

基于复杂网络的国际铜材贸易格局演化

张欣羽

(江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 基于复杂网络方法构建 2001—2021 年全球铜材贸易网络刻画其演变特征, 运用 QAP(二次分配问题)分析法对影响因素进行探究。研究发现: 整体上, 全球铜材贸易网络规模增大, 呈现出明显小世界特征; 局部上, 德国、中国、美国、意大利是核心枢纽节点, 影响世界铜材贸易的格局; 影响因素上, 国家邻近、经济发展水平差距大会显著促进铜材贸易, 地理和制度距离越大会产生抑制, 经济自由度、人口及是否使用相同语言不会产生显著影响。鉴于此, 应加强与邻近区域合作, 加大技术创新研发投入, 保障中国铜材产业供应链安全、稳定。

关键词: 铜材贸易网络; 格局演变; 复杂网络; QAP(二次分配问题); 影响因素

中图分类号: F742 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)01-0291-06

铜材作为重要战略性矿产资源——铜的加工产品, 广泛应用于电力、电子信息、交通运输和建筑等行业, 对经济发展具有推动作用^[1]。中国是铜材消费和生产大国, 据中国海关总署数据显示, 2021 年中国铜材进口量为 552.87 万 t, 进口贸易额达到 524.53 亿美元, 较上年增长 20.5%, 2021 年中国铜材出口量为 93.25 万 t, 出口贸易额达到 93.56 亿美元, 较上年增长 72.1%。可见, 中国铜材出口虽有较大提升, 但对外依存度非常高。当前世界正面临百年未有之大变局, 国际环境错综复杂^[2-5], 因此, 了解中国在世界铜材贸易网络格局中的定位对保障中国铜材产业供应链安全具有重要意义。近年来, 复杂网络分析方法已经被广泛地应用于矿产、石油、纺织品等行业的贸易网络研究^[6-12]。目前, 国内外学者关于铜贸易的研究主要从以下方面展开: ①从产业链角度分析, 如计启迪等^[13]基于铜产业链视角研究铜贸易网络, 全面刻画铜资源的全球流动以及国家之间的铜贸易关系; ②从单一铜产品角度研究, 如李步界和邢万里^[14]对全球精炼铜贸易特征及演变趋势进行研究, 得出精炼铜贸易网络社团化有着向更加全球化的趋势发展。

综上所述, 现有研究主要从整体贸易网络和铜上游产品贸易网络开展分析, 缺乏对铜产业链中下游铜材贸易网络的格局以及影响因素的探究。因此, 本文采用复杂网络理论分析不同年份的铜材贸易网络结构特征, 再运用 QAP(Quadratic

assignment problem, 二次分配问题)分析方法找出影响全球铜材贸易网络的相关因素, 为中国在世界铜材贸易中实现高质量发展及进一步市场开拓提供参考。

1 构建铜材贸易网络模型

贸易量比贸易金额更能真实反映资源在全球范围的流动^[13], 选取源自联合国 UN Comtrade 数据库 2001—2021 年各国的双边出口铜材贸易量, 研究的商品类别为铜棒(HS 编码: 7407)、铜线(HS 编码: 7408、7413)、铜板(HS 编码: 7409)、铜箔(HS 编码: 7410)和铜管(HS 编码: 7411、7412)5 类铜材产品。复杂网络模型由节点和边共同组成, 以参与铜材贸易的国家为节点, 国家间产生的贸易关系为边, 贸易量为边的权重, 构建如下全球铜材贸易有向加权网络模型(G):

$$G = (V, L, W) \quad (1)$$

式中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点(参与国)的集合; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 为边(贸易关系)的集合; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ 为权重(贸易量)的集合。

2 铜材贸易网络格局演变分析

2.1 网络整体结构特征及演变

(1)整体网络贸易规模增大。从节点数和边数来看(表 1), 参与全球铜材贸易的国家和地区数量一直增长, 在 2019 年达到了顶点, 边数也由 3 939 条增加到 5 591 条, 可见, 全球各国家铜材贸易参与度

收稿日期: 2024-07-28

基金项目: 江西省 2023 年度研究生创新专项资金项目(XY2023-S043)

作者简介: 张欣羽(2000—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 研究方向为管理科学与工程。

很高。而在 2019 年之后,由于受到全球疫情影响,各国之间的贸易关系也受到一定冲击,节点数和边数开始出现小幅度下降。

(2)整体网络贸易联系紧密。从网络平均度和网络密度来看(表 1),平均度和网络密度的变化趋势大致相同,整体呈现稳步上升趋势。平均度由 17.429 增长到了 23.791,网络密度由 0.077 增长到了 0.103,说明全球铜材贸易各参与国之间的联系变得愈加紧密。

(3)整体网络呈现小世界特征。从平均聚类系数和平均路径长度来看(表 1),二者变化呈现相反趋势。平均路径长度介于 2.008~2.183,表明通过铜材贸易关系连接 2 个国家的最短路径平均经过 2 个国家左右,全球铜材贸易网络具有典型的小世界特征。

表 1 网络整体特征指标

贸易年份	节点数	边数	平均度	网络密度	平均聚类系数	平均路径长度
2001	226	3 939	17.429	0.077	0.603	2.105
2002	228	4 045	17.741	0.078	0.590	2.107
2003	228	4 102	17.991	0.079	0.615	2.113
2004	227	4 225	18.612	0.082	0.624	2.148
2005	229	4 377	19.114	0.084	0.633	2.183
2006	229	4 617	20.162	0.088	0.644	2.110
2007	230	4 812	20.922	0.091	0.629	2.116
2008	229	4 876	21.293	0.093	0.642	2.065
2009	232	4 960	21.379	0.093	0.662	2.077
2010	231	4 971	21.519	0.094	0.623	2.088
2011	230	5 071	22.048	0.096	0.638	2.118
2012	230	5 061	22.004	0.096	0.656	2.069
2013	233	5 246	22.515	0.097	0.650	2.100
2014	232	5 209	22.453	0.097	0.654	2.068
2015	232	5 311	22.892	0.099	0.651	2.077
2016	233	5 285	22.682	0.098	0.664	2.073
2017	233	5 418	23.253	0.100	0.646	2.114
2018	232	5 506	23.690	0.103	0.647	2.091
2019	235	5 591	23.791	0.102	0.641	2.019
2020	234	5 327	22.765	0.098	0.631	2.065
2021	231	5 322	23.039	0.100	0.670	2.008

2.2 网络个体结构特征及演变

出于篇幅限制,本文选取 2001 年、2006 年、2011 年、2016 年、2021 年的铜材贸易网络进行比较。

加权重度考虑了贸易量的权重,反映节点在网络中的地位。表 2 显示,德国一直位居第 1,但在 2021 年中国取代德国成为最大铜材贸易国。同时,马来

表 2 网络个体特征指标排名

年份	特征	排名
2001 年	加权重度	德国、法国、美国、意大利、中国、比利时、西班牙、韩国、英国、日本
	接近中心性	德国、意大利、美国、英国、法国、荷兰、瑞典、中国、比利时、西班牙
	中介中心性	美国、德国、英国、南非、法国、意大利、印度、澳大利亚、西班牙、阿联酋
2006 年	加权重度	德国、中国、美国、马来西亚、法国、意大利、日本、韩国、俄罗斯、西班牙
	接近中心性	德国、中国、美国、英国、西班牙、意大利、法国、比利时、瑞典、印度
	中介中心性	美国、德国、中国、法国、英国、西班牙、意大利、南非、荷兰、加拿大
2011 年	加权重度	德国、中国、美国、墨西哥、意大利、法国、韩国、俄罗斯、比利时、日本
	接近中心性	中国、德国、比利时、美国、瑞典、意大利、英国、西班牙、印度、法国
	中介中心性	美国、中国、德国、西班牙、英国、印度、法国、南非、意大利、荷兰
2016 年	加权重度	德国、中国、美国、意大利、法国、韩国、马来西亚、波兰、西班牙、日本
	接近中心性	中国、德国、意大利、西班牙、美国、荷兰、法国、比利时、印度、英国
	中介中心性	美国、德国、中国、法国、西班牙、南非、意大利、英国、阿联酋、荷兰
2021 年	加权重度	中国、德国、美国、意大利、韩国、泰国、法国、波兰、日本、马来西亚
	接近中心性	中国、德国、荷兰、法国、意大利、美国、西班牙、印度、比利时、阿联酋
	中介中心性	中国、美国、德国、阿联酋、南非、西班牙、法国、意大利、荷兰、奥地利

西亚、泰国等东亚国家取代英国、西班牙、比利时等欧洲国家成为主要铜材贸易国,铜材贸易开始由欧洲向东亚国家转移。

接近中心性反映节点在网络的独立性。德国、中国、美国、意大利、西班牙、比利时 6 个国家一直居于前 10,说明这些国家在铜材贸易网络中是主导国家,独立性较高不容易被别国控制。

中介中心性反映节点对网络的控制力。从表 2 中可以看出,美国在 2016 年前一直位居首位,作为世界第一大经济体,对网络有着很强控制力,但中国加入世贸后,2006 年开始排名直线上升,在 2021 年超越了美国跃居第 1,作为消费大国,中国成为很多铜材出口国的目的地及中转中心。

2.3 网络的组团结构特征及演变

使用 Gephi 软件识别 2001 年、2011 年、2021 年的全球铜材贸易网络的组团分布特征(图 1)。图中,节点表示国家,节点大小与加权重度成正比,边表示国家间的贸易关系,边的粗细与节点之间的贸易量成正比。

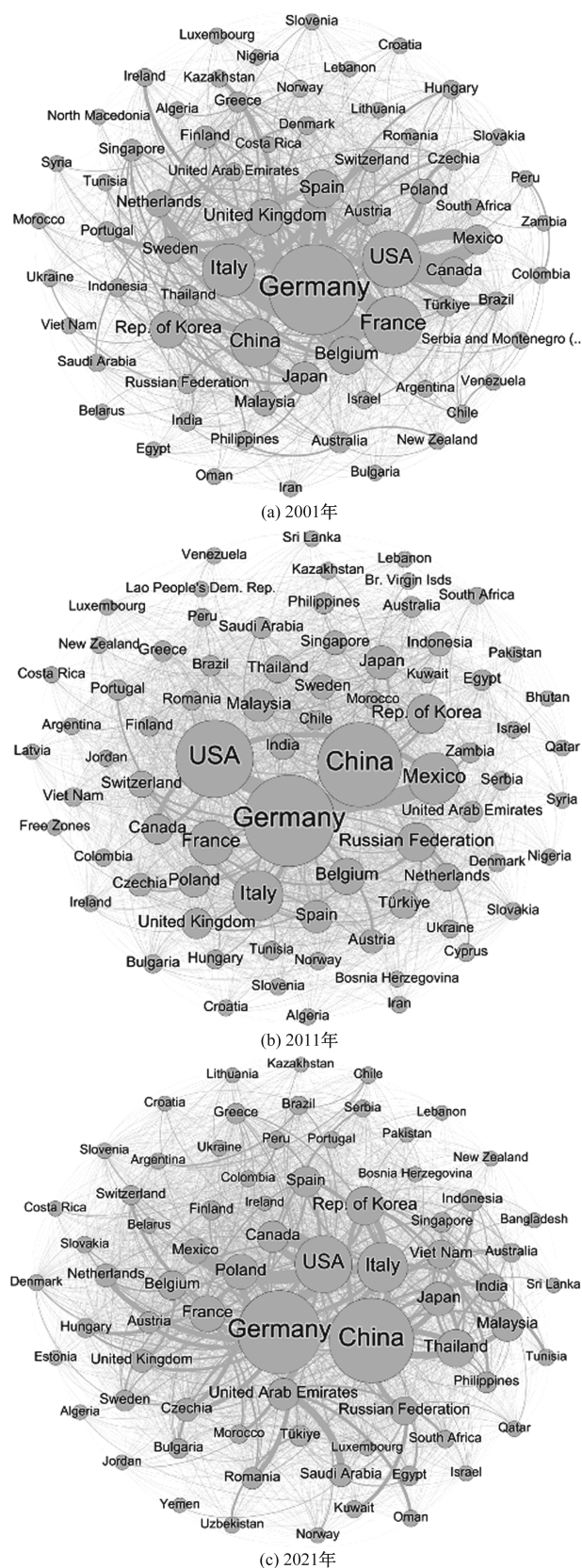


图1 2001年、2011年、2021年铜材贸易网络及组团结构

(1)整体上,全球铜材贸易网络全球化明显,组团分化程度降低。由2001年的8个组团减少

到7个组团,再减少到4个组团,可以明显发现组团数减少,组团内成员增多,说明全球铜材网络趋向于聚拢,小团体现象减少,整体贸易紧密。进一步分析可以发现,单个组团的辐射范围不断扩大,且每个组团内的成员国彼此邻近,贸易往来密切,全球铜材贸易组团分化具有地理邻近性。

(2)区域方面,欧非组团保持相对稳定,始终以德国为核心,组团成员数由80个增加到83个,是第一大铜材贸易组团。南、北美洲组团整合为以美国为核心,加拿大为次核心的美洲社团,地理邻近作用凸显。东亚、南亚、东南亚和大洋洲组团分化并重组,演化为横跨欧、亚、非、美、大洋洲的跨洲系组团。中国、韩国、日本是重要的铜材进口国和铜材出口国,以此为核心的亚洲组团是第二大铜材贸易组团。

(3)个体国家上,德国在欧非组团内保持稳定核心位置。德国是主要铜材进口国也是主要铜材出口国,作为老牌发达工业国家,其有着完善的加工技术,在铜材贸易中占据重要位置。中国在组团演变中由次核心变为核心,地位不断提高,目前,中国已超越德国在铜材市场的第一地位。阿联酋地位不断上升,超越俄罗斯成为组团核心,其首都迪拜有着中东地区最重要的海上贸易港口,凭借其地理以及海上航运优势,与南非、俄罗斯等密切开展贸易投资和交往,逐渐成为组团的中心。

3 铜材贸易网络影响因素分析

3.1 模型设定与变量选择

以引力模型^[15]为基础,考虑数据可得性,选取7个指标来探讨相关因素对铜材贸易网络构建的影响。①地理距离,选取CEPII(法国国际经济研究中心)数据库中的两国是否相邻和两国首都间地理距离来探究对铜材贸易的影响,若两国相邻为1,否则为0;②经济因素,通常认为经济规模差异越小的国家之间越容易产生贸易往来,使用世界银行数据库中的GDP差值绝对值及美国传统基金会的经济自由度来表示经济发展水平差异。③制度距离,参考种照辉和覃成林^[16]的做法,选取全球政治治理指标数据库(WGI)中的全球治理指数构建制度距离;④资源因素,一般人口越多的国家越容易发生贸易进出口往来,选取世界银行数据库中的人口规模差值进行衡量;⑤文化因素,各国之间的文化差异影响着贸易往来,选取CEPII数据库中的两国是否具有相同的官方语言进行衡量,若有取值为1,否则为0。

基于以上变量选取分析,本文设定模型如下:

$$W = f(\text{BOR}, \text{DIS}, \text{GDP}, \text{INS}, \text{ECO}, \text{POP}, \text{LAN}) \quad (2)$$

式中: W 为2021年各国铜材贸易量矩阵; BOR 为是否相邻矩阵; DIS 为两国首都间地理距离矩阵; GDP 为两国间经济差值矩阵; INS 为制度距离矩阵; ECO 为经济自由度差值矩阵; POP 为人口差值矩阵; LAN 为两国间是否使用共同语言矩阵。

3.2 QAP 相关分析

通过 Ucinet 软件对 2021 年铜材贸易矩阵和其他影响因素变量矩阵进行 5 000 次随机置换后得出的 QAP 相关结果见表 3。从表 3 中可知,国家间是否相邻、地理距离、经济差异、制度距离、经济自由度和人口规模差异均显著地影响了世界铜材贸易网络的建立,两国间的文化差异对贸易网络的形成造成一定影响,但并不显著。因此,在后续回归分析中剔除语言文化差异矩阵这一影响因素。

3.3 QAP 回归分析

采用逐步回归法对被解释变量铜材贸易矩阵 W 与解释变量矩阵 BOR 、 DIS 、 GDP 、 INS 、 ECO 、 POP 进行 QAP 回归分析,表 4 中的结果显示:是否相邻矩阵(BOR) 在模型 I ~ 模型 VI 中均通过了 1% 的显著性水平检验,且与贸易网络形成呈正相关关系,

这表明两国家间邻近会促进彼此之间的贸易往来;地理距离矩阵(DIS) 模型 II ~ 模型 VI 中均通过了 1% 的显著性水平检验,对贸易网络呈负向影响,说明两国之间地理距离越小就越容易加强彼此间的贸易联系;经济发展水平差值矩阵(GDP) 在 1% 水平下对贸易网络影响显著为正,说明国家间经济发展差距越大越容易增加贸易强度,这与所预计的情况相反。可能的原因是国家间的经济水平差距越大时,相关资源越容易掌握在某些“大国”手上,而“小国”需求这种资源时只能依赖从“大国”中进口,差距的越大,“小国”与“大国”产生的贸易强度更大;制度距离矩阵(INS) 对贸易网络建立影响显著为负,说明国家间的制度差异越小更有利于国家间发生贸易关系。因此,在铜材贸易中要提高对国家制度因素的关注,制度实行相近的国家往往容易产生贸易关联;经济自由度差值矩阵(ECO) 对铜材贸易矩阵的影响未通过显著性检验,这说明经济自由度并不是影响铜材贸易网络的主要因素;人口差值矩阵(POP) 对世界铜材贸易未产生显著影响,这一结果与预期相反。可能的原因是,结合目前铜材行业发展来看,并非是劳动力越多生产效率、质量就越高,这也从侧面反映了国家要提升产业不能仅靠劳动资源,更多的要关注如何提升其内核竞争力。

表 3 QAP 相关性结果

变量	实际相关系数	显著性水平	平均值	标准差	最小值	最大值	$P \geq 0$	$P \leq 0$
BOR	0.175	0.000***	-0.000	0.007	-0.009	0.052	0.000	1.000
DIS	-0.077	0.000***	0.000	0.013	-0.042	0.048	1.000	0.000
GDP	0.132	0.000***	-0.001	0.018	-0.019	0.127	0.000	1.000
INS	-0.032	0.002***	-0.000	0.012	-0.040	0.049	1.000	0.000
ECO	-0.026	0.010***	0.000	0.013	-0.035	0.062	0.990	0.001
POP	0.090	0.003***	-0.000	0.019	-0.020	0.162	0.002	0.998
LAN	0.008	0.231	0.000	0.012	-0.026	0.053	0.231	0.770

注:***代表通过 1% 显著性检验。

表 4 QAP 回归结果

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
BOR	0.175***	0.166***	0.161***	0.159***	0.159***	0.159***
DIS		-0.043***	-0.049***	-0.049***	-0.049***	-0.049***
GDP			0.129***	0.130***	0.130***	0.122**
INS				-0.024***	-0.021**	-0.020*
ECO					-0.005	-0.004
POP						0.015
R^2	0.031	0.032	0.049	0.050	0.050	0.050
adj. R^2	0.031	0.032	0.049	0.050	0.050	0.050
样本数	27 060	27 060	27 060	27 060	27 060	27 060

注:系数为标准化后的数据;*、**、***分别代表通过 10%、5%、1% 显著性检验。

4 结论与建议

4.1 结论

(1)从整体上看,全球铜材贸易网络规模增大,贸易联系日渐紧密,整体网络呈现明显的小世界特征。整体拓扑特征指标大体上呈上升趋势,平均路径长度降低,意味着全球铜材贸易距离缩短,最短路径平均经过2个国家即可建立铜材贸易关系,各贸易国集聚性增强。

(2)从个体上看,全球铜材资源由少数出口大国德国、中国、美国、意大利掌握并主导,铜材贸易开始由欧洲国家向东亚国家转移。阿拉伯联合酋长国、南非、荷兰凭借其发达航运业及地理位置优势上升为铜材贸易中转站。

(3)从组团分化上看,全球铜材贸易网络组团演变全球化明显,呈现集中辐射连片现象。2001年分散的8个组团经不断分化、重组后,演变为2021年聚集的4个组团,可以看出组团分化具有地域邻近性。

(4)从影响因素看,国家邻近、经济发展水平差异越大能够显著地增强各贸易国之间的铜材贸易强度,地理距离和制度距离差距越大则会显著抑制,经济自由度差值、人口差值及两国间是否使用相同官方语言不会对全球铜材贸易网络造成显著影响。

4.2 建议

(1)加强邻近区域合作,充当好世界铜材贸易的“桥梁”。国家邻近、地理距离越小会增强贸易联系,目前,“一带一路”合作达成、《区域全面经济伙伴关系协定》等协议签订带来的贸易便利加强了我国对邻近国家越南、老挝、泰国等的铜材出口,要持续推进此类区域贸易合作协定的签订,缩减运输距离带来的贸易成本。中国是世界铜材贸易的最大“桥梁”,要充分发挥好其在网络中的核心作用,带动发展较弱国家共同繁荣,形成良性贸易局面。

(2)保持开放、独立自主的贸易态度,减少外部依赖,拓宽铜材贸易市场。较大差距的经济发展水平能够促进提高铜材贸易强度,利用好中国作为世界第二大经济体的“大国”地位,持续保持对外开放,吸引他国与中国建立更紧密的铜材贸易联系,尤其是与中国经济发展差距较大的国家,拓宽欧洲、非洲、美洲市场。抓好国内国际“两个市场”和国内国外“两种资源”,推动完善经济结构调整和资源优化合理配置,促进中国铜材贸易形成“国内国外双循环”新发展格局。

(3)加大技术创新研发投入,驱动铜材高精端

发展,强化中国铜材产业供应链韧性。中国铜材上游市场由铜矿石资源丰富的南美国家智利、秘鲁主导,铜矿资源是铜材的主要成本,中国应与之相关国家建立稳固的贸易联系,鼓励中国企业“走出去”获得铜资源;铜材下游市场如电力、建筑五金等前景广阔,中国可与铜材加工业发达国家德国、美国建立贸易联系的同时学习其先进技术,加大技术研发投入,提升自主创新能力,掌握铜材加工关键技术,实现中国铜材高精端化发展。通过上下游协同作用,以此提高中国铜材产业供应链韧性,降低中国应对风险时所受的损失。

(4)完善市场体系和服务,加强环保和铜材产业可持续发展。国家应当建立健全铜材市场体系,完善市场规则和交易机制,提高市场透明度和公平性,同时,还应加强市场信息服务,及时发布行业动态、价格走势等信息,为企业提供决策支持。此外,应加强与国际环保组织的合作与交流,推广绿色生产和循环经济模式,提高资源利用效率,推动铜材行业的可持续发展。

参考文献

- [1] LI Y, AN H Z, GAO X Y, et al. The influence of copper trade relation structure on copper price: from the perspective of industrial chain[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2023, 192: 106933.
- [2] LI Y, CHEN B, LI C, et al. Energy perspective of Sino-US trade imbalance in global supply chains[J]. Energy Economics, 2020, 92: 104959.
- [3] LIU L J, CREUTZIG F, YAO Y F, et al. Environmental and economic impacts of trade barriers: the example of China-US trade friction[J]. Resource and Energy Economics, 2020, 59: 101144.
- [4] KANG X, WANG M, CHEN L, et al. Supply risk propagation of global copper industry chain based on multi-layer complex network[J]. Resources Policy, 2023, 85: 103797.
- [5] LI B, LI H, REN S, et al. Commodity supply risk assessment of China's copper industrial chain: the perspective of trade network[J]. Resources Policy, 2023, 81: 103297.
- [6] 夏启繁, 杜德斌. 21世纪海上丝绸之路能源贸易结构及与中国的贸易关系演变[J]. 地理研究, 2022, 41(7): 1797-1813.
- [7] 于焜, 马代鹏, 王贤梅. 国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J]. 资源科学, 2022, 44(10): 2006-2021.
- [8] 杨曼羚, 谭丹. 亚太14国机电产品贸易网络格局演变及特征分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(4): 1-7.
- [9] 顾伟男, 范信言, 任亚文, 等. 全球半导体贸易网络结构演

- 化及影响因素[J]. 地理研究, 2024, 43(8): 2194-2214.
- [10] 李静远, 周娜, 胡珮琪, 等. 全球铬矿贸易网络格局演化及竞争力分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 48-58.
- [11] 王晓卓. “一带一路”共建国家纺织品贸易的社会网络分析[J]. 世界地理研究, 2024, 33(5): 18-30.
- [12] 熊彬, 林诗鸿. 数字贸易网络结构及影响因素: 基于“一带一路”沿线国家(地区)双边贸易数据的研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(2): 298-305.
- [13] 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.
- [14] 李步界, 邢万里. 基于复杂网络理论的全局精炼铜贸易特征分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 57-64.
- [15] PÖYHÖNEN P. A tentative model for the volume of trade between countries [J]. *Weltwirtschaftliches archiv*, 1963; 93-100.
- [16] 种照辉, 覃成林. “一带一路”贸易网络结构及其影响因素: 基于网络分析方法的研究[J]. 国际经贸探索, 2017, 33(5): 16-28.

Evolution of Global Copper Trade Pattern Based on Complex Network

ZHANG Xinyu

(School of Economics and Management, Jiangxi University of Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Based on the complex network method to build the 2001—2021 global copper trade network to describe its evolution characteristics, QAP(quadratic assignment problem) analysis was used to explore the impact of factors. It is found that the global copper trade network has a small-world character, and in part, Germany, China, the United States and Italy are the core nodes, in terms of influencing factors, the proximity of countries and the gap of economic development level will promote the copper trade significantly, and the larger the geographical and institutional distance will restrain the copper trade, the index of economic freedom, population and use of the same language will not have a significant impact. In view of this, it is suggested to strengthen cooperation with neighboring regions, increase R&D investment in technological innovation, and ensure the security and stability of China's copper supply chain.

Keywords: copper trade network; pattern evolution; complex network; QAP(quadratic assignment problem); influencing factors