

引用格式:何瑶,杨永春,郭建科. 中断模拟下的中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 414-424. [He Y, Yang Y C, Guo J K. Vulnerability of the shipping network of China's coastal container ports under disruption simulation[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 414-424.] DOI: 10.18402/resci.2022.02.16

# 中断模拟下的中国沿海集装箱港口 航运网络脆弱性

何瑶<sup>1</sup>, 杨永春<sup>1,2</sup>, 郭建科<sup>3,4</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;  
3. 辽宁师范大学海洋可持续发展研究院, 大连 116029; 4. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展  
研究中心, 大连 116029)

**摘要:**双循环背景下,国内消费市场的持续扩大有望进一步增加港口内贸集装箱比例,而海洋集装箱运输极易受到外界因素的影响,因此对国内海洋集装箱运输网络脆弱性的研究必要而紧迫。本文在港口中断模拟下,运用复杂网络特征指标从网络结构和节点抗干扰性能两方面,分析2005年和2017年中国沿海集装箱港口航运网络脆弱性,并探讨脆弱性的主要影响因素。结果表明:①相较于2005年,2017年有较高比例的节点分别失效,使网络集聚系数上升、平均路径长度减小和网络独立路径数量增大,这表明当网络中有较多节点分别中断失效,剩余节点仍具有紧密联系,具有较多备用路径,能够以较快反应速度顺利应对干扰。港口节点间的平均路径长度、支路数量和联系受到同步影响,产生叠加效应。②2017年,最大干扰状态下港口的抗干扰性能差异较2005年减小。轴辐模式下枢纽港作用增强,上海港和深圳港的中断使网络中节点处于最大干扰状态下的比例增加,脆弱性节点增多。③航运网络脆弱性的影响因素突出表现在外界多种不可抗拒的自然和人文因素导致网络节点瞬时中断、轴辐式航运组织模式的强化、区域竞合与一体化的发展三方面。本文结果对于认清国内航运网络的脆弱性及影响因素、保障港口间有效联通和提升航运网络安全性具有理论和现实意义。

**关键词:**中国沿海港口;航运网络;中断模拟;脆弱性;抗干扰性能;集装箱

DOI: 10.18402/resci.2022.02.16

## 1 引言

海洋运输因其运力大、运费低、利用天然航道等特点,是国际物流中最重要的运输方式,占全球贸易运输的90%<sup>[1]</sup>,对国际间经济交流影响重大。2019年中国集装箱吞吐量总额达2.61亿TEU,其中主要港口内贸集装箱吞吐量约7572.7万TEU,占全国港口集装箱总量的36.87%。在以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新格局下,国内产能将得以充分释放;海洋集装箱运输作为物流中的主要运输方式,国内消费市场的持续扩大将进一

步增加港口内贸集装箱比例。海洋运输易受外界因素的影响,对中国海洋运输网络的脆弱性有必要进行深入研究。

在地学领域,脆弱性的概念由Timmerman<sup>[2]</sup>在1981年提出,并被广泛扩展到生态学、经济学等领域<sup>[3-5]</sup>。在交通领域,学者们认为交通运输的脆弱性与对抗动的敏感性密切相关,并将交通网络的脆弱性定义为网络受到攻击或局部失效时对网络连通性的影响程度,主要关注当某些节点或路径等要素,失效或出现扰动的情況下对系统整体的影

收稿日期: 2021-06-29; 修订日期: 2021-11-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971198); 教育部人文社会科学研究项目(18YJCZH246)。

作者简介: 何瑶,女,山西运城人,博士研究生,研究方向城市网络与交通网络。E-mail: heyao1116@163.com

通讯作者: 杨永春,男,陕西白水人,教授,博士生导师,研究方向为城市与区域发展规划。E-mail: yangych@lzu.edu.cn

2022年2月

响<sup>[6-8]</sup>。学者们在交通运输的不同方向有着较多研究,这包括不同交通网络的复杂性特征<sup>[9]</sup>、铁路网络的空间通达性和拓扑特性<sup>[10]</sup>、航空网络的空间组织结构<sup>[11,12]</sup>、空铁复合网络遭受攻击时系统的失效过程<sup>[13]</sup>以及港口航运网络研究<sup>[8,14-16]</sup>等。具体从港口航运网络研究上看,目前研究较多是基于复杂网络理论构建港口航运网络模型<sup>[17]</sup>。这种方法视港口为负责船舶的停泊和货物的装卸的节点,视运输路线为连接不同节点港口的通道,研究内容主要包括网络的空间结构特征、动态特征和流动<sup>[18-20]</sup>。港口集装箱航运网络脆弱性研究主要分两个方向:①仿真模拟攻击下的航运网络:Wang等<sup>[21]</sup>使用节点移除策略模拟随机误差和有针对性的攻击,用两种方法研究了集装箱航运网络的不同响应;王列辉等<sup>[22]</sup>采用随机和蓄意攻击两种方式分析了中美集装箱航运网络格局演化与脆弱性;Guo等<sup>[23]</sup>对蓄意攻击下中日韩集装箱航运网络进行了分析;吴迪等<sup>[8]</sup>则对比了蓄意攻击和随机攻击下丝路海运网络的脆弱性及风险控制。②自然灾害或特殊事件下的航运网络:Shen等<sup>[24]</sup>调查西北太平洋和北印度洋的海洋网络对热带气旋的影响的脆弱性,并试图识别通过该网络连接的国家中最脆弱的港口系统;Fang等<sup>[25]</sup>研究了受国际事件例如军事冲突、解除经济制裁和政府选举等对全球海洋网络动态的影响。

航运网络的脆弱性是影响航运可持续发展的重要因素之一。目前,集装箱航运网络脆弱性的分析方法主要集中为蓄意攻击与随机攻击等持续性攻击<sup>[21-23]</sup>,对非持续性攻击的研究较少。然而,现实中突发的自然和人为灾害极易造成网络中某一节点的中断,从而影响其余港口运行,产生较为严重的后果。中断模拟指以网络中的某一节点为攻击对象,每次模拟一个节点失效时,该节点及所连接路径被删除的网络中断情景,以此完成对样本内所有节点的仿真攻击<sup>[26]</sup>。这一方法可以较好地模拟航运网络中某一港口受到攻击中断的情景。因此,有必要使用中断模拟分析航运网络脆弱性,进一步丰富航运网络脆弱性的研究方法。此外,学者们常从国际区域进行个别年份的脆弱性研究<sup>[22,23]</sup>,对国内航运网络的脆弱性及其演变分析较少。鉴于此,本文以中国沿海港口集装箱航运为例,运用复杂网络理论建立航运网络,选取复杂网络中的特征指标,

从网络空间视角探讨港口中断模拟下,2005年和2017年中国沿海集装箱港口航运网络结构的脆弱性及节点的抗干扰性能变化特征,并分析沿海集装箱航运网络脆弱性的主要影响因素,进而预测航运网络潜在风险及提出相应对策,对保障国内沿海港口有序运营、提高海洋运输效率和增强海洋运输基础设施投资的决策科学性具有重要意义。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源及网络构建

本文以中国沿海港口为节点,港口间的航线为边权,建立中国沿海集装箱港口加权航运网络,由于部分指标计算需要,本文将节点间存在航线联系的计为1,无联系的计为0,同时构建中国沿海集装箱港口无权航运网络。考虑到集装箱的规模效应,港口样本主要指2017年吞吐量大于10万TEU的港口。港口间航线来源于《中国港口年鉴》(2006年、2018年)及由国家发改委主管、中国交通运输协会主办的货物航运信息周刊《中国航务周刊》中主要班轮公司(中远、中海、马士基、地中海、阳明海运、以星航运、上海泛亚等)船期表(2005年、2017年),共搜集2005年航线1361条,2017年航线1563条。通过合并筛掉重复航线,整理出所有样本港口的航线(包括内贸航线及外贸内支航线),分别依次测度2005和2017年的中国沿海集装箱港口航运网络在某一港口中断失效情景下航运网络结构及港口节点特征值的变化,进行中国沿海集装箱港口航运网络的脆弱性及节点抗干扰能力分析,并探究主要的脆弱性影响因素。

### 2.2 研究方法

中断模拟及特征值计算均借助MATLAB R2019b软件,在依次模拟中国港口航运网络中的每一港口中断的基础上计算特征指标。

#### 2.2.1 网络特征指标

本文主要通过计算节点中断后网络集聚性、运输性及多样性特征值的变化,来测度航运网络结构的脆弱性。

##### (1)网络集聚性

以集聚系数表征。节点集聚系数指节点 $i$ 与其所有邻接点之间连接边的数目与可能的最大连接边的数目的比值,是反映网络节点集聚情况的参数;网络的集聚系数指所有节点集聚系数的平均

值,系数越大,说明该网络节点间的联系越紧密<sup>[27]</sup>。其计算公式如下:

$$C_i = \frac{2E_i}{K_i(K_i - 1)} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i \in N} C_i \quad (2)$$

式中:  $C_i$  为节点集聚系数;  $E_i$  为与节点  $i$  的  $K_i$  个邻居节点之间实际存在的边数;  $K_i$  为节点  $i$  的度, 即与节点  $i$  联系的节点数量;  $C$  为网络集聚系数;  $n$  为网络节点个数;  $N$  为网络中的节点集合。

### (2) 网络多样性

以平均独立路径数量表征<sup>[28]</sup>。节点  $i$  到节点  $j$  的独立路径数指节点  $i$  到达节点  $j$  的所有路径, 且路径之间不存在相同的边。港口航运网络的多样性是网络容错能力的描述, 反映在空间结构上主要是指港口间存在多种联系路径, 当某个特定路径受到危机的影响, 其他独立路径保障了网络正常运行, 从而有效维持网络稳定。因此, 港口航运网络的多样性取决于两个港口之间是否存在独立于常用路径之外的其他支路。其计算公式如下:

$$V_G = \frac{\sum_{i \neq j \in G} b_{ij}}{n(n-1)} \quad (3)$$

式中:  $V_G$  为平均独立路径数量;  $G$  为所构建的航运网络;  $b_{ij}$  为网络中节点  $i$  与节点  $j$  之间的独立路径数量。

### (3) 网络传输性

以平均路径长度表征。平均路径长度指网络中任意两个节点间最短路径长度的平均值, 刻画了航运网络中要素流扩散能力。网络拥有较高的传输性表明网络中节点在信息和货物等要素交换时的速度更快, 便于港口之间交流学习、协调发展, 促进区域整体抵抗力提升。其计算公式如下:

$$L = \frac{1}{1/2n(n+1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (4)$$

式中:  $L$  为网络的平均路径长度;  $d_{ij}$  为无权网络中节点  $i$  到节点  $j$  的最短路径。

#### 2.2.2 节点特征指标

由于航运组织模式不断调整, 不同港口节点在网络中的作用也不相同。在中断模拟下, 某一节点失效, 会影响剩余节点作用及航线运输, 剩余节点会自我寻找与其余节点的联系, 节点具有一定的自

我调节机制, 即抗干扰性能。节点的功能值在其他节点失效下产生不同程度衰减, 当节点的功能值下降为最小时, 称其为该节点的最大干扰状态, 并将最大干扰状态下节点的功能值较原始的变化幅度作为该节点的抗干扰性能指数。一般情况下, 使节点在最大干扰状态下的失效节点仅有一个。港口节点最大干扰状态下节点功能值的变化幅度越大, 表明其抗干扰性能越弱, 反之则越强。

本文将分别通过计算各节点的辐射功能、中转功能和深度的抗干扰性能指数, 来测度节点抗干扰性能。

#### (1) 辐射功能

以加权邻近中心性表征。加权邻近中心性指给定节点到其他所有节点的加权最短路径之和的倒数乘以其他节点个数, 反映该节点在网络中的间接可达性, 即对邻近港口的辐射能力<sup>[27]</sup>。其计算公式如下:

$$d_{ij}^w = \min \left\{ \frac{1}{w_{ih}} + \dots + \frac{1}{w_{hj}} \right\} \quad (5)$$

$$WCC_i = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij}^w \right]^{-1} \quad (6)$$

式中:  $d_{ij}^w$  为在加权网络中任意两节点间最短路径长度;  $w_{ij}$  为节点  $i, j$  之间航线连接的数量;  $WCC_i$  为加权邻近中心性。

#### (2) 中转功能

以加权介数中心性表征。加权介数中心性指用所有节点对间的加权最短路径经过给定节点的次数和, 反映节点在网络中的中转和衔接功能, 同时可以反映“轴辐式结构中轴心作用的强弱<sup>[27]</sup>”。其计算公式如下:

$$WBC_i = \frac{\sum_{k \neq i \neq j} \frac{m_{ki}(i)}{m_{kj}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{k \neq i \neq j} \frac{m_{kj}(i)}{m_{kj}}} \quad (7)$$

式中:  $WBC_i$  为节点加权介数中心性;  $m_{kj}$  为节点  $k$  与节点  $j$  之间加权最短路径数量和;  $m_{ki}(i)$  为节点  $k$  与节点  $j$  之间加权最短路径经过节点  $i$  的次数。

#### (3) 深度

以单位权表征。单位权表示节点连接的平均权重, 即节点与所联系节点之间的平均强度, 反映节点联系的深度<sup>[27]</sup>。其计算公式如下:



2022年2月

$$U_i = \frac{S_i}{K_i} \quad (8)$$

式中:  $U_i$  为节点的单位权;  $S_i$  为节点  $i$  与其余节点的航线联系总和;  $K_i$  为节点  $i$  的度。

### 2.2.3 相关性及层级划分方法

为剖析节点脆弱性之间的相关性,借助 SPSS 中的相关分析模块,分别进行中断模拟下网络多样性下降值、网络集聚性下降值和网络传输性下降值任意两者之间的 Pearson 相关分析。

为清晰对比不同港口的不同功能的抗干扰性能层级变化,根据《全国沿海港口布局规划》和 2017 年港口集装箱规模,将港口分为枢纽港(大于 900 万 TEU)、大型港(大于 100 万 TEU)和地方港 3 类<sup>[27]</sup>。同时利用 ArcGIS 中的自然断点法分别将 2005 年和 2017 年各功能的抗干扰性能指数分为 5 级<sup>①</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 网络结构脆弱性分析

#### 3.1.1 网络集聚性

2005 年和 2017 年航运网络的集聚系数分别为 0.738 和 0.768,网络集聚程度上升;且相较于 Guo 等<sup>[23]</sup>对 2015 年中、日、韩集装箱网络的研究,本文中网络的集聚系数相对较大。集聚系数越大,表明网络中越多的港口节点与其相邻的港口间存在紧密的联系,这有利于港口间信任氛围的产生和机会主义的减少。

某一节点失效后网络集聚系数上升,表明剩余节点仍具有紧密联系。在依次模拟各节点失效后,发现 2005 年使网络集聚系数上升的失效节点比例为 39.47%,2017 年该比例上升至 48.89%。这表明 2017 年有更多的港口节点在分别受到攻击而失效后,网络剩余节点间的联系始终较为紧密,网络抵抗风险的能力增强。

#### 3.1.2 网络多样性

2005 年和 2017 年航运网络的独立路径数量分别为 9.485 和 12.241。与此同时,集装箱港口数量由 2005 年的 38 个增长至 2017 年的 45 个,虽然增加的多为联系较弱的边缘港口,但整体上沿海港口间独立路径的数量仍在增加,表明港口间的容错能力增

强,当港口节点间某一条路径遭受攻击时,具有较多的备用路径连通节点。

某一港口节点失效后网络独立路径数量增大,表明剩余节点具有较多的备用路径可以快速调整航线进行运输。在依次模拟各节点失效后,发现 2005 年使网络独立路径数量增大的失效节点比例为 24.44%,2017 年该比例上升至 33.33%。这表明 2017 年有更多的港口节点在分别受到攻击而失效后,网络剩余节点始终具有较多的备用路径保障网络正常运行,网络稳定性增强。

#### 3.1.3 网络传输性

2005 年和 2017 年网络的平均路径长度分别为 1.679 和 1.625,网络平均路径长度减小,网络运输性提高;与前人研究<sup>[23]</sup>中的集装箱网络平均路径相比,本文中网络的平均路径长度更小,集装物流的传递在节点之间的中转小于 2。运输性的提高和较小的平均路径长度既有利于集装转运的便利,也有利于港口间人员、信息及相关技术的传递,降低整体网络的脆弱性。

某一港口节点失效后网络平均路径长度减小,表明剩余节点能快速对外部变化作出响应,顺利应对干扰;同时网络平均路径长度越小,网络节点间的路径中转越少,该路径在面对冲击时其可靠性越高<sup>[29]</sup>。在依次模拟各节点失效后,发现 2005 年使网络平均路径长度减小的失效节点比例为 47.37%,2017 年该比例上升至 48.89%,这表明 2017 年有更多的港口节点在分别受到攻击而失效后,网络剩余节点间的路径中转始终较少,网络节点间路径的可靠性提高,网络应对干扰的能力提升。

综上所述,相较于 2005 年,2017 年网络的集聚性、多样性和传输性均有所上升,且中断模拟情境下,较高比例的节点分别失效使网络节点的集聚性、多样性和传输性上升。因此,2017 年的网络脆弱性各方面较 2005 年均减小。

### 3.2 网络结构脆弱性特征相关性分析

2005 年和 2017 年,网络多样性下降值与网络集聚性下降值之间均呈现显著正相关(相关系数  $R$  分别为 0.679 和 0.553),网络多样性下降值与网络传输

① 具体分级标准如下:辐射功能抗干扰性能指数:一级 0.000~0.068,二级 0.069~0.122,三级 0.123~0.283,四级 0.284~0.472,五级 0.473~1.000;中转功能抗干扰性能指数:一级 0.000~0.126,二级 0.127~0.449,三级 0.450~0.740,四级 0.741~1.000,五级为加权介数中心性值始终为 0 的港口,即始终无中转功能;深度抗干扰性能指数:一级 0.000~0.087,二级 0.088~0.160,三级 0.161~0.250,四级 0.251~0.363,五级 0.364~1.000。

性下降值也显著正相关( $R_{2005}=0.555, R_{2017}=0.822$ );同时,网络集聚性下降值与网络传输性下降值呈现显著正相关( $R_{2005}=0.509, R_{2017}=0.637$ )。上述显著性检验值均小于0.01。

各特征值之间均存在相关性,这表明:①灾害或者危机发生导致某一港口节点中断时,港口间的路径长度、支路数量和港口之间的联系通常同步受到影响,港口节点与其余节点间的联系减少,调整航线的备用路径减少,港口间联系交流的成本增加,从而产生“叠加效应”,暴露出航运网络结构的脆弱性。②“叠加效应”也表明网络中一些重要节点既是节点间快速中转的重要节点,也是港口间航线多样化联系的关键节点,重要性更加凸显。③相较于2005年,2017年的相关性系数除网络多样性下降值与网络集聚性下降值的相关性系数略微下降,其余均上升。“叠加效应”增强,网络中某些节点作用进一步提升,航运网络结构的风险性增强。

### 3.3 网络节点抗干扰性能分析

#### 3.3.1 节点抗干扰性能指数的位序—规模特征

图1表明港口节点的各项抗干扰性能指数的位序—规模分布特征明显,节点各项抗干扰性能向均衡化方向发展。将各节点按照其抗干扰性能指数从高到低排列,可以发现:①2005年中转功能抗干扰性能指数在各节点间的变化速率为0.176,是辐射功能的2.88倍,深度的3.32倍。2017年,中转功能抗干扰性能指数在各节点间的变化速率为0.108,是辐射功能的2.30倍,是深度的3.27倍。这表明相较于辐射功能和深度,节点中转功能的抗干扰性能差异更大。②2005—2017年,节点辐射功能的抗干扰性能指数变化速率由0.061下降为0.047,下降了22.95%;节点中转功能的抗干扰性能指数的

变化速率由0.176下降为0.108,下降了38.64%;节点深度的抗干扰性能指数的变化速率由0.053下降为0.033,下降了37.74%。这表明,网络节点整体抗干扰性能指数的变化速率呈现下降趋势,各功能的抗干扰性能的差异减小。综上,2017年港口数量增多,原本属于边缘位置的港口不断发展壮大,持续巩固与全国性枢纽港和区域大型港的联系,从而与全国各港口的联系加强,成为强有力的地方港,这使抗干扰性能的差异缩小。

#### 3.3.2 节点不同功能抗干扰性能指数层级划分

港口节点最大干扰状态下港口抗干扰性能表现分级如表1、表2所示。在节点辐射功能的抗干扰性能指数测度中,①2005年枢纽港全部分布于第二层级,至2017年则是上海港分布在第一层级,其余枢纽港均在第三层级。这表明,上海港辐射功能的抗干扰性能增强,而其余枢纽港则是抗干扰性能有所降低。②2005年,大型港口主要分布在第二层级,至2017年则主要分布于第三层级且数量增多。四、五层级仍然以大型港与地方港口为主。③2005年上海港使节点辐射功能处于最大干扰状态的节点比例为34.21%,而到2017年这一比例上升为77.08%。也就是说当上海港中断时,网络中77.08%的港口的辐射功能立即减弱为最小值,上海港的重要性进一步极化。

在节点中转功能的抗干扰性能指数测度中:①在枢纽港中,2005—2017年上海港的中转功能抗干扰性能指数始终属于第一层级,抗干扰性能较强。2005年,中转功能全部由枢纽港和大型港口承担,尚无地方港口能承担中转功能;至2017,温州港和湛江港具有了中运转输功能。②在节点中转功能抗干扰性能指数的测度中,使各港口节点处于最大

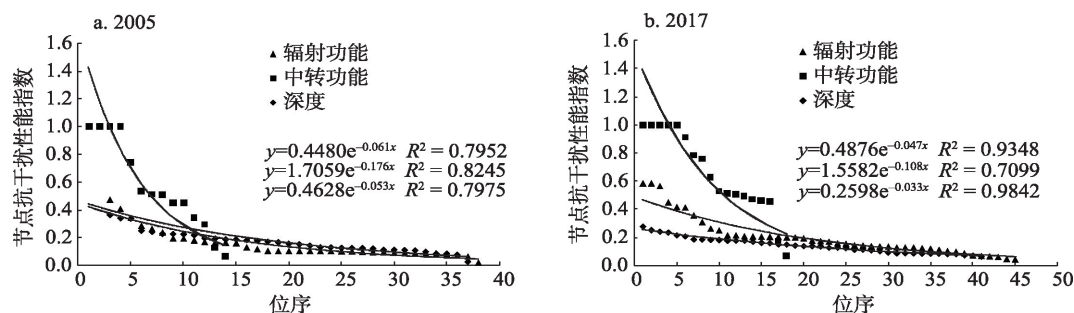


图1 节点抗干扰性能指数位序—规模图

Figure 1 Rank-size graph of node anti-interference performance index

2022年2月

表1 2005年港口节点最大干扰状态下港口抗干扰性能表现分级

Table 1 Classification of port anti-interference performance under the maximum disruption state of port nodes, 2005

	辐射功能抗干扰性能指数			中转功能抗干扰性能指数			深度抗干扰性能指数		
	枢纽港	大型港	地方港	枢纽港	大型港	地方港	枢纽港	大型港	地方港
第一层级		珠海、福州、	无锡、秦皇岛	上海	泉州			珠海、福州、 唐山、泉州	扬州
第二层级	高雄、广州、 大连、宁波、 香港、厦门、 深圳、上海、 青岛、天津	锦州、汕头、 营口、泉州、 烟台、台中、 日照、基隆、 连云港	温州、扬州	香港、广州、 深圳	烟台		高雄、广州、 青岛、上海	基隆、无锡、 汕头、营口、 日照、锦州、 烟台	湛江、镇 江、秦皇 岛
第三层级		威海、唐山、 南京、南通、 苏州	镇江、防城、 湛江	天津、青岛、 大连、厦门			天津、厦门、 深圳、香港、 大连、宁波	嘉兴、海口、 南京、南通、 苏州、台中	温州、丹 东
第四层级		嘉兴、海口	丹东		基隆、营口、 汕头、苏州			连云港、威 海	防城
第五层级		钦州	莆田	高雄、宁波、台中等 <sup>(a)</sup>				钦州	莆田

注:(a)中转功能抗干扰性能指数第五层级为没有中转功能的港口,故未区分枢纽港、大型港或地方港,且数量较多,未一一列出。下同。

表2 2017年港口节点最大干扰状态下港口抗干扰性能表现分级

Table 2 Classification of port anti-interference performance under the maximum disruption state of port nodes, 2017

	辐射功能抗干扰性能指数			中转功能抗干扰性能指数			深度抗干扰性能指数		
	枢纽港	大型港	地方港	枢纽港	大型港	地方港	枢纽港	大型港	地方港
第一层级	上海	南通、威海	茂名、无 锡、黄骅	宁波、上 海、大连		温州	宁波、上海	中山、汕头、 烟台、唐山、 营口、福州、 嘉兴、连云港	镇江、常 州、温州、 无锡、防 城、湛江、 秦皇岛
第二层级		中山、嘉兴、唐山、 珠海、汕头	温州、防城	深圳	营口、钦州		天津、广 州、香港、 深圳、厦 门、大连	虎门、威海、 珠海、钦州、 台北、日照、 泉州	泰州、黄 骅、扬州
第三层级	高雄、厦门、 广州、深圳、 香港、天津、 宁波、青岛、 大连	烟台、泉州、虎门、 锦州、福州、营口、 日照、钦州、台北、 基隆、台中	常州、湛 江、镇江、 秦皇岛	高雄、天 津、青岛、 厦门	泉州、福州	湛江	高雄、青岛	基隆、苏州、 海口、台中、 锦州、南通、 南京	惠州
第四层级		南京、海口、苏州、 连云港	台州	香港、广州	苏州、锦州				台州
第五层级			惠州、扬 州、泰州	珠海、中山等					茂名

干扰状态的节点较为均匀。③2005年有36.8%的港口有中转功能,2017年有40%的港口有中转功能。2005年当烟台港、上海港与深圳港中断时,秦皇岛港、宁波港、温州港、湛江港和南京港等港口在网络中开启中转功能作用;而至2017年,无论哪一港口中断,仍是原始网络中具有中转作用的港口在担任中转作用。这表明2017年港口网络相较于2005年

具有中转作用港口的能力增强,网络更为稳定。

在节点深度的抗干扰性能指数测度中:①2005—2017年枢纽港中除高雄、青岛港层级下降、广州港保持第二层级以外,其余枢纽港层级均上升。②2005年上海港使全国13.15%港口处于最大干扰状态,深圳港使全国7.89%的港口处于最大干扰状态。至2017年,上海港的这一比例增大为



31.11%,深圳港的比例增大为28.89%,上海港与深圳港在网络中的重要性进一步增强。

### 3.4 网络中脆弱性节点分析

从节点分析中可看出部分节点的抗干扰性能随着其他港口节点的失效而产生较大幅度的衰减,这类港口一定程度上使网络在应对攻击时的性能降低,称为“脆弱性节点”。将表1和表2中,港口3个功能中在四、五层级的节点 $\geq 2$ 个视作为脆弱性节点。2005年存在的脆弱性节点港口有:丹东、嘉兴、海口、钦州、莆田、连云港、威海和防城。2017年存在的脆弱性节点港口有:秦皇岛、南京、海口、台州、苏州、连云港、惠州、扬州、泰州和茂名。从以上结果可以看出:空间上,脆弱性节点主要存在于大型港与地方港口中;时间上,脆弱性节点增多。2005年脆弱性节点空间分布较为分散,2017年则有40%集中分布在长三角地区。主要由于处于长三角地区的枢纽港口——上海港在脆弱性节点中的作用增强,其中,在辐射功能抗干扰性能测度中,2005年上海港使1个脆弱性节点处于最大干扰状态,至2017年上升为7个;在深度抗干扰性能测度中,2005年上海港使1个脆弱性节点处于最大干扰状态,至2017年上升为5个。一旦上海港中断,其他节点的抗干扰性能大幅度下降。

### 3.5 网络脆弱性的影响因素分析

#### 3.5.1 多种不可抗拒外界因素导致网络节点瞬时中断

海上集装箱运输易受台风、暴雨、风暴潮、大风等海洋自然灾害的影响。每年西太平洋的台风约占全球的1/3,位于此区域的中国是世界上受台风影响最严重的国家之一<sup>[30]</sup>。这些自然灾害可能会造成船只的翻没、建筑物的毁坏、航道淤积、航标损坏和储存堆放物资受到海水浸泡等,从而导致港口无法运作。同时,海上集装箱运输也受到港口重大安全事故、恐怖袭击和国家间贸易战等人文因素的影响。如联合国贸易和发展会议发布的《2019年全球海运报告》<sup>[31]</sup>指出,受经贸摩擦加剧、英国“脱欧”等不确定性因素的影响,2018年全球海运贸易量仅增长2.7%,低于2017年的4.1%及历史平均水平3%。对国内而言,宁波港2017年所收集的外贸内支航线占自身总航线(尚未添加直达国外航线数据)的91.5%,上海港为80.76%,深圳港为95.74%;若一旦

国外的某一原先连接的港口由于国家间贸易战等原因出现中断失效,则可能存在因外贸航线无法运行所导致的外贸内支的国内航线受到冲击。

#### 3.5.2 轴辐式航运组织模式的强化形成“双向影响”

全球化不断加深,国内外市场联系紧密,对具有廉价运费的海运提出了更高的要求,船舶利用率低和运输不经济使多港挂靠成为过去式,轴辐式结构运输应运而生<sup>[32,33]</sup>。轴辐式网络(Hub-and-spoke network),指支线港通过支线航班对枢纽港进行箱源喂给,以支撑干线航班,同时以支线港为目的地的箱源也要通过枢纽港进行疏散,这种模式以枢纽港为核心,通过枢纽港和支线港间的航班衔接,集散干支线的集装箱流<sup>[34]</sup>。轴辐式航运模式较一般模式的优势为较强的规模经济效应、较低单位运输成本、较为便利的货流管理和控制,能够减少政府投资量、降低运营管理的难度。

根据港口节点之间的前三名联系强度,整理出港口航运网络图(图2)。可以看出:2005年的最强联系层级是区域性轴辐式结构,形成了珠三角、长三角和环渤海港口群;第二联系层级中,珠三角与长三角产生了联系,形成了两个主要的港口群;第三联系层级则是全国轴辐式层级的初次显现,形成了以上海为核心的全国轴辐式网络。2017年所有层级中,除个别港口对,几乎均为全国轴辐式网络,但其核心港口发生变化,在最强联系层级形成了上海—深圳为核心的全国轴辐式网络,第二联系层级以上海—宁波—深圳为核心,第三联系层级形成了广州—宁波—香港—上海—深圳—天津为核心的全国轴辐式网络。

轴辐式航运组织模式的强化形成了“双向影响”。正面影响为提升网络性能:①港口航运网络图(图2)可以看出轴辐模式下枢纽港使得全国港口成为强强联合的整体网络,区域之间节点的联系更为紧密。②2005年有23.68%的港口未与上海港开通航线,而2017年仅8.89%的港口未与上海港开通航线,虽然存在轴辐模式下港口间断开了原本的联系,但增加与枢纽港之间的联系,使得大部分中转的效率相对于以前更快,从而使港口之间的效率提升(网络间平均路径长度从1.679降为1.625)。③轴辐模式与港口间广泛联系的共存使得港口节点之间联系的选择性增多,从而使得运输多样性增强

2022年2月

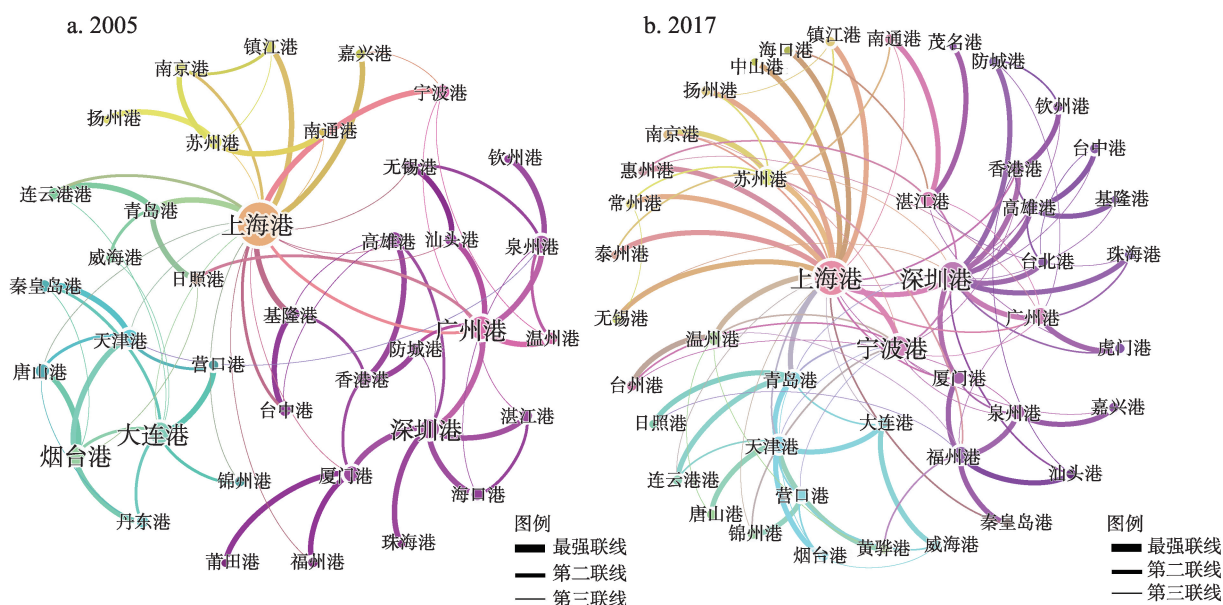


图2 中国沿海集装箱港口航运网络图

Figure 2 Shipping networks of China's coastal container ports, 2005 and 2017

(网络独立路径数量从9.485上升为12.241)。负面影响为枢纽作用极化,脆弱节点增多:①轴辐模式下枢纽港地位不断提升,在网络中的功能和作用增强,影响的节点也在增多。如2017年上海港使全国77.08%的港口辐射功能降为最小,使全国31.11%的港口深度降为最小。②轴辐模式下边缘港口与枢纽港联系可使其利益最大化,枢纽港一旦中断,边缘港口的抗干扰性能大幅度降低。随着轴辐模式下枢纽港作用增强,2017年脆弱性节点增至10个。从具体航线联系来看,2005年脆弱性节点与各枢纽港的联系航线数量之和占各脆弱性节点自身总航线比重超过30%的港口有6个,占脆弱性节点总数的75%,至2017年这样的脆弱性节点有8个,占脆弱性节点总数的80%。

### 3.5.3 区域竞合与一体化增强网络“叠加效应”

国际贸易在世界范围内快速发展,港口数量迅速增加,港口竞争日益激烈,港口逐渐发展成为供应链中的重要环节,朝全球化和网络化方向发展。传统的区域港口间恶性竞争难以为继,港口群间的竞争成为港口间竞争的主战场。2008年金融危机后,以市场化方式加速港口群经营主体一体化,促使港口间新兴的竞合关系形成,港口体系发展更为协调,在对环渤海地区港口的位序—规模分析结果表明,港口区域化发展倒逼长期恶性竞争的环渤海

区域港口合作,推动不同级别港口融合发展<sup>[35]</sup>。图2中港口节点间最强联系可以看出,除个别港口对,2017年中国沿海集装箱港口航运网络已由2005年的局部网络与若干港口对并存转变为统一的双层轴辐式结构。港口区域一体化促使港口协调发展,港口间联系更为紧密,港口航运网络的集聚性、传输性与多样性有所改善。但与此同时,在港口受到攻击中断的情况下,2017年航运网络的集聚性、传输性与多样性的下降值相关性系数,除网络多样性下降值与网络集聚性下降值的相关性系数略微下降以外,其余均上升,港口网络间“叠加效应”进一步增强,正所谓“牵一发而动全身”,从而导致脆弱性增强。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本文基于中断模拟,借助复杂网络模型中的特征指标对2005年和2017年中国沿海集装箱港口航运网络结构的脆弱性及节点的抗干扰性能进行了系统的剖析,并在此基础上分析脆弱性的主要影响因素。主要结论如下:

(1)相较于2005年,2017年原始网络的集聚性、多样性与传输性均增强,网络的脆弱性降低。从中断模拟角度看,2017年有更高比例的节点分别失效使网络聚类系数上升、网络平均路径长度减小和网



络独立路径数量增加,表明当网络中有节点受到攻击中断失效,网络中剩余节点仍具有紧密的联系,具有较多备用路径,能够更快地应对网络变化,顺利应对干扰。中断模拟下网络多样性、传输性与集聚性各下降值两两之间均存在较高的相关性,表明某一节点失效时,港口节点间的路径长度、支路数量和联系受到同步影响,产生叠加效应。

(2)相较于2005年,2017年抗干扰性能指数变化速率均呈现下降趋势。就辐射功能抗干扰性能而言,枢纽港出现了两极分化现象,除上海港的抗干扰性能增强外,其余枢纽港抗干扰性能降低;就深度功能抗干扰性能而言,上海港与深圳港使全国港口处于最大干扰状态下的比例增大,网络危险性增高;无论哪一港口中断,仍是原始网络中具有中转作用的港口担任中转作用,中转网络的稳定性增强;整体而言,脆弱性节点增多,主要为长江沿岸一带的港口。

(3)航运网络的脆弱性因素突出表现在以下三方面:①多种不可抗拒外界因素包括台风、风暴潮等自然因素和恐怖袭击、国际贸易战等人文因素;②轴辐式航运组织模式使得网络效率与传输性增强,提升了网络性能,但也导致枢纽港作用极化,脆弱性港口增多;③港口区域一体化促使港口协调发展和紧密联系,航运网络各功能有所改善。但同时,在港口受到攻击中断时,港口网络间的叠加效应会进一步增强,从而使网络脆弱性增强。

## 4.2 政策建议

因节点抗干扰性能存在较多风险,为进一步降低脆弱性,本文提出以下政策建议:

(1)重点提升枢纽港/门户港的安全保障。上海港、宁波港、深圳港等枢纽港口/门户港在国内外航运网络中发挥着重要的组织与转运功能,应提升其维护和防御能力,如制定完善的防御性措施和安全规划;

(2)应从战略层面提升部分大型港地位,合理规划战略性航线,适当增加枢纽港数量,分散枢纽港风险;同时加强脆弱节点港口与地方大型港之间的航运联系,增强自身抗干扰性能。

由于受数据局限,仅使用港口间航线建立网络,未来应考虑航线班次与集装箱船的标准箱位数对港口间联系的影响。虽针对港口中断后的航线

网络结构特征进行了测度,但尚未给出具体恢复措施,未来需要进一步分析。

## 参考文献(References):

- [1] Li Z F, Xu M Q, Shi Y L. Centrality in global shipping network basing on worldwide shipping areas[J]. *GeoJournal*, 2015, 80(1): 47-60.
- [2] Timmerman P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society: A Review of Models and Possible Climatic Application[M]. Toronto: Institute for Environmental Studies, 1981.
- [3] Nguyen C P, Dinh T S. Easing economic vulnerability: Multidimensional evidence of financial development[J]. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 2021, 81: 237-252.
- [4] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, et al. Spatiotemporal ecological vulnerability analysis with statistical correlation based on satellite remote sensing in Samara, Russia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112138.
- [5] Goto E A, Suarez A M, Ye H Y. Spatial analysis of social vulnerability in São Paulo City, Brazil[J]. *Applied Geography*, 2022, DOI: 10.1016/j.apgeog.2022.102653.
- [6] Huang W C, Zhou B W, Yu Y C, et al. Vulnerability analysis of road network for dangerous goods transportation considering intentional attack: Based on Cellular Automata[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, DOI: 10.1016/j.res.2021.107779.
- [7] Gu Y, Fu X, Liu Z Y, et al. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, DOI: 10.1016/j.tre.2019.11.003.
- [8] 吴迪, 王诺, 于安琪, 等. “丝路”海运网络的脆弱性及风险控制研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1133-1148. [Wu D, Wang N, Yu A Q, et al. Vulnerability and risk management in the Maritime Silk Road container shipping network[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1133-1148.]
- [9] 莫辉辉, 王姣娥, 金凤君. 交通运输网络的复杂性研究[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(6): 112-120. [Mo H H, Wang J E, Jin F J. Complexity perspectives on transportation network[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(6): 112-120.]
- [10] 陈卓, 梁宜, 金凤君. 基于陆路综合交通系统的中国城市网络通达性模拟及其对区域发展格局的影响[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(2): 183-193. [Chen Z, Liang Y, Jin F J. Simulation of city network accessibility and its influence on regional development pattern in China based on integrated land transport system [J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(2): 183-193.]
- [11] 杜方叶, 王姣娥, 谢家昊, 等. “一带一路”背景下中国国际航空网络的空间格局及演变[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(7): 963-972. [Du F Y, Wang J E, Xie J H, et al. Spatial pattern and change of China's international air transport network since the Belt and

2022年2月

- Road Initiative[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(7): 963-972.]
- [12] 张培文, 杜福民, 王雪, 等. 近十年中国客运航空网络空间结构演化及分析研究[J]. *世界地理研究*, 2021, 30(6): 1253-1264. [Zhang P W, Du F M, Wang X, et al. Spatial structure evolution and analysis of Chinese passenger aviation network in the last decade[J]. *World Regional Studies*, 2021, 30(6): 1253-1264.]
- [13] 徐凤, 朱金福, 苗建军. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2015, 12(1): 40-45. [Xu F, Zhu J F, Miao J J. The robustness of high-speed railway and civil aviation compound network based on the complex network theory [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2015, 12(1): 40-45.]
- [14] 郭建科, 何瑶, 侯雅洁. 中国沿海集装箱港口航运网络空间联系及区域差异[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(11): 1499-1509. [Guo J K, He Y, Hou Y J. Spatial connection and regional difference of the coastal container port shipping network of China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1499-1509.]
- [15] 郭建科, 郭姝, 秦娅风, 等. 中非集装箱航运网络演化及其对经贸联系的支撑能力[J]. *资源科学*, 2020, 42(11): 2145-2157. [Guo J K, Guo S, Qin Y F, et al. Change of China-Africa container shipping network and its ability to support economic and trade ties [J]. *Resources Science*, 2020, 42(11): 2145-2157.]
- [16] 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 C, Wang M J, Wang Y. Identification of Chinese key nodes in the shipping network of the 21st Century Maritime Silk Road[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1485-1498.]
- [17] 方志祥, 余红楚, 黄守倩. 海洋运输网络研究进展与趋势探讨[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(5): 554-563. [Fang Z X, Yu H C, Huang S Q. Review of research works on maritime network[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(5): 554-563.]
- [18] Cheung K F, Bell M, Pan J J, et al. An eigenvector centrality analysis of world container shipping network connectivity[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, DOI: 10.1016/j.tre.2020.101991.
- [19] Wan C P, Zhao Y X, Zhang D, et al. Identifying important ports in maritime container shipping networks along the Maritime Silk Road[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105738.
- [20] 王伟, 金凤君. 全球集装箱航运企业的航线网络格局及影响因素[J]. *地理研究*, 2020, 39(5): 1088-1103. [Wang W, Jin F J. Route network pattern and its influencing factors of container shipping enterprises[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(5): 1088-1103.]
- [21] Wang N, Wu N, Dong L L, et al. A study of the temporal robustness of the growing global container-shipping network[J]. *Scientific Reports*, 2016, DOI: 10.1038/srep34217.
- [22] 王列辉, 叶斐, 郑渊博. 中美集装箱航运网络格局演化与脆弱性评估[J]. *经济地理*, 2020, 40(5): 136-144. [Wang L H, Ye F, Zheng Y B. The assessment of Sino-US container shipping network evolution and vulnerability[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 136-144.]
- [23] 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.
- [24] Shen Z C, Xu X L, Li J H, et al. Vulnerability of the maritime network to tropical cyclones in the Northwest Pacific and the Northern Indian Ocean[J]. *Sustainability*, 2019, DOI: 10.3390/su11216176.
- [25] Fang Z X, Yu H C, Lu F, et al. Maritime network dynamics before and after international events[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(7): 937-956.
- [26] 彭翀, 陈思宇, 王宝强. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究: 以长江中游城市群客运网络为例[J]. *经济地理*, 2019, 39(8): 68-76. [Peng C, Chen S Y, Wang B Q. Analyzing city network's structural resilience under disruption scenarios: A case study of passenger transport network in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(8): 68-76.]
- [27] 郭建科, 何瑶, 王绍博, 等. 1985年以来中国大陆沿海集装箱港口体系位序-规模分布及其网络联系[J]. *地理研究*, 2019, 38(4): 869-883. [Guo J K, He Y, Wang S B, et al. Rank-size distribution changes and transportation network connections of the coastal container port system in Chinese mainland since 1985[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 869-883.]
- [28] Ip W H, Wang D. Resilience and friability of transportation networks: Evaluation, analysis and optimization[J]. *IEEE Systems Journal*, 2011, 5(2): 189-198.
- [29] 饶育萍, 林竞羽, 侯德亭. 基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J]. *通信学报*, 2009, 30(4): 113-117. [Rao Y P, Lin J Y, Hou D T. Evaluation method for network invulnerability based on shortest route number[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(4): 113-117.]
- [30] 王静静. 沿海港口典型自然灾害风险分析与评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2011. [Wang J J. Typical Natural Disaster Risk Analysis and Assessment of Coastal Ports[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011]
- [31] UCTAD. Review of Maritime Transport 2019[R/OL]. (2019-11-01) [2021-05-10]. [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_en.pdf)
- [32] Imai A, Shintani K, Papadimitriou S, et al. Multi-port vs. Hub-and-Spoke port calls by containerships[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2009, 45(5): 740-757.
- [33] 钟铭, 管峰, 余璇, 等. 集装箱班轮轴-幅式网络区间模型[J]. *大连海事大学学报*, 2014, 40(4): 50-54. [Zhong M, Guan F, Yu X, et al. Research on the interval programming for hub-spoke network designing[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2014, 40(4): 50-54.]
- [34] 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 C J, Jin F J. Organization networks of Chinese marine container transportation[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 392–401.]

[35] 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 J K, Chen Y Y, Yu X H, et al. Rank-size distribution and mechanism of port system in the Bohai Rim during the past thirty years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(10): 1812–1826.]

## Vulnerability of the shipping network of China's coastal container ports under disruption simulation

HE Yao<sup>1</sup>, YANG Yongchun<sup>1,2</sup>, GUO Jianke<sup>3,4</sup>

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education of the People's Republic of China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of Marine Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 4. Center of Marine Economy and Sustainable Development, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Under the background of dual circulation, the continuous expansion of domestic consumer markets in China is expected to further increase the proportion of domestic trade containers in ports, and marine transportation is vulnerable to the impact of external factors. Using disruption simulation, this study analyzed the vulnerability of China's coastal container port shipping network in 2005 and 2017 from two aspects—network structure vulnerability and node anti-interference performance—with complex network characteristic index, and the main factors of vulnerability were discussed. The results show that: (1) Compared with 2005, a higher proportion of nodes failed respectively in 2017, which caused the network clustering coefficient and the number of independent paths to increase, the shortest path to decrease. This shows that when more nodes were interrupted and failed respectively in the network, the remaining nodes still have close connections—more standby paths, faster response speed, and smooth response to disruptions. Path length, the number of branches, and connection among the port nodes are affected synchronously, resulting in a superimposing effect. (2) In 2017, the difference of anti-interference performance of port nodes under the maximum disruption state decreased. In the hub-spoke mode, the role of hub ports is enhanced. With the disruption of the Shanghai Port and the Shenzhen Port, the proportion of nodes in the network under the state of maximum disruption increases, and the number of vulnerable nodes in the whole network also increases. (3) The vulnerability factors of the shipping network are mainly manifested in three aspects: the instantaneous disruption of network nodes caused by a variety of irresistible external factors, the “two-way influence” formed by the strengthening of the hub-spoke shipping organization mode, and the “superposition effect” enhanced by regional competition and integration.

**Key words:** China's coastal ports; shipping network; disruption simulation; vulnerability; anti-interference performance; containers