

# “21世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络的脆弱性变化

吴迪,王宇鹏,盛世杰,王诺

(大连海事大学交通运输工程学院,大连 116026)

**摘要:** 为探究“21世纪海上丝绸之路”集装箱海运网络在蓄意攻击下的脆弱性变化情况,基于蓄意攻击下集装箱海运网络的地理空间联系变化和网络分裂过程,提出了集装箱海运网络崩溃临界点的识别方法,进而建立了集装箱海运网络脆弱性变化趋势和程度的量化方法,并利用2015年和2019年海上丝绸之路中港口和航线的统计数据构建网络进行分析。结果表明:2015年和2019年“海上丝路”网络的蓄意攻击承受能力分别为4.21%和5.51%,说明2019年的“海上丝路”海运网络比2015年更加强壮,其相对变化率为30.88%;“海上丝路”网络脆弱性变化的驱动机制主要包括港口层级结构的差异性减弱、关键港口备份机制日趋完备、东亚和东南亚与其他区域间的集装箱海运联系更加紧密等。最后,从持续保障中国与“海上丝路”沿线各国集装箱海运互联互通的角度,提出了相应的对策和建议。研究成果对于揭示“海上丝路”海运网络的脆弱性变化及其驱动机制和影响因素,进而有针对性的持续保障该网络的互联互通,具有重要的理论意义和实用价值,且本文的分析方法对其他运输网络脆弱性变化的相关研究也可提供借鉴。

**关键词:** 海上丝绸之路;集装箱海运网络;蓄意攻击;脆弱性;驱动机制;影响因素

DOI: 10.11821/dlxb202208015

## 1 引言

随着“21世纪海上丝绸之路”(简称“海上丝路”)建设的深化和海洋强国、交通强国战略的实施,海上丝绸之路集装箱海运网络(简称“海上丝路”网络)在保障中国与沿线各国之间设施联通和贸易畅通方面的作用已变得十分重要<sup>[1-6]</sup>。但近一时期,“海上丝路”范围内新型冠状病毒肺炎疫情愈演愈烈、军事冲突频发、恐怖主义盛行、部分地区政治局势持续动荡,对“海上丝路”网络的稳定运行造成了巨大挑战。在这一背景下,研究蓄意攻击下“海上丝路”网络的脆弱性变化情况,分析其影响因素,进而提出有针对性的安全保障对策和建议,对于持续保障“海上丝路”网络的稳定运行,促进中国与“海上丝路”沿线各国间的设施联通和贸易畅通具有重要理论意义和实用价值。

集装箱海运网络的脆弱性主要指网络中港口或航线失效对网络运输功能的影响程度<sup>[7-12]</sup>。在这方面的研究成果较为集中,包括如何利用特征值,对集装箱海运网络的脆弱

收稿日期: 2021-06-07; 修订日期: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(72104042, 42030409); 国家社会科学基金项目(20&ZD070); 辽宁省社会科学基金项目(L19CGJ001) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.72104042, No.42030409; National Social Science Foundation of China, No.20&ZD070; Social Science Foundation of Liaoning Province, No.L19CGJ001]

作者简介: 吴迪(1989-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事交通运输规划与管理相关研究。  
E-mail: wudidimu@163.com

性进行分析<sup>[13-15]</sup>, 计算集装箱海运网络对节点和边失效的敏感程度<sup>[16-18]</sup>, 建立基于特征值影响权重的集装箱海运网络脆弱性变化评价方法<sup>[19-20]</sup>, 以及集装箱海运网络关键节点的识别方法研究<sup>[21-24]</sup>等。在应用上, 现有成果主要研究蓄意攻击下全球集装箱海运网络<sup>[25-27]</sup>、海上丝绸之路集装箱海运网络<sup>[28]</sup>和班轮公司集装箱海运网络<sup>[29]</sup>的脆弱性, 集装箱海运网络脆弱性与网络效率之间的关系<sup>[30]</sup>, 关键航道通航受阻对网络脆弱性的影响<sup>[31-32]</sup>, 中国和全球集装箱海运网络的层级结构<sup>[33-34]</sup>, 以及全球集装箱海运网络<sup>[35-36]</sup>和“海上丝路”集装箱海运网络<sup>[37-39]</sup>的枢纽港格局等。

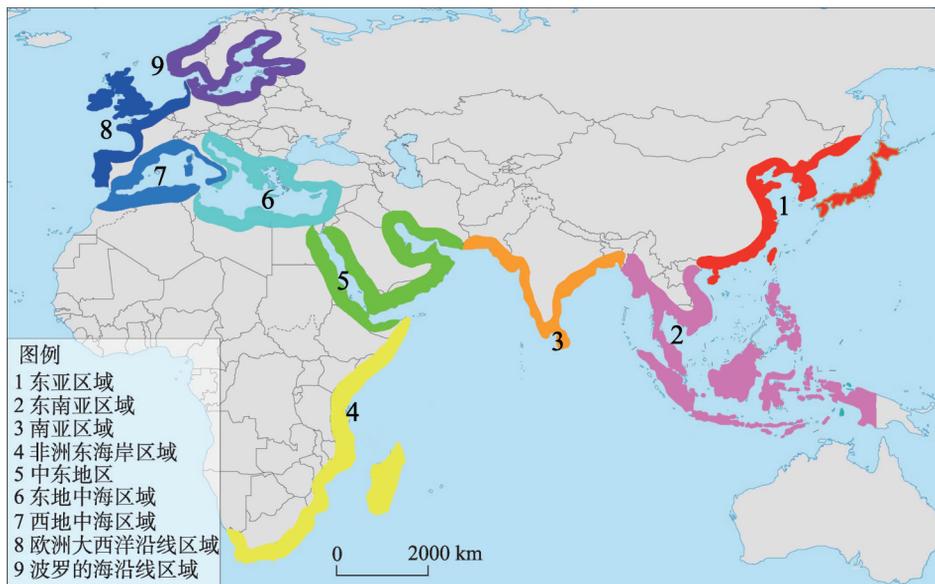
现有研究成果主要关注单一年度集装箱海运网络脆弱性的静态特征, 相应的研究方法并不完全适用于多年度集装箱海运网络脆弱性变化的研究。对于蓄意攻击下集装箱海运网络脆弱性变化研究而言, 其所关注的核心问题是网络对蓄意攻击承受能力的变化情况, 这需要对蓄意攻击下不同年度集装箱海运网络的崩溃临界点进行准确识别, 并建立相应的集装箱海运网络脆弱性变化程度量化方法。而现有的识别方法主要是根据网络特征值的变化对崩溃临界点进行推测<sup>[13, 20, 28, 40]</sup>, 在地理因素方面的考虑不够全面, 因而其相应的脆弱性量化结果往往存在一定的偏差。在应用方面, 虽然已有研究基本揭示了“海上丝路”网络脆弱性的静态特征, 但是自2015年《推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景和行动》(简称《愿景与行动》)发布以来, “海上丝路”网络随“一带一路”经济共同体一同经历了快速的发展和重大的变革, 在这一背景和趋势下, 需要从持续保障互联互通的角度, 对其脆弱性的变化及影响因素进行有针对性的深入研究。

针对以上问题, 本文利用2015年和2019年全球集装箱班轮公司在“海上丝路”范围内运营航线及挂靠港口的统计数据开展相关研究, 主要贡献包括: ①跳出利用网络特征值对集装箱海运网络脆弱性进行分析的传统研究思路, 基于蓄意攻击下集装箱海运网络的地理空间联系变化和网络分裂过程, 提出了集装箱海运网络崩溃临界点的识别方法, 并建立了相应的集装箱海运网络脆弱性变化趋势和程度的量化方法; ②对“海上丝路”建设以来, “海上丝路”网络在蓄意攻击下的脆弱性变化情况进行了量化分析; ③探讨了“海上丝路”网络脆弱性变化的驱动机制及其影响因素, 并从持续保障“海上丝路”网络互联互通的角度, 提出了相应的对策和建议。

## 2 海上丝路 网络构建

### 2.1 数据统计

“21世纪海上丝绸之路”是中国重大的西向发展战略, 从广义的角度而言, 其集装箱海运网络涉及东亚、东南亚、南亚、非洲东海岸、中东、东地中海、西地中海、欧洲大西洋沿线和波罗的海沿线等多个区域(其中, 参照航运公司的运营航区划分, 以突尼斯海峡区分东地中海区域和西地中海区域, 以斯卡格拉克海峡区分欧洲大西洋沿线区域和波罗的海沿线区域), 具体情况如图1所示。本文分别对2015年和2019年全球运力排名前100集装箱班轮公司(占全球集装箱船舶总运力约93%)的运营航线和挂靠港口数据进行了统计。结果显示: 2015年全球共有集装箱港口715个(将同一城市的多个港区合并为一个港口), 航线2826条, 其中, “海上丝路”网络中共有集装箱港口428个, 航线2429条, 分别占全球集装箱港口和航线总数的59.86%和85.95%; 2019年全球共有集装箱港口868个, 航线3035条, 其中, “海上丝路”网络中共有集装箱港口544个, 航线2724条, 分别占全球集装箱港口和航线总数的62.67%和89.75%, 说明“海上丝路”网络中港口和航线的数量在全球范围内占有较大的比例, 且2019年较2015年的占比明显上



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1665号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 “海上丝路”网络沿线各区域

Fig. 1 Regions along Maritime Silk Road container shipping network

升。进一步分析发现,2019年“海上丝路”网络中港口和航线的数量分别比2015年增加116个和295条,增幅分别为27.10%和12.14%,增幅较大,具体情况如表1所示。可知,海上丝绸之路建设以来,其沿线集装箱港口的数量和相关航运公司对“海上丝路”网络中集装箱航线的投入均明显增加,“海上丝路”网络的整体规模呈现明显扩张趋势。

表1 2015年与2019年全球和“海上丝路”港口和航线的统计数据对比

Tab. 1 Comparison of statistics of container ports and routes in 2015 and 2019

	全球		21世纪海上丝绸之路			
	港口数量(个)	航线数量(条)	港口数量(个)	占比(%)	航线数量(条)	占比(%)
2015年	715	2826	428	59.86	2429	85.95
2019年	868	3035	544	62.67	2724	89.75
变化率(%)	21.40	7.40	27.10	4.69	12.14	4.42

## 2.2 网络构建

本文在数据统计的过程中,不仅对“海上丝路”中的港口数量、航线数量及其挂靠港口情况进行了统计,还通过航运公司的官方网站和劳氏海事数据库,对各航线运营船舶的船型大小(各船舶能够容纳的箱位数)、班期(航线每周在同一港口挂靠的次数)等详细数据进行了统计。基于以上数据,本文构建了2015年和2019年两个年度的“海上丝路”集装箱海运有向加权网络。其中,以某一航线运营船舶的平均箱位数(同一航线所有运营船舶的箱位数基本相同)与其班期的乘积为该航线在相应挂靠港口之间每周的运力上限(每周平均箱位数),进而对各港口之间所有挂靠航线每周的运力上限进行加和,以之为各港口之间边的运力权重。具体构建方式如下:①以港口城市为网络中的节点;②若存在航线依次挂靠节点*i*和节点*j*,则认为节点*i*和节点*j*之间存在从节点*i*指向节点*j*的边,且任意两节点之间某一方向的边最多只有一条;③以依次挂靠节点*i*和节点*j*所有

航线每周挂靠船舶的箱位数之和为从节点*i*指向节点*j*有向边的权重, 权重越大, 则说明两港间对应方向上的运输能力越大; ④以某一节点所连接有向边(包括入边和出边)的权重之和为该节点的强度, 节点强度越大, 则节点在网络中影响力越大。

根据上述方式, 分别构建2015年和2019年“海上丝路”集装箱海运网络, 节点强度排名前10位的港口如表2所示。

表2 2015年和2019年“海上丝路”网络节点强度排名前10位的港口

Tab. 2 Top 10 ports with largest node strength in Maritime Silk Road container shipping network in 2015 and 2019

2015年				2019年			
排名	港口名称	国家	节点强度	排名	港口名称	国家	节点强度
1	深圳	中国	9402800	1	新加坡	新加坡	10588100
2	新加坡	新加坡	9269900	2	上海	中国	9616200
3	上海	中国	8872300	3	深圳	中国	8995900
4	香港	中国	7301900	4	宁波	中国	8388700
5	宁波	中国	6670600	5	香港	中国	6297800
6	釜山	韩国	5342600	6	釜山	韩国	6127200
7	巴生	马来西亚	4720100	7	巴生	马来西亚	5605000
8	鹿特丹	荷兰	3651200	8	青岛	中国	3941700
9	高雄	中国	3272200	9	高雄	中国	3539700
10	青岛	中国	2988500	10	鹿特丹	荷兰	3254600

### 3 蓄意攻击下集装箱海运网络脆弱性变化的分析方法

所谓蓄意攻击, 即按照节点的重要程度对网络中的节点进行依次删除, 这种攻击方式能够模拟重大公共卫生事件、军事冲突、恐怖袭击和罢工等人为因素导致的重大突发事件对网络的影响。研究蓄意攻击情境下集装箱海运网络脆弱性的变化, 实际上就是研究集装箱海运网络对蓄意攻击承受能力的变化。在模拟蓄意攻击的过程中, 随着攻击港口数量的增加, 各年度的集装箱海运网络都将逐渐分裂直至完全崩溃, 进而, 可以将某年度网络开始崩溃前能够承受的最大攻击规模视为该年度网络对蓄意攻击的承受能力。因此, 为了研究蓄意攻击情境下集装箱海运网络的脆弱性变化, 需要对各年度网络的崩溃临界点进行准确识别。在这一方面, 已有方法主要是基于蓄意攻击下平均路径长度和最大连通子图相对大小等特征值的变化情况对网络的崩溃临界点进行识别<sup>[13, 20, 28, 40]</sup>。但目前这类基于特征值的崩溃临界点识别方法在识别准确程度方面尚存在不足。具体而言, 平均路径长度在蓄意攻击下的变化曲线表现为先震荡上升再震荡下降, 当其变化曲线出现第一次下降或者最大值等突变现象时, 网络可能尚未出现明显的分裂或者已经错过开始崩溃的临界点, 因此基于平均路径长度变化曲线的突变现象对网络崩溃临界点进行识别时的灵敏程度不完全满足准确识别的要求; 而最大连通子图相对大小在蓄意攻击下的变化曲线是单调递减的, 即其变化趋势不存在明显的突变, 当基于最大连通子图相对大小的变化情况对网络开始崩溃的临界点进行识别时, 需要对判断网络开始崩溃的阈值进行人为设定, 因此其客观性和准确性存在不足。此外, 由上一节的数据统计可知, 不同年度集装箱海运网络中的港口数量存在较大差异, 因此集装箱海运网络脆弱性变化的量价评价还需要考虑网络规模变化这一重要因素。

基于上述分析可知, 要定量分析集装箱海运网络脆弱性的变化程度, 需要解决两个关键问题: ①如何对网络在蓄意攻击情境下的崩溃临界点进行准确识别; ②如何基于

崩溃临界点的识别结果,在考虑网络规模变化的情况下,对网络的脆弱性变化进行合理的量化评价。为此,本文建立了集装箱海运网络脆弱性变化的量化方法,包括崩溃临界点的识别和脆弱性变化的量化评价等两个部分。

### 3.1 崩溃临界点的识别

在实际中,集装箱海运网络的主要功能是保障相关区域间集装箱海运的互联互通。基于这一本质的认识,本文跳出传统的研究思路,从地理空间联系的角度入手进行思考,认为当集装箱海运网络面对蓄意攻击时,各区域间是否依然保持互联互通是判断网络是否崩溃的主要依据。进而可以认为:随着蓄意攻击港口数量的逐步增加,当某区域突然从网络主体结构(最大强连通子图)中分裂出来与其他各区域不再互联互通时,则网络开始崩溃;当网络主体结构中仅剩一个区域时,则网络完全崩溃。

基于以上思考和认识,为对蓄意攻击下集装箱海运网络的崩溃临界点进行识别,提出最大强连通区域数量的概念,即集装箱海运网络中最大强连通子图所包含地理区域的数量。设集装箱海运网络覆盖地理区域的总数为 $M$ ,最大强连通区域数量为 $R$ ,在未遭受攻击或遭受少量蓄意攻击的情况下, $R=M$ ,随着蓄意攻击港口数量的增加, $R$ 将逐渐减小,则建立蓄意攻击下集装箱海运网络崩溃临界点识别的具体步骤为:①对当前集装箱海运网络进行模拟蓄意攻击,即删除当前集装箱海运网络中节点强度最大的一个港口;②计算集装箱海运网络的最大强连通区域数量 $R$ ;③对 $R$ 和 $M$ 进行对比,若第一次出现 $R < M$ ,则此时的蓄意攻击规模为网络开始崩溃的临界点,并记录此时已删除港口的数量;④对 $R$ 和 $M$ 进行对比,若第一次出现 $R=1$ ,则此时的蓄意攻击规模为网络完全崩溃的临界点,并记录此时已删除港口的数量;⑤若 $R > 1$ ,则返回步骤①,若 $R=1$ ,则结束。

### 3.2 脆弱性变化的量化评价

通过蓄意攻击下的崩溃临界点识别,可以得到不同年度集装箱海运网络在开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量。然而,集装箱海运网络中的港口总数是不断变化的,如果通过直接对比两个年度网络开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量来反映两个年度网络对蓄意攻击承受能力的变化,则忽略了网络规模变化这一重要因素,其评价结果必然不准确。例如,若两个年度集装箱海运网络在开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量相同,但两个年度网络的港口总数不同,则两个年度网络对蓄意攻击的承受能力应该是不同的,即港口总数多的集装箱海运网络对蓄意攻击的承受能力应该相对较弱。因此,在崩溃临界点识别的基础上,为了考虑网络规模的变化,本文利用集装箱海运网络开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量占其港口总数的比例,对某年度网络的蓄意攻击承受能力进行量化评价,并计算两个年度网络蓄意攻击承受能力的变化率,从而实现集装箱海运网络脆弱性变化趋势和程度的量化分析。

(1) 蓄意攻击承受能力。设 $A_t$ 为 $t$ 年度网络的蓄意攻击承受能力, $Z_t$ 为 $t$ 年度网络开始崩溃时遭受攻击的港口数量, $N_t$ 为 $t$ 年度网络中的港口总数,则蓄意攻击承受能力的计算公式为:

$$A_t = \frac{Z_t - 1}{N_t} \times 100\% \quad (1)$$

(2) 蓄意攻击承受能力变化率。集装箱海运网络在 $t_1$ 年度至 $t_2$ 年度的脆弱性变化情况可利用蓄意攻击承受能力变化率 $V$ 进行量化评价,即:

$$V = \left( \frac{A_{t_2}}{A_{t_1}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

若  $V > 0$ ，则说明网络变得更加强壮，若  $V < 0$ ，则说明网络变得更加脆弱； $|V|$  越大，则说明脆弱性变化的幅度越大，反之亦然。

### 4 海上丝路 网络脆弱性变化的量化分析

“海上丝路”网络覆盖了东亚、东南亚、南亚、非洲东海岸、中东、东地中海、西地中海、欧洲大西洋沿线和波罗的海沿线等9个区域（图1）。因此，在正常情况下其最大强连通区域数量等于9。本文利用上述基于崩溃临界点对比的集装箱海运网络脆弱性变化分析方法，对蓄意攻击下2015—2019年“海上丝路”网络的脆弱性变化情况进行量化分析，其中模拟蓄意攻击下“海上丝路”网络的崩溃过程如图2所示。

对于2015年“海上丝路”网络而言，当攻击港口数量小于19个时，各区域间仍保持着互联互通，其最大强连通区域数量等于9；当攻击港口数量达到19个时，东亚和东南亚区域从网络主体结构中分裂出来，最大强连通区域数量从9下降至7，表明网络开始崩溃；当攻击港口数量达到69个时，各区域间均不再互联互通，最大强连通区域数量下降至1，表明网络完全崩溃（图2）。

对于2019年“海上丝路”网络而言，当攻击港口数量小于31个时，各区域间是互联互通的，最大强连通区域数量为9；当攻击港口数量达到31个时，波罗的海沿线区域从

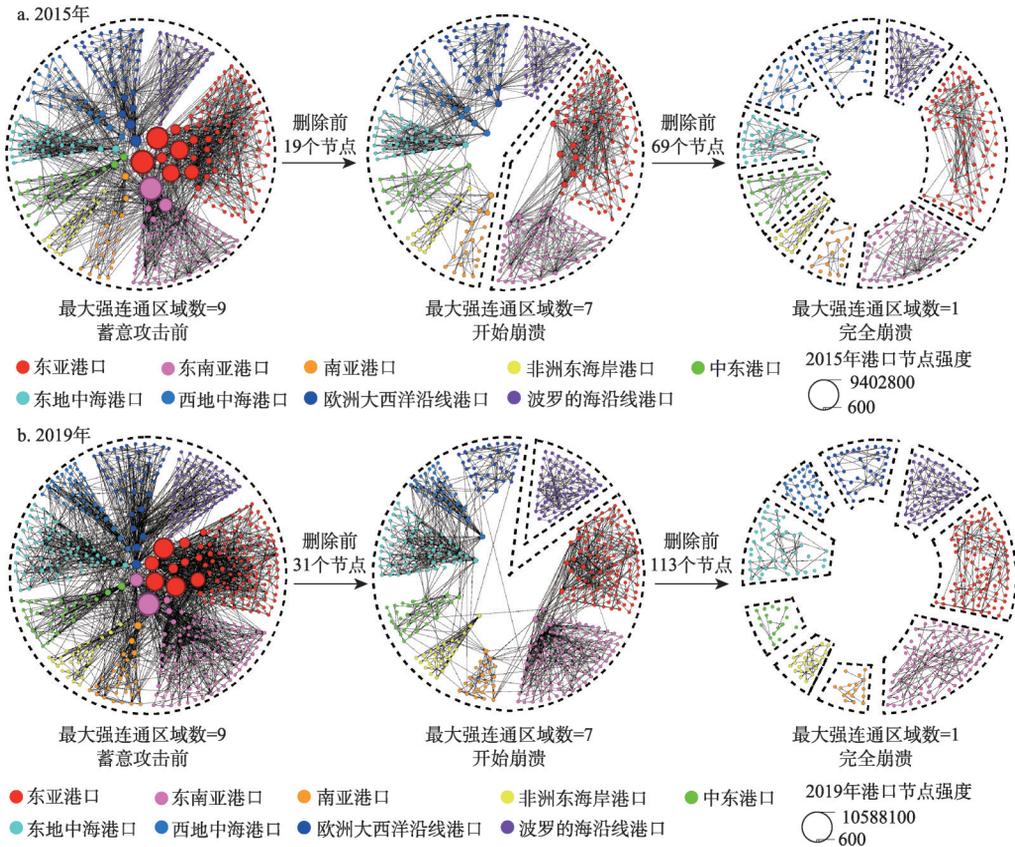


图2 模拟蓄意攻击情景下2015年和2019年“海上丝路”网络的崩溃过程

Fig. 2 Collapse process of Maritime Silk Road container shipping network in 2015 and 2019 under a simulated intentional attack

网络主体结构中分裂出来,最大强连通区域数量从9下降至8,表明网络开始崩溃;当攻击港口数量达到113个时,各区域间均不再互联互通,最大强连通区域数量下降至1,表明网络完全崩溃。

在蓄意攻击情境下,2015年和2019年“海上丝路”网络在开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量分别为18个和30个。根据式(1)和式(2)进行计算,得到2015年和2019年“海上丝路”网络的蓄意攻击承受能力分别为 $A_{2015} = 4.21\%$ 和 $A_{2019} = 5.51\%$ ,2015—2019年“海上丝路”网络的蓄意攻击承受能力变化率 $V = 30.88\%$ (表3)。综上,从网络系统对蓄意攻击承受能力变化的角度而言,2019年“海上丝路”网络比2015年更加强壮,其变化率为30.88%。

表3 2015年和2019年“海上丝路”网络对蓄意攻击承受能力的对比

Tab. 3 Comparison of tolerance to intentional attacks on Maritime Silk Road container shipping network in 2015 and 2019

年份	网络开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量(个)	网络的蓄意攻击承受能力(%)
2015	18	4.21
2019	30	5.51
变化率(%)	66.67	30.88

## 5 海上丝路 网络脆弱性变化的驱动机制及影响因素

为了探究“海上丝路”网络变得更加强壮的深层次原因,对“海上丝路”网络脆弱性变化的驱动机制及其影响因素进行分析。

### 5.1 驱动机制

通过对“海上丝路”网络内部结构特征变化的分析,可知“海上丝路”网络变得更加强壮的驱动机制主要包括港口层级结构的差异性减弱、关键港口备份机制日趋完备、东亚和东南亚与其他区域的集装箱海运联系更加紧密等。

**5.1.1 港口层级结构的差异性减弱** 所谓集装箱海运网络港口层级结构的差异性,是指处于不同层级的港口数量的差异情况。其中,差异性越大,说明集装箱海运的中转运输越集中;差异性越小,说明集装箱海运网络的港口层级结构越均衡。在实际中,集装箱港口可大体分为三个层级,第一层级港口主要包括对维系网络整体互联互通起重要作用的关键港口,若这类港口全部失效,将导致网络出现分裂;第二层级港口主要包括对相邻区域间和区域内中转运输具有一定作用的次级关键港口,若第一层级和第二层级港口全部失效,将导致网络完全崩溃;第三层级港口主要指对网络连通性影响较小的支线/喂给港。因此,可以根据模拟蓄意攻击下2015年和2019年“海上丝路”网络开始崩溃和完全崩溃的临界点,对两个年度网络的港口层级结构进行划分。其中,开始崩溃时遭受攻击的所有港口为关键港口;开始崩溃至完全崩溃期间遭受攻击的所有港口为次级关键港;其余港口为支线/喂给港。进而,得到2015年“海上丝路”网络中关键港口、次级关键港口和支线/喂给港的数量分别为19个、50个和359个,占该年度港口总数的比例分别为4.44%、11.68%和83.88%;2019年“海上丝路”网络中关键港口、次级关键港口和支线/喂给港的数量分别为31个、82个和431个,占该年度港口总数的比例分别为5.70%、15.07%和79.23%(表4)。与2015年相比,2019年“海上丝路”网络中关键港口和次级关键港口的比例相对增加,而支线/喂给港的比例明显减少,即前两个层次港口比例与第

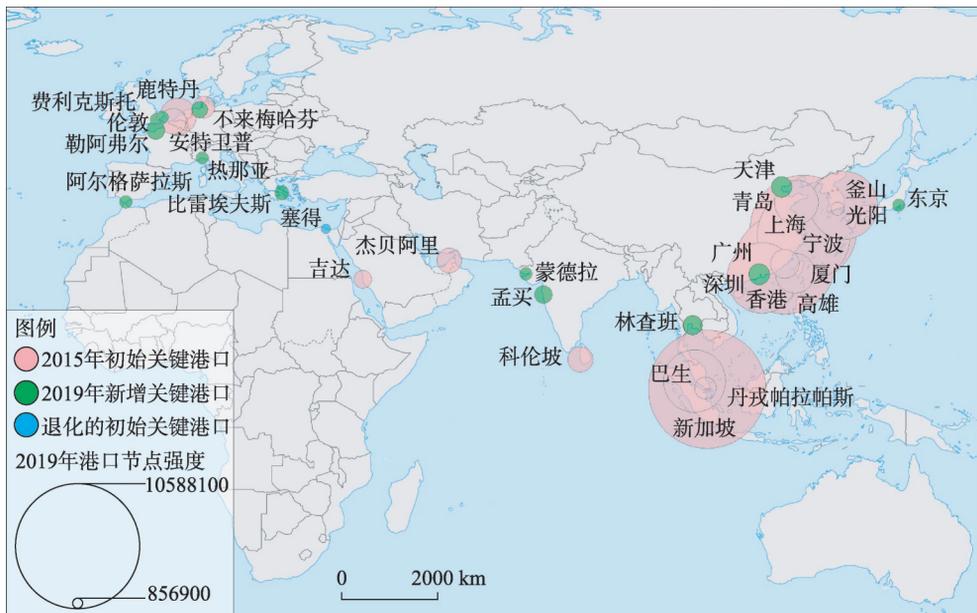
表4 2015年和2019年“海上丝路”网络港口层级结构变化  
Tab. 4 Hierarchical structure changes of ports in Maritime Silk Road container shipping network in 2015 and 2019

年份	关键港口		次级关键港口		支线/喂给港口	
	数量(个)	比例(%)	数量(个)	比例(%)	数量(个)	比例(%)
2015	19	4.44	50	11.68	359	83.88
2019	31	5.70	82	15.07	431	79.23

多层次港口比例之间的差异明显减弱,使得“海上丝路”网络的港口层级结构逐渐由金字塔结构向梯形结构转变。正是因为港口层级结构的差异性呈现减弱趋势,促使“海上丝路”网络更加趋向于均衡和紧密,所以网络在面对蓄意攻击时变得更加强壮。

**5.1.2 关键港口备份机制日趋完备** 在实际中,关键港口构成了集装箱海运网络的核心框架,集装箱从始发港到目的港往往需要经过若干个关键港口的中转才能到达,但集装箱在中转运输时一般有多个关键港口可供选择,例如,经上海港中转运输的集装箱也可以经宁波港进行中转。因此,从网络的角度来看,邻近的多个关键港口之间往往存在着一定的备份机制,如果某一港口因突发事件而无法正常运行,其备份港可以帮助受影响的部分航线实现中转运输,保障网络的运行。根据集装箱海运网络的运行机理,若两个关键港口之间存在相互备份关系,需要同时满足2个必要条件:①两关键港口间的距离较近,应位于同一海运区域内;②两关键港口之间应存在直接的航线联系。

基于以上认识,对2015—2019年“海上丝路”网络关键港口备份机制的演化情况进行分析。2015年“海上丝路”网络中共有初始关键港口19个,主要分布于东亚(9个)、欧洲大西洋沿线(3个)、东南亚(3个)、中东(2个)、南亚(1个)和东地中海(1个)等区域;2019年的新增关键港口共13个,主要分布于欧洲大西洋沿线(4个)、东亚(3个)、西地中海(2个)、南亚(2个)、东南亚(1个)和东地中海(1个)等区域。2019年退化为次级关键港口的初始关键港口仅有塞得港1个,位于东地中海(图3)。由此可知,2015—2019年“海上丝路”网络中关键港口数量发生变化的区域主要包括东亚、欧洲大西洋沿线、东南亚、南亚和西地中海等5个区域。针对上述5个区域,根据关键港口之间存在相互备份关系的必要条件进行分析,发现2015年具有相互备份关系的初始关键港口,在2019年仍然保持着相互备份关系,而新增关键港口与初始关键港口之间则形成了新的相互备份关系。如图4所示,东亚的上海港、深圳港、宁波港、香港港、



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)1665号的标准地图制作,底图边界无修改。

图3 2015—2019年“海上丝路”网络关键港口的演化情况

Fig. 3 Evolution of hub ports in Maritime Silk Road container shipping network in 2015-2019

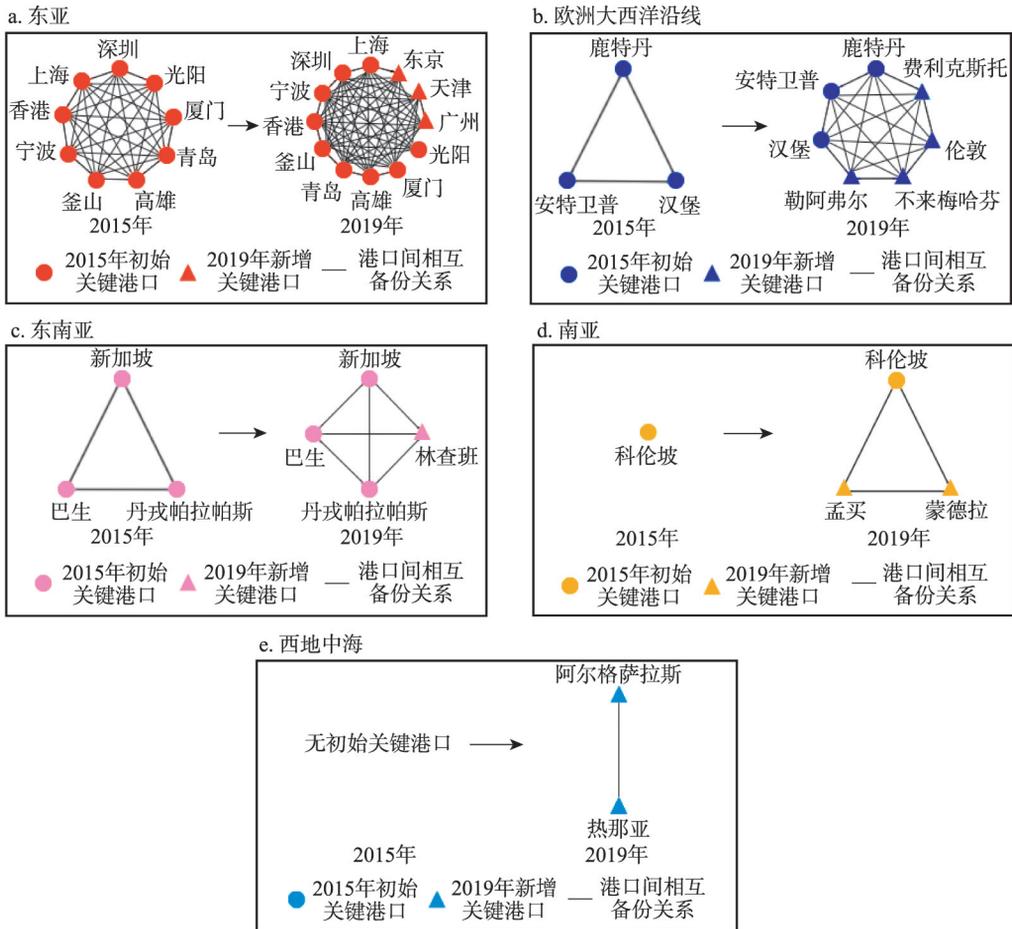


图4 2015—2019年“海上丝路”网络中主要海运区域关键港口的相互备份关系演化情况

Fig. 4 Evolution of mutual backup relationship of key ports in main maritime regions of Maritime Silk Road container shipping network in 2015-2019

釜山港和青岛港的备份港数量均由8个增长至11个；欧洲大西洋沿线的鹿特丹港、安特卫普港、汉堡港的备份港数量均由2个增长至6个；2019年东南亚的林查班港为新增关键港口，与新加坡港、丹戎帕拉帕斯港和巴生港之间形成了新的相互备份关系；2015年南亚的科伦坡港没有备份港，而在2019年孟买港和蒙德拉港成为新增关键港口，与科伦坡港之间形成了相互备份关系；2019年西地中海的热那亚港和阿尔格萨拉斯港等两个新增关键港口之间形成了新的相互备份关系，使得西地中海的关键港口具备了协同抵抗风险的能力。

进一步将东亚、欧洲大西洋沿线、东南亚、南亚和西地中海等5个区域中各关键港口的备份港数量分别进行加和平均，可以得到各区域的平均备份港数量（图5）。2015—2019年期间，东亚区域关键港口的平均备份港数量由7.78个增加至10.17个，欧洲大西洋沿线区域关键港口的平均备份港数量由2个增加至6个，东南亚区域关键港口的平均备份港数量由2个增加至3个，南亚区域关键港口的平均备份港数量由0个增加至2个，西地中海区域关键港口的平均备份港数量由0个增加至1个。由此可知，2015—2019年期间，东亚、欧洲大西洋沿线、东南亚、南亚和西地中海等5个海运区域的关键港口备份机制均变得更加完备，使得“海上丝路”网络应对突发事件的能力大幅提升。

**5.1.3 东亚和东南亚与其他区域的集装箱海运联系更加紧密** 2015年的“海上丝路”网络,仅19个港口遭受蓄意攻击时东亚和东南亚区域子网络就首先从网络主体结构中分裂出来,导致网络开始崩溃,据此可以认为东亚和东南亚是2015年“海上丝路”网络在蓄意攻击下的脆弱性敏感区域;而2019年的“海上丝路”网络,当模拟蓄意攻击的港口数量达到61个和82个时,东亚和东南亚区域子网络才分别从网络主体结构中分裂出来,说明东亚和东南亚区域子网络对蓄意攻击的敏感程度明显减弱。为探究其原因,对东亚和东南亚港口与其他区域(“海上丝路”中除东亚和东南亚以外的区域)港口间的航线联系情况进行了分析。2015年东亚和东南亚港口分别与其他区域中的84个和97个港口存在航线联系,而2019年东亚和东南亚港口分别与其他区域中的98个和111个港口存在航线联系,各增加了14个,增幅分别为16.67%和14.43%(表5)。说明东亚和东南亚与其他区域间的集装箱海运联系变得更加紧密,促使“海上丝路”网络承受蓄意事件破坏的能力逐渐提升。

## 5.2 影响因素

针对“海上丝路”网络的行为主体,从航运公司的航线布局、港口运营商的联盟策略、国际合作和国际贸易等角度,对形成上述驱动机制的主要影响因素进行分析。

**5.2.1 跨区域集装箱航线及其挂靠港口的数量增加** “海上丝路”网络中跨区域航线的数量由2015年的1133条增加至2019年的1232条,增加了99条,说明网络中各区域间航线的整体密度有所增加。但仅依靠跨区域航线数量的变化,还不足以揭示网络中各区域港口间连接紧密程度的变化情况。因此,进一步对跨区域航线的挂靠港口数量进行了分析,发现所有跨区域航线的平均挂靠港口数量由2015年的6.90个增加至2019年的7.21个,其中东亚、东南亚与欧洲大西洋沿线、西地中海、东地中海之间的大部分长距离洲际集装箱干线所挂靠的港口数量均呈现增加趋势(图6)。这一航线布局的变化,使得“海上丝路”网络中挂靠跨区域航线的港口数量由2015年的275个增加至2019年的344个,增加了69个(其中东亚2个、东南亚15个、南亚5个、东地中海16个、西地中海8个、波罗的海沿线25个),说明跨区域航线将更多的港口直接连接在一起,促进了新枢纽港的形成和港口备份机制的发展,提升了“海上丝路”网络中各区域港口之间的连接紧密程度。

**5.2.2 港口联盟和港航联盟深化发展** 据联合国贸发会议出版的《海运述评》显示,全球排名前10位的国际集装箱码头运营商在世界集装箱港口运营份额中所占的总比例由2015

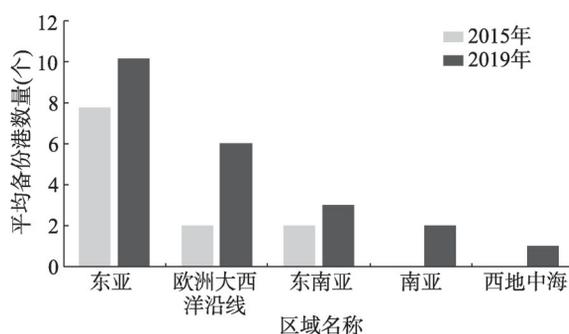


图5 2015年和2019年“海上丝路”网络中主要海运区域关键港口的平均备份港数量演化情况

Fig. 5 Evolution of average number of backup ports for key ports in main maritime regions of Maritime Silk Road container shipping network

表5 2015年和2019年与东亚和东南亚港口存在航线联系的其他区域港口的数量变化

	与东亚港口存在航线联系的其他区域港口的数量(个)	与东南亚港口存在航线联系的其他区域港口的数量(个)
2015年	84	97
2019年	98	111
变化率(%)	16.67	14.43

年的38.1%增加至2018年的70.2%（表6），增长了近1倍，说明正在有越来越多的集装箱港口接受国际集装箱码头运营商的运营和管理，促进了港口与港口之间联盟（简称“港口联盟”）的深化发展。在这一背景下，集装箱港口的服务标准日渐统一（例如中远海运在“海上丝路”范围内共参与运营13个国家的32个港口或码头，其服务标准基本相同）、作业效率普遍提高（全球集装箱船的平均在港时间由2016年的0.87 d减少至2019年的0.69 d，数据来源为联合国贸发会议出版的《海运述评》），为航运公司的航线在单位时间内多挂靠港口提供了必要条件。

与此同时，许多国际集装箱码头运营商自身也是航运公司，如马士基、地中海航运、中远海运、招商局、达飞海运、长荣海运等。因此，在港口联盟深化发展的同时，也促成了港口与航运公司之间联盟（简称“港航联盟”）的发展。当航运公司获得某港口（或码头）的经营权后，将会围绕该港口调整航线布局，使其航线网络更加优化。此外，当航运公司的船舶在本公司参与运营的码头靠泊时，往往不需要排队，在一定程度上减少了其船舶的在港时间，进一步为“海上丝路”范围内的集装箱干线在单位时间内多挂靠港口增加了可能性，为“海上丝路”网络向更加连通、更加强壮方向的发展创造了空间。

**5.2.3 国际合作和国际贸易的影响** 根据中国外交部统计，截止到2019年第二届“一带一路”国际合作高峰论坛举行之前，已有126个国家和29个国际组织同中国签署了“一

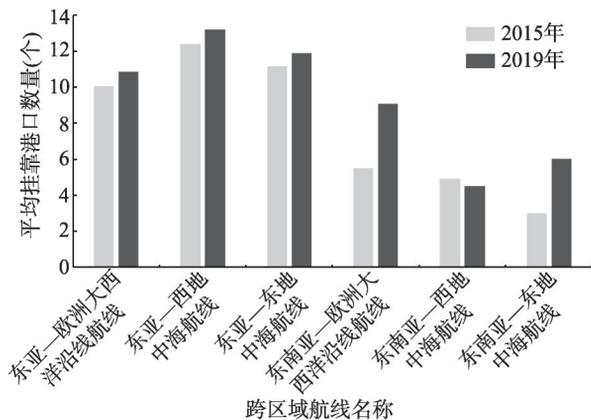


图6 2015年和2019年主要跨区域航线的平均挂靠港口数量变化

Fig. 6 Changes in the average number of ports of call for major cross-regional routes in 2015 and 2019

表6 2015年和2018年国际集装箱码头运营商的市场份额变化

Tab. 6 Changes in market share of international container terminal operators in 2015 and 2018

2015年				2018年			
排名	国际集装箱码头运营商	作业量 (百万TEU)	市场份额 (%)	排名	国际集装箱码头运营商	作业量 (百万TEU)	市场份额 (%)
1	新加坡国际港务集团	53	7.7	1	中远海运集团	106	13.5
2	和记港口集团	47	6.9	2	和记港口集团	83	10.5
3	迪拜环球港务集团	37	5.4	3	新加坡国际港务集团	80	10.2
4	马士基集团	36	5.2	4	马士基集团	79	10
5	招商局集团	26	3.8	5	迪拜环球港务集团	70	8.9
6	中国远洋运输集团	20	3	6	地中海航运集团	48	6.1
7	地中海航运集团	18	2.7	7	招商局集团	35	4.4
8	中海集团	9	1.3	8	达飞海运集团	26	3.3
9	长荣海运集团	8	1.1	9	欧门港务集团	14	1.7
10	欧门港务集团	7	1	10	美国海运装卸公司	13	1.6
合计		261	38.1	合计		554	70.2

注：数据来源于联合国贸发会议出版的《海运述评》。

带一路”的合作协议,促进了“海上丝绸之路”沿线各国的政策沟通、设施联通、贸易畅通、资金融通和民心相通。同时,中国与“海上丝路”沿线的主要国家还利用G20和金砖五国等合作框架展开了较为良好的合作。在这一背景下,亚洲和欧洲之间的集装箱贸易量由2015年的约21百万TEU增长至2019年的约25百万TEU,增幅约为19.05%,远高于同一时期全球的集装箱贸易量增长幅度(约11.76%),且亚洲和欧洲之间的集装箱贸易量占全球集装箱贸易量的比例由2015年的约15.44%增长至2019年的约16.45%(表7)。上述国际合作的加强和国际贸易的增长,为“海上丝路”网络的快速成长和优化发展提供了支持和动力。

表7 2015年和2019年亚洲和欧洲之间的集装箱贸易量变化

Tab. 7 Changes in container trade volume between Asia and Europe in 2015 and 2019

年份	亚洲和欧洲之间的集装箱贸易量(百万TEU)	全球集装箱贸易量(百万TEU)	占比(%)
2015	21	136	15.44
2019	25	152	16.45
变化率(%)	19.05	11.76	-

注:数据来源于联合国贸发会议出版的《海运述评》。

## 6 结论与讨论

### 6.1 结论

本文基于蓄意攻击下集装箱海运网络的地理空间联系变化和网络分裂过程,提出了蓄意攻击下集装箱海运网络崩溃临界点的识别方法,并建立了相应的集装箱海运网络脆弱性变化程度的量化方法。利用上述方法,基于2015年和2019年全球航运公司运营航线和挂靠港口的统计数据,对《愿景和行动》发布以来“21世纪海上丝绸之路”网络在蓄意攻击下的脆弱性变化情况进行了研究,并对其影响因素进行了详细分析,主要结论为:

(1) 2015—2019年期间,“海上丝路”网络中的集装箱港口数量由428个增加至544个,航线数量由2429条增加至2724条,增幅分别为27.10%和12.14%,网络呈现明显的扩张趋势。

(2) 在蓄意攻击情境下,2015年和2019年“海上丝路”网络在开始崩溃前能够承受的最大攻击港口数量分别为18个和30个,即2015年和2019年“海上丝路”网络的蓄意攻击承受能力分别为4.21%和5.51%,表明2019年“海上丝路”网络比2015年更加强壮,其相对变化率为30.88%。随着海上丝绸之路建设的不断深化,“海上丝路”网络愈发强壮的趋势可能进一步延续。

(3) “海上丝路”网络中关键港口和次级关键港口所占比例明显增加,港口层级结构的差异性减弱;东亚、欧洲大西洋沿线、东南亚、南亚和西地中海等海运区域的关键港口备份机制显著增强;东亚和东南亚与其他区域间的集装箱海运联系更加紧密,以上3个方面是“海上丝路”网络对蓄意攻击的承受能力显著提升的主要驱动机制。同时,跨区域集装箱航线及其挂靠港口的数量增加、港口联盟和港航联盟深化发展、国际合作和国际贸易的增加是形成上述驱动机制的主要影响因素。

### 6.2 讨论

2020年以来“21世纪海上丝绸之路”范围内新型冠状病毒肺炎疫情影响巨大,部分地区政局动荡不安,军事冲突愈演愈烈,恐怖主义长期存在,对中国集装箱海运的安全保障造成了巨大的挑战。本文结合当前形势和上述研究结论,从安全保障的角度,对

“海上丝路”网络的建设和发展提出以下对策建议：

(1) 建立针对重大突发事件的安全风险预警与应急保障机制。针对“海上丝路”范围内可能长期存在的重大公共卫生安全威胁、军事冲突、恐怖袭击和罢工等风险，应建立有效的风险预警和应急保障机制，为中国的集装箱航线提供实时的风险预警，协助相关船舶避开高危港口和航道，并在某港口或航线出现重大突发事件时提供相应的应急保障和紧急救援措施，避免不必要的损失。

(2) 充分发挥中国大型航运企业整合所形成的合力优势，打造多核的海外关键港口布局。随着中国与“海上丝路”沿线各国间经济贸易联系的日益紧密，如何提高中国集装箱航线海外一端的运行效率和安全保障水平变得十分重要而紧迫。针对目前“海上丝路”各区域中关键节点不断增加的现实情况，中国应充分利用中远海运集团和招商局集团完成相应资源整合所形成的规模优势和资金优势，增加对海外关键港口的建设和投资，尤其在东南亚、南亚、地中海和欧洲大西洋沿线等重要区域应合力打造多核的海外关键港口布局，建立海外港口的“备份机制”，进一步提升中国与“海上丝路”沿线各区域间集装箱海运的互联互通水平和抵抗风险能力。

(3) 优化国内港口和航线的资源配置，进一步突出中国关键港口的国际中转作用。目前，中国港口已形成了明显的层级结构，为进一步提高中国集装箱海运航线国内一端的运行效率，中国应加强国内沿海各港口与上海港、深圳港、宁波港和青岛港等重要关键港口的联系，减少进出口航线的中转次数，促进中国集装箱海运网络的高效稳定运行。

在本文的研究中对关键港口之间的相互备份关系进行了识别。但某一关键港口可能具有多个备份港，各备份港的优先级和对目标港口的备份程度也存在较大差异。因此，如何对备份港的优先级和备份程度进行量化分析是下一步需要研究的内容。

## 参考文献(References)

- [1] Du Debin, Ma Yahua. One Belt and One Road: The grand geo-strategy of China's rise. *Geographical Research*, 2015, 34(6): 1005-1014. [杜德斌, 马亚华. “一带一路”: 中华民族复兴的地缘大战略. *地理研究*, 2015, 34(6): 1005-1014.]
- [2] Yang Wenlong, Du Debin, Ma Yahua, et al. Network structure and proximity of the trade network in the Belt and Road region. *Geographical Research*, 2018, 37(11): 2218-2235. [杨文龙, 杜德斌, 马亚华, 等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性. *地理研究*, 2018, 37(11): 2218-2235.]
- [3] Gong Peiping, Song Zhouying, Liu Weidong. Commodity structure of trade between China and countries in the Belt and Road Initiative area. *Progress in Geography*, 2015, 34(5): 571-580. [公丕平, 宋周莺, 刘卫东. 中国与“一带一路”沿线国家贸易的商品格局. *地理科学进展*, 2015, 34(5): 571-580.]
- [4] Liu Weidong, Michael Dunford, Gao Boyang. Discursive construction of the Belt and Road Initiative: From neoliberal to inclusive globalization. *Progress in Geography*, 2017, 36(11): 1321-1331. [刘卫东, Michael Dunford, 高波阳. “一带一路”倡议的理论建构: 从新自由主义全球化到包容性全球化. *地理科学进展*, 2017, 36(11): 1321-1331.]
- [5] 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. [郑智, 刘卫东, 宋周莺, 等. “一带一路”生产网络及中国参与程度. *地理科学进展*, 2019, 38(7): 951-962.]
- [6] Liu Weidong. Scientific understanding of the Belt and Road Initiative of China and related research themes. *Progress in Geography*, 2015, 34(5): 538-544. [刘卫东. “一带一路”战略的科学内涵与科学问题. *地理科学进展*, 2015, 34(5): 538-544.]
- [7] Calatayud A, Mangan J, Palacin R. Vulnerability of international freight flows to shipping network disruptions: A multiplex network perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 108: 195-208.
- [8] Fraser D R, Notteboom T, Ducruet C. Peripherality in the global container shipping network: The case of the Southern African container port system. *GeoJournal*, 2016, 81(1): 396-409.

- [9] Gao J X, Barzel B, Barabási A L. Universal resilience patterns in complex networks. *Nature*, 2016, 530(7590): 307-312.
- [10] Zhang L, Lu J, Fu B B, et al. A review and prospect for the complexity and resilience of urban public transit network based on complex network theory. *Complexity*, 2018: 2156309. DOI: 10.1155/2018/2156309.
- [11] Reggiani A, Nijkamp P, Lanzi D. Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 4-15.
- [12] Mattsson L G, Jenelius E. Vulnerability and resilience of transport systems: A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81: 16-34.
- [13] Peng Peng, Cheng Shifen, Liu Xiliang, et al. The robustness evaluation of global maritime transportation networks. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(12): 2241-2251. [彭澎, 程诗奋, 刘希亮, 等. 全球海洋运输网络健壮性评估. *地理学报*, 2017, 72(12): 2241-2251.]
- [14] Zong Kang, Hu Zhihua. Research on the connectivity of shipping route network based on complex network. *Journal of Dalian Maritime University*, 2017, 43(1): 79-84. [宗康, 胡志华. 基于复杂网络的海运航线网络连通性分析. *大连海事大学学报*, 2017, 43(1): 79-84.]
- [15] Yu Anqi, Wang Nuo. Connectivity analysis of container shipping network of "21st Century Maritime Silk Road". *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019, 40(4): 72-77. [于安琪, 王诺. "21世纪海上丝绸之路"集装箱海运网络连通性分析. *上海海事大学学报*, 2019, 40(4): 72-77.]
- [16] Viljoen N M, Joubert J W. The vulnerability of the global container shipping network to targeted link disruption. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 462: 396-409.
- [17] Ducruet C. Hub dependence in constrained economies: The case of North Korea. *Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research*, 2008, 35(4): 377-394.
- [18] Ducruet C, Lee S, Ng A K Y. Centrality and vulnerability in liner shipping networks: Revisiting the Northeast Asian port hierarchy. *Maritime Policy & Management*, 2010, 37(1): 17-36.
- [19] Wang Nuo, Dong Lingling, Wu Nuan, et al. The change of global container shipping network vulnerability under intentional attack. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 293-303. [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. *地理学报*, 2016, 71(2): 293-303.]
- [20] Wang N, Wu N, Dong L, et al. A study of the temporal robustness of the growing global container-shipping network. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34217. DOI: 10.1038/srep34217.
- [21] Wang Chengjin, Jin Fengjun. Organization network of Chinese marine container transportation. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 392-401. [王成金, 金凤君. 中国海上集装箱运输的组织网络研究. *地理科学*, 2006, 26(4): 392-401.]
- [22] Wang Chengjin. Spatial organization networks of world marine container transportation. *Geographical Research*, 2008, 27(3): 636-648. [王成金. 全球集装箱航运的空间组织网络. *地理研究*, 2008, 27(3): 636-648.]
- [23] Wang C J, Wang J E. Spatial pattern of the global shipping network and its hub-and-spoke system. *Research in Transportation Economics*, 2011, 32(1): 54-63.
- [24] Chen Fuying, Zhang Jiantong, Luo Meifeng. Comprehensive evaluation of the positions of the ports along "21st Century Maritime Silk Road". *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(1): 157-164. [陈芙英, 张建同, 罗梅丰. "21世纪海上丝绸之路"沿线港口地位综合评价. *运筹与管理*, 2020, 29(1): 157-164.]
- [25] Deng Guishi, Wu Peijian, Tian Wei. Research on robustness and vulnerability of global shipping network. *Journal of Dalian University of Technology*, 2008, 48(5): 765-768. [邓贵仕, 武佩剑, 田炜. 全球航运网络鲁棒性和脆弱性研究. *大连理工大学学报*, 2008, 48(5): 765-768.]
- [26] Tian Wei, Deng Guishi, Wu Peijian. Analysis of network effect in port and shipping system characterized by scale-free network. *Chinese Journal of Management*, 2008, 5(3): 381-384. [田炜, 邓贵仕, 武佩剑. 具有无标度特性的港航系统网络效应分析. *管理学报*, 2008, 5(3): 381-384.]
- [27] Wu Peijian, Deng Guishi, Tian Wei. Research on topology character of container shipping network. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2008, 32(4): 665-668. [武佩剑, 邓贵仕, 田炜. 集装箱航运网络拓扑特性研究. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2008, 32(4): 665-668.]
- [28] Wu Di, Wang Nuo, Yu Anqi, et al. Vulnerability and risk management in the Maritime Silk Road container shipping network. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1133-1148. [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. *地理学报*, 2018, 73(6): 1133-1148.]
- [29] Liu H, Tian Z, Huang A, et al. Analysis of vulnerabilities in maritime supply chains. *Reliability Engineering & System*

- Safety, 2018, 169: 475-484.
- [30] Earnest D C, Yetiv S, Carmel S M. Contagion in the transpacific shipping network: International networks and vulnerability interdependence. *International Interactions*, 2012, 38(5): 571-596.
- [31] Wu Di, Wang Nuo, Wu Nuan, et al. The impact of main channel interruption on vulnerability of container shipping network and China container shipping. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 719-730. [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. *地理研究*, 2017, 36(4): 719-730.]
- [32] Wu Di, Wang Nuo, Yu Anqi, et al. Vulnerability analysis of global container shipping liner network based on main channel disruption. *Maritime Policy & Management*, 2019, 46(4): 394-409.
- [33] Du Chao, Wang Jiaoe, Mo Huihui. Spatial pattern analysis of China container shipping network on complex theory. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(2): 190-198. [杜超, 王姣娥, 莫辉辉. 中国集装箱航运网络空间格局及复杂性研究. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 190-198.]
- [34] Zhao Y Z, Zhou J M, Kuang H B. Hierarchical structures of hub ports in the global container shipping network based on centralities analysis. *Advances in Transportation Studies*, 2014, 3: 3-14.
- [35] Li Zhenfu, Shi Yanlei, Xu Mengqiao, et al. Hierarchy structure in the global liner shipping network. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2016, 36(4): 981-988. [李振福, 史砚磊, 徐梦俏, 等. 世界集装箱海运网络层次结构研究. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(4): 981-988.]
- [36] Guo Jianke, He Yao, Wang Shaobo, et al. Rank-size distribution changes and transportation network connections of the coastal container port system in Chinese mainland since 1985. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 869-883. [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. *地理研究*, 2019, 38(4): 869-883.]
- [37] Li Zhenfu, Shi Yanlei, Xu Mengqiao, et al. Position of the Asian container ports in global liner shipping network. *Economic Geography*, 2016, 36(3): 91-98. [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. *经济地理*, 2016, 36(3): 91-98.]
- [38] Li Zhenfu, Li Wanying, Xu Mengqiao. Centrality of Maritime Silk Road container shipping network. *Navigation of China*, 2018, 41(3): 123-128. [李振福, 李婉莹, 徐梦俏. 新海上丝绸之路集装箱海运网络中心性. *中国航海*, 2018, 41(3): 123-128.]
- [39] Wang Liehui, Zhu Yan. The evolution of China's international maritime network based on the "21st Century Maritime Silk Road". *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(12): 2265-2280. [王列辉, 朱艳. 基于“21世纪海上丝绸之路”的中国国际航运网络演化. *地理学报*, 2017, 72(12): 2265-2280.]
- [40] Wang Liehui, Ye Fei, Zheng Yuanbo. The assessment of Sino-US container shipping network evolution and vulnerability. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 136-144. [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. *经济地理*, 2020, 40(5): 136-144.]

## Vulnerability changes of the Maritime Silk Road container shipping network under intentional attacks

WU Di, WANG Yupeng, SHENG Shijie, WANG Nuo

(Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** Since the release of "Vision and Actions on jointly building Silk Road Economic Belt and 21st-Century Maritime Silk Road" in 2015, the Maritime Silk Road container shipping network has experienced rapid development and significant changes along with the construction of the Belt and Road economic community. To explore changes in the vulnerability of the Maritime Silk Road container shipping network under intentional attacks, this study proposed an identification method for the critical point of collapse of the container shipping network based on geospatial connection changes and the network fragmentation process under such attacks. In addition, a quantification method is developed for the change trend and degree of vulnerability of the container shipping network. The network was constructed using statistical data of ports and routes of the Maritime Silk Road in 2015 and 2019. The results show that the intentional attack tolerances of the networks in 2015 and 2019 were 4.21% and 5.51%, respectively, indicating that the Maritime Silk Road container shipping network in 2019 was stronger than that in 2015, with a relative change rate of 30.88%. The driving mechanisms for the vulnerability changes in the Maritime Silk Road container shipping network mainly included the diminished differentiation in the structure of the port hierarchy, the increasing completion of the backup mechanism of key ports, and the closer container shipping links of East and Southeast Asia with other regions. Corresponding countermeasures and suggestions are proposed for continuously guaranteeing the interconnection of container shipping between China and countries (regions) along the Maritime Silk Road. The results of this study have important theoretical significance and practical value for revealing the vulnerability changes of the Maritime Silk Road container shipping network and its driving mechanisms and influencing factors, as well as for ensuring the continuous interconnection of the network. The analysis method presented in this paper can provide a reference for related research on vulnerability changes in other transportation networks.

**Keywords:** Maritime Silk Road; container shipping network; intentional attacks; vulnerability; driving mechanisms; influencing factors