鉴Allen等<sup>[38]</sup>和Nunn<sup>[39]</sup>的模型设定构建了面板回归模型,其中,  $i$  表示国家(地区),  $t$  表示年份,构建的计量经济模型如下:

$$is_{it} = \gamma_i + \rho_i + \alpha_j X_{it} + \beta_1 fdi_{it} + \beta_2 ur_{it} + \beta_3 ht_{it} + \beta_4 lfs_{it} + \beta_5 \log(pgd p)_{it} + \beta_6 \log^2(pgd p)_{it} + \beta_7 fd_{it} + \epsilon_{it} \quad (12)$$

式中:  $is_{it}$  是第二、三产业增加值占GDP比重,用来测度一国(地区)产业结构升级的水平;  $\gamma_i$  指影响一国(地区)产业结构但不受时间因素影响的国家固定效应;  $\rho_i$  指影响一国(地区)产业结构的年度固定效应,不受国家(地区)因素的影响; 变量  $X_{it}$  为解释变量,表示一国(地区)网络特征的5类中心度指标: 入度中心度、出度中心度、接近中心度、中间中心度和特征向量中心度,上述指标逐一作为中心度指标进行回归。其他变量为控制变量: 外商直接投资 ( $fdi_{it}$ )、城镇化率 ( $ur_{it}$ )、高科技水平 ( $ht_{it}$ )、劳动力结构 ( $lfs_{it}$ )、经济增长水平 ( $\log(pgd p)_{it}$ 、 $\log^2(pgd p)_{it}$ ) 和金融发展水平 ( $fd_{it}$ )。  $\alpha$  和  $\beta$  分别为解释变量和控制变量的系数;  $\epsilon_{it}$  表示误差项。

#### 2.2 数据来源

本文选择1996—2017年7种战略稀有金属——锂、钴、钨、钼、锑、锆和稀土的贸易数据构建复杂网络,由于金属品种之间物理属性的差异,本文在建立加权网络时考虑贸易额而不是贸易量,数据来自联合国商品贸易数据库。

本文从产业结构高级化的维度测度产业结构升级。不同于大宗金属仅局限于工业层面,战略性关键金属多运用于高新技术产业,而考虑到高新技术产业与现代服务业的耦合关系,本文将第三产业也纳入统计范围。所以,本文根据克拉克定律,并参考顾雪松等<sup>[40]</sup>和干春晖等<sup>[41]</sup>的研究,选择传统指标第二、三产业增加值占GDP比重来代表一国产业结构升级。此外,本文还选择以下控制变量: ①外商直接投资,即FDI占GDP的比重,通常用来衡量贸易中的“知识溢出效应”和“技术溢出效应”,通过缓解东道国资金压力,带来先进知识和技术,改善就业结构等途径影响产业结构升级<sup>[42,43]</sup>。②城镇化率,城镇户籍人口占城镇总人口的比重,反映一个国家的城镇化进程,城镇化是推动产业结构升级重要的驱动力<sup>[44,45]</sup>。③高科技水平,高科技产品出口占制成品出口的比重反映一个国家高科技产品在国际市场上的竞争水平,从产出维度衡量一国科技进步水平<sup>[46]</sup>。④劳动力结构,产业转型升级伴随

2020年8月

着劳动力市场波动<sup>[47]</sup>,第二、三产业就业占总就业的比重反映了劳动力结构对一个国家产业结构升级的影响<sup>[48]</sup>。⑤经济增长水平,人均GDP是解释经济增长和产业结构升级的传统变量<sup>[49]</sup>,人均GDP的平方是一个派生变量,用于进一步研究模型中是否存在隐藏的非线性关系。为了考察不同经济发展水平的异质性,本文根据世界银行2017年公布的国民人均收入将样本分为:高收入组(12736美元及以上)和低收入组(12735美元及以下)。⑥金融发展水平,是由私营部门在国内信贷占GDP的比重得出的指标,用于评估一个国家金融业的发展状况<sup>[50]</sup>。上述变量的数据均来自世界银行数据库。

### 3 结果与分析

#### 3.1 全球战略性关键金属贸易网络的拓扑特征分析

##### 3.1.1 全球战略性关键金属贸易网络整体特征

表1展示了1996—2017年贸易网络规模的演变,综合节点数和边数的统计,可以发现,1996—2017年贸易网络的整体规模是在不断扩张的。本文使用Gephi软件绘制了可视化复杂网络结构图(图1)。1996年的贸易网络中,美国出口至其他国家的贸易通道是最明显的,美国是主要的出口国,日本和英国是主要的进口国;而在2017年的贸易网络中,智利超越美国成为最大出口国,日本保持其进口大国地位,而中国也成为进口大国。

图2反映了贸易网络的路径长度。平均路径长度相对稳定,基本保持在2.5左右,即每条贸易链上平均经过2.5个中介国家,说明全球战略性关键金属贸易网络的传输效率基本稳定。不同于平均路径长度,网络直径的波动很频繁,但介于5~7之间,即贸易网络的最长贸易链两端中间涉及的国家数量维持在5~7个的区间,它们都承担着“桥梁”的作用。

图3反映了贸易网络的紧密程度。网络密度与平均聚类系数在1996—2017年间的波动情况类似。网络密度基本维持在0.04左右,总体变化不

大,这表明全球战略性关键金属贸易网络呈现出松散性,贸易强度总体而言不高。平均聚类系数也在0.4上下波动,有略微的上升趋势。

通常,当一个网络平均路径长度接近相应的随机网络,且平均聚类系数远大于相应的随机网络时,称它为“小世界”网络<sup>[51]</sup>。在小世界网络中,节点间普遍存在弱纽带关系,可以采取降低“距离”或改变边数,以提高网络中信息传递的效率,促进集群发展。我们通过小世界商 $Q$ 的值来判断一个网络是否存在“小世界”特性,其定义为:

$$Q = \frac{\text{实际网络的平均群聚系数/平均路径长度}}{\text{随机网络的平均群聚系数/平均路径长度}} \quad (13)$$

通过平均路径长度和平均聚类系数数值的计算,对比贸易网络与其对应的随机网络,发现全球战略性关键金属贸易网络的小世界商 $Q$ 大于1,呈现“小世界”特征。

##### 3.1.2 全球战略性关键金属贸易网络个体特征

本文从5个维度刻画个体网络特征:入度中心度、出度中心度、接近中心度、中间中心度和特征向量中心度。

表2列出了历年中心度排名前3的国家。就入度中心度而言,荷兰在2002年超越日本成为第一大进口国,而值得注意的是,中国逐渐成为主要的进口国;美国和智利常年占据主要出口国的地位,而中国近年来逐渐淡出主要出口国的行列;接近中心度由于其计算性质,单年的统计不具备稳定性,下文对平均值的分析更具有分析价值;从中间中心度和特征向量中心度可以看出,美国一直在网络中占据重要地位,中国在网络中的影响力不断增强,且逐渐超越美国。

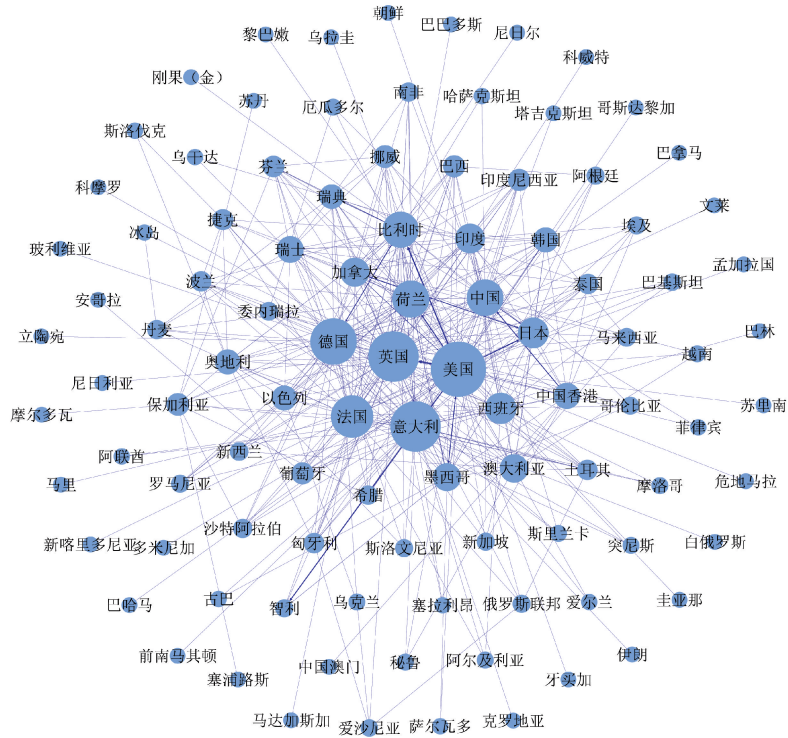
对各国22年的平均中心度指标进行排名,列出排名前10的国家(地区)(表3)。就入度中心度和出度中心度来看,荷兰、日本和中国是主要进口国,而智利、美国和中国是主要出口国;从接近中心度排名,可以看出美国、德国和意大利在网络中的独立能力最强;从中间中心度可以发现,美国、中国和德国在贸易网络中是最重要的媒介,起着关键的“桥梁”作用,有很强的控制力;就特征向量中心度而言,中国、美国和德国在网络中最具影响力。整体而言,高收入组的排名普遍比低收入组更靠前。

表1 1996—2017年全球战略性关键金属贸易网络节点数和边数

Table 1 The number of nodes and edges of the global strategic and critical metals trade network, 1996-2017

年份	1996	2001	2006	2011	2017
节点数/个	105	130	152	155	171
边数/条	509	761	857	982	1069

a. 1996年战略性关键金属贸易网络



b. 2017年战略性关键金属贸易网络

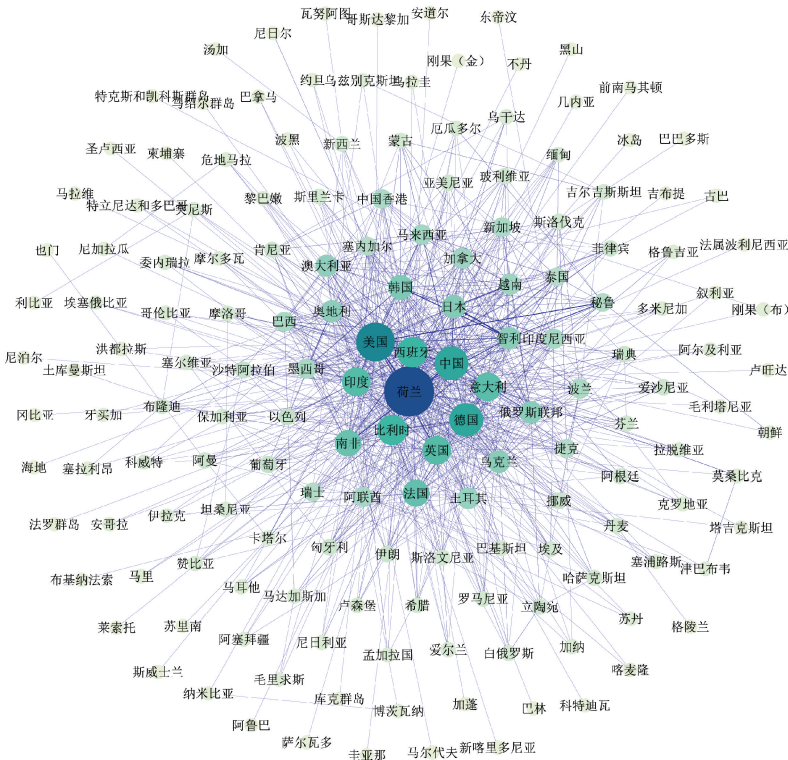


图1 1996和2017年全球战略性关键金属贸易网络

Figure 1 Global strategic and critical metals trade network, 1996 and 2017

注:每个节点代表一个国家,用黑色标签标注。两个点之间的箭头代表基于贸易关系的贸易流动方向,贸易额的大小由线条的粗细表示。

2020年8月

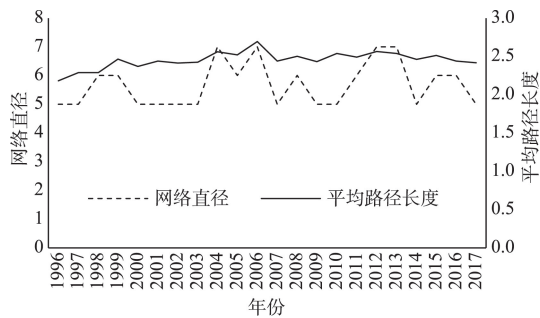


图2 1996—2017年全球战略性关键金属贸易网络直径和平均路径长度

Figure 2 Diameter and average path length of the global strategic and critical metals trade network, 1996-2017

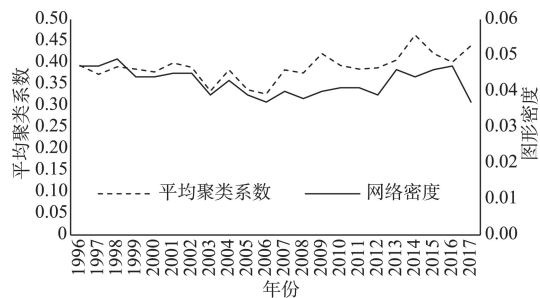


图3 1996—2017年全球战略性关键金属贸易网络密度和平均聚类系数

Figure 3 Density and average clustering coefficient of the global strategic and critical metals trade network, 1996-2017

### 3.2 贸易网络特征对产业结构升级影响的计量分析

#### 3.2.1 平稳性检验

本文在进行模型估计前对数据进行了平稳性检验,避免伪回归问题。利用Stata15.0软件对模型中各个变量均进行了LLC检验和IPS检验,在5%的显著性水平下可以认为原序列是平稳的;接着,本文用Kao检验对各变量之间是否存在长期的协整关系进行检验,结果为在1%的显著水平上拒绝原假设,即变量间存在长期均衡关系,可以对模型进行回归分析。

#### 3.2.2 回归结果分析

图4显示了第二、三产业产值占比与各观测样本中心度指标之间的相关性。从散点图中可以很直观地观察到,高收入国家较之低收入国家普遍拥有更高级的产业结构和更高的中心度。高收入组的各中心度与第二、三产业产值占比均基本存在正相关性;而低收入组受到个别极端值的影响,其关系的拟合存在相应偏差,当剔除部分极端值时,入度中心度、出度中心度、接近中心度和中间中心度与第二、三产业产值占比也存在正相关趋势,但特征向量中心度与第二、三产业产值占比的关系并不清晰,可能存在负向相关关系。

#### (1) 贸易网络中心度对产业结构升级的影响

表2 1996—2017年全球战略性关键金属网络中心度排名前3的国家(地区)

Table 2 Top three countries (region) of the global strategic and critical metals trade network in terms of centrality, 1996-2017

指标	入度中心度			出度中心度			接近中心度			中间中心度			特征向量中心度			
	排名	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1996	日本	英国	比利时	美国	澳大利亚	比利时	厄瓜多尔	土耳其	丹麦	美国	意大利	德国	德国	美国	意大利	
1998	日本	荷兰	英国	美国	智利	澳大利亚	丹麦	圭亚那	坦桑尼亚	美国	德国	意大利	美国	德国	英国	
2000	日本	荷兰	美国	美国	中国	智利	约旦	坦桑尼亚	丹麦	美国	南非	意大利	美国	中国	德国	
2002	荷兰	日本	英国	智利	中国	美国	沙特阿拉伯	卡塔尔	塞尔维亚和黑山	美国	中国	英国	中国	英国	印度	
2004	荷兰	日本	智利	智利	中国	秘鲁	毛里求斯	突尼斯	克罗地亚	美国	德国	南非	中国	美国	德国	
2006	荷兰	日本	比利时	智利	美国	中国	毛里求斯	立陶宛	洪都拉斯	美国	印度	中国	中国	美国	德国	
2008	荷兰	日本	智利	智利	美国	秘鲁	立陶宛	斐济	毛里求斯	美国	印度	中国	中国	美国	德国	
2010	荷兰	日本	中国	智利	美国	中国	孟加拉国	斯洛文尼亚	阿拉伯联合酋长国	美国	南非	中国	中国	印度	美国	
2012	荷兰	日本	中国	美国	智利	中国	布隆迪	巴林	斐济	中国	美国	意大利	中国	美国	德国	
2014	荷兰	日本	美国	美国	智利	墨西哥	沙特阿拉伯	埃及	贝宁	中国	美国	德国	中国	美国	日本	
2016	荷兰	日本	中国	智利	美国	南非	新西兰	布基纳法索	巴拿马	中国	美国	荷兰	中国	荷兰	美国	
2017	日本	中国	芬兰	智利	美国	南非	阿曼	博茨瓦纳	尼加拉瓜	荷兰	美国	中国	中国	美国	印度	

表3 1996—2017年全球战略性关键金属网络国家(地区)平均中心度排名(前10)

Table 3 Ranking of countries (regions) in the global strategic and critical metals trade network in terms of average centrality (Top10), 1996-2017

国家	入度中心度	出度中心度	接近中心度	中间中心度	特征向量中心度	收入组别
中国	3	3	5	2	1	低收入组
美国	4	2	1	1	2	高收入组
德国	8	12	2	3	3	高收入组
日本	2	25	12	13	4	高收入组
印度	14	14	9	5	5	低收入组
荷兰	1	5	6	6	6	高收入组
英国	7	24	4	7	7	高收入组
意大利	10	10	3	4	8	高收入组
韩国	6	13	19	28	9	高收入组
法国	18	30	8	10	10	高收入组

注:表中按各国特征向量中心度平均值升序排列。

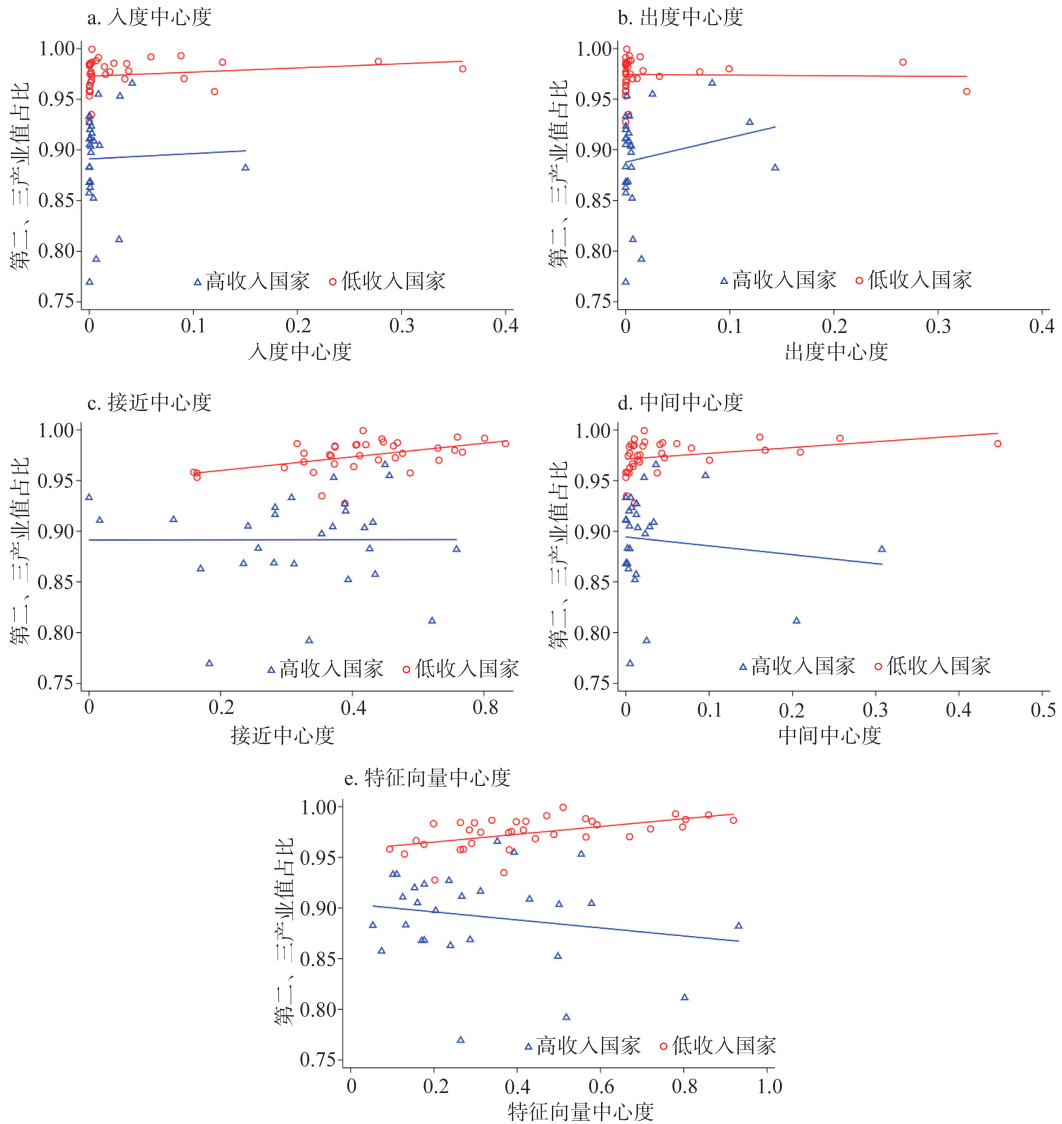


图4 各国年均第二、三产业产值占比和各中心度指标散点图

Figure 4 Annual non-agricultural output value increase (% of GDP) and scatter plots of various centrality indicators

注:每个点代表一个国家,红色的点代表高等收入国家,蓝色的点则代表低等收入国家。



2020年8月

产业结构(1)-(5)表示引入不同的中心度指标,贸易网络特征对产业结构升级的影响(表3-表5)。从实证结果来看,在1%显著性水平下,接近中心度和中间中心度对产业结构升级产生了显著正向影响,其中中间中心度对第二、三产业产值占比的弹性约为0.03(表4)。中间中心度和接近中心度表征网络中节点的控制地位和独立地位,可以很好

地描述国家在贸易网络中的掌控和反掌控能力,一个国家在贸易网络中的中介地位越高,对资源的控制就越好,在贸易中拥有更高的议价能力和话语权;而一个国家在贸易网络中接近中心度越高,在贸易中越不容易受到其他国家的影 响,在贸易网络中更为独立。实证检验结果表明,一国在战略性关键金属贸易中越处于中心或独立地位,越利于推动

表4 整体回归结果

Table 4 Overall regression results

	产业结构(1)	产业结构(2)	产业结构(3)	产业结构(4)	产业结构(5)
接近中心度(标准化)	0.00622*** (0.00200)				
中间中心度(标准化)		0.0275*** (0.00904)			
特征向量中心度(标准化)			-0.00479 (0.00499)		
入度中心度(标准化)				0.00699 (0.00750)	
出度中心度(标准化)					0.00575 (0.00754)
外商直接投资占GDP比重	0.0254*** (0.00743)	0.0242*** (0.00744)	0.0251*** (0.00745)	0.0235*** (0.00768)	0.0248*** (0.00748)
城镇人口占总人口比重	-0.0525*** (0.0190)	-0.0644*** (0.0193)	-0.0534*** (0.0190)	-0.0572*** (0.0196)	-0.0539*** (0.0191)
高技术产品出口占制成品出口比重	-0.00106 (0.00806)	-0.00331 (0.00805)	-0.00213 (0.00808)	-0.00270 (0.00807)	-0.00272 (0.00807)
第二、三产业就业占比	0.112*** (0.0211)	0.109*** (0.0211)	0.111*** (0.0212)	0.112*** (0.0212)	0.111*** (0.0212)
log(人均GDP)	0.205*** (0.0177)	0.213*** (0.0176)	0.216*** (0.0178)	0.214*** (0.0177)	0.213*** (0.0176)
log(人均GDP) <sup>2</sup>	-0.0218*** (0.00225)	-0.0228*** (0.00223)	-0.0231*** (0.00226)	-0.0230*** (0.00224)	-0.0228*** (0.00224)
私营部门的国内信贷占GDP比重	0.00683*** (0.00209)	0.00656*** (0.00209)	0.00681*** (0.00210)	0.00698*** (0.00209)	0.00696*** (0.00210)
常量	0.400*** (0.0293)	0.395*** (0.0290)	0.381*** (0.0294)	0.385*** (0.0290)	0.386*** (0.0290)
豪斯曼检验( $\chi^2$ )	62.76	78.96	62.89	62.27	63.36
$Prob>\chi^2$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
模型	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应
$R^2$	0.9412	0.9411	0.9408	0.9408	0.9408
调整后的 $R^2$	0.9380	0.9380	0.9376	0.9376	0.9376
F统计量	301.01	300.90	298.92	298.91	298.84
$Prob>F$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
观测量	1408	1408	1408	1408	1408

注:括号里的数字代表t值;\*\*\*、\*\*、\*分别表示1%、5%和10%水平上变量显著。

表5 高收入组回归结果

Table 5 Regression results of the high income group

	产业结构(1)	产业结构(2)	产业结构(3)	产业结构(4)	产业结构(5)
接近中心度(标准化)	0.00329** (0.00138)				
中间中心度(标准化)		0.00549 (0.00600)			
特征向量中心度(标准化)			0.00183 (0.00337)		
入度中心度(标准化)				-0.00372 (0.00418)	
出度中心度(标准化)					0.00426 (0.00443)
外商直接投资占GDP比重	0.0196*** (0.00403)	0.0194*** (0.00405)	0.0196*** (0.00404)	0.0205*** (0.00417)	0.0192*** (0.00405)
城镇人口占总人口比重	0.0417** (0.0164)	0.0395** (0.0167)	0.0436*** (0.0165)	0.0470*** (0.0172)	0.0412** (0.0165)
高技术产品出口占制成品出口比重	-0.00681 (0.00660)	-0.00785 (0.00661)	-0.00795 (0.00661)	-0.00793 (0.00661)	-0.00787 (0.00661)
第二、三产业就业占比	0.122*** (0.0268)	0.123*** (0.0269)	0.123*** (0.0269)	0.121*** (0.0271)	0.126*** (0.0270)
log(人均GDP)	0.0579** (0.0246)	0.0627** (0.0247)	0.0593** (0.0248)	0.0608** (0.0247)	0.0591** (0.0247)
log(人均GDP) <sup>2</sup>	-0.00524* (0.00291)	-0.00584** (0.00293)	-0.00543* (0.00293)	-0.00559* (0.00292)	-0.00543* (0.00292)
私营部门的国内信贷占GDP比重	0.00520*** (0.00126)	0.00527*** (0.00126)	0.00544*** (0.00128)	0.00533*** (0.00126)	0.00525*** (0.00127)
常量	0.628*** (0.0527)	0.621*** (0.0528)	0.623*** (0.0529)	0.619*** (0.0529)	0.625*** (0.0529)
豪斯曼检验( $\chi^2$ )	16.94	15.60	19.74	17.12	16.46
Prob> $\chi^2$	0.0308	0.0484	0.0114	0.0289	0.0362
模型	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应
R <sup>2</sup>	0.8474	0.8464	0.8463	0.8464	0.8464
调整后的R <sup>2</sup>	0.8386	0.8376	0.8375	0.8376	0.8376
F统计量	96.61	95.87	95.79	95.87	95.89
Prob>F	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
观测量	792	792	792	792	792

本国产业结构升级, Xi等<sup>[9]</sup>的研究结果也发现类似的结论,在“一带一路”倡议前一国在原油贸易的中心地位对GDP产生积极影响。

而在5%显著性水平下,特征向量中心度、入度中心度及出度中心度对产业结构升级的影响均不显著。特征向量中心度不显著说明一国无法从邻国影响力的角度带来贸易对产业结构升级的增益效果,因为在贸易中与影响力强的国家进行交易

时,并不一定能带来好处,相反可能在强势的伙伴面前丧失议价能力;而入度中心度和出度中心度的不显著也证明,在经济全球化的背景下一国单单从本国出发,用贸易进出口额衡量其贸易现状是缺乏价值的。

#### (2)其他因素对产业结构升级的影响

从整体回归结果来看,外商直接投资占GDP的比重表现了积极显著的影响,而高科技产品出口占

2020年8月

制成品出口的比重则没有,这意味着在研究产业结构升级时,技术溢出效应的贡献较技术水平而言更有意义。第二、三产业就业占比和城镇人口占总人口的比重呈现出显著的正向影响,这说明人类发展和社会文明的进步也促进了产业结构的升级。此外,经济水平同样表现出对产业结构升级的促进作用,经济水平是所有因素中最重要的,约占20%。本文还得到一个有趣的发现,即人均GDP的平方的影响显著为负,这表明经济增长与产业结构升级之间存在倒“U”型关系。根据表3,可以计算人均GDP的阈值,约为50118.72美元,即当人均GDP大于该阈值时,经济增长将对产业结构升级产生抑制作用,但目前各国的经济水平远远低于该阈值。本文还使用私营部门的国内信贷占GDP的比重来衡量金融发展的影响,发现金融发展对产业结构升级也有显著促进作用。

### (3)不同收入情况下的差异性分析

本文分别构建了高等收入组和低等收入组的面板模型,以考察不同经济水平国家(地区)的贸易网络特征对产业结构升级影响是否存在异质性。模型回归结果如表5和表6所示,可以发现,接近中心度每增加1%,高收入群体的第二、三产业增加值占比将增加3.29%,而低收入群体的第二、三产业增加值占比则增加8.43%。两个国家之间的贸易路径越短,来自其他国家的贸易壁垒的影响就越小;此外,两国之间更直接的贸易将带来更多的技术和知识外溢<sup>[52]</sup>,这两点对发展中国家尤为重要,所以对低收入群体而言更独立的贸易地位对产业结构升级的影响更大。而中间中心度仅在低收入组发现存在显著影响。中间中心度较高的低收入经济体可能会获得更高的市场支配力和市场准入,从而帮助它们参与制定贸易协定并增强其在贸易中的议价能力。一方面,更高的市场准入带来了更多的贸易;另一方面,贸易合作是以较低的价格实现的,这些都有助于促进国内产业结构顺利升级。

不同于整体样本回归结果,在低收入组中外商直接投资和金融发展水平均未表现出对产业结构升级的显著效应。可以从栾申洲<sup>[42]</sup>的研究结论中得到启发,外商直接投资对于中国产业结构优化的影响呈“U”型关系,表现为先抑制后促进,在低收入组中外商直接投资与产业结构升级并不是简单的线

性关系。而在低收入国家中金融发展水平普遍不高且金融机制不完善,较为混乱,存在各种投机行为,所以未表现出对产业结构升级的显著作用。同时,研究还发现,对低收入国家而言,城镇化反而抑制了产业结构升级。与Poelhekke<sup>[53]</sup>的研究发现相似,其解释为,城镇化的快速发展是农村居民为规避农业风险形成的一种城镇规模扩张现象。

## 4 结论与政策建议

基于1996—2017年全球7种战略性关键金属的贸易数据,本文采用复杂网络方法刻画了全球战略性关键金属贸易网络整体特征,并从入度中心度、出度中心度、接近中心度、中间中心度和特征向量中心度5个维度解构了主要国家的个体特征和贸易地位。此外,还采用面板回归模型探究了一国贸易网络特征与产业结构升级之间的关系。基于以上研究,得出以下结论与政策建议:

(1)1996—2017年期间,战略性关键金属贸易网络规模不断扩张,整体网络结构基本稳定。从网络拓扑结构来看,平均路径长度相对稳定,基本保持在2.5左右;网络直径的波动很频繁,但介于5~7之间,贸易网络传输效率变化不大。在贸易网络的紧密程度方面,网络密度基本维持在0.04左右,总体变化不大;平均聚类系数也在0.4上下波动,战略性关键金属贸易网络存在“小世界”特征。虽然从全球来看贸易环境相对平稳,但在中美贸易战、贸易壁垒增多的背景下,中国应有预警意识,加强双多边合作,增强全球战略性关键金属资源整合能力,通过采取加快海外资源开发,开辟多元化进口渠道,加大资源战略储备等多种措施保障战略性关键金属供给安全。

(2)全球战略性关键金属贸易网络核心国家分布格局较为稳定集中,核心国排名更为稳定且在网络中有更大的影响力。其中,荷兰、日本和中国是主要进口国,而智利、美国和中国是主要出口国。美国、德国和意大利在网络中的独立能力最强,不易受到其他国家的贸易制约。美国、中国和德国在贸易网络中是最重要的媒介,起着关键的“桥梁”作用,有很强的控制力。在影响力方面,中国、美国和德国在网络中占据中心地位。整体而言,中国、美国和德国是重要的参与者,在贸易网络中享有核心地位。对于中国而言,应采取更加开放的贸易政

表6 低收入组回归结果

Table 6 Regression results of the low income group

	产业结构(1)	产业结构(2)	产业结构(3)	产业结构(4)	产业结构(5)
接近中心度(标准化)	0.00843** (0.00416)				
中间中心度(标准化)		0.0474** (0.0210)			
特征向量中心度(标准化)			-0.00466 (0.0110)		
入度中心度(标准化)				0.0302 (0.0344)	
出度中心度(标准化)					0.0110 (0.0225)
外商直接投资占GDP比重	0.0359 (0.0362)	0.0355 (0.0362)	0.0317 (0.0364)	0.0338 (0.0363)	0.0319 (0.0364)
城镇人口占总人口比重	-0.133*** (0.0335)	-0.152*** (0.0341)	-0.135*** (0.0337)	-0.143*** (0.0345)	-0.138*** (0.0337)
高技术产品出口占制成品出口比重	0.0133 (0.0147)	0.00772 (0.0148)	0.0129 (0.0148)	0.0103 (0.0149)	0.0117 (0.0148)
第二、三产业就业占比	0.128*** (0.0327)	0.121*** (0.0328)	0.127*** (0.0328)	0.126*** (0.0328)	0.126*** (0.0328)
log(人均GDP)	0.229*** (0.0427)	0.221*** (0.0433)	0.247*** (0.0428)	0.241*** (0.0423)	0.242*** (0.0423)
log(人均GDP) <sup>2</sup>	-0.0241*** (0.00605)	-0.0226*** (0.00616)	-0.0264*** (0.00610)	-0.0255*** (0.00602)	-0.0257*** (0.00603)
私营部门的国内信贷占GDP比重	0.00336 (0.00625)	0.00328 (0.00624)	0.00299 (0.00627)	0.00329 (0.00628)	0.00327 (0.00632)
常量	0.384*** (0.0741)	0.413*** (0.0770)	0.351*** (0.0745)	0.369*** (0.0743)	0.362*** (0.0738)
豪斯曼检验( $\chi^2$ )	39.28	46.89	40.06	40.68	41.24
Prob> $\chi^2$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
模型	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应	固定效应
R <sup>2</sup>	0.8791	0.8793	0.8783	0.8784	0.8783
调整后的R <sup>2</sup>	0.8718	0.8720	0.8710	0.8711	0.8710
F统计量	120.53	120.76	119.61	119.74	119.62
Prob>F	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
观测量	616	616	616	616	616

策,通过政策引导与更多的国家建立贸易伙伴关系,巩固和推进与全球各个经济体和经济组织的贸易关系,并通过“一带一路”倡议以及发挥“亚投行”的战略平台作用,参与和引领国际贸易规制的制定,进一步增强国际影响力和话语权。

(3)接近中心度和中间中心度对一国产业结构升级具有显著的正向影响,具有较高中介地位和较低限制水平的国家倾向于拥有更高级的产业结

构。一国在战略性关键金属贸易中越处于中心和控制地位,越利于推动本国产业结构升级,这种影响在低收入国家更为突出。中国虽然目前在网络中有中心地位,但是随着中美贸易战的发酵,以及许多国家开始采取限制战略性关键金属出口等贸易保护政策,未来中国战略性关键金属面临的供需矛盾将更为凸显。因此,在新形势下,中国应当优化贸易结构,着力提高战略性关键金属资源高端应

2020年8月

用水平,推动战略性关键金属资源由低附加值向高附加值环节延伸,提升在全球价值链中的分工地位,从而实现本国产业优化升级。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国务院. 全国矿产资源规划(2016-2020年)[EB/OL]. (2016-11-08) [2020-02-19]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/08/content\\_5129991.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/08/content_5129991.htm). [The State Council of the People's Republic of China. National Mineral Resources Planning (2016-2020)[EB/OL]. (2016-11-08) [2020-02-19]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/08/content\\_5129991.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/08/content_5129991.htm).]
- [2] 王昶, 宋慧玲, 左绿水, 等. 国家金属资源安全研究回顾与展望[J]. 资源科学, 2017, 39(5): 805-817. [Wang C, Song H L, Zuo L S, et al. Review and prospects of national metal resource security [J]. Resources Science, 2017, 39(5): 805-817.]
- [3] 于会录, 董锁成, 李宇, 等. 丝绸之路经济带资源格局与合作开发模式研究[J]. 资源科学, 2014, 36(12): 2468-2475. [Yu H L, Dong S C, Li Y, et al. Resource cooperation development modes in the silk road economic zone based on resource distribution patterns [J]. Resources Science, 2014, 36(12): 2468-2475.]
- [4] Du R J, Wang Y, Dong G G, et al. A complex network perspective on interrelations and evolution features of international oil trade, 2002-2013[J]. Applied Energy, 2017, 196: 142-151.
- [5] Yang Y, Poon J P H, Liu Y, et al. Small and flat worlds: A complex network analysis of international trade in crude oil[J]. Energy, 2015, 93: 534-543.
- [6] Sun Q R, Gao X Y, Zhong W Q, et al. The stability of the international oil trade network from short-term and long-term perspectives[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 482: 345-356.
- [7] 程淑佳, 赵映慧, 李秀敏. 基于复杂网络理论的原油贸易空间格局差异分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(8): 20-25. [Cheng S J, Zhao Y H, Li X M. Differences in spatial pattern of main nations' crude oil trade on complicated network theory[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(8): 20-25.]
- [8] Kitamura T, Managi S. Driving force and resistance: Network feature in oil trade[J]. Applied Energy, 2017, 208: 361-375.
- [9] Xi X, Zhou J S, Gao X Y, et al. Impact of changes in crude oil trade network patterns on national economy[J]. Energy Economics, 2019, 84: 104490.
- [10] Wang W Y, Li Z F, Cheng X. Evolution of the global coal trade network: A complex network analysis[J]. Resources Policy, 2019, 62: 496-506.
- [11] Wang W Y, Li Z F. The evolution of China's interregional coal trade network, 1997-2016[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2019, DOI: 10.1016/j.physa.2019.04.210.
- [12] Xia X H, Chen B, Wu X D, et al. Coal use for world economy: Provision and transfer network by multi-region input-output analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 125-144.
- [13] Geng J B, Ji Q, Fan Y, et al. A dynamic analysis on global natural gas trade network[J]. Applied Energy, 2014, 132(1): 23-33.
- [14] Chen Z H, An H Z, Gao X Y, et al. Competition pattern of the global liquefied natural gas (LNG) trade by network analysis[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 769-776.
- [15] Chen Z H, An H Z, An F, et al. Structural risk evaluation of global gas trade by a network-based dynamics simulation model[J]. Energy, 2018, 159: 457-471.
- [16] Gao C X, Sun M, Shen B. Features and evolution of international fossil energy trade relationships: A weighted multilayer network analysis[J]. Applied Energy, 2015, 156: 542-554.
- [17] Hao X Q, An H Z, Qi H, et al. Evolution of the exergy flow network embodied in the global fossil energy trade: Based on complex network[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1515-1522.
- [18] Zhong W Q, An H Z, Fang W, et al. Features and evolution of international fossil fuel trade network based on value of emergy[J]. Applied Energy, 2016, 165: 868-877.
- [19] Zhong W Q, An H Z, Shen L, et al. Global pattern of the international fossil fuel trade: The evolution of communities[J]. Energy, 2017, 123: 260-270.
- [20] Zhong W Q, An H Z, Shen L, et al. The roles of countries in the international fossil fuel trade: An emergy and network analysis[J]. Energy Policy, 2017, 100: 365-376.
- [21] Zhong W Q, Dai T, Wang G S, et al. Structure of international iron flow: Based on substance flow analysis and complex network[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 136: 345-354.
- [22] Hao X Q, An H Z, Sun X Q, et al. The import competition relationship and intensity in the international iron ore trade: From network perspective[J]. Resources Policy, 2018, 57: 45-54.
- [23] 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.
- [24] 董迪, 安海忠, 郝晓晴, 等. 基于复杂网络的国际铜矿石贸易格局[J]. 经济地理, 2016, 36(10): 93-101. [Dong D, An H Z, Hao X Q, et al. International copper ore trade pattern based on complex network theory[J]. Economic Geography, 2016, 36(10): 93-101.]
- [25] 史超亚, 高湘昀, 孙晓奇, 等. 复杂网络视角下的国际铝土矿贸易演化特征研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(1): 57-62. [Shi C Y, Gao X Y, Sun X Q, et al. Study on the evolution characteristics of international bauxite trade from the perspective of complex network[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(1): 57-62.]
- [26] Hou W Y, Liu H F, Wang H, et al. Structure and patterns of the international rare earths trade: A complex network analysis[J]. Resources Policy, 2018, 55: 133-142.
- [27] Wang X B, Wei W D, Ge J P, et al. Embodied rare earths flow be-

- tween industrial sectors in China: A complex network approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 125: 363-374.
- [28] 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.
- [29] 马远, 徐俐俐. “一带一路”沿线国家天然气贸易网络结构及影响因素[J]. *世界经济研究*, 2017, (3): 109-122. [Ma Y, Xu L L. Network structure and influence factors of gas trade about the countries along “the Belt and Road”[J]. *World Economy Studies*, 2017, (3): 109-122.]
- [30] Wang X X, Li H J, Yao H J, et al. Network feature and influence factors of global nature graphite trade competition[J]. *Resources Policy*, 2019, 60: 153-161.
- [31] 马述忠, 任婉婉, 吴国杰. 一国农产品贸易网络特征及其对全球价值链分工的影响: 基于社会网络分析视角[J]. *管理世界*, 2016, (3): 60-72. [Ma S Z, Ren W W, Wu G J. The characteristics of agricultural trade network and its effects on the global value chain division: A study based on social network analysis[J]. *Management World*, 2016, (3): 60-72.]
- [32] 许和连, 成丽红, 孙天阳. 离岸服务外包网络与服务业全球价值链提升[J]. *世界经济*, 2018, 41(6): 77-101. [Xu H L, Cheng L H, Sun T Y. Offshore services outsourcing network and upgrading in global value chain of service industry[J]. *The Journal of World Economy*, 2018, 41(6): 77-101.]
- [33] Aller C, Ductor L, Herrerias M J, et al. The world trade network and the environment[J]. *Energy Economics*, 2015, 52: 55-68.
- [34] 刘立涛, 沈镭, 刘晓洁, 等. 基于复杂网络理论的中国石油流动格局及供应安全分析[J]. *资源科学*, 2017, 39(8): 1431-1443. [Liu L T, Shen L, Liu X J, et al. Spatial-temporal features of China's oil trade network and supply security simulation[J]. *Resources Science*, 2017, 39(8): 1431-1443.]
- [35] 刘艳, 黄健柏, 谌金宇. 全球铜矿石资源流动的网络关联及影响因素分析[J]. *统计与决策*, 2017, (7): 146-149. [Liu Y, Huang J B, Chen J Y. Analysis of network correlation and influencing factors of global copper ore resource flow[J]. *Statistics & Decision*, 2017, (7): 146-149.]
- [36] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Social Networks*, 1978, (1): 215-239.
- [37] Ge J P, Wang X B, Guan Q, et al. World rare earths trade network: Patterns, relations and role characteristics[J]. *Resources Policy*, 2016, 50: 119-130.
- [38] Allen F, Qian J, Qian M J. Law, finance, and economic growth in China[J]. *Journal of Financial Economics*, 2005, 77: 57-116.
- [39] Nunn N. Relationship-specificity, incomplete contracts, and the pattern of trade[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2007, 122(2): 569-600.
- [40] 顾雪松, 韩立岩, 周伊敏. 产业结构差异与对外直接投资的出口效应: “中国-东道国”视角的理论及实证[J]. *经济研究*, 2016, (4): 102-115. [Gu X S, Han L Y, Zhou Y M. Difference in industrial structure and effect of ODI on export: Theory and evidence from the “China-host Country” perspective[J]. *Economic Research Journal*, 2016, (4): 102-115.]
- [41] 干春晖, 郑若谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. *经济研究*, 2011, (5): 4-16. [Gan C H, Zheng R G, Yu D F. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, (5): 4-16.]
- [42] 栾申洲. 对外贸易、外商直接投资与产业结构优化[J]. *工业技术经济*, 2018, 37(1): 86-92. [Luan S Z. Foreign trade, FDI and industrial structure optimization[J]. *Journal of Industrial Technological & Economics*, 2018, 37(1): 86-92.]
- [43] 张林. 中国双向FDI、金融发展与产业结构优化[J]. *世界经济研究*, 2016, (10): 111-124. [Zhang L. Chinese bidirectional FDI, financial development and industrial structure optimization[J]. *World Economy Studies*, 2016, (10): 111-124.]
- [44] 张宗益, 伍焱熙. 新型城镇化对产业结构升级的影响效应分析[J]. *工业技术经济*, 2015, 34(5): 101-109. [Zhang Z Y, Wu Y X. Analysis of influential effect towards upgrading of industrial structure from new-type urbanization[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2015, 34(5): 101-109.]
- [45] 孙叶飞, 夏青, 周敏. 新型城镇化发展与产业结构变迁的经济增长效应[J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(11): 23-40. [Sun Y F, Xia Q, Zhou M. The economic growth effects of new urbanization development and industrial structure change[J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2016, 33(11): 23-40.]
- [46] 高远东, 张卫国, 阳琴. 中国产业结构高级化的影响因素研究[J]. *经济地理*, 2015, 35(6): 96-101. [Gao Y D, Zhang W G, Yang Q. The factors influencing of industrial structure upgrade in China[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(6): 96-101.]
- [47] 李娟, 万璐, 唐珮菡. 产业转型升级、贸易开放与中国劳动市场波动[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(1): 140-147. [Li J, Wan L, Tang P H. Estimation of labor market fluctuation and employment risk under industrial transition[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(1): 140-147.]
- [48] 景跃军, 张昀. 我国劳动力就业结构与产业结构相关性及其协调性分析[J]. *人口学刊*, 2015, 37(5): 85-93. [Jing Y J, Zhang Y. Analysis on the correlation and coordination of China's employment structure and industrial structure[J]. *Population Journal*, 2015, 37(5): 85-93.]
- [49] 刘伟, 蔡志洲. 新时代中国经济增长的国际比较及产业结构升级[J]. *管理世界*, 2018, 34(1): 16-24. [Liu W, Cai Z Z. International comparison and industrial structure upgrading of Chinese economic growth in a new era[J]. *Management World*, 2018, 34(1): 16-24.]
- [50] 陶爱萍, 徐君超. 金融发展与产业结构升级非线性关系研究: 基

- 于门槛模型的实证检验[J]. 经济经纬, 2016, 33(2): 84-89. [Tao A P, Xu J C. The nonlinear relationship between financial development and industrial structure upgrading: An empirical analysis based on threshold methodology[J]. Economic Survey, 2016, 33(2): 84-89.]
- [51] Watts D J. Networks, dynamics, and the small-world phenomenon [J]. American Journal of Sociology, 2016, 105(2): 493-527.
- [52] 孔含笑, 沈镭, 钟帅. “一带一路”产油国经济增长与石油生产和贸易的动态关系研究[J]. 资源科学, 2017, 39(6): 1071-1083. [Kong H X, Shen L, Zhong S. Dynamic relations among oil production and trade and economic growth in oil producing countries in the Belt and Road[J]. Resources Science, 2017, 39(6): 1071-1083.]
- [53] Poelhekke S. Urban growth and uninsured rural risk: Booming towns in bust times[J]. Journal of Development Economics, 2011, 96(2): 461-475.

## Impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures

ZHU Xuehong<sup>1,2</sup>, PENG Ting<sup>1</sup>, CHEN Jinyu<sup>1,2</sup>

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

2. Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact of strategic and critical metals trade network characteristics on the upgrading of industrial structures, we quantitatively characterized the topological characteristics of the network based on complex network analysis methods, using the trade data of the seven strategic and critical metals from 1996 to 2017. This study measured the degree of centrality from five dimensions: in-degree centrality, out-degree centrality, closeness centrality, betweenness centrality, and eigenvector centrality. We deciphered the roles and positions of countries in the trade network. Based on these, this study further constructed a panel regression model to examine how the characteristics of strategic and critical metals trade network impact the industrial structure upgrading. The research results show that: (1) The global strategic and critical metals trade network is loose and heterogeneous during 1996-2017 and shows the characteristics of a “small world”. (2) Individually, China, the United States, and Germany were important participants in global strategic and critical metals trade, occupying a central position in the trade network. (3) Further research found that closeness centrality and betweenness centrality showed a significant effect on promoting the upgrading of a country’s industrial structure. This effect was more prominent in low-income countries. But the influence of in-degree centrality, out-degree centrality, and eigenvector centrality were not obvious. China should adopt a more open trade policy and enhance its position in the division of labor in the global value chain to promote the optimization and upgrading of its industrial structure.

**Key words:** strategic and critical metals; trade network characteristics; complex network theory; industrial structure upgrading; centrality; small world characteristics