



基于时空数据场论的港口碳排放足迹研究^{*}

杜永腾¹, 梁 涛¹, 薛嘉辰¹, 国新毅¹, 赵吉祥¹, 钱 竞², 张建文², 李 佳²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 针对传统核算方法难以全面反映港口碳排放空间分布特征与动态演化趋势的问题, 开展了基于时空数据场论的港口碳排放足迹研究。以中国北方某大型港口为研究对象, 引入时空数据场理论框架, 构建港口碳排放势场模型, 整合港口不同区域在时间与空间维度上的碳排放数据, 采用势值叠加与时空距离转化等方法, 实现碳排放强度的时空映射、趋势预测与减排效益评估。结果表明, 港口碳排放具有显著的空间不均衡性与时间持续性特征。其中生产区碳排放占比达 40%~45%, 年增长率为 2.64%; 码头区排放与靠泊密度密切相关, 岸电系统普及后碳排放强度下降 10%~15%。通过模型预测与实际对比验证, 在实施差异化减排措施的情况下, 港口碳排放年增长率由 4.28% 降低至 2.15%, 年减排潜力达 447 t。该模型可为复杂系统的碳排放动态监测与预测分析提供理论支持, 对推动港口行业低碳转型、构建绿色智慧港口具有重要现实意义。

关键词: 港口; 碳排放; 时空数据场论

中图分类号: U651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0046-08

Port carbon emission footprint based on spatiotemporal data field theory

DU Yongteng¹, LIANG Tao¹, XUE Jiachen¹, GUO Xinyi¹, ZHAO Jixiang¹, QIAN Jing², ZHANG Jianwen², LI Jia²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the limitations of traditional accounting methods in fully reflecting the spatial distribution and dynamic evolution of port carbon emissions, this study conducts a carbon emission footprint analysis based on spatiotemporal data field theory. Taking a large port in northern China as the research object, a theoretical framework of spatiotemporal data fields is introduced to construct a port carbon emission potential field model. By integrating emission data from different port areas across spatial and temporal dimensions, and applying methods such as potential value superposition and spatiotemporal distance transformation, spatiotemporal mapping, trend forecasting, and emission reduction evaluation can be achieved. The results show that port carbon emissions exhibit significant spatial heterogeneity and temporal persistence. Specifically, the production area accounts for 40%~45% of emissions, with an annual growth rate of 2.64%. Emissions in the dock area are closely related to berthing density and decreased by 10%~15% after the widespread adoption of shore power systems. Through the comparison of model prediction and actual data, it is verified that under differentiated emission reduction measures, the annual growth rate of port emissions dropped from 4.28% to 2.15%, with an annual reduction potential of 447 t. The model can provide theoretical support for dynamic monitoring and predictive analysis of carbon emissions in complex systems, and can contribute to the low-carbon transformation of the port industry and the construction of green and smart ports.

Keywords: port; carbon emission; spatiotemporal data field theory

随着全球气候变化问题的日益严峻, 减少温室气体排放已成为国际社会的共同目标。作为国

际物流的重要枢纽, 港口行业是全球供应链和贸易的核心, 但也是能源消耗和碳排放的重要来源

收稿日期: 2025-04-01 录用日期: 2025-07-02

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52277193)

作者简介: 杜永腾(1991—), 男, 硕士, 工程师, 经济师, 研究方向为综合智慧能源、电碳耦合及低碳技术。

之一^[1-3]。对港口行业碳排放进行系统分析和管理有助于实现港口行业可持续发展。

目前, 港口碳排放核算方法包括排放因子法^[4]、全生命周期核算法^[5]、质量平衡法^[6]、实测法等。彭传圣^[7]以新加坡某港口为例, 介绍了新加坡对于港口碳排放的核算办法; 贾远明等^[8]采用排放因子法与全生命周期法对港口企业进行碳排放核算, 分析了采用全生命周期对于港口碳核算的问题; 陈伟杰等^[9]介绍了港口碳核算数据来源的获取办法; 张向阳等^[10]介绍了一种港口碳排放核算模型的建立办法, 对港口碳排放进行预测。已有研究大多依据收集的数据得出结论, 无法直观体现出港口的碳排放特征, 因此亟需一种新的可将港口碳排放直观呈现的方法, 以更好地对港口碳排放进行分析。

时空数据场论是一种研究时空数据动态变化和空间分布特征的理论框架, 它通过构建时空数据场、整合时间和空间信息, 分析不同变量在时空维度上的关系, 通常涉及多维数据分析、地理信息系统和统计建模等技术, 能够有效处理复杂的时空数据集^[11]。本文引入以时空数据场论为基础的港口碳排放分析模型, 针对港口碳排放进行时间和空间的直观映射。在港口碳排放分析中, 引入时空数据场论可以实现: 1) 识别碳排放的空间分布特征, 揭示港口内不同地点碳排放的差异性, 为制定不同地点减排策略提供依据; 2) 监测碳排放在时间维度上的变化趋势, 识别高排放时段, 有助于及时采取减排措施; 3) 评估不同方案对碳排放的影响, 分析决策实施前后的变化, 为减碳策略调整提供参考; 4) 对碳排放趋势进行预测, 为制定长远的减排计划提供理论依据。综上所述, 以时空数据场论为基础的港口碳排放分析模型具有时间与空间分析、动态监测、决策评估、排放预测等优势, 可为分析港口碳排放提供有力支持。

1 工程概况

中国北方某港口共分 4 个港区, 从北到南分别为综合、散货、煤炭、河口港区, 见图 1。规划岸线长度 71.4 km, 陆域面积 8 123 hm², 可布置泊位数量 125 个, 其中万吨级以上泊位 104 个。

2023 年, 该港口完成货物吞吐量 3.3 亿 t, 同比增长 4.99%, 连续 4 a 突破 3 亿 t。2025 年, 该港口预计吞吐量将突破 3.5 亿 t, 集装箱吞吐量达到 200 万 TEU。



图 1 港口平面
Fig. 1 Layout of the port

2 研究方法

2.1 碳足迹核算方法

在进行碳核算时, 仅对港口运营期的碳排放进行核算^[12], 分为直接排放、间接排放和其他相关排放 3 个范围。

1) 范围 1(直接排放)。通过统计港口各类燃料燃烧产生的二氧化碳获得。计算公式为:

$$C_1 = \sum C_i F_i \quad (1)$$

式中: C_i 为各直接排放源运行时燃料消耗量, t; F_i 为各燃料燃烧对应的排放因子, kg/t。

2) 范围 2(间接排放)。主要包括港口企业外购电力、热力或蒸汽产生的碳排放。通过统计港口用电量和外购热力获得。计算公式为:

$$C_2 = DF + \sum C_j F_j \quad (2)$$

式中: D 为外购电力使用量, kW·h; F 为外购电力的排放因子, kg/(kW·h); C_j 为其余外购能源使用量; F_j 为其余外购能源排放对应的排放因子, kg/t。

3) 范围 3(其他相关排放)。港口运营产生的其他间接排放, 包括员工通勤、港口废弃物处理、港口企业利用光伏风能等可再生能源发电供内部使用或向电网售电(减排)。计算公式为:

$$C_3 = \sum C_k F_k + C_1 F_1 + C_{i,3} \quad (3)$$

式中: C_k 为每种出行方式数量; F_k 为对应的碳排放因子; C_1 为港口废弃物量; F_1 为对应排放因子; $C_{i,3}$ 为其他非直接和间接的碳排放。

2.2 基本原理

2.2.1 数据场论基本原理

数据场论是一种研究多个数据点在空间维度上作用的理论框架。

对于 1 个处在 P 维空间中含 n 个对象的数据集 M , $M = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 每个对象对应的势值可用下式计算:

$$\varphi_y(x) = m_x \exp \left[-\frac{\|x-y\|^k}{\sigma} \right] \quad (4)$$

式中: $\varphi_y(x)$ 为数据对象 y 受其邻域任意一个数据对象 x_i 之间的相互作用形成的势值; $\|x-y\|$ 为 x 与 y 之间的范数距离; σ 为场源强度的影响因子; m_x 为数据对象 x_i 的质量; k 为距离指数。

对于处在该 P 维空间的任一对象 y , 其势值也收到该空间内其余所有对象的辐射影响, 可用下式计算:

$$\varphi_y = \sum_{i=1}^n \varphi_y(x_i) \quad (5)$$

式中: φ_y 为 P 维空间内任意一点受到其余对象影响的势值; $\varphi_y(x_i)$ 为任一对象 x_i 的势值。

2.2.2 时空数据场论基本原理

基于数据场论的基础, 将模型的影响进一步扩展到时间上。在普通的平面空间中, 任意点的势值由数据对象中心 α 和 β 在各自位置产生的辐射效应叠加而成; 而在时空数据场中, 引入了时间维度, 任意点的势值不仅收到平面空间中数据点的影响, 还受到来自不同时空下数据点的影响, 见图 2。

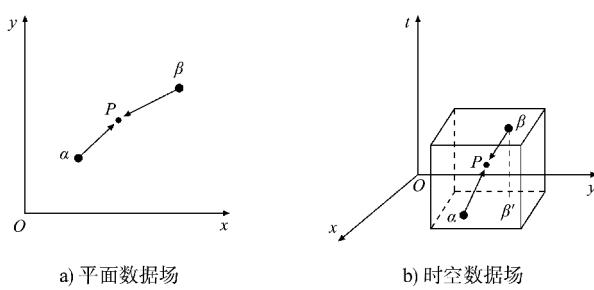


图 2 平面数据场与时空数据场邻域

Fig. 2 Neighborhood of plane data field and spatiotemporal data field

为体现不同时空中数据点对外辐射产生的影响, 可以人为划分时空区间, 规定标准时空平面, 对于时空中的每个数据点均可计算出其对标准平面空间中任意点位势能的影响。由此引入时空距离的概念来衡量非标准平面对应的时间点对标准平面中任意点位势值的影响, 时空数据场中两点之间的时空距离为^[13]:

$$\text{Dist}(\alpha, \beta) = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + (c \Delta t)^2} \quad (6)$$

式中: c 为时间和空间维度的转换系数, 可以根据不同时间点对标准时空平面的影响动态变化, 其取值见表 1^[14]; Δx 、 Δy 为空间中的位置差; Δt 为时间间隔。

表 1 不同时间间隔与数据强度下 c 的参考值

Tab. 1 Reference value of c under different time interval and data intensity

排放强度/t	c			
	$\Delta t = 15$ d	$\Delta t = 30$ d	$\Delta t = 90$ d	$\Delta t = 1$ a
0~50	0.087	0.143	0.236	0.452
50~100	0.194	0.259	0.348	0.579
100~150	0.312	0.387	0.476	0.683
150~200	0.438	0.469	0.589	0.742
200~250	0.521	0.553	0.647	0.816
250~300	0.628	0.679	0.782	0.923

2.2.3 时空数据无量纲化处理

在进行时间和空间维度的计算时, 由于时间和空间的量纲并不一致, 因此需要将两者数据进行无量纲化处理, 以解决不同数据之间的可比性问题。在此引入时空转化参数, 以实现时空数据场中不同时间和空间维度下的势值转换^[15]。

$$\varphi_Q(N) = \frac{\sum_{i=1}^n m_N \cdot \exp \left[-\frac{\|Q-N\|^k}{\sigma} \right]}{\Delta t'_{QN}} \quad (7)$$

$$\Delta t'_{QN} = \frac{\Delta t_{QN} - \Delta t_{\min}}{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}} \quad (8)$$

式中: $\varphi_Q(N)$ 为空间点 N 对 Q 的势值影响作用力; m_N 为空间点 N 的碳排放值; $\Delta t'_{QN}$ 为空间点 N 和 Q 的时空转化参数; Δt_{QN} 为空间点 N 和 Q 的时间差数值; Δt_{\min} 为时空数据集合中任意 2 个空间点的时间差最小值; Δt_{\max} 为时空数据集合中任意 2 个空间点的时间差最大值。

2.3 港口碳排放时空数据场论模型建立

在港口碳排放势场的模型构建中, 空间点的质量在碳排放势场中即为排放源在特定时间点的碳排放强度。通过监测港口碳排放源的各项数据(燃料排放、电力、外购电力、员工通勤数据、废弃物处理数据、光伏数据), 采用碳足迹核算方法可以计算出每个数据点在不同时间段的碳排放强度, 由此即可绘制港口碳排放的时空数据模型。根据港口方面需求, 本文研究频次以年为单位。对港口各区域计算出的碳排放量进行建模计算, 得到各年份下港口碳排放强度的时空数据场, 以 2015 年为例, 港口碳排放时空数据场见图 3。

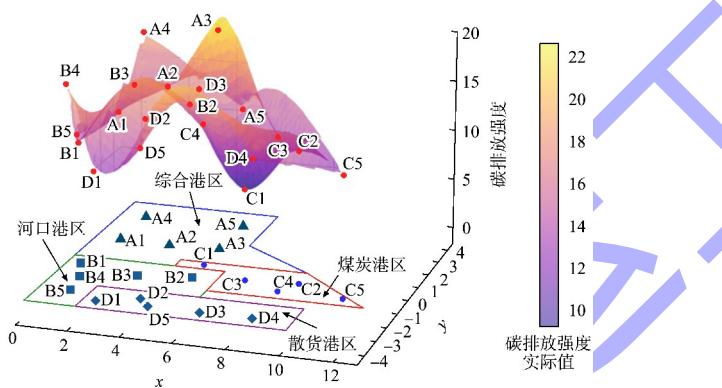


图 3 2015 年港口碳排放时空数据场

Fig. 3 Spatial and temporal data field of port carbon emissions in 2015

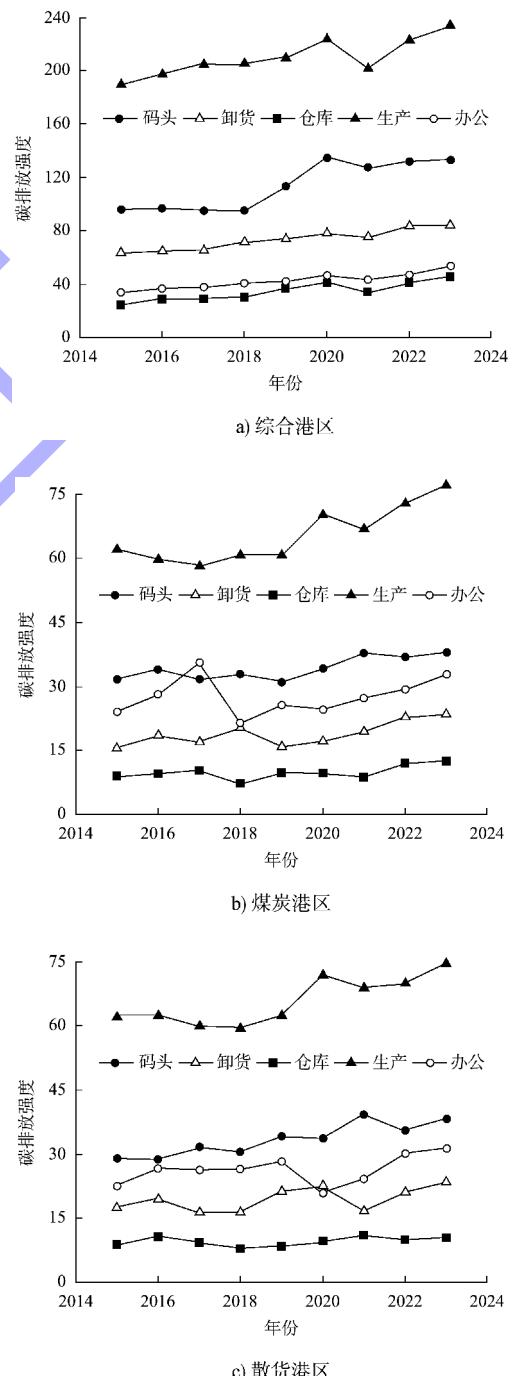
3 数据分析

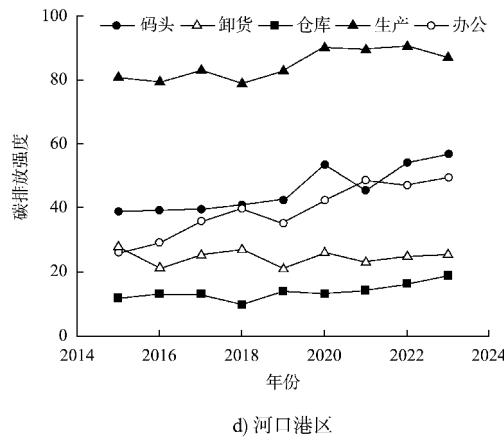
3.1 基于港口时空数据场论的数据分析

3.1.1 碳排放强度的空间、时间分布特征

根据时空数据场模拟结果, 不同港区的碳排放强度呈现出明显的空间差异。区域①综合港区, 作为港口的核心区域, 集中了大部分装卸和仓储活动, 碳排放强度较高; 区域②河口港区, 该区域主要用于港口扩展和停泊, 碳排放强度最低, 且逐年下降; 区域③煤炭港区, 该区域的碳排放强度在港口中位居第二; 区域④散货港区, 该区域碳排放强度整体较低, 但在特定年份(如 2021 年)因某些原因出现短期高排放现象。

港口各区域排放点排放强度变化见图 4。在时间维度上, 2015—2023 年的港口碳排放数据具有两大趋势。总体趋势: 港口整体碳排放量呈现缓慢增长趋势, 年均增长率约为 2.5%, 这一趋势与港口吞吐量增长以及新区域的开发密切相关。特定年份波动: 2020 年由于疫情影响, 港口运营规模下降, 碳排放量短暂降低; 2021 年后随着经济恢复, 碳排放量反弹逐年递增。





d) 河口港区

图 4 港口各区域排放点排放强度变化

Fig. 4 Changes in emission intensity of emission points in various regions of the port

3.1.2 碳排放时空预测

基于每个时间每个空间势值点的碳排放, 对未来时空数据场内的势值点的碳排放强度进行预测, 在此引入时空场预测公式^[16]。

$$\varphi(x, y, t) =$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{(\|(x, y) - (x_i, y_i)\|^2 + c^2(t - t_i)^2)^k} \quad (9)$$

式中: (x_i, y_i, t_i) 为港口内碳排放源的历史位置和时间坐标; m_i 为某位置的碳排放强度(质量); k 为距离指数, 控制碳排放衰减的速度, 在碳排放强度的时空数据场中, 一般取 $k=0.5$ 。

根据已有的时空数据场时空数值, 可以对未来若干年的时空数据进行预测。以预测 2023 年该港口的碳排放强度为例, 将 2015—2022 年该港口的碳排放时空数值 (x_i, y_i, t_i) 代入, 可建立 2023 年港口碳排放模拟时空数据场。将 2023 年该港口时空碳排放预测模型与实际模型相比较, 见图 5。

对每个港区进行分析可知, 该港口 2023 年采取了一系列措施, 因此实际的碳排放时空模型与预计的有所区别。主要区域预测值与实际值的对比见图 6。

基于时空场预测公式(3)对每个港区每个碳排放点位的排放实际值与预测值进行分析。

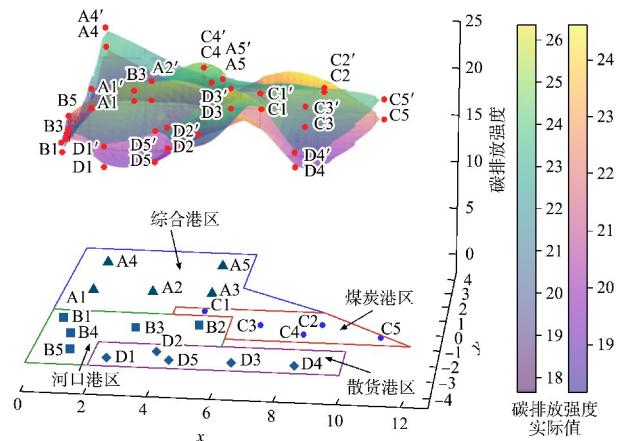


图 5 2023 年港口碳排放时空数据场预测值与实际值对比

Fig. 5 Spatial and temporal data field prediction and actual value of port carbon emissions in 2023

1) 综合港区是港口内碳排放的主要来源, 碳排放强度预计保持高位, 并呈现逐年增长的趋势。其中, 办公区碳排放占综合港区总排放量的 10%~12%, 由于绿色建筑节能改造的推进, 与预测模型相比, 电力消耗减少 5%~8%; 码头区碳排放占比为 20%, 由于岸电普及率的提升, 船舶直接排放强度与预测模型相比下降 10%~15%; 仓库区碳排放占比约为 15%, 因节能设备改造, 与预测模型相比碳排放下降约 5%; 生产区占比约 40%, 因新能源设备的推广, 碳排放强度有所下降; 卸货区占比约为 10%, 由于叉车电动化进程, 与预测模型相比下降约 8%~10%。

2) 河口港区功能较为单一, 主要用于停泊和储备, 是碳排放最低的区域, 因此该区域各碳排放势值点几乎符合模型预测值。

3) 煤炭港区以煤炭运输和储存为主, 碳排放强度较高, 近年来由于政策要求, 碳排放有所下降。其中, 办公区碳排放来源较少, 主要是办公楼的电力消耗和通勤, 占煤炭港区总排放的 5%左右, 因绿色办公技术推进, 排放强度较预计减少 10%; 码头区碳排放集中在煤炭装卸设备和停泊船舶的燃油消耗, 碳排放占比在 50%左右, 随着岸电技术的进一步应用和港区自动化改造, 预计排放强度下降 15%~20%; 仓库区碳排放主要来源于

输煤设备的运行, 占比约 20%, 得益于设备优化, 碳排放比预计下降约 10%; 生产区活动较少, 碳排放占比不足 10%, 趋势基本稳定; 卸货区煤炭的卸货作业涉及大量高能耗设备, 碳排放占比 15%, 随着设备电气化, 碳排放下降幅度在 10%~12%。

4) 散货港区以大宗商品运输为主, 碳排放强度在港口中相对适中, 但受货物吞吐量波动影响较大。其中, 办公区碳排放主要来自办公楼耗能, 排放占比较小, 为 5%~8%, 2023 年因办公楼节能改造, 碳排放强度比预计下降 8%~10%; 码头作业是散货港区排放的主要来源, 包括装卸设备和靠泊船舶的排放, 占比约 45%, 因电动化设备推广, 碳排放强度逐年比预计下降 5%~8%; 仓库区主要能耗来源于温控系统和物流设备, 碳排放占比约 20%, 因节能设备引入, 碳排放比预计下降 10%; 生产区排放源主要为辅助设施的能源消耗, 与预测值相当; 卸货区碳排放主要受卸货设备的效率影响, 碳排放占比约 15%, 符合预测值。

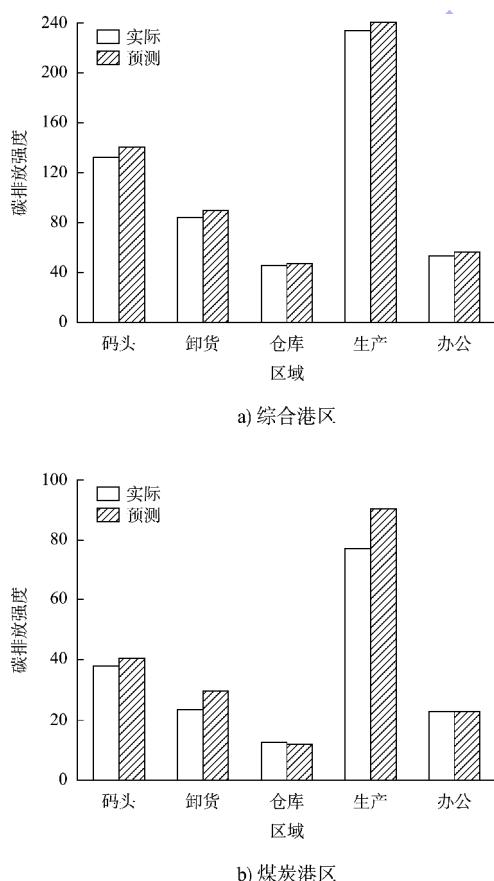


图 6 主要区域实际值与预测值对比

Fig. 6 Actual and predicted values

3.2 碳减排建议与潜力分析

通过对港口碳排放时空数据场的构建与模拟分析, 可以识别不同港区、不同功能区域的碳排放强度及其变化趋势, 为制定差异化的碳减排策略提供数据支撑和空间定位依据。

根据港口 2015—2023 年碳排放时空数据场的分布特征及 2023 年预测与实际对比结果, 港口各功能区碳排放具有显著的空间不均衡性。结合不同时空下的势值强度变化, 得出减排重点与路径。

1) 生产区减排潜力最大, 重在结构优化与设备更新。生产区在整体港口碳排放中占比高达 40%~45%, 是港口碳排放的核心区域。时空数据场模拟结果表明, 其碳排放具有空间集中、时间持续的特征。建议继续推进高能耗设备的电气化替代和新能源引入, 优化生产作业结构。同时, 通过能源管理系统监测高峰时段运行负荷, 动态

调节能耗水平, 预估碳减排潜力可达 256 t/a。

2) 码头区减排依靠岸电普及与船舶作业管理, 码头区碳排放强度呈现出与靠泊频次及作业密度强相关的时空特征。在时空数据场中, 该区域在货运高峰时段形成碳排放高势能点。建议加快推进岸电系统全覆盖, 严格限制靠泊船舶使用辅助动力。引导船舶选择在低排放时段作业, 可有效降低碳排放年增长率至 2.5%, 年碳减排潜力约为 96 t。

3) 卸货区可通过改造驱动设备降低能耗。卸货区设备运行周期集中、负荷大, 其碳排放在短时间内集中爆发, 形成时间集中型高势场。根据数据场变化趋势, 针对卸货设备开展智能化与电动化改造, 尤其提升卸载效率和降低空转率, 可将碳排放年增长率控制在 3.0%, 实现年碳减排 75 t。

4) 仓库区优化温控系统与作业流程为关键。仓库区碳排放受制冷、通风等设施持续运行影响, 在数据场中表现为“低空间扩散、高时间持续”的特性。建议采用智能温控系统, 优化能源使用结构, 提升建筑节能标准, 叠加物流调度优化, 可将年增长率从 5.82% 降至 3.00%, 年减排潜力达 66 t。

5) 办公生活区应推进绿色办公和通勤优化。尽管办公区碳排放占比仅为 6%~8%, 但其排放时间稳定, 是典型的周期性势值点, 可通过推进 LED 照明替换、光伏发电应用和绿色交通方式, 进一步优化碳排放结构。预计每年可减排约 20 t。

综上所述, 依据碳排放时空数据场模型, 港口在结构性优化、设备升级、清洁能源替代和智能运维管理等方面具备显著的减排潜力。整体来看, 通过采取多项措施, 港口碳排放年增长率可由 4.28% 降至 2.15%, 年碳减排潜力预计达到 447 t, 不同功能分区碳减排潜力预测见表 2。

表 2 不同功能分区碳减排潜力
Tab. 2 Carbon emission reduction potential

区域	碳排放占比/%	碳排放平均年增长率/%	优化后预估碳排放年增长率/%	碳减排潜力/(t·a ⁻¹)
生产区	40~45	2.64	1.00	256
码头区	15~20	3.94	2.50	96
卸货区	10~15	4.79	3.00	75
仓库区	10~12	5.82	3.00	66
办公生活区	6~8	1.94	0.50	20
合计	100	4.28	2.15	447

4 结论

1) 通过创新建模方式提高碳排放可视化与可预测性, 引入时空数据场论, 从而有效整合港口碳排放的空间分布与时间演化, 突破了传统核算方法难以直观呈现碳排放特征的局限。

2) 通过模型构建与数据分析, 明确了各港区及功能区的碳排放强度与变化趋势, 为制定分区域、分功能区的精细化减排措施提供了决策依据。

3) 利用历史数据预测 2023 年碳排放强度并与实际情况对比, 验证了模型的准确性和适用性。

4) 本文研究思路为搭建碳排放实时监控平台提供了技术理论基础, 今后可在港口碳排放时空数据场的基础上, 引入小时级甚至分钟级的监测数据, 结合物联网技术, 提升模型精度与实时响应能力。通过港口协同减排模型构建, 进一步扩展至港口集群区域间的碳流追踪与协同控制, 建立区域一体化减排评估与优化机制。

5) 研究为港口实现精准、可视、可控的碳排放管理提供了新路径, 也为其他行业领域的低碳治理提供了方法学参考。

参考文献:

- [1] 梁军波, 陈睿. 港口碳排放核算体系研究及应用[J]. 水运工程, 2024(7): 51-55.
LIANG J B, CHEN R. Research and application of port carbon emission accounting system [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 51-55.

- [2] 程大千, 马小林, 毛永宁, 等. 江苏省“零碳港口”发展路径研究[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(5): 108-113.
CHENG D Q, MA X L, MAO Y N, et al. Research on the development path of “zero carbon port” in Jiangsu Province[J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2024, 20(5): 108-113.
- [3] BOTANA C, FERNÁNDEZ E, FEIJOO G. Towards a green port strategy: the decarbonisation of the port of Vigo (NW Spain) [J]. Science of the total environment, 2023, 856: 159198.
- [4] 徐沁颖. 基于排放因子法的蒸汽锅炉碳排放核算[J]. 工业锅炉, 2023(4): 12-15, 35.
XU Q Y. Discussion on carbon accounting of steam boilers based on emission factor method [J]. Industrial boilers, 2023(4): 12-15, 35.
- [5] 高洁. 装配式混凝土建筑全生命周期碳排放核算及减碳策略研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
GAO J. Research on carbon emission accounting and carbon reduction strategy of the whole life cycle of prefabricated concrete buildings[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2024.
- [6] 郭恰, 马艳. 基于质量平衡法的污泥处理处置工艺碳减排量核算分析[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 107-111.
GUO Q, MA Y. Calculation analysis of carbon emission reduction for sludge treatment and disposal processes based on mass balance approach [J]. Water purification technology, 2019, 38(10): 107-111.
- [7] 彭传圣. 港口碳排放核算方法: 以新加坡裕廊港 2010 年碳足迹报告为例[J]. 港口经济, 2012(7): 5-9.
PENG C S. Accounting method of port carbon emissions: taking the carbon footprint report of Jurong Port in Singapore in 2010 as an example [J]. Port economy, 2012(7): 5-9.
- [8] 贾远明, 李静, 周亿迎. 港口企业碳排放核查案例分析[J]. 水运管理, 2018, 40(10): 19-22.
JIA Y M, LI J, ZHOU Y Y. Analysis on carbon emission inspection case in port enterprises [J]. Shipping management, 2018, 40(10): 19-22.
- [9] 陈伟杰, 宋炳良, 张婕姝. 基于 AIS 数据的中国沿海集装箱港口碳排放[J]. 中国环境科学, 2022, 42 (7): 3403-3411.
CHEN W J, SONG B L, ZHANG J S. Carbon emission from coastal container ports in China based on AIS data [J]. China environmental science, 2022, 42(7): 3403-3411.
- [10] 张向阳, 刘树仁, 刘宝亮, 等. 基于关键特征排序的可解释碳排放预测模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 190-197.
ZHANG X Y, LIU S R, LIU B L, et al. Interpretable carbon emission prediction model based on key feature ranking [J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2024, 48(4): 190-197.
- [11] ATLURI G, KARPATNE A, KUMAR V. Spatio-temporal data mining[J]. ACM computing surveys, 2019, 51(4): 1-41.
- [12] 刘宗杨. 内河港口船舶碳排放测度及减排策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
LIU Z Y. Research on CO₂ emission measurement and emission reduction strategy of ships in inland ports[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [13] BACH B, DRAGICEVIC P, ARCHAMBAULT D, et al. A descriptive framework for temporal data visualizations based on generalized space-time cubes [J]. Computer graphics forum, 2017, 36(6): 36-61.
- [14] YOON J, ZAME W R, VAN DER SCHAAR M. Estimating missing data in temporal data streams using multi-directional recurrent neural networks [J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2019, 66 (5): 1477-1490.
- [15] ZHOU C H, HUANG H X, LIU Z Y, et al. Identification and analysis of ship carbon emission hotspots based on data field theory: a case study in Wuhan Port[J]. Ocean & coastal management, 2023, 235: 106479.
- [16] PEBESMA E. Spacetime: spatio-temporal data in R [J]. Journal of statistical software, 2012, 51(7): 1-30.
- [17] WANG J Y, JI J H, JIANG Z, et al. Traffic flow prediction based on spatiotemporal potential energy fields [J]. IEEE transactions on knowledge and data engineering, 2023, 35(9): 9073-9087.