

计启迪, 刘卫东, 陈伟, 等. 基于产业链的全球铜贸易网络结构研究 [J]. 地理科学, 2021, 41(1): 44-54. [Ji Qidi, Liu Weidong, Chen Wei et al. Structure of global copper-containing products trade network based on industrial chain perspective. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(1): 44-54.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.01.005

基于产业链的全球铜贸易网络结构研究

计启迪^{1,2}, 刘卫东^{1,2}, 陈伟^{1,2}, 王涛^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 基于产业链视角研究铜贸易网络, 构建了 2017 年铜矿石、粗铜、精炼铜、铜材和废杂铜 5 类含铜产品的全球贸易网络, 对比产业链上各环节产品的贸易网络的拓扑结构, 以全面刻画铜资源的全球流动以及国家(地区)之间的铜贸易关系。主要结论如下: ① 2001 年以来, 全球含铜产品贸易重量稳定增长, 其中铜矿石贸易重量最大, 精炼铜次之。② 5 类含铜产品贸易网络的拓扑结构存在明显差异, 根据社区发现算法可划分为 4~8 个组团, 模块度在 0.216~0.482 之间。由于资源禀赋和工业体系发展程度不同, 大部分国家(地区)在 5 类贸易网络中分属于不同的组团。③ 中国对铜资源的需求巨大, 围绕着中国的需求产生的贸易关系在铜矿石、粗铜、精炼铜、废杂铜 4 类贸易网络中都构成第一组团, 分别包含 47、102、120、135 个国家(地区), 表明中国在全球铜贸易中占有重要地位, 但也反映了中国铜资源自给率低、对外依存度大等问题。

关键词: 贸易网络; 铜产业链; 铜资源; 拓扑结构; 贸易组团

中图分类号: F746.2/F746.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2021)01-0044-11

区域间资源禀赋与需求的不平衡导致了贸易, 而矿产资源内在的区位固定性及其在全球生产网络中的最初始(the beginning of the beginning)地位决定了矿产资源在全球范围内的流动^[1], 铜是其中之一。铜在产业和经济发展中应用广泛, 随着发展中国家尤其是中国的快速发展, 基础设施和房地产等部门对铜资源需求的增长带动了全球铜贸易的不断增长, 2018 年铜矿石贸易数量达到 3 230 万 t, 比 2001 年增长 154%。此外, 铜作为非贵重金属中最好的导电导热体, 随着清洁能源和节能技术逐渐替代传统的能源密集型技术, 其需求将呈现出巨大的增长态势^[2]。目前, 中国是全球最大的铜消费国, “十三五”期间中国对铜的需求比“十二五”预计增长 16%, “中国制造 2025”计划和“新型城镇化建设”将进一步释放对铜资源的需求, 预计 2025 年中国需要精炼铜 1 561 万 t^[3]; 另一方面, 中国是世界最大的铜进口国, 对进口铜的依赖程度很高^[4]。因此研

究国际贸易中铜资源的流动对未来持续保障铜资源需求具有重要意义。

矿产资源是许多领域学者关注的研究热点, 经济学家使用多区域投入产出模型, 基于货币价值数据, 研究全球通过矿物的空间联系^[5], 环境生态学者应用物质流分析方法研究某一区域范围内铁、铜、铝、锂等资源的源、汇、流向、流量和库存等^[6-11], 侧重资源沿着产业链的物质流动, 而利用贸易数据研究物质的国际流动、分析国家(地区)之间的资源贸易关系相对较少。将网络分析方法引入贸易分析中日益受到学者们的认可, 已有研究在全球、区域等不同尺度对贸易网络格局、空间演化、拓扑关系等展开了分析^[12-14], 并从具体产业层面对农产品、矿产品、天然气、高端制造业等产业贸易网络进行深入研究^[15-18]。总体而言, 关于产业贸易网络的研究通常仅限于单一产品, 对产业链上下游其他产品的关注不足。以铜产品为例, 有研究基于铜矿石贸易网

收稿日期: 2020-01-07; 修订日期: 2020-04-24

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20080000)资助。[Foundation: Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA20080000).]

作者简介: 计启迪(1995-), 女, 浙江长兴人, 博士研究生, 主要从事经济地理与区域发展研究。E-mail: jiqd.17b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 刘卫东。E-mail: liuwd@igsrr.ac.cn

络研究国际贸易格局和各国在网络中的地位^[19,20], 缺乏对铜产业链其他关键环节如精炼铜、废杂铜等产品的贸易分析。铜的循环利用价值高, 世界上近 40% 使用的铜来自二次资源(主要指废杂铜)的再生产^[21]。随着循环利用资源、节约能源、减少环境污染等可持续发展理念的普及, 再生产的能源需求远低于一次资源的废杂铜将成为生产精炼铜越来越重要的原料, 而废杂铜主要由铜制品使用国产生。因此, 单一的铜矿石贸易网络分析不能够全面刻画国家之间铜资源的依赖关系以及各国在铜产业链上的相对地位和竞合关系。有部分学者将产业链视角引入了贸易网络分析, Tong 等构建了全球 59 个国家(地区)含铜产品的无权有向贸易网络刻画全球铜资源的流动, 并运用多维尺度分析和块状模型方法研究核心-边缘结构^[22], 但缺乏对比产业链上不同产品的国际贸易关系。Espinoza 等将全球分为中国、日本、欧盟、拉丁美洲、北美洲和其余国家(地区)6 个区域, 通过含铜产品的贸易数据研究区域之间铜的流动, 但缺少国家层面的深入分析^[23]。Zhang 等分析了 1975—2015 年中国进出口贸易中铜资源的流动, 而其他国家(地区)在国际铜贸易网络中地位的分析尚待补充^[24]。

产业链是一个完整的系统, 链条上的某一环节的变动会影响其他环节甚至整个链条的变化^[25]。因此, 本文引入产业链视角, 研究铜产业链上各关键环节产品的全球贸易网络。在分析全球铜贸易发展态势的基础上, 识别各贸易网络的主干结构, 然后利用社区发现等网络分析方法, 对比不同产品贸易网络的拓扑结构及国家(地区)之间的铜资源贸易关系。一方面, 将研究对象从单一产品延拓至产业链上下游, 有利于全面刻画铜资源的全球流动, 了解各国在全球价值链中的相对优势, 促进资源的可持续利用; 另一方面, 已有的贸易网络研究往往依据区域范围、贸易份额和 GDP 比重确定研究对象, 而不是基于整体贸易网络本身识别重要的国家(地区)和贸易联系路径, 因此本文引入识别主干网络的方法, 以加深对贸易网络结构的认识, 旨在实现方法创新。

1 研究数据与方法

1.1 研究数据

本文使用贸易数据来自联合国 UNCOMTRADE (<https://www.trademap.org/Index.aspx>)和国际贸易

中心的 Trade Map 数据库(<https://com-trade.un.org/data/>), 主要分为 2 部分: ①2001—2018 年各国(地区)历年的铜贸易总量和贸易总额, ②双边铜贸易量和贸易金额数据。由于 2018 年双边数据的披露存在较多遗漏, 本文选择 2017 年数据构建贸易网络, 覆盖 200 多个国家(地区)之间含铜产品的进出口贸易, 其中为分析方便, 本文将中国数据分为 4 个部分: 中国(未包括港澳台地区数据)、中国香港、中国台湾及中国澳门。由于各国统计口径存在差异, 贸易产品的来源地和目的地所报告的数据并不完全相同, 一些学者采用进口国家(地区)报告的数据^[22,26], 但进口和出口数据质量存在差异的假设并未得到证实^[23]。为更全面地反映全球含铜产品的贸易情况, 本文综合进出口贸易数据, 当同一贸易流的进出口方报告的数据不一致时取两者的平均值。尽管贸易金额数据更完整, 但贸易量更能真实地反映各国资源禀赋和需求量、资源在全球范围的流动, 因此本文以国家(地区)为节点、以贸易量为边权构建有向加权贸易网络, 对于贸易量部分数据缺失的情况, 通过“世界平均价格法”计算的结果近似, 公式如下^[9]:

$$kg_m = \$_m \times \frac{\sum kg \neq 0}{\sum \$, \text{其中 } kg \neq 0} \quad (1)$$

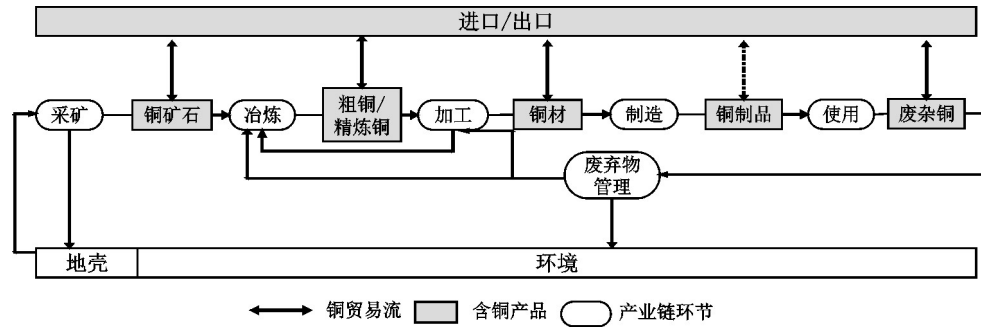
式中, \$表示贸易金额, kg表示贸易量, m 代表不同的国家。

铜的生产加工分为采矿、选矿、冶炼、中间产品加工、最终产品加工和废弃物回收利用等阶段^[27], 主要贸易产品有铜矿石、粗铜、精炼铜、铜材、铜制品、废杂铜等(图 1)。由于铜制品(最终产品)含铜量在 5%~25% 之间^[4], 一般复合其他金属加工制成, 因此本文仅研究铜产业链中含铜量更高的其他 5 大类产品, 依据 HS 编码分类处理 2017 年的双边贸易数据(表 1), 构建得 5 类贸易网络。

1.2 研究方法

1.2.1 主干网络识别

网络研究中常用 TopN 网络代表整体网络的主干结构^[25,28,29], 即保留每个节点联系最紧密的前 N 个节点和相应的边。已有研究的 N 取值不一, 原则是在精简数据、便于分析的同时尽可能地保留更多的网络信息。为确定合适的 N 取值, 本文分别提取了 N=1,2,3,4,5,10 时的 Top 网络, 计算 Top 网络的边数和边权(贸易量)之和占整体网络的比重(表 2)。



基于文献 [24] 绘制; 虚线表示不在本文研究范围内

图 1 铜产业链中的国际贸易流动

Fig.1 The international trade flow along the copper industry chain

表 1 含铜产品分类及 HS 编码

Table 1 The classification of products containing copper and HS codes

大类名称	大类英文名称	HS编码
铜矿石	Copper ores and concentrates	2603
粗铜	Blister copper	7402
精炼铜	Refined copper	7403
铜材	Copper semis	7406, 7407, 7408, 7409, 7410, 7411, 7412, 7413, 7415, 7418, 7419
废杂铜	Copper waste and scrap	7404

总体上, Top1 网络的边数占比较低, 包含的网络结构信息较少, 容易引起“岛屿”现象的误解, 即节点仅与社区内部的节点联系密切, 而与其他节点隔绝^[26]。另一方面, 铜材的 Top1 网络的贸易量占整体网络比重仅 39.10%。因此, 本文以 TopN 网络的边数占比大于 20%、贸易量占比大于 80% 为准, 确定铜矿石、粗铜 Top 网络的 N 取值为 2, 精

炼铜和废杂铜的 N 取值分别为 4 和 3, 铜材贸易网络的 TopN 则取最大值 10。N 取值的不同也从侧面反映了 5 类含铜产品贸易网络存在明显的结构差异, 因此有必要联系铜产业链上下游, 分析各国在各关键环节的产品贸易网络中的地位、与其他国家(地区)的贸易组团关系, 以全面了解各国对铜资源的需求和利用。

1.2.2 社区发现

社区发现是指把网络节点分为若干组团, 组内节点之间联系紧密, 而不同组节点之间的联系相对较弱^[30]。网络的社区发现问题研究通常用模块度 Q 评价网络分解的满意度^[31], Q 的取值范围为 [-1,1], Q 值越接近 1, 表示模块化程度越高, 即网络分解效果越好。对于本文构建的有向加权贸易网络而言, 模块度 Q 计算公式为^[32]:

$$Q = \frac{1}{W} \sum_{ij} \left(w_{ij} - \frac{S_i^{out} S_j^{in}}{W} \right) \delta(C_i, C_j) \quad (2)$$

表 2 铜贸易 Top N 网络占整体网络比重/%

Table 2 The percentage of Top N in the integral network of copper trade/%

贸易网络	指标	Top1	Top2	Top3	Top4	Top5	Top10
铜矿石	边数占比	16.74	26.42	34.85	40.80	46.61	65.28
	边权占比	67.84	80.75	89.32	93.40	95.86	99.51
粗铜	边数占比	16.00	26.01	34.78	41.38	47.27	65.22
	边权占比	88.11	93.05	95.71	97.20	98.80	99.97
精炼铜	边数占比	7.13	12.38	17.27	21.51	25.49	41.27
	边权占比	48.18	66.43	77.31	82.09	86.06	95.23
铜材	边数占比	2.72	5.25	7.66	10.06	12.40	22.86
	边权占比	39.10	54.74	64.41	71.78	77.29	89.04
废杂铜	边数占比	8.19	14.76	20.49	25.82	30.75	48.93
	边权占比	57.13	72.41	81.00	85.66	88.84	95.74

式中, w 是整个网络的贸易量, w_{ij} 为节点 i 、 j 之间的贸易量, S_i^{out} 是节点 i 出口贸易总量, S_j^{in} 是节点 j 进口贸易总量, C_i 、 C_j 表示节点 i 、 j 的社区指数, 当 i 、 j 处于同一个社区时, $\delta(C_i, C_j)$ 取 1, 否则取 0。本文选择应用广泛的、基于模块度优化的 fast unfolding 算法对网络进行模块化解析^[26,29,33,34], 并运用 Gephi 软件对分组结果进行可视化。

2 全球铜贸易发展态势

从贸易金额来看, 21 世纪以来, 全球铜贸易总额波动增长(图 2)。受 2008 年金融危机影响, 含铜产品的贸易额大幅下降, 2010 年和 2011 年出现危机后反弹的高峰。从贸易量看, 铜贸易总量稳定增长, 表明世界经济发展对铜资源需求的持续增长。铜贸易总额和贸易总量发展态势存在偏差的主要原因之一是铜既有商品属性又有金融属性, 大量金融资本进入铜市场, 导致价格剧烈波动、偏离供需基本面^[35]。因此, 相比贸易金额, 本文认为贸易量的数据能更真实地反映国家(地区)之间在铜资源贸易市场上的供给与需求关系。

在 5 类含铜产品中, 2001—2018 年, 铜矿石的贸易量最大, 随后依次是精炼铜、铜材、废杂铜和粗铜。铜矿资源赋存的地域差异使得铜矿石的生产国家(地区)和出口国家(地区)相对固定。2001 年以来, 全球铜矿石贸易的来源地有秘鲁、智利、印度尼西亚、澳大利亚、蒙古等, 这 5 个国家铜矿石的出口量之和超过全球铜矿石贸易总量的 50%, 主要流向了中国、日本、印度、韩国、西班牙等国家(地区)(表 3)。粗铜的贸易总量远远小于铜矿石, 主要从智利、赞比亚、加拿大等铜矿石储量丰富的国家(地区)流向资源供给不足的国家(地区), 而精炼铜贸易市场的供需格局有显著差异。精炼铜的主要出口地可

以分为 2 类, 一是铜矿资源丰富的国家(地区), 包括智利、赞比亚、澳大利亚、俄罗斯等; 另一类是以日本、印度为代表, 国内铜矿资源少但出口大量精炼铜, 这类国家(地区)主要以进口铜矿石作为生产原料、或回收利用废杂铜^[1], 印度的二次资源生产满足了本国 40% 的需求^[22], 日本的再生铜产量比重为 45%^[36]。铜材是全球铜贸易的重要产品, 2001—2018 年, 铜材贸易的主要来源地是德国、中国、中国台湾等工业体系完善、工业化水平较高的地区, 主要流向中国、美国、德国等地, 可见铜材作为产业发展重要的中间产品、零部件, 贸易流动主要发生在工业能力较强或快速发展的国家(地区)之间。废杂铜大部分是最终产品在经过几十年使用后报废产生, 因此较早进入工业化阶段的美国、德国、日本等发达国家产生大量废杂铜, 主要流向中国、德国、比利时等国家(地区)。一方面废杂铜是再生产的重要原料, 铜的回收利用对全球循环经济的发展非常重要; 另一方面, 废杂铜属于危险废弃物之一, 其贸易面临《巴塞尔公约》等的约束, 作为废杂铜贸易第一大目的地的中国, 自 2019 年起开始禁止 7 类废铜进口、限制 6 类废铜进口^[37], 未来废杂铜的贸易格局或将出现较大变化。

3 基于产业链的铜贸易网络拓扑结构

3.1 基于产业链的铜贸易网络拓扑特征

基于精简数据和最大保留网络信息的原则, 本文分别提取铜矿石 Top2、粗铜 Top2、精炼铜 Top4、铜材 Top10、废杂铜 Top3 的主干网络。由表 4 可知, 识别的主干网络较好地保留了整体网络的基础信息和结构信息, 基于主干网络的拓扑指标反映的含铜产品贸易网络的拓扑特征与依据整体网络的拓

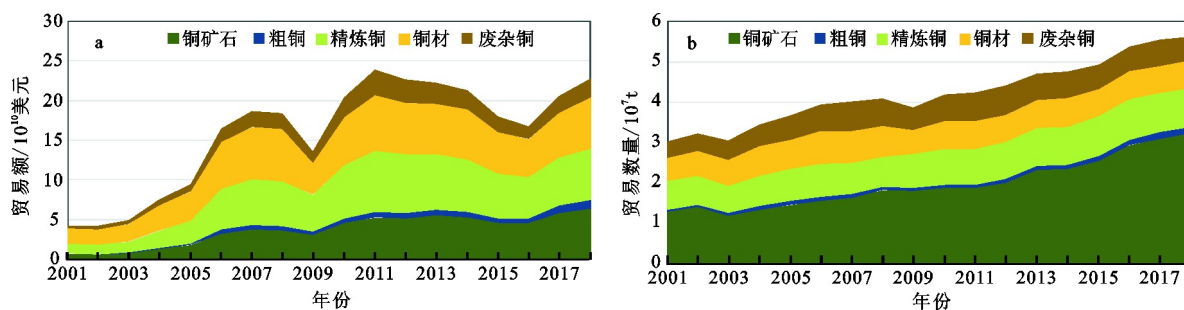


图 2 2001—2018 年含铜产品全球贸易总额 (a) 和贸易总量 (b)

Fig.2 The world trade value (a) and quantities (b) of products containing copper in 2001-2018

表 3 2001—2018 年含铜产品全球贸易的前 10 位来源地和目的地

Table 3 Top 10 source and destination of global trade in products containing copper in 2001-2018

铜矿石		粗铜		精炼铜		铜材		废杂铜	
来源地	目的地	来源地	目的地	来源地	目的地	来源地	目的地	来源地	目的地
秘鲁	中国	智利	中国	智利	中国	德国	中国	美国	中国
智利	日本	保加利亚	比利时	赞比亚	美国	中国	美国	德国	德国
印度尼西亚	印度	赞比亚	美国	日本	德国	中国台湾	德国	日本	比利时
澳大利亚	韩国	加拿大	加拿大	俄罗斯	意大利	美国	意大利	英国	韩国
蒙古	西班牙	西班牙	韩国	澳大利亚	中国台湾	韩国	法国	法国	意大利
巴西	德国	刚果(金)	德国	哈萨克斯坦	韩国	意大利	墨西哥	荷兰	日本
墨西哥	保加利亚	纳米比亚	墨西哥	秘鲁	法国	法国	中国香港	比利时	印度
阿根廷	巴西	芬兰	印度	波兰	土耳其	俄罗斯	英国	意大利	中国香港
哈萨克斯坦	菲律宾	斯洛伐克	澳大利亚	加拿大	泰国	日本	马来西亚	加拿大	荷兰
西班牙	芬兰	比利时	奥地利	印度	马来西亚	中国香港	西班牙	中国香港	中国台湾

注:表中中国指除中国香港、中国台湾和中国澳门外的其他区域。

扑指标所得的结论基本一致。

从节点数、边数和网络密度来看,铜材贸易网络的稠密度大于精炼铜,废杂铜贸易网络再次之,铜矿石和粗铜贸易网络的参与国家(地区)、贸易联系数量最少。一方面与铜材包含的产品类别众多有关;另一方面,铜矿石、粗铜作为矿产资源,受地域分布限制,其贸易联系一般发生在资源富裕的国家(地区)和资源供给不足的国家(地区)之间,主要出口国(地区)和进口国(地区)相对固定。从平均加权重度来看,铜矿石贸易网络的平均加权重度则远远高于其他贸易网络,与上文分析含铜产品的贸易量结构一致。

含铜产品贸易主干网络的平均路径长度在 2.75~5.12 之间,表明通过铜资源的贸易关系连接

2 个国家(地区)的最短路径平均经过 3.5 个国家(地区)左右,小于或接近于相同规模的随机网络的平均路径长度;主干网络的平均集聚系数在 0.04~0.27 之间,远高于相同规模随机网络的理论值。因此,含铜产品贸易网络具有明显的小世界特征,即网络中节点数目多但各点的度远小于节点数目,且任意两个国家之间可通过一条相对短的路径建立铜资源的贸易联系^[38],也表明国际铜资源贸易中国家(地区)之间信息传播能力较强^[20]。此外,平均集聚系数越高,网络越紧密;平均路径长度越小,网络越紧密。对比不同类别含铜产品贸易网络的指标可以发现,铜材、废杂铜、精炼铜的贸易网络紧密程度明显大于铜矿石和粗铜。

3.2 主干网络的组团结构

表 4 含铜产品贸易网络的拓扑指标

Table 4 Topological indicators of copper contained trade networks

贸易网络	节点数	边数	平均加权重度	网络密度	平均集聚系数	平均路径长度
整体网络						
铜矿石	127	723	251426421.1	0.045	0.32	2.61
粗铜	163	969	11456996.2	0.037	0.47	2.41
精炼铜	203	2762	42697261.3	0.067	0.60	2.04
铜材	229	8135	31207498.5	0.156	0.70	1.99
废杂铜	212	2514	32209955.6	0.056	0.66	2.17
主干网络						
铜矿石Top2	127	191	203033280.3	0.012	0.07	2.75
粗铜Top2	163	252	10660428.3	0.010	0.04	3.35
精炼铜Top4	203	594	35048685.4	0.014	0.12	3.63
铜材Top10	229	1860	27787699.4	0.036	0.27	2.90
废杂铜Top3	212	515	26090259.5	0.012	0.14	5.12

基于上文提取的主干网络,通过社区发现算法,本文识别了各贸易网络的组团结构(表 5),并用 Gephi 软件对组团结果进行可视化(图 3),其中节点代表国家(地区),节点大小与该国家(地区)的贸易关系总数成正比,相同颜色的节点同属于一个组团;边代表国家(地区)之间的贸易联系,粗细与贸易量成正比,边的颜色与目标节点一致。总体上,5 类含铜产品贸易网络的模块度在 0.216~0.482 之间,由 4~8 个组团构成,各产品的贸易往来形成了较明显的团体,而具体的组团数量、组团构成、组团内国家(地区)间贸易关系存在明显差异。

根据社区发现算法结果,铜矿石 Top2 贸易网络存在 8 个组团结构(图 3a),其中 4 个组团包含的国家(地区)数量均小于 10 个,分别是以南非和赞比亚为核心的 2 个非洲国家组团、以哈萨克斯坦为核心的前苏联国家组团和新西兰、汤加构成的“孤岛”组团。最大的组团由以中国为核心的 47 个国家(地区)构成,以秘鲁、智利、蒙古、墨西哥等为代表的国家(地区)向中国出口铜矿石,也反映了中国铜矿石进口来源市场的多元化,尽管秘鲁出口的铜矿石占中国进口总量的 30.8%,各进口来源国在中国铜矿石进口所占比重逐渐分散化。此外,该组团还包括以秘鲁为核心的其他铜矿石进口需求国家(地区),例如韩国、印度等,秘鲁是许多国家(地区)的铜矿石进口主要来源地。第二大的组团以荷兰为核心,共 36 个国家(地区),主要包含中东欧、北欧、南欧等地区。当前铜矿石的国际运输以航运为主,因此荷兰的核心地位与其发达的远洋航运业、欧洲最大港口的装卸能力、区位优势有密切关系。尽管荷

兰的铜矿石进出口贸易总量不高,许多国家(地区)与荷兰建立了贸易关系,通过荷兰进出口铜矿石。除荷兰之外,保加利亚是该组团的次要核心,组团内的最大贸易流是西班牙向保加利亚出口 71.7 万 t 铜矿石。粗铜 Top2 贸易网络也分为 8 个组团(图 3b),其中 3 个组团分别以中国、德国、英国为核心,剩余 5 个组团都仅有 2~3 个国家(地区),与其他组团联系较少,相对孤立。最大的组团共 102 个国家(地区),仍然由中国的需求带动,但与铜矿石贸易网络相比,中国的进口来源国从秘鲁、智利、蒙古、墨西哥变成赞比亚(属于第三组团)、智利、刚果(金)等。次核心是美国和荷兰,其中美国是许多国家(地区)的粗铜供应地,而荷兰的进出口贸易关系数量相当,起着贸易中转作用。对比铜矿石和粗铜 2 类贸易网络的组团结构,可以发现组团核心、组团内成员有相似之处也存在不少差异,可能的原因有:①粗铜作为贸易产品,贸易数量远远小于铜矿石,大部分资源丰富的国家(地区)以出口铜矿石为主;②粗铜与铜矿石都是初级产品,面临的基本供需格局相似,很大程度上由矿产资源禀赋差异决定,因此中国、德国、印度等资源进口大国(地区)和智利、赞比亚等资源出口大国(地区)在两类贸易网络的组团中都处于重要位置。

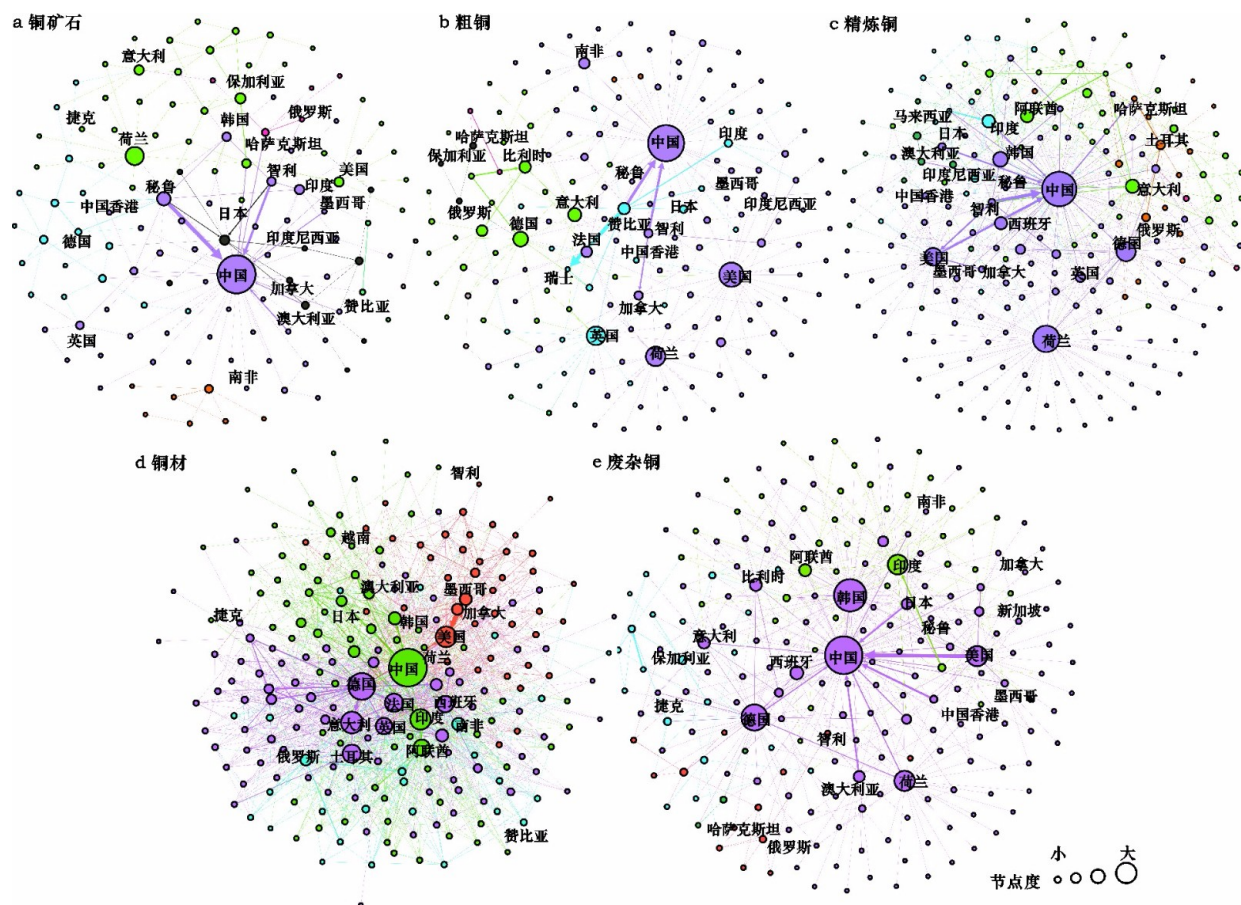
精炼铜 Top4 贸易网络共 6 个组团(图 3c),第一大组团由以中国为核心的 120 个国家(地区)构成,占该网络节点数量的 59%。组团的次核心包括荷兰、德国、美国、韩国,其中荷兰是许多“小国”精炼铜出口的主要目的地,荷兰的航运优势使其在精炼铜的国际贸易中依旧发挥重要的枢纽作用。总体

表 5 含铜产品贸易网络的组团

Table 5 Communities detected in the copper contained trade network

贸易网络	铜矿石Top2	粗铜Top2	精炼铜Top4	铜材Top10	废杂铜Top3
模块度	0.316	0.447	0.258	0.482	0.216
组团数量	8	8	6	4	5
组团核心(组团内节点数量)	中国(47)	中国(102)	中国(120)	德国(86)	中国(135)
	荷兰(36)	德国(28)	意大利(39)	中国(74)	印度(41)
	芬兰(17)	英国(22)	印度(16)	美国(43)	保加利亚(20)
	日本(10)	/(3)	土耳其(15)	南非(26)	波兰(13)
	哈萨克斯坦(7)	/(2)	马来西亚(11)		/(3)
	南非(5)	/(2)	/(2)		
	赞比亚(3)	/(2)			
	/(2)	/(2)			

注: 1. 表中中国指除中国香港、中国台湾和中国澳门外的其他区域; 2. “/”表示该组团内节点数量较少,无明确的组团核心。



节点颜色相同代表属于同一组团; 线段粗细表示节点之间的贸易流量大小, 箭头代表贸易流向;

图中中国指除中国香港、中国台湾和中国澳门外的其他区域

图 3 含铜产品贸易主干网络及组团结构

Fig.3 Top/N trade networks of copper contained and their communities' structure

而言,该组团是围绕着中国对精炼铜的巨大需求产生的贸易关系所形成的团体。中国是全球进口精炼铜数量最多的地区,进口渠道多元分散,包括智利、美国、日本、哈萨克斯坦、印度等国家。铜材 Top10 贸易网络形成了 4 个组团(图 3d),其模块度(0.482)是 5 类含铜产品贸易网络中的最大值,表明团体化效果最明显。铜材贸易网络的组团结构与其他类别贸易网络的最大差异是,第一大组团和第二大组团都围绕着铜材贸易市场上的主要供给方形成,分别以德国和中国为核心。德国是全球最大的铜材出口国,也是世界上 90 多个国家(地区)的第一大铜材进口来源地。中国仅次于德国,主要向韩国、泰国、马来西亚、印度、日本等亚太国家(地区)出口,中国香港在中国进出口铜材中起着重要的中转作用。废杂铜 Top3 贸易网络存在 5 个组团(图 3e),最小的组团由瑞典、芬兰和挪威 3 个北欧国家组成。最大

组团以中国为核心,共 135 个节点,占该贸易网络节点数量的 63.7%,构成了废杂铜贸易的主体。组团包括废杂铜最大出口国——美国,其中超 60% 的废杂铜出口流向中国;德国的废杂铜进出口数量相当,既是废杂铜第二大出口国,也是废杂铜第二大进口国,进出口废杂铜的品位可能存在优劣之分,类似的还有日本,一方面本国产生大量废杂铜需要处理,同时国家具有较高的工业化水平和技术能力,可以将废弃物作为二次资源再生产;中国、韩国是废杂铜净进口地,进口来源主要是欧美发达国家。印度是仅次于中国、德国的第三大废杂铜进口国(地区),但印度是第二大组团核心,主要进口来源地是巴基斯坦、沙特阿拉伯、英国、阿联酋等,与中国的废杂铜进口渠道竞争较小。

综合 5 类含铜产品贸易网络,对比国家(地区)在不同贸易网络中的贸易关系,联系含铜产品在国

家(地区)之间的流动,可得出如下结论。①在基于产业链的铜贸易网络中,贸易关系数量较为显著的国家(地区)基本保持在铜资源领域中工业化水平较高或工业体系较为完善的国家(地区)之间。一方面,铜矿石、粗铜、精炼铜、铜材的生产与消费、进口与出口是一国(地区)工业体系发展程度的体现^[39],同样地,废杂铜的产生反映了一国(地区)进入工业化阶段的时间和工业化水平,废杂铜的循环利用也是技术实力的体现。②一些国家(地区)之间的贸易关系在全产业链的5类含铜产品贸易网络中保持稳定,例如中国与韩国、泰国、柬埔寨在5类贸易网络中都属于同一组团;但大部分国家(地区)之间的贸易关系会随着不同类别的贸易网络出现变化,如经济往来密切的美国、加拿大、墨西哥在粗铜、精炼铜、铜材、废杂铜贸易网络中属于同一组团,但在铜矿石贸易网络中分别属于以荷兰、日本、中国为核心的3个组团,这与国家(地区)在产业链的不同阶段具有的相对优势存在差异有关,进而影响其国际贸易关系。③中国对铜资源的需求巨大,在铜矿石、粗铜、精炼铜、废杂铜贸易网络中,围绕着中国的需求产生的贸易关系形成了第一大组团;在铜材贸易网络中,中国是仅次于德国的第二大出口国,中国及其铜材出口主要目的国构成了第二大组团,体现了中国在含铜产品贸易中的重要地位。④荷兰在5类含铜产品贸易网络中都起着重要的贸易枢纽作用,贸易关系数量众多且进出口相当,可能与荷兰发达的远洋航运业、国际港口区位优势相关,这也意味着荷兰对铜资源贸易渠道的控制能力强。⑤以日本、韩国为代表的发达国家,依靠进口铜矿资源作为生产原料,加工成精炼铜、铜材等用于出口;以美国、德国为典型的欧美发达国家,对铜矿石的依赖进口较弱,但具有较强的工业实力,生产大量精炼铜、铜材可供出口,因此在精炼铜、铜材贸易网络中占有重要地位。⑥智利、秘鲁、赞比亚、刚果(金)、印度尼西亚等资源丰富国家,仅仅在铜矿石、粗铜贸易网络中拥有较多贸易关系,且通常从属于以出口目的国为核心的组团,表明这些资源型国家在产业链的初级阶段占有相对重要的地位。

4 结论与讨论

未来全球矿业竞争将从对资源的争夺拓展至整个产业链^[40],因此将产业链视角引入铜贸易网络的研究具有重要意义。本文在了解全球铜贸易发展

态势的基础上,构建了2017年铜矿石、粗铜、精炼铜、铜材和废杂铜5类含铜产品的全球贸易网络,识别各贸易网络主干结构,并用社区发现方法,对比分析不同类别贸易网络的组团结构,得出以下结论。①2001年以来,全球含铜产品贸易量稳定增长,表明世界经济发展对铜资源需求的持续增长,其中铜矿石贸易量最大,其次是精炼铜,粗铜最小。铜矿石主要从智利、秘鲁、印度尼西亚等资源型国家流向中国、日本、印度等国,精炼铜国际贸易市场的供需格局与铜矿石有显著差异,主要体现在以日本、印度为代表的国家通过进口铜矿石、废杂铜作为生产原料加工成精炼铜并大量出口。铜材和废杂铜贸易的主要来源地是美国、德国等工业化水平较高的国家。②5类含铜产品贸易网络主干结构TopN的N取值不一,表明产业链上各环节产品的贸易网络存在明显的结构差异,其中铜材、废杂铜、精炼铜的贸易网络紧密程度显著大于铜矿石和粗铜,但5类贸易网络都具有明显的小世界特征。③根据社区发现算法结果,5类含铜产品贸易网络的模块度在0.216~0.482之间,由4~8个组团构成,其中铜材贸易网络的组团化效果最优。④贸易关系数量较为显著的基本是在铜资源领域中工业化水平较高或工业体系较完善的国家(地区)。一些国家(地区)在5类含铜产品贸易网络中都属于同一组团,大部分国家(地区)之间的贸易关系在不同产品的贸易网络中存在差异,与各国在产业链的不同阶段具有的相对优势有关。⑤中国在含铜产品贸易中占有重要地位,但主要体现在对铜矿石、粗铜、精炼铜和废杂铜的巨大需求,反映了中国铜资源自给率低、对外依存度大等问题,中国应与同一组团内的国家(地区)保持良好合作关系,降低铜资源的供给风险。此外,当前“一带一路”倡议为中国与世界其他地区开展经贸合作提供了新的平台,将成为新时代中国企业开展海外投资、寻求境外资源的战略机遇期^[41],政府应适当鼓励和支持国内企业“走出去”进行矿业投资,获取境外铜矿资源的控制权和使用权,提高中国铜资源持续供应的保障能力。

基于产业链视角的铜贸易网络研究为其他产品贸易分析提供了新思路。但本文截取了2017年双边贸易数据构建5类含铜产品贸易网络,缺少从时间尺度上探讨产业链上不同类别贸易网络的演变。另一方面,矿产资源常常由少数大型企业垄断,企业行为对贸易格局的影响深远,例如智利劳资纠纷

频发影响铜矿石供应量。与此同时,企业受到各国有关资源政策的约束,如印度尼西亚颁布矿石出口禁令、中国调整废杂铜进口规定。因此下一步研究可以在以国家(地区)为单元的贸易产品流动格局基础上,结合重点企业行为、国家相关政策等分析,深入研究贸易网络的形成原因,更好地把握资源的供需格局以及国家(地区)之间贸易关系的动态变化。

参考文献(References):

- [1] Dicken P. Global Shift: Mapping the changing contours of the world economy[M]. New York: The Guilford Press, 2015.
- [2] International Copper Association. 2017 annual report, global mega trends and key markets for copper[R/OL]. <https://copper-alliance.org/about-ica/annual-reports>, 2019-09-30.
- [3] Liu C H, Liu Q Y, Li J W et al. China's belt and road initiative in support of the resourcing future generations program[J]. *Natural Resources Research*, 2018, 27(2): 257-274.
- [4] Zhang L, Yang J, Cai Z et al. Analysis of copper flows in China from 1975 to 2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 478: 80-89.
- [5] Jiang M H, An H Z, Guan Q et al. Global embodied mineral flow between industrial sectors: A network perspective[J]. *Resources Policy*, 2018, 58: 192-201.
- [6] 钟维琼, 李丹, 代涛. 全球跨区域铁资源物质流动分析[J]. *中国矿业*, 2018, 27(1): 78-82+118. [Zhong Weiqiong, Li Dan, Dai Tao. Analysis of global trans-regional iron resources movement. *China Mining Magazine*, 2018, 27(1): 78-82+118.]
- [7] Graedel T E, Bertram M, Kapur A et al. Exploratory data analysis of the multilevel anthropogenic copper cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(4): 1253-1261.
- [8] Kapur A, Bertram M, Spataro S et al. The contemporary copper cycle of Asia[J]. *J. Mater. Cycles Waste Manag*, 2003, 5(2): 143-156.
- [9] 文博杰, 王欢, 代涛, 等. 2011—2016年中国对外贸易铜物质流分析[J]. *中国矿业*, 2019, 28(9): 25-31. [Wen Bojie, Wang Huan, Dai Tao et al. Analysis of copper material flow in China's foreign trade from 2011 to 2016. *China Mining Magazine*, 2019, 28(9): 25-31.]
- [10] Liu G, Muller D B. Mapping the global journey of anthropogenic aluminum: A trade-linked multilevel material flow analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11873-11881.
- [11] Sun X, Hao H, Zhao F Q et al. Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2017, 124: 50-61.
- [12] 陈银飞. 2000—2009年世界贸易格局的社会网络分析[J]. *国际贸易问题*, 2011(11): 31-42. [Chen Yinfei. Analysis on social network of world trade situation in 2000-2009. *Journal of International Trade*, 2011(11): 31-42.]
- [13] 邹嘉龄, 刘卫东. 2001—2013年中国与一带一路沿线国家贸易网络分析[J]. *地理科学*, 2016, 36(11): 1629-1636. [Zou Jialing, Liu Weidong. Trade network of China and countries along "Belt and Road Initiative" areas from 2001 to 2013. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(11): 1629-1636.]
- [14] 王倩, 宋涛, 梁宜, 等. 东盟与大国贸易联系及其影响因素[J]. *热带地理*, 2017, 37(6): 852-861. [Wang Qian, Song Tao, Liang Yi et al. Trade linkages between ASEAN and great powers and their influencing factors. *Tropical Geography*, 2017, 37(6): 852-861.]
- [15] 王璐, 刘曙光, 段佩利, 等. 丝绸之路经济带沿线国家农产品贸易网络结构特征研究[J]. *经济地理*, 2019, 39(9): 198-206. [Wang Lu, Liu Shuguang, Duan Peili et al. Network structure of agricultural product trade in countries of the Silk Road Economic Belt. *Economic Geography*, 2019, 39(9): 198-206.]
- [16] 杨鑫, 安海忠, 高湘韵. 国际天然气贸易关系网络结构特征研究: 基于复杂网络理论[J]. *资源与产业*, 2012, 14(2): 81-87. [Yang Xin, An Haizhong, Gao Xiangyun. Structural features of global gas trading relationship network based on complex network theory. *Resource & Industries*, 2012, 14(2): 81-87.]
- [17] 郝晓晴, 安海忠, 陈玉蓉, 等. 基于复杂网络的国际铁矿石贸易演变规律研究[J]. *经济地理*, 2013, 33(1): 92-97. [He Xiaoqing, An Haizhong, Chen Yurong et al. Research on evolution of international iron ore trade based on complex network theory. *Economic Geography*, 2013, 33(1): 92-97.]
- [18] 袁红林, 辛娜. 中国高端制造业的全球贸易网络格局及其影响因素分析[J]. *经济地理*, 2019, 39(6): 108-117. [Yuan Honglin, Xin Na. Global trade network pattern and influencing factors of advanced manufacturing in China. *Economic Geography*, 2019, 39(6): 108-117.]
- [19] 张丽佳, 张丽丽, 郝晓晴, 等. 基于复杂网络的国际铜矿石贸易演变规律研究[J]. *中国矿业*, 2015, 24(10): 57-62. [Zhang Lijia, Zhang Lili, He Xiaoqing et al. Research into evolution of international copper ore trade based on complex network theory. *China Mining Magazine*, 2015, 24(10): 57-62.]
- [20] 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 Di, An Haizhong, He Xiaoqing et al. International copper ore trade pattern based on complex network theory. *Economic Geography*, 2016, 36(10): 93-101.]
- [21] Agrawal A, Sahu K K. Problems, prospects and current trends of copper recycling in India: An overview[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(7): 401-416.
- [22] Tong X, Lifset R. International copper flow network: A block model analysis[J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(2): 345-354.
- [23] Tercero Espinoza L A, Soulier M. An examination of copper contained in international trade flows[J]. *Mineral Economics*, 2016, 29(2): 47-56.
- [24] Zhang L, Chen T M, Yang J M et al. Characterizing copper flows in international trade of China, 1975-2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 1238-1246.

- [25] 王云霞, 李国平. 产业链现状研究综述[J]. *工业技术经济*, 2006, 10: 59-63. [Wang Yunxia, Li Guoping. Overview of current industrial chain research. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2006, 10: 59-63.]
- [26] Liu Z G, Wang T, Sonn J W et al. The structure and evolution of trade relations between countries along the Belt and Road[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(9): 1233-1248.
- [27] Graedel T E, Bertram M, Fuse K et al. The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles[J]. *Ecological Economics*, 2002, 42: 9-26.
- [28] 马耀峰, 林志慧, 刘宪锋, 等. 中国主要城市入境旅游网络结构演变分析[J]. *地理科学*, 2014, 34(1): 25-31. [Ma Yaofeng, Lin Zhihui, Liu Xianfeng et al. The evolution of network structure of inbound tourist in major cities of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(1): 25-31.]
- [29] 郑智, 刘卫东, 宋周莺, 等. 一带一路生产网络及中国参与程度[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(7): 951-962. [Zheng Zhi, Liu Weidong, Song Zhouying et al. The Belt and Road production networks and China's participation. *Progress in Geography*, 2019, 38(7): 951-962.]
- [30] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. *Physical Review E*, 2004, 69(2): 1-16.
- [31] 王林, 戴冠中. 复杂网络中的社区发现——理论与应用[J]. *科技导报*, 2005, 23(8): 62-66. [Wang Lin, Dai Guanzhong. Community finding in complex networks——Theory and application. *Science & Technology Review*, 2005, 23(8): 62-66.]
- [32] 汪小帆, 刘亚冰. 复杂网络中的社团结构算法综述[J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(5): 537-543. [Wang Xiaofan, Liu Yabing. Overview of algorithms for detecting community structure in complex networks. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(5): 537-543.]
- [33] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R et al. Fast unfolding of communities in large networks[J/OL]. *Journal of Statistical Mechanics-Theory and Experiment*, 2008, 10. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=15ced1b33d550948398398daac3f9363&site=xueshu_se
- [34] 宋周莺, 车姝韵, 杨宇. 一带一路贸易网络与全球贸易网络的拓扑关系[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1340-1348. [Song Zhouying, Che Shuyun, Yang Yu. Topological relationship between trade network in the Belt and Road Initiative area and global trade network. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1340-1348.]
- [35] 周平, 唐金荣, 施俊法, 等. 铜资源现状与发展态势分析[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(5): 750-756. [Zhou Ping, Tang Jinrong, Shi Junfa et al. Analysis of status and development trend of copper resources. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 2012, 31(5): 750-756.]
- [36] 上海有色网. 世界铜冶炼发展[R/OL]. <https://news.smm.cn/news/100837156>, 2018-09-10. [Shanghai Metals Market. The World history of copper smelting and refining. <https://news.smm.cn/news/100837156>, 2018-09-10.]
- [37] 中华人民共和国生态环境部. 关于调整《进口废物管理目录》的公告[R/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/201812/t20181227_687488.html, 2018-12-21. [Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Announcement on adjusting the catalogue for the management of the import of solid wastes. http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/201812/t20181227_687488.html, 2018-12-21.]
- [38] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性[J]. *地理学报*, 2009, 64(8): 899-910. [Wang Jiaoe, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 899-910.]
- [39] 马吉宇. 基于链路预测模型的国际铜资源潜在贸易关系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [Ma Jiyu. Potential trade relationship of international copper resources based on link prediction method. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.]
- [40] 闫卫东, 孙春强, 崔荣国, 等. 2015年全球矿业展望[J]. *中国矿业*, 2015, 24(1): 1-7. [Yan Weidong, Sun Chunqiang, Cui Rongguo et al. Global mining outlook 2015. *China Mining Magazine*, 2015, 24(1): 1-7.]
- [41] 刘冲昊, 范凤岩, 柳群义. “一带一路”地区铜资源供需格局趋势分析[J]. *矿产保护与利用*, 2018(2): 44-51. [Liu Chonghao, Fan Fengyan, Liu Qunyi. Copper resources supply and consumption patterns and trend in the Belt and Road region. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018(2): 44-51.]

Structure of Global Copper-containing Products Trade Network Based on Industrial Chain Perspective

Ji Qidi^{1,2}, Liu Weidong^{1,2}, Chen Wei^{1,2}, Wang Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: By comparing topology structure of various copper-containing product trade network, this article comprehensively describes the global flow of copper resources and copper trade relations among countries or regions, which is conducive to enhancing the understanding of different countries and regions' comparative advantages in the global value chain and promoting the sustainable use of resources. We build 5 types of global copper-containing product trade networks using bilateral trade data of copper ore, blister, refined copper, copper semis and copper scrap in the year of 2017. The data are collected from UNCOMTRADE and ITC Trade map database. Since the data are too huge to analyse, we first identify the backbone network using TopN method to simplify data and keep as much information as possible at the same time. Top2, Top2, Top3, Top10, and Top4 networks have been identified to represent the integral network of copper ore, blister, refined copper, copper semis and copper scrap respectively. After that, we adopt network analysis methods such as community detection to study the topology structures of each type of global copper-containing product trade networks, and discuss their similarities and differences. The main conclusions are as follows. 1) Since 2001, the global trade quantities of copper-containing products have increased steadily, indicating that the demand for copper resources for world economic development has been increasing continuously. Among them, the trade quantities of copper ore are the largest, followed by refined copper, and blister is the smallest. The pattern of supply and demand of 5 copper-containing products trade is different. 2) Trade relations mainly occur between countries and regions with higher industrialization level or better industrial system in the copper resource field. And there are obvious differences in the topological structure of 5 copper-containing product trade networks. 3) According to the results of community detecting algorithm, these networks can be divided into a range of communities from 4 to 8 with the module degree between 0.216 and 0.482. Most countries and regions belong to different communities in five types of trade networks due to difference in resource endowments and industrialization development stages. 4) China has huge demand for copper resource. In the trade network of copper ore, blister, refined copper and copper scrap, countries related to China's demand formed the largest community, indicating that it occupies an important position in the global copper trade, and reflecting problems of Chinese copper resources such as the low self-sufficiency rate and large dependence on other countries and regions. China should maintain good cooperative relations with the countries and regions within the same community to reduce the supply risk of copper resources.

Key words: trade network; copper industry chain; copper resource; topology structure; trade community