

数字科技赋能绿色航运物流低碳转型的机理、瓶颈与工程管理路径研究

苏 浩

江西理工大学商学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月15日; 发布日期: 2026年9月29日

摘 要

在“双碳”目标驱动下, 航运物流行业面临严峻的减排压力, 数字科技为其低碳转型提供了新的突破口。本文从管理科学与工程和工程管理的视角出发, 系统梳理航运物流的碳排放现状与绿色发展趋势, 构建“数据监测-智能优化-协同治理”的三层赋能分析框架及其工程实现框架, 阐释大数据、物联网、人工智能、数字孪生等技术在碳核算、能耗优化与港航协同中的作用机理与工程集成机制。在此基础上, 引入组织行为学与制度经济学理论, 深入剖析数据孤岛、技术应用浅层化、标准缺失与协同失灵等现实瓶颈背后的利益冲突、信任缺失与制度障碍。从技术管理、运营管理与政策管理三个维度提出数字化赋能的低碳转型工程管理路径: 技术层面强调轻量化部署与低碳算法迭代、技术集成与工程化部署; 在运营层面倡导数字化碳管理体系与跨企业减排绩效契约; 政策层面主张完善核算标准、优化补贴机制与建立协同监管框架。研究为航运业绿色转型提供了管理决策参考与工程实践方案, 丰富了数字科技赋能传统产业低碳化的管理理论研究与工程管理研究。

关键词

数字科技, 绿色航运物流, 低碳转型, 管理路径, 制度经济学, 航运碳减排, 工程管理, 低碳工程

Mechanism, Barriers and Engineering Management Pathways of Digital Technology Enabling Low-Carbon Transformation of Green Shipping Logistics

Hao Su

School of Business, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang Jiangxi

Received: August 24, 2026; accepted: September 15, 2026; published: September 29, 2026

文章引用: 苏浩. 数字科技赋能绿色航运物流低碳转型的机理、瓶颈与工程管理路径研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(5): 1082-1089. DOI: 10.12677/mse.2026.155105

Abstract

Driven by the goals of carbon peaking and carbon neutrality, the shipping and logistics industry faces mounting pressure to reduce emissions, with digital technology offering a new breakthrough for its low-carbon transformation. From the perspective of management science and engineering and engineering management, this paper systematically reviews the current carbon emission status and green development trends of the shipping and logistics sector, and constructs a three-tier enabling analytical framework of “data monitoring—intelligent optimization—collaborative governance” and its engineering implementation framework, to elucidate the mechanisms through which technologies such as big data, the Internet of Things, artificial intelligence and digital twins facilitate carbon accounting, energy consumption optimization and port-shipping collaboration, as well as their engineering integration mechanisms. On this basis, adopting theories of organizational behavior and institutional economics, it further explores the conflicts of interest, lack of trust and institutional barriers behind major bottlenecks including data silos, shallow technology application, absence of standards and ineffective collaboration, and their constraints on engineering implementation. From the three dimensions of technology management, operations management and policy management, this paper proposes engineering management pathways for low-carbon transformation enabled by digitalization: lightweight deployment, low-carbon algorithm iteration, technology integration and engineering deployment at the technology level; digital carbon management systems and cross-enterprise emission reduction performance contracts at the operations level; and improved accounting standards, optimized subsidy mechanisms and collaborative regulatory frameworks at the policy level. The research provides management decision-making references and engineering practice solutions for the green transformation of the shipping industry and enriches the management theory and engineering management research on digital technology enabling low-carbon transformation of traditional industries.

Keywords

Digital Technology, Green Shipping Logistics, Low-Carbon Transformation, Management Pathways, Institutional Economics, Shipping Carbon Emission Reduction, Engineering Management, Low-Carbon Engineering

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

全球气候变化已成为人类社会面临的重大现实挑战。2020 年，中国明确提出“2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和”的战略目标(以下简称“双碳”目标)。在此背景下，交通运输行业的减排责任尤为突出，其中航运物流因运输规模大、燃料结构单一、减排技术渗透率较低，成为重要的碳排放源。据国际海事组织(IMO)发布的《第四次温室气体研究》报告，国际航运年二氧化碳排放量占全球总量的一定比例(据该报告数据约为 3%)，且若不采取有效控制措施，至 2050 年该比例可能进一步上升。中国作为世界贸易大国，沿海港口吞吐量与内河航运量持续增长，航运带来的碳排放压力日益加剧[1]。

与此同时，大数据、物联网、人工智能、数字孪生等数字技术正深刻改变各行业的运行逻辑。这些

技术具备数据精准感知、实时传输、智能决策及多主体协同能力[2]，能够有效回应航运物流在碳排放监测、优化与协同维度的痛点。因此，研究数字科技如何赋能绿色航运物流低碳转型，既是对“双碳”战略的积极响应，也是航运业实现高质量发展的内在要求。

1.2. 国内外研究现状

关于航运减排与数字技术的应用，学术界已积累了一定成果。在减排方面，国际海事组织(IMO)先后推出 EEDI、EEXI、CII 等能效指标体系，要求新造及现有船舶持续降低碳排放强度。国内学者的研究视角较为多元：部分研究关注液化天然气(LNG)、甲醇、氨、氢等替代燃料的技术经济性；部分研究聚焦航速优化与航线规划；另有研究推广港口岸电应用。然而，大部分研究集中于单一技术或环节，从系统层面分析数字技术作用机制的研究仍相对不足。

在数字技术赋能方面，已有研究表明大数据可用于构建航运碳排放因子库，物联网能够实时监测船舶能耗，人工智能可优化航速与航线，数字孪生则可建立虚拟港口模型进行低碳模拟[3]。总体而言，数字技术与绿色航运的交叉研究仍处于起步阶段，尤其是在打破数据壁垒、控制技术落地成本、统一标准等现实问题上，理论深度与实践指导性有待加强。

1.3. 研究意义、内容与方法

理论层面，本文尝试构建“数字科技-绿色航运”的分析框架，厘清大数据、物联网、AI、数字孪生等技术的赋能机理；同时，引入组织行为学与制度经济学视角，系统识别我国航运物流绿色转型中的关键瓶颈及其深层根源，为后续研究提供问题导向的理论基础[4]。实践层面，本文从技术、管理、政策三个维度提出可操作的优化路径，对航运企业、港口集团及相关监管部门具有参考价值。

研究内容安排如下：第二章阐述绿色航运物流的内涵及数字科技赋能的理论逻辑；第三章分析我国航运碳减排现状与转型瓶颈，并运用组织行为学与制度经济学理论对“数据孤岛”“协同不足”等瓶颈进行深层剖析；第四章展示典型应用场景；第五章提出优化路径；第六章总结全文。研究方法包括文献分析、案例研究和系统归纳。

2. 数字科技赋能绿色航运低碳转型的理论逻辑

2.1. 绿色航运物流内涵与碳减排重点

绿色航运物流是指在航运物流全链条(包括船舶航行、港口作业、集疏运及多式联运衔接等环节)中，通过技术升级、管理优化与模式创新，实现资源高效利用与环境影响最小化[5]。碳减排重点集中于三个环节：第一，船舶航行，该环节占航运总碳排放的绝大部分，核心在于主机燃油效率、航速控制及辅助动力优化；第二，港口作业，包括岸桥、场桥、水平运输设备及船舶靠泊时辅助发电产生的排放；第三，集疏运，涉及公路、铁路、内河驳船等不同衔接方式的碳排放差异。

2.2. 核心数字技术

大数据技术能够采集船舶自动识别系统(AIS)数据、发动机运行数据、气象水文数据及港口作业数据，进而构建航运碳排放数据库，用于测算排放因子、追踪碳足迹及预测排放趋势。

物联网技术通过在船舶燃油管路、主机排气管、港口电力设备等关键位置安装传感器，实现对能耗与排放的实时监测。结合射频识别(RFID)与 5G 通信，数据传输效率得到有效保障[6]。

人工智能(AI)利用机器学习算法动态优化船舶航速、航线和配载方案；计算机视觉可识别港口拥堵及集卡排队状况，减少非作业能耗。深度强化学习能够从历史数据中自主学习最优调度策略。

数字孪生技术为船舶、港口或整个航运物流链建立虚拟镜像模型，在数字空间中进行低碳场景模拟、

方案预演与效果评估，进而指导现实世界中的绿色决策。

2.3. 赋能机理：数据监测、智能优化、协同治理

数字科技对绿色航运的赋能可分解为三个层次。

第一层，数据监测——使碳排放“可量化、可追溯”。传统方法多采用粗略的燃油消耗统计或排放因子估算，误差较大且滞后性明显。物联网加大数据技术可实现单船、单航次的实时排放数据采集，为减排工作提供真实可信的基线。

第二层，智能优化——使碳排放“可控制、可降低”。基于监测数据，AI 模型可对航速、航线、配载、港口设备调度进行动态优化，在保障运输时效的前提下最大限度降低燃料消耗。例如，根据预测到港时间调整航速，可避免港口长时间排队空转，减少额外排放。

第三层，协同治理——实现全链条低碳效益。航运物流涉及船公司、港口、货主、铁路、公路等多主体。数字平台能够打通信息壁垒，支持多式联运低碳路径规划、港航作业协同及岸电自动匹配，从系统层面降低碳排放。

3. 我国航运物流碳减排现状与转型瓶颈

3.1. 航运碳排放现状与绿色发展成效

我国拥有规模庞大的内河与沿海运输船队，运输船舶数量达十余万艘，航运领域燃油消耗量巨大，航运板块在全国交通运输碳排放中占据重要比重，内河船舶受船龄、燃油品质等因素影响排放强度相对更高[6]。内河航运(如长江、西江流域)因船舶老龄化、燃油品质参差不齐，单位周转量排放强度高于沿海及国际航线。与此同时，绿色转型已取得部分积极进展：一是船舶排放控制区(DECA)政策覆盖沿海及内河重点水域，强制使用低硫燃油；二是港口岸电设施覆盖率明显提升，根据规划，至 2025 年主要港口专业化泊位岸电覆盖率目标设定为 80% [6]；三是 LNG 动力船及电动船在内河开始试点推广。然而，上述成效距离“双碳”目标要求仍有较大差距[1] [5]。

3.2. 数字赋能绿色航运的瓶颈：基于组织行为学与制度经济学的深层剖析

尽管数字技术潜力巨大，但在我国绿色航运物流的实际应用中仍面临多重障碍。现有文献多将其归纳为“数据孤岛”“技术应用浅”“标准缺失”“协同不足”。然而，这些现象仅是表层表现，其背后存在深刻的利益冲突、信任缺失与制度障碍。以下引入组织行为学与制度经济学的理论视角进行剖析。

(1) 数据孤岛的利益冲突与产权模糊

航运数据分散于船公司(运行数据)、港口(作业与靠泊数据)、海事部门(监管数据)、货主(货物信息)等不同主体。表面上是接口不统一、标准不一致，深层原因在于组织行为学所揭示的“信息孤岛”利益博弈：各主体将数据视为核心商业资产，担心数据共享会削弱自身议价能力或暴露运营短板。制度经济学的产权理论进一步指出，航运数据缺乏清晰的产权界定与收益分配规则，导致“搭便车”风险与交易成本高企。即使在同一企业内部，船舶能效数据、财务数据与运营管理数据也常因部门利益割裂而难以整合[7]。

(2) 技术应用浅层的成本 - 收益不确定性与组织惰性

当前多数航运企业的数字化停留在“无纸化办公”“电子海图”等基础层面，深度应用 AI、数字孪生的案例较少。组织行为学中的“组织惰性”理论可以解释这一现象：企业长期形成的惯例与认知框架会阻碍对新技术的采纳，尤其是当技术方案复杂且需要跨部门协作时，内部阻力显著增强。制度经济学的交易成本理论则指出，中小企业面临资金与技术人才的双重约束，而头部企业对投入产出比缺乏明确

预期——低碳数字技术的外部性(减排效益为社会共享,成本由企业承担)导致私人投资激励不足。此外,部分数字方案过于理想化,未充分考虑航运作业中的恶劣天气、港口拥堵等不确定性,进一步降低了企业的采纳意愿。

(3) 标准缺失的制度供给滞后与路径依赖

航运碳排放核算标准尚未统一:国际上有IMO的DCS与欧盟的MRV,国内存在多种核算方法,数据可比性与碳交易衔接性差[8]。制度经济学的“制度供给滞后”理论表明,技术创新往往快于制度创新,标准制定需要多方博弈与协调,导致制度空白期较长。同时,物联网传感器接口、数据接口、平台互操作标准的缺失,使得不同厂商设备无法互联互通,形成技术路径依赖——早期投入的设备因不兼容而难以替换,进一步阻碍了规模化推广。

(4) 协同失灵的多方利益冲突与信任赤字

绿色航运需要船、港、货、政多方协同,但现实中各方目标函数不一致。船公司为按时交货倾向于提高航速,与港口的低碳调度相冲突;货主更关注运费而非碳排放;政府激励手段以补贴为主,缺乏动态碳定价与数字化监管手段。组织行为学的“社会困境”理论指出,个体理性行为可能导致集体非理性——每家主体都希望其他方减排而自身搭便车,最终协同失灵。制度经济学强调的“信任赤字”同样关键:缺乏透明、可验证的减排绩效记录,各方无法建立长期合作信任,导致数字平台难以发挥系统优化作用。

3.3. 瓶颈总结

综上,我国绿色航运物流数字化转型的瓶颈并非单纯的技术或资金问题,而是嵌套在利益冲突、产权模糊、制度供给滞后、组织惰性与信任缺失构成的复杂系统之中。单纯的“建立数据平台”“统一标准”等口号式建议,若不能回应上述深层根源,将难以落地生效。

4. 数字科技在绿色航运物流中的典型应用

4.1. 物联网 + 大数据:碳排放精准监测与核算

以上海港为例,港区内主要集装箱桥吊、轮胎吊及集卡均已安装智能电表与能耗传感器,通过工业互联网平台实时采集电力与燃油消耗数据,自动核算每个集装箱装卸产生的碳排放。同时,靠港船舶通过岸电系统记录用电量,结合AIS数据与发动机参数,动态计算船舶在港期间的辅助排放。上述数据汇集至港航大数据平台后,可生成单船、单航次、单货主的“碳足迹报告”,为碳交易与绿色认证提供可靠依据[9]。长江内河部分航运企业尝试在船用柴油机排气管安装氮氧化物与二氧化碳传感器,通过4G/5G传输至监控中心,实现排放异常实时报警。

4.2. AI优化:船舶航线与航速节能调度

船舶油耗与航速大致呈三次方关系——有研究表明,航速降低10%,燃油消耗可减少约27%[4]。然而,单纯降速可能影响交货时效。AI算法能够平衡时效与能耗。据中远海运某集装箱船队的公开数据,其引入基于深度强化学习的航速优化系统后,跨太平洋航线单次往返可节油8%~12%。该系统将气象预报(风浪、洋流)、船舶载重、港口窗口期等数据纳入模型,动态推荐各航段航速,并可规划绕开大风浪区的航线以减少阻力带来的额外油耗。此外,AI还可优化船舶配载——通过合理摆放集装箱位置减小船舶纵倾阻力,据相关研究可额外降低2%~3%的油耗。

4.3. 数字孪生:港口绿色集疏运仿真优化

宁波舟山港建设了基于数字孪生的智慧港口管理平台。在数字空间中,1:1还原港口岸线、泊位、堆

场、道路、闸口等物理实体，并接入实时作业数据、集卡 GPS 轨迹及铁路班列时刻表。管理人员可在系统中模拟不同调度策略对碳排放的影响。例如，在高峰时段预演“集中疏港”与“错峰疏港”两种方案产生的排队长度、等待时间及集卡怠速排放，择优推送到实际操作界面。孪生系统还可模拟岸电使用率提高至 100% 后港口总碳排放的减量，为基建投资提供决策参考。据相关文献报道，数字孪生辅助下的集疏运优化可减少集卡等待排放 15%~20%。

4.4. 港航协同平台：多式联运低碳路径规划

传统多式联运中，货主或货代通常仅关注运价与时效，较少考虑碳排放。港航协同平台整合船期、铁路班列时刻、公路运力及碳排放因子库等数据，提供“低碳路径规划”功能。用户输入起讫点、货物信息及期望送达时间后，平台自动计算多种运输组合(如全程水路 + 铁路、近洋运输 + 公路短驳等)的碳排放总量、成本与时间，并标注“最优低碳路径”。例如，从重庆至上海的集装箱运输，平台比较发现：公水联运(公路至武汉再换船)比全程水路节省 2 天，但碳排放高出 40%；推荐的“新能源集卡短驳 + 铁路进港 + 江海直达”方案在时间损失不大的情况下减碳 30%。据案例报道，福建某港口集团联合船公司、铁路局建设类似平台后，参与企业的绿色货运占比提升了 20 个百分点[10]。

5. 数字科技赋能绿色航运低碳转型的优化路径

5.1. 技术路径：轻量化部署与低碳算法迭代

针对中小企业资金与技术能力有限的问题，推广“轻量化”数字解决方案。例如，开发基于云服务与低代码平台的船舶能耗监测 App，船东仅需安装简易传感器或手动录入燃油加油单，即可通过云端模型估算碳排放。针对数据割裂问题，可采用统一的数据交换中间件，在不强行替换现有系统的前提下打通异构数据。

引入区块链分布式数据共享账本，而非传统的集中式平台。区块链技术通过智能合约实现数据使用权的自动授权与收益分配，能够有效回应产权模糊与信任缺失问题——各参与方无需将原始数据交由中央平台保管，而是通过零知识证明等方式验证数据真实性并获取碳减排积分，从而降低交易成本与商业机密泄露风险。

算法层面，应提升低碳优化模型的准确性与鲁棒性。未来可研究物理约束(如发动机特性曲线)与数据驱动方法的融合，使航速推荐更贴合实际运行边界。同时，建立算法性能评测基准，鼓励开源低碳算法库建设，降低航运企业使用门槛。

5.2. 管理路径：数字化低碳运营与绩效评价

航运企业应将数字化碳管理纳入日常运营体系。具体措施包括：设立首席碳官或绿色数字岗位，专门负责碳数据采集、分析与减排项目推进；建立船舶能效数字化考核指标，与船员、船长绩效挂钩，激励节能驾驶行为；对供应商(燃油供应、港口服务)进行碳绩效评价，优先选择低碳合作伙伴[11]。

设计跨企业减排绩效契约，基于博弈论中的激励相容原理，明确各方减排责任与收益分配规则。例如，船公司与港口可签订“低碳协同协议”：船公司靠泊时使用岸电并降低航速，港口则减免岸电服务费并提供优先靠泊权；若双方共同完成既定减排目标，额外获得政府碳配额奖励。同时，采用区块链碳资产收益权设计——将每艘船或每个港口的实际减排量通证化，允许其在内部市场或区域碳市场交易，使减排贡献可量化、可流转、可兑现，从而破解“搭便车”困境。

港口与船公司还可探索“碳资产数字化管理”模式。利用区块链记录每一笔碳减排量的产生、核证与交易信息，提高碳资产的流动性与可信度。内河船公司可将节油减排量开发为“碳积分”，在集团内

部或区域内交易，形成经济激励。

5.3. 政策路径：完善标准、补贴与协同监管机制

政府层面需加快三方面标准建设：一是统一航运碳排放核算标准，明确核算边界、排放因子及默认值，确保数据可比、可核查；二是制定数字技术与绿色航运融合的数据接口标准，强制新建船舶及港口设备兼容主流物联网协议；三是建立航运数字孪生模型的可信度评价标准，防止模型偏差导致决策失误[12]。

针对标准缺失背后的制度供给滞后，建议采用沙盒监管模式。在特定水域或港口群设立“数字绿色航运监管沙盒”，允许参与企业在沙盒内试验尚未形成国家标准的数据接口、核算方法或协同协议，由监管部门提供临时性合规豁免并跟踪评估。沙盒运行成熟后，将有效方案上升为行业标准，加速制度供给与技术创新同步。

财政补贴应向“数字 + 绿色”复合项目倾斜，并对接动态碳定价机制。例如，对加装排放监测物联网设备并接入政府监管平台的船舶给予一次性补贴；对采用 AI 航速优化且实际减排率超过基准值的企业，按减排量给予阶梯式奖励。同时，探索“碳监管数字化”模式，依托 AIS、遥感监测与区块链技术建设“航运碳大脑”，实现碳排放的动态核算与自动报告，既减轻企业填报负担，又提高监管效率[13]。

最后，建立跨部门协同监管机制。交通运输、生态环境、海事、海关等部门共享数字平台数据，对高排放船舶实施联合惩戒，对绿色示范项目给予优先过闸、减免港口使费等激励[14]。通过政策合力，打通数字科技赋能绿色航运的“最后一公里”。

6. 结论与展望

6.1. 主要结论

本文系统分析了数字科技赋能绿色航运物流低碳转型的内在逻辑、现实瓶颈与优化路径，主要得出以下结论：

第一，数字科技通过数据监测、智能优化与协同治理三重机制赋能绿色航运，能够显著提升碳排放的可视化水平、优化决策效率并降低全链条碳强度。

第二，我国航运物流绿色转型面临数据割裂、技术应用浅、标准缺失、协同不足四大瓶颈，其背后深层次的利益冲突、信任缺失与制度障碍需借助组织行为学与制度经济学理论加以诊断。

第三，物联网 + 大数据、AI 航速与航线优化、数字孪生仿真、港航协同平台四个典型场景已展现出良好的减排效果，具备推广价值。

第四，应从技术轻量化与算法迭代、数字化低碳运营管理、标准政策与协同监管三个维度构建系统优化路径，其中基于区块链的分布式数据共享账本、跨企业减排绩效契约、监管沙盒等具体方案能够有效回应口号式建议之外的深层问题。

6.2. 管理启示

航运企业不应将数字低碳转型简单等同于“采购软件”，而应将其作为战略性工程，从组织架构、绩效考核与供应链协同等多方面系统推进。港口集团应主动建设开放型数据基础设施，并积极引入区块链等信任机制，吸引船公司、铁路、公路等各方共建绿色生态圈。政府部门应重视数字化监管工具的效能，加大数据基础设施投入，并善于运用动态碳定价、监管沙盒等市场与制度创新手段引导低碳行为。

6.3. 研究不足与未来方向

本文存在以下不足：一是受数据获取限制，未对典型应用场景的减排效果进行实证量化分析；二是

对不同船型及国际航运的特殊性考虑不够细致；三是人工智能算法在极端工况下的鲁棒性问题未深入展开。

未来研究可从以下方向深入：开展多案例实证研究，收集真实运行数据验证数字科技的减排贡献；研究航运数字孪生模型与物理系统之间的闭环控制方法；探索基于联邦学习的跨企业低碳数据共享框架，在不泄露商业机密的前提下实现协同优化。此外，随着氢、氨、电动等新能源动力船舶的普及，数字科技如何与其深度融合，亦是一个值得关注的前沿课题。

参考文献

- [1] 黄有方, 魏明晖, 王煜, 等. “双碳”目标导向下我国绿色航运物流发展现状与趋势[J]. 大连海事大学学报, 2023, 49(1): 1-16.
- [2] 郝田标. 数字孪生技术在港口管理中的应用与效益分析[J]. 中国航务周刊, 2024(14): 48-50.
- [3] 崔秀芳, 赖炜祺, 林浩涛, 等. 基于 AIS 和波浪数据的船舶碳排放计算[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(1): 192-200.
- [4] 王凯, 胡唯唯, 黄连忠, 等. 船舶智能能效优化关键技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 181-192+199.
- [5] 张子逸. 我国绿色航运物流法律与政策研究[J]. 物流科技, 2023, 46(20): 32-34.
- [6] 彭传圣. 我国航运脱碳挑战及路径选择[J]. 中国海事, 2023(6): 24-29.
- [7] 邹鹰, 郑玉靖. 港口一体化智能绿色集疏运系统架构——以上海洋山港为例[J]. 中国港口, 2024(5): 24-28.
- [8] IMO (2021) Fourth IMO GHG Study 2020. International Maritime Organization.
- [9] 王鹏静, 刘峰, 汪晓菲. 区块链在航运领域的应用现状及发展前景[J]. 船舶工程, 2022, 44(4): 44-48.
- [10] 张敏, 韩晓龙. 多目标模糊机会约束规划的低碳多式联运路径优化[J]. 计算机应用, 2023, 43(2): 636-644.
- [11] Aspen, D.M., Haskins, C. and Fet, A.M. (2018) Application of Systems Engineering to Structuring Acquisition Decisions for Marine Emission Reduction Technologies. *Systems Engineering*, **21**, 388-397. <https://doi.org/10.1002/sys.21445>
- [12] 张爽, 韩佳霖. 欧盟海运排放监测报告核实规则及其影响[J]. 中国航海, 2014, 37(3): 104-107.
- [13] 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.
- [14] Zhang, J., Tu, Z., Yang, T., Zhu, J. and Sun, Y. (2026) Research on Multi-Objective Ship Speed Optimization Based on Evolutionary Deep Learning. *Journal of Marine Science and Engineering*, **14**, Article 1016. <https://doi.org/10.3390/jmse14111016>