

全球航运业去碳化：挑战与可持续发展

张一兵 杨镇宇

重庆交通大学 重庆市 400074

摘要：航运业占世界贸易量的 80% 以上，占全球温室气体排放量的近 3%，并且排放量在短短十年内增加了 20%，航运业正面临着迫切的去碳化挑战。本论文探讨了航运业去碳化的关键问题，包括温室气体排放的增长趋势、老化船队的挑战以及替代燃料的前景。在国际社会共同的责任下，航运业需要面对技术、经济和政治层面的复杂性，确保去碳化过程公平、公正、可持续。国际合作和全球性准则的制定是实现航运业去碳化目标的关键，同时需要平衡各国和利益相关者的权益。本研究强调通过共同努力解决挑战、确保公正性，航运业可以实现去碳化的可持续、协调和共赢的发展。

关键词：绿色航运；去碳化；清洁能源；可持续发展

1 研究目的和意义

海运业正处于关键时刻，面临着脱碳的艰巨挑战，同时应对经济和地缘政治逆风。该行业的温室气体排放量占全球总量的 3%，在过去十年中增加了 20%。如果不采取行动，到 2050 年，排放量可能达到 2008 年水平的 130%。其中使问题复杂化的是老化的世界船队，截至 2023 年初，该船队的平均船龄为 22.2 年。现在超过一半的船龄超过 15 年，许多船舶要么太旧而无法改装，要么太年轻而无法报废。脱碳的紧迫性是显而易见的，但在最佳转型方法的不确定性下，该行业面临着数十亿美元的投资。

同时，替代燃料显示出前景，但它们的采用仍处于早期阶段，98.8% 的船队仍在使用化石燃料航行。值得期待的是，21% 的订单船舶将使用更清洁的替代品。主要船旗国利比里亚、巴拿马和马绍尔群岛占航运碳排放量的三分之一，将负责执行新的绿色航运标准。投资替代燃料、加油设施和更环保的船舶的责任主要落在船东、港口和能源生产行业身上。因此驾驭经济、监管和环境优先事项的复杂纠结是该行业的下一个重大考验。

2 航运业的碳排放现状

航运业始终处于可持续发展和气候变化争论的最前沿，必须尽快减少其碳排放。航运碳排放趋势表明，该行业仍在努力解决如何实现国际海事组织通过的《2018 减少船舶 GHG 排放初步战略》以及最近修订的战略中规定

的温室气体 (GHG) 排放目标。国际航运业占全 GHG 排放总量的 2.8%。如果不采取进一步行动，预计到 2050 年，该行业的二氧化碳排放量将从 2018 年占 2008 年排放量的约 90% 增加到 2008 年排放量的 90-130%。

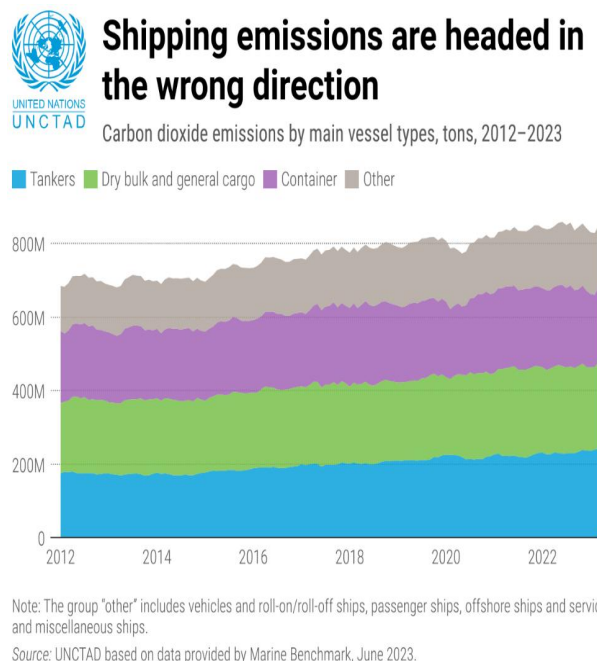


图 1 航运业的碳排放趋势图

为了使航运业不损害自身利益，特别是多年来航运需求的增长速度快于燃油效率的提高，将航运业脱碳目标纳入主流是当务之急。需要解决这一目标，以实现《巴黎协定》所制定的目标，其中包括到 2100 年努力将气温升高限制在工业化前水平以上 1.5° C 以内。然而，如果

未来几年不削减排放量,这一阈值可能会在 2040 年或更早达到,从而导致日益极端的热浪、干旱和洪水的风险迅速增加,从而可能造成毁灭性后果。到本世纪末,在 IPCC 的中间排放情景中,全球变暖“非常有可能”达到 2.7° C,而在非常高的温室气体排放情景中,全球变暖幅度可能在 3.3° C 至 5.7° C 之间。到 2100 年,实施现有政策和承诺只会将气温上升幅度降低至 2.4 - 2.6° C。航运业加速减缓行动是一个日益紧迫的问题,包括港口在内的气候影响适应的有效行动也是如此。为了更好地实现温室气体减排目标,航运业需要采取一系列措施。相关干预措施将影响运营(例如航线优化、船速和维护)、船队设计、推进、发动机和燃料以及替代燃料加注供应的基础设施。

航运业转向清洁能源所带来的沉重财政负担可能会对最脆弱的国家造成不成比例的影响。据估计,到 2050 年,全球船队脱碳每年可能需要 80 亿至 280 亿美元。100% 碳中和燃料的基础设施每年可能需要 280 亿至 900 亿美元。如果实现的话,完全脱碳可能会使每年的燃料成本增加一倍。令人望而生畏的价格引起了人们的担忧,特别是对于小岛屿发展中国家(SIDS)和最不发达国家(LDC)来说,它们已经承受着较高运输成本的负担。这些处于气候变化前线的脆弱国家严重依赖海上运输来实现贸易和经济增长。他们可能会因成本增加而面临严重的经济挫折。

因此,我们急需有针对性的支持,以减轻影响,包括对燃料排放征税或捐款,这可用于帮助小岛屿发展中国家和最不发达国家的港口更加适应气候变化、提高效率 and 数字化连接。

它还呼吁通过绿色航运走廊(为可持续船舶指定航线)进行全球合作,强调确保此类举措惠及脆弱经济体的重要性。这种财政和技术支持对于确保海事部门的能源转型公正和公平至关重要。

2 去碳化技术路径

2.1 清洁燃料技术

虽然物流、数字化、流体动力学、机械和“后处理/碳捕获和储存”措施有可能将航运的 GHG 排放量平均减少 30%,但更深层 GHG 减排的最大潜力在于燃料转向低碳或零碳燃料。航运业需要用在整个生命周期(从油井到尾流)中不排放温室气体的替代品取代化石燃料。目前,还没有现成的、一刀切的解决方案。脱碳之路表明,到 2030 年,零排放燃料将需要占国际航运燃料结构的 5% (Osterkamp, Smith, Søgaard, 2021)。2023 年国际海事组织 GHG 战略还包括承诺确保到 2030 年采用替代零和接近零 GHG 燃料。该战略规定,采用零或接近零 GHG 排放的技术、燃料和/或能源的比例应至少达到 5%,力争到 2030 年占国际航运使用能源的 10%。

目前,向替代燃料的过渡仍处于起步阶段。按船舶数量计算,全球船队中总共有 98.8%的船舶使用常规燃料。只有 1.2%的船舶使用替代燃料,主要是液化天然气(LNG),其次是电池/混合动力、液化石油气(LPG)和甲醇。LNG 是目前船舶燃料中技术最成熟、最安全、减排效果最佳的选择。然而,由于 LNG 能源技术在碳减排方面存在一定限制,难以满足国际海事组织设定的减排目标。因此,航运业正在逐渐关注氢、氨、甲醇等新型能源燃料,以寻求更具潜力的替代方案。

2.2 替代燃料应用

氢被认为是目前已知能源中最清洁的之一,其燃烧排放只有水,有利于实现零碳排放。且热值高,适合船舶,但能量密度低,难适应大型船舶趋势。因此氨是更吸引人的选择,因其在可再生能源生产时碳含量为零,无需捕获 CO₂ 排放,避免可能增加电子甲醇的成本。甲醇备受关注,与此同时,氢、帆动力、生物燃料等技术也在研究中,包括电池。电力和混合动力推进系统,尤其在小型和沿海吨位中,通过电池或电池与柴油或燃气发动机的组合不断发展。甲醇燃料技术的准备水平高于氨和氢,而氨和氢的船载燃料技术较难获取。尽管绿色氨有望具有最低的总运营成本,并在整个生命周期内实现零或接近零的温室气体排放,但在大规模应用前,仍需解决安全性和可用性问题。

对于航运业,先进生物燃料是短期内可行的选择,因为规定允许在不更换发动机的情况下使用高达20%的混合燃料。由于甲醇发动机是验证过的技术,新船可以轻松完全依赖生物燃料。可再生甲醇,如生物甲醇和可再生电子甲醇,几乎无需对发动机进行改造,可显著减少GHG排放。可再生的e-甲醇在航运业备受关注。尽管先进生物燃料的生产成本与各种替代品相近,但所使用的生物质原料的可持续性是一个关键因素。因此,目前的关注点是使用废脂肪、油和油脂来生产不影响粮食安全和土地可用性的生物燃料。其他原料的生产选择可能存在,但尚未成熟。航运业将面临来自其他部门(包括公路运输和航空)的合适原料和燃料的竞争。

因此,目前最适合国际航运的替代能源燃料主要是先进的生物燃料和电子燃料(即合成燃料),即甲醇和氨。每种替代能源燃料在效益和挑战方面各不相同。燃料的选择取决于供应链、发动机技术、环境影响和生产成本等因素(IRENA, 2021)。

2.3 新兴数字技术

数字化和脱碳都是航运业的变革力量,数字化使得脱碳成为可能。数字化与技术相结合,有助于释放能效潜力,并支持加速转型所需的合作。各种数字化工具,包括区块链、机器学习、人工智能、物联网和性能优化平台,以及数字孪生应用,都可以帮助加速脱碳。数字孪生结合了船舶整个生命周期中的信息和模型,允许执行和模拟一系列操作,如系统设计、验证服务、虚拟系统集成等。船舶可利用航速优化和天气航线服务,通过人工智能的燃料模型结合数字孪生,实现准确预测燃料消耗。技术还可用于测量船体、螺旋桨、锅炉等要素的效率,提高性能。在港口环境中,数字孪生可减少GHG排放,支持效率、生产力和节能。港口停靠优化可通过更好地访问数据和改善船舶到达港口的同步性来支持能源效率和燃料节约。其他技术,如废气节能器、螺旋桨效率设备、船首增强、船体鳍片和空气润滑系统也因提高能源效率而受到欢迎。

尽管技术进步和创新有助于海上运输抑制排放,但必

须采用全生命周期的观点,防止碳泄漏。近期AI使用激增引发对AI服务器排放影响的关切。据估计,AI语言模型和数据中心估计占全球碳排放的1%,到2040年,服务器场可能占全球碳排放的14%。

2.4 船舶设计与绿色港口

为实现航运去碳化,新建和改造船舶结构设计将涉及动力系统。甲醇、氨、液氢的能量密度低于重质燃油,分别为LNG的69.78%、56.44%、37.78%。较低的能量密度要求船舶携带更多燃料。考虑到氨和氢的毒性及高压超低温特性,使用它们的船舶需进行燃料箱和输油系统的设计、工程、安全改造。目前市场缺乏成熟解决方案。未来需要技术研发。相比氨和氢,使用甲醇的船舶无需重大设计改造,只需更大的燃料箱。既有船舶可选择加装新的甲醇发动机,也可对旧发动机进行改装,满足甲醇低闪点的设计要求。

港口装卸效率清关时间,是影响航运业碳排放的重要因素,集装箱船作为世界主要贸易运输工具,其在发达国家港口通常享有更短的等待时间,这得益于清关迅速、基础设施完善和高劳动生产率。然而,COVID-19大流行期间,发达国家的等待时间显著增加,有时甚至超过发展中国家。截至2022年底,周转时间开始从疫情中复苏。国家层面的分析表明,港口绩效差异主要源于自动化水平和交通类型的不同。通常,发达国家的港口自动化水平较高,进出口所需时间较长。根据贸发会议最新的班轮运输连通性指数,中国表现最佳,其次是韩国、新加坡、马来西亚和美国。欧洲国家如西班牙、荷兰和比利时的指数上升,而英国下跌。亚洲、拉丁美洲、加勒比海和大洋洲的多个国家正在从COVID-19的航运中断中恢复,表现良好。然而,非洲和小岛屿发展中国家的港口仍受到效率低下的阻碍,尽管有所改善,但表现仍低于大流行前水平。小岛屿受到船舶转向欧洲和北美市场、旅游业下降等因素的影响。虽然一些枢纽如牙买加和多米尼加共和国有所改善,但其他如巴哈马和毛里求斯仍然滞后。

因此,港务当局和运营商应在数字化方面加速推进,

加大对人工智能、区块链和单一窗口系统等先进技术的投资。国际社会应大力支持发展中国家采用智能海运物流，并促进贸易便利化改革。非洲国家和小岛屿发展中国家被鼓励通过提升能力和加强区域运输联系等方式提高港口生产力。为此，港口和国际组织合作生成港口绩效和贸易便利化改革的数据和指标，以推动全球港口和贸易体系的协同发展。

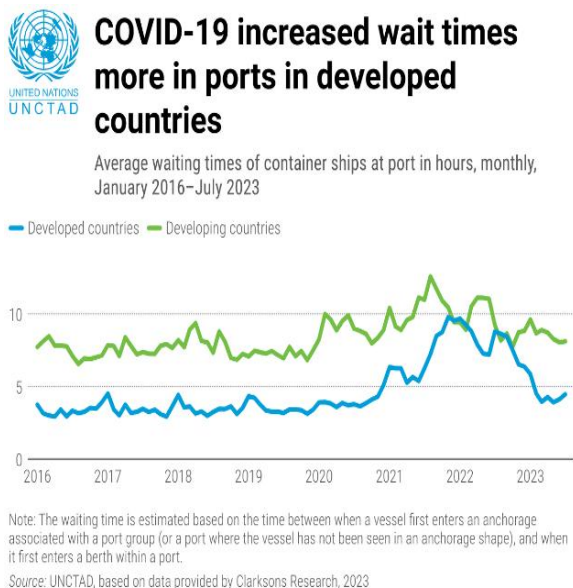


图 2 集装箱船在港口等待时间

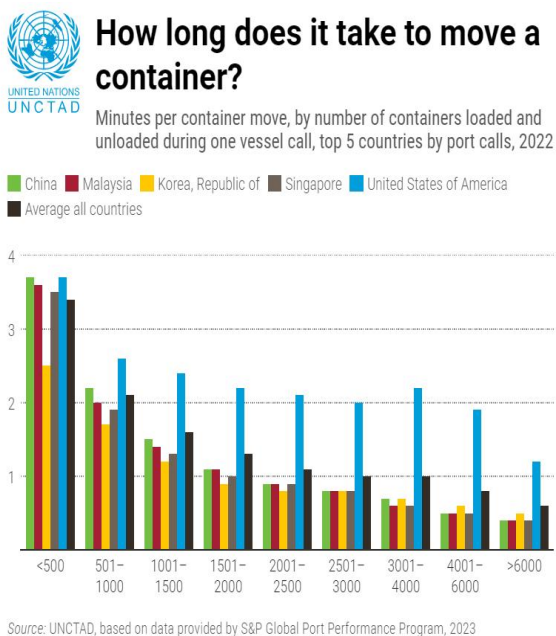


图 3 移动集装箱滞留时间图

3 航运去碳化举措

3.1 船舶能源效率指数

EEXI 是一项关于船舶能源效率的技术措施，自 2022 年 11 月 1 日起生效，适用于所有现有的 400 总吨(GT) 或以上的船舶。EEXI 是 EEDI 的“姐妹”措施，涉及船舶的设计参数，并根据每容量英里的能源效率水平衡量其结构效率。符合 EEXI 可以通过颁发和验证国际能源效率证书(IEEC)来强制执行，最初可以通过安装发动机功率限制器或轴功率限制系统等技术改进来实现。结果表明，拟议的 EEXI 只会对 IMO 的气候目标做出很小的贡献，并且在没有 EEXI 的情况下，将使 2030 年船队的二氧化碳从基线减少 0.7% - 1.3%。

3.2 碳强度指标

CII 是一种操作措施，也适用于现有船舶。自 2023 年 1 月 1 日起，5000 总吨及以上的船舶必须计算其达到的 CII，将二氧化碳排放量与行驶距离上的载货能力联系起来，并按 a 到 e 的等级对船舶进行评级。CII 是根据年效率比(AER)计算的，AER 是一年内产生的二氧化碳 2 以一年内航行的英里数。的比率，除以一年内载重吨乘

CII 等级将记录在船舶的 SEEMP 中。如果船舶连续三年被评为 D 或 E 级，则需要对其 SEEMP 进行审查，并包括改善评级的纠正措施。在生效前，年度碳强度降低系数相当于一切照旧；然后 2023 年至 2026 年 2%；并在 2027 年至 2030 年期间进一步加强。IMO 将最迟于 2026 年 1 月 1 日审查 CII 和 EEXI 要求实施的有效性，并根据需要制定和通过进一步的修正案。船旗国和港口国应确保遵守，它们分别发布和核实是否存在关于燃料油消耗报告和作业碳强度评级的遵守声明，而 IMO 则提供执行准则。

3.3 国际海事组织与温室气体排放有关的补充管制

其中包括 2022 年 12 月 MEPC 第 79 届会议(国际海事组织, 2022a)和 2023 年 7 月 MEPC 第 80 届会议(国际海事组织, 2023a)作出的以下决定：

3.3.1 MEPC 79 通过了关于与港口自愿合作和国家行动计划的修订决议(修正案(对 MEPC.323(74)号决议)和 MEPC.327(75)号决议),其中包括支持脱碳的航线。

3.3.2 MEPC 79 批准了评估候选措施对国家影响的修订程序(MEPC.1/Circ.885/Rev.1),该程序考虑了短期 GHG 减排措施综合影响评估的经验。这包括一个新的附录,主要遵循用于短期措施综合影响评估的方法。

3.3.3 MEPC 79 通过了对《防污公约附则 VI》附录 IX 的修正案,该修正案涉及必须提交给国际海事组织船舶燃料油消耗数据库的有关实施短期 GHG 减排措施的信息。这包括 EEXI、CII 和评级的达到值,以及 MEPC 80 批准的一套额外的修正案草案,其中包括运输工作数据,以及国际海事组织船舶燃料油消耗数据库中更高的粒度和可及性。

3.3.4 MEPC 80 批准了一项审查短期 GHG 减排措施的计划。

3.3.5 MEPC 80 通过了《船用燃料生命周期 GHG 强度指南》(LCA 指南),允许对与船用燃料生产和使用有关的 GHG 排放总量进行从井到尾流的计算²,包括从井到油罐和油罐到尾流的排放因子,并建立了一个通信小组,进一步发展国际海事组织 LCA 框架。

3.3.6 MEPC 80 批准 MEPC 关于根据防污公约附则 VI(数据收集系统(DCS)和 CII)第 26、27 和 28 条规定使用生物燃料的临时指南的通知,预计将在短期内鼓励使用可持续生物燃料作为 CII 的合规选择。

3.3.7 MEPC 80 还讨论了船上共同 2 捕获的建议,并将其转发给减少温室气体排放闭会期间工作组(ISWG-GHG 16),将于 2024 年 3 月举行会议,以供进一步审议。

3.4 国际海事组织制定的一篮子中期措施

除了通过 2023 年 IMO GHG 战略之外,在 2023 年 7 月,MEPC 80 进一步讨论了一系列候选中期 GHG 减排措施,这些措施是实现该战略的关键,并从结构化工作计划的第二阶段转移到第三阶段,以最终确定这些措

施。

向 MEPC 和 GHG 排放闭会期间工作组提交的大量文件涉及作为技术(例如, GHG 燃料强度标准和/或加强 IMO 碳强度措施)和经济(例如,征税、奖励、补贴或统一费率贡献)组成的一揽子措施的一部分而制定的各种候选措施。

《2023 年 GHG 战略》规定,在采取措施之前,应根据评估候选措施对国家影响的修订程序(IMO, 2022a),评估和考虑一项或多项措施对国家的影响。应特别注意发展中国家,特别是最不发达国家(最不发达国家)和小岛屿发展中国家(SIDS)的需要。

《2023 年 GHG 战略》认识到,最不发达国家和 SIDS 在能力建设和技术合作方面有特殊需求。附录概述了 IMO 支持减少船舶 GHG 排放的相关举措。

2023 年 IMO GHG 战略撤销了 2018 年 IMO 初始 GHG 战略,并将继续审查,以期在 2028 年通过另一项修订的 IMO GHG 战略。

4 展望与建议

4.1 未来展望

2023 年 7 月在 IMO 举行的 MEPC 80 会议取得了重要进展,有助于明确燃料转型的步伐。尽管如此,未来的低碳和零碳燃料组合尚未决定,IMO 在实现脱碳目标所需的特定目标和法规方面取得迅速进展至关重要。

很快,能源生产和相关的燃料加注系统需要进行重大变革,以提供未来的燃料。围绕采用绿色技术和替代燃料以及监管框架的不确定性正在增加资产搁浅的风险。然而,随着关键候选燃料的部署经验在这十年中得到改善,这种不确定性应该逐渐变得清晰。然而,在以尽可能低的成本努力实现脱碳目标的过程中,真正的危险在于船东采取“观望”政策。这意味着他们将推迟对船队更新、替代燃料和船舶绿色技术的投资。由于向低碳燃料和技术的转变需要大量的船上和陆上投资,延迟投资的时间和规模,无论是在新造船还是能源供应链方面,都可能导致船舶运力瓶颈,供应链中断以及航运和贸易成本增加。

燃料成本占船舶运营费用的很大一部分,向低 GHG 或零温室气体替代燃料的过渡可能会产生额外的成本。增加的费用可能会通过增加的运费和附加费转嫁给托运人和消费者。重要的是要提高对运费和新的、低 GHG 或零温室气体船用燃料成本的理解,并将其纳入最终的船舶运营成本和运费。

船舶在许多国家的港口停靠,穿越不同的国家和国际水域,并在国际环境中运营。因此,国际海上运输的脱碳将需要全球视角。鉴于执行 IMO 条例所需的资源,同时避免成本的不成比例增加,包括最脆弱经济体的海上物流成本,因此有必要向这些国家提供技术和财政援助。在 IMO 主持下商定的一项经济措施可为这种援助筹措资金。

4.2 政策建议

为了加快航运业的能源转型,实现 IMO 的 GHG 排放目标,需要所有利益攸关方之间进行强有力的合作。这些机构包括政府、决策者、航运和港口、以及能源供应商和贷款机构等。一些关键的优先行动,包括:

- (1) 促进燃料过渡,创造公平环境
- (2) 监测航运业能源转型和脱碳对成本、贸易和经济产出的影响
- (3) 使航运监管框架与国际商定的目标保持一致
- (4) 在转型期间支持发展中国家,特别是小岛屿发展中国家和最不发达国家

结语

航运去碳化是国际社会的共同责任,同时也是一项共同的挑战,在迈向低碳航运的过程中,国际社会必须勇于直面挑战,在确保各方利益的同时推进航运去碳化进程,只有通过共同努力解决挑战、确保公正性,我们才能实现航运业在去碳化方面的可持续、协调和共赢的发展,并不断推进人类命运共同体建设。

参考文献

- [1] 薛龙玉. 甲醇是最符合标准的替代燃料之一——访全球甲醇行业协会首席运营官 Chris Chatterton 先生[J]. 中国船检,2020(9):20-23.
- [2] 中国船级社与马士基联合推动航运去碳化[J]. 中国船检,2021(10):1.
- [3] 薛龙玉. CCUS 如何改写航运脱碳[J]. 中国船检,2022(5):16-19.
- [4] 中国船级社与新加坡海事及港务管理局签署合作备忘录[J]. 中国船检,2023(10):8.
- [5] 薛龙玉. 瓦锡兰为何看好船载 CCS 技术?——访瓦锡兰废气处理部门总监 Sigurd Jenssen 先生[J]. 中国船检,2023(3):41-44.