

船舶航运碳排放核算及驱动因素研究进展

黎倚晴¹, 李勤勤¹, 李腾飞², 梁叶¹, 谌治¹, 王灿¹, 方卫阳¹, 李国卫², 王好¹

(1. 暨南大学环境与气候学院 广州 511443; 2. 广东广船国际海洋科技研究院有限公司 广州 511457)

摘要: 船舶航运是全球温室气体减排的关键与难点领域之一, 其碳排放精准核算与关键驱动因素识别是实现净零排放的理论基石。然而, 现有研究对各类核算方法的适用性及局限性缺乏系统梳理。文章系统整合国内外航运碳排放因子, 构建多维排放因子库, 综合评述多种典型航运碳排放核算方法的特点与不足; 总结全生命周期评价的系统边界及替代燃料的碳足迹, 凸显从“油箱到尾迹”向“从源到尾”全生命周期评价框架转变的根本性意义; 阐述航运碳排放关键驱动因素的识别与量化方法; 剖析航运碳排放核算不确定性来源, 明确指出数据质量及动态表征不足是制约精准核算的核心瓶颈。研究指出, 未来应着力构建多元动态排放因子数据库, 发展融合多因子驱动的综合核算框架, 探索航运减污降碳协同路径, 建立航运全生命周期碳足迹评估体系, 为推动航运业绿色净零转型提供科学依据。

关键词: 二氧化碳; 船舶航运; 排放因子; 排放估算; 全生命周期评价

中图分类号: X32; P7

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2026)02-0013-17

A Review on Estimation and Driving Forces of Carbon Emissions in Ship Transportation

LI Yiqing¹, LI Qinqin¹, LI Tengfei², LIANG Ye¹, CHEN Zhi¹, WANG Can¹,
FANG Weiyang¹, LI Guowei², WANG Hao¹

(1. College of Environment and Climate, Jinan University, Guangzhou 511443, China;

2. GSI Marine Research Center, Guangzhou 511457, China)

Abstract: The ship transportation is one of the critical and complex sectors in global greenhouse gas emission reduction. The accurate estimation of its carbon emissions and identification of key driving factors are fundamental to achieving net-zero emission targets. However, a systematic review of the applicability and limitations of various accounting methodologies is still lacking. This review synthesizes carbon emission factors from domestic and international research and establishes a multidimensional emission factor database. It provides a comprehensive review of the characteristics and shortcomings of predominant carbon emission estimation methods for shipping. The system boundaries of life cycle assessment and the carbon footprints of alternative fuels are summarized, highlighting the fundamental significance of shifting from a “Tank-to-Wake” to a “Well-

收稿日期: 2025-11-29; 修订日期: 2026-01-21

基金项目: 广东省海洋经济发展专项 GDNRC [2024] 40.

作者简介: 黎倚晴, 硕士研究生, 研究方向为污染物监测与排放控制等

通信作者: 李勤勤, 讲师, 博士, 研究方向为环境污染物监测及减污降碳控制技术

to-Wake” life cycle assessment framework. It also elaborates on approaches for identifying and quantifying key emission drivers. The sources of uncertainty in shipping carbon emission estimation are further analyzed. This analysis clearly indicates that inadequate data quality and insufficient representation of dynamic operation are the core bottlenecks constraining accurate carbon accounting. This review proposes that future research should prioritize developing a multivariate and dynamic emission factor database, advancing integrated accounting frameworks incorporating multiple driving factors, exploring synergistic pathways for pollution reduction and carbon mitigation in shipping, and instituting a holistic life-cycle carbon footprint evaluation framework for shipping. These efforts aim to provide a scientific basis for promoting the shipping industry’s transition toward green and net-zero operations.

Keywords: Carbon dioxide; Ship transportation; Emission factors; Emission estimation; Life cycle assessment

0 引言

船舶运输凭借运载量大、运输成本低、能源利用率高、占用土地资源少等优势,承担着全球 90% 的贸易运输任务。然而,随着全球气候变暖加剧,航运碳排放对全球气候变化的负面影响日益凸显,其减排紧迫性已不容忽视。最新核算数据结果显示,1970—2021 年全球海运业的二氧化碳排放量增长了 1.7 倍,其峰值高达 8.87×10^8 t/a^[1]。全球海运碳排放量呈持续增长态势,预计 2050 年其碳排放量将比 2018 年增长 50%^[2]。航运业碳排放约占全球人为碳排放总量的 3%^[2],若不采取有效的减排措施,该占比预计到 2050 年将大幅跃升至 12%~18%,这将对实现全球变暖控制在 2℃ 以内的长期气候目标构成严重威胁^[3]。此外,船舶燃油质量较差、废气处理设备安装率低,导致船舶单位功率碳排放量可能远高于机动车尾气的排放量^[4]。因此,航运碳排放对全球气候变化具有重要影响,推进航运碳减排已成为遏制全球气候持续变暖的关键举措之一^[5-6]。

航运碳减排的紧迫性,直接推动国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)相关减排政策升级。IMO 明确提出 2050 年前后实现温室气体净零排放的里程碑式目标,并已通过全球航运业净零排放法规,要求制定强制性船用燃料标准和温室气体排放定价机制。IMO 修订的《船用燃料全生命周期温室气体强度导则》首次统一了船用燃料“从源到

尾(Well-to-Wake, WtW)”的核算边界与方法,标志着全球航运碳排放核算正式从传统的“油箱到尾迹(Tank-to-Wake, TtW)”全面转向 WtW 的全生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)模式^[7]。核算框架的根本性变革,为航运碳排放进入“全链条管控”新阶段提供了关键技术支撑,确保了科学核算方法与减排政策的衔接。这些目标和政策法规的确立,将大力推动现有船舶的深度改造,加速航运燃料和尾气排放控制措施的更新换代,从而对航运碳排放特征和总量核算产生重大影响。中国作为航运大国,海运量占世界总量的 26%^[8]。随着“21 世纪海上丝绸之路”建设加快,船舶航运活动日益频繁,航运能源消耗量持续增长^[8],船舶碳排放量保持增长趋势^[9],中国海域已成为世界海运最繁忙、CO₂ 排放热点海域之一^[10]。作为全球生态环境安全负责任的大国,中国提出了“碳达峰”和“碳中和”的减排目标,航运碳减排对于实现“双碳”目标具有重要影响^[11]。

掌握航运碳排放核算方法,准确选取合适的碳排放因子和量化碳排放总量,厘清全生命周期碳足迹框架,识别关键影响因素,为实现航运碳减排提供数据支持,是推动绿色、零碳、高效航运发展的基础。本文系统梳理了航运碳排放的核算方法及影响因素评价体系,综合评述了各类方法的适用性与局限性,在剖析核算不确定性来源的基础上,指明了未来实现精准量化与零碳排放的研究方向,旨在为航运绿色零碳发展提供科学技术支撑。

1 航运碳排放因子的核算方法

排放因子 (Emission Factor, EF) 是科学构建排放清单的核心, 而深入探究航运碳 EF 则是准确核算航运碳排放总量的关键前提。航运碳 EF 是指船舶单位做功下排放的 CO₂ 质量, 其核算方法可分为基于燃油消耗量、发动机功率和船舶负载三种方法。

1.1 基于燃油消耗量的 CO₂ EF 核算

航运排放的 CO₂ 是燃油中碳氢物质氧化的产物, 其 EF 与燃油含碳量和燃烧效率密切相关^[12]。基于燃油消耗量的 CO₂ EF (g/kg fuel) 计算如下。

$$EF_{CO_2} = R_{FG} \times c(CO_2) \times M_{CO_2} \quad (1)$$

$$EF_{CO_2,A} = \sum_{CO_2,A} EF_i \times P_i \quad (2)$$

式中: R_{FG} 为气体排放速率 (m³/kg fuel), $c(CO_2)$ 为 CO₂ 的摩尔浓度, M_{CO_2} 为 CO₂ 的相对分子质量, $EF_{CO_2,A}$ 为平均 EF, P_i 为 i 工况在整个航运周期的时间占比。

1.2 基于引擎功率的 CO₂ EF 核算

基于船舶引擎功率的 $EF_{CO_2,P}$ [g/(kW·h)] 可由 EF_{CO_2} 结合燃油消耗速率 FCR [kg fuel/(kW·h)] 由公式 (3) 核算^[12]。船舶实际 i 航行工况下的 FCR _{i} 可根据船舶额定 FCR_{base} 和实际负荷系数 LF _{i} 换算, 即式 (4)^[13]。LF _{i} 由船舶实际航行速度 v_a 和船舶最大设计速度 v_{max} 核算, 即式 (5)^[14-15]。

$$EF_{CO_2,P} = EF_{CO_2} \cdot FCR \quad (3)$$

$$FCR_i = FCR_{base} (0.455LF_i^2 - 0.71LF_i + 1.28) \quad (4)$$

$$LF_i = \left(\frac{v_a}{v_{max}} \right)^3 \quad (5)$$

1.3 基于船舶负载的 CO₂ EF 核算

基于船舶排放 CO₂ 实测数据, 美国环保署 (US EPA) 得出 EF 与航载负荷之间的关系如式 (6) 所示^[16]。

$$EF = a(FL)^{-x} + b \quad (6)$$

式中: FL 为负荷因子; a 、 b 和 x 为与特定污染物有关的估算常数, 分别为 44.1、648.6 和 1。

IMO 推荐的燃油 EF 由高到低依次为柴油 (3 206 g/kg)、轻油 (3 151 g/kg)、重油 (3 114 g/kg)、液化石油气 (丁烷, 3 030 g/kg)、液化石油气 (丙烷, 3 000 g/kg)、液化天然气 (2 750 g/kg)、乙醇 (1 913 g/kg) 和甲醇 (1 375 g/kg)。低硫燃油作为新的燃油类型, 其 EF 根据黏度选择采用柴油 EF 或轻油 EF。IMO 推荐的功率 EF 由高到低依次为船用柴油/船用轻柴油锅炉 [922.0 g/(kW·h)]、船用柴油中速辅机 [690.7 g/(kW·h)]、重油中速或高速主机 [686.0 g/(kW·h)] 及重油低速主机 [622.0 g/(kW·h)]。《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南 (试行)》规定, 含硫量为 2.7% 和低于 2.7% 的低速发动机 EF 为 620.6 g/(kW·h) 和 588.8 g/(kW·h), 中速/高速发动机 EF 为 677.9 g/(kW·h) 和 646.1 g/(kW·h), 蒸汽轮机 EF 为 970.7 g/(kW·h) 和 923.0 g/(kW·h)。

本研究总结了现有研究报道的航运 EF, 如表 1 所示。从表中可以看出, 航运 EF 与 IMO 推荐值存在显著差异。直接采用 IMO 推荐值, 估算结果可能偏离实际排放量。此外, 不同研究 EF 存在显著差异, 这主要与船舶类型、燃油种类、发动机技术、运行工况和测量方法的差异有关。尽管燃油 EF 核算方法应用最广, 但其难以捕捉实际航行随负载、航速甚至环境改变的 EF 动态变化。而引擎功率 EF 虽能更好地反映航运动态碳排放, 但对数据质量要求极高, 观测和核算成本较高。随着传统高碳排放的船用燃油被逐步替代, 混合燃油或纯清洁能源使用的比例将大幅提升, 其 EF 亟待测量和更新^[17]。

表 1 基于燃油消耗和引擎功率的航运 CO₂ 排放因子库Table 1 Marine CO₂ emission factor inventory based on fuel consumption and engine power

核算方法	船舶类型	排放因子 / (g · kg ⁻¹)	参考文献	核算方法	船舶类型	排放因子 / (g · kW ⁻¹ · h ⁻¹)	参考文献
基于燃油消耗	所有船舶	3 170	[18]	基于引擎功率	所有船	588.79 ~ 922.97	[16]
	所有船舶	3 170	[19]		所有船	702	[20]
	所有船舶	3 190	[21]		货船	655	[23]
	所有船舶	2 905	[22]		重油货运船舶	667	[24]
	货运船舶	3 200	[21]		柴油货运船舶	622	[25]
	货运船舶	2 860	[22]		柴油货运船舶	533 ~ 612	[25]
	货运船舶	3 070	[26]		货运船	605	[22]
	重油集装箱船	3 441	[23]		所有船	616	[22]
	柴油油船	3 135	[27]		军舰	800	[22]
	柴油集装箱船	3 176	[27]		客 / 渔 / 拖船	620	[22]
	干散货船	3 110.91 ~ 3 134.97	[28]		柴油工程船	699	[12]
	集装箱船	3 083.93 ~ 3 128.51	[28]		柴油科考船	631	[12]
	非货运船舶	3 050	[21]			697	[29]
	客船 / 渔船 / 拖船	2 930	[22]		轻柴油客运渡轮	663 ~ 952	[29]
	柴油工程船	3 071	[12]		轻柴油客运游轮	653 ~ 708	[30]
	柴油科考船	3 153	[12]		轻 / 重柴油客运游轮	763 ~ 803	[31]
		3 151	[12]		低硫重油货运船舶	588 ~ 660	[31]
	柴油刺网渔船	3 104	[32]		中间燃料油货船	605 ~ 628	[24]
	柴油钓渔船	2 996	[32]		柴油货船	672 ~ 749	[33]
	柴油拖网渔船	3 123	[32]		重油货船	590 ~ 644	[16]
	柴油捕捞渔船	3 074	[32]		渣油货船	620.62 ~ 970.71	[16]
	军舰	3 776	[22]		渣油船	678	[34]
	客 / 渔 / 拖船	2 930	[22]		馏分油船	645	[34]
	低硫柴油集装箱船	3 206	[35]		重油货船	603 ~ 620	[36]
	低硫重油集装箱船	3 151	[35]		馏分油货船	607 ~ 646	[36]
	柴油集装箱船	3 151	[35]		渣油货运船舶	691/697	[30]
重油集装箱船	3 114	[35]	重柴油货运船舶	691 ~ 694	[30]		
甲醇集装箱船	1 375	[37]	轻柴油货运船舶	676 ~ 708	[30]		
渣油货柜船	3 028/3 031/3 096	[37]	重油货船	627/626	[38]		

2 航运碳排放量的核算方法

核算方法的选择是决定航运碳排放总量核算是否准确的关键环节^[39], 不同方法核算结果的差异可达40%^[40]。当前, 航运碳排放核算方法包括“自上而下(Top-down)”和“自下而上(Bottom-up)”两类^[41-42]。其中, “自上而下”主要基于燃油消耗的统计, 与燃料种类、消耗量和燃油值EF有关^[22]。“自下而上”与船舶活动数据密切相关, 既包括船舶详细信息(如IMO编号、船舶类型、尺寸、引擎类型、燃油种类、装载量等), 也包括船舶活动调查数据(如引擎功率、行驶距离、最大速度、港口停靠次数、船舶运行模式、运行时间、船舶轨迹等)^[43]。当前, 航运碳排放总量核算包括基于燃油消耗量、引擎功率、发动机效率、自动识别系统和贸易驱动五种方法。

2.1 基于燃油消耗量的核算方法

航运碳排放量可通过统计燃油消耗量 $A(t)$ 与EF核算, 参照《IPCC国家温室气体清单指南》中的估算方法^[44], 航运碳排放总量 $C(t)$ 的计算公式为:

$$C = A \times EF \quad (7)$$

A 核算方法可分为“自上而下”和“自下而上”两种方法。在“自上而下”的方法中, A 可依据燃油供应商和船舶燃油消耗监测系统提供燃油消耗数据^[45]。此外, 可根据单位载客量和单位载货量核算客运和货运 A 。在充分考虑其运输周转量的情况下, 可参考《城市大气污染物排放清单编制技术手册》, 即式(8)^[46-47]。

$$A = (\beta \times \text{PTK} + \text{FTK}) \times \text{YX} \quad (8)$$

式中: PTK为客运周转量, 10^4 人·km; FTK为货物周转量, 10^4 t·km; YX为燃油消耗系数, kg/(10^4 t·km); β 为PTK转换为FTK的燃油消耗量转换系数, 一般取0.065。PTK和FTK数据无法获取时, 可由式(9)和式(10)计算。

$$\text{PTK} = \frac{\text{PL}}{\text{PD}} \quad (9)$$

$$\text{FTK} = \frac{\text{FL}}{\text{FD}} \quad (10)$$

式中: PL为载客量; PD为平均载客距离; FL为货

运装载量; FD为平均货运距离。

在“自下而上”的方法中, A 核算充分考虑燃料类型、发动机类型和船舶实际活动过程。该方法建立的测算模型贴近船舶实际燃油消耗情况, 是目前普遍使用的方法, 如式(11)所示^[48]。

$$A = \sum_{i,j,k} \text{VAN}_i \times P_i \times \text{LF}_{i,j,k} \times T_{i,k} \times \text{SFC}_{i,j,k} \quad (11)$$

式中: i, j, k 分别代表船舶类型、引擎等级和航行工况; VAN_i 为 i 型船舶在估算期间的抵离港次数; P_i 为第 i 类船舶引擎功率; $\text{LF}_{i,j,k}$ 为 i 型船舶的引擎 j 在 k 运作模式下的功率输出负荷; $T_{i,k}$ 为 i 型船舶在第 k 种航行工况下的工作时间; $\text{SFC}_{i,j,k}$ 为 i 型船舶的引擎 j 在 k 航行工况下的燃油消耗率^[49]。

基于引擎功率及发动机效率的 A 核算, 充分考虑了船舶发动机功率和燃油消耗速率的综合变化, 即式(12)^[22,39-40]:

$$A = \sum_j P_j \times F_{\text{MCR},i} \times t \times \text{SFOC} \quad (12)$$

式中: $F_{\text{MCR},i}$ 是发动机效率; SFOC是单位时间单位功率下的特定燃油消耗量, 可由式(13)和式(14)核算。

$$\text{SFOC} = \text{SFOC}_{\text{relative}} \times \text{SFOC}_{\text{base}} \quad (13)$$

$$\text{SFOC}_{\text{relative}} = 0.455\text{LF}^2 - 0.71\text{LF} + 1.28 \quad (14)$$

式中: $\text{SFOC}_{\text{relative}}$ 是船舶不同引擎负荷系数下的燃油效率, 变化范围为0到1。 $\text{SFOC}_{\text{relative}}$ 可由船舶最大燃油效率设计值 $\text{SFOC}_{\text{base}}$ 和引擎负荷系数LF计算。

2.2 基于引擎功率的核算方法

基于引擎功率的核算中, 综合考虑船舶的载重、引擎功率以及在不同工况下的航运特征和活动时间, 碳排放总量 $E_{i,j,k}$ 计算公式如式(15)所示^[46,50-51]。

$$E_{i,j,k} = \text{VAN}_i \times \sum (P_i \times \text{LF}_{i,j,k} \times \text{EF}_{i,j,k} \times T_{j,k}) \quad (15)$$

2.3 基于发动机效率的核算方法

航运发动机效率是影响船舶航运的关键因素, 充分考虑船舶发动机效率的航运碳排放量的核算^[43]如下。

$$E_{j,k} = \text{EF}_j \times \text{LF}_{j,k} \times \frac{P_j}{\eta_j} \times T_{j,k} \quad (16)$$

式中: $\text{LF}_{j,k}$ 为船舶 j 在航线 k 上的平均发动机负荷因子, 包括船舶在航线 k 上的机动、慢速巡航和全速巡航等不同操作模式; P_j 为船舶 j 的额定主发动

机功率, η_j 为船舶 j 的发动机效率; $T_{j,k}$ 为船舶 j 在航线 k 上航程持续时间。

2.4 基于自动识别系统的核算方法

IMO《国际海上人命安全公约》规定 300 总吨及以上的商业船舶及所有尺寸的客船必须安装船舶跟踪系统, 即自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS)。基于 AIS 可获取船舶静态信息 (如 IMO 识别编号、尺寸、重量、名称、类型)、动态信息 (位置、航向、速度、航行时长、航线、平均速度和海上各点之间的行驶时间) 和航程信息 (目的地、吃水深度、到达时间等)。AIS 数据的核算方法基于高时间分辨率的船舶动态数据, 不仅可显著提高航运碳排放估算精度, 还可获取 CO₂ 排放量在不同航线、季节、货运等因素下的分配情况^[52]。基于 AIS 的航运碳排放估算方法包括船舶交通排放评估模型 (Ship Traffic Emission Assessment Model, STEAM)^[53]、船舶排放清单模型 (Shipping Emission Inventory Model, SEIM)^[13]、船舶交通能源及环境模型 (Ship Traffic Energy and Environmental Model, STEEM)、船舶能源与排放模型 (Ships Energy and Emissions Model, SENEM)^[40] 等。目前, STEAM 已成为国内外普遍使用的方法^[54-55], 被认为是估算航运碳排放动态轨迹的最优方法^[42]。

在核算一定数量船舶的排放总量时, 可采用逐艘船舶引擎功率法^[47,56-58]。该方法充分考虑船舶动力设备中主机、辅机和锅炉的碳排放, 即单艘船舶 CO₂ 排放量是由船舶主机 (E_M)、辅机 (E_A) 和锅炉排放量 (E_G) 的之和, 数量为 p 的船舶 CO₂ 排放总量 E 由所有船舶排放总量之和, 即式 (17)。 E_M 、 E_A 和 E_G 可分别由式 (18)、式 (19) 和式 (20) 计算:

$$E = \sum_p (E_M + E_A + E_G) \quad (17)$$

$$E_M = \text{MCR} \times \text{LF}_M \times \text{MEF} \times \text{TM} \times \text{CF}_M \times 10^{-6} \quad (18)$$

$$E_A = \text{ECR} \times \text{LF}_A \times \text{AEF} \times \text{TA} \times \text{CF}_A \times 10^{-6} \quad (19)$$

$$E_G = \text{GLD} \times \text{GEF} \times \text{TG} \times \text{CF}_G \times 10^{-6} \quad (20)$$

式中: MCR、ECR 和 GLD 分别为船舶主机、辅机和锅炉的额定功率; LF_M 和 LF_A 分别为船舶主机和辅机的负荷系数; MEF、AEF 和 GEF 分别为主机、

辅机和锅炉; TM、TA 和 TG 分别为主机、辅机和锅炉累计工时; CF_M 、 CF_A 和 CF_G 分别为主机、辅机和锅炉排放控制措施调整系数。船舶 LF_M 由船舶实际运行速度决定, 可由式 (5) 核算, LF_A 则与船舶类型和运动状态有关。但当船舶航运过程中船体阻力增加时, LF_M 与实际船速存在差异, 需考虑主机负荷系数修正因子 δ ^[56,59]。辅机及锅炉负荷系数与船型和工况有关, 可采用 IMO 数据^[3]。

2.5 基于贸易驱动的核算方法

贸易驱动的核算方法将航运经贸活动水平数据与航运碳排放量之间建立对应关系, 展示了经济发展与航运活动之间的内在联系。在基于货物运输燃油消耗和排放因子的核算方法中, 通过结合航运货物运输的燃油消耗率和运输距离, 可核算航运碳排放量^[60], 如式 (21) 所示。

$$E = \sum_{l=1}^n Q_{lr} \times \text{TD}_r \times F_{lm} \times \text{EF} \times 10^{-6} \quad (21)$$

式中: l 、 r 和 m 分别是船型、活动区域和燃油类型; Q_{lr} 是运输量; TD_r 是沿主要航线的平均运输距离; F_{lm} 表示燃油消耗率 (kg fuel/kt · Nm)。

基于双边贸易流和航次航运排放清单模型 (Voyage-based Shipping Emission Inventory Model, VoySEIM) 的航运能源效率数据, 全球航运贸易排放矩阵模型 (Global Trade Emission Matrix of Shipping Model, GTEMS) 可用于估算国际贸易相关的航运碳排放量^[5]。该模型从双边贸易总量中分离出海运贸易量后, 将每个海运贸易流与相应类型的运输船只进行匹配, 再结合排放影响指数和双边航线距离, 最终核算每个贸易流的航运碳排放量。GTEMS 模型的一般公式如式 (22) 所示。

$$E_{o,d,c,v} = W_{o,d,c} \times \text{SP}_{o,d,c} \times \text{VD}_{c,v} \times \text{EEOI}_{v,o,d} \times D_{o,d} \times 10^{-6} (o \neq d) \quad (22)$$

式中: $E_{o,d,c,v}$ 是贸易商品 c 由 v 型船舶从 o 国出口到 d 国所产生的海运碳排放量; $W_{o,d,c}$ 是贸易商品 c 从 o 国出口到 d 国的总重量; $\text{SP}_{o,d,c}$ 是贸易商品 c 从 o 国出口到 d 国的海运比例; $\text{VD}_{c,v}$ 是船只类型 v 运载贸易商品 c 的船只分布系数; $\text{EEOI}_{v,o,d}$ 是船只类型 v 从 o 国航行到 d 国的能效运营指标 (g CO₂ t⁻¹Nm⁻¹); $D_{o,d}$ 是标准化航线网络中从 o 国到 d 国的航运距离。

EEOI_{v,o,d}可由式(23)计算。

$$EEOI_{v,o,d} = \frac{\sum_s \sum_i [E_{v,s,o,d,i} \times (1 + BAF_{v,s})]}{\sum_s \sum_i (DWT_i \times TCU_{v,s} \times D_{v,s,o,d,i})} \times 10^6 (o \neq d) \quad (23)$$

式中: $E_{v,s,o,d,i}$ 是指航行于 o 国与 d 国之间航次 i 的航运碳排放量, 按航运类型 v 和载重船型 s 分类; $BAF_{v,s}$ 是船舶停泊调整系数; DWT_i 是船舶在第 i 个航次的载重吨位, 与动态活动无关; $TCU_{v,s}$ 是总容量利用率。

基于贸易海运周转量数据, 结合实际运输货物船舶类型及能耗差异, 可核算贸易海运碳排放^[9], 如式(24)所示。

$$C^t = \sum_i C_i^t = \sum_i E_i^t \times EF^t = \sum_i T_i^t \times R_i^t \times EF^t = \sum_i V_i^t \times D_i^t \times R_i^t \times EF^t \quad (24)$$

式中: C_i^t 为 t 年第 i 种船舶燃油碳排放量; E_i^t 为 t 年 i 型船舶的能源消耗量; T_i^t 为 t 年 i 船型的货物周转量; R_i^t 为 t 年 i 船型的单位运输周转量能耗 (kg fuel/t); V_i^t 为 t 年 i 船型的海运量 ($t \cdot Nm^{-1}$); D_i^t 为 t 年 i 型船型货物运输距离。

此外, 在全球气候变化与国际地缘冲突交织的背景下, 特殊航道 (如北极航道) 及其航线布局引发关注^[61]。为系统评估其碳排放影响, 贸易—航运—排放一体化模拟预测 (Trade-Integrated Shipping Emissions Projection, TISEP) 模型应运而生。该模型整合了 AIS 数据、多源贸易大数据和海洋气象数据, 能够对气候变化、海冰情势、全球贸易流、船舶航行路线、船舶碳排放等多维度、多时空尺度的复杂地球—人类系统交互过程开展高精度模拟, 评估新航道对全球航运格局和碳排放的影响^[62]。

综上所述, “自上而下”核算方法简便, 但燃油数据依赖燃油供应商或燃油监控系统提供的燃油消耗统计数据, 存在数据缺失或与航运实际消耗燃油量存在差异的问题, 且无法反映航运碳排放时空分布规律^[63-64]。“自下而上”可精准核算单一船只碳排放量, 估算结果更接近实际航运情况^[40]。然而, “自下而上”方法目前多采用发动机负荷因子、工况作业时长、燃油消耗率和 EF 等平均值, 而这些参数受船舶大小、船龄、燃料、装载量、市场波

动等多因素综合影响, 导致估算结果存在一定的不确定性^[65-66]。此外, 需要注意的是, AIS 数据在使用前需进行预处理, 包括动态数据的清洗和静态数据的匹配^[55,67]。动态数据清洗包括剔除重复数据和异常数据以及填补缺失数据, 静态数据匹配则是将 AIS 动态数据与船舶特征信息进行匹配。贸易法依赖货运船只的活动水平数据, 未考虑其他船型的排放情况, 且忽略了不同贸易区和航线上的地理环境特征及控制政策的差异, 无法体现航运作业动态变化。

“自上而下”和“自下而上”两种方法既可以单独使用, 也可以根据实际需求混合使用, 从而提高估算的精确度和准确度^[68]。近年来, 随着人工智能技术的发展, 集成学习模型和深度学习模型等机器学习方法极大提升了 AIS 数据清洗和船舶行为识别的准确率和处理效率^[69-70]。未来, “自下而上”将逐渐发展为航运碳排放核算的主流方法。

3 航运燃料碳排放全生命周期评估

传统“自上而下”和“自下而上”方法均属于 TtW 范畴。随着 LCA 框架体系的逐步完善和成熟, 国际社会对船用燃料涵盖原料、生产、运输及燃烧功能的全链条碳排放总量日益重视, 驱动国际航运碳排放核算体系发生根本性转变, 即从 TtW 全面过渡到涵盖“源至油箱 (Well-to-Tank, WtT)”和 TtW 的 WtW 体系^[71-72]。此外, 随着航运碳排放减排力度的加强、碳排放政策的收紧, 替代能源被视为减污降碳的首选方案, 甲醇、氨、氢、生物柴油、生物液化天然气 (LNG) 等燃料使用占比逐渐提升。然而, 替代能源是否为“真”低碳或零碳能源还存在很大的不确定性。

LCA 对于评估替代燃料可持续性具有重要作用, 既能确定船舶燃料全生命周期的碳排放强度, 又能区分船舶燃料全生命周期内各阶段碳排放强度, 在 IMO 净零框架和船舶产品碳足迹标准中处于核心地位。航运碳排放 LCA 的核算框架如图 1 所示, 包含原料开采、原料运输、原料加工、燃油储存、燃油运输、燃油加注及燃油使用等阶段。LCA 核算结果显示, 使用替代燃料能够有效减少

TtW 阶段的碳排放总量，然而其原料开采、运输、加工、储存和运输阶段的碳排放亦不容忽视^[73]。如图 2 所示，LCA 核算的灰氨 WtT 的碳 EF 是 TtW 的 7 倍，约占 WtW 的 90%；灰氢 WtT 的碳 EF 是 TtW 的 20 倍，约占 WtW 的 95%。此外，LCA 核算结果显示，化石燃料生产的甲醇（即灰甲醇）碳排放强度并不低于传统船用柴油和 LNG，不符合航运脱碳目标，而使用有机物回收和碳捕集生

成的绿甲醇中的负碳效应能够有效实现航运碳减排^[74]。针对重油、LNG、柴油和甲醇的 TtW 和 WtW 对比研究结果显示，TtW 模式下 LNG 可减排约 25%，但 WtW 的 LCA 核算体系下其减排幅度可降至 10%~20%，LNG 燃料 WtT 阶段的碳排放总量可能是 TtW 的 100 倍；绿色甲醇可实现高达 70%~90% 的全生命周期碳减排，而灰氨全链条碳排放强度甚至远大于柴油^[39,75-77]。

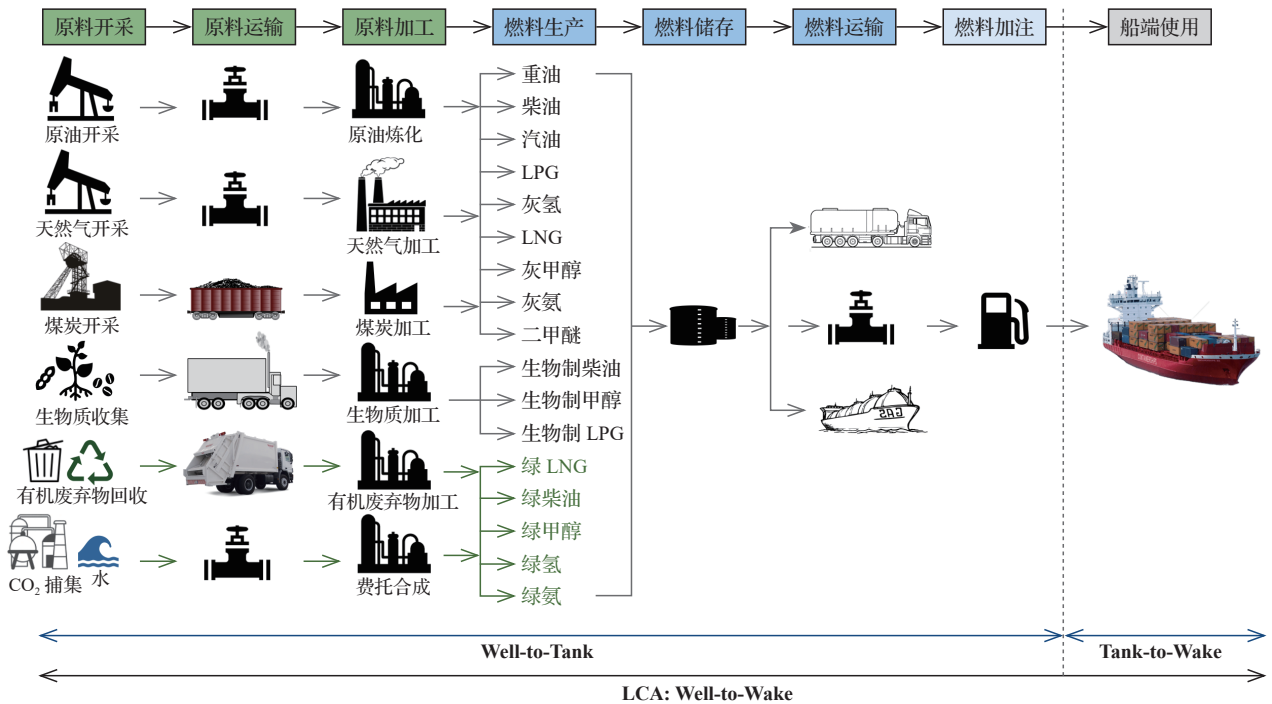


图 1 船用燃料全生命周期碳排放核算框架

Fig.1 Framework for the LCA of carbon emission from marine fuels

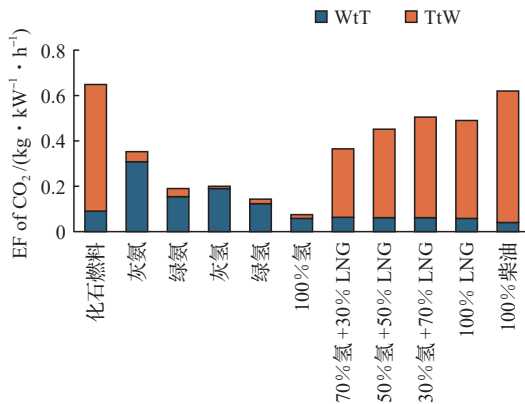


图 2 船用燃料全生命周期碳排放因子^[78-79]

Fig.2 LCA based carbon Emission Factors (EF) of marine fuels

因此，不同原料制备路径生产的替代燃料，其上游阶段碳排放强度存在显著差异，将会影响航运全生命周期的碳排放总量核算^[78,80-81]。此外，燃料生产前端的能源体系是否为绿色能源、生产末端是否引入碳捕集与封存技术，也会影响全路线碳足迹评价结果^[72,82]。替代燃料的“绿色”“低碳”或“零碳”属性，高度依赖于其具体的原料来源和生产路径，必须通过 LCA 进行个案核算，以避免间接碳排放和环境负面影响。这不仅凸显了 LCA 在引导技术投资与政策制定方面的关键作用，也验证了科学量化与比较不同燃料路径综合环境效益的重

要性。综上所述, 航运业脱碳的终极路径并非单一的燃料替代, 而是必须与能源系统的全面绿色化协同推进。

4 区域和航线航运碳排放量核算

在 LCA 核算框架中, WtT 阶段的碳总量主要取决于原料的生产工艺与运输路径, 而 TtW 阶段的精准核算则核心取决于具体的航运航线及其动态活动特征。开展区域范围和航线上航运碳排放量的核算, 可获取不同船型及区域或航线上航运碳排放总量的时空动态变化特征, 识别航运碳排放的热点区域和航线^[13,39]。区域和航线上的航运碳排放核算需明确船舶航线信息, 包括航线的出发点、途经

点、终点、海域和港口等, 通过将空间和航线划分为网格, 分配各个网格的索引号, 进而核算区域范围和航线上高精度航运碳排放^[14,83-84], 如图 3 所示。区域和航线船舶碳排放总量可由式 (25) 和式 (26) 计算。

$$Q_j = \sum_{i=0}^n E_{i,j} \quad (25)$$

$$Q = \sum_{j=0}^m Q_j \quad (26)$$

式中: j 表示网格编号; i 为船舶类型; m 为空间区域内网格单元数; n 表示航行经过网格 j 的所有船舶数量; $E_{i,j}$ 为船舶 i 在网格 j 的排放量; Q_j 为网格 j 的船舶排放总量; Q 为区域和航线所有船舶碳排放总量。

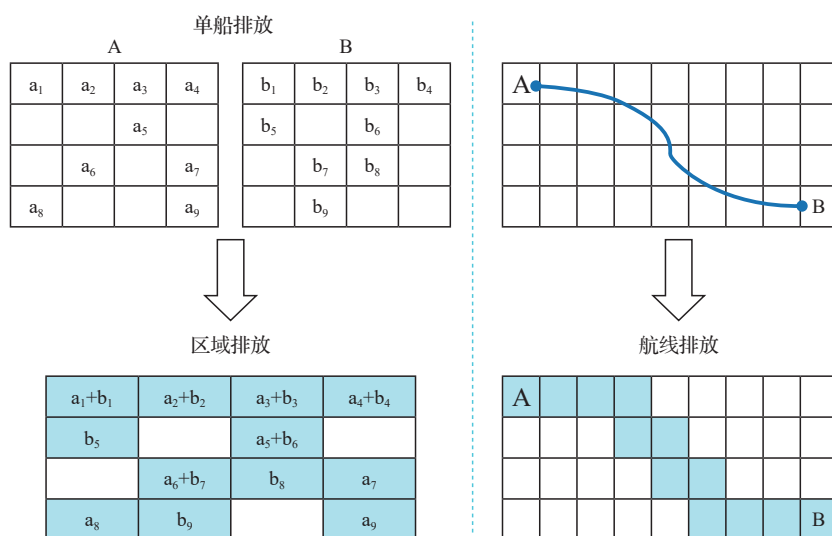


图 3 区域和航线船舶碳排放量核算

Fig.3 Accounting of carbon emissions from ships in regions and shipping routes

需要注意的是, 在交通密集区域, 船舶 AIS 信号丢失或重叠会导致部分船舶活动数据缺失, 从而低估碳排放总量。船舶碳排放量的简单叠加, 不仅忽略了风速、洋流、船体污损等外部阻力对实际负载和燃油消耗的动态影响, 也未考虑区域排放控制政策对航运航线、航速和燃料选择的约束效应。此外, 网格尺寸过大会模糊航运空间细节, 难以精准识别港口、狭窄航道、贸易热门航线等真正的碳排放热点区; 网格尺寸过小可能因数据稀疏和计算复杂程度增加而引入新的噪声。因此, 如何实现空

间分辨率与估算精度之间的最优平衡, 是提高区域和航线航运碳排放核算准确性的核心挑战与关键权衡。

5 航运碳排放驱动因素评估方法

精准的核算是识别真实驱动因素的基础, 而对主导驱动因素的深刻理解又是制定有效减排政策的依据。对数平均迪氏指数法 (Logarithmic Mean Divisia Index Method, LMDI) 模型是评价各影响因素对航运碳排放的影响权重, 该模型有效避免了残差和

零值问题^[85]，被广泛应用于驱动因素的识别。以往研究中，LMDI 多关注能源消耗、运输强度、货类结构、经济发展四个因素^[9,86]。基于 LMDI 的船舶碳排放驱动因素分解模型如式 (27) 所示：

$$C^t = \sum_i \frac{C_i^t}{E_i^t} \times \frac{E_i^t}{T_i^t} \times \frac{T_i^t}{T^t} \times \frac{T^t}{G^t} \times \frac{G^t}{P^t} \times P^t \quad (27)$$

式中： C_i^t 为 t 年 i 船型 CO_2 排放量； E_i^t 表示 t 年 i 型船舶的能源消耗量； T_i^t 表示 t 年 i 型船舶的货物周转量； T^t 表示 t 年船舶总货物周转量； G^t 表示 t 年的航运 GDP 值； P^t 表示 t 年的总人口数。各类船舶的货运周转量可由式 (28) 核算。

$$T_i = M_i \times D_i \quad (28)$$

式中： T_i 为 i 船型的货物周转量； M_i 为 i 船型的货运量； D_i 为 i 船型货物运输距离。客运和货运船舶总货物周转量 T 由式 (29) 计算。

$$T = F + \lambda P \quad (29)$$

式中： F 为货运周转量； P 为客运周转量； λ 为客运周转量换算为货运周转量的折算系数，一般取值为 0.3^[87]。式 (27) 可进一步简化为式 (30)。

$$C = \sum_i EF \times EI_i \times TS_i \times TI \times G \quad (30)$$

式中： TS_i 为 i 船型运输的货物在总运输货物中所占的比例，即货类结构； TI 为经济发展对航运的依赖程度，即运输强度； G 为使用水运业生产总值代表经济发展水平，即经济因素。目标年航运碳排放总量变化 ΔC_{tot} 是目标年排放量 C^t 和基准年 C^0 的差值，可进一步分解为各因素对航运碳排放的影响^[86]。

$$\Delta C_{tot} = C^t - C^0 = \Delta C_{ce} + \Delta C_{ei} + \Delta C_{ts} + \Delta C_{ti} + \Delta C_g \quad (31)$$

式中： ΔC_{ce} 为排放因子， ΔC_{ei} 为能源因素， ΔC_{ts} 为货物结构， ΔC_{ti} 为运输强度影响， ΔC_g 为经济增长影响。各因素的影响可进一步由对应 t 年的量与基准年的量进行核算。

$$\Delta C_{ei} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{EI_i^t}{EI_i^0} \quad (32)$$

$$\Delta C_{ts} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{TS_i^t}{TS_i^0} \quad (33)$$

$$\Delta C_{ti} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{TI_i^t}{TI_i^0} \quad (34)$$

$$\Delta C_g = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{G^t}{G^0} \quad (35)$$

然而，船舶航运碳排放是一个受多种因素共同作用的复杂系统。在船体特征方面，除基础参数外，航运碳排放核算驱动因素的识别还需纳入引擎速度分类、燃油类型、燃油模式、船舶运载量、尾气处理措施、船舶作业性质、船龄等因素^[34,41,55,88-90]。在船舶活动方面，则需要综合考虑引擎效率、航速、工况、作业时长、负荷量、装载频率等动态参数。在外部环境方面，如港口密度、航道交通、市场经济波动、贸易结构演变、新型燃料替代、地缘政治局势、区域减排政策，以及环境气候变化和社会活动等，亦对排放路径产生显著影响^[62,91-95]。值得关注的是，新兴经济体海上贸易的持续增长，正推动不同水域航运碳排放强度发生结构性转变^[1]。由此可见，船舶碳排放是多因素融合的复杂系统。LMDI 模型虽能实现因素分解，却难以刻画多因素之间的非线性交互与动态反馈机制，因而在识别航运碳排放真实驱动因素方面存在一定的局限性。未来研究应致力于构建能够融合多因素动态耦合的新型评估框架，并注重引入符合区域特征的本地化因素，以提升模型在具体政策场景中的适用性与解释力。

6 航运碳排放核算的不确定性分析

影响航运碳排放的因素繁多，其总量核算的不确定性主要来自 AIS 数据及其处理方法、船舶特征信息及发动机负荷计算、燃油量及 EF^[54]。

AIS 数据及其处理方法的不确定性，主要是由船舶 AIS 数据覆盖率不足、数据质量问题（残缺、异常、重复等）和时间分辨率低所致。在交通繁忙和数据接收不稳定时，船舶轨迹 AIS 数据易出现缺失^[96]。非商用船舶（游艇、帆船、钓鱼船、摩托艇等）在特定水域是碳排放的重要贡献源^[52,97]，但其 AIS 数据普遍缺失，易造成航运碳排放总量被低估^[98]。此外，特殊水域的航运工况变化频繁，AIS 数据的时间分辨率过低会导致某些高排放工况被忽视，而提高 AIS 数据时间分辨率，可显著提高核算的准确性^[99-100]。

船舶特征信息与发动机负荷计算环节的核算不确定性, 主要涉及船舶特征信息不完整、主机负荷计算方法不统一, 以及辅助设备和辅助系统负荷计算方法尚不成熟三个方面。船舶特征信息中, 船舶尾气处理设施是影响航运碳排放的重要因素之一, 然而其类型和实际处理效率数据较为缺乏^[15]。当前难以统计所有船舶的主/辅发动机型号和功率, 采用参考值的核算结果与实际不符^[98]。此外, 船舶航速受水流方向、风速风向、载重和船体状况等多种因素影响, 若忽视这些外部因素可能导致主机负荷估算不足, 进而低估航运碳排放量^[39,40,101]。同时, 不同工况下(如运行模式、航速、航线和货物载荷)主机和辅机负荷功率持续变化, 使得其负荷因子的计算更为复杂^[102]。而采用默认负荷因子的方法, 未考虑船型、货运装载量及航运工况的动态变化, 最终导致船舶碳排放量与实际排放量存在差异。

燃料消耗与 EF 的不确定性, 主要源于船舶燃油消耗记录不完整及精细化 EF 缺失。高精度多类型燃油消耗量的缺失, 是影响航运碳排放量核算的重要因素之一。不同船龄船舶的引擎性能和燃油效率存在差异, 船龄对 EF 影响常被忽略。若锅炉 EF 较高, 船舶在机动、在泊及锚泊状态下主要依赖锅炉, 锅炉碳排放占比接近 30%, 但其数据采集更为困难, EF 不确定性更大^[88]。不同水域环境下船速、工况、区域贸易、控制措施, 甚至船员操作习惯存在差异, 本地化 EF 更符合实际情况^[12,103]。使用推荐而非实测 EF, 可能导致排放量的核算与实际不符。此外, 随着清洁燃料的逐步推广和应用, 清洁燃料及不同比例混合燃料的消耗量和 EF 亟需测量和核算, 以提升航运碳排放核算的精度和准确度^[104]。

7 总结与展望

航运碳排放是全球碳治理体系中的重要一环, 现有研究在 EF、总量核算方法与影响因素识别上已取得显著进展。本研究通过系统梳理发现, 现有航运碳排放核算在数据精准性、模型综合性、评估全面性及系统边界完整性方面仍存在局限, 制约了其支撑深度减排决策的效能。未来航运碳排放研究需

超越对单一参数的补充或者修正, 应致力于构建一个多参数、多尺度、多维度、动态化的精准核算与评估体系。尤为关键的是, 必须确立“科学核算—驱动力评估—精准政策”的闭环逻辑, 为航运碳减排科学决策提供坚实的方法支撑。未来相关研究可重点在以下 4 个关联互补的方向上寻求突破。

(1) 构建高时间分辨率动态 EF 库。现有航运碳排放核算研究多依赖通用 EF, 难以表征由船龄、燃油质量、尾气处理装置、航线等多因素导致的实际航运碳排放差异。且近年来, 随着碳排放技术的发展和船用燃料结构的优化, 多船型 EF 亟待添加和更新。采用高精度、微型化和可集成的检测技术开展 EF 研究, 构建多元化 EF 库, 可实现真实航运碳排放量的精准量化。

(2) 构建多因子驱动的综合核算框架。当前航运碳排放核算模型大多将航运视为孤立体系, 忽略了排放控制政策、国际贸易波动、社会经济发展、气候变化、海况等外部因素的驱动作用。通过耦合 AIS、政策、贸易、气候与海洋等多源大数据, 并引入随机森林、神经网络等人工智能算法, 构建能够模拟“政策—气候—贸易—航运”复杂反馈过程的航运碳排放多因子综合核算模型。这不仅显著降低核算结果的不确定性, 更能实现对不同减排情景下碳排放动态的科学预测, 从而为航运碳减排策略制定提供前瞻性视角。

(3) 拓展减污降碳的综合评估维度。除 CO₂ 外, 航运排放的多种有毒有害大气污染物会对生态环境安全和人体健康构成威胁。未来必须将视角从单一的碳核算拓展至减污降碳的协同效应评估。这需要将碳排放核算与空气质量模型、大气化学模型及健康风险评估模型进行跨学科整合, 通过定量评估航运排放对大气环境与公共健康的综合影响, 从而识别出既能有效降碳又能最大程度改善空气质量的协同路径, 推动航运业迈向真正意义上的绿色高质量发展。

(4) 完善全生命周期核算支撑航运深度脱碳。相较于传统 TtW, WtW 的全生命周期碳足迹框架将航运碳排放核算边界从船舶运营单一环节, 拓展至覆盖燃料生产、船舶制造与回收的完整链条, 是

IMO 温室气体减排战略实施的关键技术支撑。这不仅提高了航运碳排放核算的准确性,更改变了碳排放驱动力的评估框架。这标志着航运碳排放强度的关键决定因素从单一的船舶能效,转变为一个涵盖上游能源碳强度、燃料生产运输及船舶制造、营运、循环利用效率等因素的全链条综合评价体系。

该体系能为船舶的绿色设计、绿色运营与绿色拆解提供数据支持,从而推动从更宏观的系统视角规划航运业的可持续发展路径。未来研究需进一步开发适用于中国国情和航运特点的本地化 LCA 数据库与核算工具,以精准服务于我国“双碳”目标下的航运绿色低碳转型。

参考文献 (References):

- [1] WANG X T, LIU H, ZHANG J N, et al. Global shipping emissions from 1970 to 2021: structural and spatial change driven by trade dynamics[J]. *One Earth*, 2025, 8(4): 101243.
- [2] FABER J, HANAYAMA S, ZHANG S, et al. Fourth IMO GHG study 2020[R]. 2020.
- [3] BUHAUG Ø, CORBETT J J, ENDRESEN Ø, et al. Second IMO CHG study 2009[R]. 2009.
- [4] 刘欢, 商轶, 金欣欣, 等. 船舶排放清单研究方法及其进展[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 1-12.
LIU Huan, SHANG Yi, JIN Xinxin, et al. Review of methods and progress on shipping emission inventory studies[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1): 1-12.
- [5] WANG X T, LIU H, LYU Z F, et al. Trade-linked shipping CO₂ emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(11): 945-951.
- [6] EYRING V, ISAKSEN I S A, BERNTSEN T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4735-4771.
- [7] International Maritime Organization (IMO), Marine Environment Protection Committee(MEPC). Resolution MEPC 391(81)-Annex 10: guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels[S]. 2024.
- [8] 张艳, 钱浩祺, 黎泉. “双碳”目标下中国航运业绿色转型展望[J]. *科技导报*, 2024, 42(19): 66-72.
ZHANG Yan, QIAN Haoqi, LI Quan. Expectation of green transformation of shipping industry in China under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(19): 66-72.
- [9] 马雪菲, 杨华龙, 邢玉伟. 中国国际贸易海运 CO₂ 排放特征及驱动因素研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(10): 2132-2142.
MA Xuefei, YANG Hualong, XING Yuwei. Study on characteristics and driving factors of CO₂ emissions from China's international maritime transportation sector[J]. *Resources Science*, 2018, 40(10): 2132-2142.
- [10] LU B, MING X, LU H M, et al. Challenges of decarbonizing global maritime container shipping toward net-zero emissions[J]. *npj Ocean Sustainability*, 2023, 2(1): 11.
- [11] 杨广浩. 高时空分辨率的中国原油海运 CO₂ 排放核算模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2024.
YANG Guanghao. Research on a high spatiotemporal resolution CO₂ emission accounting model for Chinese crude oil shipping[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2024.
- [12] ZHANG F, CHENY J, TIAN C G, et al. Emission factors for gaseous and particulate pollutants from offshore diesel engine vessels in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(10): 6319-6334.
- [13] YI W, WANG X T, HE T K, et al. The high-resolution global shipping emission inventory by the shipping emission inventory model(seim)[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17(1): 277-292.
- [14] YU H C, FANG Q L, FANG Z X, et al. Carbon footprints: uncovering spatiotemporal dynamics of global container ship emissions during 2015—2021[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 209: 117165.
- [15] JOHANSSON L, JALKANEN J, KUKKONEN J. Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 167: 403-415.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency. Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories final report[R]. 2009.
- [17] 邓宇昂, 张彦, 李秋娟, 等. 船舶尾气检测方法研究现状与展望[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(21): 1-18.
DENG Yuang, ZHANG Yan, LI Qiujuan, et al. Research status and prospect of ship exhaust detection methods[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(21): 1-18.

- [18] CARLTON J, DANTON S, GAWEN R, et al. Marine exhaust emissions research programme[R]. 1995.
- [19] ENDRESEN Ø, SORGARD E, SUNDET J K, et al. Emission from international sea transportation and environmental impact[EB/OL]. (2003-09-13)[2025-11-29]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2002JD002898>.
- [20] CORBETT J J, KOEHLER H W. Updated emissions from ocean shipping[EB/OL]. (2003-10-29)[2025-11-29]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003JD003751>.
- [21] European Commission and Entec UK Limited. Service contract on ship emissions: assignment, abatement and market-based instruments task 2b and c-NO_x and SO₂ abatement[R]. 2005.
- [22] EYRING V, KOHLER H W, VAN A J, et al. Emissions from international shipping: 1. the last 50 years[EB/OL]. (2005-09-15)[2025-11-29]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004JD005619>.
- [23] MOLDANOVA J, FRIDELL E, POPOVICHEVA O, et al. Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(16): 2632-2641.
- [24] CELO V, DABEK-ZLOTORZYNSKA E, MCCURDY M. Chemical characterization of exhaust emissions from selected Canadian marine vessels: the case of trace metals and lanthanoids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(8): 5220-5226.
- [25] KHAN M Y, RANGANATHAN S, AGRAWAL H, et al. Measuring in-use ship emissions with international and U.S. Federal methods[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2013, 63(3): 284-291.
- [26] SCHLAGER H, BAUMANN R, PETZOLD A, et al. Aircraft-based trace gas measurements in a primary European ship corridor [C] // *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC)*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007: 83-88.
- [27] SINHA P, HOBBS P V, YOKELSON R J, et al. Emissions of trace gases and particles from two ships in the southern Atlantic Ocean[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(15): 2139-2148.
- [28] 朱永祥, 张智答, 魏燕华, 等. 我国内河营运船舶二氧化碳排放特征及排放因子测试研究[J]. *中国水运*, 2024(23): 135-137.
ZHU Yongxiang, ZHANG Zhida, WEI Yanhua, et al. Research on the characteristics of CO₂ emissions and emission factor testing for inland shipping vessels in China[J]. *China Water Transport*, 2024(23): 135-137.
- [29] COOPER D A. Exhaust emissions from high speed passenger ferries[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(24): 4189-4200.
- [30] COOPER D A. Exhaust emissions from ships at berth[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(27): 3817-3830.
- [31] AGRAWAL H, MALLOY Q G J, WELCH W A, et al. In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(21): 5504-5510.
- [32] ZHANG F, CHEN Y, CHEN Q, et al. Real-world emission factors of gaseous and particulate pollutants from marine fishing boats and their total emissions in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(8): 4910-4919.
- [33] KHAN M Y, GIORDANO M, GUTIERREZ J, et al. Benefits of two mitigation strategies for container vessels: cleaner engines and cleaner fuels[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 5049-5056.
- [34] GRIGORIADIS A, MAMARIKAS S, IOANNIDIS I, et al. Development of exhaust emission factors for vessels: a review and meta-analysis of available data[J]. *Atmospheric Environment: X*, 2021, 12: 100142.
- [35] CZERMANSKI E, CIRELLA G T, ONISZCZUK-JASTRZABEK A, et al. An energy consumption approach to estimate air emission reductions in container shipping[J]. *Energies*, 2021, 14(2): 278.
- [36] WINNES H, FRIDELL E. Particle emissions from ships: dependence on fuel type[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2009, 59(12): 1391-1398.
- [37] 黄学良, 张洲, 杨威强, 等. 广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3162-3168.
HUANG Xueliang, ZHANG Zhou, YANG Weiqiang, et al. Emission factors and preliminary emission estimates of air pollutants from ships at berth in the Guangzhou port [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(8): 3162-3168.
- [38] CHU-VAN T, RISTOVSKI Z, POURKHESALIAN A M, et al. On-board measurements of particle and gaseous emissions from a large cargo vessel at different operating conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 832-841.
- [39] KRAMEL D, MURI H, KIM Y R, et al. Global shipping emissions from a Well-to-Wake perspective: the MariTEAM model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(22): 15040-15050.
- [40] MORENO-GUTIERREZ J, DURAN-GRADOS V. Calculating ships' real emissions of pollutants and greenhouse gases: towards zero uncertainties[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141471.

- [41] 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.
- [42] NUNES R A O, ALVIM-FERRAZ M C M, MARTINS F G, et al. The activity-based methodology to assess ship emissions: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 87-103.
- [43] CORBETT J J, LACK D A, WINEBRAKE J J, et al. Arctic shipping emissions inventories and future scenarios[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(19): 9689-9704.
- [44] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[Z]. 2006.
- [45] DENIZ C, DURMUSOGLU Y. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(1): 255-261.
- [46] 周君蕊, 邱培培, 肖凯, 等. 长江武汉段船舶大气污染物排放清单研究[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2024, 70(5): 623-628.
ZHOU Junrui, QIU Peipei, XIAO Kai, et al. Air pollutant emission inventory from ships in Wuhan section of the Yangtze River[J]. *Journal of Wuhan University(Natural Science Edition)*, 2024, 70(5): 623-628.
- [47] LI Y, ZHANG Y L, CHENG J X, et al. Comparative analysis, use recommendations, and application cases of methods for develop ship emission inventories[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(8): 1224.
- [48] SMITH T W P, JALKANEN J P, ANDERSON B A, et al. Third IMO GHG study 2014[R]. 2015.
- [49] United States Environmental Protection Agency. Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories[R]. 2009.
- [50] 曾凡涛, 吕靖. 厦门港船舶排放清单及港口生态效率评价[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(5): 2304-2311.
ZENG Fantao, LYU Jing. Ship emission inventory and valuation of eco-efficiency in Xiamen Port[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2304-2311.
- [51] CHEN D S, WANG X T, LI Y, et al. High-spatiotemporal-resolution ship emission inventory of China based on AIS data in 2014[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 776-787.
- [52] COELLO J, WILLIAMS I, HUDSON D A, et al. An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 114: 1-7.
- [53] JALKANEN J P, BRINK A, KALLI J, et al. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the baltic sea area[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(23): 9209-9223.
- [54] CHEN X Y, YANG J X. Analysis of the uncertainty of the AIS-based bottom-up approach for estimating ship emissions[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 199: 115968.
- [55] 邱琬钧. 基于 AIS 数据的全球海域船舶碳排放测算及时空分布特征研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2024.
QIU Wanjun. Research on carbon emission measurement and spatiotemporal distribution characteristics of global sea ships based on AIS data[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2024.
- [56] 刘跃, 陈俊峰, 田玉军, 等. 环渤海经济区海域船舶大气污染物排放特征[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(3): 523-530.
LIU Yue, CHEN Junfeng, TIAN Yujun, et al. Emission characteristics of atmospheric pollutants from ships in sea area Circum-Bohai Sea Economic Zone[J]. *Research of Environmental Science*, 2021, 34(3): 523-530.
- [57] YANG L, ZHANG Q J, ZHANG Y J, et al. An AIS-based emission inventory and the impact on air quality in Tianjin port based on localized emission factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 146869.
- [58] 张永林, 杨道源, 李悦, 等. 2023 年四川省内河船舶大气污染物和 CO₂ 排放清单研究[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(5): 1467-1475.
ZHANG Yonglin, YANG Daoyuan, LI Yue, et al. Study on the inventory of air pollutants and CO₂ emissions from inland vessels in Sichuan Province in 2023[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(5): 1467-1475.
- [59] 何斌. 重庆果园港船舶大气污染物排放清单及不确定性分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
HE Bin. Study on air pollutant emission inventory and uncertainty analysis of ships in Chongqing Orchard Port[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [60] LI C, BORKEN-KLEEFELD J, ZHENG J Y, et al. Decadal evolution of ship emissions in China from 2004 to 2013 by using an integrated AIS-based approach and projection to 2040[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(8): 6075-6093.
- [61] MUDRYK L R, DAWSON J, HOWELL S E L, et al. Impact of 1, 2 and 4 °C of global warming on ship navigation in the

- Canadian Arctic[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(8): 673-679.
- [62] ZHAO P J, LI Y L, ZHANG C X, et al. Arctic sea route access reshapes global shipping carbon emissions[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 8431.
- [63] EKMEKCIOGLU A, ÜNLUGENCOGLU K, ÇELEBI U B. Estimation of shipping emissions based on real-time data with different methods: a case study of an oceangoing container ship[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2022, 24(3): 4451-4470.
- [64] YU H C, FANG Z X, FU X J, et al. Literature review on emission control-based ship voyage optimization[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 93: 102768.
- [65] MARAGKOIANNI A, PAPAETHIMIOU S, ZOPOUNIDIS C. Mitigating shipping emissions in European ports: social and environmental benefits[M]. Cham: Springer, 2016.
- [66] SMIT R, CHU-VAN T, Suara K, et al. Comparing an energy-based ship emissions model with AIS and on-board emissions testing[J]. *Atmospheric Environment: X*, 2022, 16: 100192.
- [67] 余红楚, 方庆龙, 方志祥, 等. 船舶动态驱动的碳排放时空分布规律[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1769-1776.
YU Hongchu, FANG Qinglong, FANG Zhixiang, et al. Exploring the spatiotemporal distribution patterns of carbon emissions driven by massive ship trajectory data[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(3): 1769-1776.
- [68] MIOLA A, CIUFFO B. Estimating air emissions from ships: meta-analysis of modelling approaches and available data sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2242-2251.
- [69] YAN Z J, CHENG L, HE R, et al. Extracting ship stopping information from AIS data[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 111004.
- [70] REN Y M, YANG J, GUO Z Q, et al. Ship classification based on attention mechanism and multi-scale convolutional neural network for visible and infrared images[J]. *Electronics*, 2020, 9(12): 2022.
- [71] STATHATOU P M, PETRUNIA I, BARENTHIN T, et al. Marine scrubbers vs low-sulfur fuels: a comprehensive Well-to-Wake life cycle assessment supported by measurements aboard an ocean-going vessel[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(14): 7066-7080.
- [72] FAN A L, XIONG Y Q, YANG L, et al. Carbon footprint model and low-carbon pathway of inland shipping based on micro-macro analysis[J]. *Energy*, 2023, 263: 126150.
- [73] BICER Y, DINCER I. Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: a life cycle approach[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(2): 1179-1193.
- [74] 曹浩宇, 谢晓敏, 张庭婷, 等. 基于生命周期的航运甲醇燃料能耗与碳排放研究[J]. *环境科学学报*, 2026, 46(1): 534-544.
CAO Haoyu, XIE Xiaomin, ZHANG Tingting, et al. Life cycle-based energy consumption and carbon emissions of methane fuel in shipping[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2026, 46(1): 534-544.
- [75] JANG H Y, JEONG B, ZHOU P L, et al. Demystifying the lifecycle environmental benefits and harms of LNG as marine fuel[J]. *Applied Energy*, 2021, 292: 116869.
- [76] 范爱龙, 熊宇祺, 贺亚鹏, 等. 长江船舶替代燃料动力全生命周期碳足迹研究[J]. *船舶工程*, 2022, 44(12): 70-75.
FAN Ailong, XIONG Yuqi, HE Yapeng, et al. Lifecycle carbon footprint study for alternative fuel power of Yangtze River ships[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(12): 70-75.
- [77] JANG H Y, JEONG B, ZHOU P L, et al. Parametric trend life cycle assessment for hydrogen fuel cell towards cleaner shipping[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 372: 133777.
- [78] NGUYEN D, FERNANDES R J, TURNER J W G, et al. Life cycle assessment of ammonia and hydrogen as alternative fuels for marine internal combustion engines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 112: 15-30.
- [79] LEE K, MURAKAMI S, ÖLCER A I, et al. Hydrogen enriched LNG fuel for maritime applications: a life cycle study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 78: 333-343.
- [80] MASUM F H, TAN E C D, KOLODZIEJ C P, et al. Life cycle assessment of methanol from fossil, biomass, and waste sources, and its use as a marine fuel in dual-fuel engines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(43): 23239-23250.
- [81] ZINCIR B A, ARSLANOGLU Y. Comparative life cycle assessment of alternative marine fuels[J]. *Fuel*, 2024, 358: 129995.
- [82] PERCIC M, VLADIMIR N, FAN A L. Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in

- short-sea shipping: a case study of croatia[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115848.
- [83] QI X L, LI Z F, LI S Y, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of arctic shipping black carbon emissions based on AIS data 2016 to 2022[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 219: 118318.
- [84] 周玥. 基于 AIS 数据和模糊逻辑的港口船舶排放对环境影响的评估[D]. 威海: 山东交通学院, 2025.
ZHOU Yue. Environmental impact assessment of ship emissions based on AIS data and fuzzy logic theory in ports[D]. Weihai: Shandong Jiaotong University, 2025.
- [85] ANG B W, LIU F L, CHEW E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis[J]. *Energy Policy*, 2003, 31(14): 1561-1566.
- [86] 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 等. 广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 115-122.
WENG Shujuan, LIU Yingying, TANG Feng, et al. Driving forces and mitigation potential of CO₂ emissions for ship transportation in Guangdong Province, China[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1): 115-122.
- [87] LI W, LI H, ZHANG H X, et al. The analysis of CO₂ emissions and reduction potential in China's transport sector[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016(1): 1043717.
- [88] 蔡欣宇, 陈焱明, 陈奕恒, 等. 基于 AIS 数据的长三角沿海地区船舶碳排放估算与分析[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(8): 83-97.
CAI Xinyu, CHEN Yanming, CHEN Yiheng, et al. Estimation and analysis of carbon emissions from ships in the Yangtze River Delta coastal region based on AIS data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(8): 83-97.
- [89] 牟军敏, 张新生, 姚鑫, 等. 基于航行数据的北极地区船舶排放清单[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(5): 116-124.
MOU Junmin, ZHANG Xinsheng, YAO Xin, et al. Emission inventory of ship based on navigation data in Arctic region[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(5): 116-124.
- [90] STEPHENSON S R, WANG W S, ZENDER C S, et al. Climatic responses to future trans-arctic shipping[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(18): 9898-9908.
- [91] 林博闻, 马晓凤, 庄义彬. 港口船舶尾气排放量及泊位调度优化研究[J]. *中国航海*, 2024, 47(1): 88-96.
LIN Bowen, MA Xiaofeng, ZHUANG Yibin. Optimization of berth scheduling to control ship exhaust emissions in port[J]. *Navigation of China*, 2024, 47(1): 88-96.
- [92] 吴慧玲, 陈亚杰, 葛世伦. 中国水路运输碳排放驱动因素分析[J]. *中国水运*, 2023(5): 56-58.
WU Huiling, CHEN Yajie, GE Shilun. An analysis of the driving factors of carbon emissions from waterway transport in China[J]. *China Water Transport*, 2023(5): 56-58.
- [93] LIU H, MENG Z H, LYU Z F, et al. Emissions and health impacts from global shipping embodied in US-China bilateral trade[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(11): 1027-1033.
- [94] ZHANG W W, YI W, HE T K, et al. Ship emissions and reduction potential under domestic policies and international cooperation: a case study in Hainan, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 156: 253-266.
- [95] LI H J, JIA P, WANG X J, et al. Ship carbon dioxide emission estimation in coastal domestic emission control areas using high spatial-temporal resolution data: a China case[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 232: 106419.
- [96] LIU J, SHI G Y, ZHU K G. Vessel trajectory prediction model based on AIS sensor data and adaptive chaos differential evolution support vector regression(ACDE-SVR)[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(15): 2983.
- [97] KUO N, CHEN P. Quantifying energy use, carbon dioxide emission, and other environmental loads from island tourism based on a life cycle assessment approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(15): 1324-1330.
- [98] ZHANG Y Q, FUNG J C H, CHAN J W M, et al. The significance of incorporating unidentified vessels into AIS-based ship emission inventory[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 203: 102-113.
- [99] PENG X, WEN Y Q, WU L C, et al. A sampling method for calculating regional ship emission inventories[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 89: 102617.
- [100] TIAN Y J, REN L L, WANG H Y, et al. Impact of AIS data thinning on ship air pollutant emissions inventories[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(7): 1135.
- [101] LIU S K, PAPANIKOLAOU A. Fast approach to the estimation of the added resistance of ships in head waves[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 112: 211-225.
- [102] BROWN I N, ALDRIDGE M F. Power models and average ship parameter effects on marine emissions inventories[J]. *Journal*

-
- of the Air & Waste Management Association, 2019, 69(6): 752-763.
- [103] 曹亚丽. 典型区域船舶及港区大气污染物排放清单及特征研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
CAO Yali. Inventory and characteristics of air pollutants from ships and ports in typical regions[D], Shanghai: Shanghai University, 2021.
- [104] XING H, SPENCE S, CHEN H. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110222.