文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0066 - 10

船舶碳捕集与封存技术的经济性评估与前景分析

高晓阳[1], 田 明[1], 宋兆国[2], 李承卓[3], 宁 业[3], 吴宛青[3*]
(1. 中国船舶燃料有限责任公司 战略与企业管理部, 北京 100020;
2. 中国船舶燃料有限责任公司总部, 北京 100020;
3. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要:国际航运业作为全球贸易的命脉,其碳排放量占全球总量的 3%,是实现气候目标面临的严峻挑战。船舶碳捕集与封存(OCCS)技术,因其显著的减排潜力及与现有船舶的兼容性,被广泛视为推动航运业迈向净零排放的重要路径。本研究聚焦于 OCCS 技术的经济可行性,系统分析了其成本构成,揭示了初始资本支出与因捕集系统带来的额外燃料消耗是制约其推广的核心经济壁垒。通过对一艘 MR 型油轮的案例研究进行量化分析,结果显示,在特定条件下,OCCS 系统的投资回收期为 8.38 年,初步验证了该技术在商业化应用上的经济潜力。进一步地,敏感性分析指出,碳税税率与 CO_2 市场价格是投资回收周期的决定性变量,也是未来评估技术经济性时必须重点考量的不确定因素。基于此,本研究提出,OCCS 的商业化落地无法单纯依赖技术成熟,必须构建政策引导、技术创新与市场机制三维协同的支撑体系。本研究通过实证数据为航运业从宏观脱碳战略向微观经济决策的转化提供了理论依据,填补了 OCCS 技术在具体船型应用中的量化评估空白。

关键词:绿色航运; 经济效益; 船舶碳捕集与封存; 前景分析
中图分类号:U664.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.008

Economic assessment and prospect analysis of onboard carbon capture and storage technology applications

Gao Xiaoyang[1], *Tian Ming*[1], *Song Zhaoguo*[2], *Li Chengzhuo*[3], *Ning Ye*[3], *Wu Wanqing*[3*]
(1. Strategy and Corporate Management Department, China Marine Bunker (PetroChina) Co., Ltd., Beijing 100020, China; 2. Headquarters, China Marine Bunker (PetroChina) Co., Ltd., Beijing 100020, China; 3. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: As the lifeblood of global trade, the international shipping industry accounts for approximately 3% of global carbon emissions, posing a significant challenge to the achievement of climate targets. Onboard carbon capture and storage (OCCS) technology is widely regarded as an important pathway for the shipping industry to move toward net-zero emissions because of its substantial emission-reduction potential and compatibility with existing vessels. This study focuses on the economic feasibility of OCCS technology and systematically analyzes its cost structure. The results reveal that initial capital expenditure and the additional fuel consumption caused by the capture system are the major economic barriers limiting its large-scale adoption. A quantitative case study of a medium-range (MR) tanker shows that, under specific operating and market conditions, the investment payback period of the OCCS system is 8.38 years, preliminarily demonstrating the economic potential of this technology for commercial application. Furthermore, the sensitivity analysis indicates that the

收稿日期:2026-02-13
基金项目:工信部高科技船舶项目(2019-360)
第一作者:高晓阳(1989—),男,工程师,研究方向为航运绿色脱碳转型,(E-mail)gao.xiaoyang@chimbusco.com
* **通信作者**:吴宛青(1963—),男,教授,研究方向为绿色船舶、船舶与港口污染控制、危险货物水运安全控制,(E-mail)wuwanqingdmu@sina.com
引用格式:高晓阳,田明,宋兆国,等. 船舶碳捕集与封存技术的经济性评估与前景分析[J]. 中国航海,2026,49(4):66 - 75.
Gao X Y, Tian M, Song Z G, et al. Economic assessment and prospect analysis of onboard carbon capture and storage technology applications[J]. Navigation of China,2026,49(4):66 - 75. (in Chinese)

carbon tax rate and the CO_2 market price are the decisive variables affecting the payback period, as well as key uncertainties that should be emphasized in future techno-economic assessments. Based on these findings, this study suggests that the commercialization of OCCS cannot rely solely on technological maturity, but requires a coordinated support framework integrating policy guidance, technological innovation, and market mechanisms. By providing empirical data, this study offers an analytical basis for translating the shipping industry's macro-level decarbonization strategy into micro-level economic decision-making and helps fill the gap in quantitative assessments of OCCS applications for specific ship types.

Key words: green shipping; economic benefit; onboard carbon capture and storage; prospect analysis

全球变暖是当前人类社会面临的最严峻挑战之一,其主要驱动力是人为活动导致的 CO_2 等温室气体排放[1-2]。在此背景下,国际航运业作为全球贸易的命脉,其环境足迹不容忽视[3]。目前,航运业每年排放 CO_2 约 10 亿 t,占全球总排放量的 3%,对全球气候目标构成严重威胁[4]。为应对这一挑战,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)于 2023 年出台新版温室气体减排法案,明确提出约到 2050 年实现国际航运温室气体净零排放的宏伟目标[5]。因此,制定并实施一套全面、可行的全球航运业温室气体减排方案,已成为一项刻不容缓的工作,对于实现全球气候目标至关重要。

为实现航运业的脱碳目标,业界正积极探索多种技术路径。虽然 NH_3、H_2 等燃料被视作终极解决方案,但其规模化应用面临成本高昂和周期漫长的双重挑战[6-7]。因此,在替代燃料全面普及之前,亟须其他技术作为补充,以加速减排进程。风力推进等节能技术虽取得显著进展,商业化落地规模仍存在瓶颈[8]。相较之下,船舶碳捕集与封存技术(Onboard Carbon Capture and Storage, OCCS)为实现航运净零排放开辟了一条潜在的快速路径[9]。尽管该技术在陆上工业领域运用成熟,但其在航运领域的应用仍面临特殊挑战,核心难点在于保障经济可行性[10-11]。OCCS 系统不仅初始投资与维护成本高昂,还需额外配备操作人员[12]。更关键的是系统自重与捕获所得 CO_2 会挤占宝贵的载重吨位,直接削弱船舶的盈利能力,对整体经济效益构成显著冲击。因此,对 OCCS 系统进行严谨的经济性评估,是推动其商业化落地的关键前提。现有研究已针对 OCCS 的经济可行性进行初步探索。Luo 等[13]率先将燃烧后碳捕集技术引入船舶场景,在不加装额外燃气轮机的前提下实现了 73% 的碳捕集率,由于船上空间狭隘及余热不足,该研究未能达到 90% 的捕集目标,并据此测算出特定船舶的碳捕集成本为 77.50 欧元/t。Feenstra 等[14]采用 30 wt% 的 MEA 与 PZ 混合溶液捕集发动机排放的 CO_2,并依托液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)冷能完成 CO_2 液化。研究指出,通过添加 PZ 溶剂及利用 LNG 冷能,可将捕集成本从 304 欧元/t(捕集率 60% 时)显著降低至 209 欧元/t。针对投资回收期,Tian 等[15]对一艘 LNG 动力散货船的分析显示,其回收期长达 13 年。此外,OCCS 系统与船舶能效指数之间的关系也引起广泛关注。Feng 等[16]将 CCS(Carbon Capture and Storage, CCS)系统与船舶发电系统相结合,有效满足了能效营运指数(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI)的要求。Güler 等[17]针对不同船型的 CCS 系统进行成本对比分析,研究指出:对于运费较低的原油油船,减速航行是最佳的成本导向方案;而对于高航速、高运费价值的 LNG 运输船,CCS 则比其他 CO_2 控制方法更具成本效益;当碳捕集率从 31.9% 提升至 34.5%,碳捕集成本同步由 73.74 美元/t 下降至 65.35 美元/t。这些研究共同证实,OCCS 的经济性并非一成不变,而是高度依赖于具体的应用场景与船舶类型,存在显著差异。该结论凸显了针对特定船型进行案例研究的必要性。在此背景下,MR 型油船的评估显得尤为重要。该船型与 LR1 型油船及同尺寸干散货船的合计排放量,占到全球航运总排放量的 17%。针对这一高排放、高影响力的船型进行 OCCS 经济性评估,不仅能精准分析计算该技术在高排放船舶上的应用潜力,研究成果也可为整个航运业的减排战略提供关键的数据支撑与决策参考。

综上所述,针对船舶应用 OCCS 系统的经济性研究尚存空白,本研究系统剖析 OCCS 的经济性构成要素。以一艘 MR 型油船为案例,对其加装 OCCS 系统的成本与效益进行了详细的量化分析。依托分析结果,本研究进一步提出推动该技术在航运业落地的发展建议,旨在为科学评估 OCCS 系统的经济性提供理论支撑。

1 OCCS 全流程概况

OCCS 是指一套集成船上 CO_2 捕集、液化和存储功能的完整系统[18]。系统通过在航行中处理船舶发动机排放的废气,最终将捕获的 CO_2 以液态形式暂存于船上。船舶靠港后,液态 CO_2 完成卸载船

转运,并由岸基设施负责其后续的运输、利用或封存。因此,后续环节的成本通常不计入船舶运营成本之内,这也决定了现阶段行业当前对 OCCS 的讨论与实践,普遍聚焦于船载系统本体。

1.1 CO_2 捕集系统

CO_2 捕集系统的核心功能为分离和富集船舶发动机等排放源产生的 CO_2。根据捕集环节与燃烧过程的时序关系,其捕集技术可分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链捕集等 4 类[19]。从具体的分离工艺来看,则主要包含物理吸收法、化学吸收法和膜分离法等技术[20]。在诸多技术方案中,基于胺液的化学吸收法作为成熟的燃烧后捕集技术,凭借其高技术成熟度、相对低廉的运行成本和广泛的应用基础,已成为当前工业界与学术界的研究焦点[21]。因此,以该方法为核心进行深入分析,其具体工艺流程见图 1。

1)该工艺流程始于废气进入废热回收装置,为后续捕集流程提供部分能量。

2)废气经进一步冷却至约 40 ℃,以满足胺溶剂有效吸收 CO_2 所需的温度工况。

3)经降温的废气由鼓风机送入吸收塔,在此与胺溶剂充分接触。塔顶排出的气体通入水洗单元,以回收随气流夹带的微量胺液;塔底汇集的则是吸收了 CO_2 的高浓度富液。

4)该富液经泵输送,流经换热器预热后送入汽提塔。

5)汽提塔内溶剂被再沸器加热至沸点,解析释放出 CO_2。脱除 CO_2 后的贫溶剂从汽提塔底部流出,经泵送回换热器另一侧,在与富液进行热交换回收余热后回流至吸收塔,完成整个循环。

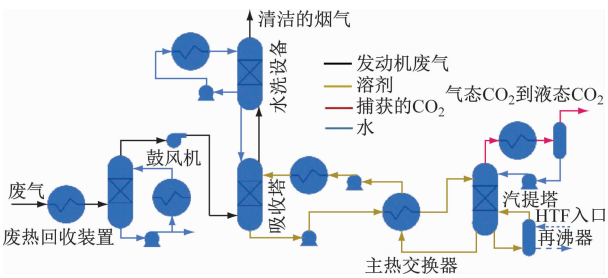


图 1 基于胺液的化学吸收法的通用流程

Fig. 1 The general process of chemical absorption method based on amine solution

1.2 CO_2 液化和储存系统

储存气态 CO_2 最方便的方式是将其转化为液态,液态 CO_2 的密度远高于气态,储运效率更优。从捕集系统获得的气体虽然是高浓度废水饱和的 CO_2,但这种混合物可能具有腐蚀性,因此在储存前必须进行净化处理。根据 CO_2 相平衡曲线,船舶通常将 CO_2 储存压力控制在 15 ~ 20 bar,对应温度区间为 -28.6 ℃ ~ -19.7 ℃,以维持其液态状态。标准的液化过程还可进一步提纯 CO_2 组分,脱除包括 N_2、O_2 等不可凝气体在内的多种杂质。在具体液化流程中,气态 CO_2 首先进入小型洗涤塔脱除气体中的杂质。随后,气流被引入两级压缩系统见图 2,将压力提升至 15 bar,等熵效率为 85%,产生的 CO_2 浓度为 99.3%。将压缩后的 CO_2 通入干燥器,进一步降低水分含量。干燥后的加压 CO_2 进入冷凝器热交换器,通过与制冷剂换热实现液化。结合 Roussanaly 等[22]的研究结果,液化后的 CO_2 被输送至储罐,并在 9 bar 和 -45 ℃ 的低温工况下完成储存。

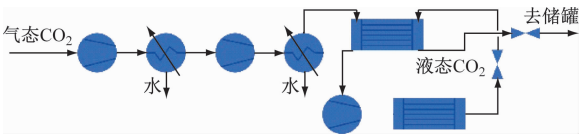


图 2 两级压缩系统

Fig. 2 Two-stage compression system

2 OCCS 应用的经济性要素分析

2.1 成本分析

现阶段 OCCS 的成本核算缺乏统一标准,存在要素定义模糊、相互交叉等问题,显著降低经济性评估的精准度[23]。为建立一套逻辑清晰、便于横向对比的分析模型,本研究将 OCCS 的经济性要素简化为年化资本成本和运营成本两部分,分层开展成本核算。

2.1.1 年化资本成本

OCCS 的资本成本是一个涵盖项目全生命周期的综合性概念,完整涵盖从设备采购到项目建成的全部投资[24]。其成本核算体系主要由设备购置成本(Cost, C)、装置内部成本(Inside Battery Limits, C_{ISBL})、固定资本成本(Fixed Capital Investments, C_{FCI})以及其他资本成本(Other Capital Investments, C_{OCI})[25]等 4 部分构成。其中设备购置成本是基础,指采购吸收塔、分离塔、压缩机、储罐和配套设备等所需的直接费用。在此基础上,将这些设备安装就位,并完成内部管道、仪表和控制系统的连接,所形成的实体建设投入即为装置内部成本。装置内部成本反映项目在建设阶段的直接资本投入,在装置内部成本的基础上,纳入所有与项目建设相关的间接费用,即构成固定资本成本。依托该层级递进式成本结构,系统性地梳理各项资本构成之间的逻辑

关系,为准确评估 OCCS 项目的经济性提供清晰的框架。因此,OCCS 的总资本成本(Capital Expenditures, C_{CAPEX})计算为

$$C_{CAPEX} = C + C_{ISBL} + C_{FCI} + C_{OCI} \quad (1)$$

式(1)中:C_{CAPEX}为总资本成本,$;$C$ 为设备购置成本,$;$C_{ISBL}$为装置内部成本,$;C_{FCI}为固定资本成本,$;$C_{OCI}$为其他资本成本,$。

在陆基碳捕集场景中,运营成本通常是成本的主要驱动因素[26]。然而,对于航运业而言,采用 OCCS 时,C_{CAPEX}对总成本的影响则显著增大[27-28]。为在不同项目间进行公平的成本比较,并准确评估项目的经济性,往往需引入年化资本成本的概念。年化资本成本(Annual Capital Expenditures, $C_{ANCAPEX}$)是指项目在一年内为筹集和使用资本所付出的总成本。其是一个综合性概念,不仅包括购买设备的直接费用,还涵盖了与项目建设和运营相关的所有间接费用[29]。其数值由总资本成本与资本回收系数(Capital Recovery Factor, F_{CRF})共同决定,具体计算方法为

$$C_{ANCAPEX} = C_{CAPEX} \times F_{CRF} \quad (2)$$

式(2)中:$C_{ANCAPEX}$为年化资本成本,$/y;$F_{CRF}$为资本回收系数,其数值由设备生命周期和贴现率共同决定,具体为

$$f_{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

式(3)中:n 和 i 分别为设备生命周期和贴现率,通常假设 n 和 i 分别为 25 a 和 8%[14]。

2.1.2 运营成本

OCCS 的运营成本涵盖系统运行期间生产液态 CO_2 的全部费用,可分为固定运营成本和可变运营成本两部分。

1)固定运营成本(Fixed Operational Expenditures, C_{FOPEX})不随系统负荷波动,主要包括预防性维护、人员薪酬、保险和税费等。为便于经济性分析,这部分成本通常简化为年化资本成本的 3% 进行估算,具体计算方法为

$$C_{FOPEX} = C_{ANCAPEX} \times 3\% \quad (4)$$

2)可变运营成本(Varible Operational Expenditures, C_{VOPEX})随 OCCS 的负荷与运行时间而波动,主要由直接消耗成本和机会成本两部分构成。

①直接消耗成本源于维持碳捕获、净化和液化过程所产生的额外燃料(Cost for Fuel, C_{Fuel})与溶剂消耗造成的成本(Cost for MEA, C_{MEA}),其计算依赖于单位成本和消耗量[30]见式(5)和式(6)。

②机会成本(Cost for Loss, C_{Loss})则指因安装 OCCS 设备导致船舶载重量下降,进而造成的年运费收入损失。该成本取决于船舶的年运费率、总额外质量和船舶载重量,具体计算见式(7)。

值得注意的是,OCCS 的热量需求是影响其运营成本,特别是燃料成本的关键因素。该需求高度依赖于所选技术,对于某些能利用废热的船舶而言,这部分热量可能无需额外成本;而对于其他船舶,则可能需要消耗燃料来满足,以显著增加总成本。

$$C_{fuel} = \dot{m}_{fuel} \times c_{fuel} \quad (5)$$

$$C_{MEA} = \dot{m}_{MEA} \times c_{MEA} \quad (6)$$

$$C_{LOSS} = \frac{W_{TSW}}{W_{DWT}} \times R_{AFR} \quad (7)$$

式(5)~式(7)中:C_{fuel}为年度额外燃料消耗成本,$/y;$C_{MEA}$为年度溶剂消耗成本,$/y;C_{LOSS}为机会成本,$/y;$\dot{m}_{fuel}$为额外燃料消耗量,t;$\dot{m}_{MEA}$为溶剂需求量,t;$c_{fuel}$为燃料的单位成本,$/t;c_{MEA}为 MEA 的单位成本,$/t;$W_{TSW}$为 OCCS 系统质量,t;$W_{DWT}$为船舶的载重吨,t;$R_{AFR}$为船舶的费率,$/y。

2.2 经济效益分析

航运业碳减排政策主要包括碳限额、碳交易、碳补偿和碳税。在以上碳税作为一种针对 CO_2 等温室气体排放所征收的环境税,凭借明确的成本约束效力和可量化的经济影响而显得尤为突出[31]。碳税政策无需构建复杂的配额交易体系,降低监管成本,还具备较强的灵活性,能适应不同区域乃至全球范围内的政策框架。此外,航运业捕集的 CO_2 既可直接销售,也可转化为甲醇等高附加产品。因此,在航运场景下部署 OCCS 技术的经济收益主要来自销售所捕获的 CO_2 产品和因减排而避免缴纳的碳税两个渠道。现有研究指出碳税税率区间为 60~100 $/t,而 CO_2 的市场价格取值 60 $/t[32]。在综合考虑全部收入来源及运营成本后,OCCS 项目的净收益(Annual Net Profit, C_{ANP})计算为

$$C_{ANP} = E \times P_{CO_2} + E \times P_d - C_{FOPEX} - C_{VOPEX} \quad (8)$$

式(8)中:C_{ANP}为 OCCS 项目的年净收益,$/y;$E$ 为 OCCS 捕获的 CO_2 的质量,t/y;P_{CO_2}为 CO_2 的市场价格,$/t;$P_d$ 为碳税税率,$/t。

C_{ANP}的核算直接取决于捕获的 CO_2 质量,因此,精确核算船舶的 CO_2 排放总量是整个经济性分析的前置基础。为此,本研究采用联合国政府间气候变化专门委员会推荐的碳排放因数法进行计算,有

$$E_m = \sum_i F_i \times \frac{44}{12} \times 1\,000A \times B \quad (9)$$

式(9)中:E_m 为 CO_2 的排放量,kg;i 为燃料类型;F_i 为 i 燃料的消耗量,J;A 为缺省碳含量,kg/GJ,表示

单位能量中碳的含量;B 为缺省氧化碳因数,kg/GJ,表示燃料中碳被氧化的比例。

IMO 和相关研究指出,轻油的碳排放因数为 3.082 t CO_2/吨燃油,而重油的碳排放因数稍低,为 3.012 t CO_2/吨燃油[33-34]。此外,Doudnikoff 等[35]研究证实,船舶主机的日常油耗与船舶航速的 3 次方成正比。据此,船舶在航行时主机所消耗的(Flow of HFO, F_{HFO})量可通过式(10)和式(11)联立求解。船舶辅机消耗的(Flow of MGO, F_{MGO})量则与航速无关,其构成包括固定部分和可变两部分。可变部分通常受船上冷藏箱和冷冻箱数量的影响。为简化分析,本研究仅考虑辅机燃油消耗中的固定部分,具体计算为

$$F_{HFO} = F_{MC} \times (v_c/v_0)^3 \times t_c/24 \quad (10)$$

$$F_{MC} = 24 \times 10^{-6} \times (M_{SFOC} \times L_M \times P_M) \quad (11)$$

$$F_{MGO} = 24 \times 10^{-6} \times (A_{SFOC} \times L_F \times P_F) \times t_c/24 \quad (12)$$

式(10)~式(12)中:F_{MC}为船舶主机燃油消耗常数,t/d;v_c 为船舶航行的平均航速,kn;v_0 为船舶的设计航速,kn;t_c 为船舶航行时间,h;M_{SFOC}为主机油耗率,取 206 t/(kW · h)[35];L_M 为主机负荷,取 0.8[35];P_M 为主机功率,kW;A_{SFOC}为辅机油耗率,取 219.06 t/(kW · h)[35];L_F 为辅机负荷,取 0.5[36];P_F 为辅机功率,kW。

因此,船舶 HFO 燃油碳排放量(Emission of HFO, E_{HFO})和 MGO 燃油碳排放量(Emission of MGO, E_{MGO})分别为

$$E_{HFO} = 3.012 \times F_{HFO} \quad (13)$$

$$E_{MGO} = 3.082 \times F_{MGO} \quad (14)$$

船舶的碳排放主要源于其燃油消耗。Cariou 等[36]的研究表明,主机与辅机的燃油消耗分别占船舶总消耗的 87% 和 11%。由于燃油燃烧是船舶碳排放的主要来源,可推断出主机与辅机产生的碳排放量共同构成了全船碳排放总量(Emission, E)的主体,其贡献率约为 98%。基于该分配比例,全船的碳排放量 E 计算为

$$E = (E_{HFO} + E_{MGO})/98\% \quad (15)$$

综合前述 OCCS 的成本与净收益模型,可进一步计算其投资回收周期(Payback Period, P_{PBP}),具体计算为

$$P_{PBP} = C_{CAPEX}/C_{ANP} \quad (16)$$

为进一步清晰地评估船舶 OCCS 系统应用的经济性,本研究构建了其经济性评估流程见图 3。图 3 系统地展示从成本构成分析到最终得出投资回收周期的完整评估路径。具体而言,评估始于对 OCCS 系统各项成本的核算,包括总资本成本、固定运营成本和可变运营成本,这些成本共同构成 OCCS 系统的年化资本成本。另一方面,评估也考虑 OCCS 系统带来的年净收益,这主要来源于售碳与碳税的收益,并需扣除运营成本。最终,通过将年化资本成本与年净收益进行对比,即可计算得出 OCCS 系统的投资回收周期,从而为判断其经济可行性提供关键依据。

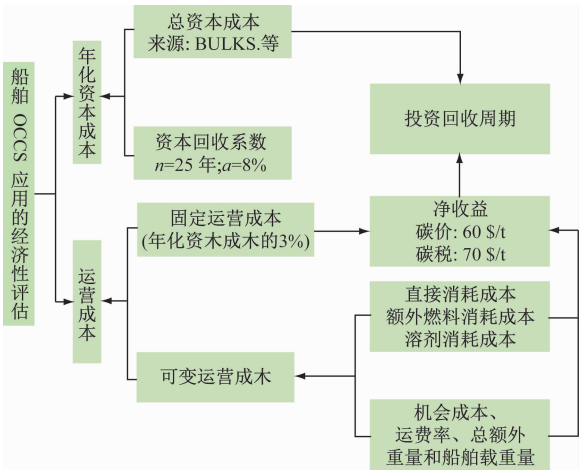


图 3 船舶 OCCS 应用的经济性评估流程

Fig. 3 Flowchart of the economic assessment of the application of OCCS on ships

3 案例分析

3.1 案例概况

中型油船是全球航运碳排放的核心船型,其脱碳进程对整个行业实现净零排放目标至关重要。因此,对该船型进行经济性分析对促进航运业脱碳具有重要意义。“Stena Impero”号为一艘 5 万吨级的成品油/化学品船见图 4a,是该类船型中的典型代表。此外,该船已安装船上 OCCS 系统见图 4b,因此成为评估该技术经济性及其推广潜力的理想案例。为直观评估船舶应用 OCCS 系统后的经济表现,本研究选取“Stena Impero”号油船作为研究对象。



(a)船舶整体外观 (b) OCCS 系统

图 4 “Stena Impero”号船舶及其 OCCS 系统

Fig. 4 “Stena Impero” vessel and its OCCS system

“Stena Impero”号由瑞典 Stena Bulk 航运公司运营,船体总长 183 m,宽 32 m,载重吨为 49 683 t。动力系统包括一台额定功率为 7.2 MW 的 MAN

6S50ME-C9.5 型二冲程主发动机和4 台辅助发动机(分别为两台 MAN 6L23/30H 和 2 台 MAN 5L23/30H)。船载 OCCS 系统采用基于胺液的化学吸收法,属于燃烧后捕集技术。此外,船舶搭载 KYMA 在线数据采集系统,能持续监测并记录燃料消耗、发动机负荷等关键运行参数。这些翔实的基础数据为本次经济性分析提供了可靠的数据基础见表 1。

表 1 案例初始参数

Tab.1 Initial parameters of the case

序号	参数	数据	序号	参数	数据
1	主机型号	MAN 6S50ME-C9.5	2	主机数量/台	1
3	主机功率/MW	7.2	4	辅机数量/台	4
5	辅机功率/kW	1 050/710	6	设计航速/kn	15.00
7	辅机型号	2x MAN 6L23/30H 2x MAN 5L23/30H	8	航速/kn	10.03
9	数据总小时数/h	8 881	10	HFO 消耗量/t	3 155
11	MGO 消耗量/t	1 712	12	净载重/t	49 683
13	CCUS 系统质量/t	283.96	14	总资本成本/M	13.58

注:数据源自报告[37]和网站 https://www.hifleet.com/.

3.2 案例成本核算

为确定案例船舶应用 OCCS 系统的 ANCAPEX,本研究首先对系统的总投资成本进行核算。基于对材料清单、工程及集成任务的详细分析,并参考文献[37],C_{CAPEX}估算为 13.58×10^6 \$。该成本构成如下:设备费用占比最高,约为 2/3(8.3×10^6 \$);造船厂安装费用约占 1/4(3.58×10^6 \$);其余为项目支持费用(1.7×10^6 \$)。在 C_{ANCAPEX}的计算中,本研究进一步假设设备生命周期为 25 a,贴现率为 8%。据此,C_{ANCAPEX}值为

$$C_{\mathrm{ANCAPEX}} = C_{\mathrm{CAPEX}} \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1} = 1.222\times10^6\ \$ \tag{17}$$

在此基础上,结合 C_{ANCAPEX}的计算,可进一步得出案例船舶的 C_{FOPEX}值为

$$C_{\mathrm{FOPEX}} = C_{\mathrm{ANCAPEX}} \times 3\% = 3.67\times10^4\ \$ \tag{18}$$

核算总运营成本时,主要考虑由 OCCS 系统运行产生的额外燃料和吸收剂消耗。结合文献[37]结论,在案例船舶中,通过现有辅助发电机和燃油锅炉来提供用于 CO_2 解吸、压缩和液化以及辅助设备运行所需的额外能源,计算得出的燃料惩罚系数为 9.2%,MEA 溶剂捕集系统运行而导致的额外燃料消耗占船舶总燃料消耗的 9.2%。据此,本研究估算该系统每年额外消耗的燃料量为 440.35 t(燃油单价 556 \$/t);同时,MEA 吸收剂的消耗速率为 1.5 kg/t-CO_2(MEA 单价 2 200 \$/t)。然而,系统的实际运行效率受到多重因素的制约。为明确本经济模型的适用边界,本研究界定该模型仅适用于燃料消耗率超过 462 kg/h 时的 OCCS 运行工况。该启动阈值是由系统的固定流量设计确定的。此外,鉴于胺液对废气中的 SO_x 和 NO_x 高度敏感性,系统不仅要求配备高效洗涤器并定期更换溶剂,从而增加运营成本,还可能影响长期捕集效率。因此,该经济模型在计算运营成本时,仅计入处理经 SO_x 洗涤器净化后废气的相关成本。综合上述运行限制,案例船舶的年度碳捕集率被设定为 29.07%。基于上述数据,计算得出的 C_{fuel}和 C_{MEA}分别为

$$C_{\mathrm{fuel}} = \dot{m} \times c_{\mathrm{fuel}} = 244\,834.60\ \$ \tag{19}$$

$$C_{\mathrm{MEA}} = \dot{m}_{\mathrm{MEA}} \times c_{\mathrm{MEA}} = 14\,389.65\ \$ \tag{20}$$

在计算机会成本时,首先依托 Gao 等[38]的研究成果,将案例船舶的运费率设定为 15 775 \$/d。因此,由于船舶安装 OCCS 系统导致的运输能力下降而造成的机会成本,其数值基于表 1 中的相关数据和运费率计算得出,有

$$C_{\mathrm{VOPEX}} = C_{\mathrm{fuel}} + C_{\mathrm{MEA}} + C_{\mathrm{Loss}} = 2.93\times10^5\ \$ \tag{21}$$

综上所述,案例船舶的成本分配情况揭示了 OCCS 系统经济性的两项核心特征,案例船舶成本分配见图 5。

1)巨额的初始投资是其最显著的经济特征,该成本在总成本中占据绝对主导地位,远超其他所有成本项的总和。这表明船舶所有人在引入 OCCS 系统时必须投入一笔巨大的前期资金,这笔投资是决

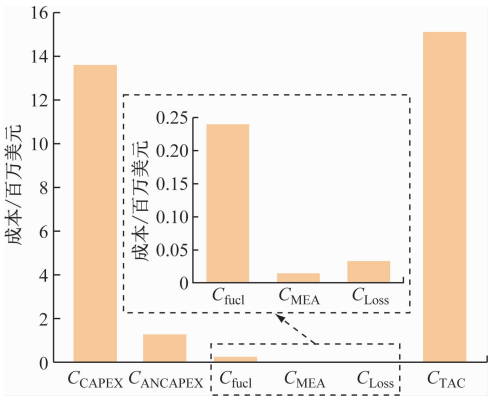


图 5 案例船舶成本分配

Fig. 5 Cost distribution for the case vessel

定项目能否启动的关键门槛,也是影响项目整体经济可行性的首要约束条件。

2)在运营成本层面,可变运营成本是主要组成部分,占比高达 88.87%,而其中额外燃料消耗成本又占据了绝大部分(83.67%)。该数据揭示了 OCCS 系统运营经济性的核心矛盾:系统运行需要额外能量驱动捕集、压缩和储存 CO_2 的设备,导致燃油消耗量增加,因此额外燃料消耗成本成为运营阶段最主要的成本负担。这直接凸显了燃油效率的关键作用,任何能降低这部分成本的因素都将对 OCCS 系统的经济性产生正向影响。综合以上两点,船舶应用 OCCS 系统的经济可行性受到双重制约:根本性制约是巨额初始投资,其决定了项目的启动门槛;关键性制约是运营成本的控制,其直接决定了项目在营运阶段的净收益。因此,要提升 OCCS 系统的经济可行性,必须采取“两手抓”的策略:通过技术进步、规模化生产和政策补贴等方式降低初始投资;通过持续的技术创新和精细化的能源管理,最大限度地降低运营成本。

3.3 案例效益核算

精确核算船舶的 CO_2 排放总量是案例效益分析的基础与前提。基于表 1 的数据,先计算得出案例船舶主机和辅机的年燃料消耗量分别为

$$F_{HFO} = F_{MC} \times (v_c/v_0)^3 \times t_c/24 = 3\ 155\ \text{t} \quad (22)$$

$$F_{MGO} = 24 \times 10^{-6} \times (A_{SFOC} \times L_F \times P_F) \times t_c/24 = 1\ 712\ \text{t} \quad (23)$$

船舶的碳排放主要源于燃油消耗,其中主机和辅机是两大主要来源,其燃油消耗占比分别约为 87% 和 11%。因此,案例船舶的总碳排放量可依据该消耗比例进行分配计算,具体如下:

$$E = (3.012 \times F_{HFO} + 3.082 \times F_{MGO})/98\% = 1.50 \times 10^4\ \text{t} \quad (24)$$

为计算年净利润,本研究设定了 2 个关键价格参数。首先,借鉴何书畅[39]的研究成果,碳税税率区间为 60 ~ 100 $/t,本研究选取 70 $/t 作为计算基准。其次,$CO_2$ 的市场价格(P_{CO_2})设定为 60 $/t[32]。基于上述参数,计算得出的净收益为

$$C_{ANP} = E \times P_{CO_2} + E \times P_d - C_{FOPEX} - C_{VOPEX} = 1.62 \times 10^6\ \$ \quad (25)$$

基于上述对 OCCS 系统成本与净收益的分析,案例船舶应用该系统的投资回收周期计算结果为

$$P_{PBP} = C_{CAPEX}/C_{ANP} = 8.38\ \text{a} \quad (26)$$

综上所述,案例船舶应用 OCCS 系统的投资回收周期计算结果为 8.38 a。这一结果表明项目具备一定的盈利能力。值得注意的是,该回收周期在很大程度上受当前较高的运行维护成本影响,未来随着 OCCS 技术的成熟与规模化应用,相关成本有望持续下降,从而进一步缩短投资回收期,提升项目的整体经济性和可行性。

3.4 敏感性分析

船舶应用 OCCS 系统涉及复杂的技术环节,且投资回收周期受多种参数变动的影响,具有显著的不确定性。为科学地评估这些不确定因素对投资回收周期的影响,并验证评价模型的可靠性和稳健性,依托前文的经济性评估结果,以投资回收周期为指标,选取碳税税率、CO_2 市场价格、燃料价格和 MEA 价格作为核心影响因数进行敏感性分析。

1)为评估各影响因数的敏感性,本文以前文的经济性评估结果为基础参数,参照白宏山等[40]的研究思路,分别将各影响因数调整为 -20%、-10%、10% 和 20%,其余参数保持不变,计算投资回收周期的变化幅度。各影响因数的敏感性分析结果见图 6。结果显示,随着碳税税率的增加,投资回收周期相对于基础参数的变化率从 14.89% 显著下降至 -11.47%,表明碳税税率是决定投资回收周期的关键因素,其变动对投资回收周期具有显著的负面影响,即缩短回收期。

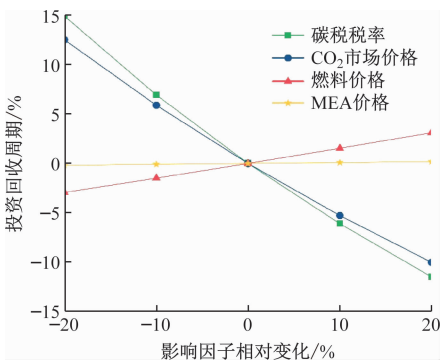


图 6 不同影响因数的敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of different influencing factors

2)随着 CO_2 市场价格的上升,投资回收周期亦明显缩短(变化率从约 12.49% 下降至 -10.00%),表明 CO_2 市场价格对投资回收周期具有重要影响,并与碳税税率共同构成影响系统经济性的核心驱动因素。

3)随着燃料价格的增加,投资回收周期呈延长趋势(变化率从约 -2.93% 升至 3.12%),表明燃料价格上涨会延缓投资回收,但其影响程度弱于碳税和 CO_2 市场价格。

4)MEA 价格的变化对投资回收周期的影响最小,其影响幅度不足 1%,因此不属于主要的敏感因素。

综上所述,碳税税率和 CO_2 市场价格对投资回收周期的核算结果具有显著影响,是投资决策过程中需重点考量的不确定性因素。燃料价格虽然对投资回收周期呈现正向影响(即延缓回收周期),但其影响程度相对较弱。相比之下,MEA 价格对投资回收周期的影响微乎其微,可忽略不计,因此并非决策中的关键考量因素。

4 航运业 OCCS 应用的发展建议

OCCS 是航运业实现净零排放目标的核心技术路径。为加速其规模化应用进程,有效支撑绿色航运战略的落地,本研究提出以下几点政策与产业建议。

4.1 构建财税政策体系,破解初始投资困局

OCCS 系统初始投资成本高昂,是制约该技术在航运业大规模应用的首要瓶颈。为有效破除该约束,政府应构建一套“前端激励 + 后端扶持”的综合性财税政策体系,覆盖技术应用的全生命周期。

1)在前端,应聚焦初始投资,提供精准财政支持。通过对安装 OCCS 设备的船舶提供直接的资金补贴、优惠利率的专项贷款或投资税收抵免等政策工具,直接缓冲航运企业面临的巨额前期资本支出,降低投资门槛和财务风险,从而激发航运公司采用 OCCS 技术的主观意愿。

2)在后端,需着眼于运营成本,实施持续性扶持政策。在船舶投入运营后,政府可通过减免港口费、下调企业所得税等方式,分摊企业年度资本摊销成本和固定运营成本。这种持续性激励能显著改善项目的现金流状况,有效缩短投资回收期,确保 OCCS 项目在全生命周期内具备经济可持续性。

依托前后端政策的协同联动效应,能系统性地降低 OCCS 技术的应用成本,为其在航运业实现商业化推广与规模化应用奠定坚实的经济基础。

4.2 聚焦关键技术创新,驱动 OCCS 降本增效

当前,额外燃料消耗是 OCCS 可变运营成本的主要构成,成为制约其运营经济性的关键。为系统性地降低能耗与成本,应聚焦关键技术创新路径。

1)着力推进系统集成与能源替代。将 OCCS 系统与船舶发动机的废热回收系统深度集成,利用余热替代蒸汽,大幅降低捕集过程的能耗。同时,积极研发以绿电为基础的电气化捕集技术,采用高效电加热器取代传统蒸汽再沸器,从源头上削减燃料消耗与直接排放。

2)加速核心材料的研发与工艺革新。研发新一代低能耗、高吸附容量和强抗氧化性的吸收剂,并探索膜分离等新型捕集工艺,旨在显著降低捕集环节的能耗与溶剂损耗,从而压缩运行成本。

3)拓展碳资源的价值转化路径。过开发新型碳转化技术,将捕集的 CO_2 作为甲醇等高价值产品,推动碳产物从成本负担转变为可观的稳定收益来源。

综上所述,通过能源替代、工艺革新与价值转化的组合式创新,可系统性地降低 OCCS 的运营成本,显著提升其经济性与投资吸引力,为该技术的规模化应用奠定坚实的技术基础。

4.3 发挥碳市场杠杆作用,打通 OCCS 价值闭环

当前,OCCS 的经济收益主要来自规避碳税所产生的成本节约,以及捕获 CO_2 的售卖或利用。要突破其经济性瓶颈,关键在于建立有效的碳定价和市场机制,将减排行为直接转化为可交易、可量化的稳定经济收益。鉴于航运业的全球性特征,政策设计需兼顾国际协调与区域先行。

1)应积极推动在国际层面(如 IMO)建立全球性碳税或排放交易体系,搭建统一、公平的减排成本核算体系。

2)针对已纳入碳市场的区域(如欧盟),应严格执行并逐步强化其碳市场机制。而在尚未建立全国碳市场的国家(如中国),则可率先探索设立航运业专项碳交易试点或碳税政策,为未来全面接轨积累实践经验。进一步地,应允许安装 OCCS 的船舶将其经核证的减排量用于抵消自身碳配额,或作为自愿减排量在市场上交易。该模式将为航运公司开辟一个稳定、全新的收入来源,将环保投入转化为可交易的资产。通过“碳定价约束 + 市场交易激励”的双向驱动模式,引导社会资本流向绿色航运技术研发,形成“减排-收益-再投资”的良性循环,从而加速整个行业向净零排放目标迈进。

5 结 语

本研究旨在系统性地剖析船舶应用OCCS技术的经济性构成要素,并通过对MR型油轮的案例进行深度量化分析,以评估其商业化应用的可行性。具体结论如下。

1)案例量化分析揭示OCCS经济性的核心障碍与潜在可行性。对MR型油船的深度分析表明,其经济性瓶颈主要体现在两个层面:资本端,巨额的初始投资是首要制约因素;在运营端,由额外燃料消耗主导的VOPEX占比高达88.87%,成为影响系统运营经济性的关键。然而,在考虑碳税规避和CO_2销售收入后,该系统的投资回收期为8.38 a,表明其在特定条件下已具备一定的盈利能力,展现了商业化的潜力。

2)敏感性分析揭示投资回收周期对碳税税率与CO_2市场价格的显著敏感性,这两者构成决策过程中的核心不确定性。与之相比,燃料价格的影响则相对次要,而MEA价格的影响可忽略不计,对决策影响甚微。

3)推动OCCS商业化应用需构建"政策-技术-市场"三位一体的支撑体系。

在政策层面,应构建"前端激励+后端扶持"的财税政策体系,通过直接补贴、税收抵免等方式降低初始投资门槛,依托港口费减免等措施降低运营成本,激发航运企业的应用意愿。

在技术层面,聚焦关键技术创新,通过系统集成、能源替代、工艺革新和价值转化等组合路径,系统性降低能耗与全周期运维成本。

在市场层面,应充分发挥碳市场的杠杆作用,建立有效的碳定价与交易机制,将减排行为直接转化为可交易、可量化的经济收益,从而打通价值闭环,形成"减排-收益-再投资"的产业良性循环。

综上所述,OCCS是实现航运业碳减排的重要技术手段,未来发展前景广阔。然而,针对船舶应用OCCS的经济性分析,未来仍需在以下领域展开深入研究。

1)深化低能耗工艺与余热集成技术研究。未来应重点聚焦于新型低能耗吸收剂的开发及传统MEA工艺的改进。同时,探索将OCCS系统废热和船舶主机余热回收系统进行深度集成,实现能源的梯级利用,从而大幅降低因运行捕集系统导致的额外燃料消耗,从根源上降低可变运营成本。

2)推进设备轻量化、紧凑化和船舶适配性设计。鉴于船舶空间有限,未来需研发紧凑型、模块化的捕集设备及高性能轻质材料。同时,应重新考量船舶布局与货物存储方案,以在降低初始投资的同时,减少加装设备对船舶运力和稳定性的负面影响。

3)创新投融资模式与精准化扶持政策。针对航运业特点,一方面应探究如何利用绿色债券、碳资产证券化等多元化金融工具,有效化解初始投资巨大的难题;另一方面需探索更加精准有效的扶持政策,如提供直接补贴与税收优惠。同时布局CO_2资源化利用路径,推动捕集的CO_2转化为甲醇等高附加值产品,以此拓宽企业收益渠道,从而提升航运企业应用碳捕集技术的积极性,共同推动行业的绿色转型发展。

参 考 文 献

[1] Dimoune D M, Abiodun B J, Ostrowski M, et al. Effect of stratospheric aerosol injection on marine heatwave events off the coast of South Africa[J]. Scientific Reports, 2025, 15:36731.

[2] Luo B, Luo D, Xiao C, et al. Recent accelerated decadal shift in winter north american temperature patterns under pacific-atlantic decadal variability[J]. Earth's Future, 2025, 13(10):1-14.

[3] Wan C, Shao L, Fan L, et al. Spatiotemporal evolution of global maritime accidents: integrating hot spot detection and severity modeling for system safety[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2026, 266: 111687.

[4] Ha S, Jang H, Park C, et al. A prospective life cycle assessment framework for sustainable renewable fuels in international shipping: hydrogen based e fuels[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226: 116219.

[5] Kumar R, Sebe M, Yao F, et al. Shipping fuel pathways in a changing climate: a prospective foresight study for 2050[J]. Marine Policy, 2025, 182: 106868.

[6] Minutillo M, Rinauro B, Lanni D, et al. Technical feasibility of a methanol-fuelled SOFC system for the propulsion of bulk carrier ships[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 184:151893.

[7] Mehrabian M J, Hooshmand H, Khoshgoftar Manesh M H. Ammonia-fueled solid oxide fuel cells for maritime applications: a 4E and risk assessment with multi-objective optimization and intelligent control[J]. Renewable Energy, 2026, 256: 124432.

[8] Wang K, Li Z, Liu X, et al. Wind-assisted propulsion system for shipping decarbonization: technologies, applications and challenges[J]. Energy, 2025, 336: 138420.

[9] Wu H, Zhang X, Wu Q, et al. Readiness and challenges of carbon capture technologies based on the

shipping industry[J]. Marine Pollution Bulletin, 2024, 207: 116878.

[10] Vakili S, Manias P, Armstrong L M, et al. Technical, economic, and environmental assessment of CO_2 ship transport in carbon capture and storage[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 373:123919.

[11] Zhang N, Wang X, Wang C, et al. Design and innovative application of ship CCUS technology under the requirements of green shipping[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(6): 1157.

[12] Jensen E H, Pedersen R C, Loge I A, et al. The cost of impurities: a techno-economic assessment on conditioning of captured CO_2 to commercial specifications [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2025, 141: 104309.

[13] Luo X, Wang M. Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation [J]. Applied Energy, 2017, 195: 402-413.

[14] Feenstra M, Monteiro J, Van Den Akker J T, et al. Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 85: 1-10.

[15] Tian Z, Zhou Y, Zhang Y, et al. Design principle, 4E analyses and optimization for onboard CCS system under EEDI framework: a case study of an LNG-fueled bulk carrier[J]. Energy, 2024, 295: 130985.

[16] Feng Y, Zhu H, Dong Z. Simultaneous and global optimizations of LNG-Fueled hybrid electric ship for substantial fuel cost, CO_2, and methane emission reduction [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2282-2295.

[17] Güler E, Ergin S. An investigation on the solvent based carbon capture and storage system by process modeling and comparisons with another carbon control methods for different ships[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 110: 103438.

[18] Jeong I, Shin H, Choung S, et al. Techno-economic and environmental evaluation of onboard carbon capture and storage system through heat integration and solvent selection[J]. Energy, 2025, 334: 137747.

[19] Osman A I, Hefny M, Abdel M I A, et al. Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19: 797-849.

[20] Yi C, Guan B, Zhuang Z, et al. Onboard carbon capture and storage system: integration of sorption, regeneration, separation and storage[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 375:133856.

[21] Waseem M, Ghasem N, Al-Marzouqi M. Experimental and simulation study of a catalytic-membrane integrated system for efficient CO_2 stripping [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2025, 211:110216.

[22] Roussanaly S, Deng H, Skaugen G, et al. At what pressure shall CO_2 be transported by ship? an in-depth cost comparison of 7 and 15 barg shipping [J]. Energies, 2021, 14(18): 5635.

[23] 刘骏,袁鑫,陈衡,等. 大规模火电 CCUS 应用的经济性评估及提升研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(10):1316-1325.
Liu J, Yuan X, Chen H, et al. Study on economic assessment and improvement for large-scale thermal power CCUS applications [J]. Journal of chinese society of power engineering, 2023, 43(10):1316-1325. (in Chinese)

[24] Tavakoli S, Gamlem G M, Kim D, et al. Exploring the technical feasibility of carbon capture onboard ships[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 452: 142032.

[25] Visonà M, Bezzo F, D′Amore F, et al. Techno-economic analysis of onboard CO_2 capture for ultra-large container ships [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 485: 149982.

[26] Roussanaly S, Berghout N, Fout T, et al. Towards improved cost evaluation of carbon capture and storage from industry[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 106: 103263.

[27] Ros J A, Skylogianni E, Doedee V, et al. Advancements in ship-based carbon capture technology on board of LNG-fuelled ships[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 114: 103575.

[28] Roussanaly S, Aasen A, Anantharaman R, et al. Offshore power generation with carbon capture and storage to decarbonize mainland electricity and offshore oil and gas installations: a techno-economic analysis [J]. Applied Energy, 2019, 233/234: 478-494.

[29] Ahmed U. Sustainable framework of hydrogen production from date palm waste with CO_2 capture: An energy, exergy and economic analysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 179: 151676.

[30] Awoyomi A, Patchigolla K, Anthony E J. Process and economic evaluation of an onboard capture system for LNG-Fueled CO_2 carriers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(15): 6951-6960.

[31] Liu H, Ju K, Wei X, et al. Shipowners′ responses to carbon tax: speed optimization using AIS data [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2025, 27(12): 7663-7678.

[32] Zhang L, Tang Z, Gao R, et al. CCUS-assisted electricity-chemical polygeneration system for decarburizing coal-fired power plant: Process integration and performance assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: 141972.

(下转第 **152** 页)

WAVEWATCH Ⅲ: updates and verification [J]. Journal of Physical Oceanography, 2019, 49 (2): 489-517.

[20] Umesh P A, Behera M R. Performance evaluation of input-dissipation parameterizations in WAVEWATCH Ⅲ and comparison of wave hindcast with nested WAVEWATCH Ⅲ-SWAN in the Indian Seas [J]. Ocean Engineering, 2020,202: 1-29.

[21] Foli B A K, Ansong J K, Addo K A, et al. A WAVEWATCH III model approach to investigating ocean wave source terms for West Africa: input-dissipation source terms [J]. Remote Sensing in Earth Systems Sciences, 2022,5(1):95-117.

[22] 韩慎友,陈伟斌,陈见. 超强台风"天鸽"(1713)近海急剧加强特征及诊断分析[J]. 气象研究与应,2020,41(1):70-74.
Han S Y, Chen W B, Chen J. Characteristics and diagnostic analysis on rapid intensification of super typhoon "Hato" (1713) over the offshore area [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020,1(1):70-74. (in Chinese)

[23] Kaplan J, Demaria M, Knaff J A. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins [J]. Weather and forecasting, 2010,25(1):220-241.

[24] 陈依妮. 基于WAVEWATCH Ⅲ的近岛礁波浪数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2022.
Chen Y N. Numerical simulation of waves near islands and reefs based on WAVEWATCH Ⅲ [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2022. (in Chinese)

[25] Campos R M, Soares C G. Comparison of HIPOCAS and ERA wind and wave reanalyses in the North Atlantic Ocean[J]. Ocean Engineering, 2016,112:320-334.

[26] Cha D H, Wang Y. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model[J]. Monthly Weather Review, 2013,141(3): 964-986.

[27] 李江夏,胡玉植. ERA-Interim 和 ERA-5 再分析资料中台风模拟精度评估[J]. 水利水运工程学报,2021(1):62-69.
Li J X, Hu Y Z. Assessment of typhoons in ERA-Interim and ERA-5 reanalysis datasets[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1):62-69. (in Chinese)

(上接第75页)

[33] Zhen L, Hu Z, Yan R, et al. Route and speed optimization for liner ships under emission control policies[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 110: 330-345.

[34] Psaraftis H N, Kontovas C A. Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 52-69.

[35] Doudnikoff M, Lacoste R. Abating carbon dioxide and sulfur oxides emissions from container shipping [J]. Transportation Research Record, 2013, 2326: 8-15.

[36] Cariou P, Cheaitou A. The effectiveness of a European speed limit versus an international bunker-levy to reduce CO_2 emissions from container shipping [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(2): 116-123.

[37] Bulk S. Project Remarccable: a case study for onboard carbon capture on the MR tanker Stena Impero [R]. London: Oil and Gas Chimate Initiative, 2024: 1.

[38] Gao W, Zheng H, Zhang Y, et al. Simulation and optimization of a dual-loop organic Rankine cycle-onboard carbon capture system for LNG-powered ships [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 486: 144512.

[39] 何书畅. 考虑碳税和EEOI的集装箱班轮运输航线配船研究[D]. 大连:大连海事大学, 2024.
He S C. Vessel allocation study for liner shipping routes considering carbon tax and EEOI [D]. Dalian: Dalian Maritime University. 2024. (in Chinese)

[40] 白宏山,赵东亚,田群宏,等. CO_2 捕集、运输、驱油与封存全流程随机优化[J]. 化工进展, 2019, 38(11): 4911-4920.
Bai H S, Zhao D Y, Tian Q H, et al. Stochastic optimization of the whole process of CO_2 capture, transportation, utilization and sequestration [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(11): 4911-4920. (in Chinese)