

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

粤港澳大湾区航运网络韧性及驱动机制研究

郑健良, 宋敏, 石常峰

Study on the resilience and driving mechanisms of the shipping network in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area

ZHENG Jianliang, SONG Min, SHI Changfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20250227001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

粤港澳大湾区航运网络韧性及驱动机制研究

郑健良¹, 宋敏², 石常峰²

(1. 广东省交通运输规划研究中心, 广东 广州 510101; 2. 河海大学 商学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 探究不同类型突发事件对航运网络的冲击作用及事后恢复机制, 对保障航运稳定性与促进港口发展具有重要的理论和实践意义。基于复杂网络理论构建粤港澳大湾区航运网络, 重点分析网络在度破坏、中间性破坏、强度破坏和随机破坏 4 种不同破坏模式下网络的结构变化, 并通过多种恢复策略评估航运网络的韧性表现。研究表明: 香港港、深圳港和广州港作为粤港澳大湾区航运网络的核心节点, 其韧性直接关系到网络的整体稳定性。尽管网络初期具备较强连接性和效率, 连通度与效率分别达 10.300、0.295, 但在遭遇破坏时, 核心港口失效会显著降低网络效率和连通性, 因此需加强对这些节点的保护。强度恢复策略在度破坏时效果最佳, 网络连通性韧性 0.76, 独立路径韧性 0.54; 而中介恢复策略在强度和中介破坏下表现优越, 网络效率韧性分别达 1.00 和 0.83, 需要依据实际情况进行恢复策略选择。基于指数随机图模型的分析结果表明, 网络韧性提升依赖于路径优化与港口合作的双重机制: 通过“直航优先”降低多跳运输脆弱性, 并通过互惠合作与地理协同构建核心港口辐射连接与次级港口专业化协作网络, 形成多层次冗余路径, 提高系统抗风险能力。研究结果可为港口管理、航线优化及应急恢复策略制定提供科学依据, 有助于提升粤港澳大湾区航运系统的稳定性与韧性。

关键词: 粤港澳大湾区; 航运网络; 结构韧性; 应对策略; 破坏模式

中图分类号: TV92 文献标志码: A 文章编号:

作为全球贸易的核心载体, 海上运输系统承担着 80% 以上的国际货物运输量, 是连接全球生产体系与消费市场的关键基础设施^[1-2]。其中, 港口节点与航运路线构成的空间网络不仅决定着物流效率, 更成为影响区域经济韧性的战略要素^[3-4]。值得注意的是, 航运网络在促进全球化资源配置的同时, 其固有的连通性特征也使系统风险具备跨区域传导能力——局部节点故障可能通过网络连接引发级联失效, 最终导致全球供应链中断的“多米诺效应”^[5-6]。这一特性在近年来频发的“黑天鹅”事件(如新冠疫情导致的港口拥堵、苏伊士运河堵塞事件)中已得到充分验证。

网络结构的韧性是指在面临紧急情况或灾难时, 网络系统能够有效恢复、维护或提升其原有功能和性能的能力^[7]。一个韧性优良的航运网络应具备强大的抗干扰能力, 即能够承受港口和航道停运后运输中断的影响, 并通过适当的维修措施迅速将网络恢复到可接受的标准水平^[8-9]。粤港澳大湾区作为中国经济活跃区域, 其航运网络韧性建设具有重要战略意义。从地理特征看, 该区域坐拥香港、深圳、广州三大世界级港口, 2022 年集装箱吞吐量占全球总量的 15% 以上^[10-12], 其网络稳定性直接关乎“一带一路”海上通道安全。从政策导向看, 《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确提出要构建“具有国际竞争力的现代化综合交通运输体系”, 其中特别强调提升基础设施“抗风险能力”和“应急保障水平”。然而目前大湾区航运网络同时面临三类典型威胁: (1) 气候相关灾害, 如台风季对珠江口锚地的周期性冲击; (2) 地缘政治风险, 包括国

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-05-19; 接受日期: 2025-06-09

作者简介: 郑健良(1981—), 男, 海南儋州人, 高级工程师, 主要从事港口航道规划、战略研究和设计咨询等方面研究。

E-mail: 8100727@qq.com 通信作者: 宋敏(E-mail: songmin@hhu.edu.cn)

际贸易规则突变和关键航道通行受限;(3)技术性瓶颈,表现为港口自动化水平差异导致的协同效率损失^[9, 13-15]。这些多元风险的交织作用,使得传统基于单因素分析的韧性评估方法难以满足区域发展需求。因此,为提高粤港澳大湾区航运网络韧性以保障全球供应链和贸易流通,必须深入分析航运网络的危机传播机制及其韧性水平,从而提高网络整体的稳定性和抗干扰能力。

综上所述,本文以粤港澳大湾区港口群航运网络为研究对象,提出一种基于不同攻击模式的网络结构韧性评估方法,旨在定量测度不同破坏情景下港口群航运网络的结构韧性。本文的主要工作包括:(1)构建基于复杂网络理论的粤港澳大湾区航运网络并揭示其拓扑结构特征。通过拓扑结构分析航运网络内部港口之间的连接性、节点重要性及网络的整体结构特征,揭示网络中各港口节点的作用和关键路径,为理解粤港澳大湾区航运网络韧性水平提供基础。(2)提出基于多种随机破坏模式的航运网络结构韧性评估框架。通过模拟不同突发事件冲击下的网络演化,全面分析不同层级港口节点在遭遇突发事件时的动态响应和网络整体韧性表现,从而评估航运网络在面临外部冲击时的恢复能力和抗风险能力。(3)揭示航运网络内部的危机传染机制。通过指数随机图模型(Exponential Random Graph Model, ERGM)定量模拟网络结构和外部因素对网络形成的影响,有助于全面理解网络关系并为政策制定者、港口管理者和航运公司制定合理的海上运输安全保障机制提供参考。

1 文献综述

1.1 航运网络解构研究

航运网络解构是分析港口与航线空间组织关系的基础研究。早期研究主要采用港口体系理论,通过吞吐量规模、航线密度等统计指标刻画网络结构。刘丽等^[16]和郭建科等^[17]分别运用港口生态位宽度和空间分析方法识别不同航运网络的空间结构特征。随着交通地理学的发展,学者开始关注港口间的空间联系。蒋自然等^[18]运用分形方法对长三角港口体系 2000 年以来的空间规模结构维数和关联结构维数进行测算。近年来,复杂网络理论的发展为分析全球贸易和海上运输流动网络拓扑结构、特性及其演变提供了重要启发^[19-20]。学者们尝试引入复杂网络理论中的中心性指标和社区发现算法来识别枢纽港口和航线集群^[21-22]。刘镇等^[23-24]等运用复杂网络方法探究共建“一带一路”国家(地区)班轮航运网络与地中海邮轮港口参与全球邮轮航运网络的结构特征。

综上所述,传统的航运网络分析主要侧重于港口间的空间联系与异质性特质,少有采用复杂网络分析方法解构航运网络的结构特征与空间关联。因此,本文构建基于复杂网络理论的粤港澳大湾区航运网络并刻画其拓扑结构特征,以揭示网络中各港口节点的异质性作用和关键路径。

1.2 航运网络韧性评估研究

网络韧性评估是研究网络在遭受冲击或灾难后恢复能力的重要范式,广泛应用于交通网络,包括公路网络、航空网络、海事网络等研究。在航运网络中,韧性评估不仅涉及节点(港口)和边(航线)的容错能力,还包括网络整体在面临突发事件时的应对能力。Dirzka 等^[25]通过研究运输网络中断的形式来分析新冠疫情初期全球航运网络的动态影响,研究表明疫情导致了多个港口的关闭或航线的暂停,对全球航运流动造成了严重干扰;Liu 等^[26]从阻力、吸收性和可恢复性 3 个维度建立网络韧性模型,以评估区域全面经济伙伴关系(Regional Comprehensive Economic Partnership, RCEP)成员国之间航运网络的性能。最新的研究进一步探讨了如何在不同的破坏情境下评估航运网络的抗风险能力。He 等^[5]通过检测随机攻击或蓄意攻击前后网络指标性能的变化来分析集装箱港航运网络韧性。

综上所述,传统的航运网络韧性研究存在破坏模式设置过于简化,通常为频繁的、可观测的中断事件,而较少关注低概率-高影响的突发性事件。因此,本文提出基于多种随机破坏模式的航运网络结构韧性评估框架,以衡量粤港澳大湾区航运网络在面临外部突发冲击时的恢复能力和抗风险能力。

1.3 航运网络演化机制研究

网络机制探究旨在揭示影响航运网络演化的关键因素及其对网络节点、连接与整体行为的作用,理解航运网络的演化机制是提升其韧性的理论基础^[27-28]。早期研究多采用定性分析方法,如王伟等^[29]通过案例比较识别出的港口腹地经济、自然条件等影响因素。随着研究方法的发展,学者们开始引入定量分析技术。Hu等^[30]利用社会网络模型和灰色关联分析方法发现技术引进水平、信息化水平与城市群低碳合作网络发展高度相关。二次指派程序(Quadratic Assignment Procedure, QAP)模型的应用进一步推动了多因素影响定量分析^[31],但其在处理网络内生效应方面存在局限。近年来,ERGM因其独特的结构-属性双重分析能力,逐渐成为网络机制研究的新范式^[32]。该模型能够同时分析网络结构的内生特征(如互惠性、传递性)和外生变量的影响,已广泛应用于合作网络^[33]、贸易网络^[34]和组织网络^[35]中。通过这种方式,能更精确地捕捉影响航运网络韧性的内在机制与外部因素,并为网络优化提供理论依据。

综上所述,当前对航运网络演化机制的研究聚焦于经济社会等外部影响因素的定性分析与定量分析,忽略了对网络内生特征的影响分析。因此,本文将ERGM应用于粤港澳大湾区航运网络的演化机制研究中,以探究其内外部因素的双重影响。

2 研究方法

2.1 航运网络韧性评估框架

本文以粤港澳大湾区港口为网络节点,港口间航线作为网络的边构建航运网络。对网络采取以下4种破坏模式:度破坏(Degree-based Attack, DA)、中间性破坏(Betweenness-based Attack, BA)、强度破坏(Strength-based Attack, SA)和随机破坏(Random Attack, RA),并从航运网络受到冲击后呈现的4种阶段出发进行网络结构韧性评价。具体阶段如图1所示。航运网络在初始阶段处于稳定状态,表现为高效的运输和航运流动。随着冲击事件的发生,航运网络的连接性和效率开始受到影响,表现为运输效率下降,港口和航线的功能受限等。经过一定时间后,航运网络的节点和边重新连通,运输流动逐步恢复到较为正常的状态。最终,网络结构完全恢复并趋于稳定。其中,所有恢复策略中的节点排序均基于网络初始拓扑属性(t_1 时刻的度值/中间性/强度),而非破坏后的残差网络属性。该设定确保恢复过程重建原始网络结构特性,符合韧性三角理论对恢复初始状态的基本要求。

具体而言,初始稳态(t_1)的确认需同时满足网络完成初始化加载、所有节点和边的属性验证通过、基础指标计算完毕3个条件;系统崩溃(t_2)的触发需以网络效率降至初始值的1%作为核心判定依据,结合被移除节点数达到临界规模(即网络从功能性状态向崩溃状态转变时,被移除节点的最小数量阈值)进行辅助验证,且需满足连续2个操作步长的稳定性验证;恢复终态(t_3)的判定则要求系统在结构层面实现所有被移除节点按原始拓扑重新接入,在功能层面使独立路径数恢复至初始值的80%,同时确保连续3个恢复步长内各项指标波动控制在 $\pm 2\%$ 以内。

2.2 航运网络韧性评估指标

航运网络韧性包含结构韧性(静态拓扑抗毁性)与系统韧性(动态功能恢复能力)。前者通过复杂网络指标(如节点强度、路径冗余性)提供基础支撑;后者依托韧性三角理论,量化性能随时间变化的恢复过程,二者共同构成航运网络韧性的完整评估框架。

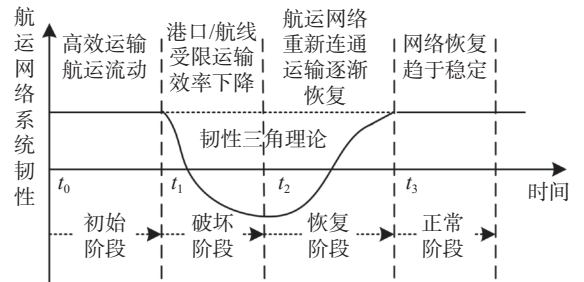


图1 航运网络韧性评估框架

Fig. 1 Framework for assessing shipping network resilience

(1)几何加权度 给定航运加权网络 $G = (V, E)$, 边权重为 $w(e)$, 节点 v 的度为 $d(v)$, 节点 v 的几何加权度 $G_W(v)$ 计算如下:

$$G_W(v) = \begin{cases} \sum_{u \in N(v)} w(e_{vu}) \cdot \ln(d(u) + 1) & N(v) \neq \emptyset \\ 0 & N(v) = \emptyset \end{cases} \quad (1)$$

式中: $N(v)$ 为节点 v 的邻居节点集合; e_{vm} 为连接节点 v 与邻居节点 u 的边。

(2)中介中心性 对于航运网络中的节点 v , 中介中心性 $B_C(v)$ 计算式为:

$$B_C(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}} \quad (2)$$

式中: σ_{st} 为从节点 s 到节点 t 的最短路径数量; $\sigma_{st}(v)$ 为从节点 s 到节点 t 且经过节点 v 的最短路径数量。

(3)强度 航运网络中节点 v 的强度 $s(v)$ 计算式为:

$$S(v) = \sum_{e \in E(v)} w(e) \quad (3)$$

式中: $E(v)$ 为与节点 v 相连的边集合。

(4)网络独立路径数 在航运网络中, 节点总数 $n = |V|$, 非孤立节点集合为 $V' \subseteq V$, 非孤立节点数量 $m = |V'|$, 最大路径长度限制为 L 。从非孤立节点中选取节点对数量为 p (取值依实际情况而定), 对于每对节点 \bar{d} , 从 v_i 到 v_j 的简单路径数量为 n_{ij} , 网络独立路径数 I_F 计算如下:

$$I_F = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^p n_i}{p} & p > 0 \\ 0 & p = 0 \end{cases} \quad (4)$$

(5)网络效率 在网络中, 节点间距离矩阵元素 d_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的最短路径长度, 网络效率 E 计算公式为:

$$E = \begin{cases} \frac{\sum_{1 \leq i < j \leq n, d_{ij} < \infty} \frac{1}{d_{ij}}}{C_n^2} & C_n^2 \text{ 中有效节点对数量} > 0 \\ 0 & C_n^2 \text{ 中有效节点对数量} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

(6)网络连通度综合连通度指标由各连通度指标加权平均得到, 通过该综合指标衡量网络连通情况:

$$I_C = \alpha \frac{\lambda(G)}{\lambda_{\max}} + \beta \frac{\kappa(G)}{\kappa_{\max}} + \gamma \frac{\bar{d}}{d_{\max}} + \delta C + \eta R \quad (6)$$

式中: 边连通度 $\lambda(G)$ 是使图 G 不连通需移除的最少边数; 点连通度 $\kappa(G)$ 是使图 G 不连通需移除的最少节点数; 平均度 \bar{d} 为所有节点度总和除以节点总数; 集群系数 C 为图中所有三角形数量与所有可能三角形数量之比; R 为图 G 最大连通分量的大小比例; α 、 β 、 γ 、 δ 、 η 分别为各连通度指标的权重, 在本研究中默认上述指标同等重要。

(7)韧性指数 韧性三角理论是指可通过提高系统性能或缩短恢复时间, 减小韧性三角形面积(图1)。由此, 本文的韧性指数可由航运网络遭遇不同类型破坏期间及恢复过程中系统表现随时间变化的恢复程度来表示, 计算公式为:

$$R_p = \frac{\int_{t_1}^{t_3} IP(t) dt}{\int_{t_1}^{t_3} IP(t_1) dt}, \quad R_E = \frac{\int_{t_1}^{t_3} E(t) dt}{\int_{t_1}^{t_3} E(t_1) dt}, \quad R_C = \frac{\int_{t_1}^{t_3} IC(t) dt}{\int_{t_1}^{t_3} IC(t_1) dt} \quad (7)$$

2.3 指数随机图模型

ERGM 是一种用于分析网络结构数据的统计模型,旨在揭示网络内部的关系模式和形成机制。本研究从内生网络结构、节点参与者属性和外生网络关系 3 个角度构建了影响因素的指标体系,具体分析公式如下:

$$\Pr(Y = y | \theta) = P_{\theta}(y) = \frac{1}{I(\theta)} \exp\{\theta^T_a g_a(y) + \theta^T_b g_b(y, m) + \theta^T_c g_c(y, n)\} \quad (8)$$

式中: $g_a(y)$ 表示内生网络结构对网络的影响; $g_b(y, m)$ 反映节点参与者属性的网络统计信息; $g_c(y, n)$ 表示外生网络关系的统计量,以区域间地理距离和贸易活动形成的关联数量为特征,从而表示关系形成过程中的网络嵌入效应。; θ 表示每个变量要估计的参数。 $\frac{1}{I(\theta)}$ 是为归一化系数,确保概率值在 0 到 1 的范围内,形式如下所示:

本研究通过马尔可夫链蒙特卡洛最大似然估计法 (Markov Chain Monte Carlo Maximum Likelihood Estimation, MCMC-MLE) 求解 ERGM 的参数 θ , 具体步骤如下: 首先, 基于式(8)定义的内生网络结构、节点属性与外生网络关系统计量, 构建模型的指数族分布形式; 其次, 通过蒙特卡洛法生成马尔可夫链模拟网络, 以近似真实网络分布的似然函数; 最后, 采用随机近似算法迭代调整 θ 值, 直至模型收敛至最大似然估计。

参数的显著性通过 z 统计量进行检验。 z 统计量由参数的估计值除以其标准误差计算得出, 通常当其对应的 $p < 0.05$ 时, 可认为该参数的影响在统计上是显著的 ($p < 0.05$ 为显著)。模型选择依据赤池信息准则 (Akaike Information Criterion, AIC) 与贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion, BIC) 指标, 优先保留解释力强且简约的变量组合。进一步通过拟合优度检验模型有效性: 若模拟网络的度分布、边共享伙伴等统计量与实际网络无显著差异, 则表明模型能够有效捕捉网络生成机制。本文的技术路线如图 2 所示。

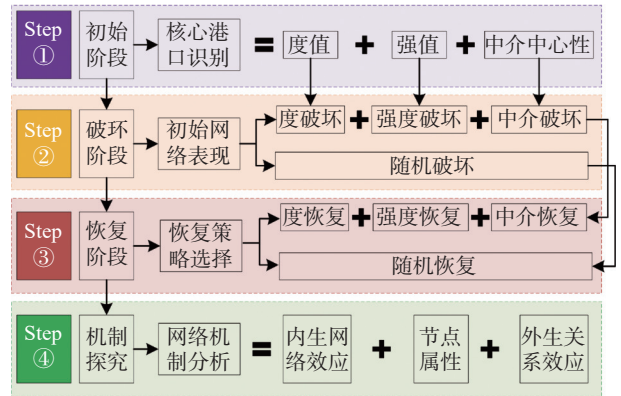


图 2 技术路线

Fig. 2 Technical roadmap

3 实证研究

3.1 初始阶段粤港澳大湾区航运网络分析

为深入研究粤港澳大湾区航运网络的韧性, 基于 2024 年 7 月至 12 月期间的全球船舶挂靠数据, 结合复杂网络理论与韧性三角理论构建了粤港澳大湾区航运网络, 探讨粤港澳大湾区航运网络在面对不同攻击模式与恢复模式下的韧性表现。通过第三方数据, 首先提取了所有船舶的挂靠信息, 并根据航程的起始港和目的港进行排序, 筛选出仅涉及粤港澳大湾区港口群内部的航线。以港口作为网络节点, 航线作为网络的边, 航线的通航次数作为权重, 构建一个有向有权航运网络, 计算网络的关键性指标, 包括网络效率、网络独立路径数和网络连通度。

本文结合 Origin2022 与 Gephi 0.9.2 绘制粤港澳大湾区内部航运网络 (图 3 所示), 其中地理底图通过 Tianditu Map Import 调用国家地理信息公共服务平台在线服务获取, 并叠加港口节点坐标网格。从航运网络的拓扑图看, 粤港澳大湾区航运网络呈现出密集的连接结构。其中, 香港和广州港为核心节点, 大量航线直接或间接地连接这些港口, 突显了这些港口节点在整个航运网络中的战略性地位。高密度的连接不仅提高了港口之间的运输效率, 还增强了网络在面对突发事件时的恢复能力, 进而提升了整个系统的韧性。

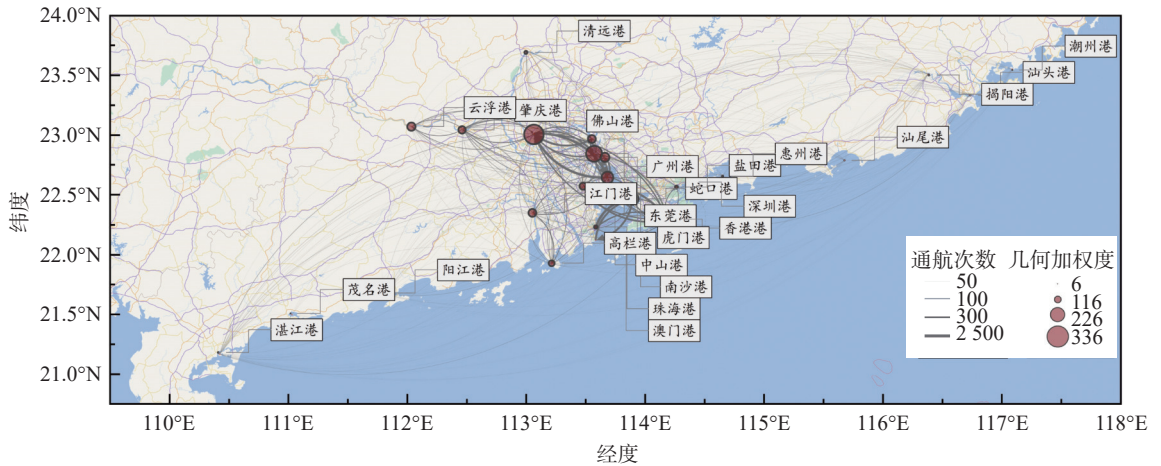


图3 粤港澳大湾区内部航运网络

Fig. 3 Internal shipping network of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

注: 该图基于自然资源部国家地理信息公共服务平台下载的审图号为GS(2023)1234号的标准地图制作, 底图无修改。

粤港澳大湾区前9个港口的度值、中间性、强度如表1所示, 根据几何加权重、中介中心性与强度等关键指标的分析, 香港港和广州港在几何加权重和强度等多维度上都位居前列, 显示了其在网络中的枢纽作用。具体来说, 香港港在几何加权重(337.44)和强度(22 793)方面分别排名第一和第二, 表明其在航运网络中的连接性极强。香港港的极高连接性使其不仅成为粤港澳大湾区航运网络中的关键枢纽, 也在全球航运网络中占据重要地位, 对全球供应链的协调和货物的高效中转起到了至关重要的作用。在粤港澳大湾区航运网络中, 各港口之间的高密度连接形成了一个相互依赖的网络。每个港口不仅承担着自己的货物处理任务, 还通过与其他港口的连接增强了整个系统的灵活性和适应性。在中介中心性较高的港口, 如潮州港和湛江港, 作为信息流通和物流调度的枢纽, 在保障货物运输的持续性和多样性方面发挥了重要作用。

表1 粤港澳大湾区内部航运网络节点港口TOP 9

Tab. 1 Top 9 node ports in the internal shipping network of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

排名	几何加权重		中介中间性		强度	
	港口名称	数值	港口名称	数值	港口名称	数值
1	香港	337.44	潮州	332.70	佛山	25 415
2	佛山	323.53	湛江	119.60	香港	22 793
3	广州	271.34	汕头	113.42	南沙	21 495
4	蛇口	206.16	深圳	81.03	蛇口	17 858
5	南沙	204.34	汕尾	60.58	广州	17 569
6	虎门	165.40	盐田	59.17	中山	12 344
7	云浮	156.40	珠海	47.50	虎门	12 005
8	江门	146.13	阳江	41.93	东莞	10 596
9	东莞	145.21	茂名	37.33	肇庆	10 203

在航运网络的初始阶段, 粤港澳大湾区航运网络的网络效率为0.295, 这表明在初始状态下, 网络能够保持较为高效的运输流动。网络中的港口节点如香港港、广州港、深圳港等通过密集的航线网络连接, 能够有效支撑区域经济和国际贸易流动。粤港澳大湾区航运网络的独立路径数为16.20, 表示在遭遇部分节点或航线中断时, 网络仍能依靠备选路径维持其基本功能。这一冗余特性使得网络具有较强的抗干扰能力, 特别是在全球贸易不断变化、不可预测的自然灾害或经济冲击下, 粤港澳大湾区航运网络能够有效避免单一故障点导致整个航运系统的崩溃。粤港澳大湾区航运网络在初始阶段的连通度为10.30, 说明各港口

节点之间具有较强的连接性, 确保了航运流动的高效性。

3.2 破坏阶段粤港澳大湾区航运网络分析

图 4 为粤港澳大湾区航运网络在遭到破坏时各个指标的变化情况。默认在网络指标值下降到 0 时, 破坏阶段得以结束。图 4 描绘了粤港澳大湾区航运网络韧性指标在受到 DA、BA、SA、RA 等 4 种破坏时随被破坏节点个数增多的动态变化。

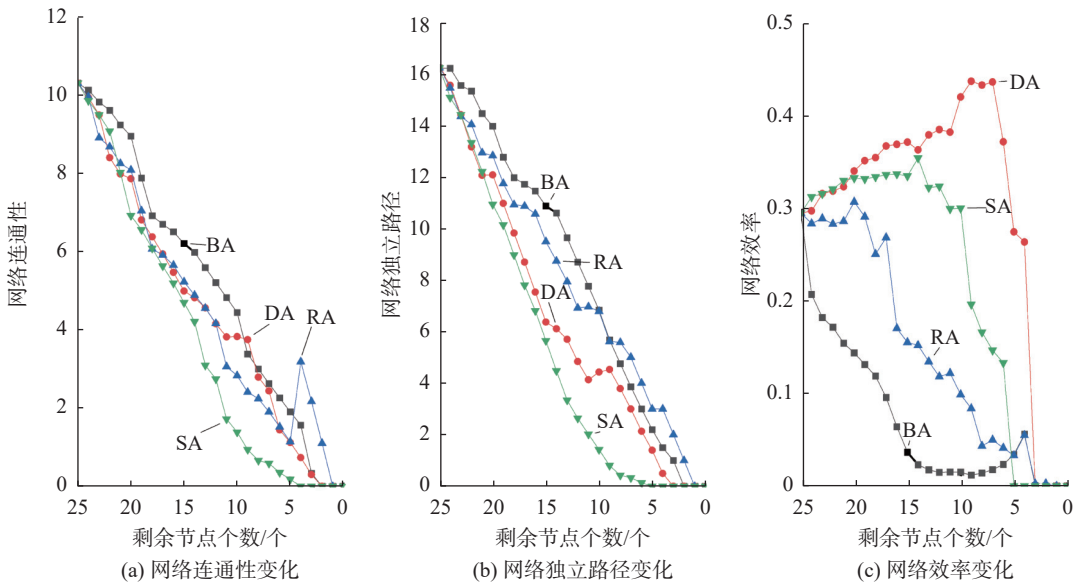


图 4 4 种破坏模式下粤港澳大湾区航运网络指标

Fig. 4 Shipping network indicators of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under four disruption scenarios

通过对 BA、DA、RA 和 SA 四种攻击模式的比较分析可知, 从整体表现看, DA 与 SA 策略对粤港澳大湾区航运网络的影响最大。在移除前 10 个港口时, DA、SA 模式下网络连接性分别从初始的 10.286 下降至 4.306 与 5.180, 下降幅度分别为 58.10% 与 49.63%; 独立路径数分别从 16.207 下降至 5.708 与 6.800, 降幅分别为 64.78% 与 58.04%。相比之下, BA 和 RA 模式的影响相对较小, 两种模式下网络连通性和独立路径数的降幅分别为 36.87%、29.45% 和 45.14%、34.90%。这表明随着这些关键港口的停运, 网络中的重要连接路径被切断, 港口之间的连通性丧失, 导致网络几乎无法恢复。在这种模式下, 攻击重点是港口吞吐能力较强的节点, 如佛山港、香港港和广州港等吞吐能力较强的港口。这些港口在网络中扮演着核心角色, 停运会导致整个航运网络的效率大幅下降。在 SA 模式下, 佛山港的失效对网络指标的影响尤为突出, 网络连通性下降 30.0%, 网络独立路径下降 35.0%, 网络效率下降 30.0%。这显示吞吐能力强的港口对网络整体性能的显著影响。佛山港作为货物吞吐量最大的港口, 一旦停运, 其他港口无法迅速弥补其货物处理能力, 导致整个区域的物流运输出现大规模中断。因此, 在实际应用中, 加强对这些港口的保护, 确保其在突发事件中的恢复速度, 是提高粤港澳大湾区航运网络韧性的关键。

DA 和 BA 策略的影响虽然较强, 但与 SA 模式相比, 其影响较为分散。DA 模式下, 攻击集中在网络中的高连接节点, 例如香港港和广州港。香港港的失效引起网络连接性下降 35.2%, 网络独立路径下降 45.6%, 网络效率下降 40.3%。这表明香港港在网络中具有极高的连接度, 其失效将严重破坏网络的整体连通性和运输效率。深圳港和广州港的失效影响略小, 但仍然显著, 网络连通性分别下降了 28.5% 和 25.3%, 网络独立路径下降了 38.9% 和 35.1%, 网络效率下降了 32.7% 和 28.6%。这进一步证实了高连接度港口在网络中的关键作用。BA 模式则针对那些在网络中起到桥梁作用的节点, 例如潮州港和湛江港。潮州港和湛江港的失效分别导致网络连接性下降 20.1% 和 18.7%, 网络独立路径下降 30.5% 和 28.9%, 网络效率下降 25.8% 和 23.4%。这些港口虽然吞吐量相对较小, 但在连接不同港口之间的运输流动中起到桥梁作用,

一旦这些港口节点遭受攻击,信息流和物流的传递将受到阻碍,进而影响整个网络的稳定性。

相较于其他破坏类型,RA模式的影响较为温和。在这种模式下,攻击随机选择节点,虽然网络的各项指标逐步下降,但由于攻击没有集中在关键节点上,网络连通性和效率下降的速度较慢。尽管如此,随着攻击节点的增加,网络的独立路径逐渐减少,最终依然会导致整体功能的下降。

3.3 恢复阶段粤港澳大湾区航运网络分析

恢复阶段的粤港澳大湾区航运网络中,各种恢复模式在网络效率、连通性和独立路径数的恢复效果上表现出显著差异。通过对比分析(图5)可以看出,度恢复模式(Degree-Based Recovery Mode, DR)是最有效的恢复策略,该模式通过优先恢复度数较高的港口节点,如香港港、广州港和佛山港等。并且当50%港口恢复连接时,网络连接性从最低点迅速回升至约10.18,恢复幅度超90%;独立路径恢复至近11条,恢复幅度为68%。度数较高的节点优先恢复,网络的核心连接得以迅速恢复,港口之间的航运流动顺畅,减少了路径中断的风险。

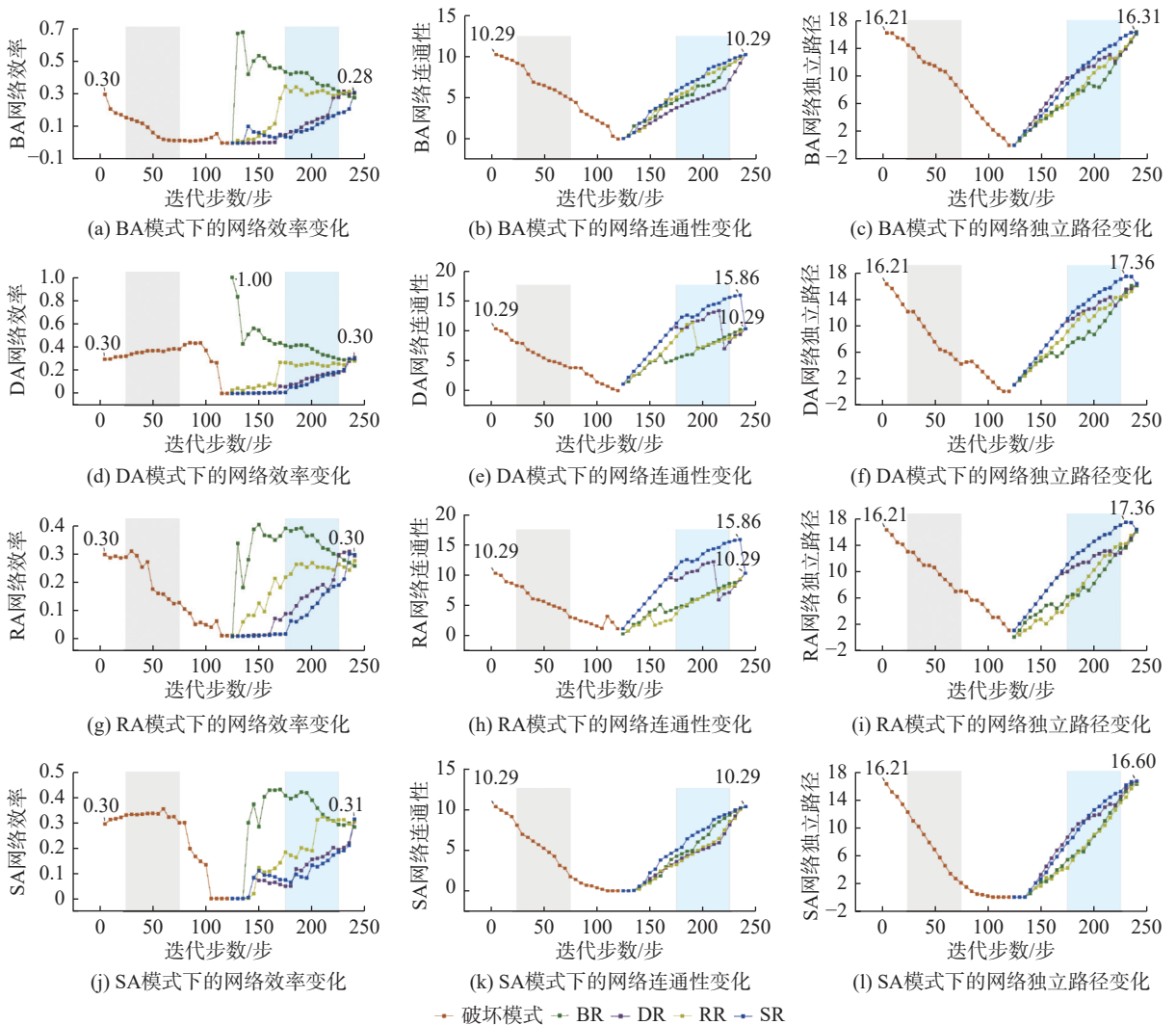


图5 4种恢复模式下粤港澳大湾区航运网络指标

Fig. 5 Shipping network indicators of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under four recovery scenarios

中间性恢复模式(Betweenness-Based Recovery Mode, BR)是较为均衡的恢复策略。在BR模式下,50%港口恢复连接时,网络效率回升至0.4。由于中介节点恢复优先,整体网络的运作有所改善,但由于恢

复的重点并非最关键的节点,网络效率的提升相对较慢。同时,连通性回升至约 6,恢复幅度为 60%。尽管恢复了中介节点,但由于这些节点在网络中的作用较为有限,连通性恢复进展较慢。独立路径数回升至约 8 条,恢复幅度为 50%。虽然部分路径得到恢复,但由于恢复重点未放在高连接节点,独立路径恢复的速度和效果不如 DR 模式。

由于随机恢复模式(Random Recovery Mode, RR)通过随机选择节点进行恢复,缺乏优先级设置,导致恢复过程较为无序,因此恢复效果最差。尽管该模式恢复了部分港口节点,但由于恢复分散,整体效果较差。50% 港口恢复连接时,网络效率在 RR 模式下波动回升至 0.26。由于恢复没有明确的优先级,关键港口恢复的进展较慢,网络效率的回升幅度较小。连通性回升至约 9.90,随后经历显著的下降过程,继而呈现缓慢的波动上升趋势。这种不稳定的恢复模式反映了随机策略在重建网络关键连接方面的固有缺陷。由于没有集中恢复关键节点,网络的连通性恢复波动性明显,尤其是港口节点之间的关键连接未能得到有效恢复。

3.4 稳定阶段粤港澳大湾区航运网络韧性

航运网络经历上述破坏恢复过程后,利用韧性三角理论量化网络各指标受损程度,得到粤港澳大湾区航运网络韧性如图 6 所示。通过对粤港澳大湾区航运网络在 DA、BA、SA 和 RA 模式下的恢复效果进行对比可知,恢复策略的有效性在不同破坏情景中呈现明显差异。综合来看,强度恢复模式(Strength-Based Recovery Mode, SR)在 DA 情境下的恢复效果最为优越,网络连通性与网络独立路径韧性优势明显,而 BR 则在 SA 和 BA 的情境中显示出较强的韧性恢复能力,尤其在网络效率和网络连通性方面,表现尤为突出。

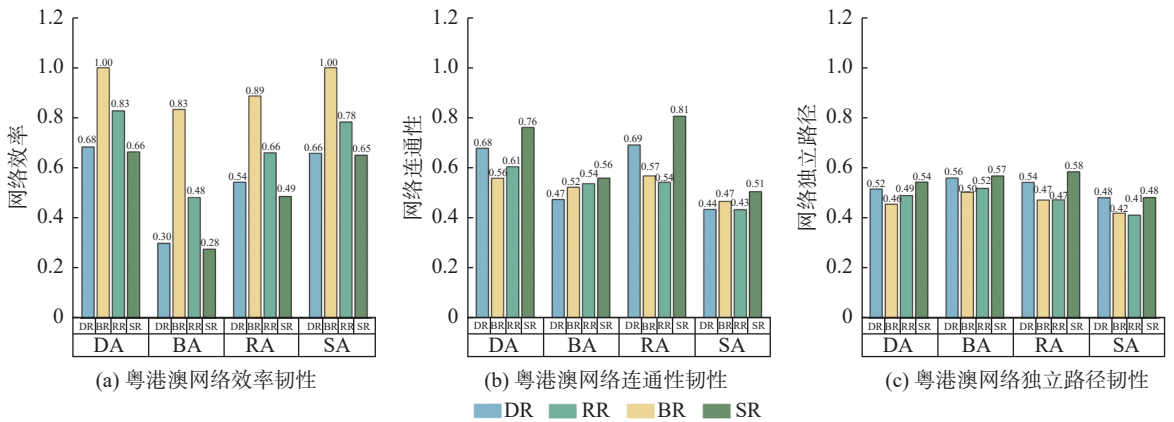


图 6 粤港澳大湾区内部航运网络韧性对比

Fig. 6 Comparison of internal shipping network resilience in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

在 DA 情境下,SR 表现出最强的恢复能力,其网络连通性韧性为 0.76,网络独立路径韧性为 0.54,均显著高于其他策略,表明 SR 在应对度优先攻击时具有明显优势。相较而言,BR 在此情境下表现较弱,网络连通性韧性仅为 0.56,而 DR 和 RR 策略虽有较好表现,但整体恢复效果仍不及 SR。在 BA 与 SA 情境下,BR 策略表现出优越的适应性,尤其在恢复网络效率方面成效显著。BR 在 BA 与 SA 情境下的网络效率韧性分别达到 0.83 和 1.00,明显高于其他恢复策略。值得注意的是,各恢复策略在这两种情境下的网络连通性韧性与网络独立路径韧性数值相近,而 BR 在网络效率与网络连通性方面相比 DR 等策略仍具有明显优势,这表明 BR 策略在应对中介中心性和节点强度导向的攻击时更为有效。因此,在实际应用中,针对不同的破坏情景合理选择恢复策略,将有助于最大限度地提升网络的稳定性和韧性。

3.5 网络的形成机制分析

模型 1 至模型 5 通过不同结构项揭示了粤港澳大湾区航运网络的生成机制和内在动力学。模型 1 关注边的生成以分析港口间直接航线连接的倾向,模型 2 通过三角形结构探索局部聚类效应和协作模式,模型 3 聚焦节点度分布以识别枢纽与边缘港口特征,模型 4 分析共同邻居倾向以研究社群协作机制,模型

5 强调航线关系的传递性以评估网络的密集连接与韧性表现。基于 ERGM 的实证结果表明, 粤港澳航运网络的形成是内生结构效应、节点属性效应与外生关系效应共同作用的结果(表 2)。

表 2 网络的 ERGM 估计结果

Tab. 2 ERGM estimation results of the network

模型统计量		模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
内生网络效应	边	1.40***	1.13***	-19.16***	-33.43***	-32.27***
	互惠性				2.93***	2.74***
	传递性				-0.17***	-0.15***
	扩散性				4.81**	4.60***
	集聚性				4.66***	4.57***
节点属性	发出效应			-0.00*		0
	接收效应			-0.00*		0
	同配效应			-1.50**		-0.73
	异配效应			-1.75		-0.41
	地理邻近		0.89**			0.01
外生关系效应	出港吞吐量结构邻近(除中国)		-1.13***			-0.63
	进港吞吐量结构邻近		1.86***			1.53*
	进港伙伴邻近		-1.19*			-1.27
	进港伙伴邻近(除中国)		0.83**			0.83*

注: 表中***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的显著性水平上显著。

(1) 内生网络效应影响 网络内生效应显著驱动了港口间的连接模式。所有模型的互惠性系数均显著, 反映了粤港澳港口在航线布局中普遍遵循“对等互惠”原则, 通过双向货物交换降低空载率并提升船舶调度效率, 与文中香港与深圳港建立集装箱对开航线, 港口合作的双向资源互补结论一致。其次, 扩散性与集聚性的强正向效应, 印证了网络呈现“核心-边缘”层级结构, 香港、广州港等核心枢纽通过高连接度吸引中山、江门等次级港口形成辐射状航线, 从而降低区域物流的中转成本。然而, 传递性系数负向显著, 说明网络排斥冗余的三角闭合结构, 这与实际航运中“直航优先于多跳中转”的路径优化策略直接相关, 避免因多次装卸导致的时效损耗。

(2) 节点属性效应影响 同配效应正向显著, 揭示国际货物占比相近的港口间因资源协同、制度趋同及市场匹配更易形成紧密合作, 例如香港港与深圳港通过共享全球航运联盟资源强化欧线网络嵌入; 异配效应负向显著则表明国际货物占比差异显著的港口通过功能互补建立垂直分工。而港口吞吐量的发出效应和接收效应不显著, 表明港口吞吐量并不能显著促进连接发起和接收, 进出港连接更多依赖网络惯性, 而非主动吸引力。

(3) 外生效应影响 地理邻近性显著且为正, 表明地理距离相近的港口更倾向于建立合作关系, 这一结论与粤港澳大湾区港口群的空间分布特征高度契合。珠江口地理位置临近港口群, 依托共享的深水航道资源及陆域集疏运网络体系, 形成了密集的航线连接。进港吞吐量结构邻近性呈现显著正向驱动效应, 表明港口间“同类协同”的核心机制: 通过规模经济、资源共享与风险共担, 结构相似的港口形成专业化协作网络, 从而提升区域物流系统的效率与韧性。国际伙伴邻近性参数的正向显著性揭示了全球化网络嵌入机制的重要作用。香港港与深圳港作为国际航运枢纽, 通过深度参与 2M 联盟等全球航运网络组织, 共享鹿特丹港等欧洲核心枢纽的优先靠泊权与舱位资源, 显著提升了在国际航运市场中的网络地位。值得关注的是, 国内伙伴邻近性参数呈现显著负向特征, 这折射出区域港口市场的竞争性张力。

模型的拟合优度检验(图 7)显示, 所有系数收敛性良好, 表明模型能够有效捕捉网络结构的形成机制。图 7(a)~(d) 分别为原有观测网络与表 2 第(5)列 ERGM 估计得到的仿真网络的入度节点比例分布图、出

度节点比例分布图、边共享伙伴的边比例分布图和最小测地距离的二元组比例分布图。其中, 黑实线表示原有观测网络特征统计量, 虚线及箱线图表示仿真网络在 95% 置信区间下的测度结果, 当黑实线落在虚线线条之间或箱线图内时, 说明模型具有理想的拟合优度, 仿真网络能够有效解释原有观测网络的结构特征。

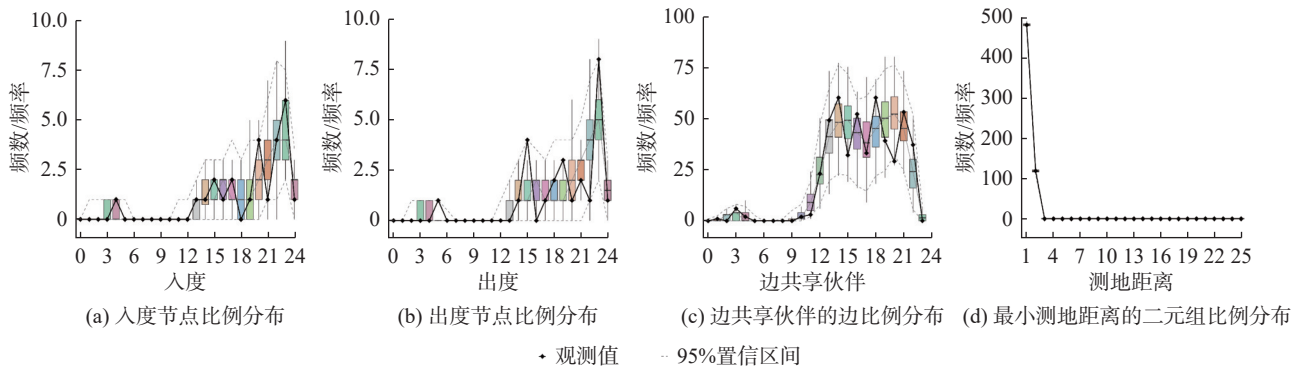


图 7 基于 ERGM 的 GOF 检验结果

Fig. 7 GOF test results based on the ERGM

4 结 语

本研究基于复杂网络理论构建粤港澳大湾区航运网络, 重点分析航运网络在经过网络度破坏、中间性破坏、强度破坏和随机破坏 4 种不同破坏模式下网络的结构变化, 并通过多种恢复策略评估航运网络的韧性表现, 进一步利用 ERGM 探究航运网络的生成机制和内在动力学。主要研究结论如下:

(1) 广州港、深圳港和香港港在整个航运网络中的关键性作用不可忽视。香港港以 337.44 的最高几何加权度位居网络连接性之首, 强度值达 22 793, 位列第二。广州港同样表现突出, 强度值达 17 569。不仅在日常运输中具有重要地位, 在网络遭遇破坏时也最易受影响。因此, 这些港口的韧性提升直接关系到整个粤港澳大湾区航运网络的稳定性。

(2) 粤港澳大湾区航运网络在初始阶段具有较强的连接性和效率。网络初始效率为 0.295, 独立路径数达 16.2, 连通度为 10.3, 表明网络结构紧密且高效。网络的高密度连接结构和港口节点的核心地位使其在初期能够保持高效的运输流动和较强的抗干扰能力。然而, 在经历破坏阶段时, 网络表现出明显的脆弱性。尤其是在佛山港、香港港和广州港等吞吐能力较强的港口节点失效时, 网络效率和连通度显著下降。

(3) 在 DA 破坏情境下, SR 恢复策略表现最好, 网络连通性韧性为 0.76, 网络独立路径韧性为 0.54, 均显著高于其他策略; 而在 BA 和 SA 破坏情境下, BR 恢复策略则展现了更加平衡和持续的恢复能力, 尤其在网络效率与网络连通性方面的恢复效果尤为突出, 针对不同的破坏情景应合理选择恢复策略以最大限度地提升网络的稳定性和韧性。

(4) ERGM 的实证研究表明, 粤港澳航运网络韧性提升依赖于路径优化与港口合作的双重机制。网络通过抑制冗余中转推行“直航优先”, 降低多跳运输的脆弱性; 同时, 港口依托互惠合作与地理协同构建核心港口辐射连接、次级港口专业化协作的分层协作体系, 形成多层次冗余路径以增强风险应对弹性, 二者协同构成抵御系统性风险的核心动力。

参 考 文 献:

[1] QIN Y F, GUO J K, LIANG M X, et al. Resilience characteristics of port nodes from the perspective of shipping network:

- Empirical evidence from China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 237: 106531.
- [2] 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 190-198. (DU Chao, WANG Jiaoe, MO Huihui. Spatial pattern analysis of China container shipping network on complex theory[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(2): 190-198. (in Chinese))
- [3] 吴莎莎, 梁木新, 郭建科, 等. 基于航运网络的港口海向可达性识别与测度[J]. *地理研究*, 2024, 43(4): 824-842. (WU Shasha, LIANG Muxin, GUO Jianke, et al. Identification and measurement of seaward accessibility of port based on shipping networks[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(4): 824-842. (in Chinese))
- [4] 王成金. 现代港口地理学的研究进展及展望[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 243-251. (WANG Chengjin. Research prospect and progress of modern port geography[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(3): 243-251. (in Chinese))
- [5] HE Y, YANG Y C, WANG M M, et al. Resilience analysis of container port shipping network structure: the case of China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9489.
- [6] 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 Delta[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(2): 90-97. (in Chinese))
- [7] 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 Liehui, YE Fei, ZHENG Yuanbo. The assessment of Sino-US container shipping network evolution and vulnerability[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(5): 136-144. (in Chinese))
- [8] POO M C P, YANG Z L. Optimising the resilience of shipping networks to climate vulnerability[J]. *Maritime Policy & Management*, 2024, 51(1): 15-34.
- [9] 王列辉, 张圣, 陈锐. 南海周边航运网络脆弱性及对中国集装箱运输的影响[J]. *世界地理研究*, 2022, 31(4): 700-712. (WANG Liehui, ZHANG Sheng, CHEN Rui. Network vulnerability of ports around the South China Sea and the impact on Chinese maritime transport[J]. *World Regional Studies*, 2022, 31(4): 700-712. (in Chinese))
- [10] 王琪, 陈炜, 韦春竹. 粤港澳大湾区港口群参与全球航运网络特征[J]. *热带地理*, 2022, 42(2): 236-246. (WANG Qi, CHEN Wei, WEI Chunzhu. Participation of the global shipping network in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. *Tropical Geography*, 2022, 42(2): 236-246. (in Chinese))
- [11] 向晓梅, 张超. 粤港澳大湾区海洋经济高质量发展路径研究[J]. *亚太经济*, 2020(2): 142-148, 152. (XIANG Xiaomei, ZHANG Chao. Methods of coordinating development of marine economy in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area[J]. *Asia-pacific Economic Review*, 2020(2): 142-148, 152. (in Chinese))
- [12] 王启凤, 钟坚, 汪行东. 建设国际航运中心背景下粤港澳大湾区港口群治理模式研究[J]. *经济体制改革*, 2020(6): 64-70. (WANG Qifeng, ZHONG Jian, WANG Xingdong. Model of port group governance in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area under the background of building an international shipping center[J]. *Reform of Economic System*, 2020(6): 64-70. (in Chinese))
- [13] 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[J]. *World Regional Studies*, 2008, 17(1): 94-104, 118. (in Chinese))
- [14] 邱志萍, 刘镇. 全球班轮航运网络结构特征演变及驱动因素: 基于联合国 LSBCI 数据的社会网络分析[J]. *经济地理*, 2021, 41(1): 39-48, 146. (QIU Zhiping, LIU Zhen. Research on the structure features evolution and driving factors of global liner shipping network: based on the social network analysis of UN LSBCI data[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(1): 39-48, 146. (in Chinese))
- [15] 罗敬思, 徐治中, 贾良文. 广东省沿海港航设施受风暴潮影响特点及类型分析[J]. *珠江水运*, 2016(15): 61-62. (LUO Jingsi, XU Zhizhong, JIA Liangwen. Analysis of characteristics and types of storm surge impact on coastal port and shipping facilities in Guangdong province[J]. *The Pearl River Water Transport*, 2016(15): 61-62. (in Chinese))
- [16] 刘丽, 叶士琳, 徐跃渊, 等. 基于生态位理论的长三角港口体系竞合关系识别与优化策略[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 40(4): 57-66. (LIU Li, YE Shilin, XU Yueyuan, et al. Identification and optimization strategy of co-opetition relationship in Yangtze River Delta Port system based on niche theory[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 40(4): 57-66. (in Chinese))

- [17] 郭建科, 郭姝. 中国与印度洋沿岸国家航运网络演化研究[J]. 海洋经济, 2020, 10(5): 6-15. (GUO Jianke, GUO Shu. Research on the evolution of shipping networks between China and the countries bordering the ocean coastal[J]. Marine Economy, 2020, 10(5): 6-15. (in Chinese))
- [18] 蒋自然, 傅海威, 曹有挥. 长三角港口体系的空间结构与演变趋势[J]. 中国航海, 2016, 39(2): 106-110. (JIANG Ziran, FU Haiwei, CAO Youhui. Spatial structure and evolution trends of port system in Yangtze River Delta[J]. Navigation of China, 2016, 39(2): 106-110. (in Chinese))
- [19] 谢逢洁, 杨盼盼, 崔文田. 复杂网络理论中的高阶网络研究综述[J]. 系统科学学报, 2024, 32(1): 121-127. (XIE Fengjie, YANG Panpan, CUI Wentian. Review of higher-order network research in complex network theory[J]. Journal of Systems Science, 2024, 32(1): 121-127. (in Chinese))
- [20] 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. Spatial structure of container port systems across the Taiwan Straits under the direct shipping policy: a complex network system approach[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(4): 605-620. (in Chinese))
- [21] 林国龙, 汤兵兵, 丁一. 考虑季节性因素影响下的北极航线与传统航线网络构建[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 108-114. (LIN Guolong, TANG Bingbing, DING Yi. Network construction of Arctic route and traditional route under seasonal influence[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2017, 36(3): 108-114. (in Chinese))
- [22] 陈万灵, 何传添. 海上丝绸之路的各方博弈及其经贸定位[J]. 改革, 2014(3): 74-83. (CHEN Wanling, HE Chuantian. Game between parties and economic orientation of the maritime silk road[J]. Reform, 2014(3): 74-83. (in Chinese))
- [23] 刘镇, 郭虹, 邱志萍. “一带一路”班轮航运网络结构特征对沿线双边贸易的影响[J]. 华东经济管理, 2023, 37(12): 46-57. (LIU Zhen, GUO Hong, QIU Zhiping. The influence of the structural characteristics of the “Belt and Road” liner shipping network on bilateral trade along the routes[J]. East China Economic Management, 2023, 37(12): 46-57. (in Chinese))
- [24] 龙祖坤, 刘玉杰. 地中海邮轮航运网络结构及空间分布特征研究[J]. 大连海事大学学报(社会科学版), 2023, 22(6): 13-23. (LONG Zukun, LIU Yujie. The study of network structure and spatial distribution characteristics of the cruise itinerary in the Mediterranean[J]. Journal of Dalian Maritime University (Social Science Edition), 2023, 22(6): 13-23. (in Chinese))
- [25] DIRZKA C, ACCIARO M. Global shipping network dynamics during the COVID-19 pandemic's initial phases[J]. *Journal of Transport Geography*, 2022, 99: 103265.
- [26] LIU J G, FU Y T, HAN K K, et al. Resilience analysis of the RCEP shipping network[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2024, 257: 107317.
- [27] 王直欢, 胡炜琴, 王逸文. 基于复杂网络的长三角和粤港澳航运网络韧性评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(5): 184-193. (WANG Zhihuan, HU Weiqin, WANG Yiwen. Resilience assessment of Yangtze River Delta and Guangdong-Hong Kong-Macao shipping networks based on complex network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(5): 184-193. (in Chinese))
- [28] LIU W, SONG Z Y. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 193: 106617.
- [29] 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 Wei, JIN Fengjun. Route network pattern and its influencing factors of container shipping enterprises[J]. Geographical Research, 2020, 39(5): 1088-1103. (in Chinese))
- [30] HU F, QIU L P, XIANG Y, et al. Spatial network and driving factors of low-carbon patent applications in China from a public health perspective[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1121860.
- [31] XU H C, LI Y L, ZHENG Y J, et al. Analysis of spatial associations in the energy-carbon emission efficiency of the transportation industry and its influencing factors: Evidence from China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 97: 106905.
- [32] SHI C F, QI J H, ZHI J Q, et al. Study on the pattern and driving factors of water scarcity risk transfer networks in China from the perspective of transfer value: Based on complex network methods[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025, 112: 107752.
- [33] 林润辉, 季泽. 基于指数随机图模型的发明者合作网络形成机制研究[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(13): 131-140. (LIN Runhui, JI Ze. The formation mechanism of inventors' collaboration network based on exponential random graph model[J].

Science & Technology Progress and Policy, 2024, 41(13): 131-140. (in Chinese))

- [34] 徐建军, 安辉, 杨晓伟. “一带一路” 跨国金融对出口贸易网络的影响研究: 基于指数随机图模型的实证检验[J]. *中国软科学*, 2022(6): 146-157. (XU Jianjun, AN Hui, YANG Xiaowei. Effect of transnational finance on export trade network across the Belt and Road initiatives: empirical test based on the expornal random graph model[J]. *China Soft Science*, 2022(6): 146-157. (in Chinese))
- [35] 李敏, 胡载舟, 鲁倩倩. 基于指数随机图模型的区域产业组织网络形成研究: 来自义乌的经验证据[J]. *系统管理学报*, 2022, 31(4): 746-757. (LI Min, HU Zaizhou, LU Qianqian. Formation of regional industrial organization network based on ERGM: evidence from Yiwu[J]. *Journal of Systems & Management*, 2022, 31(4): 746-757. (in Chinese))

Study on the resilience and driving mechanisms of the shipping network in the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area

ZHENG Jianliang¹, SONG Min², SHI Changfeng²

(1. *Guangdong Provincial Transportation Planning Research Center, Guangzhou 510101, China*; 2. *Business School of Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: Understanding the impacts of different types of sudden events on shipping networks and their recovery mechanisms is of critical importance for ensuring maritime stability and advancing the sustainable development of ports. This study takes the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area (GBA), one of China’s most economically dynamic regions, as a case to systematically analyze the structural vulnerabilities and resilience mechanisms of its shipping network under various disruptive scenarios. Drawing on complex network theory, the GBA shipping network is constructed, and key topological metrics such as network efficiency, connectivity, and the number of independent paths are quantified, providing a rigorous framework for evaluating network performance under stress. Four disruption scenarios are designed to simulate potential real-world shocks: degree-based attack (DA), betweenness-based attack (BA), strength-based attack (SA), and random attack (RA). The results indicate that the ports of Hong Kong, Shenzhen, and Guangzhou serve as core nodes, and their resilience directly shapes the overall stability of the network. Although the initial network exhibits high connectivity and efficiency (connectivity: 10.300; efficiency: 0.295), the failure of these core ports substantially degrades both metrics, demonstrating that network vulnerability is highly concentrated in critical hubs. In particular, attacks targeting node degree and strength cause the most pronounced declines in network performance, underscoring the system’s dependence on highly connected or high-throughput ports. During the recovery phase, four strategies are evaluated: degree-based recovery (DR), betweenness-based recovery (BR), strength-based recovery (SR), and random recovery (RR). The analysis shows that under DA disruptions, the SR strategy proves most effective, achieving network connectivity resilience of 0.76 and independent path resilience of 0.54. Conversely, under BA and SA scenarios, the BR strategy performs better, particularly in restoring network efficiency, with resilience reaching 1.00 and 0.83, respectively. These results suggest that recovery strategies should be tailored to the type of disruption, and that prioritizing the restoration of critical nodes is more effective than random or uniform recovery in strengthening network resilience. Furthermore, the exponential random graph model (ERGM) is employed to examine the network’s formation and evolution mechanisms. The findings reveal that the GBA shipping network is shaped by a combination of endogenous structural effects, node attribute effects, and exogenous relational effects. Structural tendencies such as reciprocity and clustering highlight the importance of bilateral cooperation between ports and the emergence of a “core–periphery” hierarchy, in which core ports like Hong Kong and Guangzhou radiate connections to secondary ports, facilitating efficient cargo flows and reducing redundant routes. The network also exhibits negative transitivity, consistent with practical shipping strategies that prioritize direct routes to minimize multi-hop transit time

and handling costs. Node attribute analysis indicates that ports with similar shares of international cargo are more likely to cooperate, while throughput alone does not significantly influence edge formation. Geographic proximity and international partnerships further reinforce collaborative ties, demonstrating that spatial and strategic factors jointly shape network resilience. The dual mechanisms of route optimization and port cooperation are central to enhancing network robustness. By reducing the vulnerability of multi-hop transportation and fostering reciprocal cooperation between core and secondary ports, the network establishes multi-level redundant paths, improving its capacity to withstand systemic risks. These findings provide scientific guidance for port management, route optimization, and regional emergency recovery planning, emphasizing the importance of prioritizing and rapidly restoring core ports, optimizing shipping routes, and strengthening cooperative frameworks to build adaptive and resilient maritime systems. Such insights are particularly valuable for responding to global trade fluctuations, natural disasters, and operational disruptions. Overall, the study not only elucidates the structural and functional dynamics of the GBA shipping network but also establishes a transferable analytical framework applicable to other regional and global shipping systems.

Key words: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; shipping network; structural toughness; coping strategies; damage mode