

数字技术对港口韧性的赋能效应研究

沈伟腾^{1,2*}, 余璇^{2,3}

- 浙江万里学院 商学院, 浙江 宁波 315100;
- 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211;
- 宁波大学 商学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:在全球供应链不确定性加剧的背景下,如何增强港口应对外部冲击的能力成为学界和业界关注的热点问题。为此,文章基于2004年至2023年中国16家港口上市公司的面板数据,采用网络爬虫技术获取企业年报文本,利用逆文档概率词频法提取数字化相关关键词频以量化数字技术应用程度,同时运用敏感性指数法测度港口韧性水平。在此基础上进一步构建固定效应模型实证检验数字技术对港口韧性的赋能效应及其作用机制。结果表明:数字技术应用能够显著提升中国主要港口的韧性,数字技术水平每提高1个标准差,港口韧性将增加约0.2个标准差,且该发现在经过一系列稳健性检验后仍然成立;数字技术通过强化吸收能力和适应能力发挥作用,其中对适应能力的增强效应尤为突出,而通过创新能力提升韧性的路径尚未显现;在2020年全球公共卫生事件冲击下,数字技术对港口韧性的赋能效应得到显著增强,而在面临气候变化和2008年金融危机冲击时,数字技术对港口韧性的赋能效应并未发生显著变化。这些结论为当前全球不确定性骤增背景下寻求港口韧性的提升提供了新的视角。

关键词:港口工程;赋能效应;固定效应;港口;数字技术;韧性

中图分类号:F552,F270.7

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.007

The empowering effect of digital technology on port resilience

Shen Weiteng^{1,2*}, Yu Xuan^{2,3}

- School of Business, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China;
- Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
- School of Business, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Against the backdrop of increasing global supply chain uncertainties, how to enhance the ability of ports to cope with external shocks has become a hot topic in both academia and industry. To this end, this study is based on panel data of 16 listed Chinese port companies from 2004 to 2023. A web crawling technique was used to obtain the text of corporate annual reports. The term frequency-inverse document frequency method was applied to extract the frequency of digitalization-related keywords, so as to quantify the degree of digital technology application. Meanwhile, the sensitivity index method was used to measure the level of port resilience. On this basis, a fixed-effects model was further constructed to empirically examine the empowering effect of digital technology on port resilience and its underlying mechanism. The results show that the application of digital technology significantly improves the resilience of major Chinese ports. For each standard deviation increase in the digital technology level, port resilience increases by about 0.2 standard deviations. This finding remains valid after a series of robustness tests. Digital technology exerts its effect by strengthening absorptive capacity and adaptive capacity, among which the enhancing effect on adaptive capacity is particularly prominent. However, the path of improving resilience through innovation capacity has not yet emerged. Under the impact of the 2020 global

收稿日期:2025-04-20

基金项目:浙江省软科学研究计划项目(2024C35085);国家自然科学基金青年项目(72304158)资助

作者简介:沈伟腾(1991—),男,讲师,博士,研究方向为数字经济、海洋经济。*通信作者:swtlzq@163.com

引用格式:沈伟腾,余璇.数字技术对港口韧性的赋能效应研究[J].中国航海,2026,49(2):61-68.

Shen W T, Yu X. The empowering effect of digital technology on port resilience[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 61-68. (in Chinese)

public health event, the empowering effect of digital technology on port resilience was significantly enhanced. In contrast, under the impact of climate change and the 2008 financial crisis, the empowering effect of digital technology on port resilience did not change significantly. These conclusions provide a new perspective for seeking to improve port resilience in the current context of sharply increasing global uncertainties.

Key words: port engineering; empowering effect; fixed-effects; ports; digital technology; resilience

港口是连接海洋与内陆、国际与国内市场的核心枢纽。然而,近年来频发的外部冲击事件暴露了港口系统的脆弱性。2020年,全球约40%的集装箱港口出现空船航行现象^[1],气候灾害每年给港口造成约76亿美元的直接损失和670亿美元的间接损失^[2]。传统港口管理模式在信息协同与资源调度方面存在短板,而数字技术为提升港口韧性提供了新路径。政策层面,中国政府高度重视港口数字化发展。《国家综合立体交通网规划纲要》《交通运输部关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见》等国家和部级层面文件均强调要推动数字技术与港口发展相融合。这些政策为数字技术与港口韧性关系的研究提供了指引和实践基础。

1 研究进展

1.1 港口韧性的相关研究

目前,港口韧性的定义尚未统一。BECKER和CALDWELL将其定义为港口在扰动中维持基本功能和结构的能力^[3]。后续学者进一步细化为港口在抵御不利事件冲击并从冲击中恢复的同时能够最小化对运营干扰的能力^[4-5]。MARTIN和SUNLEY将韧性分为工程韧性、生态韧性和适应韧性三类^[6],而港口韧性的研究主要关注工程韧性^[7]和适应韧性^[8]两类。其中,工程韧性关注港口基础设施的抗冲击能力,适应韧性则聚焦于冲击后的调整与恢复能力。

港口韧性的测度主要基于两种思路:一是直接测度。在对港口韧性概念进行清晰界定的基础上,收集港口运营相关的数据对港口韧性水平进行测度^[9]。二是间接测度。通过分析港口在面对自然灾害^[10]、气候变化^[11]、公共卫生事件^[12]等外部冲击时的运营表现间接评估。

在影响因素方面,现有研究主要聚焦运营效率、风险管理能力等与港口韧性密切相关的特征,探究这些特征的影响因素,从而部分地反映港口在面对外部冲击时的适应性和恢复能力^[13-15]。

1.2 数字技术应用的测度及对港口的影响

目前,数字技术应用测度在地区和企业层面呈现出不同的方法论特征。地区层面的研究将数字经济发展水平作为测度对象,通过构建综合评价指标

体系来评估某一国家、省份或城市的数字经济发展水平^[16-18]。企业层面的测度则呈现多元化特征,国内学者主要基于上市公司年报数据,从早期的数字化无形资产占无形资产总额的比例^[19]和年报关键词词频分析^[20],发展到近期应用大语言模型提升测度精度^[21]。在海洋经济领域,综合评价指标体系法仍是主流测度方法。

关于数字技术对港口影响的研究呈现出明显的主题分化,主要集中在效率提升^[22-23]和可持续发展两个维度^[24]。值得注意的是,虽然港口效率、可持续性与韧性这三个概念存在内在关联,但各自的研究侧重点存在明显差异。港口韧性的研究聚焦于系统的抗冲击和恢复能力,效率研究着眼于作业流程的优化改进,而可持续研究更关注环境保护与经济发展之间的平衡关系。

1.3 文献评述

现有关于港口韧性的文献拓展了研究深度和广度,但仍存在某些不足。一方面,鲜有数字技术对港口韧性影响及其机制的实证检验。尽管大数据、人工智能等技术在港口运营中广泛应用,但相关研究仍停留在定性探讨,量化分析不足。另一方面,现有研究多聚焦单一外部冲击,未能比较不同外部冲击下的影响。这种局限性不仅影响理论认识的全面性,也导致政策建议的片面性。

2 理论分析

从组织能力视角看,数字技术不仅仅是工具性手段,更是重构组织能力的核心要素^[25]。港口组织通过数字技术培育动态能力,增强环境感知、资源整合和快速响应能力,从而在面对不确定性时表现出更强的韧性。Wang^[26]将动态能力划分为吸收能力、创新能力和适应能力。吸收能力是指企业识别、吸收和运用外部知识的能力^[27]。创新能力是指企业开发和推出新颖产品、流程或服务的能力^[28]。适应能力则是指企业能够通过重新配置资源和协调流程迅速且有效地应对环境变化的能力^[29]。

吸收能力的本质在于信息处理效率的提升。数字技术通过物联网与区块链构建的实时数据网络,可显著降低信息搜寻与验证成本^[30]。将货物状态、设备运行、环境变量等数据实时上链,本质上构建了

一个“完全信息市场”,大幅度提供信息传达效率。在此基础上,智能算法将碎片化数据转化为结构化知识,使得港口管理者能更精准识别环境扰动信号^[31],降低信息搜寻成本。

创新能力的核心在于通过资源的重组与优化配置创造新的经济租金。一方面,通过人工智能、大数据分析和物联网,港口企业能够精准感知市场需求、优化货物流转路径,使传统港口运营模式向智能化、自动化方向升级,从而释放新的生产力,提升运营效率^[32];另一方面,区块链、云计算和数字孪生等技术使得港口的管理模式发生根本性变革,企业得以重新配置信息流、资金流和物流资源,构建更加透明、高效、稳定的供应链体系^[33]。

数字技术通过提升港口企业的适应能力,强化其弹性决策机制,保持运营的稳定性和可持续性。基于 AI 预警系统预测货物流量并优化泊位调度^[34],物联网实时数据支撑运营模式动态调整^[35],区块链增强供应链协同降低信息不对称,使港口快速响应市场波动与供应链中断。

3 研究方法 with 数据

3.1 模型设定

文章将采用面板固定效应模型进行实证分析,主要基于两个方面的考虑:一方面,面板固定效应模型通过控制港口层面和年份层面的固定效应,能够排除那些无法直接观测但与港口韧性和数字技术应用同时相关的因素,如行业特性、地理位置、文化因素等,从而降低遗漏变量偏误,确保回归结果的可靠性^[36]。另一方面,经过模型设定检验(F 检验和 Hausman 检验)均支持固定效应模型的适用性。因此,本文采用面板固定效应模型,检验数字技术应用对港口韧性的赋能效应。具体模型设定如下:

$$P_{ORTRES_{i,t}} = \beta_0 + \beta_1 D_{IG_{i,t}} + \sum_{j=2}^9 \beta_j C_{control_{i,t,j}} + \gamma_c + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (1)$$

式(1)中, $P_{ORTRES_{i,t}}$ 为被解释变量,表示港口公司 i 在第 t 年的韧性水平; $D_{IG_{i,t}}$ 表示港口公司 i 在第 t 年的数字技术应用程度,为解释变量; $\sum_{j=2}^9 \beta_j C_{control_{i,t,j}}$ 表示一系列公司和省级层面的控制变量,包括经济发展、人力资本、交通基础设施、公司规模、资本回报率、城镇化、贸易开放程度以及产业结构。 γ_c 和 δ_t 分别为公司固定效应和年份固定效应。 $\varepsilon_{i,t}$ 为随机扰动项。 $\beta_j (j = 1, 2, \dots, 9)$ 为对应变量的待估参数。重点关注 $D_{IG_{i,t}}$ 的待估参数 β_1 。

3.2 变量说明

被解释变量:港口韧性水平。借鉴经济韧性的测度方法^[37],通过构造敏感性指数的方式衡量中国主要港口的韧性水平。计算公式如下:

$$P_{ORTRES_{i,t}} = \ln \left(\frac{C_{TP_{i,t}}}{C_{TP_{i,t-1}}} / \frac{C_{TP_t}}{C_{TP_{t-1}}} \right) \quad (2)$$

式(2)中, $C_{TP_{i,t}}$ 表示港口 i 在第 t 年的集装箱吞吐量, C_{TP_t} 为所有港口在第 t 年的集装箱吞吐量。 $P_{ORTRES_{i,t}} > 0$ 表示第 t 年港口 i 的集装箱吞吐量增速快于全国增速,反映该港口有着较高的韧性水平。若 $P_{ORTRES_{i,t}} < 0$ 则意味着第 t 年港口 i 的集装箱吞吐量增速慢于全国增速,反映该港口韧性水平较低。

解释变量:数字技术应用程度(D_{IG})。利用港口上市公司的文本数据衡量港口的数字技术应用程度。具体过程包括:第一步,构建数字技术相关的词汇词典。词典基于两个来源进行构造:一是参考数字技术相关的权威文献;二是从北大法宝数据库中筛选 2004 年以来发布的数字技术和港口相关的政策文件,以获得更多关键词汇,从而扩大词典。第二步,计算数字技术相关词频。利用 Python 从巨潮资讯网爬取 2004 年以来中国港口上市公司的年报并将其转换为文本格式。第三步,基于年报文本数据和数字技术相关的词汇词典,利用逆文档概率词频法(TF-IDF)^[38],构建数字技术应用程度指数。

此外,为了尽可能降低遗漏变量偏误,借鉴相关研究^[39-40],选取港口所在省份经济发展水平(LNPERGDP)及其二次项(LNPERGDP2)、人力资本水平(HUMCAP)、交通网络密度(TRANSP)、城镇化率(URBAN)、贸易开放程度(OPEN)、产业结构(THIRD_GDP)、公司规模(SIZE)和净资产收益率(ROE)作为控制变量。

3.3 数据来源

文章采用 2004 年至 2023 年中国 16 个港口上市公司数据。由于个别港口上市公司的集装箱吞吐量数据缺失严重,故实际采用的观测值数量为 204。港口韧性测度使用的集装箱吞吐量通过两个来源进行相互补充和印证得到。具体而言,先从《中国港口年鉴》中收集统计汇总的集装箱吞吐量。然而,部分港口的集装箱吞吐量数据未在统计汇总表中体现,故从描述各港口当年基本情况的文本中寻找集装箱吞吐量。通过上述步骤后,仍存在部分港口数据缺失。于是,用港口所在地级市的国民经济和社会发展统计公报进行补充,同时也对来自《中国港口年鉴》的数据进行印证。数字化应用程度测度所使用的年报文本来自巨潮资讯网。港口所在省份控

制变量数据来自《中国统计年鉴》，港口上市公司数据来自国泰安数据库。

4 实证结果与分析

4.1 基准回归

表1列(3)给出了数字技术对港口韧性赋能效应的检验结果,出于对比的需要,列(1)和列(2)分别列出了不加入固定效应和仅加入港口固定效应的估计结果。结果显示,列(1)中, D_{IC} 的估计系数为正且在10%的水平上显著,表明数字技术应用程度越高的港口,其港口韧性水平越高。在加入港口固定效应的列(2)中, D_{IC} 的系数符号不变,显著性降低,但下降幅度较小。列(2)中不显著的结果可能是未能控制组内 D_{IC} 和 P_{ORTRES} 两者之间的时间趋势或个别年份事件冲击引起,故在列(3)中加入时间固定效应。列(3)的结果显示, D_{IC} 的估计系数仍为正,但统计显著性大幅度提高。具体而言,当加入所有固定效应后,估计系数增大到0.547且能够在1%的显著性水平上通过统计显著性检验。就经济意义而言, D_{IC} 提高1个标准差, P_{ORTRES} 将增加约0.2个标准差。

表1 基准回归结果

Tab.1 Benchmark regression results

变量	(1) P_{ORTRES}	(2) P_{ORTRES}	(3) P_{ORTRES}
D_{IC}	0.427* (0.218)	0.309 (0.196)	0.547*** (0.130)
控制变量	控制	控制	控制
港口固定效应	未控制	控制	控制
年份固定效应	未控制	未控制	控制
N	204	204	204
组内 R^2	0.166	0.231	0.501

注:括号中数据为Driscoll-Kraay标准误;***、**和*分别表示在1%、5%和10%的显著性水平上通过统计显著性检验,下同。列(2)和(3)中的 R^2 为组内 R^2 。

4.2 稳健性检验

这部分从三个角度出发进行稳健性检验。一是替换数字技术应用程度的代理变量。基于港口货物吞吐量重新计算敏感性指数,并用于衡量港口韧性。表2列(1)显示, D_{IC} 的估计系数仍显著为正,相比表1列(3)稍大,核心结论仍成立。二是剔除2020年及之后样本。剔除所有港口上市公司2020年及之

后的样本。表2列(2)显示, D_{IC} 的估计系数仍然显著为正。三是控制港口所在地级市的数字技术发展水平。港口上市公司的数字技术应用程度会受到所在城市数字技术发展的影响,两者之间往往呈现正相关关系。同时,港口所在城市数字技术发展水平也可能直接影响港口韧性,这使得表1列(3)中 D_{IC} 对 P_{ORTRES} 的正向影响可能来自于城市数字技术发展水平,而非港口本身的数字化。因此,以人工智能水平衡量港口所在地级市的数字技术发展水平(D_{IC2}),并作为控制变量加入到模型中。表2列(3)结果显示, D_{IC} 的估计系数仍显著为正,且系数大小无明显变化, D_{IC2} 的估计系数虽为正,但统计上不显著。该结果表明,城市数字技术发展可能仅通过影响港口本身的数字技术应用程度作用于港口韧性。

表2 稳健性检验结果

Tab.2 Robust test results

变量	(1) $P_{ORTRES2}$	(2) P_{ORTRES}	(3) P_{ORTRES}
D_{IC}	0.710** (0.256)	0.392*** (0.052)	0.555*** (0.128)
D_{IC2}	—	—	0.033 (0.030)
控制变量	控制	控制	控制
港口固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
N	203	65	204
组内 R^2	0.379	0.589	0.504

4.3 数字技术对港口韧性的赋能机制

在前述赋能机制理论分析的基础上,围绕吸收能力、创新能力和适应能力,分别检验数字技术对港口韧性赋能效应的来源。杨林等^[41]研究,对研发投入强度和技术人员占比分别进行标准化处理并进行加总衡量创新能力,以研发支出占营业收入比重(研发强度)衡量吸收能力,以研发、资本及广告三种支出的变异系数衡量适应能力。其中,为保证变异系数与适应能力方向一致,对变异系数取负值,值越大意味着适应能力越强。

表3列(1)显示,数字技术应用对吸收能力的促进作用成立。数字技术应用程度每提高1个标准差,吸收能力将提高约0.124个标准差。列(2)的结果显示, D_{IC} 的估计系数虽为正但统计上不显著,没有足够证据表明数字技术应用能够促进创新能力

提升。显然,这与理论分析不吻合。列(3)的结果显示,数字技术应用程度提升能够显著增强适应能力。数字技术应用程度每提高1个标准差,适应能力将提高约0.294个标准差。这三种能力本身构成了港口韧性的重要方面。因此,表3的结果表明,数字技术仅能通过增强吸收能力和适应能力,提高港口韧性水平。检验结果的差异可能源于创新文化与组织结构的影响。港口企业的创新能力不仅依赖数字技术应用,还受到企业文化、组织结构、领导力等因素的影响。在一些传统的港口企业中,数字技术应用可能更多体现在操作层面和管理效率提升方面,而在研发和技术创新方面的推动作用可能较为有限。如果企业的创新文化尚未成熟,或者组织结构不够灵活,即使数字技术得到了广泛应用,创新能力的提升依然受到制约。

表3 赋能机制的检验结果

Tab. 3 Test results of enabling mechanism

变量	(1)	(2)	(3)
	吸收能力	创新能力	适应能力
D_{IG}	0.217** (0.080)	3.029 (2.947)	-4.738** (2.184)
控制变量	控制	控制	控制
港口固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
N	147	142	138
组内 R^2	0.476	0.526	0.398

4.4 外部冲击的影响

作为全球供应链的重要组成部分,港口时常面临来自外部的多种冲击,既有来自经济层面的冲击,也有来自环境和公共卫生事件的冲击。为此,构造三类外部冲击变量:1) 公共卫生事件冲击虚拟变量(C_{OVID})。在2020年之前,该变量取0,2020年及之后取1。2) 金融危机冲击虚拟变量(C_{RISIS})。当年份属于[2007, 2009]区间时,取1,其他年份取0。3) 气候变化冲击变量(T_{EMP} 、 W_{IND} 和 S_{EE})。气候变化的重要表现之一是全球气候变暖。对收集自NASA的栅格数据进行处理,获得港口所在城市的年平均气温数据(T_{EMP}),以此衡量气候变化冲击。此外,从对港口韧性影响的角度看,大风、能见度等气候因素影响较大,故对来自GSOD气象站点的风速和能见度数据,按照IDW方法插值成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的栅格数据,再分区域平均得到各港口所在城市的年度风速(W_{IND})和能见度(S_{EE})。分别构造

D_{IG} 与 C_{OVID} 、 C_{RISIS} 、 T_{EMP} 、 W_{IND} 、 S_{EE} 的交乘项并进行估计。

表4列(1)的结果显示, $C_{OVID} \times D_{IG}$ 估计系数显著为正,表明公共卫生事件的发生增强了数字技术的赋能效应。在公共卫生事件影响期间($C_{OVID} = 1$), D_{IG} 的估计系数约为0.843($0.448 + 1 \times 0.395$),相比表1列(3)中 D_{IG} 的估计系数(0.547)更大。因此,赋能效应得到提升。公共卫生事件的爆发限制了人员流动和接触,数字技术能够帮助港口减少对人工操作的依赖、提高港口作业效率、增强信息透明度和实时性。这使得相比于其他时期,数字技术对港口韧性的赋能效应也更大。列(2)的结果显示, $C_{RISIS} \times D_{IG}$ 的估计系数在统计上均不显著。金融危机期间,港口面临的主要挑战是贸易量减少和资金困境,导致进出口货物量大幅下降。在这种情况下,港口恢复依赖于市场需求和金融支持。尽管数字技术能够帮助港口提高管理效率,但对于需求萎缩这一核心问题的缓解作用较为有限。列(3)、(4)和(5)中, $T_{EMP} * D_{IG}$ 、 $W_{IND} * D_{IG}$ 和 $S_{EE} * D_{IG}$ 的估计系数在统计上均不显著。现有研究发现,气候变化带来的极端天气会破坏港口基础设施,从而降低运营效率和提高运营成本^[10-11]。数字技术引入能够帮助企业应对气候变化对基础设施和运营绩效造成的不利影响^[42]。列(3)、(4)和(5)的结果意味着,数字技术在帮助港口应对气候变化带来的不利影响中尚未发挥积极作用。在中国主要港口的实际运营中,数字技术在许多港口中还未得到完全的渗透与深度应用,尤其在应对复杂的气候变化影响方面,相关技术应用和管理模式尚未完全成熟或被广泛采用。此外,数字技术的效果往往是渐进的,尤其在面临复杂系统性问题时,其作用并非立竿见影,需要通过长时间的数据积累、模式优化和技术迭代才能显现。

5 主要结论与政策建议

作为全球供应链的重要一环,港口时常面临各种不确定的外部冲击。因此,探究如何提升港口在面对各种外部冲击时的韧性显得尤为重要。基于2004至2023年中国16个港口上市公司的面板数据,采用固定效应模型实证检验数字技术对港口韧性的赋能效应及机制,并进一步探讨三种外部冲击对赋能效应的异质性影响。主要结论包括:第一,数字技术显著提升港口韧性。数字技术应用每提升1个标准差,港口韧性指数增加约0.2个标准差。在替换变量、排除干扰样本等稳健性检验后,结论仍然成立。第二,吸收能力和适应能力显著。港口上市

表4 外部冲击对赋能效应影响的检验结果

Tab.4 Test results of the impact of external shocks on the enabling effect

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	P_{ORTRES}	P_{ORTRES}	P_{ORTRES}	P_{ORTRES}	P_{ORTRES}
D_{IG}	0.448*** (0.115)	0.666*** (0.065)	0.396 (0.679)	-0.400 (1.262)	1.005 (0.825)
$C_{OVID} * D_{IG}$	0.395* (0.197)	—	—	—	—
$C_{RISIS} * D_{IG}$	—	-0.380 (0.413)	—	—	—
$T_{EMP} * D_{IG}$	—	—	0.014 (0.039)	—	—
$W_{IND} * D_{IG}$	—	—	—	0.332 (0.408)	—
$S_{EE} * D_{IG}$	—	—	—	—	-0.026 (0.058)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
港口固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
N	204	204	204	199	199
组内 R^2	0.462	0.460	0.462	0.470	0.468

企业能够通过应用数字技术增强其吸收能力和适应能力,且对适应能力的增强效应大于对吸收能力的增强效应。然而,创新能力路径未通过显著性检验。第三,冲击类型存在异质性。赋能效应在面对公共卫生事件冲击时得到显著增强,而在面对金融危机和气候变化两种冲击时,赋能效应未得到增强。

基于上述研究,本文提出如下政策建议:第一,构建韧性数字基座。建设国家级港口数据中台,统一物联网、区块链数据标准,破解跨港口和企业数据孤岛。开发港口数字孪生预警系统,集成气象、疫情、供应链等多源风险数据,实现“一港一策”智能预案。第二,强化动态能力培育。设立港口数字化专项基金,重点支持AI调度算法、弹性供应链系统等适应能力建设项目。建立“港口-航运-物流”数字联盟,通过智能合约构建多方协同应急机制。第三,实施差异化韧性策略。针对公共卫生事件,推广无接触作业模式,开发基于机器视觉的集装箱自动消杀系统。针对气候灾害,部署边缘计算气象站,结合深度学习实现台风路径精准预测与资源预调度。

尽管本研究就数字技术赋能港口韧性进行了系

统研究,但仍存在若干不足之处,主要体现在两个方面:一是样本局限于上市港口公司,未来需纳入非上市港口数据扩展普适性;二是外部冲击分析侧重短期效应,长期气候适应机制需更长时间序列验证。

参 考 文 献

- [1] Kuźmicz K A. Impact of the COVID-19 pandemic disruptions on container transport [J]. *Engineering Management in Production Services*, 2022, 14(2): 106-115.
- [2] Verschuur J, Koks E E, Li S, et al. Multi-hazard risk to global port infrastructure and resulting trade and logistics losses [J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 5.
- [3] Becker A, Caldwell M R. Stakeholder perceptions of seaport resilience strategies: a case study of gulfport (mississippi) and providence (rhode island) [J]. *Coastal Management*, 2015, 43(1): 1-34.
- [4] Hosseini S, Barker K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: a case study of inland waterway ports [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 93: 252-266.

- [5] Gu B, Liu J. Port resilience analysis based on the HHM-FCM approach under COVID-19 [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 243: 1-15.
- [6] Martin R, Sunley P. On the notion of regional economic resilience: conceptualization and explanation [J]. *Journal of Economic Geography*, 2015, 15(1): 1-42.
- [7] Speir C, Phillips A, Mamula A, et al. A measure of port-level resilience to shocks in commercial fisheries [J]. *Marine Policy*, 2023, 151: 105575.
- [8] León-mateos F, Sartal A, López-manuel L, et al. Adapting our sea ports to the challenges of climate change: Development and validation of a Port Resilience Index[J]. *Marine Policy*, 2021, 130: 1-16.
- [9] Wan C, Yuan J, Cao D, et al. A fuzzy evidential reasoning-based model for evaluating resilience of ports to typhoons [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2024, 133: 104228.
- [10] Verschuur J, Koks E E, Hall J W. Port disruptions due to natural disasters: Insights into port and logistics resilience [J]. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, 2020, 85: 1-12.
- [11] Izaguirre C, Losada I J, Camus P, et al. Climate change risk to global port operations[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(1): 14-20.
- [12] Nguyen P-N, Kim H. The effects of the COVID-19 pandemic on connectivity, operational efficiency, and resilience of major container ports in Southeast Asia[J]. *Journal of Transport Geography*, 2024, 116: 103835.
- [13] Mansouri M, Nilchiani R, Mostashari A. A policy making framework for resilient port infrastructure systems [J]. *Marine Policy*, 2010, 34(6): 1125-1134.
- [14] Liu J, Zhang H, Zhen L. Blockchain technology in maritime supply chains: applications, architecture and challenges [J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(11): 3547-3563.
- [15] 俞海宏, 刘南. 基于系统动力学的长三角港口群效率模型研究[J]. *中国航海*, 2012, 35(1): 98-104.
Yu H H, Liu N. Efficiency model of the port group on Yangtze River Delta based on system dynamics [J]. *Navigation of China*, 2012, 35(1): 98-104. (in Chinese)
- [16] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65-76.
Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. *Journal of Management World*, 2020, 36(10): 65-76. (in Chinese)
- [17] Davoudi S, Keith S, Jamila H L, et al. Resilience: A bridging concept or a dead end? [J]. *Planning Theory & Practice*, 2012, 13(2): 299-333.
- [18] Liang S, Tan Q. Can the digital economy accelerates China's export technology upgrading? Based on the perspective of export technology complexity [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024, 199: 123052.
- [19] 赵宸宇, 王文春, 李雪松. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. *财贸经济*, 2021, 42(7): 114-129.
Zhao C Y, Wang W C, Li X S. How does digital transformation affect the total factor productivity of enterprises[J]. *Finance & Trade Economics*, 2021, 42(7): 114-129. (in Chinese)
- [20] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现——来自股票流动性的经验证据[J]. *管理世界*, 2021, 37(7): 130-144.
Wu F, Hu H Z, Lin H Y, et al. Enterprise digital transformation and capital market performance: Empirical evidence from stock liquidity[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(7): 130-144. (in Chinese)
- [21] 金星晔, 左从江, 方明月, 等. 企业数字化转型的测度难题:基于大语言模型的新方法与新发现[J]. *经济研究*, 2024, 59(3): 34-53.
Jin X Y, Zuo C J, Fang M Y, et al. Measurement problem of enterprise digital transformation: new methods and findings based on large language models [J]. *Economic Research Journal*, 2024, 59(3): 34-53. (in Chinese)
- [22] Castellano R, Fiore U, Musella G, et al. Do digital and communication technologies improve smart ports? A fuzzy DEA Approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(10): 5674-5681.
- [23] Yen B T H, Huang M J, Lai H J, et al. How smart port design influences port efficiency-A DEA-Tobit approach [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2023, 46: 100862.
- [24] Klein M, Spsychalska-wojtkiewicz M. Digitalization of small ports as a step in achieving sustainable goals[J]. *Procedia Computer Science*, 2023, 225: 3381-3387.
- [25] Sambamurthy V, Bharadwaj A, Grover V. Shaping agility through digital options: reconceptualizing the role of information technology in contemporary firms[J]. *MIS Quarterly*, 2003, 27(2): 237-263.
- [26] Wang C L, Ahmed P K. Dynamic capabilities: A review and research agenda [J]. *International Journal of Management Reviews*, 2007, 9(1): 31-51.

- [27] Cohen W M, Levinthal D A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation [J]. *Administrative science quarterly*, 1990, 35 (1): 128-152.
- [28] Hagedoorn J, Duysters G. External sources of innovative capabilities: The preferences for strategic alliances or mergers and acquisitions [J]. *Journal of Management Studies*, 2002, 39(2): 167-188.
- [29] Gibson C B, Birkinshaw J. The Antecedents, consequences, and mediating role of organizational ambidexterity [J]. *Academy of Management Journal*, 2004, 47(2): 209-226.
- [30] 李斌, 杨冉, 卢娟, 等. 企业数字化转型、供应链溢出与劳动力技能偏向[J]. *数量经济技术经济研究*, 2024, 41(8): 133-153.
Li B, Yang R, Lu J, et al. Enterprise digital transformation, supply chain spillover and labor skill preference[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2024, 41(8): 133-153. (in Chinese)
- [31] Yau K L A, Peng S, Qadir J, et al. Towards smart port infrastructures: Enhancing port activities using information and communications technology [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 83387-83404.
- [32] Cuong T N, Kim H-S, You S-S, et al. Data analytics and throughput forecasting in port management systems against disruptions: a case study of Busan Port [J]. *Maritime Economics & Logistics*, 2023, 25(1): 61-89.
- [33] Guan P, Wood L C, Wang J X, et al. Blockchain adoption in the port industry: a systematic literature review[J]. *Cogent Business & Management*, 2024, 11 (1): 2431650.
- [34] Barua L, Zou B, Zhou Y. Machine learning for international freight transportation management: A comprehensive review [J]. *Research in Transportation Business & Management*, 2020, 34: 100453.
- [35] Zarzuelo I, Soeane M J, Bermudez B L. Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review [J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2020, 20: 100173.
- [36] Wooldridge J M. *Econometric analysis of cross section and panel data* [M]. Cambridge: MIT press, 2010.
- [37] 张蕾蕾, 宋林. 数字治理与城市经济韧性[J]. *经济学动态*, 2024, 65(10): 109-127.
Zhang L L, Song L. Digital governance and urban economic resilience [J]. *Economic Perspectives*, 2024, 65(10): 109-127. (in Chinese)
- [38] 包群, 但佳丽, 王云廷. 国内贸易网络、地理距离与供应商本地化 [J]. *经济研究*, 2023, 58(6): 102-118.
Bao Q, Dan J L, Wang Y T. Domestic trade network, geographical distance and localization of suppliers [J]. *Economic Research Journal*, 2023, 58(6): 102-118. (in Chinese)
- [39] He X, Hu W, Li W, et al. Digital transformation, technological innovation, and operational resilience of port firms in case of supply chain disruption [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 190: 114811.
- [40] Liu J, Qi Y, Lyu W. Port resilience in the post-COVID-19 era [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 238: 106565.
- [41] 杨林, 和欣, 顾红芳. 高管团队经验、动态能力与企业战略突变: 管理自主权的调节效应 [J]. *管理世界*, 2020, 36(6): 168-188.
Yang L, He X, Gu H F. Top management team's experiences, dynamic capabilities and firm's strategy mutation: Moderating effect of managerial discretion [J]. *Journal of Management World*, 2020, 36(6): 168-188. (in Chinese)
- [42] Almeida F, Okon E. Achieving sustainable development goals through digitalization in ports [J]. *Business Strategy and the Environment*, 2024, 33(7): 6737-6747.