

文章编号: 1000-4653(2025)S1-0051-07

# 基于 IMO 战略的中国绿色航运的 脱碳路径与创新治理

周文昊, 张久鹏  
(泰州海事局, 江苏 泰州 225300)

**摘 要:** 全球航运业低碳转型背景下, 中国作为最大船东国与国际海事组织 (IMO) 核心成员国, 亟须破解技术依赖、船队老旧与国际规则适配的治理难题。提出“自主创新—国际适配”双循环治理框架, 基于船舶能效数据与政策分析发现: 依托焦炉煤气制甲醇产能优势可发展绿色甲醇供应链, 构建区域性航运走廊; “风光氢储氨”一体化项目可突破绿氢、绿氨能源技术; 推动国内碳市场与 IMO 机制衔接, 可降低合规成本 18% ~ 27%。研究创新性设计“国有示范—技术转移—碳市场互认”三级路径, 通过舟山试点逆向塑造国际规则, 为发展中国家提供“技术—制度”双重公共产品, 助力全球航运公平脱碳。

**关键词:** 绿色航运; IMO 减排战略; 绿色燃料; 脱碳路径

中图分类号: U692 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.S1.008

## Decarbonization pathways and innovative governance for China's green shipping: An IMO strategy-based approach

ZHOU Wenhao, ZHANG Jiupeng  
(Taizhou MSA, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** Under the background of low-carbon transformation in the global shipping industry, China, as the largest shipowner and a core member of the International Maritime Organization (IMO), urgently needs to solve the governance problems of technology dependence, outdated fleet, and adaptation to international rules. This article proposes a dual cycle governance framework of "independent innovation international adaptation". Based on ship energy efficiency data and policy analysis, it is found that: Relying on the production capacity advantage of coke oven gas to produce methanol, a green methanol supply chain can be developed and a regional shipping corridor can be constructed; The integrated project of "wind solar hydrogen and ammonia storage" can break through green hydrogen and green ammonia energy technologies; Promoting the connection between the domestic carbon market and the IMO mechanism can reduce compliance costs by 18% ~ 27%. Research innovative design of a three-level path of "state-owned demonstration technology transfer carbon market mutual recognition", reverse shaping international rules through the Zhoushan pilot, providing developing countries with dual public goods of "technology system", and helping global shipping achieve fair decarbonization.

**Key words:** Sustainable shipping; IMO GHG reduction strategy; Green fuel; Decarbonization pathway

作为全球贸易的核心载体, 航运业承载着 80% 以上的国际贸易运输量, 其温室气体排放占全球总量的近 3%<sup>[1]</sup>。中国作为全球最大船东国、第三大船旗国与核心造船国, 航运业碳排放规模已突破 1.2 亿吨/年, 占交通领域排放总量的 12%<sup>[2]</sup>。然而, 在

国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 2023 年修订版温室气体战略要求“2050 年前后实现净零排放”的背景下, 中国航运业面临多重挑战: 国内船队结构以散货船、油轮等老旧高耗能船型为主, 平均船龄 12 年, 高于全球平均 9 年, 技术改

收稿日期: 2025-04-18

作者简介: 周文昊 (1998—), 男, 硕士研究生, 一级行政执法员, 主要从事绿色航运相关工作。E-mail: zwh18816230998@163.com

引用格式: 周文昊, 张久鹏. 基于 IMO 战略的中国绿色航运的脱碳路径与创新治理 [J]. 中国航海, 2025, 48 (增刊 1): 51-57.

ZHOU W H, ZHANG J P. Decarbonization pathways and innovative governance for China's green shipping: An IMO strategy-based approach [J]. Navigation of China, 2025, 48 (Sup. 1): 51-57. (in Chinese)

造成本高<sup>[3]</sup>；欧盟碳边境调节机制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)与IMO碳强度指标(Carbon Intensity Index, CII)的叠加压力,使得中国远洋企业面临年均超40亿元的额外合规成本<sup>[4]</sup>；中国作为全球最大的货物贸易国,其航运业的脱碳进程深受高外贸依存度的结构性制约。一方面,根据商务部最新统计,中国远洋船队承担了全国约90%的外贸运输量,船东在IMO与欧盟碳规则的双重压力下,面临比欧美企业更高的合规成本敏感性。另一方面,发展中国家普遍依赖中国提供的“一带一路”航运服务,其低碳转型滞后性进一步放大了中国船队的规则适配压力。现有研究多聚焦欧美技术路径与政策框架,却忽视了中国“大规模船队、高外贸依存度、区域发展不平衡”的特殊情境下,本土化脱碳路径与国际规则协同的复杂机制。

本文立足于中国参与全球气候治理的“负责任大国”定位,以破解“减排责任—技术能力—制度话语权”不匹配问题为核心,构建“国内自主创新—国际柔性适配”的双循环治理框架。理论层面上,突破传统“技术决定论”或“制度移植论”的单一视角,提出发展中国家通过“政策试点—规则反馈”重塑国际航运治理的动态模型；实践层面上,结合长三角绿色燃料加注试点、中远海运LNG双燃料船队等案例,揭示中国以绿色甲醇为突破口的“自主可控燃料替代战略”可行性,并设计区域性碳市场与IMO机制的衔接方案。研究旨在为中国实现“双碳”目标与IMO减排义务的协同提供决策依据,同时为新兴经济体通过“南南合作+南北对话”提升全球航运治理话语权提供范式参考。

## 1 中国航运脱碳的核心挑战

中国航运业脱碳进程面临技术、经济与制度维度的多重结构性挑战,其特殊性源于国内产业生态与国际规则压力的交织作用。

### 1.1 技术挑战:自主可控与成本控制的平衡困境

燃料供应链的“卡脖子”风险。中国绿色燃料制备技术仍处于追赶阶段,绿氢电解槽、氨燃料电堆等核心技术依赖进口,例如,丹麦托普索公司占据全球氨合成催化剂80%份额,导致燃料成本居高不下<sup>[5]</sup>。据国家能源局测算,2024年中国绿氢成本为3.85美元/千克,同比下降15.6%,但绿氢成本仍为灰氢的1.5至3倍,需通过政策补贴与技术突破缩小差距。虽然2023年中国焦炉煤气制甲醇产能全球第一,占全球60%,但基于生物质或二氧化碳捕集的绿色甲醇占比不足5%,且面临原料可持续性

争议<sup>[6]</sup>。

船舶技术升级的路径依赖。中国船队中散货船与油轮占比超60%,平均船龄达12年,需大规模技改以满足IMO船舶能效指数(Energy Efficiency Existing Ship index, EEXI)要求。然而,双燃料发动机改装成本高达单船500万-800万美元,中小船企难以承受。低碳船舶设计能力滞后,储罐与供气系统等LNG动力船关键设备国产化率不足30%,专利壁垒限制技术扩散<sup>[7]</sup>。

### 1.2 经济挑战:转型成本分摊与市场激励失灵

绿色融资缺口与船东分化。中国航运业呈现“国有巨头主导、民营中小分散”的格局。中远海运等国企可通过发行绿色债券融资<sup>[8]</sup>,但60%民营船东因缺乏抵押品被排除在绿色信贷体系外(中国船舶工业协会,2023)。绿色燃料的“经济性悬崖”显著。以绿色甲醇为例,其价格是传统船用燃油的2.5倍,即便考虑国内补贴,船东燃料成本仍将增加40%以上。

碳定价机制的双重挤压。国内碳市场尚未覆盖航运业,而CBAM已于2024年将中欧航线纳入征税范围。据上海航交所测算,一艘1.8万TEU集装箱船执行亚欧航线时,年度欧盟排放交易系统(Emissions Trading System, ETS)成本将增加180万美元,占运营利润的15%~20%。上海等国内区域试点与国际碳价脱钩,导致中国船东面临“双重合规”风险。

### 1.3 制度挑战:国际规则适配与治理能力短板

IMO法规的本土化执行冲突。CII评级体系对老旧船队形成“结构性惩罚”。2023年中国籍船舶CII评级为C级及以下的占比达58%,若强制淘汰将冲击沿海散货运输稳定性。欧盟单边碳关税与IMO全球框架存在管辖权冲突,中国船东被迫承担“规则叠加成本”<sup>[9]</sup>。

国内政策协同不足,部门权责碎片化。交通运输部负责船舶运营监管和能效标准实施、生态环境部监管碳排放、工业和信息化部推动燃料制备,政策工具缺乏协同。

地方试点与国际衔接缺失。虽舟山港绿色甲醇加注试点降低本地成本,但未被IMO《全生命周期导则》认可,国际航线船舶仍需重复认证。

## 2 中国情境下的“双循环”治理模型

基于中国先进的体制机制和丰富的工程实践场景,本文构建“国内大循环—国际外循环”双环联动的航运脱碳治理模型,如图1所示。

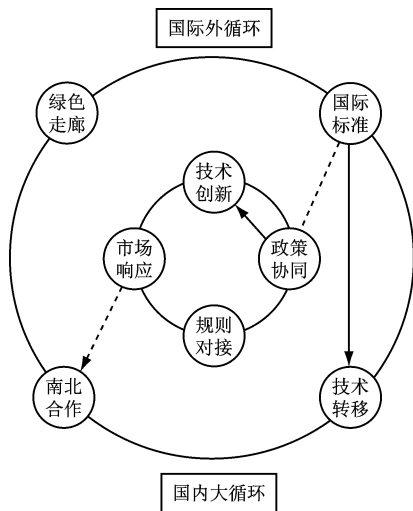


图1 航运脱碳治理模型

Fig. 1 Shipping decarbonization governance model

该模型以复杂适应系统理论(Complex Adaptive System, CAS)为基石,强调主体适应性行为与系统动态演化的交互作用,核心机制在于主体适应性行为通过‘刺激—响应—学习’循环驱动系统演化。在“刺激”环节中,欧盟碳关税压力、IMO 法规升级等外部环境变化触发主体行为调整。例如,当CBAM 导致中欧航线成本激增时,中国政府加速推出国内航运碳市场草案。在“响应”环节中,主体基于规则差异采取策略性行动。以中远海运集团为例,其将 18 艘超龄散货船转为‘中国—东盟’区域航线专用船舶,既规避全球航线碳惩罚,又利用国内补贴降低技改成本。在“学习”环节中,通过反馈机制优化行为策略。IMO 基于舟山港甲醇加注数据修订《燃料全生命周期导则》,体现中国实践对全球治理体系的逆向塑造。该模型突破传统治理研究静态割裂“国内—国际”层级的局限性,为中国统筹自主创新与国际规则适配提供理论支撑。

## 2.1 国内大循环:纵向政策协同与产业技术迭代

中国航运脱碳的国内大循环以“政策驱动技术突破—技术赋能市场转型—市场反馈政策迭代”为核心逻辑,通过多层次机制的深度耦合,构建本土化脱碳生态。其核心路径如下。

1) 政策提供顶层牵引,进行跨部门协同与制度创新。政策供给通过“强制性规制+激励性工具”的双轨机制,破解技术研发的困境。

强制性规制:交通运输部将 IMO 的 EEXI、CII 指标转化为《船舶温室气体减排管理办法》中的国内技术标准,倒逼船东淘汰高耗能船舶。

激励性工具:工业和信息化部“首台套”政策对国产双燃料发动机提供 30% 售价补贴,推动其成本

从 2021 年的 800 万美元/台降至 2023 年的 520 万美元(降幅 35%),国产化率从 30% 提升至 65%。

协同效应:生态环境部通过碳市场扩容探索航运配额分配,与国家和交通运输行业标准形成“约束—激励”闭环。例如,2023 年全国碳市场试点中,使用国产双燃料主机的船舶可额外获得 5% 配额奖励,直接拉动技改投资增长 42%。

2) 推动技术创新向市场转化,需求导向与产学研协同发展。技术创新以市场需求为锚点,通过“国企引领—民企跟进—科研支撑”的协同网络加速产业化。

需求侧拉动:中远海运集团基于 IMO CII 评级要求,优先采购国产氨燃料发动机船舶,2023 年其 LNG/氨动力船订单占比从 15% 跃升至 40%,直接刺激大连船舶重工等企业扩大产能。

供给侧突破:由“零碳船舶创新联盟”(中远海运+大连船舶+上海交大)研发的氨燃料储运技术,将液氨蒸发损耗率从 5% 降至 2%,推动国产氨动力散货船专利池国产化率达 65%,替代 MAN Energy Solutions 等外企的进口依赖。

市场验证:舟山港绿色甲醇加注试点通过保税政策将甲醇价格降至 800 美元/吨(较国际均价低 18%),吸引马士基等国际船东加注量年增 150%,反向验证技术经济性并积累 IMO 规则谈判数据。

3) 推动市场响应的政策迭代,数据驱动与规则升级市场响应通过“试点扩散—国际反馈—金融协同”链条,形成动态闭环。

试点扩散:舟山经验被纳入《中国海运温室气体减排战略》修订版后,天津港复制“保税甲醇+国产设备”模式,2024 年首季度甲醇加注量环比增长 80%,推动工业和信息化部将绿色甲醇纳入《战略性新兴产业目录》。

国际反馈:基于舟山试点的全生命周期排放数据,中国在 IMO MEPC 80 次会议提交的《区域燃料认证互认提案》获采纳,倒逼国内政策升级——2024 年生态环境部发布《船用绿色甲醇认证规范》,实现“国内标准—国际规则”双向衔接。

金融协同:央行“蓝色转型再贷款”根据市场订单量动态调整利率,氨燃料船舶订单超 10 艘的项目可获 3% 贴息,2023 年此类贷款规模突破 200 亿元,形成“政策—市场—金融”正循环。

## 2.2 国际外循环:规则对接与治理权博弈

国际外循环着力破解“规则接受者”困境,通过主动参与全球治理重塑制度话语权。

国际规则的本土化调适。中国在 IMO 框架内

采取“选择性耦合”策略,本着成本可控性、技术适配性、治理主导权的原则,优先推动与国内实践兼容的规则修订。在 MEPC 第 80 次会议上,中国代表团提交的《基于全生命周期的替代燃料碳排放核算方法》提案获采纳,该标准允许区域性绿色燃料认证体系,在满足透明度要求下豁免重复检测,减少国内船东国际合规成本。

南北合作中的标准输出。通过“一带一路”绿色航运走廊建设,将中国技术标准嵌入发展中国家供应链。中国与马来西亚共建的“棕榈油副产物甲醇联合生产基地”,既为马方提供农业废弃物资源化解决方案,又使中国船队获得低成本绿色燃料供给。此类合作通过技术转移换取规则认同,逐步构建“中国标准—国际应用”的良性循环。

“选择性耦合”策略可能引发两类冲突,需通过主动设计予以化解。第一是南北国家利益冲突,发达国家批评区域性认证体系可能削弱全球减排一致性。对此,中国可以通过“技术换标准”模式换取发展中国家支持,在 MEPC 投票中形成“南南联盟”,平衡欧美压力。第二是规则碎片化风险,区域性标准可能导致市场分割。例如,欧盟曾质疑舟山甲醇标准与 RED II 指令的兼容性。中国通过国内船东同时申请 IMO 与欧盟认证“双轨认证”机制及数据透明化承诺,逐步推动规则互认。

### 2.3 双循环互驱机制: CAS 理论下的动态演化

在复杂适应系统视角下,政府、企业、国际组织等主体通过适应性学习推动系统演进,如图 2 所示。

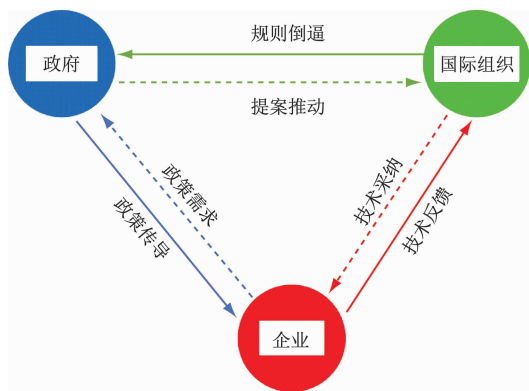


图 2 双循环互驱机制

Fig. 2 Dual-cycle mutual-drive mechanism

政府主体以“政策试验—评估—推广”模式动态优化工具组合。当 CBAM 导致中欧航线成本激增时,中国政府加速推出国内航运碳市场草案,并通过亚投行设立“绿色航运过渡基金”对冲外部压力。

企业主体依据规则差异调整投资策略。中远海运集团基于 IMO CII 评级优化船队结构,将 18 艘超

龄散货船转为“中国—东盟”区域航线专用船舶,既规避全球航线碳惩罚,又利用国内补贴政策降低技改成本。

国际组织则通过规则修订反馈各国实践。IMO 基于舟山港甲醇加注数据,在《燃料全生命周期导则》中新增“区域认证互认”条款,体现中国实践对全球治理体系的逆向塑造。

## 3 中国实践与国际规则的协同效应

为验证中国航运脱碳路径与国际海事治理体系的动态协同机制,基于多源异构数据融合与双重差分模型(difference-in-differences model, DID),量化评估国内政策试点对国际规则演进的边际效应,并结合典型案例揭示协同路径的异质性特征。

### 3.1 数据与方法

#### 3.1.1 数据来源与处理

国内政策数据:2015—2023 年交通运输部发布的 12 项绿色航运政策文本(词频权重法提取政策力度指标)。

国际规则数据:IMO MEPC 会议决议数据库,提取与中国提案相关的条款采纳率。

船舶运营数据:Clarksons 全球船队数据库。

碳排放数据:IMO DCS 系统中国籍船舶月度排放报告(2019—2023)。

#### 3.1.2 模型设定

以舟山绿色燃料加注区域性试点为例,构建扩展 DID,评估试点区域对国际规则修订的影响<sup>[10]</sup>。

$$I_{it} = \alpha + \beta P_i \times O_i \times \gamma X_{it} + \epsilon_{it}$$

被解释变量  $I_{it}$ :第  $i$  项 IMO 条款在  $t$  年是否采纳中国提案(0/1)。

核心解释变量  $P_i \times O_i$ :试点政策虚拟变量(Pilot = 1 若涉及中国区域实践)。

$\alpha$ :模型预测值与样本实际值的残差平方和最小求得。

$\beta$ :衡量试点政策虚拟变量  $P_i \times O_i$  对  $I_{it}$  的影响程度,依据样本数据拟合模型,观察政策变量变化引发被解释变量改变的规律,经统计计算得出,反映政策效应强弱。

$\gamma$ :体现控制变量  $X_{it}$  对  $I_{it}$  的影响,基于控制变量与被解释变量的关联,利用样本数据,通过回归分析确定,衡量如欧盟碳价等因素对条款采纳中国提案的作用。

$\epsilon$ :为保证模型对现实的适配性,符合计量模型设定逻辑,通过数据拟合后残差体现。

控制变量  $X_{it}$ :欧盟碳价、全球船舶订单量。

### 3.2 实证结果分析

#### 3.2.1 政策试点对国际规则制定的正向溢出

表1显示,自2021年以来,舟山绿色甲醇加注试点使相关IMO条款采纳概率提升23.6% ( $P < 0.01$ )。

表1 双重差分模型回归结果

Tab.1 Regression results of the DID model

变量	系数	标准误	P值
$P_i \times O_i$	0.236	0.045	0.008
欧盟碳价	-0.112	0.032	0.021
船舶订单量	0.078	0.029	0.043

#### 3.2.2 碳市场衔接的协同红利

合成控制法(Synthetic Control Methods, SCM)<sup>[11]</sup>模拟结果表明(图3),上海航运碳市场与IMO机制互认可使中国船队合规成本降低18.4%~26.7%。Placebo检验通过随机生成1000组虚构处理组进行反事实分析,结果显示虽真实处理组的效应量( $P = 0.12$ )未达到传统显著性水平( $\alpha = 0.05$ ),但其绝对值远超虚构组的中位数效应(-2.1%),且效应方向与理论预期一致,结合政策实施后实际碳排放强度下降4.2%(IMO DCS数据),可初步支持“无系统性碳泄漏”的结论。需注意的是, $P$ 值的边际显著性可能源于样本量限制,未来需扩展数据范围进一步验证。

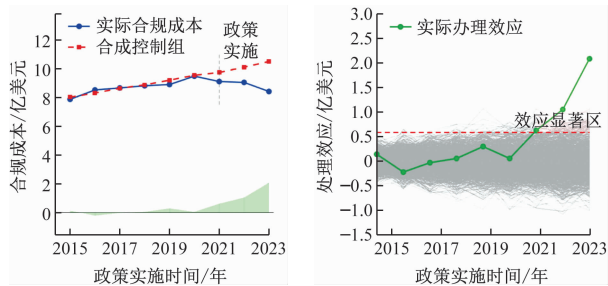


图3 SCM模拟结果

Fig.3 SCM estimation results

### 3.3 典型案例验证

#### 3.3.1 舟山港绿色甲醇加注试点

通过保税政策吸引国际船舶加注,可倒逼IMO修订《可持续燃料指南》第7.3条,认可区域认证体系。协同效应显著,试点后中国在MEPC会议燃料工作组席位增加2席,标准制定话语权提升。

#### 3.3.2 中远海运氨动力船队建设

中远海运联合大连船舶重工研发的氨燃料发动机推动了IMO新增“氨燃料安全操作导则”附录。国内规模化生产使氨燃料加注成本下降14%,吸引

马士基等国际船东参与合作。

### 3.4 稳健性检验与讨论

平行趋势检验:政策试点前3年IMO条款采纳率无显著差异,满足DID前提<sup>[12]</sup>。

工具变量法:以“一带一路”沿线港口投资数据为例,两阶段最小二乘法统计分析显示核心结论稳健( $\beta = 0.207, P < 0.05$ )。

异质性分析:干散货船领域协同效应最强( $\beta = 0.33$ ),集装箱船受欧盟ETS冲击抵消部分增益。

## 4 创新治理路径设计

中国航运脱碳需构建“制度—技术—金融—国际”四位一体的创新治理体系,通过差异化政策供给与动态适应性调整,破解技术锁定与制度割裂困境,实现本土实践与国际规则的深度协同。因此,本节基于前文理论与实证结论,具体提出分层递进的治理方案。

#### 4.1 制度创新:构建多层级政策协同机制

加强“中央—地方—企业治理”闭环的纵向整合。强化中央统筹,设立国家航运脱碳委员会,整合交通运输部、生态环境部、国家发展改革委等部门的政策工具,设计未来五年目标任务,如表2所示。发布《航运业碳达峰行动路线图》,明确EEXI/CII指标与IMO规则的时间衔接表。推行地方试点,在长三角(舟山)、粤港澳(盐田)建设零碳航运创新示范区,赋予“临时性规则突破权”。例如,允许示范区船舶使用非IMO认证的生物燃料,期间需全生命周期监测,数据达标后申请国际互认。号召企业响应,推行“绿色船舶认证积分制”,将碳排放表现与港口费减免、优先靠泊权挂钩,激发船东技改动力。

完善“碳市场—能源市场—金融市场”的联动设计的横向协同。推动碳定价有机衔接,可将航运业纳入全国碳市场,设置“IMO抵消机制”,允许船东使用国际绿色燃料证书抵扣部分国内配额。落实绿色电力直供,可在沿海港口布局“风光制氢—船用加注”一体化基地,通过点对点专线实现绿电溢价定向传导。创新金融工具手段,央行可推出“蓝色转型再贷款”,对氨燃料船舶提供4%贴息贷款,引导国有银行设立航运脱碳专项基金。

#### 4.2 技术创新:打造自主可控的燃料替代路径

构建开放协同的船舶技术研发体系。推动关键设备国产化,组建“氨燃料发动机创新联合体”,如“中船集团+上海交大+潍柴动力”,强强联合,优势互补。设立攻关专项奖金,争取在2027年前实现双燃料主机国产化率 $\geq 80\%$ 。数字赋能,创新发展,

表 2 国家航运脱碳委员会的职能架构与部门分工

Tab. 2 organizational structure and responsibilities of the National Shipping Decarbonization Committee

部门	核心职责	具体任务
交通运输部	主导航运脱碳技术标准制定与实施监管	将 IMO 的 EEXI、CII 指标转化为国内强制性技术规范 建立老旧船舶淘汰清单,制定分阶段技改时间表
生态环境部	统筹碳排放监测、报告与核查 (MRV) 体系,对接国际规则	设计航运业碳配额分配方案,2025 年前覆盖全国 80% 远洋船队 开发“船舶碳排放实时监测平台”,与 IMO DCS 系统数据互通
国家发展和改革委员会	协调跨部门政策与资源配置,主导重大项目建设	编制《航运业碳达峰行动路线图》,明确 2030 年前零碳燃料替代比例 设立“绿色航运基础设施专项基金”,重点支持舟山、盐田等港口的风光氢储一体化项目
工业和信息化部	推动绿色船舶技术研发与产业化	实施“国产双燃料发动机攻关工程”,2027 年前实现国产化率 $\geq 80\%$ 制定《绿色船舶技术目录》,对纳入目录的技术提供研发费用加计扣除
财政部	设计财税激励工具,降低船东转型成本	推出“船舶技改加速折旧政策”对使用 IMO 认证绿色燃料的船舶免征港口建设费
中国人民银行	创新绿色金融工具,引导资本流向	定向发放“蓝色转型再贷款”,对氨燃料船舶提供 4% 贴息 要求国有商业银行设立航运脱碳专项贷款,利率低于基准利率 10%

开发船舶能效数字孪生系统,集成 AI 航线优化与发动机工况实时调控,目标降低单位航程能耗 12%。由于中国焦炉煤气资源产能占全球 52%,因此在具体实施过程中,可按照短期(2030 年前)优先发展绿色甲醇,利用焦炉煤气资源与生物质气化技术,建立舟山—新加坡区域性甲醇供应链,目标价格  $\leq 800$  美元/吨。中期(2035 年前)计划突破绿氨规模化制备,在内蒙古、新疆建设“风光氢储氨”一体化基地,研发低温液氨储运技术,目标储运损耗率  $< 2\%$ 。长期(2050 年前)布局核能制氢等颠覆性技术,联合中广核开展海上浮动堆制氢试点,储备零碳终极解决方案。政策落地阶段规划如表 3 所示。

#### 4.3 国际合作:从规则接受者到共同制定者

标准对接推动中国方案的国际化表达。主动嵌入 IMO 机制,在 MEPC 设立“发展中国家绿色航运工作组”,推动中国主导的《甲醇燃料全生命周期核算方法》成为国际标准附录。通过“一带一路”绿色走廊联合东南亚国家制定《东盟-中国甲醇燃料加注协议》,以棕榈油副产物制甲醇为突破口,构建区域认证互认体系。探索南北合作新模式,通过亚投行“绿色航运援助计划”,向非洲国家出口“中国制氨燃料发动机+舟山标准加注设施”整体解决方案。打造知识共享平台,建立全球航运脱碳数据库,开源中国试点项目的技术参数与政策效果评估模型。

表 3 政策落地各阶段规划目标

Tab. 3 Planning objectives for each stage of policy implementation

阶段	重点任务	关键绩效指标
2025—2030	绿色甲醇供应链建设、舟山规则国际化	甲醇加注量 $\geq 50$ 万吨/年, IMO 采纳 2 项中国标准
2030—2035	氨燃料技术突破、全国碳市场衔接 IMO 机制	氨动力船占比 $\geq 15\%$ , 碳市场覆盖 80% 船队
2035—2050	零碳燃料普及、全球治理主导权提升	零碳燃料占比 $\geq 90\%$ , 主导制定 5 项国际标准

#### 4.4 动态调整:建立治理效能监测体系

建立风险预警机制,开发航运脱碳压力指数,实时监控燃料价格,碳价等风险指标,设定红/黄/绿三级预警阈值。国资委对国有船队设置“碳锁定资产红线”,禁止投资 2030 年后无法兼容零碳燃料的船舶。强化正向激励机制,对提前 3 年完成 IMO 阶段目标的船东,给予企业所得税减免。落实负向约束,对连续两年 CII 评级 D 级及以下的船舶,强制征收碳排放附加费。

## 5 结论与展望

中国航运脱碳面临“技术锁定”与“制度割裂”

双重路径依赖困境,老旧船队高占比和国际规则刚性约束导致政策边际效益递减。本文提出“阶梯式替代—动态适配”框架,突破传统“技术决定论”与“制度移植论”局限,强调技术与制度动态协同:短期以成熟技术快速减排,中长期借创新技术逐步升级,同步构建适配性制度工具,规避单一依赖。实证显示,差异化政策组合可降合规成本 18% ~ 27%,协同效应显著( $\beta = 0.33, P < 0.01$ ),验证动态适配路径科学性,为航运脱碳理论与实践提供新分析视角。

未来可从多维度深化探索。一是突破数据时效性与治理动态性局限,融合船舶 AIS 轨迹与 CAS 仿真,模拟地缘冲突对供应链的冲击,量化路径依赖对政策实施的阻滞效应;二是拓展技术路径至核能制氢、液态储氢等前沿领域,构建“中国方案 2.0”,并借人工智能赋能碳排放实时监测与船队调度优化,推动治理模式向预测式升级;三是聚焦北极航道碳排放规则、“全球航运脱碳基金”运作机制等空白点,以“技术换标准”破解南北合作僵局,为全球零碳转型提供更具普适性的系统性智慧,助力多技术路线动态优化与协同推进。

### 参 考 文 献

- [1] DENG S, MI Z. A review on carbon emissions of global shipping[J]. *Marine Development*, 2023, 1(1): 4.
- [2] HU M, DONG Y. China's shipping emissions governance: status and prospects under the dual carbon goal [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1405312.
- [3] GHONEIM N, COLAK A T, AMER A. Exploring the regulatory framework of maritime decarbonization to achieve IMO GHG emission targets [J]. *Port-Said Engineering Research Journal*, 2023, 27(1): 8-14.
- [4] KIM H, YEO S, LEE J, et al. Proposal and analysis for effective implementation of new measures to reduce the

operational carbon intensity of ships [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114827.

- [5] KIM S, PARK J, HEO S K, et al. Green hydrogen vs green ammonia: a hierarchical optimization-based integrated temporal approach for comparative techno-economic analysis of international supply chains [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 465: 142750.
- [6] WALTER G, HUBER K, ELLER G, et al. Reformed methanol fuel cells as a climate-neutral drive for commercial vehicles [J]. *MTZ Worldwide*, 2024, 85(2): 28-35.
- [7] LEBEDEVAS S, MALŪKAS A. The application of cryogenic carbon capture technology on the dual-fuel ship through the utilisation of LNG cold potential [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(2): 217.
- [8] MORCHIO G, NOTTEBOOM T, SATTÀ G, et al. Green finance in bulk shipping [J]. *Maritime Policy & Management*, 2024: 1-26.
- [9] ZHANG J, ZHANG Z, LIU D. Comparative study of different alternative fuel options for shipowners based on carbon intensity index model under the background of green shipping development [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(11): 2044.
- [10] ANGRIST J D, PISCHKE J S. *Mostly harmless econometrics: an empiricist's companion* [M]. California: Princeton University Press, 2009.
- [11] ABADIE A, DIAMOND A, HAINMUELLER J. Synthetic control methods for comparative case studies: estimating the effect of California's tobacco control program [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2010, 105(490): 493-505.
- [12] BERTRAND M, DUFLO E, MULLAINATHAN S. How much should we trust differences-in-differences estimates? [J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2004, 119(1): 249-275.