

基于系统动力学的运河航道网碳减排模型 构建与减排路径分析

蒋军¹, 黄健¹, 孙正春², 吴尚峰¹, 凡超¹

(1. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 214135)

摘要: 为全面考察节能减排措施在运河航道网碳减排中的实际效果, 在深入分析相关政策及未来发展趋势的基础上, 基于系统动力学原理构建了运河航道网碳减排模型。模型综合考虑了船舶、港口码头、港口经济效益、能源使用及环境保护等多个系统要素, 通过动态仿真技术, 模拟了不同节能减排策略实施下的碳减排效果, 并进行了对比分析。研究表明, 技术手段的应用在显著降低船舶和港口码头的碳排放中起到了关键作用, 尤其是船舶能效管理和岸电技术方面的进展能有效减少运河航道网的整体能源消耗和碳排放。文章在理论上验证了技术革新和市场机制的重要性, 可为运河航道网实现更高效的碳减排目标提供科学依据和实践指南, 将极大促进运河航道网的环境可持续发展。

关键词: 系统动力学; 运河航道网; 船舶碳减排

中图分类号: U6; U612.14; X82

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)09-0001-10

doi: 10.7640/zggwjs202609001

Construction of a system dynamics-based carbon emission reduction model for canal waterway networks and analysis of reduction pathways

Jiang Jun¹, Huang Jian¹, Sun Zhengchun², Wu Shangyi¹, Fan Chao¹

(1. College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 214135, China)

Abstract: In order to comprehensively examine the actual effect of energy-saving and emission reduction measures in carbon emission reduction of canal waterway network, a carbon emission reduction model of canal waterway network was constructed based on the principle of system dynamics on the basis of in-depth analysis of relevant policies and future development trends. The model comprehensively considers multiple system elements such as ships, port terminals, port economic benefits, energy use and environmental protection, and simulates the carbon emission reduction effect under the implementation of different energy-saving and emission reduction strategies through dynamic simulation technology, and carries out a comparative analysis. The results show that the application of technological tools plays a key role in significantly reducing carbon emissions from ships and port terminals, and in particular, advances in ship energy efficiency management and shore power technology can effectively reduce the overall energy consumption and carbon emissions of the canal waterway network. This paper theoretically demonstrates the critical roles of technological innovation and market mechanisms, which can provide a scientific basis and practical guidelines for the canal waterway network to achieve more efficient carbon emission reduction targets, and greatly facilitate its environmentally sustainable development.

Key words: system dynamics; canal navigation network; carbon emission reduction from ships

收稿日期: 2025-07-21 修回日期: 2025-09-16

基金项目: 重庆市教育委员会人文社科项目 (23SKGH141); 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2024NSCQ-MSX1186); 重庆市研究生联合培养基地 (JDLHPYJD2022002)

作者简介: 蒋军 (1983—), 男, 湖北荆州人, 博士, 副教授, 研究方向为交通运输规划与管理、运输与物流系统优化。E-mail: 362531571@qq.com

0 引言

京杭大运河作为世界上最长的人工内河航道横贯了中国的华北和华东的多个重要经济区,历史上一直是中国南北经济与文化交流的重要纽带,对区域经济、文化和交通发展具有深远影响。但随着航运量的不断增加,运河船舶碳排放问题日益凸显,给区域环境带来较大压力。因此,针对运河航道网络的碳减排研究亟需结合定量分析方法,建立系统的评估框架监测减排措施的动态效果。系统动力学作为一种融合定性结构分析与定量数值模拟的方法论,能够在多尺度层面上构建复杂系统的动态模型。通过明确系统内部变量间的因果链条与反馈机制,实现对系统行为在多种情境下的动态演化过程进行仿真分析。针对港口碳减排,众多学者从不同角度(如方法模型和市场政策)进行了大量研究。马骥等^[1]以上海港集疏运系统为研究对象,在分析系统各要素之间相互关系的基础上,建立了系统动力学模型,并通过设计不同的政策仿真情景,考察相关政策对港口集疏运系统碳排放的影响作用。姚海滨^[2]利用 Vensim 软件构建了航空公司碳减排的 SD 模型,该模型能够仿真模拟采取不同节能减排措施和参与碳市场等情形下对航空公司碳排放发展趋势的影响。黄静等^[3]以江苏省集装箱港区为研究对象,基于实测排放数据对集装箱拖车“油改气”开展费效分析和敏感性分析。陈鹏^[4]针对港口工程运营期碳排放评价方法的不足,并结合国内外研究成果与港口实际,明确碳排放计算范围、排放源、数据来源及水平评价方法,开展案例应用;结果显示,该方法可反映港口运营期碳生成机理及影响。阮雷斌等^[5]通过分析 RTG 在工作过程中的能量流动以及势能回收的可行性,并结合双向 DC/DC 变换器,提出了一种基于混合动力技术的节能方案。仿真结果表明,该方案能够有效降低 RTG 的能耗,提升能源利用效率。Yang 等^[6]首次阐述了港口系统碳排放的来源及其基本构成要素,并引入了港口一体化物流系统的概念。在市场经济政策方面,Homsombat 等^[7]分析了激励或抑制性政策对港口、托运人以及航运公司行为的影响。Cui 等^[8]运用博弈论探讨了政府如何对船舶及竞争性港口作业征收排放税,从而更好地控制港口污染物排放。Sheng 等^[9]构建了以船公司和港口为主体的两阶段博弈模型,探讨了单边与统一海事排放管制

这两者间的经济及环境影响。目前,国内外学者主要从市场机制、技术手段和运营管理 3 个方面对船舶碳减排问题进行了广泛研究。在减排市场机制方面,现有的路径主要集中在征收碳税和碳排放权交易。

因此,本文基于系统动力学理论研究运河航道网碳减排模型,并提出可行的碳减排路径,可为实现“碳达峰、碳中和”目标提供理论依据,为运河流域绿色可持续发展提供决策参考。

1 运河航道网船舶碳减排措施效果评估模型构建

航运业作为一个复杂的产业系统,其运营受到多方面因素的综合影响。船舶的碳排放主要源自航行过程中和港口运营阶段的能源消耗,但同样受到市场需求、政府政策等多重外部因素的影响。这些因素相互交织构成了复杂的反馈回路,从而对碳排放动态演化产生深远影响。系统动力学作为一种融合定性结构分析与定量数值模拟的方法论,能够在多尺度层面上构建复杂系统的动态模型。通过明确系统内部变量间的因果链条与反馈机制,实现对系统行为在多种情境下的动态演化过程进行仿真分析。尤其在相关数据不完备或部分变量难以直接量化的情形下,系统动力学模型可通过结构建模与参数调节,对系统运行机制进行合理推演,从而确保模型在反映现实系统特征方面的有效性与適切性。本文将运河航道网船舶碳减排系统划分为船舶、港口、政府、市场的减排体系。

1.1 运河航道网与普通河流差异性分析

本研究的核心研究对象是运河航道船舶碳减排系统,具体聚焦于运河航道场景下,围绕船舶碳排放产生、影响及减排措施效果评估所涉及的多主体、多要素交互系统。研究以京杭大运河苏州段为实证案例,通过构建系统动力学模型,量化分析船舶、港口、政府、市场 4 大子系统间的动态反馈关系,评估技术手段、财政激励、市场机制 3 类减排措施在不同实施强度下的效果,最终为运河航道船舶碳减排策略制定提供科学依据。

从研究边界看,该系统不仅涵盖船舶在运河航行全周期(低速航行、机动、锚泊、在泊等阶段)的碳排放,还包括港口运营(装卸、水平运输、岸电供应等)、政府政策调控(环保投资、碳排放标准、财政补贴)及市场机制作用(碳交易、能源价格、运价)等多维度影响因素,形成“船舶-港

口-政府-市场”相互耦合的复杂系统。运河与普通河流在航道属性、运营模式、碳排放影响因素上存在本质区别, 这些差异直接决定了 2 类碳减排模型的设计逻辑与核心参数, 具体差异如下:

1) 在航道属性与通航条件方面, 运河多为人工开挖或整治, 航道的水深、宽度、曲率半径等参数标准化程度高, 水流速度稳定, 通航环境可控性强; 而普通河流水深、流速受季节、降水等自然因素影响大, 航道条件不稳定。这一差异的本质是运河模型需突出“人工调控下的标准化运营”, 普通河流模型需重点考虑“自然变量的动态干扰”。

2) 在船舶运营特征上, 运河通航船舶多为适配航道等级的中小型船舶, 航速受航道限速、船闸调度影响, 波动范围小, 且“航速-油耗”关系更稳定; 普通河流可通航大型海船, 航速受水流、风向影响大, 波动范围广, “航速-油耗”关系需叠加自然阻力修正。差异本质为运河模型可简化船型与航速参数, 聚焦“标准化运营下的减排优化”; 普通河流模型需增加自然阻力、船型差异等变量, 提高模型适应性。

3) 对于减排措施的适用性, 运河港口间距短、停靠频次高, 且航道沿线电力基础设施完善; 普通河流港口分散、部分偏远港口电力供应不足, 且船舶航行距离长, 清洁能源补给覆盖率低。其差异本质是运河模型中“岸电建设”“清洁能源改造”等技术措施的参数权重更高; 普通河流模型需强化“跨区域政策协同”“远距离能源补给”等变量。

1.2 运河航道网碳减排措施分析

通过设置不同影响参数分析运河航道网碳减排的路径, 将运河航道网碳减排措施分为技术手段、财政激励和市场机制等 3 类, 如表 1 所示。

表 1 运河航道网船舶碳减排影响参数

Table 1 Impact parameters of carbon emission reduction from ships in the canal waterway network

措施类型	影响参数
技术手段	船舶结构调整浮动因数, 装卸效率提升
财政激励	节能减排专项资金因数
	政府环保投资政策因子
市场机制	碳排放配额比例
	碳交易价格浮动因数

1.3 模型假设

运河航道网碳排放主要来源为船舶排放, 船

舶运营过程中可分为 5 个阶段, 包括低速巡航、巡航、机动、锚泊和在泊, 不同船舶航行状态的碳排放量占比如图 1 所示。根据数据显示, 船舶碳排放主要集中于低速巡航、巡航以及机动 3 个阶段。而运河航道网碳排放除受到船舶碳排放影响外, 还受到复杂的经济社会环境以及能源消耗等因素的影响。因此, 运河航道网碳减排系统是一个具有层次性和相互作用的复杂系统。在该系统中, 各子系统通过多重反馈机制和传导路径相互联系, 形成了动态的耦合效应, 进一步加深了系统的复杂性和演化特征。

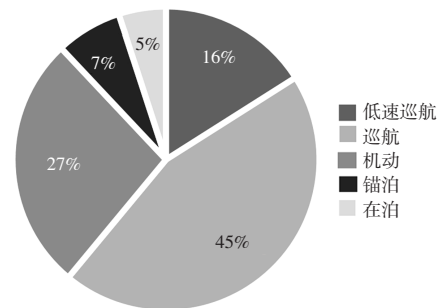


图 1 船舶航行状态划分碳排放量

Fig. 1 Ship carbon emissions by navigation status

构建具有实际参考价值的运河航道网船舶碳减排系统动力学模型时, 必须先明确模型的目标和边界条件, 并在此基础上合理地做出一系列假设, 以有效简化模型的复杂性和不确定性。针对运河航道网船舶碳减排模型, 提出以下主要假设:

1) 随着船舶使用年限的增加, 其发动机性能、船体结构以及自重等关键参数可能会发生一定程度的退化或变化, 从而影响其整体运行效率和能耗特性, 但燃油的使用效率降低率难以通过一定时间数据进行测度。因此, 本文不考虑个别船舶因自身原因导致参数变化, 认为选定船舶即代表该区域此类型船舶普遍状况。

2) 在碳减排模型中, 假设不考虑突发事件对航运业运营及运河航道网碳排放的潜在影响, 如苏伊士运河货轮搁浅事故、恶劣天气等, 仅专注于常规运营条件下的碳排放动态。

3) 选取的 CO_2 排放指标即为碳排放指标, 不考虑其他温室气体排放形成的碳排放。

1.4 系统因果反馈回路分析

1.4.1 因果回路图

构建因果回路图可直观识别系统正/负反馈回路, 展示变量因果关系与相互作用, 为理解系统

1.4.2 系统流图及变量说明

图2 运河航道网碳减排系统因果关系图

Fig. 2 Causality diagram of the carbon emission reduction system of the canal waterway network

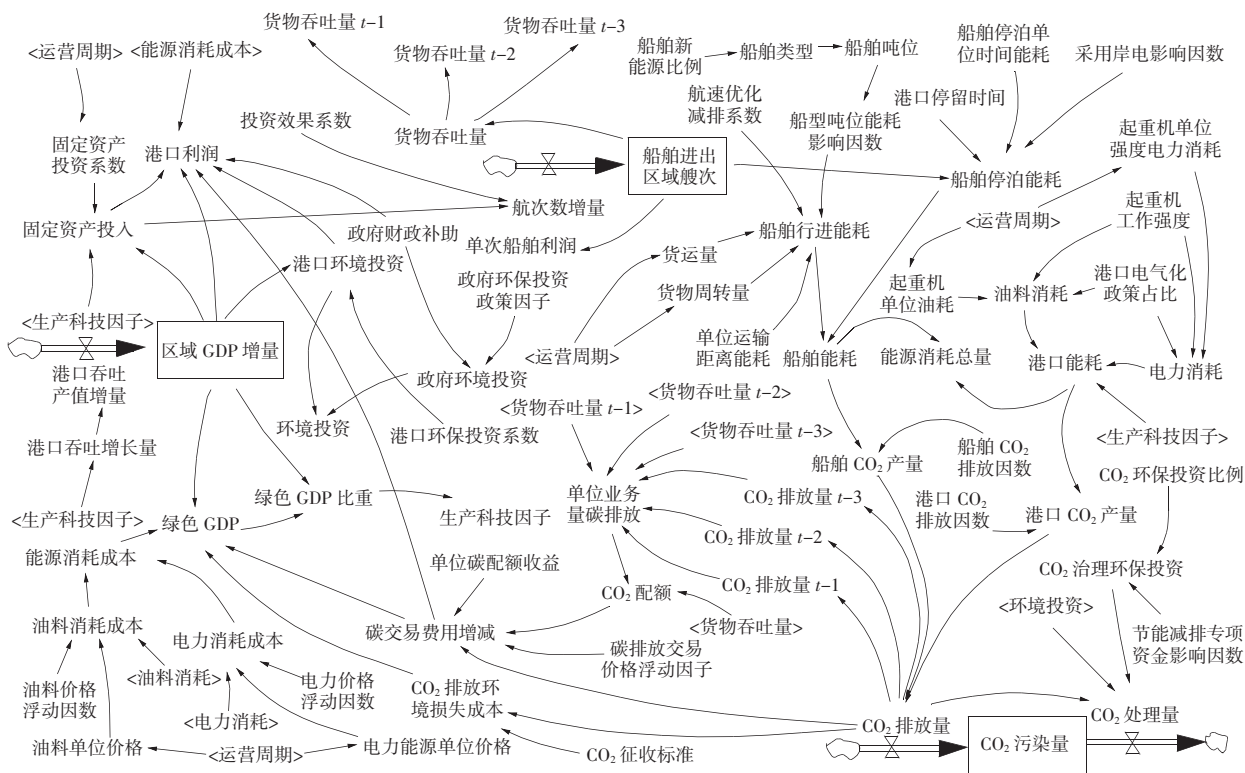


图3 运河航道网碳减排系统流图

Fig. 3 Carbon emission reduction system flow diagram for the canal waterway network

表 2 各变量的含义、计算方式及数据来源
Table 2 The meaning, calculation method, and data source of each variable

变量	含义	数据来源
H	货运周转量	航运/港口业务系统的运输记录、货运合同台账, 或行业货运统计平台
h	货运量	港口计量设备数据、货运提单、业务申报系统
E_d	单位运输距离能耗	船舶轮机日志, 主要记录燃油消耗、航行距离、能源监测系统, 或行业通用能耗定额(参考 JTS/T 150—2022《水运工程节能设计规范》)
K_v	航速优化减排系数	船舶运营试验数据, 包括对比不同航速下能耗、航运节能技术研究报告、企业内部航速优化方案验证结果
K_s	船型吨位能耗影响因数	船舶设计资料(含能耗参数)、行业船型能耗统计数据库, 如海事部门、船舶工业协会发布的数据
T	港口停留时间	港口生产调度系统、船舶在港动态记录(AIS 系统数据辅助验证)
E_t	船舶停泊单位时间能耗	船舶轮机日志(停泊期间燃油/电力消耗记录)、港口能源监测(若可采集船舶在港能耗)
K_{se}	采用岸电影响因数	港口岸电计量系统(记录岸电供应电量、功率)、船舶自身发电能耗记录(轮机日志)
C_{c1}	折标准煤系数(运输部分)	国家标准(如 GB/T 2589—2020《综合能耗计算通则》)、行业能源折算规范(水运行业节能相关规定)
E_c	起重机单位油耗/强度电力消耗	起重机能源计量装置(电表、油表)、港口装卸作业记录系统(含作业强度、时长)
W	起重机工作强度	港口装卸作业系统(记录吊次、载荷数据)、起重机操作日志
K_e	港口电气化政策占比	港口设备管理台账(记录设备驱动类型)、作业系统数据(区分电力/燃油驱动作业量)
C_{c2}	折标准煤系数(装卸部分)	同 C_{c1} , 依据国家标准、行业规范
K_t	生产科技因数	港口科技改造项目前后的能耗测试数据、生产系统节能效果评估报告

将上述系统流图进行因果逻辑整合, 以 CO_2 排放量为核心输出, 其综合表达式如下:
$$\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \left[\left(\frac{H}{h} \times E_d \times K_v \times K_s + T \times E_t \times (1 - K_{se}) \right) \times C_{c1} \right] + [E_c \times W \times K_e \times C_{c2} \times K_t] \quad (1)$$
式中: 货运量 h =船舶进出数量 $\times 119.3+35\,400$, 式中系数与参数主要来自《中国港口年鉴(2020—2024)》及《苏州统计年鉴(2020—2024)》等相关数据测算。各变量的含义、计算方式及数据来源如表 2 所示。
港口停留时间、船舶停泊单位时间能耗等参数受港口吞吐量、船舶类型等变量影响, 最终通过因果反馈机制与经济指标(如港口利润、碳交易费用)关联。运河航道碳减排系统主要变量如表 3 所示。

表 3 运河航道网碳减排系统主要变量
Table 3 Key variables of the canal waterway network carbon reduction system

变量名称	变量类型	变量名称	变量类型
CO_2 污染量	状态变量	货物周转量	辅助变量
CO_2 处理量	辅助变量	能源价格	辅助变量
CO_2 排放量	辅助变量	CO_2 排放 GDP 损失因数	常量
环境投资	辅助变量	船舶吨位	辅助变量
政府财政支出	辅助变量	船舶行进能耗	辅助变量
航道区域 GDP	辅助变量	船速优化系数	常量
碳交易费用	辅助变量	船舶能耗	辅助变量
港口 CO_2 排放量	辅助变量	船舶停泊能耗	辅助变量
船舶结构调整浮动系数	辅助变量	船舶 CO_2 排放量	辅助变量
船舶类型比例系数	常量	采用岸电船舶比例系数	常量
政府环保投资政策因子	常量	船舶停港时长	辅助变量
水路运输占比因数	常量	港口吞吐量	辅助变量
货运需求	辅助变量	单位吞吐量 CO_2 排放	常量
货运量	辅助变量	节能减排专项基金因数	常量
碳交易价格浮动因子	常量	港口能耗	辅助变量
碳排放交易价格	辅助变量	港口装卸效率	常量
运价	常量	能源价格	常量

1.5 运河航道网船舶碳减排评估模型仿真分析
1.5.1 数据来源及参数测算方法
本研究选取京杭运河苏州段作为仿真对象, 建模数据主要源自权威统计资料, 包括《中国港口年鉴(2020—2024)》和《苏州统计年鉴(2020—2024)》等公开出版物, 同时结合了江苏省海事管理部门和苏州市环境保护部门官方网站发布的相关数据。基于历史数据, 并根据上海港可持续发展报告、

上海港年度报告中的相关数据进行估算以确定模型参考系数。各类能源燃烧系数以及折算标准煤参考系数如表4所示。

表4 各类能源燃烧系数以及折算标准煤参考系数

Table 4 Combustion factors for various energy sources and reference factors for converting to standard coal

能源	平均低发热量	煤当量(CE)换算系数
煤	20 908 kJ	0.714 3 kgCE/kg
燃油	41 816 kJ	1.428 6 kgCE/kg
LSFO	41 816 kJ	1.428 6 kgCE/kg
LNG	44 980 kJ	1.757 2 kgCE/kg
电力	3 600 kJ/(kW·h)	0.122 9 kgCE/(kW·h)

1.5.2 模型方程构建

1) 状态变量

状态变量亦可称为系统存量,是表征系统累积效应的关键参量。它量化了自系统启动初始时刻至任意指定时间点期间,系统内外部信息流或物质流累积的数量特征。此类变量对系统整体的特性及动态行为具有显著的塑造与影响作用,因其界定了系统在各时间节点的初始配置及运行状态。状态变量不仅映射了系统的即时状态,更是系统演变历程与未来趋势的内在表征。其数学表述形式可通过方程式来描述:

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Inflow(s) - Outflow(s)] ds + Stock(t_0) \quad (2)$$

式中: $Stock(t)$ 为 t 时刻的状态变量; $Inflow(s)$ 为流入量; $Outflow(s)$ 为流出量; $Stock(t_0)$ 为初始时刻的状态变量。

2) 速率变量

速率变量亦称作流量变量,是衡量状态变量随时间变化快慢的物理量。它主要刻画了状态变量在时间维度上的动态演变特征,具体表现为状态变量在某一瞬时点的净变化速率,即状态变量对时间的导数。该变量的基本原理可通过微分方程式来表达:

$$\frac{d(Stock)}{dt} = Inflow(t) - Outflow(t) \quad (3)$$

3) 辅助变量

辅助变量在系统中对于连接状态变量与速率变量极为关键,它们用于阐述两者间的转换机制及信息传递路径。这类变量的显著特性在于不具备累积效应,同时也不蕴含微分意义,而是能够即时响应相关变量的变动。在系统研究的整体框架内,常量则代表着那些持续或近乎恒定不变的

因素。辅助变量与常量的共同作用使得系统内部的逻辑关系更为明晰与精确,进而为系统行为与性质的描述与阐释提供了强有力的支撑,增强模型对系统动态特性的表达能力。

4) 表函数

在系统动力学领域,表函数作为一种高效的数学工具被普遍采纳,其核心作用在于刻画一个变量随另一变量变化而变化的复杂关联模式。鉴于系统模型中变量间往往呈现出非线性关系,难以仅凭简单的算术操作或统计手段予以精确解析与量化,表函数因此显得尤为重要。它能够有效捕捉并表述这些变量间错综复杂的相互依赖关系,为研究者深入洞察系统运行机制、精准预测未来发展趋势以及科学制定决策与策略提供了有力支撑,其数学表达式为:

$$LOOKUPNAME[(X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max})] \quad (4)$$

式中: X 为自变量; Y 为因变量。

1.5.3 模型检验

1) 关键回路逻辑检验

原模型中“碳交易价格→船舶燃油使用→CO₂排放量”的负反馈回路为:碳交易价格上升→航运企业减排成本增加→主动优化燃油使用(如改用LNG/岸电)→船舶燃油消耗下降→CO₂排放量减少→碳交易需求降低→碳交易价格回落,并通过“数据匹配+逻辑推演”验证该回路。在数据匹配方面,2021—2023年长三角碳交易价格从60元/t升至85元/t(上海环境能源交易所数据),同期苏州段船舶LNG使用率从15%升至28%,燃油消耗下降12%,CO₂排放量下降9%,与回路逻辑一致;在逻辑推演方面,无遗漏反馈链(如燃油消耗下降→航速轻微下降→货运量无显著变化,因航速优化在“能耗-时间平衡”范围内,货运量波动<3%,符合实际运营逻辑)。

2) 回路完整性评审

专家对模型中8条核心反馈回路(如“政府环保投资→岸电建设→CO₂排放量”和“港口装卸效率→船舶停留时间→能耗”)的完整性打分,平均得分4.1分,仅1条回路(“船舶配船结构→货运匹配度→能耗”)需补充细节(专家建议明确“配船结构”包含“船舶吨位适配度”和“航线匹配度”2个子因子),修正后回路完整性达标。

3) 数学逻辑检验

对CO₂排放量计算式(1)进行逻辑拆解:

$$\text{CO}_2 \text{ 排放量} = \left[\frac{H}{h} \times E_d \times K_i \times K_s + T \times E_i \times (1 - K_{se}) \right] \quad (5)$$

式中: $\frac{H}{h} \times E_d \times K_i \times K_s$ 为船舶航行与停泊碳排放; $T \times E_i \times (1 - K_{se})$ 为港口装卸设备碳排放。公式覆盖运河航道碳排放的两大核心来源(苏州环保局数据, 两者占比超 95%), 各因子物理意义明确(如 K_{se} 为采用岸电影响因数, 反映岸电替代燃油的减排比例), 无数学逻辑矛盾。

4) 验证指标与方法

选取模型核心输出变量作为验证指标, 采用平均绝对百分比误差(MAPE)量化误差。

验证指标: 船舶 CO_2 排放量, t/a; 港口装卸设备 CO_2 排放量, t/a; 船舶能耗总量, 吨标准煤/a。

MAPE 计算公式:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{实际值}_i - \text{仿真值}_i}{\text{实际值}_i} \right| \times 100\% \quad (6)$$

表 5 模型历史行为验证数据对比(2019—2023 年)

Table 5 Data comparison for model validation against historical behavior(2019—2023)

年份	指标	实际值/t	仿真值/t	绝对误差	百分比误差/%
2019	船舶 CO_2 排放量	128 000	126 500	1 500	1.17
	装卸港口设备 CO_2 排放量	32 000	31 200	800	2.50
	船舶能耗总量	45 000	44 200	800	1.78
2020	船舶 CO_2 排放量	115 000	117 200	2 200	1.91
	港口装卸设备 CO_2 排放量	29 000	28 500	500	1.72
	船舶能耗总量	40 500	41 300	800	1.98
2021	船舶 CO_2 排放量	108 000	106 800	1 200	1.11
	港口装卸设备 CO_2 排放量	26 000	26 500	500	1.92
	船舶能耗总量	38 000	37 500	500	1.32
2022	船舶 CO_2 排放量	102 000	103 500	1 500	1.47
	港口装卸设备 CO_2 排放量	24 000	23 800	200	0.83
	船舶能耗总量	24 000	23 800	200	0.83
2023	船舶 CO_2 排放量	95 000	96 200	1 200	1.26
	港口装卸设备 CO_2 排放量	22 000	21 800	200	0.91
	船舶能耗总量	33 500	34 000	500	1.49

排放量: $\text{MAPE}=1.38\%$ (优秀); 港口装卸设备 CO_2 排放量: $\text{MAPE}=1.58\%$ (优秀); 船舶能耗总量: $\text{MAPE}=1.77\%$ (优秀)。

综上, 本模型在结构合理性、行为一致性、参数可靠性方面均达到系统动力学模型的验证标准, 可用于京杭运河苏州段及同类运河航道的船舶碳减排措施效果评估, 为政策制定提供科学可信的量化工具。

2 运河航道网船舶碳减排效果评估

2.1 船舶碳减排场景方案设计

通过系统动力学理论, 对运河航道网络碳排放控制模型进行了深入探讨, 重点考察了港口运营、航运工具、政策调控及市场机制 4 个子系统

式中: n 为需要验证的数据点数量; t 为第 t 个数据点; 实际值 _{t} 为第 t 个指标的真实测量值; 仿真值 _{t} 为第 t 个指标的模型计算结果。

误差判定标准: $\text{MAPE} < 10\%$ 为优秀, $10\% \leq \text{MAPE} < 20\%$ 为良好, $\text{MAPE} \geq 20\%$ 为不合格。2019—2023 年京杭运河苏州段的船舶进出港艘次、货运量、港口吞吐量、船舶能耗(燃油/LNG/电力消耗)等数据取自于《中国港口年鉴(2020—2024)》《苏州统计年鉴(2020—2024)》以及 2019—2023 年苏州段船舶 CO_2 排放量、港口设备碳排放强度取自苏州市环境保护局《年度生态环境状况公报》与江苏省海事局《船舶大气污染防治报告》。2019—2023 年苏州段实际数据与模型仿真数据如表 5 所示。

根据表 5 数据计算各指标的 MAPE , 船舶 CO_2

的相互作用机制。研究识别了影响航道网络碳排放的核心变量, 并明确了各子系统间的动态反馈机制, 进而建立了航道网络碳减排的系统动力学框架。在模型构建过程中, 综合运用了指平滑法、多元回归以及灰色系统理论等定量分析方法, 借助 SPSS 和 EViews 等统计分析工具, 完成了系统各要素间动力学方程的构建, 同时对模型参数进行了标定与验证。在此基础上, 运用情景规划方法设计了多种碳减排方案, 通过调整模型中的关键参数, 模拟了不同政策情景下的减排效果, 为航道网络碳减排策略的制定提供了科学依据。因此设置以下减排途径:

1) 技术减排。可通过优化船舶及港口设施的

能源使用效率来提升环保效益。具体实施路径涉及加大对可再生能源的整合力度、改进能源管理系统、优化运河船舶配船结构、采用岸电技术等。

2) 政策调整。通过增加环保资金补贴投入、落实补贴政策、完善碳减排政策以达到减排目的, 主要措施包括落实碳交易市场制度、合理优化碳税费用等。

3) 市场调节。通过合理提高或减少运河航道网水路运输各环节市场费用以达到刺激碳减排手段积极性, 如宏观调控运价、能源价格等。

2.1.1 技术减排情景设定

船舶结构调整浮动因数通常为船舶利用清洁能源比例以及合理调配船舶船型的比例。作为衡量港口运营效能的关键参数之一, 装卸作业效能直接反映港口的整体运营能力。在当今全球港口运输行业竞争日益加剧的背景下, 提升装卸作业效能不仅有助于增强港口的核心竞争力, 推动港口可持续发展, 同时也是实现港口绿色运营的重要途径。装卸作业效能的提升可以通过2种主要方式实现: 1) 运用先进技术对装卸工艺流程进行改进; 2) 对现有装卸机械设备进行技术升级。本文通过构建不同情景方案, 对装卸作业效能参数进行调整, 从而开展对比性研究分析。通过对比分析可知, 各技术手段的仿真曲线均有明显低于基准情形, 说明在实施相应的技术手段减排措施后, 均起到了一定的减排效果。但在港口能耗中存在实施减排效果低于基准情况, 当调整运河航道网能源消耗架构后, 导致其他能源价格浮动, 后期能耗转移回油耗, 因此在实际实施过程中应进行弹性调整。从以上仿真模拟可得, 岸电设施的广泛应用可显著减少船舶能源消耗, 然而其对港口能源使用模式的仿真结果影响有限。这一现象主要源于岸电系统在船舶与港口两大领域的碳排放占比相对较低, 同时现有模型尚未纳入岸电电力供应链上游的能源消耗与排放因素。技术减排仿真情景如表6所示。

表6 技术减排仿真情景设计

Table 6 Design of simulation scenarios for technological emission reduction

情景模式	情景设计	
	船舶结构调整浮动因数	装卸效率提升因数
A ₁	1.0	1.0
A ₂	1.2	1.0
A ₃	1.0	1.2

2.1.2 政策调整情景设定

在模拟分析中, 节能减排专项基金与政府环境治理投入被确立为财政激励体系的关键调控变量。各影响因子的基准值统一设定为1, 当数值调整为2时, 仅表明对政策执行力度进行了调节, 以此开展情景模拟研究, 仅为探究趋势设定取值。财政激励仿真情景如表7所示。

表7 财政激励仿真情景设计

Table 7 Design of simulation scenarios for financial incentives

情景模式	情景设计	
	节能减排专项资金因数	政府环保投资政策因数
B ₁	1.0	1.0
B ₂	1.0	1.2
B ₃	2.0	1.0

随着措施实施强度的提升, 在运河航道网的碳减排系统中, CO₂排放量呈现显著递减态势。随着时间推移, 其与现行政策下的污染水平差距持续扩大, 这表明强化财政激励措施能够有效拓展运河航道网碳减排的潜力空间。通过对比2种财政激励方案发现, 增加节能减排专项资金(如提升政府环保投资力度)的仿真结果表现出更大的曲线斜率, 这意味着其减排效果更为显著。这种差异主要源于节能减排专项资金对运河航道网相关项目具有更强的直接推动作用。实证研究表明, 具有针对性的财政政策往往能产生更为显著的激励效应。

2.1.3 市场调整情景设定

在碳排放交易市场的运行机制中, 政策调控因素主要体现为碳排放配额和碳排放交易价格这2个核心要素。碳排放配额作为市场总量控制的基础, 直接影响着企业的排放行为和市场供需关系; 而碳排放交易价格则通过市场机制反映排放权的稀缺程度, 对企业的减排决策产生重要影响。通过改变这2个关键参数的具体数值, 可以构建相应的数学模型, 对市场运行机制进行模拟仿真。市场机制仿真情景见表8, 得到的仿真模拟见图4。

表8 市场机制仿真情景设计

Table 8 Design of simulation scenarios for market mechanisms

情景模式	情景设计	
	碳排放配额比例	碳交易价格浮动因数
C ₁	1.0	1.0
C ₂	1.2	1.0
C ₃	1.0	2.0

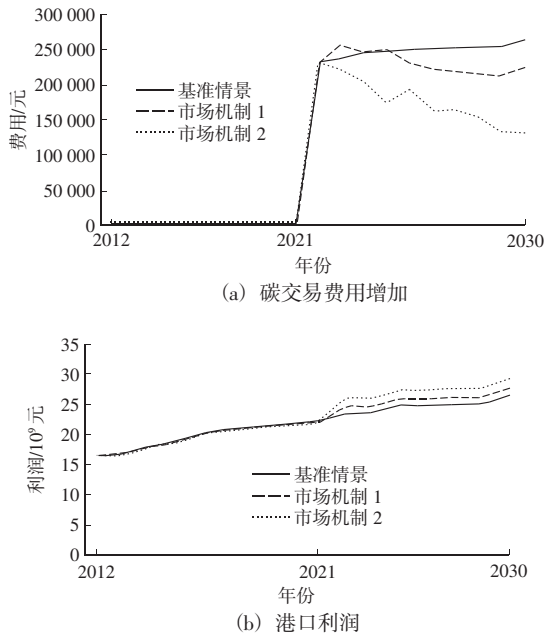


图4 市场机制措施仿真模拟

Fig. 4 Simulation of market mechanism measures

由图4可知,碳排放交易市场的引入对运河航道网的碳减排效果明显。由于选定场景为京杭运河江苏段,在选定时间段并未加入碳交易市场,故仿真2021年前,碳交易费用增加为0,于2021年后假定加入全国碳交易市场进行模拟仿真。在预设的减排情境下,碳排放配额的递减已成为不可逆转的走向。伴随着碳交易价格的攀升,企业承担的碳排放费用将显著增加,这种经济压力将驱动运河航道网络中的航运企业主动实施节能降耗措施。鉴于市场机制在某些年份的减排效能不及现行机制,本文在后续的复合仿真过程中已将其排除。通过仿真数据分析发现:碳交易由亏损转为盈利时,港口收益随之提升,这促使航运企业持续优化节能减排策略,形成正向循环效应;此外,随着碳排放配额的缩减,利润增速加快,而碳交易价格的波动对利润的影响则相对有限。

2.2 仿真结果分析

为比较不同减排措施取得的碳减排效果,将3种最优减排情景的调控要素作为输入变量,系统输出指标选取港口盈利水平、能源总消耗量及单位业务碳排放强度,通过对比分析方法进行评估。研究过程中,各减排方案的最佳组合效果被设定为关键输入参数,同时将经济收益、能耗总量及碳排放效率作为核心评价指标建立完整的分析体系。通过输入最优减排策略的调控因子,对港

口经济效益、能源使用总量和单位业务碳排放强度等输出变量开展系统性的对比研究,结果如图5所示。

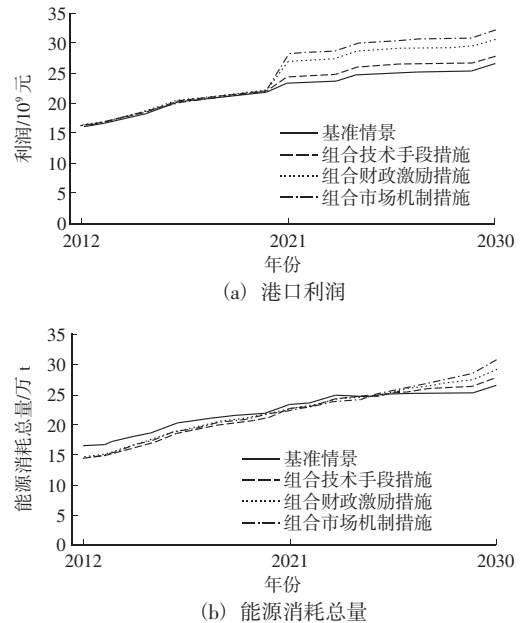


图5 组合措施仿真模拟

Fig. 5 Simulation of combined measures

仿真分析表明,在既定参数条件下,各类组合策略的实施效果均超越了现行政策框架,这一实证结果验证了3种调控方案在推动运河航道网络低碳化发展的同时,也确保了其经济收益的可持续性。研究数据证实,市场化机制对提升运河航道网络的碳减排效能具有显著优势。鉴于技术研发周期较长、成果转化存在时滞性,加之财政激励政策的约束效应相对有限,构建市场导向的减排机制将成为未来运河航道网络低碳转型的主导方向,这种机制不仅能够促进技术创新,还能提升技术应用的实效性,同时也能促进激励政策的有效实施。

2.3 船舶碳减排措施效果分析

基于本文构建的运河航道网碳减排系统动力学模型,并利用Vensim软件对不同碳减排组合措施进行分析,在将其设定参数带入模型后得到如图5所示的分析结果。

仿真结果显示,当技术手段、财政激励及市场机制3类措施组合应用时,整体碳排放量的下降幅度高达35%,比单一措施高出约30%。此外,组合措施还优化了运河航道网的经济效益,使港口平均装卸效率提高了20%以上,区域航运

整体利润增长了15%。此外,港口实施“油改电”政策后,港口设备碳排放下降幅度达到45%~50%,而港口装卸效率的提升则间接减少了运输过程中的碳排放量,降幅达15%。财政激励措施在中长期对碳减排的影响尤为显著。当节能减排专项资金增加1倍时,运河航道网的整体碳排放量可减少18%~22%。尤其是在财政投入的中后期阶段,减排效果随着资金规模的扩大而逐渐加速,显示出明显的积累效应。同时,提高政府环保投资比例也对企业低碳技术应用起到了推动作用。当环保投资比例提升至当前的150%时,区域内碳排放下降了12%,港口设备绿色化率提升了18%。然而,对比分析显示,专项资金投入的减排效果优于单纯提升政府环保投资比例,其带来的碳排放削减幅度高出近10%。市场机制在提升减排灵活性与可持续性方面发挥了重要作用。优化碳排放配额和调整碳交易价格是市场机制的关键调控手段。当碳交易价格提升至现有水平的2倍时,区域内碳排放量减少了25%以上,同时碳交易市场收益提高了40%。碳排放交易市场的灵活性与激励作用还体现在配额的合理分配上,这不仅使运河航道网的整体经济效率提升约12%,还促进了低碳技术的广泛应用。

根据仿真结果和上述分析可以发现,多样化的措施组合可以显著提高整体效率。组合的措施越多,其协同效应也越明显,从而更有效地推动环保目标的实现。这种综合治理策略不仅促进了环境质量的改善,也为相关行业的可持续发展提供了强有力的支持和保障。因此,政策制定者和行业实践者应当注重措施的整合与优化,以确保环境保护和经济发展的双赢。

3 结语

本文考虑各方影响,分别从宏观层面和微观层面分析了船舶和港口的碳减排系统,通过因果关系和反馈机制明确了不同子系统的因果关系图和系统流图,构建包含技术、政策和市场等多个方面的运河航道网船舶碳减排系统动力学模型,并通过技术创新、结构优化、政策调整开展情景仿真,评估技术手段、财政激励、市场机制3类措施对运河航道船舶碳减排的效果及单措施与组

合措施的协同作用,并以京杭运河苏州段数据验证模型。仿真结果显示,港口碳减排主要靠优化机械设备能耗,应加快机械“油改电”、提高岸电覆盖率可显著降碳,船舶速度优化影响较小;增加财政激励,尤其加大专项资金投入,比提高政府环保投资比例的中长期减排效果更显著。

参考文献:

- [1] 马骥,申彦. 基于系统动力学的上海港集疏运系统低碳政策仿真研究[J]. 物流科技, 2024, 47(1): 107-111.
Ma J, Shen Y. Simulation research on low-carbon policy for Shanghai Port collection and distribution system based on system dynamics[J]. Logistics Sci-Tech, 2024, 47(1): 107-111.
- [2] 姚海滨. 基于系统动力学的航空公司碳减排路径研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
Yao H B. System dynamics modeling and simulation analysis on carbon reduction pathways for airlines[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2023.
- [3] 黄静, 封学军, 陈汨梨, 等. 基于费效分析的港内集装箱拖车“油改气”减排效益评估[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(4): 19-24.
Huang J, Feng X J, Chen M L, et al. Emission reduction benefit evaluation of "oil-to-gas" container trailers in port based on cost-benefit analysis[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(4): 19-24.
- [4] 陈鹏. 港口工程运营期碳排放评价方法与案例分析[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(7): 97-102.
Chen P. Evaluation method and case study on carbon emission evaluation during the operation period of port engineering[J]. China Harbour Engineering, 2025, 45(7): 97-102.
- [5] 阮雷斌, 张海峰. 港口RTG绿色低碳改造技术研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(8): 16-20, 55.
Ruan L B, Zhang H F. Research and application of green and low-carbon transformation technology for port RTGs[J]. China Harbour Engineering, 2025, 45(8): 16-20, 55.
- [6] Yang L, Cai Y, Zhong X Z, et al. A carbon emission evaluation for an integrated logistics system: A case study of the Port of Shenzhen[J]. Sustainability, 2017, 9(3): 462.
- [7] Homsombat W, Yip T L, Yang H, et al. Regional cooperation and management of port pollution[J]. Maritime Policy and Management, 2013, 40(5): 451-466.
- [8] Cui H, Notteboom T. Modelling emission control taxes in port areas and port privatization levels in port competition and co-operation sub-games[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 56: 110-128.
- [9] Sheng D, Li Z C, Fu X, et al. Modeling the effects of unilateral and uniform emission regulations under shipping company and port competition[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2017, 101: 99-114.