



调整能源结构对港口集装箱集疏运网络碳排放的影响

唐双世¹, 郭秀娟², 蒋柳鹏¹, 刘哲芸², 李彦冬¹, 王昕怡¹

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 港口作为国家重要的物流枢纽, 其集疏运网络的能源结构对于碳排放的影响尤为显著。以广州港集装箱集疏运网络碳排放为研究对象, 探讨调整能源结构对港口集装箱集疏运网络碳排放的影响。通过建立碳排放计算模型, 分析不同运输方式、能源类型和运输距离等因素对碳排放的影响。结果表明, 采用清洁能源替代传统能源, 如天然气、纯电代替柴油等燃油, 能显著减少港口集疏运网络碳排放。

关键词: 港口集装箱集疏运网络; 排放因子; 清洁能源; 能源结构; 广州港

中图分类号: U169; U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0045-06

Impact of adjusting energy structure on carbon emissions of port container collection and distribution network

TANG Shuangshi¹, GUO Xiujuan², JIANG Liupeng¹, LIU Zheyun², LI Yandong¹, WANG Xinyi¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: As an important logistics hub in China, the energy structure of the port collection and distribution network has a particularly significant impact on carbon emissions. Taking carbon emissions of the container collection and distribution network of Guangzhou Port as the research object, we discuss the impact of adjusting the energy structure on carbon emissions of the container collection and distribution network of the port. By establishing a carbon emission calculation model, we analyze the impact of different transportation modes, energy types and transportation distances on carbon emissions. The results show that the use of clean energy instead of traditional energy, such as natural gas and pure electric instead of diesel and other fuel oils, can significantly reduce carbon emissions of the port collection and distribution network.

Keywords: port container collection and distribution network; emission factor; clean energy; energy structure; Guangzhou Port

在全球温升的背景下, 中国积极响应联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)降碳号召, 于2020年9月正式提出了“双碳”目标, 交通运输行业作为能源消耗三大行业之一, 是实现“双碳”目标的重点领域, 根据国际能源署(IEA)的统计

数据, 2019年中国交通运输行业的碳排放量为9.01亿t, 占比9.12%。港口集疏运网络是交通运输行业的重要环节, 当前集疏运网络低碳研究多是从运输结构、组织模式、集疏运网络布局等方面展开^[1-4], 也有部分学者针对港口综合碳排放

收稿日期: 2023-12-28

作者简介: 唐双世(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水运工程经济。

开展研究^[5-6]。从研究范围来看,现有研究主要集中在进港船舶和港内货物装卸设备等港域内碳排放^[7-12],而对港口集疏运网络通道的碳排放关注较少。

综上,本文提出一个基于 IPCC 方法计算港口集疏运网络碳排放量的框架,该框架易于实现且可以区分各运输方式的碳排放量,并且通过分析能源结构调整对港口集疏运网络碳排放的影响,为碳达峰、碳中和的实施提供重要的信息支撑,有助于港口运输行业的可持续性发展。

1 数据与方法

1.1 碳排放量估算方法

港口集疏运网络是指一组港口、腹地城市和运输通道之间相互关联的系统,它们共同构成了一个复杂的物流网络^[13]。港口集疏运总量可以表示为:

$$Q = \sum_{i \in I_n} Q_i = \sum_{i \in I_n} \sum_{j \in J_n} q_{ij} \quad (1)$$

式中: Q 为港口集疏运总量; $i(I_n)$ 、 $j(J_n)$ 分别为腹地与运输方式(集合); Q_i 为腹地 i 的集疏运量;

q_{ij} 为腹地 i 以方式 j 的运输量。

本文采用 IPCC 提出的排放因子法对港口集疏运网络碳排放进行估算,该方法是目前应用范围较广的一种方法,计算公式为:

$$E_{\text{mission}} = D_A F_E \quad (2)$$

式中: E_{missions} 为碳排放项目碳排放量的估算值; D_A 为碳排放清单中碳排放源的活动数据; F_E 为排放因子,即单位某排放源使用量所释放的温室气体数量。

在集疏运网络系统中消耗的主要是移动燃烧源,可基于不同交通工具的类型、行驶里程、单位行驶里程燃料消耗等数据计算碳排放。碳排放系数的计算方法为:

$$F_{E,j} = MN_1 N_2 k K_j G \quad (3)$$

式中: $F_{E,j}$ 为第 j 种运输方式的碳排放系数, M 为平均低位发热量; N_1 为单位热值含碳量, N_2 为碳氧化率, k 为碳原子转化系数, K_j 为运输方式的单位载质量与距离的油耗量, G 为集装箱重箱平均质量。各运输方式的运输能耗强度以及碳排放系数见表 1。

表 1 运输能耗强度及碳排放系数

运输类型	工具(燃料)类型	运输能耗强度系数	碳排放系数/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{TEU}^{-1}$)
铁路	内燃机	0.48 kg 标准煤/(100 t·km) *	0.15
公路	柴油	2.69 kg 标准煤/(100 t·km) *	0.85
	液化天然气(LNG)	0.75 L/(t·km) ^[14]	0.49
水运	柴油	0.67 kg 标准煤/(100 t·km) *	0.21
	LNG	17.57 g/(t·n mil) ^[15]	0.09

注:带*数据来源于《2019年中国能源统计年鉴》^[16]。

港口集装箱集疏运网络的二氧化碳排放量可表示为^[17]:

$$E = \sum_{i \in I_n} \sum_{j \in J_n} E_{ij} = \sum_{i \in I_n} \sum_{j \in J_n} F_{E,j} L_{ij} Q_i P_{ij} \quad (4)$$

式中: E 为港口集装箱集疏运网络碳排放总量, E_{ij} 为腹地 i 以运输方式 j 运至港口产生的碳排放量, L_{ij} 为腹地 i 以运输方式 j 运至港口的距离, Q_i 为腹地 i 的集装箱量, P_{ij} 为腹地 i 选择运输方式 j 的概率。

1.2 碳排放系数结果比较

将本文计算得到的碳排放系数与既有文献对

比,见表 2。可以看出,本文根据广州港集装箱运输方式计算得到的碳排放系数与既有文献对于碳排放系数计算数据较为接近。其中,文献[18]中公路运输碳排放系数综合考虑 LNG、柴油集卡得出,因此其碳排放系数介于本文 LNG 集卡与柴油集卡碳排放系数之间,文献[19]和[20]则是以柴油集卡能耗为计算依据与本文计算结果较为接近,而文献[21]是对货物周转量碳排放的综合考量,而不是对交通运输过程中碳排放水平的单独考量,本文旨在计算港口集疏运网络运输通道产生的碳排放,因此碳排放系相对综合考量值较小。

表 2 计算得到的碳排放系数与既有文献结果比较

来源	年份	运输类型	碳排放系数/($\text{kg}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{TEU}^{-1}$)	本文碳排放系数/($\text{kg}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{TEU}^{-1}$)
文献[18]	2019	公路	0.63	0.49~0.85
		铁路	0.17	0.15
文献[19]	2021	公路	0.77	0.49~0.85
		铁路	0.12	0.15
		水路	0.09	0.09~0.21
文献[20]	2023	公路	0.88	0.49~0.85
		铁路	0.15	0.15
文献[21]	2023	公路	1.42	0.49~0.85
		铁路	0.17	0.15
		水路	0.13	0.09~0.21

2 实例分析

基于港口集疏运网络, 本文做如下假设:

- 1) 假设 1, 由于集疏运网络中转的比例较低, 暂不考虑中转过程产生的碳排放;
- 2) 假设 2, 在预测碳排放时, 暂不考虑腹地城市的拓展及动态变化;
- 3) 假设 3, 纯电能源产生的间接碳排放暂不

计入港口集疏运网络的碳排放。

现有能源结构与优化能源结构的区别主要在于清洁能源的应用比例, 见图 1。LNG 正加快投入到能源应用中, 而纯电能源的充电问题也将以标准化箱式换电模式解决, 未来 10 年纯电能源将实现平价, 故能源结构优化模式下将投入更多的纯电集卡以及纯电船舶。

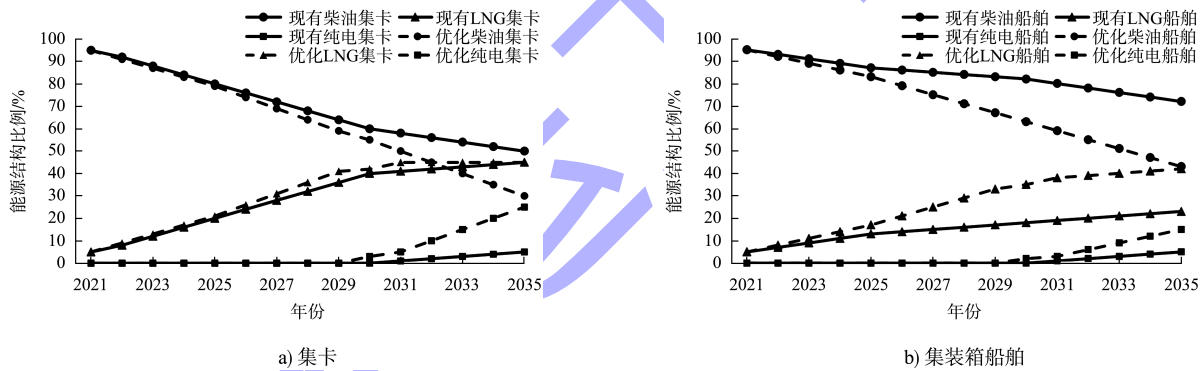


图 1 广州港集疏运网络能源结构

2.1 现有与优化能源结构下碳排放量预测

在现有的能源结构下, 利用 IPCC 方法和 2022—2035 年广州港集装箱集疏运预测量数据, 计算得到广州港集装箱集疏运网络碳排放量, 见

图 2。从整体上来看, 现有能源结构下广州港集装箱集疏运网络碳排放保持低速增长, 2022—2035 年年均增长率为 2.02%, 由 128.66 万 t 增长至 166.89 万 t。

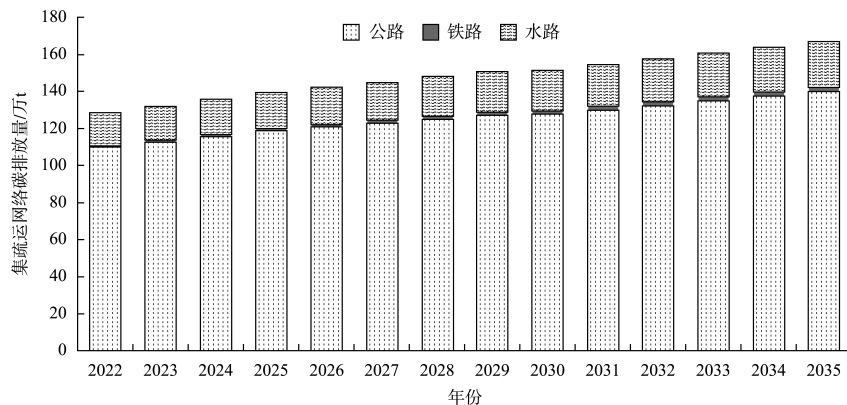


图 2 现有能源结构下 2022—2035 年广州港集装箱集疏运网络碳排放量

根据 Tao 等^[22]的研究,港口集装箱集疏运网络过度依赖公路运输可能是碳排放上升的一个主要原因,本文进一步验证了该观点。数据显示,尽管广州港充分发挥了珠江水网的运输优势,实现了单一运输方式向公水联运、水水联运以及铁水联运等低碳节能的多式联运转变,公路、铁路、水路3种运输方式的占比分别约为32.0%、0.8%、67.2%,相较于全球其他港口,例如上海港公路运输占上海港集装箱吞吐量的70%左右^[23],广州港公路集疏运比例已经相对较低,但是绝大部分集装箱仍然需要通过公路运输往来于港口与腹地之间,包括公路直达运输与水路、铁路两端公路短驳运输,其公路运输碳排放占比高达85.72%。

受限于城市综合交通运输体系的发展,公转铁、公转水部分的集装箱仍需要通过公路短驳进行运输,公路短驳运输产生的碳排放量大,占广州港集装箱集疏运体系排放的55.11%,其中铁路、水路短驳分别占4.48%、50.63%。随着腹地经济产业发展以及集装箱生成量增加,广州港集

装箱集疏运网络碳排放仍然呈现增长趋势。因此除运输结构调整外,还需要考虑能源结构优化问题,进一步扩大清洁能源应用比例,着眼于降低各运输方式的碳排放强度^[24],进而有效降低广州港集疏运网络整体碳排放。

优化能源结构下广州港集装箱集疏运网络碳排放量见图3。可以看出,碳排放量呈现先增长后降低的趋势,2022—2035年年均增长率为-0.15%,其中2022—2029年年均增长率为1.84%,2030—2035年年均增长率为-2.81%。碳排放下降的主要原因是能源结构优化下2030年柴油集卡和船舶比例降低,相对于现有能源结构分别降低了5%和18%,而LNG及纯电能源应用比例上升,LNG集卡与纯电集卡分别提升4%和1%,LNG船舶与纯电船舶分别提升17%和1%。2035年纯电比例进一步扩大,纯电集卡与船舶应用比例分别提升18%和9%,碳排放强度进一步降低,2030年能源结构优化下碳排放相较于现有模式降低了4.5%,2035年则降低了24.7%,扩大清洁能源应用比例的降碳效果显著。

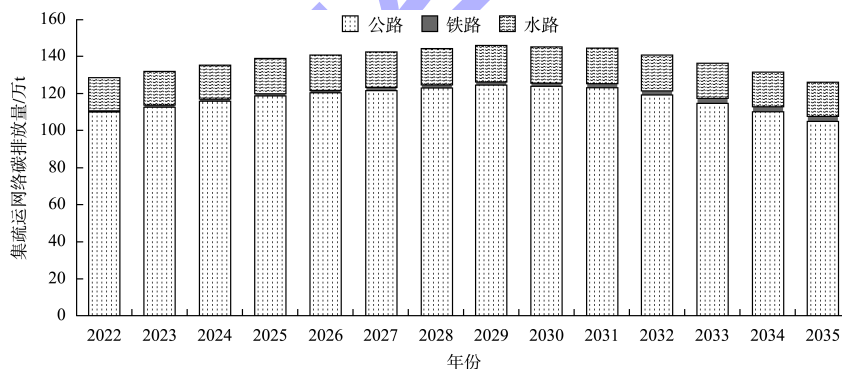


图3 优化能源结构下2022—2035年广州港集装箱集疏运网络碳排放量

2.2 敏感性分析

根据《广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)》^[25],电力调入调出CO₂间接排放仅作为信息项,而不计入当地的温室气体排放量。但是根据IPCC发布的《国家温室气体清单指南》^[26],国家/区域地理边界内的活动消耗的调入电力和热力(包括热水和蒸汽)相关的间接排放应计入排放量中。参照DB11/T 1786—2020《二氧化碳排放

核算和报告要求 道路运输业》^[27],运输行业的二氧化碳排放核算边界应该包括消耗外购电力所产生的排放 $E_{\text{外购电}}$ 。为应对广东省交通运输行业二氧化碳排放核算边界的不确定性,本文对纯电能源的碳排放系数做敏感性分析,将广州港电力调入所产生的间接碳排放纳入到广州港集装箱集疏运网络碳排放中。纯电能源碳排放系数计算的相关参数取值,见表3。

表 3 纯电集卡、船舶相关参数值

运输设备	续航里程/km	装载箱量/TEU	电池配置/(kW·h)	碳排放系数/(kgCO ₂ ·km ⁻¹ ·TEU ⁻¹)
纯电集卡	120	2	282	0.36(实测)
纯电船舶	300	100	7 500	0.08 ^[28]

注: 电力(当量)折标准煤系数为 0.122 9 kg 标准煤/(kW·h), 标准煤碳排放系数为 2.493 kgCO₂/kg 标准煤^[29]。

近年来, 中国清洁低碳化进程不断加快, 随着国家清洁发电体系的发展, 电力能源的碳排放强度将会有所降低。因此, 本文以当前电力碳排放系数为基础, 等差考虑碳排放系数下降 20%, 进行广州港集装箱集疏运网络碳排放敏感性分析, 结果见表 4。

表 4 纯电能源碳排放系数敏感性分析结果

情景	敏感性系数/%	碳排放系数/(kgCO ₂ ·km ⁻¹ ·TEU ⁻¹)		公路碳排放量/万 t	碳排放总量/万 t
		纯电集卡	纯电船舶		
1	20	0.43	0.09	131.66	154.63
2	0	0.36	0.08	127.28	150.02
3	-20	0.29	0.06	122.91	145.17
4	-40	0.22	0.05	118.54	140.56
5	-60	0.14	0.03	113.54	135.09
6	-80	0.07	0.02	109.17	130.47
7	-100	0	0	104.79	125.62

注: 以 2035 年数据为例。

纯电能源碳排放系数敏感性对能源结构的影响见图 4。可以看出, 情景 1 与 2 中纯电能源碳排放系数具有一定增幅, 当碳排放系数增长 20%, 2035 年集疏运网络产生二氧化碳排放 154.63 万 t, 相较于现有能源结构降低 7.9%, 而相较于不考虑电力排放的优化能源结构增长 18.8%; 情景 3~7 中碳排放系数则相应减小, 集疏运网络二氧化碳排放随着纯电能源碳排放系数减小而降低, 情景 7 减小至与优化能源结构一致。

随着纯电能源碳排放系数的减小, 公路碳排放降低并且在集疏运网络排放中占比也略微降低, 其原因主要是柴油及 LNG 在能源结构中占比仍然较高, 而纯电交通工具受制于商业化发展以及充换电站基础设施配备等因素, 仍具有可发展空间, 若能够进一步加大纯电在能源结构中的应用比例, 港口集疏运网络将产生可观的降碳效应。

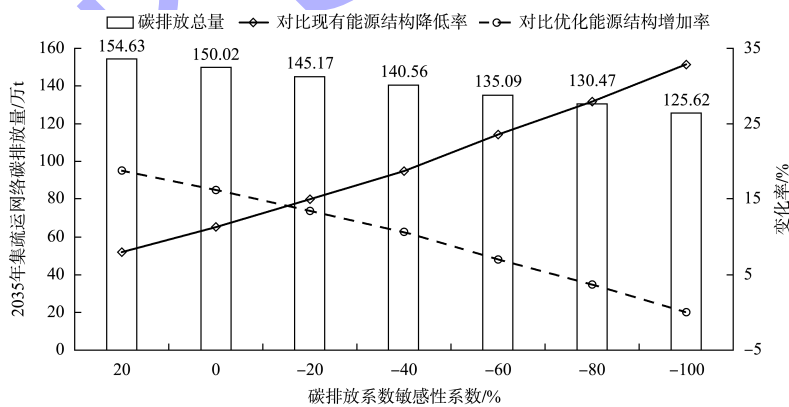


图 4 纯电能源碳排放系数敏感性对能源结构的影响

3 结语

1) 现有能源结构下, 广州港集装箱集疏运网络碳排放呈低速增长, 公路干线运输与短驳运输是主要的碳排放来源; 优化能源结构下, LNG、纯电应用比例逐年提升, 港口集疏运网络碳排放显著降低, 2035 年相较于现有能源结构降低了 24.7%, 清洁能源应用的降碳效果显著。

2) 敏感性分析将电力调入的间接碳排放纳入考虑范围, 随着纯电能源碳排放系数的减小, 集疏运网络的二氧化碳排放量降低, 并且值得注意的是, 能源结构优化与纯电碳排放系数增加的对向作用下, 碳排放相较现有能源结构仍降低 7.9%。

3) 建议加强能源结构优化策略, 推动港口能源升级改造, 逐步替代传统高排放能源, 扩大清

洁能源应用比例,进一步完善充换电站等基础设施建设,加快实现清洁能源平价化。

参考文献:

- [1] 吴琴,陶学宗,尹传忠,等.港口集疏运“公转铁”的减排影响分析[J].铁道运输与经济,2019,41(1):101-105.
- [2] 陈洁敏,李文斌,宗传苓.深圳港碳达峰与碳中和路径的实践与探索[J].交通与港航,2021,8(4):75-80.
- [3] 王达川,靳廉洁,姚海元,等.“双碳”目标下深圳国际枢纽海港集疏运体系优化研究[J].中国航海,2022,45(4):107-111.
- [4] 林成功,胡希元,程长,等.碳达峰背景下我国集装箱铁水联运发展现状及对策研究[J].交通运输研究,2022,8(6):120-128.
- [5] 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.
- [6] 赵瑞嘉,谢燕,宿博涵,等.集装箱港口碳排放量及碳达峰时间测算方法[J].大连海事大学学报,2021,47(4):56-64.
- [7] LIAO C H, TSENG P H, CULLINANE K, et al. The impact of an emerging port on the carbon dioxide emissions of inland container transport: An empirical study of Taipei port [J]. Energy policy, 2010, 38 (9): 5251-5257.
- [8] PAN S, BALLOT E, FONTANE F. The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains [J]. International journal of production economics, 2013, 143(1): 86-94.
- [9] YANG L, CAI Y J, 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): 1-23.
- [10] WANG L K, PENG C, SHI W M, et al. Carbon dioxide emissions from port container distribution: spatial characteristics and driving factors [J]. Transportation research (part D): transport and environment, 2020, 82: 102318.
- [11] 周海英,张文静.绿色港口建设下港口与船舶减排决策研究[J].科技管理研究,2022,42(7):205-214.
- [12] 彭云,李相达,王文渊,等.绿色集装箱港口节能减排策略综述[J].交通运输工程学报,2022,22(4):28-46.
- [13] 付玉鹏,梁亚莉,郭永健.“双碳”背景下港口集装箱多式联运运输网络研究[J].交通节能与环保,2022,18(4):75-79.
- [14] 李伟,王群.基于新能源气体发动机的LNG重卡开发[R].合肥:集瑞联合重工有限公司,2015.
- [15] 郑海波.电力推进船舶EEDI计算方法研究[J].自动化应用,2017(10):60,119.
- [16] 国家统计局能源统计司.2019年中国能源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.
- [17] JIANG L P, TANG S S, WANG G S. The evaluation of government subsidy policies on carbon emissions in the port collection and distribution network: a case study of Guangzhou port [J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1213701.
- [18] 陶学宗,吴琴,尹传忠.绿色交通目标下集装箱“公转铁”的CO₂减排潜力评估[J].气候变化研究进展,2019,15(6):660-669.
- [19] 陆潘涛,韩亚龙,戴瀚程.1.5℃和2℃目标下中国交通部门2050年的节能减排协同效益[J].北京大学学报(自然科学版),2021,57(3):517-528.
- [20] 张子昂,尹传忠,陶学宗.低碳导向的铁路驮背运输方案[J].上海海事大学学报,2023,44(2):62-67.
- [21] 田佩宁,毛保华,童瑞咏,等.我国交通运输行业及不同运输方式的碳排放水平和强度分析[J].气候变化研究进展,2023,19(3):347-356.
- [22] TAO X Z, WU Q, ZHU L C. Mitigation potential of CO₂ emissions from modal shift induced by subsidy in hinterland container transport [J]. Energy policy, 2017, 101: 265-273.
- [23] 陈雪.公路集疏港路径优化问题研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [24] 刘长俭,黄川,耿志鑫,等.我国低碳港口建设发展路径探讨[J].可持续发展经济导刊,2023(S1):42-45.
- [25] 广东省生态环境厅.广东省市县(区)温室气体清单编制指南(试行)[R].广州:广东省生态环境厅,2020.
- [26] 国家温室气体清单特别工作组.国家温室气体清单指南[R].神奈川:日本环境战略研究所,2006.
- [27] 中交水运规划设计院有限公司,北京市应对气候变化研究中心,中国交通建设股份有限公司.二氧化碳排放核算和报告要求 道路运输业:DB11/T 1786—2020[S].北京:北京市市场监督管理局,2020.
- [28] 姜磊,梁强,李响,等.不同船型的内河纯电池动力船舶经济性分析[J].船电技术,2021,41(6):11-14.
- [29] 国家统计局能源统计司.2022年中国能源统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.

(本文编辑 王璁)