

“一带一路”背景下中欧港口航运网络的演化特征

郭建科, 侯雅洁, 何瑶

(教育部人文社科重点研究基地, 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029)

摘要:中国与欧洲位于欧亚大陆的东西两端, 中欧的贸易畅通是“一带一路”发展的重要内容。当前, 中欧经贸联系仍主要通过海运完成, 中欧港口航运网络的连通是贸易畅通的保障, 因此, 研究中欧港口航运网络的发展演变对于认识和保障中欧贸易的畅通具有重要意义。依据近20 a的3个时间断面(1995、2005、2015年)航运数据, 构建中国与欧洲各港口航线联系网络, 并通过刻画港口航运网络的复杂性特征, 揭示不同港口节点可达性变化的空间分异, 进而从中转港体系、网络组织结构两方面探讨中欧航运网络的演化特征。研究表明: ① 1995年以来, 中欧航线联系的港口节点显著增加, 网络覆盖范围明显扩大。2005年和2015年网络均表现出明显的小世界特征和无标度特性; 不同港口航线联系的广度、深度和可达性变化差异明显, 其中84%的港口可达性增强, 地中海和阿拉伯海沿岸少数港口可达性减小。② 中欧航运网络的中转港体系由“V”型转变为“U”型, 核心中转港出现分化、中转节点逐渐体系化, 中转路径趋于多元化, 网络稳定性增强。③ 中欧航运网络的轴—辐组织结构不断优化, 网络运行效率明显提升, 航线联系更加多元化、复杂化。中欧港口航运网络的轴—辐空间结构经历了“三角型”“均衡哑铃型”和“非均衡哑铃型”3个阶段, 最终形成以上海港和鹿特丹港为主枢纽的多层次轴—辐空间组织结构。

关键词:“一带一路”; 中欧; 复杂网络; 空间联系; 轴—辐系统

2015年3月, 国家多部委联合发布《推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动》, 愿景指出, “一带一路”贯穿欧亚非三大洲, 连接着活跃的东亚经济圈和发达的欧洲经济圈, 其中重点方向是从中国沿海港口出发, 经过南海到印度洋最终延伸至欧洲。因此, 中国与欧洲国家的经贸联系是“一带一路”倡议的重要组成部分。中国与欧盟作为欧亚大陆的东西两端, 一直保持着长期稳定的贸易伙伴关系, 而海运作为国际贸易的主要运输形式^[1], 其发展对世界经济贸易的联系也至关重要。当前, 中欧经贸联系仍主要通过海运完成, 港口航运网络是其主要载体, 因此, 研究中欧港口航运网络的发展演变对于认识和提升中欧经贸联系的支撑能力具有重要意义。

全球海运的发展演变一直由国际贸易的分工组织和航运技术的变革引领^[2], 20世纪50年代集装箱运输迅速发展, 革新了运输体系和货源组织形式^[3], 极大地提高了海运效率, 有效促进了全球贸易的发展, 也为随后国际航运网络和全球供应链的形成提供了支撑, 航运的发展也逐渐成为地理学、管理学和交通运输规划学等领域研究的重点。研究之初, 学者关于港口航运网络的研究一方面是以港口为研究单元, 研究港口在参与航运过程中的发展与影响机理, 包括港口的竞争力^[4]、区域内港口间的组织联系^[5]以及港口体系的形成演化机理^[6]。此类研究多以港口吞吐量等港口基本属性为评价指标, 且多运用如赫希曼—赫芬达尔指数^[7]、位序规模法则^[8]等方法, 关注单一港口或港口群的变化发展。

收稿日期: 2019-03-18; 修订日期: 2019-12-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871112); 教育部人文社科基地重大项目(18JJD90005); 辽宁省社科联重点项目(2020slkjzd-003)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41871112; Major Projects of Humanities and Social Science Research Base of Ministry of Education, No. 18JJD90005; Key Projects of Liaoning Federation of Social Sciences, No. 2020slkjzd-003.]

第一作者简介: 郭建科(1980—), 男, 山西长治人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交通物流与港口空间组织、海洋经济地理研究。E-mail: gjianke98@126.com

引用格式: 郭建科, 侯雅洁, 何瑶. “一带一路”背景下中欧港口航运网络的演化特征[J]. 地理科学进展, 2020, 39(5): 716-726. [Guo Jianke, Hou Yajie, He Yao. Characteristics of change of the China-Europe port shipping network under the Belt and Road Initiative. Progress in Geography, 2020, 39(5): 716-726.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.05.002

1981年,国外学者Hayuth^[9]首次从海向联系的角度划分了港口体系的演化阶段,自此港口的海向联系特性得到了学者们的关注。逐渐有一些学者运用传统方法研究港口间的航线组织及其优化布局、航运网络的构建模型。Liu等^[10]考虑港口需求的内陆性,提出了全球运输网络设计的框架,并验证了其有效性;韩增林等^[11]提出了东北集装箱港口及中转站、运输通道的优化布局;Fremont^[12]以马士基航运公司的全球航运网络为例,探究点对点与轴—辐2种航运模式的作用关系;Notteboom^[13]、Rimmer^[14]分别以欧洲和亚太地区为研究区域,探究了集装箱码头运营商发展战略的转移对区域港口和航线联系的影响;王成金^[15]分析了世界航运企业的联盟重组,并考察了企业演变对航运网络及港口体系的影响。

随着“流空间”及复杂性科学的兴起与发展,港口间的航运联系逐渐建立在“流”的基础上,形成以港口为节点、港口间的航线联系为边的航运网络。王成金等^[16]较早运用港口间的O-D流进行全球航运网络的研究。随后航运网络的研究主要依托大数据、复杂系统方法,研究不断深入。Deng等^[17]、Kaluzs等^[18]基于复杂网络理论构建了全球和区域集装箱航运网络,证明航运网络具有“小世界”效应和“无标度特性”;Ducruet等^[19]发现全球航运网络具有鲁棒性,并通过中心性指标分析了港口在全球网络中的相对位置;Guo等^[20]研究了中日韩航运网络的拓扑特征,并发现中日韩航运网络具有一定的鲁棒性;王列辉等^[21]结合海峡两岸通航政策的变化重点分析了海峡两岸航运结构的演化特征;李振福等^[22]通过中心性等节点特征指标分析了亚洲集装箱港口在网络中的地位。陈芙蓉等^[23]重点分析了中国与东南亚的航运联系,明确了网络拓扑结构特征;王成等^[24]分析了“21世纪海上丝绸之路”航运网络的整体结构特征,并识别了沿线的关键节点,对比了港口中心性地位和航运能力的差异。学者针对航运网络的相关研究主要集中在网络拓扑结构特征及港口在网络中的重要性及地位上。可见,对网络整体结构特性及其与经济地理现象结合的探究相对较少,因此,本文基于中欧港口间的航线联系数据,运用复杂网络分析方法对中国与欧洲的港口航运网络联系的空间组织结构及其相关经济地理意义进行深入的分析与讨论,试图从航运网络的角度明确中欧航运经济联系的发展演变过程,为中欧经贸联系的进一步发展提供参考。

总体来看,中欧航运网络的研究不同于以往全球或国家内部航运网络的研究,是在全球航运网络的背景下,将中国与欧洲的航运联系提炼出来进行深入分析,这对明确中欧经贸联系的支撑能力、提高货运效率、有效进行配置具有重要意义。同时在“一带一路”倡议不断推进发展的过程中,有效识别中欧航运网络的重要节点与运输组织结构对中国对外贸易的持续健康发展具有积极意义,也能够促进倡议的进一步发展。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文数据选取1995、2005、2015年《中国航务周刊》的中国至世界各地船期表,构建中国至世界各地的船期信息数据库,从中筛选整理出中国至欧洲的船期信息(包含中转港),考虑到中欧航线为远洋航线,航行周期较长,班次统计以月为单位;同时为确保数据的稳定性,选取一年中班次较为稳定的6月为研究期,构建中欧航运联系船期数据库。文章将数据库中各到离港及沿途港口视作网络中的节点,节点对之间的联系为边,并对数据中同一港口的不同港区进行了合并,形成“一市一港”的对应关系,如:将盐田、蛇口、赤湾、大铲湾合并为深圳,并根据船期表到离港数据的统计原则,将地理位置分散的港口节点整理连接成完整的航线。

1.2 研究方法

本文运用复杂网络分析方法,建立节点间联系的无权 and 加权邻接矩阵,采用Matlab、Gephi计算网络各特征值,并利用ArcGIS和Gephi对航运网络的空间分布格局和组织模式进行可视化。选取复杂网络相关评价指标^[25-26]如表1。

2 中欧航运网络整体及港口节点的特征演变

2.1 网络整体覆盖范围不断扩大

总体上,中欧航运网络覆盖国家不断增多,覆盖港口数量不断增长,航线联系密度不断提升,如表2。具体来看,1995—2015年中欧航运网络覆盖国家由13个增长为33个,覆盖港口数量由23个增长为75个,其中中国港口由6个增加到11个,欧洲港口由14个增加到43个,途经的东南亚与非洲北

表1 常用复杂网络评价指标公式及含义

Tab.1 Formulas and meanings of commonly used complex network evaluation indicators

指标	公式	数学含义	地理意义
度	$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}$	节点 v_i 的度 k_i 表示该节点连接的边数; 式中, i 与 j 指网络中港口节点, N 指网络中所有的节点, a_{ij} 指港口节点间的航线数量	反映港口节点在网络中联系的广度
单位权	$U_i = S_i / k_i$	节点 v_i 的点权 S_i 表示与它相连边的权重之和; 单位权表示节点连接的平均权重, 表示节点 v_i 的点权 S_i 与其节点度 k_i 的比值	反映港口节点在网络中联系的深度
平均路径长度	$L = \frac{1}{C_N^2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} d_{ij}$	网络中 2 个节点 v_i 和 v_j 之间的距离 d_{ij} 为连接这 2 个节点的最短路径上的边数; C_N^2 是排列组合, 表示在 N 个中选 2 个的所以组合个数; 平均路径长度表示任意 2 个节点之间距离的平均值	反映网络整体的连通性
聚类系数	$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$	节点 v_i 的 k_i 个邻居节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能的边数 C_k^2 之比就是节点 v_i 的聚类系数 C_i ; 网络的聚类系数 C 就是所有节点 v_i 的聚类系数 C_i 的平均值	反映港口节点与相邻港口联系的紧密性和网路整体节点间联系的紧密性
接近度中心性	$Cc(v_i) = (N-1) / \sum_{j=1, j \neq i}^N d_{ij}$	指节点 v_i 到其他所有节点最短距离之和的倒数与其他节点数的乘积; d_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的最短路径长度	反映港口节点在网络的重要性 and 可达性

表2 航运网络覆盖范围演化

Tab.2 Change of shipping network coverage

指标	1995年	2005年	2015年
覆盖国家数量/个	13	27	33
覆盖港口数量/个	23	59	75
覆盖航线数量/(班/月)	29	428	890

部港口数量也不断变化。随着“21世纪海上丝绸之路”的不断发展,中国与欧洲各国的航运贸易联系不断深化,覆盖范围不断扩大。中国通往欧洲的航线班次也不断增多,2015年形成每月890班的航行频次。因此,中国与欧洲各国的航运联系不断深化,航运连接体系不断完善。

2.2 网络复杂性特征及其动态变化

(1) 网络整体组织结构效率提升,“小世界”特征明显

整体来讲,中欧航运网络的平均路径长度与同等规模随机网络相比逐渐减小,聚类系数与同等规模随机网络相比逐渐增大,网络结构效率和集聚性增强,“小世界”特征越来越显著,如表3。具体表现在:① 2005年和2015年(考虑到1995年网络中包含节点较少,不具备复杂网络的显著特征,因此1995年不作复杂网络特征的对比分析)网络的平均路径长度分别为1.649和1.665,而同等规模随机网络的

表3 港口节点小世界特性指标演变

Tab.3 Change of port node small world characteristic index

指标	2005年		2015年	
	L	C	L	C
同等规模随机网络	1.633	0.358	1.668	0.336
中欧航运网络	1.649	0.792	1.665	0.788
差值	0.016	0.434	0.003	0.452

平均路径长度分别为1.633和1.668,两者较为接近,均较小;同时,网络聚类系数 C 分别为0.792和0.788,而同等规模随机网络的聚类系数分别为0.358和0.336,两者相差较大,中欧航运网络的聚类系数较大,网络整体表现出“小世界”特性。② 比较而言,2005—2015年网络平均路径长度与同等规模的随机网络的差值逐渐缩小,网络组织效率提升;同时网络聚类系数与同等规模随机网络聚类系数的差值增大,网络节点集聚性增强。综合以上变化发现,中欧航运网络整体表现出“小世界”特性,并且逐渐显著。

(2) 网络具有无标度特性

从度累积概率分布图来看(图1),中欧航运网络度累积概率分布逐渐呈现出“长尾”特征,即少数节点度值较高,多数的节点度值较小且相近,累积概率分布曲线幂率拟合值(R^2)逐渐增大,网络具有无标度特性。2005年网络节点度累积概率分布曲线表现出一定的“长尾”特征,幂率拟合度较优($R^2=0.8548$);2015年曲线呈现更为明显的“长尾”特征,

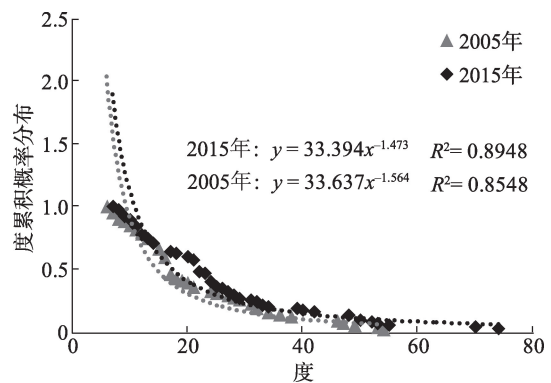


图1 节点度累积概率分布

Fig.1 Cumulative probability of node degree

幂率拟合度增大($R^2=0.8948$)。综合以上变化可以发现,中欧航运网络在2005—2015年间,节点度累积概率分布曲线呈现幂率分布的态势,且幂率拟合值逐渐增大,网络整体具有无标度特性。

2.3 网络中不同港口节点的可达性及其功能变动差异

基于航运网络的港口体系不同于传统港口体系的研究,更强调港口的外部性。无权网络节点度值反映节点连接数量的多少,即广度;而加权网络节点的单位权则能进一步描述节点连接关系的强弱,即深度;加权邻近中心性综合节点度和强度描述节点在网络中的相对可达性(亦即其重要程度);因此本文选取节点度、单位权、邻近中心性深入刻画港口间联系与其功能结构,并根据2005年和2015年网络节点的特征值变化,划分节点变化的不同类型(表4)。

整体来看,随着中欧贸易的不断深化发展,网络中84%的港口可达性增大,网络整体连通性提升,少数地中海和阿拉伯海沿岸港口可达性减小。虽然网络整体规模不断扩大,节点数量不断增加,但各节点的功能及其外部性差异显著且不断变化,根据各节点指标的变化差异将节点变化分为4类(表4):

(1) 当节点广度和深度均增大时,可达性必然随之增大,包括深圳港、上海港、勒阿弗尔港、福斯港等,此类港口不仅注重其海向联系范围的拓展,同时不断增强其对外联系的紧密度,港口与其联系节点的通达性增强,发展趋于多元化和网络化。

(2) 当节点广度增大、深度减小时,港口可达性变化存在差异;其中厦门港、香港港、大连港、安特卫普港、马耳他港、的里雅斯特港、丹戎帕拉帕斯港的可达性增大,此类港口在对外拓展联系范围时倾向于同通达性较好的核心港口建立联系,尽管其对外联系的平均权重有所降低,但与核心港口联系带来的辐射效应与对外联系的便捷性使其相对可达

性增大;而科佩尔港、伊斯坦布尔港在网络中的相对可达性降低,此类港口虽然其联系覆盖范围增大,但其扩展的港口更多的是通达性较低的边缘支线港,导致其相对可达性降低,此类港口多受到新兴港口发展的冲击而逐渐失去其原有地位。

(3) 当节点的广度不变或小幅减小而深度增大时,港口在网络中的相对可达性增大,包括鹿特丹港、汉堡港、费利克斯托港、瓦伦西亚港,此类港口虽然在网络中的联系范围不变或小幅减小,但保持着对外联系强度的增大,仍具有较好的可达性。此类港口多为传统枢纽港,凭借其原有的区位优势和发达的集疏运系统,仍保持着较好的可达性,但由于网络结构的发展变化,其地位有所下降,其辐射控制的支线港口减少。

(4) 当节点广度和深度都减小时,可达性也随之减小,包括威尼斯港、里耶卡港、科伦坡港、海法港、那不勒斯港,此类港口对外联系的广度和深度均减小,在网络中的地位逐渐下降,发展趋缓。

3 中欧港口航运网络的中转港体系演化

由于中国与欧洲分别位于欧亚大陆的东西两端,相距较远,为解决远距离运输的问题以及满足不同区域差异化需求的情况,一般货物从启运港前往目的港需在第三方港口中转,进行挂靠、装卸货物、补给、换装运输工具等操作。从中国起运运抵欧洲的船舶多经过马六甲海峡、苏伊士运河,以及直布罗陀海峡完成,途中多次中转,因此,沿途中转港的识别及其影响下的航线路径的演化对于航运网络的路径优化具有重要意义。根据1995、2005、2015三个年份的航线统计数据绘制中欧航运网络的航线路径演化图,将港口间的航线联系转化成点

表4 基于航线连接广度和深度的港口节点变化类型

Tab.4 Classification of port development types based on breadth and depth of node connections

指标变化			港口		
可达性 (邻近中心性)	广度 (度)	深度 (单位权)	中国港口	欧洲港口	中转港口
↑	↑	↑	深圳、上海、宁波、青岛、天津、高雄	比雷埃夫斯、勒阿弗尔、福斯、巴塞罗那、泽布吕赫、南安普敦、热那亚、拉斯佩齐亚、康斯坦萨、不莱梅哈芬港、敖德萨、焦亚陶罗、奥尔胡斯、哥德堡	巴生港、塞得港、新加坡、吉达、苏伊士、贝鲁特
↑	↑	↓	厦门、大连、香港	安特卫普、马耳他、的里雅斯特	丹戎帕拉帕斯
↑	↓	↑	—	鹿特丹、汉堡、费利克斯托、瓦伦西亚	—
↓	↑	↓	—	科佩尔、伊斯坦布尔	—
↓	↓	↓	—	威尼斯、里耶卡、那不勒斯	科伦坡、海法

对点形式(如航线A-B-C-D-E-F……依次转化为A-B, B-C, C-D, D-E, E-F……),并运用ArcGIS的XY转线功能,最终得到图2。结果表明:中欧航运网络的中转港出现分化,中转港体系由“V”型结构转变为“U”型结构;运输路径也逐渐多元化。

(1) 1995—2005年,中转港分化,中转港体系由“V”型转化为“U”型

1995年中国与欧洲港口的航线联系中有3条航线(8班次)可直接运抵欧洲,占比达37.9%,其余班次均需要中转第三港口,其中在马六甲航道的中转全部依赖新加坡港,在苏伊士运河的中转全部依赖亚历山大港,新加坡港凭借其扼守马六甲海峡的天然区位优势,成为网络中对外联系广度和强度最大的港口。中欧航运联系的中转港体系形成“V”型结构,“V”型结构在不同的航道依赖单一中转港,稳定性较低,中转枢纽容易遭受拥堵的风险,网络整体运输效率较低。

2005年中欧航线联系网络中28.3%的航线可直达欧洲,直达航线占比下降;中转航线增多,同时中转港口不再是单一港口,部分航线中转多个港口,其中马来西亚的巴生港发展迅速,与新加坡港形成竞争,中欧航运联系的中转港口出现分化,巴生港以度值(47)、点强度(895)超过新加坡港成为该区域的中转首位港。网络中有64%的港口与新加坡港建立航运联系,79.6%的港口与巴生港建立航运联系,巴生港吸引了大量以往经由新加坡港的中转业务并迅速扩大其业务范围,逐渐发展成为中国与欧洲航线联系路径上的又一大核心中转港。中欧远洋运输的中转不再依赖单一中转港,中转港分化,形成“U”型结构,一定程度上降低了网络拥堵的风险,提升了网络抵御风险的能力,整体结构稳定性增强,运输效率提升。

(2) 2005—2015年,“U”型中转港体系不断稳固,网络运输路径更加多元化

2015年中欧港口航运网络在核心中转港不断竞争演化发展的同时,兴起了大量新兴中转港,随着中转港口体系的完善以及多元化发展,中欧港口间的运输路径也逐渐多元化。① 2015年新加坡港重新成为中欧中转港体系的首位港,联系范围覆盖网络中73%的港口;而巴生港以64%的覆盖范围位居中转港第二位,但其对外联系强度高于新加坡港,两港在竞争中逐渐形成错位发展,最终形成马六甲海峡中转港口的“双中心”结构。② 同时,东南

亚地区还发展形成了丹戎帕拉帕斯港和帕西古当港等中小型中转港,中转港体系逐渐完备,承运人可根据不同需求选择不同的中转港进行运输,运输路径逐渐多元化。③ 除马六甲海峡中转港不断多元化外,西亚和非洲中小型中转港口的加入也不断推动中欧港口间的运输路径朝着多元化方向发展。

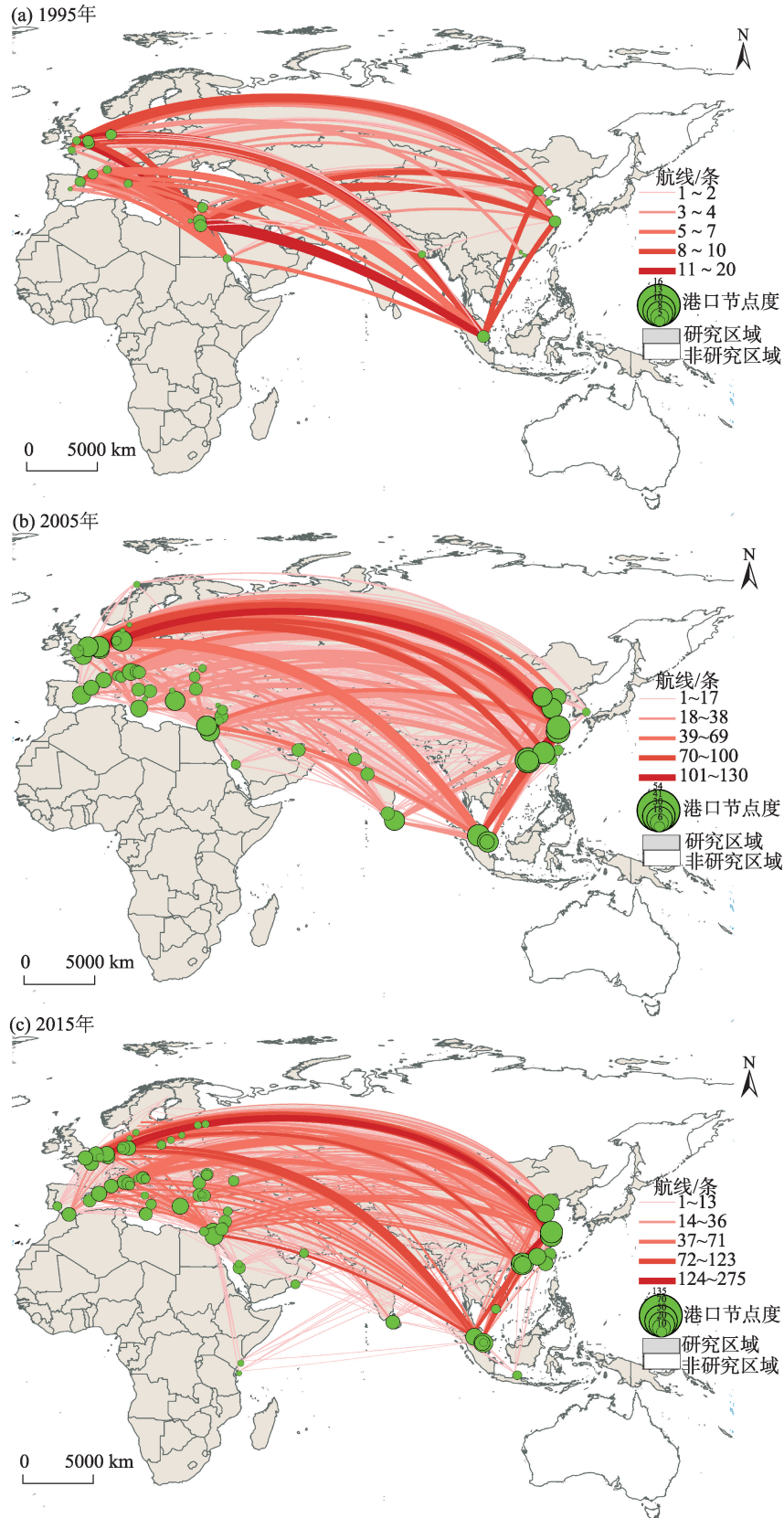
综合以上论述,中欧港口航运网络中,中转港口的分化和路径的多元化都弱化了网络中转港体系的“V”型结构,形成了“U”型结构,有效增强了中欧航运网络的稳定性,降低了网络拥堵的风险,提升了网络的运输效率。

4 中欧港口航运网络空间组织结构的演化

为研究中欧航运网络中港口节点组织的空间模式,本文根据港口节点联系的强度值提取了3个年份网络中各港口的最强联系和次强联系,构成TOP2航运联系网络组织结构图(图3),以此形成网络节点间联系的核心组织结构,并对其演化规律进行深入挖掘。结果发现:网络TOP2组织结构呈现“轴—辐”组织模式,即网络中大量节点通过一个或几个枢纽节点联系,并组织形成网络,该模式下,货物先由各节点运输至枢纽节点,再集中配置运送至不同的支线节点,形成中心节点规模效应,具有较高的运输效率和较低的运输成本。

(1) 1995年,网络呈现“三角型”轴—辐组织结构

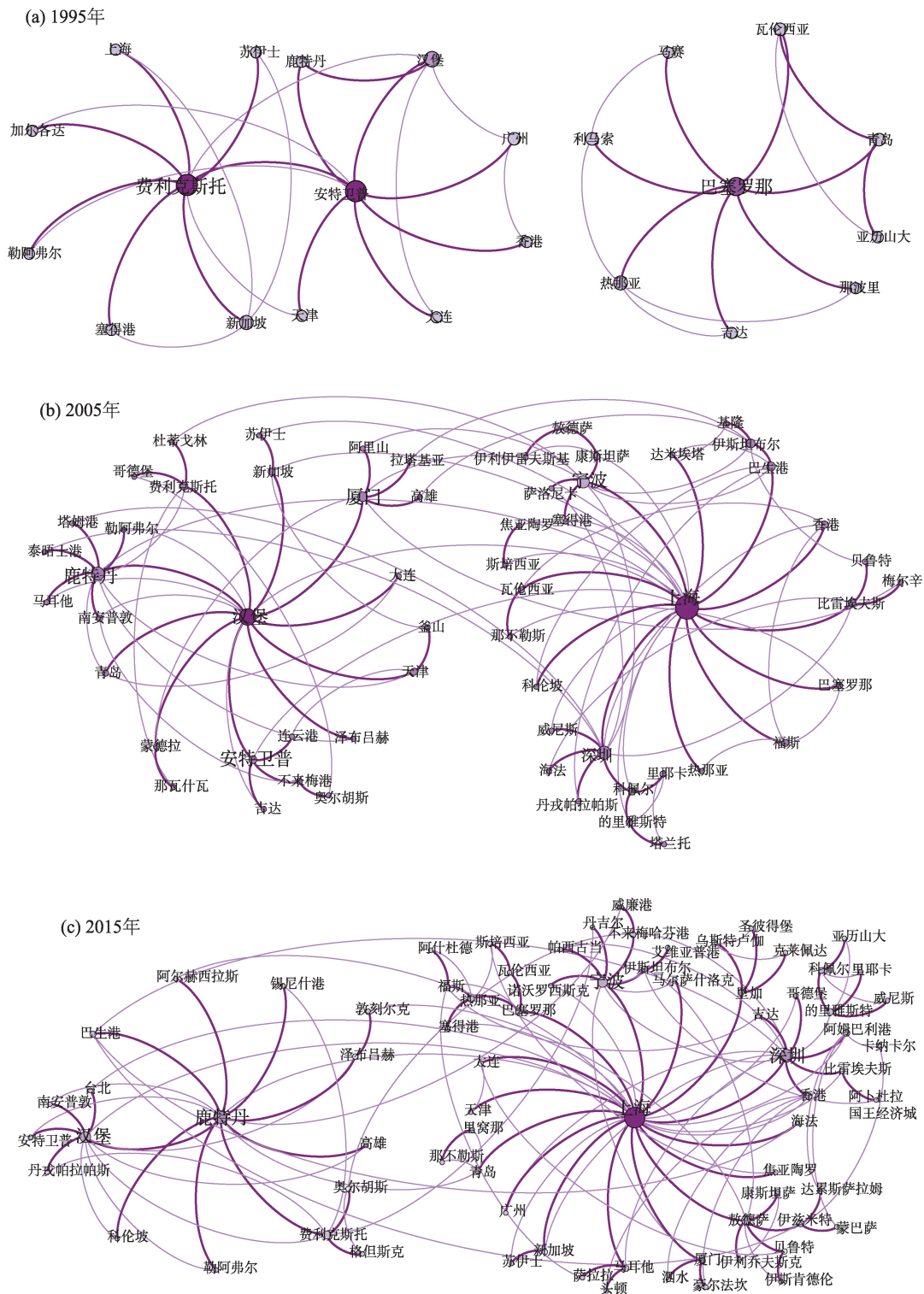
1995年(图3a)网络整体以巴塞罗那港、安特卫普港、费利克斯托港为核心枢纽节点,各自辐射一定范围的港口,形成相对独立的3个组织集群,同时,费利克斯托港和安特卫普港之间互为最强联系,形成两大集群间的连接轴线,巴塞罗那的最强和次强联系均为集群内港口,与费利克斯托港互为第三强联系,因此,网络呈现“三角型”轴—辐结构。中国港口分别以三大核心为枢纽进行航运联系,航线连接较少,网络中三大核心枢纽均为欧洲港口,网络整体由欧洲港口主导(图4a)。究其原因,欧洲作为世界经济贸易的发达地区加之其集装箱化发展较早,区域内港口已初步完成自组织协调,形成一定的等级体系,由此,其核心港口成为中欧航运网络中的枢纽节点,辐射控制整个网络。而中国集装箱运输起步较晚,国内港口的外贸运输和洲际远洋航线集中在少数港口,同时多以香港为门户



注：本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1667号的标准地图制作，底图无修改。

图2 中欧航运联系网络中转路径的演化

Fig.2 Change of the transit path of the China-Europe shipping network



注:深紫色连线表示节点间最强连线,淡紫色表示第二强连线,节点大小及颜色深浅反映节点重要性。

图3 不同年份中欧航运网络轴-辐组织结构图

Fig.3 The "hub-spoke" organization structure of the China-Europe shipping network in different years

进行对外联系,并且规模较小,在中欧网络中从属于欧洲核心枢纽港;国内港口尚未完成自组织协调,发展混乱,大小港口分割发展,未形成完善协调的运输组织体系。

(2) 2005年,网络呈现“均衡哑铃型”轴-辐组织结构

2005年(图3b)网络中17%的港口与汉堡港形成最强联系,19%的港口与上海港形成最强联系,

汉堡港与上海港成为网络的2大核心枢纽节点,分别辐射网络48%和51%的节点,辐射范围相当;而两港互为次强联系,构成网络中两大集群间的一级轴线;网络呈现一轴两核的“均衡哑铃型”轴—辐组织结构。21世纪以来,中国对外贸易量的迅速增长、航运技术的快速发展以及政府的港口体制改革都在一定程度上释放了中国港口的发展潜力,使得中国港口迅速组织发展成为中欧网络中的一大核心集群,其中上海港组织形成与德国汉堡港辐射范围相当的港口集群。两大核心枢纽港组织区域内次级枢纽港,基本完成区域内自组织协调,并形成一定等级体系。汉堡港与鹿特丹港、安特卫普港,上海港与宁波、深圳港分别形成一主两副的三中心结构(图4b),共同组织辐射其支线港口。中国南北港口形成分化,南部港口基本实现区域内组织协调,形成以上海为核心枢纽的组织网络,而北部港口尚未与区域内核心枢纽港联系形成网络,其航线组织仍由欧洲港口主导。

(3) 2015年,网络呈现“非均衡哑铃型”轴—辐组织结构

2015年网络12%的节点与鹿特丹港形成最强联系(图3c),20%的节点与上海港形成最强联系,鹿特丹港与上海港成为网络的两大核心枢纽,两大核心港分别辐射网络22%和78%的节点;同时两港互为次强联系,构成网络中两大集群的连接轴线,亦即网络的主轴线,形成非均衡哑铃型结构。随着东亚地区逐渐发展成为世界经济增长的重心,中国持续增长的对外贸易量使中国港口进一步深化发展,上海港连接的港口数量迅速扩大,并逐渐超越鹿特丹港。在网络轴—辐结构发展演化的过程中,欧洲港口因其充分市场化的竞争机制不断发展更替,2015年荷兰鹿特丹港取代德国汉堡港在网络中的核心枢纽地位,成为主枢纽港;德国汉堡港与英国

费利克斯托港成为次级枢纽港(图4c)。中国港口在不断完善自身协调发展的同时形成稳定的层级体系,即以上海港为主核心,深圳港、宁波港为次级核心,其余大中型港口与核心港口建立紧密联系的网络化组织格局;除此之外,上海港还不断扩大其对外联系范围,连接了众多跨区域的中小港口,扩展了其海向联系。至此,中欧航运网络形成以上海港和鹿特丹港为主核心,汉堡港、费利克斯托港、宁波港、深圳港为次级核心的多核心轴辐结构。

5 结论

1995—2015年随着中国与欧洲贸易的不断发展,中欧航运网络也随之不断变化,网络所覆盖的范围不断扩大。1995、2005和2015年,网络所覆盖的国家数量分别为13、27、33个,覆盖的港口数量分别为23、59和75,其中欧洲国家的数量由8个增加至20个,中国与欧洲各国的贸易不断深化,贸易联系的范围逐渐扩大。据此,文章建立了中欧航运网络数据库,基于复杂网络理论,分析了中欧航运网络复杂性特征,并综合运用ArcGIS和Gephi技术平台进行多维度空间分析,主要结论如下:

(1) 中欧航运网络节点众多,结构复杂,除起始港和终到港外还途经众多中转港,网络整体“小世界”特性显著,并具有无标度特性。1995—2005年网络整体发展较快,所有节点的对外联系广度、深度和可达性均提升;而2005—2015年网络节点不同指标的变化存在差异,84%的港口可达性上升,其中中国港口的可达性全面提升,只有少数地中海和阿拉伯海沿岸港口可达性下降,占比16%。

(2) 1995—2015年,中欧航运网络中转港体系由“V”型转化为“U”型,双核枢纽不断强化。1995年,中欧港口航运联系的中转港体系较为单一,在

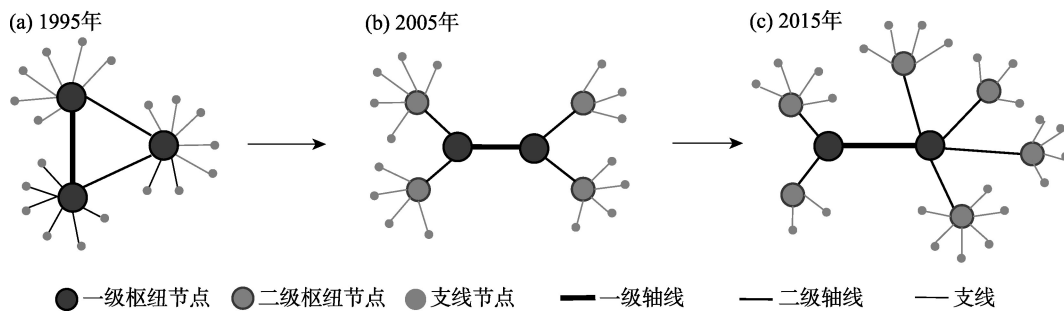


图4 航运网络轴—辐模式演化图示

Fig.4 Hub and spoke pattern diagram of the shipping network in different years

马六甲海峡船舶依赖单一港口中转,中转港体系呈现“V”型结构。2005年,网络中转港口明显增多,特别是巴生港在马六甲海峡的航线中转中占据60%的份额,对新加坡港的依赖程度明显下降;除此之外,科伦坡港的中转箱量也逐渐增加,网络中转港体系呈现“U”型结构;2015年,网络中新增加了多个中小型中转港,运输路径更加多元化;马六甲海峡海域新增了丹戎帕拉帕斯、泗水等港口;印度洋沿岸中转港口也增多,部分非洲港口也加入其中,网络中转港体系呈现“U”型结构,运输路径也随之多元化。

(3) 中欧航运网络的港口节点在空间联系上具有鲜明的轴—辐组织特征,网络运行效率明显提升,网络稳定性增强。中欧港口航运网络轴—辐空间结构经历了“三角型”“均衡哑铃型”和“非均衡哑铃型”3个阶段,最终形成以上海港和鹿特丹港为主枢纽的多层次轴—辐空间结构。1995年,欧洲港口集装箱化发展较早,而中国港口集装箱化较晚且水平较低,网络的航线组织由欧洲三大核心枢纽港支配,呈现典型的“三角型”结构。2005年,随着中国制造业的发展和世界经济贸易格局的改变,中欧航运网络结构也发生巨大变化,上海港迅速发展成为网络中与汉堡港相当的核心枢纽港,形成了“哑铃型”组织模式。2015年,随着“一带一路”沿线国家经贸联系不断强化,中欧航运网络组织格局进一步演化,上海港不仅成为中国港口的主枢纽,其辐射范围也逐渐增大并超过鹿特丹港,成为中欧航运网络中的主要核心枢纽节点,形成了“非均衡哑铃型”组织结构。

本文研究进一步丰富了“一带一路”沿线港口航运网络分析,首次揭示了网络中转路径的枢纽结构及其演化态势,并对轴—辐系统进行了识别,提炼了节点与航线联系的空间组织结构,对于揭示“海上丝路”沿线港口间的相互作用关系、优化全球性海运物流供应链具有借鉴意义。具体来看,中国与欧洲的航运通道仍主要经东南亚国家,过马六甲海峡,进入印度洋,后经苏伊士运河抵达欧洲,而面对中欧日益紧密的贸易联系和日益增长的货运量,中欧航运通道的发展建设必须朝着多元化的方向发展。近年来,中国企业也在不断发展新的运输通道,通过对瓜达尔港的援建成功开辟了一条全新的航运线路,货物可通过中巴铁路实现与瓜达尔港的海铁联运,不经过马六甲海峡直接进入印度洋;另外,中国还与斯里兰卡的汉班托塔港签署了长期合

作协议,该港口是未来“21世纪海上丝绸之路”新的补养中转站,未来企业也应更多地投资或加盟全球贸易与物流枢纽节点的建设,以点带线形成新的物流通道,以线带面形成新的贸易与物流产业区,最终发展构筑全球物流网络体系,以此为中欧贸易联系提供更为有效的支撑,并以此提高中国在国际贸易与物流体系的地位和主导权。

最后,由于篇幅所限,本研究仅选取了3个时间断面数据进行分析,对网络空间联系的波动性揭示不够;在研究范围上,仅以中欧网络为切入点,虽然较为深入地系统地考察了“海上丝路”主要路径的航线特征,但不足以反映整个海上丝路沿线国家的全貌,有待今后进一步比较分析和跟踪研究。

参考文献(References)

- [1] Levinson M. The Box: How the shipping container made the world smaller and the world economy bigger [M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2006: 56-89.
- [2] 王成金. 全球集装箱航运的空间组织网络 [J]. 地理研究, 2008, 27(3): 636-648. [Wang Chengjin. Spatial organization networks of world marine container transportation. Geographical Research, 2008, 27(3): 636-648.]
- [3] 韩增林, 安筱鹏, 王利, 等. 中国国际集装箱运输网络的布局与优化 [J]. 地理学报, 2002, 57(4): 479-488. [Han Zenglin, An Xiaopeng, Wang Li, et al. Distribution and optimization of container transportation network in China. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(4): 479-488.]
- [4] 曹有挥. 集装箱港口体系的演化模式研究: 长江下游集装箱港口体系的实证 [J]. 地理科学, 1999, 19(6): 485-490. [Cao Youhui. On the evolution model of the container port system: A case study of the lower Changjiang River container port system. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(6): 485-490.]
- [5] Notteboom T E. Concentration and load centre development in the European container port system [J]. Journal of Transport Geography, 1997, 5(2): 99-115.
- [6] 曹有挥, 李海建, 陈雯. 中国集装箱港口体系的空间结构与竞争格局 [J]. 地理学报, 2004, 59(6): 1020-1027. [Cao Youhui, Li Haijian, Chen Wen. The spatial structure and the competition pattern of the container port system of China. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 1020-1027.]
- [7] 潘坤友, 曹有挥, 魏鸿雁. 长三角地区集装箱航运网络演化与效应 [J]. 经济地理, 2018, 38(2): 90-97. [Pan Kunyou, Cao Youhui, Wei Hongyan. Study on evolution and effect of container shipping network in Yangtze River Del-

- ta. *Economic Geography*, 2018, 38(2): 90-97.]
- [8] 郭建科, 陈园月, 于旭会, 等. 1985年来环渤海地区港口体系位序-规模分布及作用机制 [J]. *地理学报*, 2017, 72(10): 1812-1826. [Guo Jianke, Chen Yuanyue, Yu Xuhui, et al. Rank-size distribution and mechanism of port system in the Bohai Rim during the past thirty years. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(10): 1812-1826.]
- [9] Hayuth Y. Rationalization and concentration of the U.S. container port system [J]. *The Professional Geographer*, 1988, 40(3): 279-288.
- [10] Liu Z Y, Meng Q, Wang S A, et al. Global intermodal liner shipping network design [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2014, 61: 28-39.
- [11] 韩增林, 安筱鹏. 东北集装箱运输网络的建设与优化探讨 [J]. *地理科学*, 2001, 21(4): 308-314. [Han Zenglin, An Xiaopeng. Research on the construction and optimization of container transportation network in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(4): 308-314.]
- [12] Fremont A. Global maritime networks the case of Maersk [J]. *Journal of Transport Geography*, 2007, 15: 431-442.
- [13] Notteboom T E. Consolidation and contestability in the European container handling industry [J]. *Maritime Policy and Management*, 2002, 29: 257-269.
- [14] Rimmer P J. The Asia-Pacific rim's transport and telecommunications systems: Spatial structure and corporate control since the mid-1980s [J]. *GeoJournal*, 1999, 48: 43-65.
- [15] 王成金. 世界航运企业重组及其对航运网络结构的影响: 兼论对中国港口体系的影响 [J]. *世界地理研究*, 2008, 17(1): 94-104, 118. [Wang Chengjin. International reorganization of shipping liners and its effect on world network structure. *World Regional Studies*, 2008, 17(1): 94-104, 118.]
- [16] 王成金, 金凤君. 中国海上集装箱运输的组织网络研究 [J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 392-401. [Wang Chengjin, Jin Fengjun. Organization networks of Chinese marine container transportation. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 392-401.]
- [17] Deng W B, Long G, Wei L, et al. Worldwide marine transportation network: Efficiency and container throughput [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(11): 118-901.
- [18] Kaluza P, Kölsch A, Gastner M T, et al. The complex network of global cargo ship movements [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2010, 7(48): 1093-1103.
- [19] Ducruet C, Notteboom T. The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics [J]. *Global Networks*, 2012, 12(3): 395-423.
- [20] Guo J K, Wang S B, Wang D D, et al. Spatial structural pattern and vulnerability of China-Japan-Korea shipping network [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(5): 697-708.
- [21] 王列辉, 洪彦. 直航背景下海峡两岸集装箱港口体系空间结构: 基于复杂网络的视角 [J]. *地理学报*, 2016, 71(4): 605-620. [Wang Liehui, Hong Yan. The spatial structure of container port system on both sides of the Taiwan straits under the background of direct navigation: From the perspective of complex network. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(4): 605-620.]
- [22] 李振福, 史砚磊, 徐梦俏, 等. 亚洲集装箱港口的全球班轮网络地位 [J]. *经济地理*, 2016, 36(3): 91-98. [Li Zhenfu, Shi Yanlei, Xu Meng, et al. Global liner network status of Asian container ports. *Economic Geography*, 2016, 36(3): 91-98.]
- [23] 陈芙英, 胡志华. 海上丝绸之路东南亚航运网络空间格局研究 [J]. *大连海事大学学报*, 2016, 42(4): 91-96, 104. [Chen Fuying, Hu Zhihua. Study on the spatial pattern of shipping network in South-East Asia along the Maritime Silk Road. *Journal of Dalian Maritime University*, 2016, 42(4): 91-96, 104.]
- [24] 王成, 王茂军, 王艺. 中国嵌入“21世纪海上丝绸之路”航运网络的关键节点识别 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(11): 1485-1498. [Wang Cheng, Wang Maojun, Wang Yi. Identification of Chinese key nodes in the shipping network of the 21st Century Maritime Silk Road. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1485-1498.]
- [25] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 28-57. [Wang Xiaofan, Li Xiang, Chen Guanrong. The theory and application of complex network. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2006: 28-57.]
- [26] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 42-69. [Sun Xijing, Si Shoukui. Complex network algorithms and applications. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2016: 42-69.]

Characteristics of change of the China–Europe port shipping network under the Belt and Road Initiative

GUO Jianke, HOU Yajie, HE Yao

(Center of Ocean Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: China and Europe are located at the east and west ends of Eurasia. The smooth flow of trade between China and Europe is an important part of the development of the Belt and Road region. At present, China–Europe economic and trade ties are still mainly maintained by sea. The connection between Chinese and European ports through shipping network is the guarantee of smooth trade. Therefore, studying the development and change of China–Europe port shipping network is of great significance for understanding and enhancing the supporting capacity of China–Europe trade links. Based on the shipping data of the past 20 years, the network of Chinese and European port routes is constructed. By portraying the complexity of the port shipping network, the spatial differentiation of the portability changes of different port nodes is revealed. Then we explored the characteristics of change of the China–Europe shipping network by the transit port system and the network organization structure. The result shows that: 1) Since 1995, the port nodes linked to the China–Europe routes have increased significantly, and the network coverage has expanded significantly. In 2005 and 2015, the network showed obvious small world and scale-free characteristics; the changes in the breadth and depth of connection and accessibility of the different ports were significantly different, with 84% of the ports being more accessible, and a few ports in the Mediterranean and the Arabian Sea showed reduced accessibility. 2) The transit port system of the China–Europe shipping network has changed from V-shaped to U-shaped. The core transit ports have become differentiated, the transit nodes have gradually become systematic, the transit paths have become more diversified, and the network stability has increased. 3) The hub and spoke structure of the China–Europe shipping network is continuously optimized, the network operation efficiency is significantly improved, and the route links are more diversified and complicated. The hub-spoke spatial model of the China–Europe port shipping network has experienced three stages of change from triangular to balanced dumbbell type and unbalanced dumbbell type, which finally formed the multi-level hub-spoke spatial organizational structure, with Shanghai and Rotterdam as the main hubs.

Keywords: Belt and Road Initiative; China and Europe; complex network; spatial association; hub and spoke system