

特色专题

“双碳”目标下中国船用绿色甲醇燃料的发展趋势分析

周玲玲¹, 王明媛^{2*}, 周剑¹, 郑嵩鑫³, 袁雪纯²

摘要 梳理了绿色甲醇燃料概念,对比分析了生物质路径、电制路径及电-生物质耦合路径等主要制备技术路径方法、减排潜力及其优劣势;总结归纳了中国国家、行业层面有关水运行业醇燃料相关政策,明确推动甲醇燃料在沿海和内河船舶中试点应用、加快甲醇加注站及储存等配套设施建设,梳理了目前中国已发布绿色甲醇相关标准文件,包括船舶甲醇燃料相关指南及聚焦绿色甲醇评价、绿色甲醇产品碳足迹评价团体标准,明确政策标准处于起步阶段;同时基于低排放分析平台(LEAP)构建中国碳排放预测综合评估模型,量化计算中长期中国水运行业能源消耗及碳排放总量,预估2050年中国水运行业能耗总量约为5800万~8500万t标准煤,排放总量将下降至约0.3亿~1.2亿t CO₂。提出未来中国推进船用绿色甲醇燃料产业发展路径建议,应持续跟踪并深度参与国际海事组织净零框架谈判进展及相关规则建设,结合行业内外优势系统深化水运行业转型路径量化研究,同时先试先行,由点及面,系统推进中国绿色甲醇有序发展。

关键词 船用燃料;绿色甲醇;“双碳”

交通部门是全球碳排放增长最快的部门之一,其碳排放问题日益严峻。数据显示,全球交通部门碳排放量从2010年的约70亿t CO₂增加至2023年的82.7亿t CO₂,预计2050年前将再增长1倍。在交通领域的碳排放构成中,航运部门占据着重要份额,2018年其温室气体(greenhouse gas, GHG)排放量达到10.76亿t,占全球温室气体排放的2.8%^[1]。

为应对航运业碳排放带来的环境压力,国际社会已积极采取行动。国际海事组织(International

Maritime Organization, IMO)发布的《2023年船舶温室气体减排战略》提出,在2050年实现国际航运零或近零排放。2025年4月,IMO初步批准的《国际海事组织净零框架》,对船用燃料温室气体强度(gas fuel intensity, GFI)提出目标要求。国际航运业开始加速走向碳中和。低碳和零碳燃料作为水运行业重要的中长期减排措施一直备受行业关注,其中绿色甲醇作为一种兼具清洁、可再生、碳中和属性的燃料,逐渐成为航运业重点考虑的选择之一。目前许多研究针对未来中国船用甲醇燃料发展路径开展了预测和分析,但不同研究之间存在较大差异和不确定性。本文主要基于中国船用绿色甲醇燃料生产技术路径、相关管理政策、未来需求潜力3个维度,分析展望中国水运行业船用绿色甲醇燃料的发展总体趋势。

1. 清华大学能源环境经济研究所,北京 100084

2. 中理检验有限公司,北京 100029

3. 香港科技大学(广州)碳中和与气候变化学域,广州 511453

收稿日期: 2025-10-21; 修回日期: 2025-11-20

基金项目: 中国远洋海运集团有限公司科技项目(2024-3-Z001-08)

作者简介: 周玲玲,助理研究员,研究方向为能源系统分析、全过程碳管理,电子信箱: linglingzhou@tsinghua.edu.cn; 王明媛(通信作者),研究方向为水运行业绿色、低碳、可持续发展,电子信箱: wang.mingyuan2@coscoshipping.com

引用格式: 周玲玲,王明媛,周剑,等.“双碳”目标下中国船用绿色甲醇燃料的发展趋势分析[J]. 科技导报, 2025, 43(22): 68-76; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.10.00088

1 船用绿色甲醇技术路径

1.1 概念

目前,中国尚未有在国家层面正式发布的绿色甲醇统一定义,但已有一些组织和行业标准对其进行了术语、评价方法和分类的规定。

在国内学术领域内,对绿色甲醇的定义方式可以总结为碳源、氢源定义法,即根据甲醇分子中碳氢的来源来定义绿色甲醇。碳源和氢源均来自生物质的甲醇被称为生物甲醇;碳源来自空气捕集,氢源来自可再生能源电解水的甲醇被称为电子/电制甲醇;碳源来自生物质,氢源来自可再生能源电解水的甲醇被称为电制生物甲醇。以上3种甲醇在国内统称为绿色甲醇,其他碳源和氢源制备的甲醇则被称为“蓝色”“灰色”“棕色”甲醇等。从减排的角度来看,学术研究通常将“绿色”定义为容易实现显著的生命周期碳减排效果,且具备实现零碳排放的潜力。

在国际上,通常不使用绿色甲醇这一词汇,在不同的定义体系下,绿色甲醇则会被划分为不同的燃料类型。根据《欧盟可再生能源指令(修订版)》的定义,交通燃料主要分为3类:生物燃料、可再生非生物燃料和回收碳燃料,其中,生物燃料和可再生非生物燃料属于可再生燃料,回收碳燃料不属于可再生燃料,不计入欧盟可再生燃料来源比例,但是其减排效果依旧计入总减排量。

欧盟使用生命周期减排阈值定义“合格燃料”,其中生物燃料的减排阈值为65%,再生非生物燃料和碳回收燃料的减排阈值为70%,减排比例超过该阈值的燃料都被认为是“合格燃料”。

中国出入境检验检疫协会发布的团体标准《绿色甲醇评价方法》借鉴了类似的定义方式,将生物来源、非生物可再生来源、化石来源且减排比例介于50%~65%的甲醇,定义为“低碳甲醇”;将生物来源且减排比例超过65%,以及非生物可再生来源且减排比例超过70%的甲醇定义为“绿色甲醇”。该团体标准没有借鉴“回收碳燃料”概念,而是将工业尾气制备甲醇的工艺归为化石来源甲醇,该方法会忽略回收碳燃料的减排潜力。

1.2 主要技术路径

国内外绿色甲醇燃料制备路径主要有生物质路

径、电制路径、电-生物质耦合路径和回收碳路径4类。其中,前3类路径为国内语境中的“绿色”甲醇制备路径,回收碳路径制备的甲醇常被称为“蓝色”甲醇。

1.2.1 生物质路径

生物质路径的核心在于利用农林废弃物、沼气、工业废液等生物质资源,即碳源氢源均来自生物质。由于生物质中的碳来源于生长过程中吸收的自然界 CO_2 ,因此,由生物质制备的绿色甲醇在其使用阶段的碳排放为零,从而实现了较低的生命周期碳排放。该路径通过气化、重整等方式将生物质中的碳和氢转化为甲醇,实现了碳在生物圈内的循环利用。尽管技术相对成熟,但该路径面临原料收集分散、预处理复杂等挑战,其减排潜力主要取决于生物质原料来源和生产过程的能耗总量。

生物质制备甲醇主要包含以下3种方法。(1) 生物质气化制备甲醇:通过高温将农林废弃物、城市固体废弃物等气化,转化为富含 CO 和 H_2 的合成气,再通过传统的甲醇合成反应器制备甲醇。(2) 沼气制备甲醇:利用生物质厌氧发酵产生的沼气(主要成分为甲烷和 CO_2)作为原料,通过重整反应制备合成气,再合成甲醇。(3) 黑液气化制备甲醇:将造纸工业产生的黑液(一种富含木质素等生物质成分的工业废液)进行高温气化,转化为合成气后合成甲醇。

1.2.2 电制路径

电制路径代表着未来的发展方向,其核心驱动力是可再生电力。该路径通过电解水或协同电解等方式获取氢源,并结合空气捕集的 CO_2 合成甲醇。这种路径不依赖化石燃料,能够实现极低的生命周期碳排放,甚至达到“负碳”目标。尽管目前技术成本较高,但随着可再生能源和碳捕集技术的进步,其经济性将持续提升。

电制甲醇主要包含以下3种制备方法。(1) 绿氢与 CO_2 合成制备甲醇:利用可再生电力电解水制备绿氢,然后与捕集的 CO_2 制取合成气,最后合成甲醇。(2) 协同电解:在一个电解槽中,同时对水和 CO_2 进行电解,一步生成甲醇合成所需的合成气,最后合成甲醇。(3) 可再生电力直接合成:通过电化学或光电化学反应,利用可再生电力直接将 H_2O 和 CO_2 转化为甲醇,省去中间步骤。

1.2.3 电-生物质耦合路径

电-生物质耦合路径则代表了技术融合的趋势。该路径将生物质气化与电解水制绿氢相结合,通过优化碳氢比例,在提高生产效率的同时,最大化地利用各种可再生资源。这种耦合模式为绿色甲醇的生产提供了更灵活、更高效的解决方案。

1.2.4 回收碳路径

该路径的核心是回收和再利用非生物质、非可再生的废弃碳源,并将其转化为燃料。这些碳源原本会

直接排放到大气中,但通过技术手段被截留并转化为有价值的产品。虽然碳源和氢源均不可再生,但仍然可以具有显著的减排效益。这种减排主要源于其替代效应——通过将工业废碳转化为燃料,它成功地替代了原本需要从地下开采并燃烧的化石燃料,从而避免了新增碳排放。

各类型制备路径和方法的减排潜力、优劣势和减排潜力如表 1 所示。

表 1 不同甲醇制备路径和方法对比

路径分类	制备方法	碳源	氢源	核心工艺	减排潜力*	优势与劣势	技术难点
生物质路径	生物质气化制备甲醇	生物质	生物质	气化、合成	76%~97% ^[2-4]	优: 原料来源广泛, 可利用废弃物。劣: 原料收集运输成本 高, 气化过程复杂	气化效率与稳定性, 合成气净化
	沼气制备甲醇	沼气	沼气	重整、合成	63%~99% ^[3]	优: 有效减少甲烷排放, 废物利用。劣: 沼气杂质需严格 净化, 否则会毒害催化剂	沼气脱硫等预处理, 催化剂抗毒性
	黑液气化制甲醇	黑液	黑液	高温气化、合成	89%~97% ^[3-4]	优: 有效利用工业废液, 实现 循环经济。劣: 技术复杂, 需 与现有工业流程高度集成	黑液成分复杂, 气化效率
电制路径	绿氢与CO ₂ 合成	空气CO ₂	水	电解、合成	>87% ^[5-7]	优: 不依赖化石燃料, 可实现 “零碳”或“负碳”。劣: 绿 氢和碳捕集成本高昂	电解槽效率, 成本降低
	协同电解	空气CO ₂	水	电解、合成		优: 流程集成化, 理论能耗 低。劣: 技术不成熟, 尚处于 中试阶段	电极材料, 反应器稳定性
	可再生电力直接合成	空气CO ₂	水	电化学		优: 流程最简洁, 理论效率 最高。劣: 技术尚处于实验室 阶段, 距离商业化远	高效催化剂, 反应器设计
电-生物质耦合路径	电-生物质耦合	生物质	生物质+绿氢	混合气化、合成	75%~95% ^[3]	优: 优化碳氢比例, 提高碳 利用率和甲醇产量。劣: 系统 复杂, 需要管理多种能源	系统集成与控制, 成本优化
回收碳路径	焦炉煤气制备甲醇	化石	化石	重整、合成	65% ^[3]	优: 利用工业废气, 减排效 益高, 成本相对较低。劣势: 制 气体成分复杂, 纯化难度大	尾气成分波动控制, 杂质去除, 能耗控制

注: *以欧盟可再生能源指令设定的化石燃料基准(94 gCO₂eq/MJ)相比的生命周期碳排放减少量。这是一个范围值参考值, 不考虑使用二氧化碳捕集与封存技术(原料收集除外), 具体数值取决于原料类型、运输距离、工艺效率和能源消耗等多种因素。

2 中国船用绿色甲醇管理政策

2.1 国内政策

目前, 中国的“双碳”目标是所有能源政策的根本遵循。在此框架下, 一系列国家级战略文件为生物质燃料的发展指明了方向。《2030 年前碳达峰行动方案》提出“大力发展新能源和清洁能源船舶”“推进船

舶受电设施改造”“积极发展可持续航空燃料和生物柴油等替代燃料”等方向性要求。《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》强调“推动运输工具装备低碳转型”“加快形成绿色低碳运输方式”。2024 年 7 月, 国务院印发的《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》提出, “推进交通运输绿色转型。建设绿色交通基础设施。完善充(换)

电站、加氢(醇)站、岸电等基础设施网络,加快建设城市智慧交通管理系统”。多个部委也针对燃料甲醇提出了支持政策,主要包含以下领域。

在工业领域,政策支持的重点是推动传统化工行业的减碳,并加快绿色甲醇的试点和推广。2022年发布的《工业领域碳达峰实施方案》提出,鼓励利用可再生能源制备绿色甲醇,推动甲醇在高耗能行业中的替代应用。同时,《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》进一步明确支持研发以H₂O、CO₂直接合成甲醇的绿色甲醇制备技术,并将其列为前沿和颠覆性低碳技术。这为绿色甲醇的技术创新和工业化应用奠定了政策基础。然而,目前绿色甲醇的生产成本仍较高,基于可再生能源的生产路径在经济性和实际规模化应用上仍有较大挑战。

在交通领域,中国多措并举,从基础设施建设、船舶技术和标准到燃料认证体系等方面开展了全面探索,并逐步建立了船用绿色甲醇的技术和政策框架。在基础设施建设方面,《绿色交通“十四五”发展规划》明确提出要推动甲醇燃料在沿海和内河船舶中的试点应用,《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》中也明确指出要加快甲醇加注站、储存设施和配套网络的建设。在船舶技术和标准方面,中国已陆续出台了多项技术规范,针对甲醇燃料船舶的设计、储运、加注、使用安全提出了技术要求,对船舶的建造、运营和检测提供了技术支撑,同时明确了燃料加注环节的加注模式、设备要求和应急响应机制。这些规范的出台为船用绿色甲醇的安全性和可操作性提供了保障(表2)。

表2 中国已发布的燃料甲醇政策文件

发布年月	政策文件名称	牵头单位/归口单位	文件类型	相关内容
2021年10月	《绿色交通“十四五”发展规划》 ^[8]	交通运输部	发展规划	加快新能源和清洁能源运输装备推广应用。积极探索油电混合、氢燃料、氨燃料、甲醇动力船舶应用
2022年3月	《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》 ^[9]	国家发展改革委	发展规划	扩大工业领域氢能替代化石能源应用规模,积极引导合成氨、合成甲醇、炼化、煤制油气等行业由高碳工艺向低碳工艺转变
2022年6月	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》 ^[10]	科学技术部	实施方案	部署研究以水、二氧化碳和氮气等为原料直接高效合成甲醇等绿色可再生燃料的技术,并将其列为前沿和颠覆性低碳技术
2022年6月	《减污降碳协同增效实施方案》 ^[11]	生态环境部等7部门	实施方案	推动船舶受电设施改造,探索开展氢燃料、生物柴油、生物甲醇等船舶试点示范
2022年7月	《工业领域碳达峰实施方案》 ^[12]	工业和信息化部等3部门	实施方案	鼓励有条件的地区利用可再生能源制氢,优化煤化工、合成氨、甲醇等原料结构。支持发展生物质化工,推动石化原料多元化。鼓励依法依规进口再生原料
2022年8月	《绿色交通标准体系(2022年)》 ^[13]	交通运输部办公厅	标准	将“船舶清洁能源应用标准”纳入其中,为甲醇燃料船舶的设计、建造、运营和安全规范的标准制定指明了方向
2025年1月	《甲醇燃料加注船舶技术与检验暂行规则(2025)》 ^[14]	国家海事局	法规	为甲醇燃料加注船舶的建造和运营,提供了全面的技术和检验标准
2025年3月	《关于推动交通运输与能源融合发展的指导意见》 ^[15]	交通运输部等10部门	指导意见	完善车船绿色燃料加注体系规划,系统推动车船绿色燃料加注设施和装备发展。推进绿色低碳船舶发展。推动国际标准互认,促进国际标准领域合作,加快健全交通运输绿色燃料认证体系

2.2 绿色甲醇相关标准

现有绿色甲醇燃料认证体系仍不完善,一方面,对甲醇燃料的生产路径覆盖度不够;另一方面,现有团体标准的权威性相对较低,尚不能完全满足国际航

运市场对燃料认证的高要求。而IMO关于国际海运业温室气体排放的净零框架计划将于2026年10月通过最终审议,各成员国对绿色燃料的认证要求也将更为严格。中国绿色甲醇认证体系与国际标准的对

接仍显不足,在未来将限制中国绿色甲醇燃料及相关船舶技术的国际推广应用。这些不足表明,在推动船用绿色甲醇的规模化应用过程中,中国仍需进一步完善技术标准和认证体系,加快与国际组织的协同合作,以更好地应对即将到来的全球航运减排挑战(表3)。

表 3 中国已发布的燃料甲醇的相关标准

发布年月	政策文件名称	牵头/归口单位	文件类型	相关内容
2022年6月	《船舶应用甲醇/乙醇燃料指南》(2022) ^[16]	中国船级社	指南	为甲醇/乙醇燃料在船上的使用提供技术标准。主要包括船舶布置、燃料储存、燃料加注、通风、消防、电气系统、监控、甲醇/乙醇发动机等内容
2023年4月	《船舶甲醇燃料加注作业指南》(2023) ^[17]	中国船级社	指南	对船舶甲醇加注模式、加注设备、安全保护、风险评估、操作程序、应急响应等方面的相关要求进行了规定
2024年11月	T/CIECCPA047—2024《绿色甲醇产品碳足迹量化与评价方法》 ^[18]	中国工业节能与清洁生产协会	团体标准	为绿色甲醇的全生命周期评估提供了统一的原则、方法和分级体系,旨在从原料、生产到终端消费全环节确保其可持续性和可追溯性
2024年12月	T/SEESA 024—2024《绿色甲醇评价方法》 ^[19]	上海市节能环保服务业协会	团体标准	规定了生物质黑颗粒气化耦合绿氢制备的绿色甲醇产品,如何进行碳足迹的量化、评价、信息披露和报告
2025年3月	T/CIQAI09—2025《绿色甲醇产品碳足迹评价》 ^[20]	中国出入境检验检疫协会	团体标准	为甲醇产品生命周期碳足迹的量化和评价提供了统一的方法与规则,并特别规范了绿色甲醇产品的评价标准,可作为编制碳足迹报告的依据

3 船用绿色甲醇潜力分析

目前,国内外对能源消费预测的相关研究较多,但因模型方法不同,能耗相关驱动因素,如经济增长、人口数量、经济结构等关键因素的假设不同,研究结果之间存在巨大差异。本研究在分析“双碳”目标下中国未来能耗和排放驱动因素的基础上,从全国层面分析中国未来能源和碳排放中长期趋势及结构,并重点分析水运行业未来能源消耗及碳排放总量,以及船用绿色甲醇燃料未来需求潜力。

3.1 模型方法

低排放分析平台(low emissions analysis platform, LEAP)是一个基于情景分析的自底向上的能源-环境-经济量化核算工具,由斯德哥尔摩环境研究所与美国波士顿大学共同开发。本研究构建的中国 CO₂ 排放预测综合评估模型,是在 LEAP 模型基础上,考虑各终端行业部门间能源消费特点,同一终端部门内各细分部门、产品间生产工艺、能源消费结构间的差异,模型基于现有的能源统计数据,构建了基于不同技术路线的中国能源系统需求预测综合评估模型(图1)。

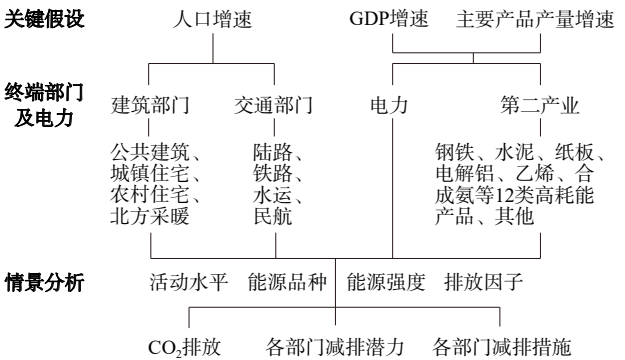


图 1 研究框架与技术路线

3.1.1 基础数据

模型的基年为 2015 年,预测终止年为 2060 年。其中,2015—2022 年根据中国社会经济数据、能源统计数据对模型进行校准。模型中 2023—2060 年基于现有可获得的展望数据及相关规划进行预测。在模型预测中,总体思路即基于历史年份的变化规律,以及国内和国际相关文献研究及专家判断,设定不同情景下政策变化的强度与变化速度,对能源需求与碳排放进行预测。

3.1.2 情景设定

水运行业运输服务相关活动水平和能耗数据主要来源于交通运输部统计数据、绿色创新发展研究院

每年发布的能源统计数据,以及国内外相关文献数据。总体上从3个维度就影响能耗的关键因素进行假设,包括水运行业运输总周转量、单位周转量能源消耗及能源结构即低碳能源的替代,设定了基于不同目标约束、不同政策力度等假设条件的3种情景,分别为基准情景(BAU情景)、政策情景(2055碳中和情景即2055CNG)、强化政策情景(2050碳中和情景即2050CNG)。

1) 运输总周转量。中国水运行业货运量与周转量均呈现较快增长趋势。2015年,中国水路运输货运总周转量为91772亿t·km。2024年,全行业货运总周转量增长为141423亿t·km,9年年均增长4.9%,2020年以来年均增长7.5%。分类型来看,2024年中国内河货运周转量为21833亿t·km,比上年增长5.1%,与2020年相比年均增长8.2%;中国海洋货运周转量为119590亿t·km,比上年增长9.5%,2020年以来年均增长7.4%^[21]。

基于历史数据,结合国内主要研究机构及专家学者判断,模型中对未来中国水运行业总周转量增长趋势进行设定。情景设定中,2030年运输周转量将增长至19万亿~20万亿t·km,政策情景及强化政策情景下,2040年左右行业运输量增速减缓,进入平台阶段,约为24万亿t·km,2060年,全行业总周转量区间范围约为23万亿~35万亿t·km。

2) 能源强度及能源结构。基于水运行业历史年份能源强度年下降幅度,结合不同情景下能源和碳排放约束差异,参照IMO《2020年第四次温室气体研究》^[1]报告,国内外相关文献研究及行业专家判断,考虑未来水运行业潜在节能减碳技术与管理措施包括新能源船舶应用、淘汰老旧船舶、船舶大型化、运营节能等,模型设定各种情景下能源强度下降幅度,总体上年均下降1%~2.5%,2050年后能效下降空间缩窄。

从能源结构来看,未来水运中内河的电动化趋势逐步加快,2035年3种情景下内河燃料消耗总量中电力所占比重约为10%~20%,2050年逐步提高至40%~60%,同时作为清洁燃料天然气占比先升后降,2050年占比约为20%~30%。水运中沿海的电动化趋势略慢于内河,2050年电力所占比重约为30%~60%,天然气比重约为15%~30%。对于远洋船舶,电动化比重最小,2050年占比约为10%~15%,天然气比重约

为25%~30%,受国际海事组织市场机制制约,远洋船舶燃料中绿色甲醇、氢、氨等零碳/近零碳燃料比重大幅增加,2050年所占比重约为30%~45%。

3.2 模型结果

3.2.1 水运行业能源消费总量

在全国碳达峰碳中和目标下,基于情景假设,通过LEAP模型对中国水运行业终端能源需求进行了展望。

未来水运行业终端能源需求趋势显示,3种情景的水运终端能源消费总量约在“十五五”期间达到峰值平台阶段(图2)。其中BAU情景下,峰值水平约为8881万t标准煤(tce),政策情景和强化政策情景下峰值水平为7969万、7532万tce。2个政策情景下,峰值平台期后水运行业能源消耗总量将呈现下降趋势,2050年,水运行业终端需求总量在BAU情景下约为8500万tce,政策情景和强化政策情景下分别约为7000万、5800万tce。政策情景(2055CNG)下,2050年行业终端能源需求总量相比2015年增加约3500万tce,增长近1倍。

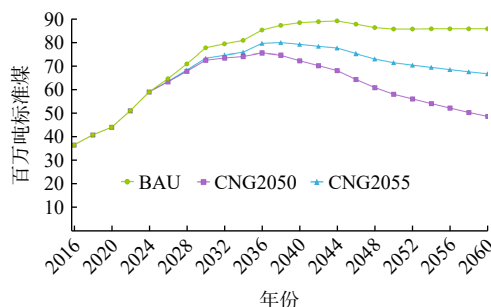


图2 中国水运行业终端能源需求展望(2015—2060年)

3.2.2 水运行业能源消费结构

从能源结构看,总体上水运行业终端需求结构不断优化升级,电气化率不断提升,清洁过渡燃料天然气占比先升后进入稳定阶段。政策情景(2055CNG)下,水运部门终端能源需求中电气化率由2015年的0,提升到2030年8%,2050年将进一步提升至38%。随着“十五五”阶段加速提高清洁燃料天然气比重,水运部门中天然气所占比重由2015年0提升至2030年15%左右,2035年将进一步提升至24%,随后保持在24%水平。

在模型中假设水运行业在内河和沿海的天然气燃料中按比例掺烧清洁氢气,而在远洋水运中考虑使用甲醇、氢、氨等零碳/近零碳燃料。总体上来看,水

运行业清洁能源(含甲醇、氢、氨)所占比重由 2015 年的 0,将逐步提高到 2035 年 3%,进一步提升至 2050 年 20%。在水运远洋船舶运输中政策情景及强化政策情景下零碳/近零碳燃料所占比重在 2035 年将约为 5%,约为 150 万 tce,综合中国船级社、美国船级社等未来国际水运燃料需求预测判断,绿色甲醇约占零碳/近零碳燃料约 50%~90%,模型结果显示,中国水运行业绿色甲醇需求约为 75 万~135 万 tce,折算为甲醇约 110 万~198 万 t。2050 年零碳/近零碳燃料比重提升至 40%~45%,约为 1015 万~1108 万 tce,综合美国船级社等未来国际水运燃料需求预测判断,绿色甲醇约占零碳/近零碳燃料 1/3~1/4,模型结果显示,中国水运行业 2050 年绿色甲醇燃料需求约为 253 万~369 万 tce,折算为甲醇 371 万~542 万 t。

3.2.3 碳排放总量

模型中水运行业碳排放是指与能源消费相关的碳排放量。3 种情景下(图 3),CO₂ 排放量均在 2035 年左右达到峰值水平,约 1.4 亿~1.6 亿 t CO₂。峰值水平后,水运部门 CO₂ 排放即进入持续下降通道,其中 BAU 情景下 2050 年水运碳排放量为 1.2 亿 t CO₂,比 2035 年下降 0.47 亿 t CO₂;政策情景(2055CNG)下 2050 年碳排放量为 0.54 亿 t CO₂,比 2035 年下降约 1 亿 t CO₂;2050CNG 情景下 2050 年碳排放量为 0.3 亿 t CO₂。

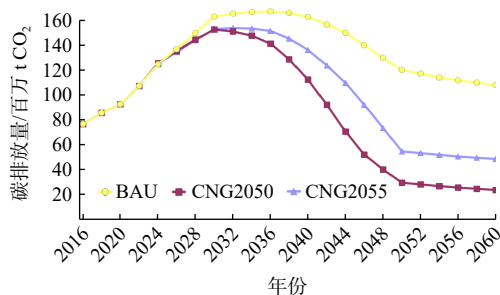


图3 中国水运行业 CO₂ 排放趋势(百万 t CO₂)

模型研究结果与现有文献研究^[22-25]比较分析如图4所示。2025—2035年,本模型研究结果在现有研究预测结果的区间范围内。而现有研究中长期预测相对较少,2050年,本模型结果油耗数据与现有研究基本一致,但考虑到技术进步、管理运行能效改进、替代燃料等,本模型预测 2050 年水运行业碳排放总量低于现有研究结论。

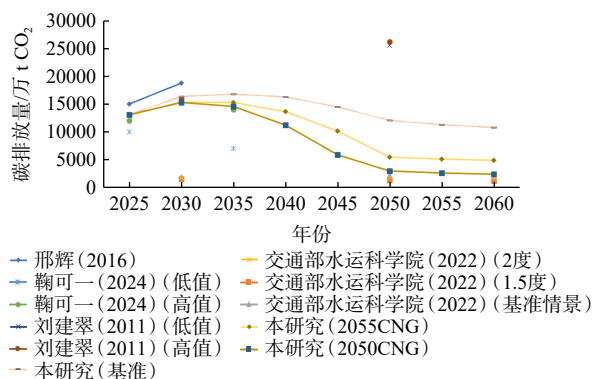


图4 中国水运行业 CO₂ 排放结果对比分析(万 t CO₂)

4 未来中国船用甲醇燃料发展建议

4.1 深度参与并持续跟踪 IMO 净零框架谈判进展

绿色甲醇燃料是国际海运中长期减碳路径中的重要替代燃料,是国际海运实现零碳目标的重要减排抓手。国际层面,未来绿色甲醇发展趋势将很大程度上受到 IMO 净零框架进展影响。随着两航领域谈判进程加速,IMO 将于 2026 年 10 月对净零框架修正案进行最终投票,随之将加速推进净零框架相关导则、指南制定工作。净零框架的核心要素(如船用燃料全生命周期温室气体强度核算方法学、可持续燃料认证体系、零碳/净零碳燃料额外奖励机制等)将决定未来全球及中国绿色甲醇发展进程。一方面,应加速中国船用燃料核算方法学及认证体系建设,深度参与 IMO 净零框架谈判,参与国际规则制定进程;另一方面,结合净零框架进展,加快量化影响研究,应对国际规则制约,最小化中国国际海运运输成本,提升中国国际海运贸易的竞争优势。

4.2 系统深化中国水运行业“双碳”目标转型路径研究

国内层面,聚焦未来中国水运行业“双碳”目标转型路径研究中对中长期中国水运周转量、能源需求及碳排放总量预测结果差异较大。总体上,水运行业涵盖内河、沿海和远洋运输方式,能碳统计起步晚、难度大,公开统计数据较少。水运行业内学术机构研究熟识行业特点,缺少全国总体碳中和趋势判断下水运路径分析;行业外研究难以掌握不同运输方式燃料消耗类型与数据。未来亟需综合行业内外研究结构,开展水运全行业中长期能碳趋势预测分析,发现重点减碳路径及贡献,量化支撑中国船用替代燃料政策制定、产业发展。

4.3 系统推进聚焦绿色甲醇的政产学研金组合发展

综合 IMO 下零碳进程、中国碳达峰、碳中和“双碳”目标要求,针对达峰年份滞后、减排措施有限的水运行业,绿色甲醇是行业实现零碳目标的重要抓手之一,也是中国未来绿色燃料的重要组成。中国绿色甲醇产业处于起步阶段,需要从顶层设计、产业规划、学术研究、金融支撑多维度系统综合推进发展。通过建立跨部委联合工作机制,以交叉学科量化研究为支撑,制定多技术路径试点示范、推广应用、全面深化政策与金融支持,在绿色甲醇相关规则与市场 2 方面推进产业加速有序发展。

参考文献 (References)

- [1] International Maritime Organization (IMO). Fourth IMO GHG study 2020[R]. London: IMO, 2020.
- [2] IRENA, Methanol Institute. Innovation outlook: Renewable methanol[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [3] The European Parliament, Council of the European Union. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)[R]. Brussels: Official Journal of the European Union, 2018.
- [4] Brynolf S, Fridell E, Andersson K. Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 74: 86–95.
- [5] Wyndorps J, Ostovari H, von der Assen N. Is electrochemical CO₂ reduction the future technology for power-to-chemicals? An environmental comparison with H₂-based pathways[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2021, 5(22): 5748–5761.
- [6] Wiranarongkorn K, Eamsiri K, Chen Y S, et al. A comprehensive review of electrochemical reduction of CO₂ to methanol: Technical and design aspects[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2023, 71: 102477.
- [7] Filosa C, Gong X, Bavykina A, et al. Enabling the methanol economy: Opportunities and challenges for heterogeneous catalysis in the production of liquid fuels via methanol[J]. Accounts of Chemical Research, 2023, 56(23): 3492–3503.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 关于印发《绿色交通“十四五”发展规划》的通知[EB/OL]. [2025–10–03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html.
- [9] 中华人民共和国国家发展改革委. 《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》[EB/OL]. [2025–10–03]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》的通知[EB/OL]. [2025–10–03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm.
- [11] 生态环境部等7部委. 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. [2025–10–03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/17/content_5696364.htm.
- [12] 工业和信息化部, 发展改革委, 生态环境部. 关于印发《工业领域碳达峰实施方案》的通知[EB/OL]. [2025–10–03]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5717004.htm.
- [13] 交通运输部办公厅. 关于印发《绿色交通标准体系(2022年)》的通知[EB/OL]. [2025–10–03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/23/content_5706441.htm.
- [14] 国家海事局. 关于发布《甲醇燃料加注船舶技术与检验暂行规则(2025)》的公告[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://www.msa.gov.cn/page/article.do?articleId=3C871773-071C-46A5-8CBA-DFB118977F02>.
- [15] 交通运输部等十部门. 关于推动交通运输与能源融合发展的指导意见[EB/OL]. [2025–10–03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202504/t20250425_4167770.html.
- [16] 中国船级社. 《船舶应用甲醇/乙醇燃料指南》(2022)[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=202206140284263335&columnId=202007171176731956>.
- [17] 中国船级社. 《船舶甲醇燃料加注作业指南》(2023)[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/specialDetail?id=202303221039287856>.
- [18] 绿色甲醇产品碳足迹量化与评价方法: T/CIECCPA 047—2024[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://ndls.org.cn/standard/detail/c636e4ebc198656cbc6c59a2d14bfde2>.
- [19] 上海市节能环保服务业协会. T/SEESA 024—2024绿色甲醇评价方法[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://ndls.org.cn/standard/detail/fdb9cfcc9f271a4a96866e27a4eff96b>.
- [20] 中国出入境检验检疫协会. T/CIQA 109—2025绿色甲醇产品碳足迹评价[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://ndls.org.cn/standard/detail/e41f4898b934375d90eab50bd2e4baa1>.
- [21] 交通运输部. 2024年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2025–10–03]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html.
- [22] 邢辉, 段树林, 黄连忠, 等. 中国水路运输业能源消耗与废气排放测算[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1913–1920.
- [23] 交通运输部水运科学研究院. 中国内河航运中长期低碳发展路径研究[EB/OL]. [2025–10–03]. <https://theicct.org/wp->

- content/uploads/2023/02/marine-china-inland-shipping-CH-feb23-updatedvf.pdf.
- [24] 鞠可一, 李善志, 马雨静. 中国水运业碳排放影响因素分解与达峰情景预测[J]. 物流科技, 2024, 47(6): 89–93.
- [25] 刘建翠. 中国交通运输部门节能潜力和碳排放预测[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 640–646.

Analysis on the development trends of marine green methanol fuel under the "dual carbon" goals in China

ZHOU Lingling¹, WANG Mingyuan^{2*}, ZHOU Jian¹, ZHENG Songxin³, YUAN Xuechun²

1. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. China Standard Inspection Co., LTD., Beijing 100029, China

3. Carbon Neutrality and Climate Change Thrust, Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 511453, China

Abstract This paper systematically reviews the concept of green methanol fuel, and conducts a comparative analysis of the main manufacturing technology paths, emission reduction potential, as well as the advantages and disadvantages for the major routes, including the biomass path, the electricity-based path and the electricity-biomass coupling path, etc. We summarize the relevant policies on methanol fuel for the water transportation industry at the national and industry levels, clearly stating to promote the pilot application of methanol fuel in coastal and inland river vessels, and to accelerate the construction of methanol refueling stations, storage facilities and other supporting facilities. A review has been conducted of the current green methanol-related standards in China, including guidelines for methanol fuel for ships and group standards focusing on the evaluation of green methanol and the carbon footprint assessment of green methanol products. Related policies and standards are still in the initial stage. At the same time, based on the low-emission analysis platform LEAP, a comprehensive assessment model for carbon emissions prediction of China's water transportation industry is constructed to quantitatively calculate the total energy consumption and carbon emissions of China's water transportation industry in the medium and long term. It is estimated that the total energy consumption will be about 58~85 million tce, and the total emissions will decrease to 30~120 million tons CO₂. Based on the above analysis, suggestions for the future development of marine green methanol fuel industry in China are proposed, including: continuously tracking and deeply participating in the IMO's negotiations on the net-zero framework and related rules construction; combining the internal and external water industry advantages to conduct in-depth quantitative research on the dual-carbon transformation path of the water industry; and taking the lead through trials and experiments, step by step to systematically promote the development of green methanol in China.

Keywords marine fuel; green methanol; "dual carbon" ●



(责任编辑 赵庆圆)