

基于设备能耗数据的港口碳排放测算及评估 ——以天津港为例

尉建南¹, 肖颖², 何枫鸣¹, 郑刘杰¹, 赵树明¹, 万涛¹

(1.天津市城市规划设计研究总院有限公司, 天津 300190; 2.天津丞明咨询有限公司, 天津 300456)

摘要: 海运作为最重要的运输方式之一, 碳排放量超过10亿 $t \cdot a^{-1}$, 而港口碳排放比例占海运总量的15%以上, 减碳需求迫切。采用自下而上的测算方法, 基于设备能耗数据, 从港口运行全过程切入, 提出涵盖港口陆地活动和船舶停泊两个运行阶段的碳排放测算方法, 并以天津港为案例进行实证分析。计算结果显示, 2023年天津港碳排放量为98.7万 t , 其中船舶停泊碳排放占36.5%, 柴油设备为主要排放源。基于设备能耗数据的测算方法与燃料消耗直接计算方法的误差率在3%以内, 验证了方法的可靠性。最后指出, 通过优化船舶调度、推广岸电使用(替代辅机发电)及运营优化(如多式联运、智能物流)等措施可有效降低港口碳排放强度。

关键词: 碳排放; 港口陆地活动; 船舶停泊; 设备能耗; 碳排放因子; 天津港

Measurement and Assessment of Port Carbon Emissions Based on Equipment Energy Consumption Data: A Case Study of Tianjin Port

YU Jiannan¹, XIAO Ying², HE Fengming¹, ZHENG Liuji¹, ZHAO Shuming¹, WAN Tao¹

(1. Tianjin Urban Planning & Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300190, China; 2. Tianjin Chengming Consulting Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: Maritime transportation, as one of the most critical modes of transportation, generates more than 1 billion metric tons of carbon emissions annually, with ports accounting for over 15% of the total and needing urgent carbon emissions reduction. This paper adopts a bottom-up estimation approach based on equipment energy consumption data and assessment of the entire port operation process. The proposed carbon emissions estimation method covers both port land-based activities and ship berthing operations. Using Tianjin Port as a case study, an empirical analysis is conducted and reveals that the port's carbon emissions in 2023 are 987,000 metric tons. Ship berthing accounts for 36.5% of total carbon emissions and diesel-powered equipment is identified as the primary emission source. The discrepancy between this equipment-based method and direct fuel consumption calculations was within 3%, confirming the reliability of the proposed approach. Finally, the paper highlights that optimizing ship scheduling, promoting the use of shore power (as a substitute for auxiliary engine power generation), and enhancing operations (e.g., multi-modal transportation and smart logistics) can effectively reduce the carbon emissions intensity of ports.

Keywords: carbon emissions; port land-based activities; ship berthing; equipment energy consumption; emission factor; Tianjin Port

收稿日期: 2025-05-29

基金项目: 天津市交通运输委员会交通运输科技项目“天津市交通碳排放计算和综合效益评价自动化平台研究”(2024-A24), 天津市科技支撑重点研发计划项目“天津市国土空间碳源-汇模型研究与规划应用”(23YFZCSN00210)

作者简介: 尉建南(1995—), 女, 山西大同人, 硕士, 工程师, 研究方向为城市交通规划、低碳交通, 电子邮箱13102176550@163.com。

通信作者: 万涛(1983—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为交通规划、交通模型, 电子邮箱1169468702@qq.com。

0 引言

在经济贸易全球化背景下, 工业活动的

持续增加正加速全球变暖进程。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的研究^[1]表明, 工业活

动已导致全球总升温 1°C (2020年数据), 预计2030—2052年升温幅度达到 1.5°C 。工业活动的增加将推动货物运输量的增长, 而海运作为成本最低的运输方式(相较于陆运和空运), 承担着全球90%以上的贸易运输量, 其主导地位在未来仍将持续巩固。

作为海运体系的核心节点, 港口(包括沿海港口和内河港口)发挥着不可替代的作用。截至2023年末, 中国港口生产用码头泊位达22 023个, 其中沿海港口泊位为5 590个(含万吨级以上泊位2 409个)。这些港口一般由交通运输部、省政府部门及省交通运输厅三级管理体系共同监管。以天津港为例, 其总面积约为 121 km^2 , 截至2023年末拥有各类泊位超过200个(含100多个万吨级泊位), 具备处理集装箱、散货、液体货物等多种货物的能力, 是中国北方地区最重要的综合性港口之一。

港口运营活动不可避免地产生大量碳排放。通过系统评估港口碳排放情况, 并基于节能减碳理念优化港口能源结构, 不仅能够推动碳达峰碳中和目标的实现, 更能为全面应对环境保护挑战提供重要支撑。

1 港口碳排放测算方法综述

国外对港口碳排放的研究起步较早, 已形成较为完整的理论体系和测算方法, 其中基于能耗数据的港口碳排放测算方法应用最为广泛。例如, 基于用电量和燃料使用量等实际能耗数据, J. Martínez-Moya 等^[2]计算了集装箱码头的碳排放量; 基于集装箱装卸设备的移动次数和移动距离, M. A. Budiyanto 等^[3]估算了港口碳排放量。

随着“碳达峰、碳中和”战略的深入推进, 中国各行业碳排放研究取得显著进展, 港口碳排放领域也建立了相应的理论基础。在具体研究方法上, 吴茜等^[4]利用天津港生产经营数据, 运用系统动力学方法对天津港的碳排放进行建模分析, 探讨其影响因素及减排路径, 以支持港口的绿色低碳转型和碳达峰目标的实现。梁军波等^[5]采用自上而下与自下而上相结合的方法, 综合设备数据和宏观能源统计数据计算港口碳排放量, 并据此提出设备优化和减排策略。Weng J. X. 等^[6]的系统综述表明, 船舶在港口停泊期间的碳排放占港口总碳排放的主导地位, 因此针对船舶的能源措施具有较大的减排潜力。

既有研究存在明显局限: 一方面, 主要关注单台设备的独立排放, 缺乏对船舶停泊全过程的碳排放测算; 另一方面, 忽视了辅机在装卸作业中持续运行产生的碳排放。针对这些问题, 本文从港口运行全过程出发, 将作业流程细分为停泊、卸货、码头至堆场转运、堆垛及反向操作等环节, 整体划分为港口陆地活动和船舶停泊两个运行阶段。提出结合两个运行阶段来测算港口年运营碳排放量, 并基于港口吞吐量测算单位货物碳排放强度, 为优化碳排放结构和制定精准减排措施提供科学依据。

2 基于港口运行过程的碳排放测算方法

2.1 港口运行过程

从港口运行角度来看, 港口货物运输分为进口和出口两个过程。进口流程为: 集装箱船舶停靠码头后, 由岸边集装箱起重机进行卸货作业, 随后通过港口内部转运机械将集装箱运送至堆场, 再由堆场起重机完成堆垛作业; 待出港货车抵达堆场后, 通过起重机装载货物, 最终运输至全国各地物流中转中心。出口流程则为上述进口流程的逆向操作。

港口进出口作业涉及众多机械设备, 整体可划分为港口陆地活动和船舶停泊两个运行阶段。图1展示了港口货物运输流程, 具体包括船舶停泊、集装箱装卸、货车运输以及集装箱的接收与交付等关键环节。

2.2 碳排放测算

港口碳排放测算可分为两部分: 港口陆地活动碳排放和船舶停泊碳排放。港口陆地活动碳排放主要来源于装卸设备和运载设备在装卸、运输及堆垛作业过程中的燃料消耗, 通过各设备燃料消耗量及其碳排放的累加计算得出总量; 船舶停泊碳排放则是指船舶在港期间因装卸作业、辅助系统运行及生活用电等产生的碳排放, 通过船舶辅机的功率与停泊时长计算获得。具体技术路线如图2所示。

2.2.1 港口陆地活动碳排放计算方法

港口陆地活动碳排放主要来源于以下3类机械设备。

1) 起重机设备: 作为集装箱装卸的核心设备, 其碳排放因动力类型而异。柴油动力起重机因直接燃烧化石燃料而产生较高碳排放; 电力起重机则因使用电网供电, 其碳

排放取决于电力来源的清洁程度。

2) 集装箱运载设备：包括叉车、跨运车等短距离搬运设备，其碳排放与设备运行时间和能耗强度直接相关。

3) 终端集疏运设备：承担集装箱从堆场至港区出口的运输任务。由于运输距离较长且普遍采用柴油动力，这类设备的单台碳排放量通常最高，是港口陆地活动碳排放的重要来源。

这些设备的驱动能源并非全部来自电力或燃料。其中，使用燃料驱动的机械设备碳排放计算公式如下：

$$E_f = \sum_i EF_i \times EFF_i \times T_i, \quad (1)$$

式中： E_f 为燃料驱动机械设备年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)； i 为某机械设备使用的燃料类型； EF_i 为燃料 i 对应的碳排放因子/(kg·L⁻¹)； EFF_i 为燃料 i 的燃料消耗因子/(L·h⁻¹)； T_i 为使用燃料 i 的机械设备年均使用时

间/(h·a⁻¹)。

使用电力驱动的机械设备碳排放计算公式如下：

$$E_e = \sum_j EF \times EC_j \times T_j, \quad (2)$$

式中： E_e 为电力驱动机械设备年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)； j 为第 j 种电力驱动的机械设备； EF 为电力排放因子/(kg·(kW·h)⁻¹)； EC_j 为第 j 种机械设备单位时间用电量/(kW·h·h⁻¹)； T_j 为第 j 种机械设备年均使用时间/(h·a⁻¹)。

货车碳排放计算公式如下：

$$E_u = \sum_x EF_x \times E_{fx} \times D_x \times N_x, \quad (3)$$

式中： E_u 为货车年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)； x 为货车使用的燃料类型； EF_x 为燃料 x 对应的碳排放因子/(kg·L⁻¹)； E_{fx} 为使用燃料 x 的货车单位耗油量/(L·km⁻¹)； D_x 为平均每辆货车在港口运行的平均距离/km； N_x 为年均货车交通量/(辆次·a⁻¹)。

按照起重机、集装箱运载设备、终端集疏运设备对各类机械设备重新分类，上述设备的碳排放可通过以下公式计算：

$$E_{pl} = E_{cc} + E_{ce} + E_u, \quad (4)$$

式中： E_{pl} 为港口陆地活动年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)； E_{cc} 为起重机年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)； E_{ce} 为集装箱运载设备年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)； E_u 为终端集疏运设备(货车)年CO₂排放量/(kg·a⁻¹)。其中：

$$E_{cc} = \sum_a E_{fa} + E_{ea}, \quad (5)$$

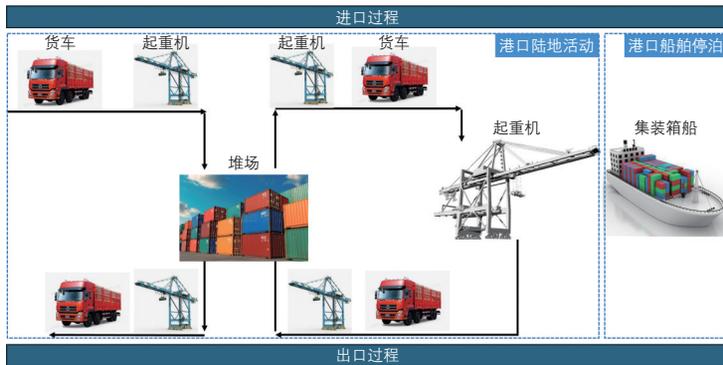


图1 港口货物运输流程

Fig.1 Cargo transportation process at ports

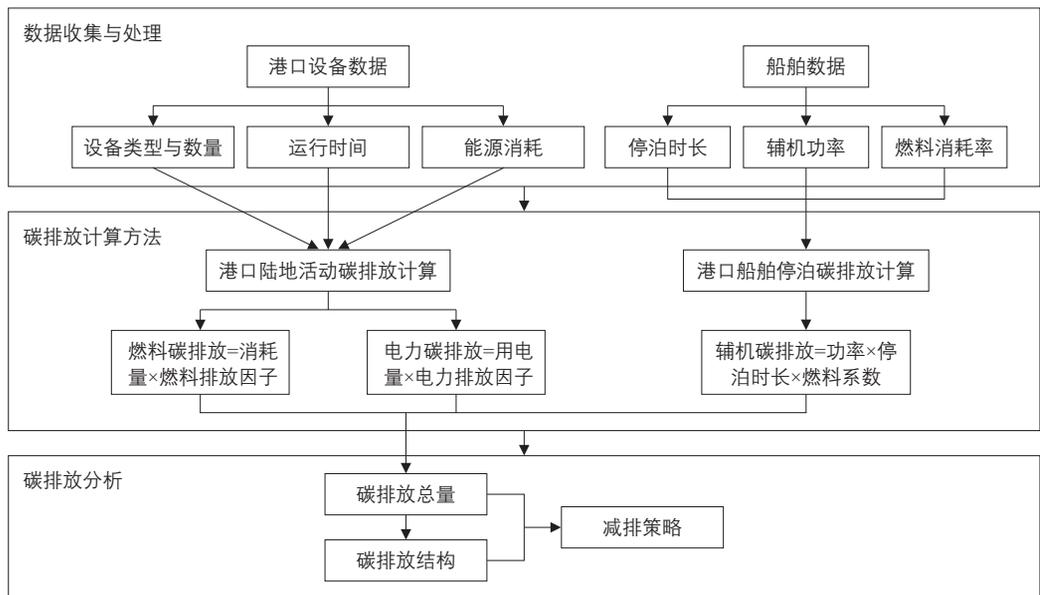


图2 港口碳排放测算技术路线

Fig.2 Technical roadmap for port carbon emissions measurement

式中： a 为起重机设备； E_{fa} 为燃料驱动起重机年 CO_2 排放量/ $(\text{kg}\cdot\text{a}^{-1})$ ； E_{ea} 为电力驱动起重机年 CO_2 排放量/ $(\text{kg}\cdot\text{a}^{-1})$ 。

$$E_{ce} = \sum_b E_{fb} + E_{eb}, \quad (7)$$

式中： b 为集装箱运载设备； E_{fb} 为燃料驱动集装箱运载设备年 CO_2 排放量/ $(\text{kg}\cdot\text{a}^{-1})$ ； E_{eb} 为电力驱动集装箱运载设备年 CO_2 排放量/ $(\text{kg}\cdot\text{a}^{-1})$ 。

2.2.2 船舶停泊碳排放计算方法

船舶主要动力装置包括 3 个系统：主机、辅机和锅炉。当船舶处于停泊(锚泊)状态时，动力供给主要由辅机和锅炉承担。鉴于锅炉碳排放较之主机和辅机可忽略不计，本文将船舶在港期间碳排放量计算限定于辅机的排放范畴。由于辅机功率并非强制报告数据，本文参考 Weng J. X. 等^[6]提出的主机-辅机功率比例关系进行推算。

表 1 数据显示，不同船舶在停泊(锚泊)状态下，辅机功率通常维持在主机功率的 20% 水平。对于无法获取具体主机功率的案例，可采用单位船舶载重对应的辅机功率进行估算。基于文献[6]对港口货船的专项研究，10 万吨级船舶的典型辅机功率配置为 2 000 kW。

船舶停泊碳排放计算公式如下：

$$E_{sp} = 2L_{sp} \times L_{ap} \times EEF \times P_{time} \times P_{num} \times 10^{-10}, \quad (8)$$

式中： E_{sp} 为船舶停泊年 CO_2 排放量/ $(\text{万 t}\cdot\text{a}^{-1})$ ； L_{sp} 为船舶平均载重量/ t ； L_{ap} 为单位载重量的辅机功率/ $(\text{kW}\cdot\text{t}^{-1})$ ； EEF 为辅机排放因子/ $(\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1})$ ； P_{time} 为单艘船舶单次平均在港停泊时长/ h ； P_{num} 为年均船舶停泊量/ $(\text{艘次}\cdot\text{a}^{-1})$ 。

3 天津港碳排放测算

3.1 天津港概况

天津港位于天津市滨海新区，地处渤海湾西岸，海河入海口(地理坐标：东经 $117^{\circ}42'05''$ 、北纬 $38^{\circ}59'08''$)是华北和西北地区的重要出海口。作为中国北方最大的综合性港口，天津港总水域面积 336 km^2 ，陆域面积 131 km^2 。港口由北疆港区、南疆港区、东疆港区及大沽口港区等多个功能区组成(布局见图 3)，拥有各类码头泊位 150 余个，包括 100 多个万吨级以上深水泊位。天津港年货物吞吐量超过 5 亿 t，集装箱吞吐

量突破 2 000 万标准箱，港口货运量巨大，是中国北方乃至全球最繁忙的港口之一，港口现状货车交通量分布如图 4 所示。

3.2 运营数据

1) 设备规格和使用情况。

天津港设备数量及其利用率见表 2，主要包括 3 类数据。①设备数量，涵盖轮胎式起重机、门座式起重机、跨运车等各类港口装卸运输设备；②设备技术参数，包括单台设备的运输能力、发动机排量、平均功率等关键性指标；③设备运行效率，通过设备实际作业时间与总可用时间(含计划维护时间)的比值计算设备利用率，反映设备使用强度。

表 1 不同类型船舶在停泊(锚泊)状态下的辅机功率因子

Tab.1 Auxiliary engine power factors of different vessel types during berthing (anchoring)

船型	辅机功率因子
普通货船	0.19
集装箱船	0.22
油轮	0.21
客船	0.28
拖轮	0.22

注：辅机功率因子为辅机功率与主机功率的比值。



图 3 天津港布局

Fig.3 Layout of Tianjin Port

2) 能源使用情况。

统计能耗数据，主要包括柴油、汽油、天然气等燃料消耗量及电力消耗量(见表3)。对于缺乏直接能耗数据的港口，可通过设备利用率数据结合各类设备的单位小时燃料消耗量或电力使用量进行间接计算。

3) 船舶停泊情况。

包括船舶年在港停泊(锚泊)时长数据，各船型的载重量、停泊艘次及装卸集装箱数量。表4数据显示，天津港全年船舶停泊量达14 800艘次，即日均在港停泊船舶数超过40艘。

4) 碳排放因子。

本文采用《IPCC 碳排放因子数据库(2006)》(IPCC Emission Factor Database(2006))的燃料排放因子数据(见表5)。核算结果显示：柴油单位体积CO₂排放量为2.68 kg·L⁻¹、单位质量CO₂排放量为3.16 kg·kg⁻¹；汽油单位体积和单位质量CO₂排放量分别为2.30 kg·L⁻¹和3.16 kg·kg⁻¹；天然气单位体积CO₂排放量为2.10 kg·m⁻³。电力排放因子采用生态环境部发布的省级电力平均CO₂排放因子，选取2023年天津市数据0.84 kg·(kW·h)⁻¹，该数值已充分考虑区域发电结构的差异性。

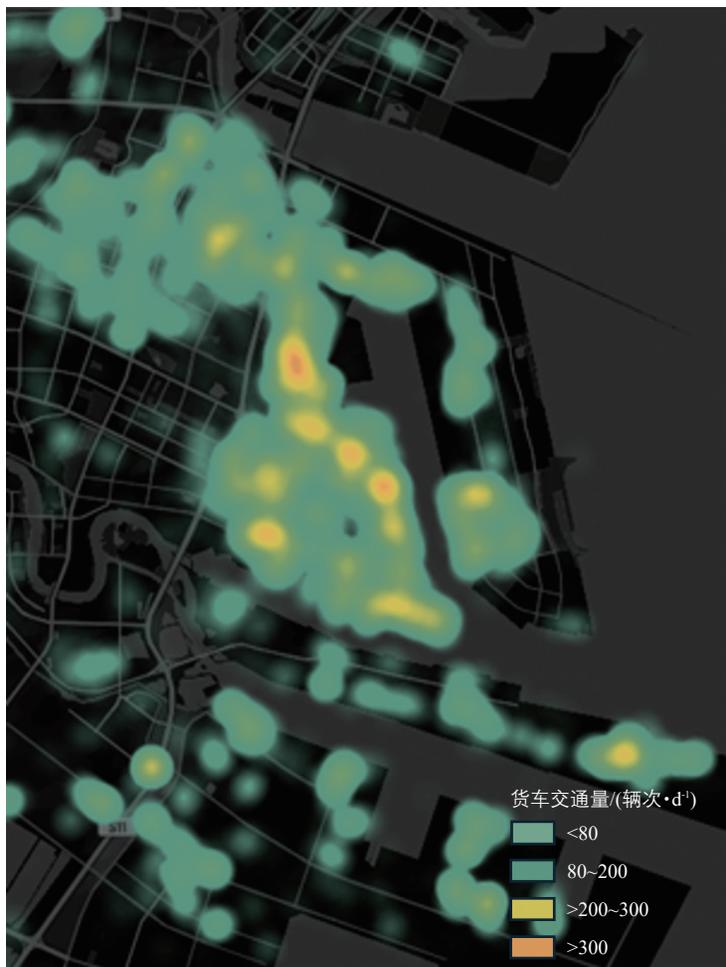


图4 天津港现状货车交通量分布
Fig.4 Distribution of current truck traffic volume at Tianjin Port

表2 天津港设备数量及其利用率

Tab.2 Equipment quantity and utilization rate at Tianjin Port

设备类型	数量/台	单台设备的单位小时燃料消耗量/(L·h ⁻¹)或电力使用量/(kW·h·h ⁻¹)	设备利用率/%
轮胎式起重机	80	70	34
门座式起重机	139	200	58
其他类型起重机	23	200	47
叉车	266	50	68
单斗车	126	50	72
跨运车	179	50	43
集装箱专用机械	1 032	120	53
其他机械	559	50	31

资料来源：文献[7]。

3.3 港口陆地活动碳排放

根据《天津港统计年鉴(2023)》机械设备数据核算，2023年天津港港口陆地活动产生的碳排放量为62.7万t，碳排放构成如下。

1) 起重机设备。作为港口物流体系中的核心装卸设备，起重机承担着船舶、车辆与堆场间的货物转运功能。2023年，全港起重机系统在运行过程中产生的碳排放量达25.9万t，占港口碳排放总量的比例较高。

2) 集装箱运载设备。通过对2023年单日运营数据的分析，内部短距离运输设备(含叉车、跨运车等)的年碳排放量为28.2万t。根据2023年天津港港内货车出行起点分布(如图5所示)数据测算，内部货车日均作业量为17 628车次，平均运距5 km，年碳排放量为3.4万t。

3) 终端集疏运设备。天津港货物集疏运以公路运输为主导(约占70%~80%)。根据2023年单日运营数据测算，外部进港货车日均作业量达37 129车次，单车次平均运距8 km，年碳排放量约6.9万t；其他集疏运方式(铁路、水运等)年碳排放量约1.7万t。

根据《天津港统计年鉴(2023)》燃料使用数据核算，2023年天津港港口陆地活动产生的碳排放量为64.1万t，其中柴油、汽油等燃料直接排放10.9万t，电力间接排放53.2万t；基于其中的机械设备数据计算得出的碳排放量为62.7万t。两种计算方法对比显示：燃料消耗直接算法与设备运行间

接算法之间的误差率在3%以内，这一结果验证了本文提出方法的准确性，表明该方法在港口碳排放测算中具备应用推广价值。

3.4 船舶停泊碳排放

依据前文船舶停泊碳排放计算方法，结合船舶平均在港停泊时长、年均船舶停泊量等关键参数，采用 $620 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 的辅机排放因子进行测算，得出2023年天津港船舶停泊产生的碳排放量为36.0万t。

3.5 碳排放汇总

基于燃料及电力消耗数据，本文对各类设备的碳排放进行测算，结果见表6。港口陆地活动碳排放占港口碳排放总量的63.5%，船舶停泊碳排放占36.5%。在陆地活动碳排放构成中，起重机以41.3%的比例居首，集装箱专用机械(21.2%)次之，港口货车(16.4%)位列第三。这一分布特征主要源于货车保有量大、使用频率高的运营特点。

3.6 单位货物碳排放强度

2023年，天津港完成货物吞吐量5.58亿t，同比增长1.8%；集装箱吞吐量2218.7万标准箱，同比增长5.5%。如表7所示，本文采用分类汇总方法计算碳排放量：首先计算起重机设备、集装箱装载设备和终端集疏运设备3类排放源的碳排放量，再与船舶停泊碳排放量累加。最后，将各类排放量分别除以货物吞吐量，得出2023年天津港单位货物碳排放强度为 $17.7 \text{ t} \cdot \text{万 t}^{-1}$ 。

4 结论

本文以天津港为例，基于设备能耗数据，综合考虑港口陆地活动和船舶停泊两个运行阶段，测算2023年天津港碳排放量，并评价其碳排放水平，主要研究结论如下：

1) 燃料消耗直接算法得出的碳排放量(64.1万t)与设备运行间接算法得出的碳排放量(62.7万t)的误差率在3%以内。这一结果验证了基于设备能耗数据及港口运行统计数据的自下而上计算方法的可靠性，表明该方法可推广应用于其他港口的碳排放测算。

2) 2023年天津港碳排放量为98.7万t，其中，起重机占港口陆地活动碳排放的41.4%，集装箱专用机械占21.2%(不含内部货车和其他机械碳排放)，货车(内部货车和

终端货车)占16.4%。这三类排放源共同构成港口陆地活动碳排放的主要来源。

表3 天津港燃料使用情况

Tab.3 Fuel consumption at Tianjin Port

能源类型	燃料消耗量/t	度数/万度
柴油	34 115	
汽油	335	
电力		63 067

资料来源：文献[7]。

表4 天津港船舶停泊数据

Tab.4 Ship berthing data at Tianjin Port

项目	数据
单船停泊时长/h	46
单船平均载重量/t	42 845
停泊量/艘次	14 800

资料来源：文献[7]。

表5 不同燃料排放因子

Tab.5 Emission factors by fuel type

kg·TJ⁻¹

燃料	固定源与移动源(燃料)排放因子		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
柴油	74 100.0	3.0	0.6
汽油	70 000.0	3.0	0.6
天然气	64 200.0	3.0	0.6

资料来源：《IPCC碳排放因子数据库(2006)》。

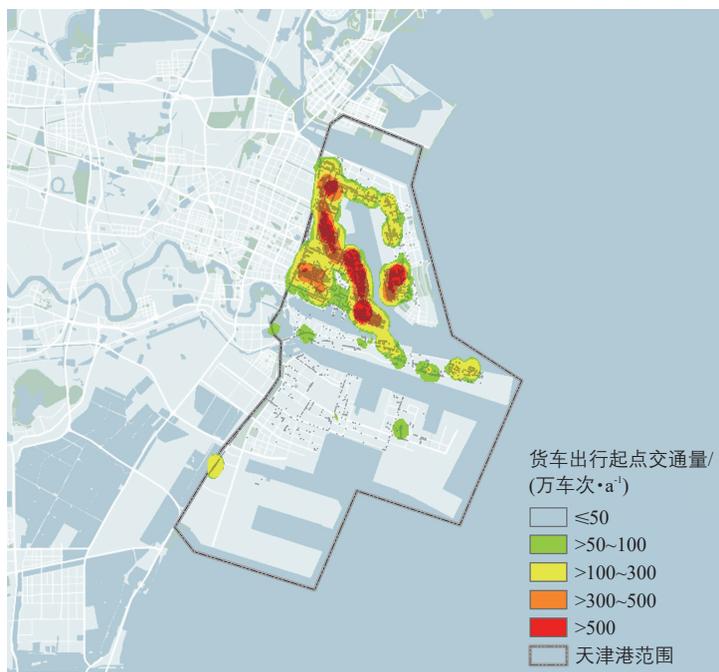


图5 2023年天津港港内货车起点分布

Fig.5 Distribution of truck origins within Tianjin Port in 2023

表6 2023年天津港碳排放构成

Tab.6 Composition of carbon emissions at Tianjin Port in 2023

项目	碳排放量/万t	比例/%
轮胎式起重机	4.1	6.5
门座式起重机	20.2	32.2
其他类型起重机	1.6	2.6
叉车	2.1	3.4
单斗车	1.3	2.1
跨运车	1.7	2.7
集装箱专用机械	13.3	21.2
其他机械	6.4	10.2
港口内货车	3.4	5.4
港口外货车	6.9	11.0
其他集疏运设备	1.7	2.7
设备总计	62.7	100.0
港口陆地活动	62.7	63.5
船舶停泊	36.0	36.5
总计	98.7	100.0

表7 2023年天津港单位货物碳排放强度

Tab.7 Carbon emissions intensity per unit of cargo at Tianjin Port in 2023

碳排放源	单位货物碳排放强度 t·万t ⁻¹
起重设备	4.6
集装箱运载设备	5.1
终端集疏运设备	1.5
船舶停泊	6.5
总计	17.7

3) 船舶在港期间产生的碳排放量较大, 2023年天津港船舶停泊碳排放占碳排放总量的36.5%。港口拥堵导致的等待时间延长会显著增加碳排放。

4) 港口作为全球贸易与物流体系的关键节点, 其碳排放来源具有多样性特征, 涵盖船舶停泊、装卸设备运行、货物运输以及港口自身运营等多个环节。基于本文分析, 主要碳排放途径包括船舶停泊、起重设备运行、货物装卸转运及货车运输。

减排措施方面: 1)在船舶停泊环节, 可通过优化船舶路径减少在港停留时间, 同时推广岸电使用以替代辅机发电。目前, 天津港已实现自有船舶100%使用岸电, 成为全球港口岸电应用标杆。2)在起重机和装卸设备环节, 可加速作业机械电动化进程, 目前

天津港集装箱码头场内倒运车辆已实现100%电动化。3)在货车运输环节, 可通过车辆升级(如在集装箱码头投放氢能重卡用于省际长距离运输、散杂货码头协议车队完成新能源替代)、能源替代(建设充电充氢站, 探索氢能应用)以及运营优化(加强多式联运和智慧物流, 整合铁路、海运、公路资源, 降低中转损耗和空驶率)等多维度措施实现减排。目前天津港已实现煤炭、焦炭等货物100%铁路运输。

本文提出的基于设备能耗数据的港口碳排放测算方法具有普适性, 可应用于不同港口的碳排放测算, 为制定针对性的减排措施提供依据。后续研究可结合天津港能源结构全面绿色化等实践, 进一步精细化测算港口碳排放, 科学评估减排措施实施效果。

参考文献:

References:

- [1] 联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC). 第六次评估报告综合报告: 气候变化2023 [R]. 瑞士: 联合国政府间气候变化专门委员会, 2023.
- [2] MARTÍNEZ-MOYA J, VAZQUEZ-PAJA B, MALDONADO J A G. Energy efficiency and CO₂ emissions of port container terminal equipment: evidence from the port of Valencia [J]. Energy policy, 2019, 131: 312-319.
- [3] BUDIYANTO M A, HUZAIFI M H, SIRAIT S J, et al. Evaluation of CO₂ emissions and energy use with different container terminal layouts[J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 1-14.
- [4] 吴茜, 刘英凡, 王晓丽, 等. 基于系统动力学的天津港能源结构碳排放模型分析[J/OL]. 天津理工大学学报, 2024: 1-7[2025-03-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1374.N.20241011.1052.006.html>.
- [5] 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.
- [6] WENG J X, SHI K, GAN X F, et al. Ship emission estimation with high spatial-temporal resolution in the Yangtze River estuary using AIS data[J]. Journal of cleaner production, 2020, 248: 119297.
- [7] 天津市统计局. 天津港统计年鉴2023[R]. 天津: 天津市统计局, 2023.