

【能源转型&碳中和】交通系统能源转型对大宗商品的影响之二：船用燃料（上篇）

——高明宇 投资咨询证号：Z0012038

国投安信期货研究院

李海群 从业资格证号：F03107558

2023 年 12 月 7 日

目前，航运碳中和成为一个日益受到关注的问题，尤其是在今年的国际海事组织海洋环境保护委员会第 80 届会议（MEPC80）上，航运碳中和的进程得到了进一步加速。本系列文章将从多个角度深入探讨航运碳中和的相关议题，包括：航运业碳中和法规的制定与实施进程；潜在的替代燃料方案及其可行性；航运业替代燃料船队的发展现状与前景；以及这一转型对全球能源格局所带来的潜在影响。

一、全球航运业加速推进碳中和，多国酝酿规范与投资

根据国际海事组织（IMO）的数据，航运业的碳排放在全球温室气体排放中占比约为 2%至 3%，是全球温室气体排放的重要来源之一，因而近年来航运业的碳中问题也受到国际社会的高度关注。

作为联合国的一个专门机构，IMO 基于《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》《巴黎协定》等一系列国际公约为基础，开展了船舶温室气体减排相关政策规范的推进。与此同时，欧盟、中国、美国、新加坡等多个国家和地区已经或正在制定有关航运碳减排的地区性规范和政策。

1. IMO 针对航运碳中和进程概览**1) 脱碳目标明显加速**

全球航运碳中和规则的发展历程可以追溯到 2008 年，当时国际海事组织（IMO）首次提出了减少航运业温室气体排放的目标。自那时以来，IMO 制定了一系列重要的举措和时间点，推动航运业朝着碳中和的目标迈进。

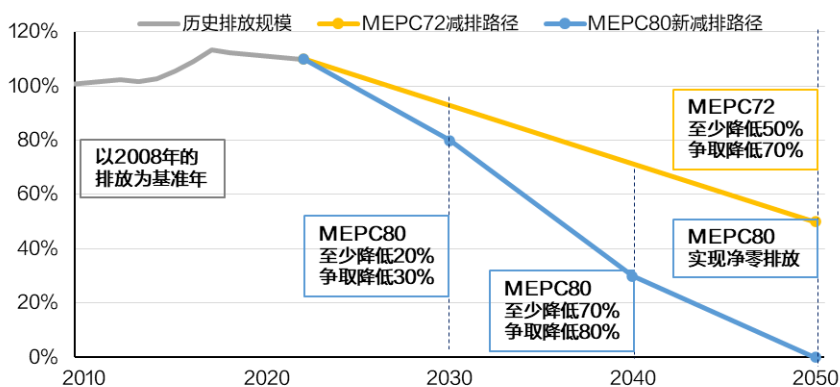
表1：IMO船舶温室气体减排进程回顾

时间	历程
2011年	MEPC62会议，通过了强制性的船舶能效规定，包括： <ul style="list-style-type: none"> • 新船能效设计指数（EEDI）， • 船舶能效管理计划（SEEMP）。
2013年	EEDI限值要求的第0阶段开启。
2018年	MEPC72会议，IMO达成船舶温室气体减排初步战略，目标： <ul style="list-style-type: none"> • 以2008年为基准，到2030年航运碳排放强度降低40%， • 到2050年航运碳排放强度降低70%并且温室气体排放总量减半， • 本世纪内努力实现零排放。
2021年	MEPC76会议，通过了降低国际航运碳强度的技术和营运措施，包括： <ul style="list-style-type: none"> • 现有船舶能效指数（EEXI）， • 增强的船舶能效管理计划（SEEMP）， • 碳强度指标（CII）评级计划， 并从2023年开始生效。
2023年	EEXI和CII正式生效。 <ul style="list-style-type: none"> • CII衡量的是船舶每单位运力的燃料消耗水平， • 每年需上报上一年能耗数据，并形成A-E的评级，各船型CII的评级边界值要求会逐年增高。 • 连续三年为D级或E级的船舶在船舶能效管理计划（SEEMP）中制定整改计划。

数据来源：公开资料整理，国投安信期货

而在今年召开的 MEPC80 会议中，更是重新修订了船舶温室气体减排战略，相较于 2018 年制定的初步战略，脱碳步伐明显提速。**新战略提出了船舶温室气体需在接近 2050 年前后达到净零排放，这相较于 MEPC72 提出的初步战略“到 2050 年将温室气体年排放总量相较 2008 年减少至少 50%”有了显著提速。**此外新战略还在 2050 年前设立了两个阶段性的核查点，即到 2030 年，船舶温室气体年度排放总量相比 2008 年应至少降低 20%，争取降低 30%；到 2040 年，年度排放总量相比 2008 年应至少降低 70%，争取降低 80%。且目标和校核点均是考虑全生命周期温室气体排放，即包括上船前排放（WTT）和船端排放（TTW）两部分。

图1: IMO温室气体减排新战略与原有时间表对比

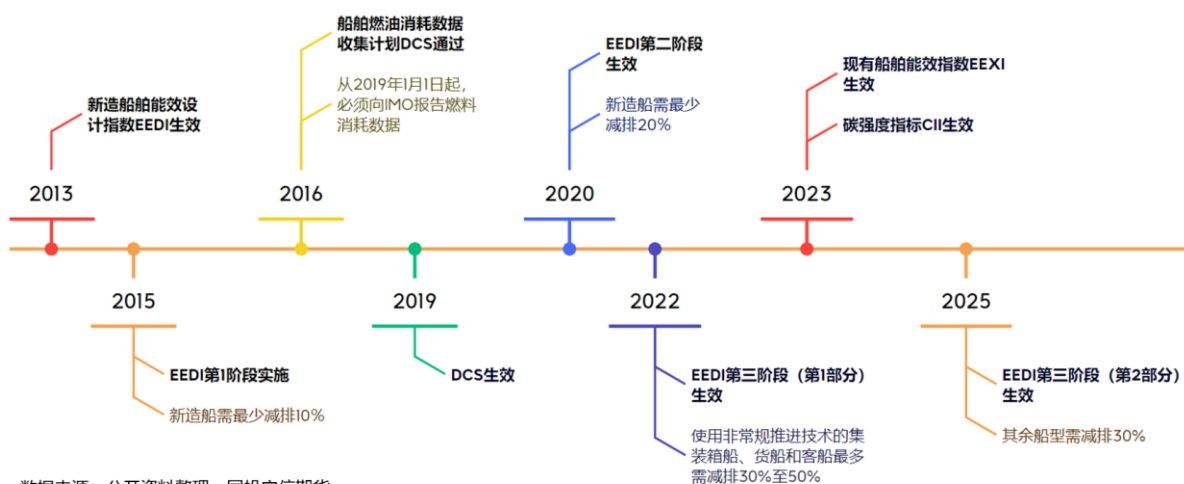


数据来源: 公开资料整理, IMO, 国投安信期货

2) 国际海事组织推进技术措施和经济措施

为达成温室气体减排的目标, IMO 也制定了一系列的技术措施, 鼓励船东和船舶运营商采取行动, 减少船舶的能源消耗和碳排放。其中现有船舶能效指数 EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) 和碳强度指标 CII (Carbon Intensity Indicator) 于今年正式生效。

图2: IMO针对温室气体排放的措施进程



数据来源: 公开资料整理, 国投安信期货

船舶能效指数 EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index)

EEXI 基于船舶的技术特性和能源效率指标, 评估船舶的能源效率。

$EEXI = CO_2 \text{ 转换系数} \times \text{油耗} \times \text{主机功率} / \text{运载能力} \times \text{船速}$ 。

根据公式可以理解, 其本质是衡量基于船舶技术参数, 计算把 1 吨货物移动 1 海里所产生的

CO₂ 的量的理论值。今年年初 EEXI 正式生效后，要求现有船舶在 2023 年的年度检验中一次性满足所要求 EEXI 值（EEDI 2/3 阶段标准），并获得国际能效证书（IEE 证书），否则船舶需退出运营。对于不满足 EEXI 要求的船舶，船东可通过限制船舶最高航速以满足要求。

碳强度指标 CII (Carbon Intensity Indicator)

CII 基于船舶的实际运营，评估船舶单位运输功平均 CO₂ 排放量的指标。

$$CII = (\text{年度油耗} \times \text{CO}_2 \text{ 因子} / \text{年行驶距离} \times \text{运载能力}) \times \text{修正系数}。$$

根据公式可以理解，不同于 EEXI 是基于船舶技术参数的理论值，CII 是用船舶实际运营产生的参数计算。CII 则采取评级制度，即对船舶实际的碳强度从最佳到最差进行分级，共分为 A~E 五个等级。CII 的评级旨在鼓励船舶提高运输过程中的能源效率和碳排放效率。目前 IMO 尚未出台针对 CII 评级的强制措施。

截至目前，IMO 尚未对航运碳中和的具体经济措施，即未对船舶温室气体排放定价机制形成最终结论。预计具体的经济措施将在 2025 年审议通过，并在 2027 年生效实施。

2. 区域性航运碳减排进程

1) 欧盟推出针对控制航运碳排放的经济措施

2023 年 5 月 16 日，欧盟完成碳排放权交易体系 EU-ETS 修正案立法生效程序，航运业将于 2024 年正式纳入其中。该法案也成为了全球首个针对航运碳排放的地区性经济措施。根据该修正案，凡是在欧盟港口挂靠的船舶都需要购买并缴纳欧盟配额（EUA），对停靠欧盟航次产生的温室气体排放进行履约。

此外，从 2025 年开始，船舶涉欧航程的排放强度需要以 2020 年碳排强度为基准，每五年要按照以下比例递减：2025 年降低 2%，2030 年降低 6%，2035 年降低 13%，2040 年降低 26%，2045 降低 59%，2050 年降低 75%，不符合的需要支付罚金。

针对欧盟推出的两项针对航运碳排放的经济措施，以及其可能产生的成本规模，我们将在后续系列文章中做详细介绍。

2) 我国加速推进航运碳中和相关的布局

作为世界最大船东国，我国的航运脱碳进程对全球进程影响不容小视。目前我国已经采取了一系列的布局 and 措施。在能耗记录方面，我国规定自 2022 年 12 月起，所有进出我国港口的 400 总吨以上船舶，无论船旗如何，需按照《船舶能效管理计划》(SEEMP) 的要求记录能耗数据。为未来进一步的规则推进打下基础。尽管目前我国的碳排放交易体系尚未将航运业纳入其中，但部分港口和航运企业已被纳入上海市碳排放配额管理单位。

此外我国沿海地区对岸电的使用要求日益提高，而今年新修订并将于 2024 年 1 月 1 日生效的《海洋环境保护法》更是规定了沿海港口船舶不按规定使用岸电、沿海港口不按规定提供岸电服务均将面临处罚。

3) 其他国家和地区

目前包括美国、新加坡、挪威等国家正在酝酿或推进航运脱碳相关的规范和投资措施。

二、使用替代燃料将是航运业脱碳的最终方案

为了减少航运业的碳排放，航运公司需要采取一系列措施，包括船舶节能技术、碳捕捉技术和使用替代燃料等方案。

1. 船舶节能技术 Energy Saving Technologies (ESTs)

船舶节能技术是一种旨在降低船舶能源消耗、减少碳排放和运营成本的技术。它通过改进船舶设计、采用更高效的动力系统、降低阻力以及减轻船舶重量等多种手段达成目标。例如，有些船舶通过改进船体涂层，以减少水阻力，还有一些加装了能帮助减阻增效的节能设备，比如风帆助力设备 (WAPS) 和消涡鳍设备 (PBCF)。使用风帆助力设备的船舶每年可以节省 5%–9% 的燃油，而装有消涡鳍设备的船舶，其推进效率可提升 3%~5%。

相较其他措施，加装节能装置的方案成本低、改装相对容易，短期内可对于船舶的碳排放有较好改善。据统计以数量计目前有近 10% 的船队已采用了 EST 设备，而手持订单中的预计加装

占比则达到了 28%。但 EST 的加装无法根本性解决碳排放问题，预计减排上限仅在 20%左右，无法应对中长期的减碳计划。

表2：各船型船舶节能装置渗透率

	散货船	油轮	集装箱船	LNG船	LPG船	滚装船	客船	所有船型
现有船队	16%	11%	20%	40%	16%	10%	2%	9%
手持订单	24%	17%	43%	43%	26%	29%	15%	28%

数据来源：ABS，国投安信期货

2. 碳捕捉技术 Carbon capture and storage (CCS)

碳捕捉技术是将船舶排放的二氧化碳捕获并存储在地下的方法，理论上此种方案的脱碳潜力可达到 90%以上。但碳捕捉是需要大量的能源和设备来实现，成本较高，并且运输和储存二氧化碳也面临着一些技术和环境挑战。例如，二氧化碳需要被压缩和液化，才能被储存和运输，而且储存二氧化碳的地下储存场所也需要满足一定的地质条件和环保标准。

3. 替代燃料

航运业正在越来越多的考虑采用替代燃料，这些燃料可以从根本上解决碳排放问题。目前潜在的船用替代燃料包括 LNG、LPG、甲醇、氨、氢等，但在减碳效果、供应链和技术发展方面，这些方案则各有优劣，航运业对于未来替代燃料的选择尚未有统一性的结论，其中受到关注较多的分别是 LNG、甲醇、氨和氢。我们将从脱碳能力、技术进展、供应和成本四个角度来分析。

1) LNG

脱碳能力：相比传统的燃油，目前 LNG 温室气体减排效应在 20%左右，若进一步改进甲烷泄露等问题，则最高可达到 24%的减排效应。因而基于化石燃料的 LNG 只能作为一种过渡燃料。除非使用电制 LNG，其减碳比例可高达 98%。

技术进展：目前 LNG 发动机技术已经商业化多年，相当成熟。主要的船用发动机制造商都有超过二十年的 LNG 发动机运行经验。

加注便利度：目前全球范围内有近 200 个港口能提供 LNG 的加注，主要集中在西北欧和亚

太地区。未来加注设施的分布可能会变得更加广泛，预计到 2025 年底，可加注 LNG 的港口将达到 268 个。

成本：基础设施成本方面，LNG 终端成本约为 5000 万欧元，LNG 加气船成本为 3000 万欧元。加注成本方面，截至 2023 年 10 月，基于化石燃料的 LNG 的加注成本已与低硫燃料油相近。

能量密度：LNG 的能量密度略低于船用燃料油，但在当前潜力较大的几类替代燃料中偏高，同样续航力的船舶，LNG 动力船的燃料舱容是燃料油的 1.6 倍。

总结：尽管 LNG 并非零碳燃料，且因其需在低温高压下保存，船舶的改装难度较大，但其技术和供应链的成熟性、较好的成本优势和较高的能量密度将使其成为航运业在碳中和过程中重要的过渡燃料。

2) 甲醇

脱碳能力：从全生命周期的角度而言，煤制甲醇和天然气制甲醇无甚减碳效果，因而基于“零碳”甲醇的讨论主要是指生物甲醇或通过可再生能源由二氧化碳和氢气制成的可再生甲醇（电制甲醇）。与常规船用燃料相比，电制甲醇最多时可减少 99% 二氧化碳排放，并完全消除氧化物和颗粒物的排放。

技术进展：甲醇燃料内燃机技术相对成熟，在车辆、船舶上均有多年的应用经验。主要的船用发动机生产商均开展了甲醇发动机的研发或生产，目前已研发投入实际使用的主机型号基本可以覆盖各种类型、各种大小远洋船舶的功率需求。

加注便利度：截至 2022 年，全球范围内已有超过 120 个港口能提供甲醇的加注服务，主要位于欧洲、亚太和北美。由于甲醇常温常压即可储存，其储存要求较气体燃料更低，一方面加注设施的建造更为容易，另一方面原先的加油基础设施稍加改动便可用于甲醇加注，因未来若加注需求进一步上升，则加注便利度可以在相对短的时间内获得提升。

成本：基础设施成本方面，小型甲醇加注设备的安装成本大约 40 万欧元，也可对加油船进

行改装，成本约为 150 万欧元。加注成本方面，截至 2023 年 10 月，生物甲醇和可再生能源电制甲醇的成本是燃料油的 4-5 倍。

能量密度：甲醇的能量密度约为船用燃料油的 1/2，出于等效能量密度的考虑，甲醇存储罐所需空间大约要比传统燃料大一倍。

总结：考虑全生命周期的脱碳能力，船舶脱碳需使用零碳甲醇，现阶段零碳甲醇供应较少，所以现在的加注成本远高于燃料油。且由于甲醇的能量密度偏小，需要的燃料舱舱容更大，会挤占货舱容积。但由于甲醇的安全性较 LNG 等气体燃料更高，且可常温运输，所以未来基础设施、船舶改装方面的技术难度较小，未来的发展潜力较大，或将成为脱碳难度、成本、技术难度、供应等方面综合考量下性价比较高的一个选择。

3) 氢

脱碳能力：氢在转化为电和热时只产生水，不产生碳排放。然而当今大多数氢是由天然气（灰氢）、煤（棕氢）等化石燃料生产的，若从全生命周期而言化石燃料基的氢气相对于传统燃料并无明显减碳效果。目前主要的低碳制氢方法包括采用 CO₂ 捕捉和封存技术 CCS 通过传统的 SMR 技术制成（蓝氢），或使用可再生电力通过电解水分离出水中的氢（绿氢）。

技术进展：当前氢动力驱动船舶的技术尚不成熟，主要是通过氢燃料电池作为动力系统，我国首艘氢燃料电池动力船在今年 10 月完成了首航。而全球首艘以氢内燃机作为动力的船则于去年才正式下水。

加注便利度：目前港口氢加注和接驳基础设施基本空白。

成本：基础设施成本方面，因氢气的运输和储存不易，其建设难度和成本预期高于 LNG 基础设施。加注成本方面，目前绿氢和蓝氢都未有规模化的制备，采购成本高昂。

能量密度：对于 20 MPa、70 MPa 的压缩氢气和常压低温（-253℃）下的液化氢而言，体积能量密度分别为柴油的 5.0%、12.3%和 23.2%，考虑加压或制冷条件下燃料围护系统则有更大和更规整的空间需求，采用氢燃料的船舶货舱容量将受到明显挤压。

总结：若船舶使用绿氢，则真正达到了零碳的排放，但其在燃烧、运储等方面的技术和成本仍面临较大挑战，当前使用氢作为船用燃料还缺乏竞争力。目前来看使用氢的衍生物氨作为替代燃料似乎更具竞争力。

4) 氨

脱碳能力：氨本身为无碳燃料，但若满足全生命周期的脱碳，必须使用“蓝氢”或“绿氢”制取“蓝氨”或“绿氨”。

技术进展：当前船用氨燃料发动机尚未投入商用，目前各家主机生产商正在积极推动氨燃料发动机的研发。今年 10 月，WinGD 首款氨燃料发动机（X52DF-A）获原则性认可。但氨具有毒性，空气中仅 0.25% 的浓度即可导致死亡，在船上处理氨或将需要对船舶布局和安全程序进行重新设计。

加注便利度：氨作为传统大宗商品，其运输网络已较为成熟，但当前网络主要为工业生产服务，其港口设施并非为船舶燃料加注而准备，对于液态氨的加注系统需要重新规划建设。此外氨的毒性也使得其作为船舶燃料必须解决港口工人、港口所在地居民的安全问题。

成本：基础设施成本方面，氨加注的基础设施或类似于 LPG 或 LNG 加注的技术，可参考 LNG 加注设施的成本估量。加注成本方面，当前绿氨的价格相较于传统燃料油在 4-5 倍左右。

能量密度：氨的能量密度较氢有显著提高，但不及甲醇和 LNG，是传统燃料油的 3 倍水平。

总结：氨在燃烧过程中完全零碳，又较氢的储运条件更为宽松，是目前可能性较大的几种替代燃料之一。但无论是其本身的毒性问题，还是成本、主机设备、储运条件等问题都是在氨成为有较好可用性的船用燃料前需要解决的问题。

图3：主要替代燃料相较传统船燃全生命周期脱碳潜力

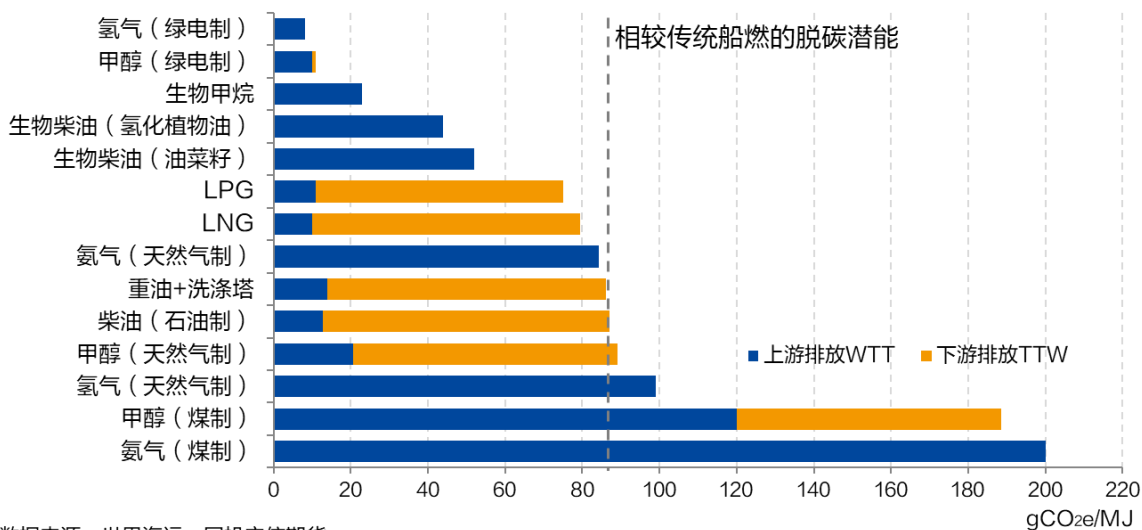


表3：主要替代燃料价格与传统船用燃料属性对比

燃料名称	全生命周期碳强度 (gCO ₂ e/MJ)	船用主机投入商用	加注成本-美元/吨 (VLSFOe)	所需舱容 m ³
船用低硫油	~90	是	~560	1000
LNG	~80	是	~690	1600
甲醇 (绿电制)	~10	是	~2280	2270
氨 (绿电制)	~8	否	~2655	3120 (液态-33℃)
氢 (绿电制)	~8	是	~8600	4220 (液态-253℃)

数据来源：Argus, DNVGL, 公开资料整理，国投安信期货

航运业去碳化的关键在于采用低碳或零碳燃料，目前潜在选择集中于 LNG、甲醇、氢、氨。然而这几种燃料从技术、经济等可行性对比后，并没有一种替代燃料能够在所有方面都具有明显优势，从而可以完全替代传统燃料成为航运业新的选择。技术经济的不确定性使得航运业去碳化的进程遇阻。不过近年来替代燃料的新签订单量逐步出现上升趋势，并在这一过程中体现出一定未来选择的倾向性。我们将在下篇中详细介绍当前替代燃料在航运业的渗透情况，以及对于能源结构可能产生的潜在影响。

免责声明

本文由国投安信期货有限公司撰写,研究报告中所提供的信息仅供参考。

文章根据国际和行业通行的准则,以合法渠道获得这些信息,尽可能保证可靠、准确和完整,但并不保证文章所述信息的准确性和完整性。

本文不能作为投资研究决策的依据,不能作为道义的、责任的和法律的依据或者凭证,无论是否已经明示或者暗示。

国投安信期货有限公司将随时补充、更正和修订有关信息,但不保证及时发布。

对于本文所提供信息所导致的任何直接的或者间接的投资盈亏后果不承担任何责任。

本文版权仅为国投安信期货有限公司所有,未经书面许可,任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。

如引用发布,需注明出处为国投安信期货有限公司,且不得对本文进行有悖原意的引用、删节和修改。

国投安信期货有限公司对于本免责声明条款具有修改权和最终解释权。