

引用格式:余红楚,方志祥,陆锋,等.重要经济发展区域间海运网络时空演变特性分析[J].地球信息科学学报,2018,20(5):582-592. [ Yu H C, Fang Z X, Lu F, et al. Spatial-temporal evolution patterns of maritime networks between important economic developing zones revealed [J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(5):582-592. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180085

## 重要经济发展区域间海运网络时空演变特性分析

余红楚<sup>1</sup>,方志祥<sup>1,3\*</sup>,陆 锋<sup>2</sup>,彭 澎<sup>2</sup>,赵志远<sup>1</sup>,冯明翔<sup>1</sup>

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉 430079;2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101;3. 时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心,武汉 430079

### Spatial-temporal Evolution Patterns of Maritime Networks between Important Economic Developing Zones Revealed

YU Hongchu<sup>1</sup>, FANG Zhixiang<sup>1,3\*</sup>, LU Feng<sup>2</sup>, PENG Peng<sup>2</sup>, ZHAO Zhiyuan<sup>1</sup>, FENG Mingxiang<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing (LIESMARS), Wuhan 430079, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Engineering Research Center for Spatiotemporal Data Smart Acquisition and Application, Ministry of Education of China, Wuhan 430079, China

**Abstract:** MSR (countries along the Maritime Silk Road), BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) and AJK (the United States, Japan and South Korea) are important economic developing zones to promote international trade. Study on the spatio-temporal evolution pattern of maritime network is helpful to analyze the competition and balance of international trade between different countries, and to make scientific strategic deployment and intelligent decision in global maritime trade. Automatic Identification System (AIS) data makes the real-time analysis of maritime network possible for its advantages of real-time and the near-complete coverage for the offshore area of the ports. Based on the AIS data of three main types of business ships in international trade, namely bulk ship, container ship and tanker ship, this paper reveals spatio-temporal evolution patterns of maritime networks between important economic developing zones, using the timeline method to describe the change of the networks in and outside different zones. The result shows that the structural maritime network evolutions of bulk-layer, container-layer, and tanker-layer inside the MSR are much larger than the evolutions inside BRICS and AJK, which indicates that the Belt and Road Initiative has promoted the trade between MSR countries. The dynamics outside three typical important economic developing zones (MSR, BRICS, and AJK) are large from 2013 to 2016, which indicates that the networks between them have changed greatly with the implementation of the Belt and Road Initiative. The structural maritime network dynamics weighted by cargo handling capacity in 2015 and 2016 are smaller than 2013 and 2014, which indicates that under the implementation of the Belt and Road Initiative, the changes of cargo handling capacity in and outside

收稿日期 2018-01-27;修回日期:2018-04-27.

基金项目 :中国科学院重点项目(ZDRW-ZS-2016-6-3);国家自然科学基金项目(41771473);国家重点研发计划项目(2017YFC1405302);测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费资助。[ **Foundation items:** Key Project of the Chinese Academy of Sciences, No.ZDRW-ZS-2016-6-3; National Natural Science Foundation of China, No. 41771473; National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC1405302; LIESMARS Special Research Funding. ]

作者简介 余红楚(1990-),女,博士生,主要从事海上交通大数据挖掘研究。E-mail: hongshuxifan8140@163.com

\*通讯作者:方志祥(1977-),男,教授,主要从事时空行为建模、导航与位置服务研究。E-mail: zxfang@whu.edu.cn

the three economic developing zones have decreased in 2015 and 2016. Obviously, the Belt and Road Initiative has different influences on MSR, BRICS, and AJK. The maritime networks inside and outside MSR are affected by this initiative. The bulk, container, tanker maritime networks inside BRICS have diverse dynamics derived from this initiative, which also affected the maritime networks outside BRICS to some extent. This initiative has no influences on the network inside AJK, but partly affects the network outside AJK. Improving the throughput and position of MSR in the maritime network is still very important to global trade balance.

**Key words:** AIS trajectories; economic developing zones; maritime network; spatial-temporal evolution pattern; the Belt and Road Initiative

**\*Corresponding author:** FANG Zhixiang, E-mail: zxfang@whu.edu.cn

**摘要:**“海上丝绸之路”沿线国家(MSR)、金砖国家(BRICS)、美日韩(AJK)是重要经济发展区域。研究其海运网络的时空演变规律有助于国家层面的贸易竞争均衡分析,对海运战略科学部署和智慧应对具有十分重要的意义。AIS(Automatic Identification System)数据具有实时性,且已基本覆盖全球港口的近海区域,能为海运网络提供及时分析的数据支撑。本文利用AIS数据挖掘MSR、BRICS、AJK的运输网络时空演变规律,结果表明,MSR散货、集装箱、油轮的内部网络结构的变化明显大于AJK和BRICS,说明“一带一路”倡议促进了MSR的内部海运贸易;MSR、AJK和BRICS的外部网络结构变化2013–2016年都较大,说明“一带一路”倡议的实施期间,MSR、AJK和BRICS 3个区域之间的海运贸易变化较大;3个区域的集装箱、油轮吞吐量加权的内外部海运网络结构2015–2016年较2013–2014年更为稳定,随着“一带一路”倡议的实施,这3个区域内部和区域之间的吞吐量加权海运网络结构变化幅度逐步减小。“一带一路”倡议对不同的经济发展区域的影响不同,对MSR的内外部海运网络结构都产生了一定影响,对BRICS散货、集装箱、油轮型海运网络的影响呈现差异化特征,对AJK内部海运网络没有影响,对AJK的外部网络产生了部分影响。提高MSR的海运贸易吞吐量,提升MSR在海运网络中的贸易地位,仍是当前的发展重点。

**关键词:** AIS轨迹;经济发展区域;海运网络;时空演变规律;“一带一路”倡议

## 1 引言

“海上丝绸之路”沿线国家(MSR)、金砖国家(BRICS)、美日韩(AJK)是重要经济发展区域,对促进国际运输和经济发展有重要意义。如何及时掌握区域层面海洋运输网络时空动态和演变规律,对分析和掌握海洋运输的制约因素和竞争均衡关系,并进行科学部署和智慧应对十分有帮助。

目前,海运网络的相关研究主要包括结构动态、网络流、海运交通和海运安全等方面。针对海运网络结构动态建模方面,相关学者通过OD流矩阵<sup>[1-2]</sup>和加权邻接矩阵<sup>[3]</sup>,结合运输时间、运输能力、运营策略、服务模式和腹地可达性等因子,提出了基于组合优化和优先级规则的启发式模型<sup>[4]</sup>,最小化运输时间和最大化运输能力模型<sup>[5]</sup>等,研究海运网络的空间结构<sup>[6]</sup>、区域动态<sup>[7-9]</sup>、时间动态<sup>[10]</sup>、空间异质性<sup>[11-12]</sup>、空间可达性<sup>[13]</sup>、局部优劣势<sup>[14]</sup>等。海运网络流从节点-边交通流(节点度、连接强度、连接紧密性<sup>[15-16]</sup>)出发,研究海运网络的多样化特征<sup>[17-18]</sup>,如中心性和脆弱性<sup>[19-22]</sup>、连接性和复杂性<sup>[23-25]</sup>、不均衡性<sup>[26]</sup>和健壮性<sup>[27]</sup>。海运交通研究包括运输服务模

式(点对点直航和支线-枢纽转运<sup>[10,28]</sup>)设计和优化<sup>[29-30]</sup>,航运公司的竞争和垄断行为分析<sup>[31]</sup>,物流运输系统信息化建设和运营管理<sup>[32-33]</sup>等,有助于提升海洋运输的经济效益和运营效率<sup>[34]</sup>等。海运安全包括风险评估<sup>[35]</sup>、安全航行<sup>[36]</sup>、海上搜救<sup>[37]</sup>等。现有研究通常基于国际集装箱、劳氏海事情报组、劳氏船级社以及其他专门网站的统计数据,以记录性数据的实证分析为主,在严谨的方法论上存在不足<sup>[38-39]</sup>。同时,记录数据主要关注大型国际港口,对区域层级内部港口间的地理空间结构考虑不周,限制了相应研究成果的应用范围。

海洋运输网络演化作为网络动态分析的重要组成部分,目前主要从3个角度出发,包括传统空间港口扩张模式的模拟分析<sup>[40]</sup>,基于腹地可达性和港口区域特性的港口系统演变规律分析<sup>[41-44]</sup>,和基于图论和复杂网络的运输流的动态演化模型(如随机游走模型和拓扑结构演变分析)<sup>[26,45]</sup>。目前基于图论和复杂网络的研究主要围绕统计指标(如节点度、聚类系数、最短路径、平均行程数、接近中心性、介数中心性、直达中心性等)开展,对由单个节点层次的变化拓展到整个网络结构的变化考虑不足。

海运网络由不同的子网组成,不同的子网作为国际海运格局的重要组成部分,子网内部和子网间的海运网络演变反映了国际政策实施、地理区位、运营策略等对海运网络的影响,如“一带一路”倡议,对所覆盖的沿线国家会产生诸多经济与社会影响,同时也对 MSR 同 AJK、BRICS 等的贸易往来产生一定影响。通过 MSR、BRICS 和 AJK 3 个子网间和子网内部的结构动态对比,能够一定程度上反应“一带一路”倡议对海运网络格局产生的影响,同时区域间海运网络时空演变差异化特性也为分析重大事件对海运网络的影响提供了技术支撑。

本文将借助船舶 Automatic Identification System (AIS) 的位置监控数据,充分利用该数据的实时性及其在全球港口近海区域的覆盖能力,挖掘 AJK、BRICS 和 MSR 散货、集装箱、油轮型的内部和外部网络结构演变规律和吞吐量加权的网络结构演变规律,从而满足多层次区域性海运网络动态的及时分析需求,为评估重大政策的可能影响提供一定的依据。

## 2 研究区和数据源

本文主要采用 2013 年 1 月到 2016 年 12 月的 AIS 轨迹数据,包括船舶 ID、船舶类型、经纬度坐标、船舶国籍、船舶吨位等信息。研究区域(图 1)包括“海上丝绸之路”典型沿线国家(中国 CN、菲律宾 PH、马来西亚 MY、印尼 ID、新加坡 SG、柬埔寨 KH、越南 VN、老挝 LA、泰国 TH、缅甸 MM、孟加拉国

BD、印度 IN、斯里兰卡 LK、巴基斯坦 PK、沙特 SA、也门 YE、索马里 SO、肯尼亚 KE、埃及 EG、土耳其 TR、意大利 IT ([http://www.hsscsl.net/mode\\_55839.htm](http://www.hsscsl.net/mode_55839.htm)), BRICS 国家(中国 CN、俄罗斯 RU、印度 IN、巴西 BR、南非 ZA)、AJK 国家(美国 US、日本 JP 和韩国 KR)。

## 3 研究方法

本文利用 4 年的全球 AIS 数据(2013 年 1 月到 2016 年 12 月),挖掘海量船舶轨迹,并结合全球港口航行指南等信息资料,进行空间位置匹配;通过对匹配结果进行 OD(Origin and Destination)识别和船次统计,得到不同时段内不同国家间的航次频数,利用船舶 ID 关联船名库(包括船型、吨位、尺寸等),估算不同时段内不同国家间的吞吐量。其研究方法流程如下(图 2):

通过 BRICS、AJK 和 MSR 内部网络结构特征,分析其内部网络结构演变规律和吞吐量加权的内部网络结构演变规律。通过 BRICS、AJK 和 MSR 同其他国家间的贸易货运流,分析它们的外部网络结构演变规律和吞吐量加权的外部网络演变规律。

本文选择散货、集装箱、油轮 3 种船型所构成的网络进行分析。这 3 类船舶被称为“三大商船”,在全球海运贸易中具有举足轻重的作用。散货船服务于全球铁矿石、煤炭、粮食等大宗商品的海运贸易,以铁矿石为例,铁矿石贸易量在全球铁矿石总产量中的比重接近 60%,铁矿石贸易量中海洋运输

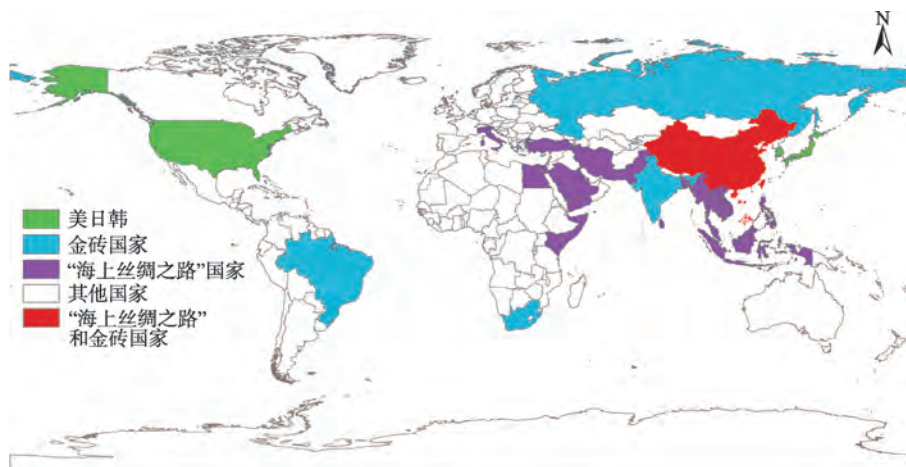


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area



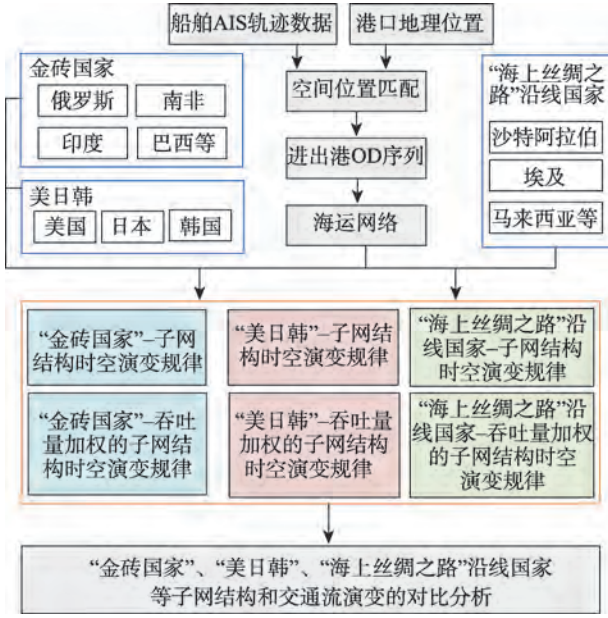


图2 本文研究方法流程图

Fig. 2 The method for spatial-temporal evolution pattern analysis of maritime network

方式占比接近90%，其他运输方式占比不足10%。集装箱运输一直都是港口贸易物流的重要形式，支撑着全球贸易供应链，以2015年为例，集装箱吞吐量占据了70%以上的国际贸易海运量。石油及成品油的运输主要以海洋运输为主，如目前有超过80%的进口原油是需要海洋运输的，因此，油轮贸易也十分重要。通过这3种类型的船舶在不同国家间吞吐量变化，能够有效反映国家之间、区域之间的贸易变化特征，有助于评估重大事件对重要经济发展区域海运贸易的影响。为此，本文选择这3类船舶对海运网络进行分析。

### 3.1 网络结构演变分析方法

Timeline作为社会网络演化分析的重要手段，能够有效而快速的发现网络结构的变化、生动描述网络结构演化趋势。该方法以复杂网络理论为基础，节点代表网络中的个体，边表示网络中的个体之间的联系。通过分析任意2个连续时间段网络结构的差异，得到多个时间片段下的网络演化特征<sup>[47]</sup>。

传统的Timeline是基于滑动窗口来确定网络的结构变化，考虑海洋运输的长周期特性，本文以季度作为基本时间单元，分析不同季度间的网络演变规律。从季度 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 的网络结构变化由 $\sigma_{(S_i, S_{i+1})}$ 来衡量。

对于单个节点，其在 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 的变化定义为：

$$\tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v) = \begin{cases} \left| \log \frac{d_{(S_i)}(v) + 1}{1} \right|, & v \in V(Out Node) \\ \left| \log \frac{1}{d_{(S_{i+1})}(v) + 1} \right|, & v \in V(In Node) \\ \left| \log \frac{d_{(S_i)}(v)}{d_{(S_{i+1})}(v)} \right| + \left| \log \frac{adj_{S_i}(v) \cap adj_{S_{i+1}}(v)}{adj_{S_i}(v) \cup adj_{S_{i+1}}(v)} \right|, & v \in V(Stable Node) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v)$ 表示基于网络连接结构的节点变化计算值； $d_{(S_i)}(v)$ 表示节点 $v$ 在 $S_i$ 时刻的节点度； $d_{(S_{i+1})}(v)$ 表示节点 $v$ 在 $S_{i+1}$ 时刻的节点度； $adj_{S_i}(v)$ 表示节点 $v$ 在 $S_i$ 时刻与之有连接的节点个数(Neighbors)； $adj_{S_{i+1}}(v)$ 表示节点 $v$ 在 $S_{i+1}$ 时刻与之有连接的节点个数(Neighbors)。

网络从 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 变化则可定义为：

$$\tilde{\sigma}_{(S_i, S_{i+1})} = \left( \sum_{v \in V(OUT)} \tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v) + \sum_{v \in V(IN)} \tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v) + \sum_{v \in V(STABLE)} \tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v) \right) / \left( |V(g_{S_i}) \cup V(g_{S_{i+1}})| \right) \quad (2)$$

式中： $\tilde{\sigma}_{(S_i, S_{i+1})}$ 为基于传统的Timeline的网络变化计算值； $|V(g_{S_i}) \cup V(g_{S_{i+1}})|$ 为 $S_i$ 和 $S_{i+1}$ 时刻网络节点的并集； $\sum_{v \in V(STABLE)} \tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v)$ 表示 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 时刻网络稳定节点变化的累积值； $\sum_{v \in V(IN)} \tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v)$ 为 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 时刻网络新增节点变化的累积值； $\sum_{v \in V(OUT)} \tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v)$ 为 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 时刻网络消亡节点变化的累积值。

### 3.2 吞吐量加权的网络结构演变分析方法

吞吐量加权的网络结构演变分析方法不仅考虑网络节点间的连接结构，还引入网络节点间的交通流变化，即吞吐量的变化。从季度 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 的网络变化由 $\sigma_{(S_i, S_{i+1})}$ 来衡量。对于单个节点，其在 $S_i$ 到 $S_{i+1}$ 的变化定义为：

$$\tilde{d}_{(S_i, S_{i+1})}(v) = \begin{cases} \left| \log \frac{\sum_{v_i \in E_{(v, v_i)}(v)} CP_{(v, v_i)} + 1}{1} \right|, & v \in V(Out Node) \\ \left| \log \frac{1}{\sum_{v_i \in E_{(v_i, v)}(v)} CP_{(v, v_i)} + 1} \right|, & v \in V(In Node) \\ \left| \log \frac{\sum_{v_i \in E_{(v, v_i)}(v)} CP_{(v, v_i)}}{\sum_{v_i \in E_{(v_i, v)}(v)} CP_{(v, v_i)}} \right| + \left| \log \frac{\sum_{v_i \in E_{(v, v_i)}(v)} CP_{(v, v_i)} \cap \sum_{v_i \in E_{(v_i, v)}(v)} CP_{(v, v_i)}}{\sum_{v_i \in E_{(v, v_i)}(v)} CP_{(v, v_i)} \cup \sum_{v_i \in E_{(v_i, v)}(v)} CP_{(v, v_i)}} \right|, & v \in V(Stable Node) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v)$  表示基于吞吐量加权的节点变化计算;  $\sum_{v_i \in E_{(s_i)}(v)} CP_{(v, v_i)}$  表示节点  $v$  在  $S_i$  时刻的吞吐量;  $\sum_{v_i \in E_{(s_{i+1})}(v)} CP_{(v, v_i)}$  表示节点  $v$  在  $S_{i+1}$  时刻的吞吐量;  $\sum_{v_i \in E_{(s_i)}(v)} CP_{(v, v_i)} \cap \sum_{v_i \in E_{(s_{i+1})}(v)} CP_{(v, v_i)}$  表示节点  $v$  在  $S_i$  和  $S_{i+1}$  时刻吞吐量的交集;  $\sum_{v_i \in E_{(s_i)}(v)} CP_{(v, v_i)} \cup \sum_{v_i \in E_{(s_{i+1})}(v)} CP_{(v, v_i)}$  表示节点  $v$  在  $S_i$  和  $S_{i+1}$  时刻吞吐量的并集。网络从  $S_i$  到  $S_{i+1}$  变化则可定义为:

$$\tilde{\sigma}_{(s_i, s_{i+1})} = \left( \sum_{v \in V(OUT)} \tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v) + \sum_{v \in V(IN)} \tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v) + \sum_{v \in V(STABLE)} \tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v) \right) / \left( \left| CP(g_{s_i}) \cup CP(g_{s_{i+1}}) \right| \right) \quad (4)$$

式中:  $\tilde{\sigma}_{(s_i, s_{i+1})}$  表示基于吞吐量加权的网络变化计算值;  $\left| CP(g_{s_i}) \cup CP(g_{s_{i+1}}) \right|$  表示  $S_i$  和  $S_{i+1}$  时刻网络吞吐量的并集;  $\sum_{v \in V(STABLE)} \tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v)$  表示  $S_i$  到  $S_{i+1}$  时刻网络稳定节点变化的累积值;  $\sum_{v \in V(IN)} \tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v)$  表

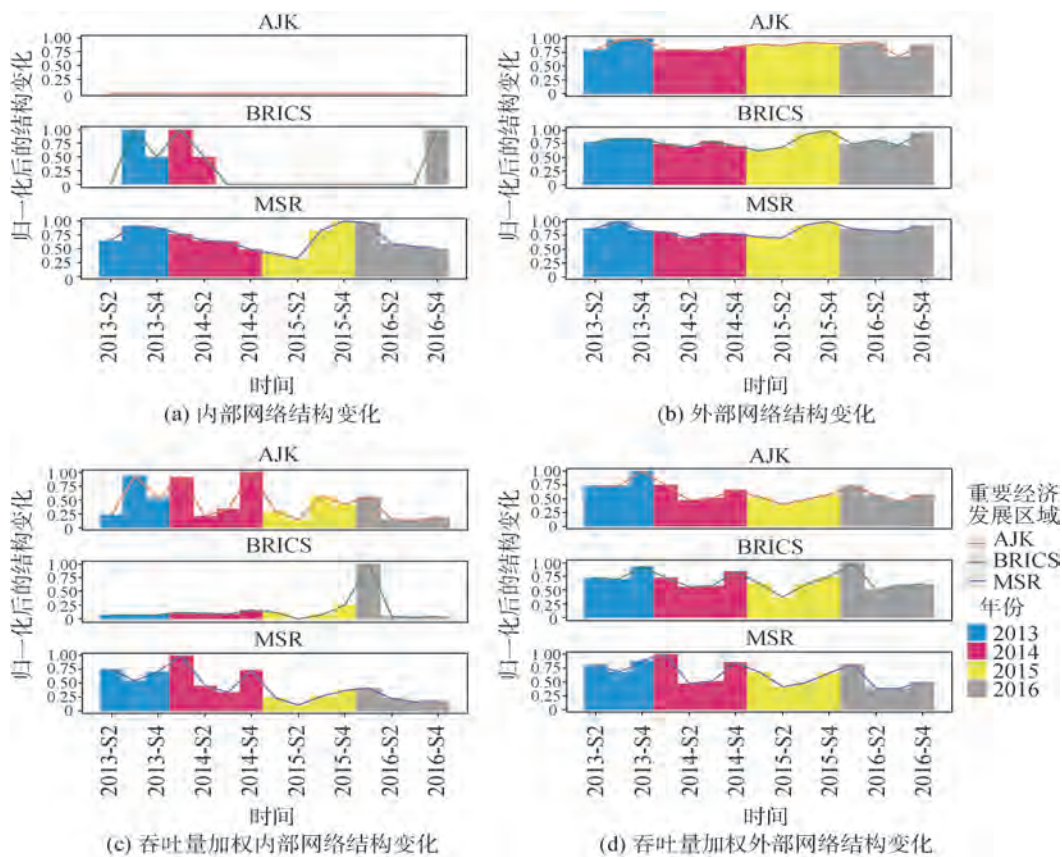
示  $S_i$  到  $S_{i+1}$  时刻网络新增节点变化的累积值;  $\sum_{v \in V(OUT)} \tilde{d}_{(s_i, s_{i+1})}(v)$  表示  $S_i$  到  $S_{i+1}$  时刻网络消亡节点变化的累积值。

## 4 研究结果

### 4.1 散货海运网络时空演变规律

图3表示重要经济发展区域散货型内部网络结构变化(图3(a))、外部网络结构变化(图3(b))、吞吐量加权内部网络结构变化(图3(c))和吞吐量加权外部网络结构变化(图3(d)),纵坐标表示这一季度较上一季度的变化值除以最大变化值进行归一化之后的结果。表1为3个区域的散货海运网络在2013–2016年的动态变化统计分析结果。可以发现:散货船型方面,AJK、BRICS和MSR的外部网络结构变化较为相似,内部网络结构变化差异较大。具体分析如下:

(1)AJK的内部网络结构在2013–2016年没有



注: S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>分布代表二、三、四季度

图3 重要经济发展区域间散货型海运网络时空演变规律

Fig. 3 evolution pattern of bulk-layer maritime networks between important economic developing zones

表1 重要经济发展区域间散货型2013–2016年网络结构变化统计分析表

Tab. 1 Statistics of bulk-layer maritime network dynamics between important economic developing zones from 2013 to 2016

类型	年份	AJK		BRICS		MSR	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
散货型内部网络结构变化	2013	0.000	0.000	0.500	0.500	0.812	0.148
	2014	0.000	0.000	0.375	0.479	0.632	0.112
	2015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.636	0.327
	2016	0.000	0.000	0.250	0.500	0.651	0.220
散货型吞吐量加权内部网络结构变化	2013	0.570	0.358	0.080	0.005	0.667	0.108
	2014	0.616	0.402	0.121	0.037	0.628	0.301
	2015	0.361	0.184	0.118	0.105	0.241	0.115
	2016	0.257	0.200	0.283	0.478	0.241	0.116
散货型外部网络结构变化	2013	0.926	0.110	0.826	0.038	0.903	0.087
	2014	0.808	0.033	0.741	0.041	0.772	0.052
	2015	0.905	0.023	0.807	0.178	0.840	0.149
	2016	0.847	0.119	0.811	0.097	0.866	0.046
散货型吞吐量加权外部网络结构变化	2013	0.823	0.153	0.790	0.128	0.785	0.109
	2014	0.602	0.128	0.680	0.134	0.707	0.263
	2015	0.494	0.070	0.587	0.154	0.558	0.126
	2016	0.581	0.119	0.674	0.221	0.520	0.210

变化,而MSR的变化明显大于AJK和BRICS。如:MSR在2013–2016年内部网络结构变化的年度均值依次为0.812、0.632、0.636、0.651, BRICS的内部网络结构变化年度均值依次为0.500、0.375、0和0.250,说明“一带一路”倡议的实施期间,MSR的散货型海运网络的内部网络结构发生了明显变化。AJK内部网络变化的均值和标准差都为0,说明AJK内部网络结构没有发生变化,非常稳定。

(2)AJK、BRICS和MSR的外部网络结构变化在每个季度相对上一季度变化都较大,且年度变化均值在0.74以上,说明“一带一路”倡议的实施期间,MSR的散货型海运网络的外部网络结构与BRICS、AJK没有明显差异。

(3)AJK和MSR的吞吐量加权的内部网络结构变化较为相似,都呈现2015–2016年较2013–2014年变化较小的趋势,如:AJK的2015、2016变化均值为0.361、0.25;MSR的2015、2016变化均值为0.241、0.241;AJK的2013、2014变化均值为0.570、0.616;MSR的2013、2014变化均值为0.667、0.628。而BRICS的吞吐量加权的内部网络结构变化与AJK、MSR差异较大,并在2016年第一季度出现峰值。说明“一带一路”倡议的实施期间,AJK和MSR的内部网络中的散货吞吐量发生了较大变化,但在2015–2016年这种变化逐渐减缓。

(4)2013–2016年AJK、BRICS和MSR的吞吐量加权的外部网络结构变化标准差在0.07–0.263之间,总体上每年的第一和第四季度较第二和第三季度变化较大,这3个区域的表现较为相似。说明“一带一路”倡议实施期间,AJK、BRICS和MSR的吞吐量加权的散货型外部网络结构变化没有明显差异。

4.2 集装箱海运网络时空演变规律

在集装箱船型方面,图4表示重要经济发展区域的内部网络结构变化(图4(a))、外部网络结构变化(图4(b))、吞吐量加权内部网络结构变化(图4(c))和吞吐量加权外部网络结构变化(图4(d)),纵坐标表示这一季度较上一季度的变化值除以最大变化值进行归一化之后的结果。表2表示重要经济发展区域集装箱型海运网络在2013–2016年的动态变化统计分析结果,发现:在集装箱船型方面,AJK、BRICS和MSR的外部网络结构的变化明显大于内部网络结构。

(1)AJK的内部网络结构在2013–2016年保持稳定,MSR的内部网络结构变化大于BRICS,如:MSR的年度变化均值依次为0.788、0.590、0.549、0.492, BRICS的年度变化均值依次为0.486、0.390、0.372和0.466。说明“一带一路”倡议实施期间,MSR的集装箱型海运网络的内部网络结构发生了明显变化。



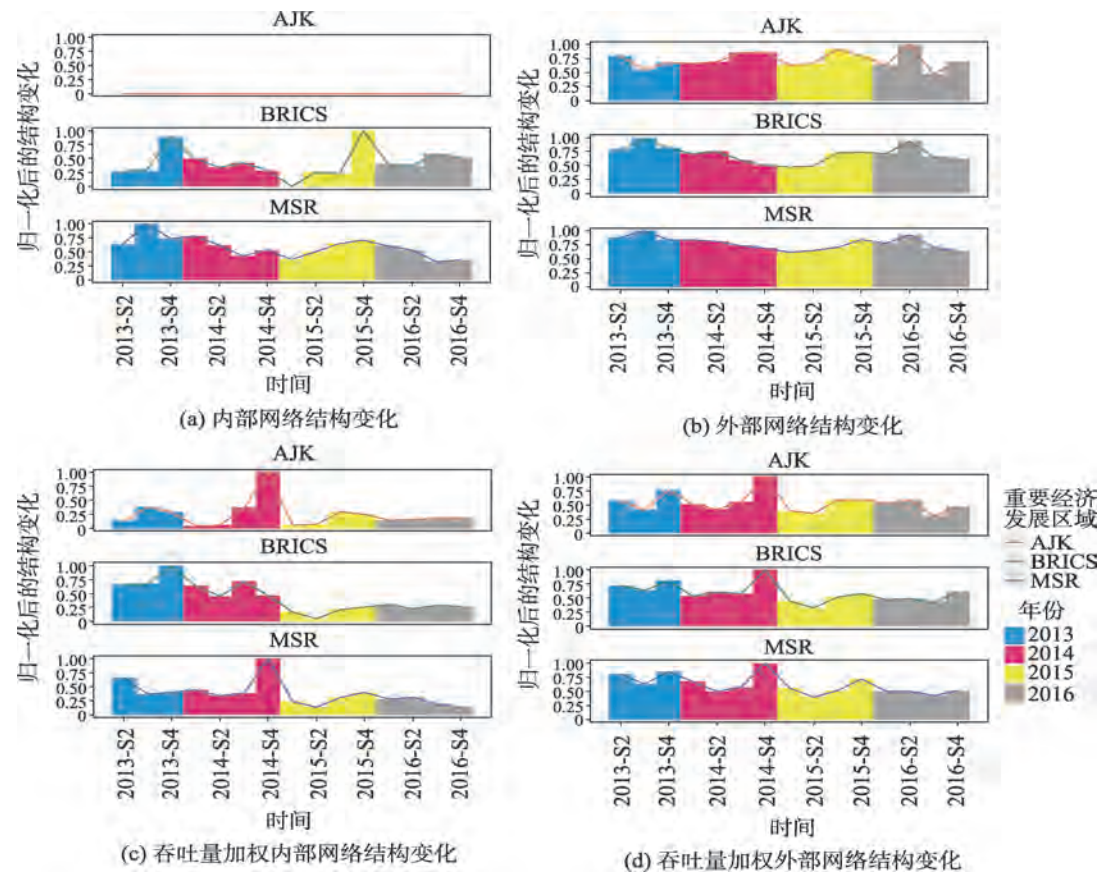


图4 重要经济发展区域间集装箱型海运网络时空演变规律  
Fig. 4 Evolution pattern of container-layer maritime networks between important economic developing zones

表2 重要经济发展区域间集装箱型2013–2016年网络结构变化统计分析表  
Tab. 2 Statistics of container-layer maritime network dynamics between important economic developing zones from 2013 to 2016

类型	年份	AJK		BRICS		MSR	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
集装箱型内部网络结构变化	2013	0.000	0.000	0.486	0.352	0.788	0.192
	2014	0.000	0.000	0.390	0.091	0.590	0.149
	2015	0.000	0.000	0.372	0.434	0.549	0.152
	2016	0.000	0.000	0.466	0.096	0.452	0.136
集装箱型吞吐量加权内部网络结构变化	2013	0.268	0.130	0.772	0.198	0.475	0.160
	2014	0.368	0.447	0.567	0.132	0.542	0.308
	2015	0.171	0.120	0.170	0.090	0.265	0.112
	2016	0.168	0.022	0.272	0.036	0.229	0.085
集装箱型外部网络结构变化	2013	0.670	0.127	0.867	0.117	0.906	0.083
	2014	0.762	0.102	0.646	0.115	0.762	0.066
	2015	0.749	0.126	0.610	0.142	0.700	0.095
	2016	0.701	0.220	0.732	0.140	0.762	0.125
集装箱型吞吐量加权外部网络结构变化	2013	0.580	0.182	0.723	0.087	0.767	0.117
	2014	0.623	0.258	0.683	0.213	0.687	0.220
	2015	0.480	0.128	0.468	0.106	0.543	0.134
	2016	0.471	0.120	0.501	0.075	0.479	0.040

(2)AJK、BRICS 和 MSR 的外部网络结构变化在 2013–2016 年都较大,波动均值在 0.61 以上,但 BRICS 和 MSR 的外部结构变化较为相似,AJK 与其他 2 个区域间存在一定差异。

(3)BRICS、AJK 和 MSR 的吞吐量加权的内部网络结构 2013–2014 年变化明显高于 2015–2016 年,说明“一带一路”倡议实施期间,AJK 和 MSR 的内部网络中的集装箱吞吐量在 2013–2014 年发生了较大变化,并且 2015–2016 年这种变化逐渐减缓。

(4)AJK、BRICS 和 MSR 吞吐量加权的外部海运网络在 2013–2016 年的年度变化均值呈现下降趋势,但是 2014 年这些区域的变化标准差最大(AJK 为 0.258、BRICS 为 0.213、MSR 为 0.220)。

### 4.3 油轮海运网络时空演变规律

在油轮船型方面,图 5 表示重要经济发展区域内部网络结构变化(图 5(a))、外部网络结构变化(图 5(b))、吞吐量加权内部网络结构变化(图 5(c))和吞吐量加权外部网络结构变化(图 5(d)),纵坐标

表示这一季度较上一季度的变化值除以最大变化值进行归一化之后的结果。表 3 表示重要经济发展区域油轮型海运网络在 2013–2016 年的动态变化统计分析结果。结合图 5 和表 3,可以发现:在油轮船型方面,AJK、BRICS 和 MSR 的内部网络结构变化差异较大,BRICS 和 MSR 的外部海运网络结构变化较为相似,吞吐量加权的内外部网络结构变化都呈现出 2015–2016 年明显小于 2013–2014 年的趋势。具体如下:

(1)AJK 的内部网络结构在 2013–2016 年没有变化,BRICS 的内部网络结构变化均值在 0.347 以上,标准差在 0.409 以上,MSR 的内部网络结构变化均值在 0.462 以上,标准差在 0.055 以上,而且 BRICS 的内部网络结构变化各个季度差异较大,规律性不明显。说明:“一带一路”倡议实施期间,AJK、BRICS 和 MSR 的内部网络结构变化差异较大,MSR 油轮型内部网络结构一直处于变化较大的状态。

(2)AJK、BRICS 和 MSR 的外部网络结构变化均值分别在 0.686–0.840、0.766–0.839、0.695–0.891

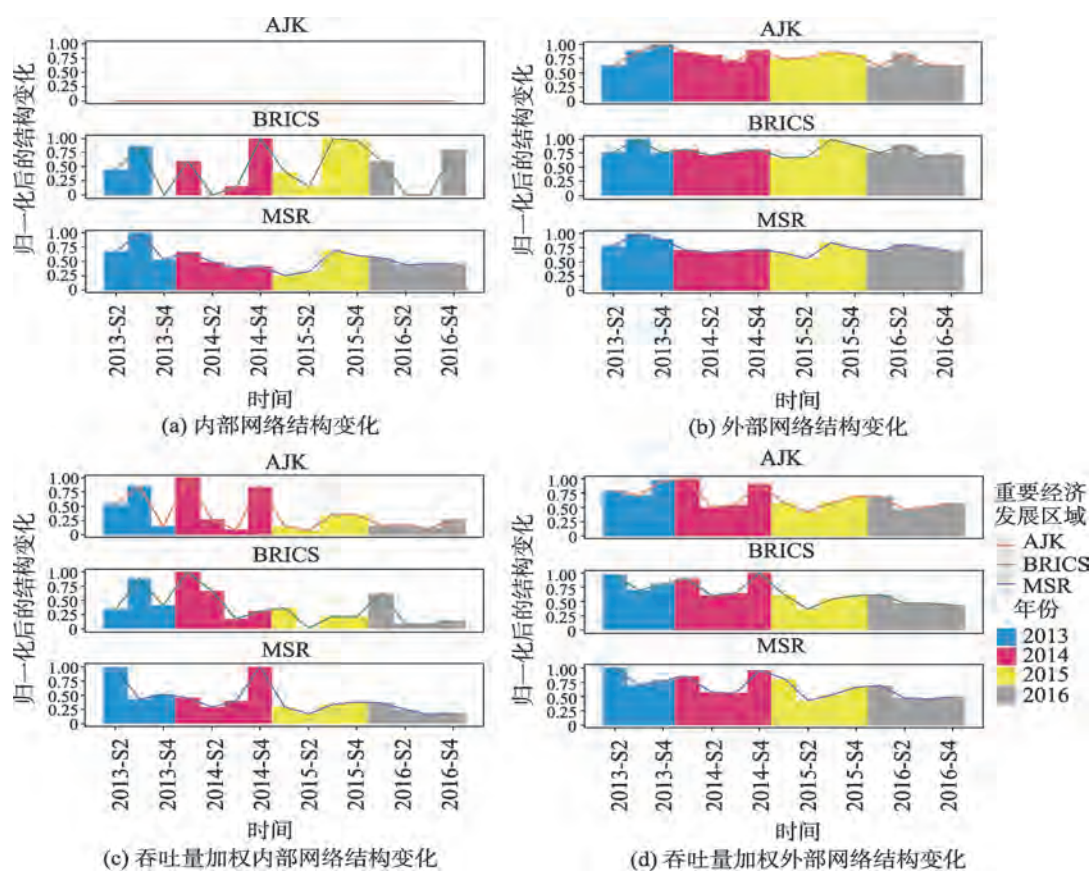


图 5 重要经济发展区域间油轮型海运网络时空演变规律

Fig. 5 Evolution pattern of tanker-layer maritime networks between important economic developing zones



表3 重要经济发展区域间油轮型 2013–2016 年网络结构变化统计分析表

Tab. 3 Statistics of tanker-layer maritime network dynamics between important economic developing zones from 2013 to 2016

类型	年份	AJK		BRICS		MSR	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
油轮型内部网络结构变化	2013	0.000	0.000	0.435	0.432	0.737	0.239
	2014	0.000	0.000	0.434	0.453	0.482	0.127
	2015	0.000	0.000	0.626	0.421	0.462	0.218
	2016	0.000	0.000	0.347	0.409	0.475	0.055
油轮型吞吐量加权内部网络结构变化	2013	0.502	0.354	0.550	0.299	0.638	0.297
	2014	0.548	0.439	0.538	0.368	0.534	0.318
	2015	0.228	0.142	0.207	0.146	0.296	0.091
	2016	0.169	0.069	0.235	0.259	0.238	0.092
油轮型外部网络结构变化	2013	0.840	0.188	0.839	0.139	0.891	0.113
	2014	0.825	0.084	0.779	0.049	0.695	0.024
	2015	0.804	0.056	0.808	0.164	0.695	0.116
	2016	0.686	0.104	0.766	0.085	0.733	0.061
油轮型吞吐量加权外部网络结构变化	2013	0.823	0.131	0.828	0.143	0.638	0.297
	2014	0.736	0.255	0.791	0.188	0.534	0.318
	2015	0.572	0.106	0.538	0.119	0.296	0.091
	2016	0.556	0.101	0.507	0.074	0.238	0.092

之间,标准差分别在 0.056–0.188、0.049–0.164、0.024–0.116 之间,并且各个季度的变化值都较大。“一带一路”倡议实施期间,AJK、BRICS 和 MSR 的油轮型外部网络结构变化都很大。

(3)AJK、BRICS 和 MSR 的吞吐量加权的内部网络结构变化较为相似,2013–2014 年的变化的均值和标准差都大于 2015–2016 年,而且各个季度变化值的差异也较大。“一带一路”倡议实施期间,重要经济发展区域内部网络结构的油轮吞吐量发生了较大变化,并在 2015–2016 年呈现减缓趋势。

(4)AJK、BRICS 和 MSR 的吞吐量加权外部网络结构变化在 2013 年各季度变化均值分别为 0.823、0.828、0.638,2014 年为 0.736、0.791、0.534,2015 年为 0.572、0.538、0.296,2016 年为 0.556、0.507 和 0.238。说明 AJK、BRICS 吞吐量加权外部网络结构变化明显大于 MSR,并且 3 个区域外部网络结构的油轮吞吐量变化在 2013–2014 年较大,2015–2016 年变化呈现减缓趋势。

5 结论

本文利用 AIS 挖掘 AJK、BRICS 和 MSR 的海运网络时空演变规律,为及时分析和评估国际重大事件对海洋贸易的影响提供了方法支撑,对国家层面的科学决策和战略应对具有深远意义。本文研究

结果表明:

(1)MSR 散货、集装箱、油轮型的内外部网络结构 2013–2016 年发生了较大的变化,说明“一带一路”倡议一定程度上影响了 MSR 的贸易结构。但在 2015–2016 年 MSR 3 种类型的吞吐量加权海运网络变化较 2013–2014 年逐渐减缓,说明此倡议虽然对 MSR 的贸易结构影响较大,但贸易结构的改变对吞吐量的影响却在减缓。提高 MSR 的海运贸易吞吐量,提升 MSR 在海运网络中的贸易地位,仍是当前的发展重点。

(2)BRICS 散货、集装箱、油轮型的内部网络结构变化差异明显,说明“一带一路”倡议对 BRICS 内部不同类型的海运网络结构变化产生的影响不同。BRICS 3 种类型的外部海运网络变化与 MSR 较为相似,反映此倡议一定程度上影响了 BRICS 的外部贸易结构。

(3)AJK 散货、集装箱、油轮型的内部网络结构 2013–2016 年保持稳定,说明“一带一路”倡议对 AJK 的内部贸易结构并没有产生显著影响。AJK 3 种类型的外部海运网络结构变化与 MSR 存在一定的差异,说明“一带一路”倡议影响了 AJK 与部分其它国家的贸易结构。

由于缺乏具体的船舶卸货–装货量,本文在计算吞吐量时假设船舶是满载的,后续分析需结合更加精细的数据进一步深入研究。

## 参考文献(References):

- [1] Fremont A. Global maritime networks the case of maersk [J]. *Journal of Transport Geography*, 2007, 15: 431-442.
- [2] Ducruet C, Zaidi F. Maritime constellations: A complex network approach to shipping and ports[J]. *Maritime Policy & Management*, 2012, 39(2): 151-168.
- [3] Caschili S, Medda F, Parola F, et al. An analysis of shipping agreements: The cooperative container network[J]. *Networks & Spatial Economics*, 2014, 14(3-4): 357-377.
- [4] Song D P, Zhang J, Carter J, et al. On cost-efficiency of the global container shipping network[J]. *Maritime Policy & Management*, 2005, 32(1): 15-30.
- [5] Jiang J, Lee L H, Chew E P, et al. Port connectivity study: An analysis framework from a global container liner shipping network perspective[J]. *Transportation Research Part E*, 2015, 73: 47-64.
- [6] 徐梦俏, 李振福, 史砚磊, 等. 世界集装箱海运网络空间联系强度[J]. *上海海事大学学报*, 2015, 36(3): 6-12. [ Xu M Q, Li Z F, Shi Y L, et al. Spatial linkage of global container shipping network[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2015, 36(3): 6-12. ]
- [7] Ducruet C, Notteboom T. The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics [J]. *Global Networks*, 2012, 12(3): 395-423.
- [8] Ducruet C. Multilayer dynamics of complex spatial networks: The case of global maritime flows (1977-2008) [J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 60: 47-58.
- [9] Yu H C, Fang Z X, Peng G J, et al. Revealing the linkage network dynamic structures of Chinese maritime ports through automatic information system data[J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1913.
- [10] Ducruet C. *Maritime network spatial structure and time dynamics*[M]. New York: Routledge, 2016.
- [11] Liu C L, Wang J Q, Zhang H. Spatial heterogeneity of ports in the global maritime network detected by weighted ego network analysis[J]. *Maritime Policy & Management*, 2018, 45(1): 89-104.
- [12] 李振福, 史砚磊, 徐梦俏, 等. 世界海运网络异质性研究[J]. *中国科技论文*, 2016, 11(7): 793-797. [ Li Z F, Shi Y L, Xu M Q, et al. Heterogeneity of global shipping network[J]. *China Science Paper*, 2016, 11(7): 793-797. ]
- [13] 李振福, 李贺, 徐梦俏, 等. 世界海运网络可达性对比研究[J]. *大连海事大学学报*, 2014, 40(1): 101-104. [ Li Z F, Li H, Xu M Q, et al. Comparison research on reachability of the global shipping network[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(1): 101-104. ]
- [14] Ducruet C, Lee S W, Roussin S. Local strength and global weakness: A maritime network perspective on South Korea as Northeast Asia's logistics hub[J]. *International Journal of Maritime Affairs and Fisheries*, 2009, 1(1): 32-50.
- [15] Hu Y H, Zhu D L. Empirical analysis of the worldwide maritime transport network[J]. *Physica A*, 2009, 388: 2061-2071.
- [16] Fugazza M, Hoffmann J. Liner shipping connectivity as determinant of trade[J]. *Journal of Shipping and Trade*, 2017, 2(1): 1.
- [17] Ducruet C. Network diversity and maritime flows[J]. *Journal of Transport Geography*, 2013, 30: 77-88.
- [18] Dinwoodie J, Tuck S, Rigot- Müller P. Maritime oil freight flows to 2050: Delphi perceptions of maritime specialists[J]. *Energy Policy*, 2013, 63: 553-561.
- [19] Laxe F G, Seoane M J F, Montes C P. Maritime degree, centrality and vulnerability: Port hierarchies and emerging areas in containerized transport (2008-2010)[J]. *Journal of Transport Geography*, 2012, 24: 33-44.
- [20] Viljoen N M, Joubert J W. The vulnerability of the global container-shipping network to targeted link disruption[J]. *Physica A*, 2016, 462: 396-409.
- [21] 吴迪, 王诺, 吴暖, 等. 主航道中断背景下集装箱海运网络的脆弱性及其对中国的影响[J]. *地理研究*, 2017, 36(4): 719-730. [ Wu D, Wang N, Wu N, et al. The impact of main channel interruption on vulnerability of container shipping network and China container shipping[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 719-730. ]
- [22] 王诺, 董玲玲, 吴暖, 等. 蓄意攻击下全球集装箱海运网络脆弱性变化[J]. *地理学报*, 2016, 71(2): 293-303. [ Wang N, Dong L L, Wu N, et al. The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 293-303. ]
- [23] Jiang J, Lee L H, Chew E P, et al. Port connectivity study: An analysis framework from a global container liner shipping network perspective[J]. *Transportation Research Part E*, 2015, 73: 47-64.
- [24] 田炜, 邓贵仕, 武佩剑, 等. 世界航运网络复杂性分析[J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(4): 605-609. [ Tian W, Deng S G, Wu P J, et al. Analysis of complexity in global shipping network [J]. *Journal-Dalian University of Technology*, 2007, 47(4): 605-609. ]
- [25] 刘婵娟, 胡志华. “海上丝绸之路”海运网络层次体系划分[J]. *经济地理*, 2017, 37(7): 27-32. [ Liu C J, Hu Z H. Hierarchy system research about the maritime silk road shipping network[J]. *Economic Geography*, 2017, 37(7): 27-32. ]
- [26] Xu M Q, Li Z F, Shi Y L, et al. Evolution of regional inequality in the global shipping network[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 44: 1-12.
- [27] 彭澎, 程诗奋, 刘希亮, 等. 全球海洋运输网络健壮性评估[J]. *地理学报*, 2017, 72(12): 2241-2251. [ Peng P, Cheng S

- F, Liu X L, et al. The robustness evaluation of global maritime transport networks[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(12):2241-2251. ]
- [28] Wang C J, Wang J E. Spatial pattern of the global shipping network and its hub-and-spoke system[J]. *Research in Transportation Economics*, 2011,32(1):54-63.
- [29] Vad Karsten C, Brouer B D, Pisinger D. Competitive liner shipping network design[J]. *Computers & Operations Research*, 2017,87:125-136.
- [30] Fahmiasari H, Parikesit D. Container shipping network efficiency comparison in indonesia: Nusantara Pendulum and Sea Tollway[J]. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 2017,33(2):79-80.
- [31] Lee H, Boile M, Theofanis S, et al. Modeling the oligopolistic and competitive behavior of carriers in maritime freight transportation networks[J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012,54:1080-1094.
- [32] Song D W, Lee P T W. Maritime logistics in the global supply chain[J]. *International Journal of Logistics Research and Applications* 2009,12(2):83-84.
- [33] Davarzani H, Fahimnia B, Bell M, et al. Greening ports and maritime logistics: A review[J]. *Transportation Research Part D*, 2016,48:473-487.
- [34] Stopford M. *Maritime economics*[M]. London and New York: Routledge, 2009.
- [35] Akhtar M J, Utne I B. Human fatigue's effect on the risk of maritime groundings A Bayesian Network modeling approach[J]. *Safety Science*, 2014,62:427-440.
- [36] Hänninen M, Banda O A V, Kujala P. Bayesian network model of maritime safety management[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014,41:7837-7846.
- [37] Bezgodov A, Esin D. Complex network modeling for maritime search and rescue operations[J]. *Procedia Computer Science*, 2014,29:2325-2335.
- [38] Fransoo J C, Lee C Y. The critical role of ocean container transport in global supply chain performance[J]. *Production & Operations Management*, 2013,22(2):253-268.
- [39] Wilmsmeier G, Notteboom T. Determinants of liner shipping network configuration: A two-region comparison[J]. *Geojournal*, 2011,76(3):213-228.
- [40] Hägerstrand T. *The Propagation of Innovation Waves*[M]. Lund: Royal University of Lund, 1952.
- [41] Notteboom T E. The peripheral port challenge in container port systems[C]. *International Maritime Transport: Perspectives*, 2005:173-188.
- [42] Wilmsmeier G, Monios J, Pérez-Salas G. Port system evolution: The case of latin america and the caribbean[J]. *Journal of Transport Geography*, 2014,39:208-221.
- [43] Monios J, Wilmsmeier G. Giving a direction to port regionalization[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012,46(10):1551-1561.
- [44] Monios J; Wilmsmeier G. Port-centric logistics, dry ports and offshore logistics hubs: Strategies to overcome double peripherality[J]. *Maritime Policy & Management*, 2012,39(2):207-226.
- [45] Kosowska-Stamirowska Z, Ducruet C, Rai N. Evolving structure of the maritime trade network: Evidence from the Lloyd's Shipping Index (1890-2000) [J]. *Journal of Shipping and Trade*, 2016,1:10.
- [46] 吴斌,王柏,杨胜琦.基于事件的社会网络演化分析方法[J]. *软件学报*,2011,22(7):1488-1502. [ Wu B, Wang B, Yang S Q. Framework for tracking the event-based evolution in social networks[J]. *Journal of Software*, 2011,22(7):1488-1502. ]