



低碳航运中国：综述与展望

Low-carbon Shipping China Review & Outlook

2022年12月

项目团队

首席研究员

吴桂涛（大连海事大学）

特约撰稿人

邢 辉（大连海事大学）

主要贡献者

张 晗（信德海事）

陈 洋（信德海事）

张 毅（船队在线 HiFleet）

王 凯（大连海事大学）

刘勤安（大连海事大学）

李 超（大连海事大学）

李 想（大连海事大学）

外部评阅人

黄连忠（大连海事大学）

陈树伟（信德海事）

任旭东（DNV 中国）

郑庆国（中波轮船）

致 谢

本报告系 2022 年度交通运输行业重点科技项目清单项目（2022-MS7-205）、大连海事大学综合交通运输理论研究专项“我国海运船队低碳转型战略研究”的阶段性成果，得到了中央高校基本科研业务费专项资金（3132022649）资助和“十四五”国家重点研发计划“船舶运行能效提升与排放控制技术”项目（2022YFB4300800）支持。

本报告得到了船队在线 HiFleet、Clarkson Research SIN、DNV AFI 等信息平台的数据支持，同时报告中还大量引用了招商轮船（CMES）、大连船舶重工（DSIC）、MAN Energy Solutions、WinGD、Wärtsilä、Norsepower、NYK、Methanol Institute 等企业或组织的图片，项目团队向相关单位和个人表示衷心感谢！

联系我们

邢辉

大连海事大学 1999 楼 309 室

大连市凌海路 1 号，116026

xingcage@dlnu.edu.cn

<http://www.dlnu.edu.cn/>

张晗

万达广场 2#楼 1712 室

大连市高新园区，116023

zhanghan@xindemarine.com

<http://www.xindemarine.com/>

免责声明

本报告所述观点仅系项目团队的研究成果，不代表项目团队成员所在单位大连海事大学和信德海事技术服务（大连）有限公司（本报告中简称“信德海事”）的立场和观点。项目团队已尽可能地确保报告所引用数据的准确性，但不为因数据应用所导致的任何后果承担责任。

本报告所引用的信息和材料不在任何程度和方面表达或暗示项目团队成员及其所在单位对任何国家、地域、城市或地区的法律地位或合法性，以及其版图及边界划分的立场和观点。

2022 年 12 月

©大连海事大学，保留一切权利！

序 言

气候变化已成为全人类的共同关切。2020年9月22日，国家主席习近平向全世界郑重宣布——中国“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”。实现碳达峰、碳中和，事关中华民族永续发展和人类文明持久繁荣。

航运作为一种最经济、最高效的大宗货物运输方式，承担了80%以上的国际贸易运输任务，为世界经济发展和人类文明进步作出了卓越贡献。然而，作为化石燃料消耗的主要行业之一，世界航运年均二氧化碳排放也占到当年全球人为源二氧化碳排放的将近3%，促进航运业低碳可持续发展迫在眉睫。中国同时是贸易大国、航运大国、港口大国和造船大国，推动海事价值链加快低碳转型，对于提升中国海事产业竞争力、构建人类命运共同体意义重大。

大连海事大学研究团队适时撰写了《低碳航运中国：综述与展望》报告，旨在凝聚行业广泛共识，以期尽快达成一致行动。希望本报告为中国航运、船舶及海事产业链上下游相关企业的战略规划及相关从业人员的学习研究提供有价值的参考，并期待您的积极反馈。



孙玉清
大连海事大学

目 录

1 简介	1
2 全球海事行业的政策法规与自愿行动	3
2.1 政府/非政府国际组织引领航运去碳化进程	3
2.2 国家/地区绿色航运转型战略与政策	7
2.3 行业组织/企业的自愿行动	14
3 船舶清洁能源与动力	21
3.1 概述	21
3.2 替代船舶动力	22
3.3 替代船用燃料	41
4 中国海运船队与船舶工业	67
4.1 中国海运船队基本情况	67
4.2 中国船东及其船队基本情况	71
4.3 中国船舶工业基本情况	81
5 绿色航运供应链分析	89
5.1 世界海运船队主要贸易航线分析	89
5.2 中国海运船队主要贸易航线分析	97
5.3 替代燃料的可扩展性和基础设施	104
6 中国海运船队低碳转型战略与路径	110
6.1 船队更新与结构优化：低碳转型的必由之路	110

6.2 能效提升：永恒的价值追求.....	111
6.3 替代船用燃料：路在何方？	111
6.4 推动甲醇作为替代船用燃料对于中国具有重要意义	113
6.5 替代燃料船舶与基础设施同步推进：破解“鸡与蛋”的难题..	114
6.6 燃料、基础设施和设备：跨价值链协作是必不可少的关键 .	114
6.7 人才：技术创新和产业可持续发展的源泉.....	115
缩略词和术语	116
参考文献.....	121

1 简介

航运承担了 80%以上的国际贸易运输任务，是一种最经济、最高效的大宗货物运输方式，为世界经济繁荣和人类文明进步作出了卓越贡献。“柴油机+燃油（包括重质燃料油和轻质柴油）”的组合驱动航运业已逾一个世纪，且在现代海运船队中占据绝对统治地位。作为化石燃料消耗的主要行业之一，航运业的废气排放也为公众所重视。

船舶主推进动力装置（主机）、电源系统（副机）和热源系统（锅炉），成为船舶主要的燃料消耗设备。其废气排放主要包括两大类：大气污染物，如 SO_x 、 NO_x 、PM、CO、NMVOCs 等；温室气体，如 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等。前者主要成分是 SO_x 、 NO_x 、PM，主要危害是造成局部的空气污染和环境灾害；而后者被认为对地球整体的气候变化造成影响，且以 CO_2 排放量最为显著。随着《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL 公约）附则 VI 第 3 章的累次修正，尤其是 IMO 2020 年限硫令的生效实施，船舶 SO_x 、PM、 NO_x 减排成效显著。然而，当前世界航运年均燃料消耗约为 3 亿吨油当量，年均温室气体排放约为 10 亿吨（其中主要为 CO_2 ），占到当年全球人为源 CO_2 排放的将近 3%。航运低碳转型并最终实现净零排放，已成为国际社会尤其是国际海事行业关注的焦点。

当前，中国拥有海运船舶约 1.2 万艘，净载重量约 1.4 亿吨，年度

海上货运量约 40.5 亿吨，年度海上货物周转量约 9.8 万亿吨公里¹。初步测算，中国海运船队每年燃油消耗逾 2,000 万吨，CO₂ 排放逾 6,000 万吨。面向未来的航运碳排放监管要求，从产业链全要素深入剖析中国海运船队低碳转型的挑战和路径，寻求全局最优的解决方案，对于促进中国海运船队的高质量发展、提升中国海运船队的市场竞争力，具有重要的现实意义。

¹ 根据《2021 年交通运输行业发展统计公报》数据。

2 全球海事行业的政策法规与自愿行动

2.1 政府/非政府国际组织引领航运去碳化进程

I. 联合国系统 (UN)

1988 年，世界气象组织 (WMO) 和联合国环境规划署 (UNEP) 联合建立了政府间气候变化专门委员会 (IPCC)。IPCC 于 1990 年基于气候变化的“现有知识”发布了第一次评估报告，这促使 1992 年 6 月 4 日在巴西里约热内卢举行的联合国环境与发展大会上通过了《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC, 1994 年 3 月生效)。UNFCCC 与后来的《京都议定书》和《巴黎协定》共同构成在气候变化治理方面具有法律约束力的全球性协议。由于国际航运的特殊性，其产生的温室气体很难分配到某个国家，《巴黎协定》要求其燃料排放应作为缔约方国家温室气体排放清单的一部分计算，但排除在国家总量之外单独报告。

2009 年 12 月，国际社会在 UNFCCC COP15 次会议上开始讨论为航运业设定减排目标，并由 IMO 负责在行业内部的组织实施，航运低碳转型遂逐渐纳入监管当中。

II. 国际海事组织 (IMO)

作为联合国的专门机构，IMO 对航运温室气体排放行使权力和承担责任，相关强制性监管法规主要通过 MARPOL 公约实施¹。2011 年 7 月，IMO 以 MEPC.203(62)号决议在 MARPOL 附则 VI 中增加了一个

¹ 1997 年 9 月，IMO 外交大会通过了《MARPOL 公约》附则 VI——《防止船舶造成大气污染规则》，2005 年 5 月 19 日生效。

新的章节——“第 4 章 船舶能效规则”，通过了提高国际航运能效的强制性措施¹，适用于 400 GT 及以上的船舶。自 2013 年 1 月 1 日生效起，船舶能效设计指数（EEDI，适用于新造船）以及船舶能效管理计划（SEEMP，适用于所有船舶）成为提升船舶技术能效和操作能效的重要监管措施，具体计算方法、适用对象、限值要求后经多次修正²。2016 年 10 月，IMO MEPC.278(70)号决议通过了 MARPOL 公约附则 VI 关于船舶燃油消耗数据收集的强制性要求³，IMO DCS 机制开始发挥作用。在前述工作基础上，2021 年 6 月，IMO MEPC.328(76)号决议通过了 MARPOL 公约附则 VI 修正案，自 2023 年 1 月 1 日起，EEXI 计算和 CII 评级将成为强制性要求⁴。截至 2022 年底，IMO 针对新造船/现有船碳强度水平已经形成了从技术到操作全方位的监管要求。

此外，2018 年 4 月，IMO 以 MEPC.304(72) 号决议通过了《IMO

¹ 从 2019 年 1 月 1 日起，5000 总吨及以上的船舶需要收集他们使用的每种燃料油的消耗数据以及其他指定数据，汇总数据将在每个日历年结束后报告给船旗国。船旗国在确定数据已按照要求报告后，将向船舶发出符合声明，随后将此数据传输到 IMO 船舶燃油消耗数据库（GISIS 平台的一个模块）。<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>.

² Resolution MEPC.212(63); Resolution MEPC.233(65); Resolution MEPC.245(66); Resolution MEPC.308(73); Resolution MEPC.322(74); Resolution MEPC.324(75); Resolution MEPC.332(76); Resolution MEPC.213(63); MEPC.282(70); Resolution MEPC.346(78).
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.332\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.332(76).pdf).
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.346\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.346(78).pdf).

³ Amendments to MARPOL Annex VI on Data collection system for fuel oil consumption of ships, adopted by resolution MEPC.278(70), entered into force on 1 March 2018.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Data-Collection-System.aspx>.

⁴ Resolution MEPC.328(76); Resolution MEPC.333(76); Resolution MEPC 336(76); Resolution MEPC.337(76); Resolution MEPC.338(76); Resolution MEPC.339(76); Resolution MEPC.350(78); Resolution MEPC.351(78); Resolution MEPC.352(78); Resolution MEPC.353(78); Resolution MEPC.354(78); Resolution MEPC.355(78).
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx#3>.

船舶温室气体减排初步战略》，设定的减排目标和路径如图 2-1-1 所示，并为此安排了一系列的短期、中期和长期减排措施。然而，2021 年 11 月，UNFCCC COP26 次会议以及随后的 IMO MEPC77 次会议，释放了加快实现航运碳中和的强烈信号。

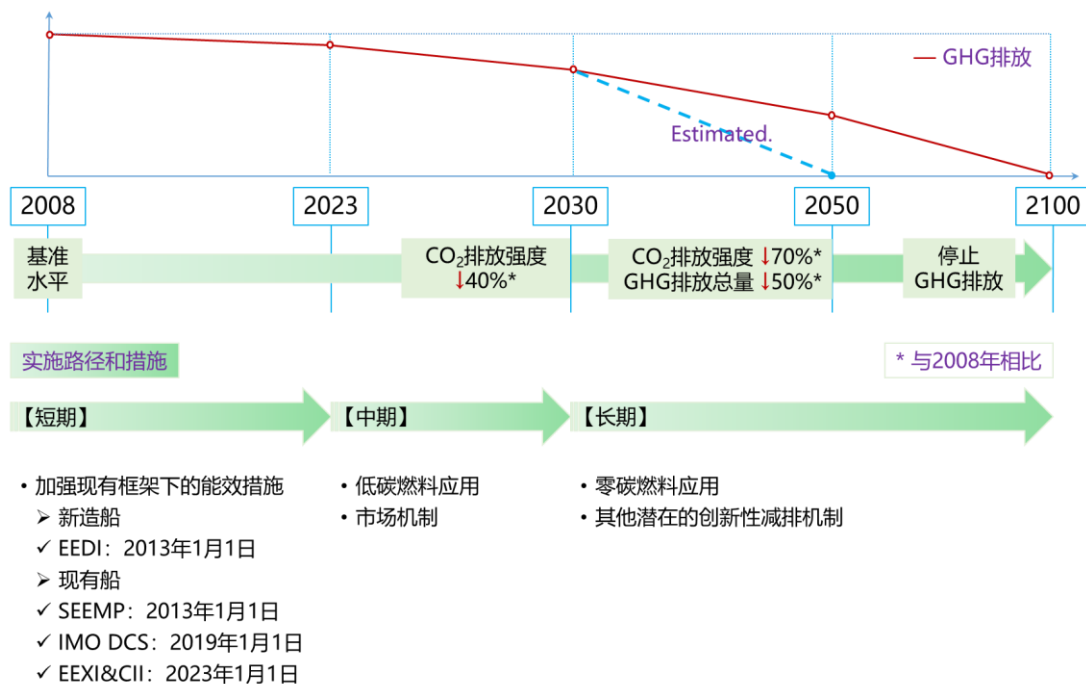


图 2-1-1 IMO 船舶温室气体减排路线图

III. 欧盟 (EU)

欧盟自 2005 年开始实施欧盟碳排放交易体系 (EU ETS)¹，且自 2013 年便开始提议将海运业纳入 EU ETS 之中。2015 年 4 月，欧盟通过了关于海运二氧化碳排放监测、报告和认证的条例 (EU MRV)，并

¹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2003:275:TOC>.

自 2018 年 1 月 1 日开始第一个报告期¹。2019 年 12 月 11 日，新一届欧盟委员会出台《欧洲绿色协议》（European Green Deal），成为其政策引导的总纲²。2021 年 6 月 28 日，欧盟通过了《欧洲气候法》（European Climate Law），目标设定到欧盟 2030 年温室气体排放较 1990 年减少至少 55%（原目标为 40%），到 2050 年实现碳中和³。2021 年 7 月 14 日，欧盟委员会提出“Fit for 55”一揽子立法计划，其中涉及到航运业的内容包括：将航运业纳入 EU ETS；增加对船用可再生和低碳燃料的需求，对停靠欧洲港口的船舶所使用能源的温室气体含量设定最大限值，并鼓励在泊船舶采用零排放技术；促进替代燃料基础设施等。FuelEU Maritime 和新的 EU ETS 将成为欧盟航运碳排放监管的法规框架，其中后者预计将于 2026 年对航运业全面实施。

IV. 国际海事论坛（GMF）

国际海事论坛（GMF）是一个国际非营利组织，致力于塑造全球海运贸易的未来，以促进可持续的经济发展和人类福祉⁴。自 2019 年，GMF 相继提出“波塞冬原则”（The Poseidon Principles）⁵和“海运货物宪章”（Sea Cargo Charter）⁶的呼吁，分别从银行和散货大租家的角度对业内产生了较为重要的影响。

¹ European Union. Regulation (EU) 2015/757 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC. Official Journal of the European Union, L 123/55. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015R0757&qid=1670205834607>.

² https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

³ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_en.

⁴ <https://www.globalmaritimeforum.org/initiatives/>.

⁵ <https://www.globalmaritimeforum.org/poseidon-principles>.

⁶ <https://www.globalmaritimeforum.org/sea-cargo-charter>.

2019年9月，在纽约举行的联合国气候峰会上，GMF与世界经济论坛（World Economic Forum）组织发起成立了“零排放联盟”（Getting to Zero Coalition），目前已涵盖海事、能源、基础设施和金融等行业的200多个组织（包括160家公司），并得到了主要政府和政府间国际组织的支持。该联盟致力于在2030年前让零排放燃料动力船舶投入深远海运营具有商业可行性，并到2050年实现航运脱碳。2021年9月，该联盟组织发起了“航运脱碳行动呼吁”（Call to Action for Shipping Decarbonization），促进航运业符合《巴黎协定》的温控目标，并在2050年之前完全使用净零能源。

2.2 国家/地区绿色航运转型战略与政策

1. 英国

2011年9月19日，英国发布首个《海洋产业增长战略》（UK Marine Industries: a strategy for growth），将造船业作为海洋事业发展的重要部分¹。2017年9月6日，英国发布《国家造船战略：英国未来海军造舰计划》（National Shipbuilding Strategy: the future of naval shipbuilding in the UK），明确提出大力提振本土船舶工业能力²。2022年3月10日，新版《国家造船战略》（National Shipbuilding Strategy: A refreshed strategy for a globally successful, innovative and sustainable shipbuilding enterprise）发布³，英国政府将在未来30年内，向造船业投入40亿英镑，以保障

¹ <https://www.gov.uk/government/publications/uk-marine-industries-a-strategy-for-growth>.

² <https://www.gov.uk/government/publications/national-shipbuilding-strategy>.

³ <https://www.gov.uk/government/publications/refresh-to-the-national-shipbuilding-strategy>.

造船业的未来发展，具体措施包括：在教育部成立“造船技能工作组”，为国内造船厂提供技能培训，进一步确保英国造船业能够应对未来的技术风险挑战；在国际贸易部成立“海运办公室”，帮助造船厂赢得海外出口订单；向航运局投入 2.06 亿英镑，用于零排放船舶和基础设施的研发等。

2019 年 1 月 24 日，英国发布了雄心勃勃的《海事 2050 战略》（Maritime 2050: navigating the future），其中相当大的篇幅涉及到海事环保政策法规、新技术和能源及燃料的发展¹。其目标是将英国打造为在欧洲和 IMO 环保规则制定完善方面的重要角色，成为低/零排放海运的权威。同年 7 月 11 日，英国推出《清洁海事计划》（Clean Maritime Plan: Maritime 2050 environment route map），更详细地阐述了英国政府向未来零排放航运过渡的路线图²。

II. 新加坡

2011 年，新加坡海事与港务管理局（MPA）启动了《新加坡海事绿色倡议》（MSGI），承诺在 5 年内向该项目投资高达 1 亿新元，旨在减少航运相关活动对环境的影响以及促进新加坡的清洁绿色航运发展³。2019 年，MSGI 被进一步延期执行到 2024 年 12 月 31 日，并提升到促进航运脱碳。该倡议主要包括四个项目：绿色船舶计划；绿色港口计划；绿色能源和技术计划；绿色意识计划。

¹ <https://www.gov.uk/government/publications/maritime-2050-navigating-the-future>.

² <https://www.gov.uk/government/publications/clean-maritime-plan-maritime-2050-environment-route-map>.

³ <https://www.mpa.gov.sg/maritime-singapore/sustainability/maritime-singapore-green-initiative>.

2021年8月1日，新加坡全球海上脱碳中心（GCMD）正式成立，由新加坡 MPA 和六个创始合作伙伴（BHP、BW、DNV Foundation、Eastern Pacific Shipping、Ocean Network Express 及 Sembcorp Marine）提供资金¹，成为新加坡推动航运脱碳减排的中坚力量。

为制定海事行业可持续发展的长期策略，2022年3月，MPA 公布了《新加坡海事脱碳蓝图：迈向 2050》，将追加 3 亿美元以上的资金并重点支持海事行业脱碳的 7 个关键领域：港口码头；国内港口操作；未来的船用燃料、加注标准和基础设施；新加坡船舶登记；在 IMO 和其他国际平台上的努力；研发与人才；碳意识、碳会计和绿色融资²。

2022年10月26日，新加坡贸易与工业部（MTI）发布了《新加坡国家氢能战略》（Singapore’s National Hydrogen Strategy），提出了开发新技术、建立低碳氢能供应链，如图 2-2-1 所示，到 2050 年实现净零排放的愿景³。其中，无论是作为氢能载体还是直接作为燃料使用，低碳氢供应链的部署都是关键一环。

¹ <https://www.gcformd.org/>.

² <https://www.mpa.gov.sg/maritime-singapore/sustainability/maritime-singapore-decarbonisation-blueprint>.

³ <https://www.mti.gov.sg/Industries/Hydrogen>.

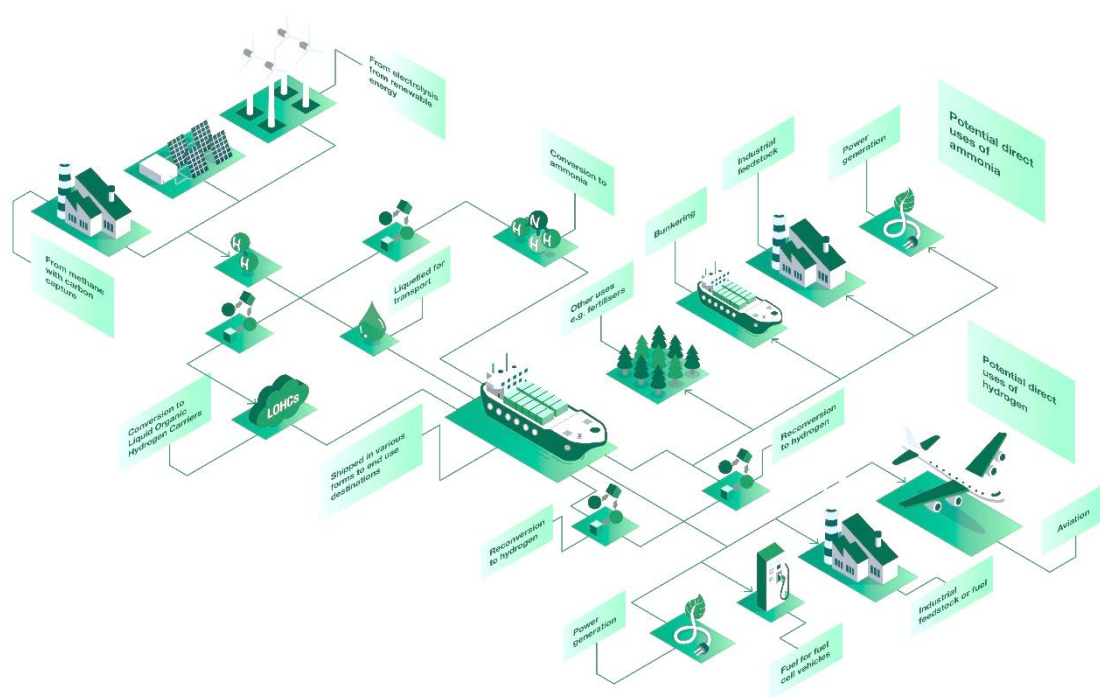


图 2-2-1 新加坡未来氢能生态系统¹

III. 美国

虽然美国航运业在国际海事行业中的存在感不强，但美国对国际海事行业的影响力不容小觑。2021 年 11 月，在英国格拉斯哥召开的 COP26 次会议上，美国利用其外交影响力接连促成了几项航运业脱碳发展重要议程并预期将产生深远影响，具体包括：美国和其他 12 个国家共同签署了由丹麦发起的一项声明——在 2050 年之前实现航运零排放²；美国宣布推出“先行者联盟”（First Movers Coalition）计划，推进私营部门的脱碳行动，Maersk 与物流、贸易、货主等与航运相关的

¹ <https://www.mti.gov.sg/Industries/Hydrogen>.

² 同时签署这一声明的其他 12 个国家：比利时、英国、芬兰、法国、德国、洪都拉斯、匈牙利、冰岛、马绍尔群岛、挪威、巴拿马和瑞典。

其他 34 家公司（组织）成为这一联盟的创始成员；美国等 22 国在会议期间签署了由英国发起的《克莱德班克宣言》(Clydebank Declaration)，承诺至 2025 年在全球至少建立六条“绿色航运走廊”，2050 年实现航运业脱碳。

2022 年 1 月，C40 城市气候领导联盟(C40 Cities Climate Leadership Group)、洛杉矶港、上海港共同发起倡议建立“上海-洛杉矶绿色航运走廊”，以实现上海港和洛杉矶港之间清洁、低碳的港到港货物运输；同年 6 月，长滩港也宣布加入该走廊。2022 年 4 月 12 日，美国国务院发布了一份关于绿色航运走廊的文件，表达了推进国内外绿色航运走廊建设的决心¹。此外，根据 2021 年 11 月通过的《基础设施投资和就业法案》以及 2022 年 8 月通过的《降低通货膨胀法案》，在未来五年内美国将在绿色港口、航道基础设施领域新增数百亿美元的投资。洛杉矶、长滩、明尼阿波利斯等 3 个地方政府通过 Ship It Zero 联盟决议，推出了“零排放船舶”相关的地方法规。

IV. 日本

2020 年 10 月，日本宣布 2050 年实现碳中和目标。2021 年 5 月，日本国会参议院正式通过《全球变暖对策推进法》修正案，以立法形式明确了日本政府提出的到 2050 年实现碳中和目标。2021 年 6 月，日本经济产业省（METI）发布了最新版《2050 年碳中和绿色增长战略》（GGS），重点以海上风电和太阳能、氢和氨燃料、下一代热能、核能、

¹ <https://www.state.gov/green-shipping-corridors-framework/>.

汽车和储能电池、半导体和通信、航运、交通与物流、食品/农林和水产、航空、碳循环与材料、下一代住宅和建筑、资源循环、生活方式等 14 个领域发展绿色低碳产业¹。为了实现 2050 碳中和目标，2021 年 3 月，METI 设立了 2 万亿日元（约 192 亿美元）的“绿色创新基金”（Green Innovation Fund）²，作为日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）的一部分³，未来十年用于需要长期持续支持的领域，包括 GGS 所提及的 14 个重点领域。

2020 年 3 月，日本国土交通省（Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism）联合日本船舶技术研究协会（Japan Ship Technology Research Association）、日本财团（The Nippon Foundation）等发布了《国际航运零排放路线图》⁴，如图 2-2-2 所示，推介日本为实现国际航运零排放的相关研究与政策法规。

¹ https://www.meti.go.jp/english/policy/energy_environment/global_warming/ggs2050/index.html.

² https://www.meti.go.jp/english/press/2021/0312_002.html.

³ <https://green-innovation.nedo.go.jp/en/>.

⁴ https://www.mlit.go.jp/en/maritime/GHG_roadmap_en.html.

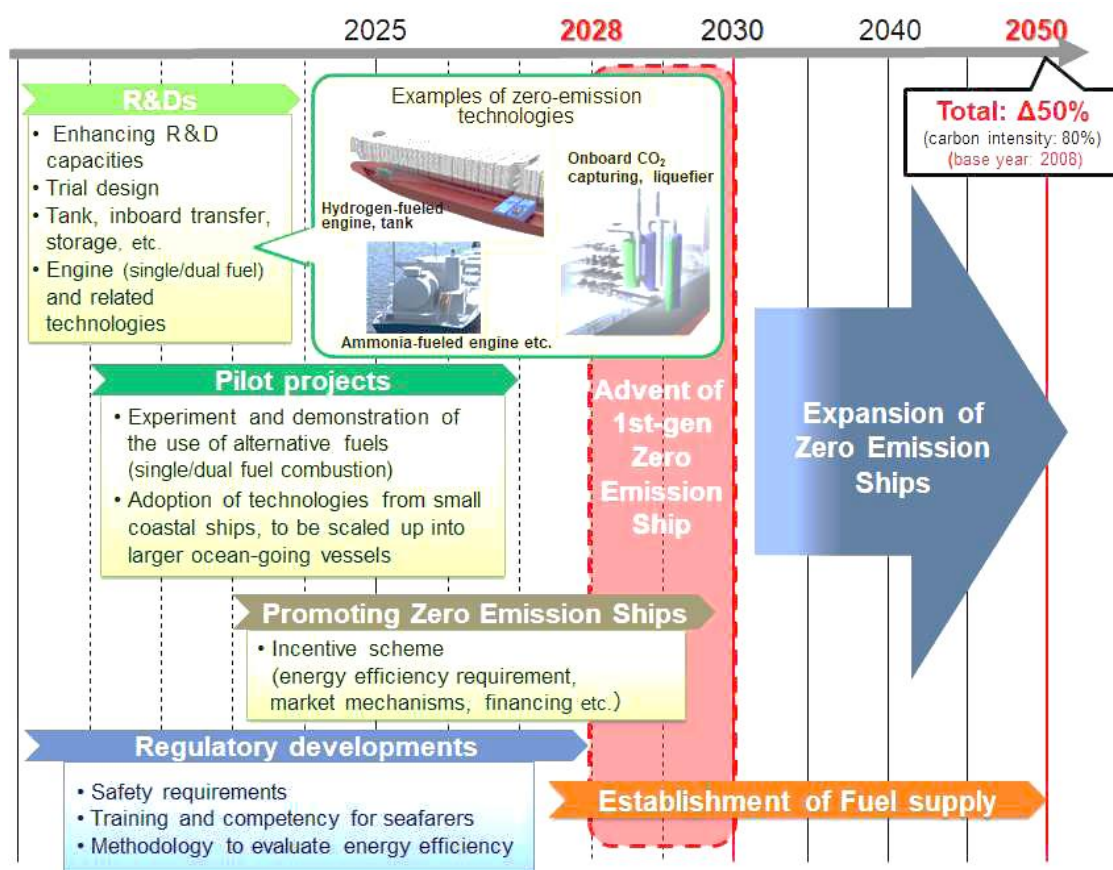


图 2-2-2 日本：国际航运零排放路线图¹

2021年10月26日,日本船东协会(Japanese Shipowner’s Association)正式发布了《日本航运业：2050 温室气体净零排放的挑战》(Japanese Shipping Industry: The Challenge of 2050 Net Zero GHG)², 该报告清晰阐明了日本航运业温室气体减排的努力和立场, 并指出: 航运公司必须从重质燃料油转向零排放燃料, 优先考虑的候选燃料包括可再生甲烷、氢以及氨; 要利用成熟的液化天然气燃料基础设施, 扩大可再生甲烷的使用, 同时扩大氢和氨的使用, 以期 3 种燃料成为未来集中使用的燃

¹ <https://www.mlit.go.jp/common/001354314.pdf>.

² <https://www.jsanet.or.jp/GHG/>.

料。日本船东协会的报告基本体现了现阶段日本航运业对低碳转型的态度和选择，三大船东日本邮船（NYK Line）、商船三井（MOL）和川崎汽船（K Line）目前都是 LNG 燃料的坚定支持者，但也都在积极推动 2050 年之前向可再生甲烷、氢、氨 3 种零碳燃料的过渡，这从其对于氨燃料船舶开发及氨供应链构建的热情中可见一斑。

日本 METI “绿色创新基金”支持了一个项目名为“国产氨发动机船舶产业化示范工程”，参与方包括了 NYK Line、Japan Engine Corporation、IHI Power Systems、Nihon Shipyard、ClassNK 等，其目标是实现氨燃料拖船的开发和运营以及氨燃料氨气运输船的开发和运营，这两条船将分别于 2024 和 2026 年交付投入使用¹。

2.3 行业组织/企业的自愿行动

在此前 IMO 关于 NO_x、SO_x 减排法规的约束下，航运企业已开始大力度投资 LNG 燃料船舶、柴电混合动力船舶等。据 DNV AFI 数据²，全球范围内 LNG 燃料营运船舶 338 艘，订单 518 艘；LPG 燃料营运船舶 28 艘，订单 93 艘；甲醇燃料营运船舶 20 艘，订单 60 艘；氢燃料营运船舶 6 艘，订单 19 艘；电池电力营运船舶 555 艘，订单 194 艘。航运低碳转型大幕已然启动。

具体而言，早在 2018 年，航运头部企业 A.P. Moller-Maersk 就承诺其航运操作到 2050 年之前实现脱碳。2021 年，Maersk 加速了这一

¹ https://www.nyk.com/english/news/2022/20220712_02.html

² <https://afi.dnv.com/statistics>.

进程，将其全价值链净零目标提前到 2040 年，如图 2-3-1 所示。作为支撑该目标的举措，2021 年 7 月，Maersk 在现代尾浦船厂（HMD）订造首艘以碳中性甲醇为燃料的 2,100TEU 支线集装箱船，预计 2023 年年中交付¹。2021 年 8 月，Maersk 进一步在现代重工（HHI）确定了 8 艘 16,000TEU 的超巴拿马型甲醇燃料集装箱船舶订单，并进一步在 2022 年 1 月将该笔订单扩大到了 12 艘，预计交付时间在 2024-2025 年之间。2022 年 10 月，Maersk 宣布与 HHI 签署协议，再次订造 6 艘 17,000TEU 甲醇燃料集装箱船，至此其甲醇燃料船舶订单已达 19 艘²。与此同时，2022 年 3 月，Maersk 与 CIMC ENRIC、European Energy、Green Technology Bank、Orsted、Proman 和 WasteFuel 签署合作意向，将在 2025 年年底起每年供应 73 万吨甲醇；2022 年 8 月，Maersk 与德博能源商定甲醇采购意向，后者将年产 20 万吨绿色甲醇，预计于 2024 年 9 月起投入商业运营；2022 年 11 月，Maersk 宣布与美国 Carbon Sink 达成绿色甲醇合作伙伴关系，后者将在美国南达科他州建设绿色甲醇生产设施，预计年产量 10 万吨，自 2027 年开始进入商业运营³；2022 年 12 月，Maersk 宣布与第 9 家绿色甲醇合作伙伴——美国 SunGas Renewables 签订意向书，第一座工厂预计将于 2026 年开始运营，年产能约为 39 万吨⁴。

¹ <https://www.maersk.com.cn/news/articles/2021/07/01/container-fueled-by-carbon-neutral-methanol>.

² <https://www.maersk.com.cn/news/articles/2022/10/05/maersk-continues-green-transformation>.

³ <https://www.maersk.com.cn/news/articles/2022/11/16/maersk-and-carbon-sink-sign-strategic-partnership>.

⁴ <https://www.maersk.com.cn/news/articles/2022/12/15/maersk-and-sungas-renewables-sign-strategic-green-methanol-partnership>.

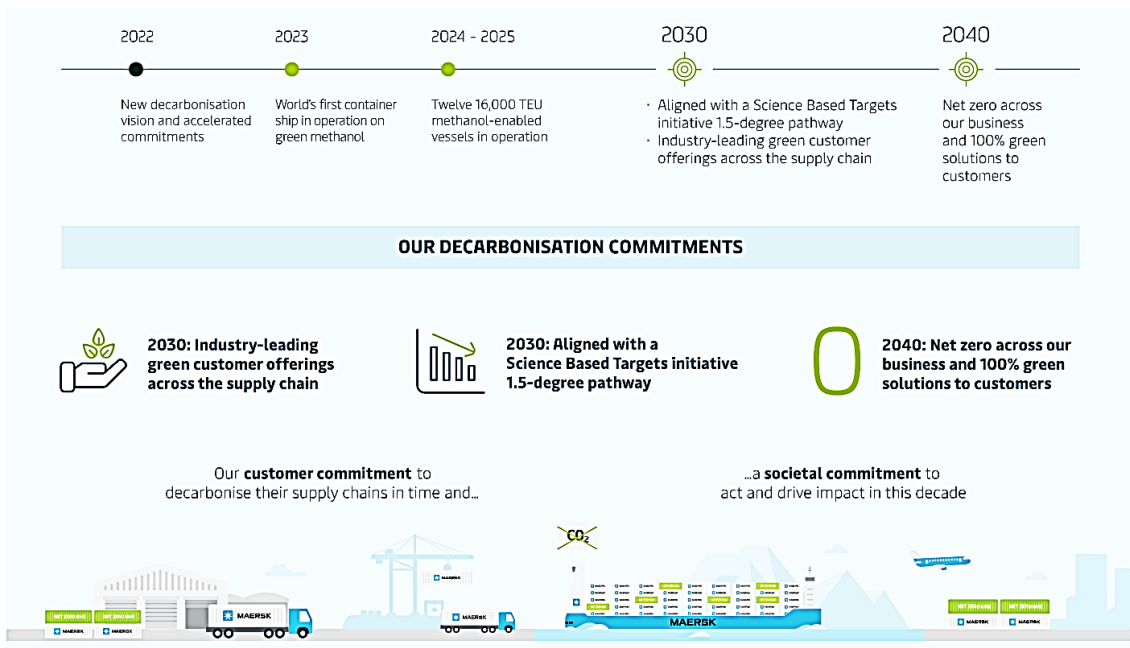


图 2-3-1 Maersk 2040 碳中和路线图¹

CMA CGM 致力于 LNG 动力船舶，目前正在运营的 LNG 动力集装箱船有 29 艘，到 2026 年这一数字还将增至 77 艘²。但同时也紧随 Maersk 之后，2022 年 8 月，CMA CGM 宣布在大连船舶重工订造 6 艘 15,000TEU 超巴拿马型甲醇燃料集装箱船，计划将在 2025 年下半年交付³。2022 年 10 月，中远海运集团通过旗下公司分别与南通中远海运川崎、大连中远海运川崎签订造船协议，共计订造 12 艘 24,000TEU 甲醇双燃料动力集装箱船。2022 年 12 月，招商轮船与招商工业签署了 2+4 艘 9,000CEU（标准车位）甲醇双燃料 PCTC（汽车滚装运输船）

¹ <https://www.maersk.com.cn/sustainability/our-priorities/the-environment/climate-change>.

² <https://www.cma-cgm.com/local/singapore/news/150/cma-cgm-group-and-mpa-collaborate-to-advance-maritime-decarbonisation-digitalisation-innovation-and-workforce-development>.

³ <http://www.simic.net.cn/en/news-show.php?id=260085>.

建造合作意向书。头部集运公司对大型甲醇燃料集装箱船投入了较大的热情,但业界仍对可再生甲醇燃料的可靠供应表示忧虑。除专注 LNG、甲醇作为替代燃料之外,以 NYK Line、MOL 和 K Line 日本三大船东为代表的部分船东对氨燃料船舶投入了极大的热情。

为了寻求将氨作为替代船用燃料,2021 年 6 月,Itochu Corporation 发起了一个由 23 家公司和组织组成的联合研究框架(the Joint Study Framework on Ammonia as an Alternative Marine Fuel),随后,该联合体还进一步扩容至 34 家公司和组织,如图 2-3-2 所示,涵盖价值链上下游。此外,日本企业还是新加坡氨燃料供应链建设的积极参与者。除了 Itochu Corporation 发起的联合体共同开发新加坡氨燃料加注中心,Sumitomo Corporation 和 Keppel Offshore & Marine 也联合了 A.P. Moller-Maersk、Maersk McKinney Moller 零碳航运中心、Fleet Management、Yara International 等机构,研究在新加坡建立一个全面、有竞争力的氨燃料船舶加注供应链体系¹。

¹ <https://www.sumitomocorp.com/en/jp/news/release/2021/group/15340>.



图 2-3-2 船用氨燃料联合研究框架¹

除了日本、新加坡企业在船用氨燃料供应链领域倾注热情，挪威、韩国等的能源、化工、船舶、航运等相关行业企业在氨燃料船舶开发、氨燃料供应链构建方面也颇为积极。2021 年 7 月，挪威散货船船东 Viridis 与 Elkem、Vestkorn、BioMar、Franzefoss Minerals 和 Saltimeport 五家货主单位签署谅解备忘录²，依托其新型氨动力船舶打造北欧零排放航运网络，如图 2-3-3 所示。2021 年 9 月，作为亚洲最大的氨采购商，韩国乐天精密化学（LOTTE Fine Chemical）与世界最大的氨承运商之一——Trammo 签署谅解备忘录³，以建立绿色氨供应链以及建立韩国氨价值链，如图 2-3-4 所示。

¹ <https://www.itochu.co.jp/en/news/news/2021/210729.html>.

² <https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2022/06/2022-06-06-Amon-intro-AEA.pdf>.

³ <https://www.icis.com/explore/resources/news/2021/09/15/10685238/korean-chems-giant-lfc-and-fertz-trader-trammo-ink-green-ammonia-mou/>.



图 2-3-3 北欧氨动力航运网络¹

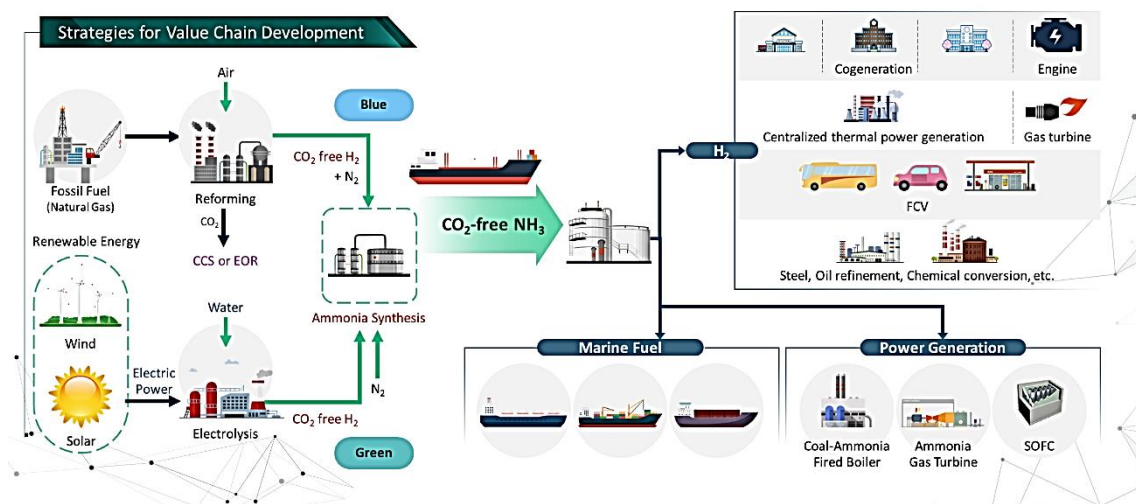


图 2-3-4 乐天精密化学构建韩国氨价值链²

¹ <https://www.ammoniaenergy.org/articles/the-ammonia-wrap-an-ammonia-powered-shipping-network-in-northern-europe-and-more/>.

² <https://www.ammoniaenergy.org/paper/the-promotion-of-green-blue-ammonia-as-a-carbon-neutral-energy-in-korea/>.

此外，港口、货主、银行、保险等海事全产业链和价值链都在积极推进航运脱碳。尤其值得一提的是，类似“波塞冬原则”（The Poseidon Principles）和“海运货物宪章”（Sea Cargo Charter），消费者、货主等联盟组织的行动也倒逼航运业低碳转型。Ship It Zero 是一个由环境和公共卫生倡导者、科学家、航运专家和购物者组成的联盟，敦促世界上一些大型跨国零售商在 2030 年前将其海运转向零排放船舶¹。与该联盟类似的一个组织为零排放船舶货主联盟（coZEV），2021 年 10 月由 Aspen Institute 发起成立，成员包括 IKEA、Amazon、Unilever 等一众颇具影响力的跨国零售商²。

¹ <https://shipitzero.org/>.

² <https://www.cozev.org/>.

3 船舶清洁能源与动力

3.1 概述

低碳航运背景下，在“主机-推进器-船体”组成的能量转化与守恒系统中，常规的减少能源消耗和废气排放的主要措施包括减少船舶阻力、提升推进效率、使用高效主机，但其节能减排潜力相对有限，无法实现航运业的净零排放。

- ✚ 使用风力推进装置、太阳能光伏系统、核动力装置、电池电力系统等清洁能源动力替代基于化石燃料的柴油机推进动力装置，是减少船舶废气排放的主要措施之一；
- ✚ 而对于传统的柴油机推进动力装置而言，使用 LNG、氢、氨、甲醇、生物柴油等低碳、零碳或碳中性替代燃料，也是减少废气排放的重要选项之一；
- ✚ 如果低碳、零碳或碳中性替代燃料成为一种选择，因燃料电池相比内燃机有更高的热效率，以燃料电池动力系统替代柴油机推进动力装置也被寄予厚望；
- ✚ 与此同时，供应链与物流优化、航线/航速优化、降速运行、到港使用岸电、船体/螺旋桨清洁及设备维护等营运措施，对于任何推进动力装置而言，都是不可或缺的节能减排选项。

各种低碳航运措施及其碳减排潜力如图 3-1-1 所示。

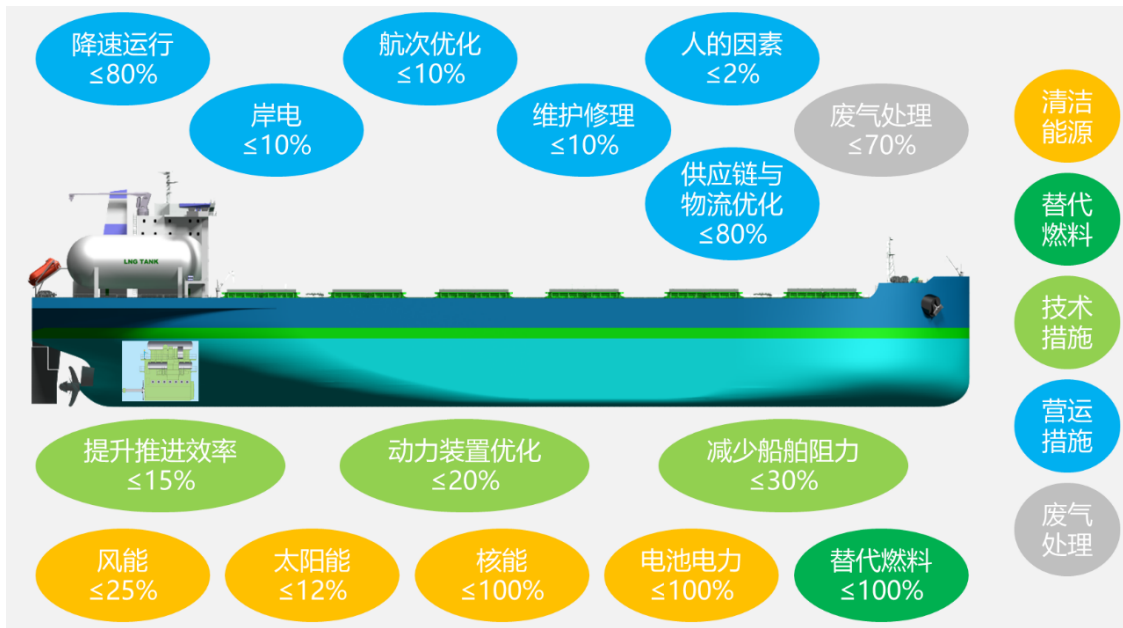


图 3-1-1 低碳航运措施及减排潜力

大量的研究和报告已经表明，基于传统的柴油机推进动力装置的技术改进和操作优化，并不足以实现《IMO 船舶温室气体减排初步战略》设定的减排目标——国际航运 2050 年的温室气体排放总量相比 2008 年减少 50%，遑论到本世纪中叶实现航运碳中和。因此，替代船舶动力或替代船用燃料成为碳中性航运的必由之路。

3.2 替代船舶动力

基于文献综述和行业调研，风力推进装置、太阳能光伏系统、核动力装置、电池电力系统四种清洁能源动力方案是目前技术可行的潜在替代动力方案。碳捕集利用与储存作为一种后处理技术，可视为一种等效的替代船舶动力方案，在此一并讨论。燃料电池动力系统是否能成为低碳或零碳动力方案，本质上还是取决于替代船用燃料的选用，因此本

节暂不做讨论。

1. 风力推进装置

风力推进世界海运船队长达几个世纪，直到两个世纪前被化石燃料发动机所逐渐替代。1980 年代，受石油危机、油价上涨的影响，风力推进有过短暂的复苏，此后受油价暴跌、技术不成熟、营运不经济等因素的影响而一度停滞。进入 21 世纪，在国际公约关于船舶节能减排法规的要求下，风力推进又进入公众视野。当前，主流的风力推进装置包括三种技术方案：风筝帆；硬翼帆；转筒帆。

风筝帆（如图 3-2-1）最成功的应用示范之一是德国 SkySails 公司的天帆系统，首见应用于“Beluga”号¹。实船测试表明，理想航次可节省燃油 50%，年均可节省燃油消耗 10-15%。2019 年 6 月，日本 K Line 与法国船舶自动风帆动力研发商 Airseas 公司签署为期 20 年的协议，为 K Line 的一艘船安装 Seawing 风帆装置并提供服务，意向订购 50 套，预期该装置能实现超过 20%的燃料节省。K Line 第一艘配备 Seawing 天帆系统的船舶将是一艘 210k DWT 的 Capesize 型散货船，安装工作将于 2022 年 12 月进行。

¹ www.skysails.com.

(a) Beluga SkySails¹



(b) Airseas Seawing²



(c) Airseas Seawing-Ville de
Bordeaux³



图 3-2-1 风筝帆应用示范

¹ www.skysails.com.

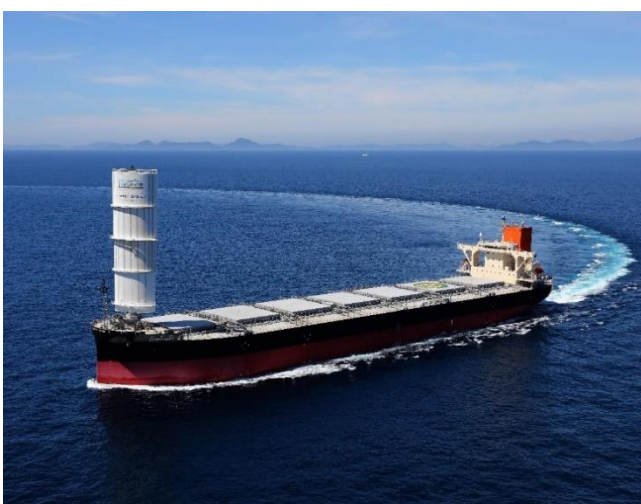
² <https://www.kline.co.jp/en/news/csr/csr7510328279625406497/main/0/link/190607EN%20.pdf>.

³ <https://www.airseas.com/>.

硬翼帆（如图 3-2-2 所示）主要为 1980 年代日本造船厂所使用，在建造了全球首艘安装现代风帆助航系统的“新爱德丸”之后，日本还先后建造了 17 艘配备相同系统的船舶。近年来，低碳航运背景下，日本新一代风帆助航系统研发和应用又开始兴起，其中入选日本 METI “绿色创新基金”的风帆项目主要有两个：MOL 的 Wind Challenger 硬帆项目；K Line 的 Seawing 天帆项目。2022 年 10 月，安装有 Wind Challenger 硬翼帆的散货船“SHOFU MARU”交付并投入营运。



(a) Shin Aitoku Maru¹



(b) SHOFU MARU²

图 3-2-2 硬翼帆在日本的应用

¹ 信德海事. 绿色航运洞察.2022-31周, 2022-08-02。

² <https://www.mol.co.jp/en/pr/2022/img/22110.pdf>.

近年来硬翼帆在我国船舶行业得到显著的技术升级(如图 3-2-3 所示),比较成功的应用示范包括:2018 年由大连船舶重工集团有限公司为招商轮船建造的世界首艘风帆辅助推进 VLCC——“NEW VITALITY (凯力)”轮;以及 2022 年由大连船舶重工集团有限公司为招商轮船建造的全球首艘双翼动力风帆辅助推进 VLCC——“NEW ADEN (新伊敦)”轮。

(a) M/T NEW VITALITY
“凯力”轮¹



(b) M/T NEW ADEN
“新伊敦”轮²



图 3-2-3 硬翼帆在中国的应用

¹ <http://www.dsic.cn/xwzx/jtxw/3408d49f1158432ba37dc6e33270a0ad.htm>.

² https://www.cmhk.com/main/a/2022/k01/a44909_47791.shtml.

英国初创技术公司 BAR Technologies 也是硬翼帆的创新工程方案提供者之一。他们与 Yara Marine Technologies 共同开发的 WindWings 技术已于 2021 年 11 月获得了 DNV 的原理性认可 (AiP)¹，并将与 Cargill、Deltamarin Finland 针对一艘散货船开展首次安装应用²。其他的硬翼帆技术或设计还包括法国 VPLP Design 公司的 AYRO Oceanwings 系统、瑞典 AlfaWall Oceanbird 公司的 Oceanbird 系统等，如图 3-2-4 所示。

(a) 英国 BAR Technologies 的 WindWings³



(b) 法国 VPLP Design 的 AYRO Oceanwings⁴



¹ <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/more-commercial-ships-utilize-wind-technologies-to-cut-emissions.html>.

² <https://www.bartechnologies.uk/insights/cargill-windwings/>.

³ <https://www.bartechnologies.uk/project/windwings/>.

⁴ <https://www.vplp.fr/maritime/canopee/>.

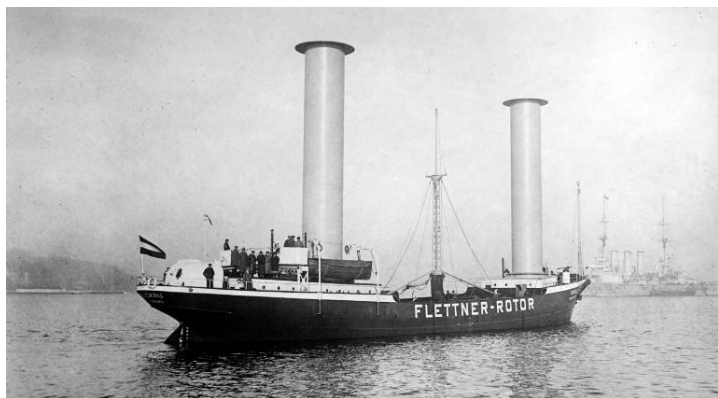
(c) 瑞典 AlfaWall
Oceanbird 的 Oceanbird¹



图 3-2-4 其他的硬翼帆技术与系统

转筒帆（如图 3-2-5 所示）基于马格努斯效应（Magnus effect）产生推动力，于 1920 年代由德国工程师 Anton Flettner 提出²。转筒帆在现代船舶上的首次商业化应用是德国 Enercon 公司 2008 年下水的 E-Ship 1，该轮于 2010 年投入商用，在 Emden-Portugal 的一个航次中宣称节省燃料消耗高达 22.9%。在 2016 年德国汉堡国际海事展（SMM）上，E-Ship 1 轮获得了国际帆船协会（IWSA）风力推进创新奖³。

(a) Flettner Rotor⁴



¹ <https://www.theoceanbird.com/>.

² <https://downloads.hindawi.com/journals/ijrm/2016/3458750.pdf>.

³ https://www.wind-ship.org/en/innovation_awards/.

⁴ <https://anemoimarine.com/rotor-sail-technology/>.



(b) Enercon E-Ship 1¹



(c) MV Fehn Pollux

图 3-2-5 转筒帆的提出与现代应用

除了 Enercon 公司外,芬兰 Norsepower 公司和英国 Anemol Marine Technologies 公司也是转筒帆的解决方案提供者。Norsepower 转筒帆已经应用于多种船型,如图 3-2-6 所示。其中一个装有两个转筒帆的滚装船——M/V Estraden, 一年节省了 5%的燃料消耗; Maersk 的一艘 110k DWT 的 LR2 型成品油轮——Maersk Pelican, 安装了两个 Rotor Sails 转筒帆, 一年节省了 8.2%的燃料消耗。

¹ <https://www.wind-ship.org/wp-content/uploads/2016/07/1287778.jpg>.



(a) M/S Estraden



(b) M/T Maersk Pelican



(c) Viking Grace



(d) Scandlines Copenhagen



(e) SC Connector



(f) Sea Zhoushan

图 3-2-6 Norsepower 转筒帆应用案例¹

英国 Anemol Marine Technologies 公司的转筒帆自 2018 年装船应用，目前也有多艘实船安装案例或订单，如图 3-2-7 所示。Anemol 转筒帆首个实船应用为 64k DWT 散货船 M/V Afros，由上海船舶研究设计院（SDARI）为希腊船东 Victoria Steamship 设计。值得一提的是，SDARI 的设计案例还包括上述 325k DWT 的 Sea Zhoushan 轮。

¹ <https://www.norsepower.cn/>.

(a) M/V Afros¹



(b) Berge Mulhacen 和
Berge Neblina²



(c) Wind Challenger +
Anemoi 转筒帆
散货船效果图



图 3-2-7 Anemoi 转筒帆应用案例

在其“SHOFU MARU”成功的基础上，MOL 于 2022 年 8 月与 Oshima Shipbuilding 签署了建造第二艘安装有 Wind Challenger 硬翼帆的散货船建造合同，新项目还计划同时安装 3 只 Anemoi 转筒帆，如图

¹ <https://anemoimarine.com/afros-rotor-sail-bulk-carrier/>.

² <https://anemoimarine.com/valemax-berge-neblina>. Berge Bulk 公司 210k DWT Newcastlemax 散货船 Berge Mulhacen 和 388k DWT Valemax 矿砂船 Berge Neblina.

3-2-7(c)所示，并因此成为全球首艘安装两型风帆助航系统的船舶，有望实现年均 20%的温室气体减排¹。

风力推进装置适用的船型、航线和气象海况有一定的限制，而且对于大型商船而言，其能提供的推进功率相对有限——一般认为小于 25% 标定功率。若以年为统计周期，现有示范应用项目的节油效益均小于 15%。因此，风帆系统主要还是作为特定船舶（主要为散货船、油轮）、特定航线的一种辅助推进装置（WAPS），对于提升营运能效表现有其独特价值。

II. 太阳能光伏系统

太阳能光伏系统是当前陆地上最有前景的可再生能源利用装置，其在海上应用的典型示范项目包括 MV Auriga Leader、MV Paolo Topic、MS Tûranor PlanetSolar 等，如图 3-2-8 所示。作为国家高技术船舶科研项目的应用示范，“中远腾飞”轮安装了总容量为 143kW 的太阳能光伏系统，日照充足的情况下每天可节省燃油 0.46 吨。然而，地球表面的太阳辐射强度约为 2-6kWh/m²/day，光伏组件的能量转换效率通常低于 20%，因此，光伏发电功率仅约为 100-300W/m²。与此同时，受地理纬度、季节、昼夜以及船舶表面有限的可用表面积影响，太阳能光伏系统的节能潜力据测算小于 12%。然而，对于汽车运输船、滚装船、散货船而言，太阳能光伏系统发电用于照明、通信、蓄电池充电等场合，仍不失为提升船舶营运能效的有效措施。

¹ <https://www.mol.co.jp/en/pr/2022/22092.html>.



(a) MV Auriga Leader



(b) MV Paolo Topic



(c) MS Tûranor PlanetSolar



(d) “中远腾飞”轮

图 3-2-8 太阳能光伏助航船舶典型示范项目

III. 核动力装置

人类历史上一共建造过四艘核动力商船：美国 1959 年下水的 NS Savannah；德国 1964 年下水的 NS Otto Hahn；日本 1969 年下水的 NS Mutsu；苏联 1986 年下水的 NS Sevmorput。NS Sevmorput 现为俄罗斯所有，是目前唯一在役运行的。虽然具有无需频繁补充燃料、更多的载货空间、更高的功率和航速、没有废气排放等优势，但高昂的建造和营运费用、安全与保安考量、公众接受度、特殊的人员技能要求、港口基础设施等显著的障碍，也使得核动力装置进入商船队还有很长的一段路要走。然而，在局部地区或细分船型上，核动力装置也许适用于一些创新性的应用场景，如图 3-2-9 所示。

(a) Ulstein Thor & SIF¹



(b) Seaborg MSR 动力
FSRU²



¹ <https://ulstein.com/news/ulstein-thor-zero-emission-concept>.

² <https://www.seaborg.com/press-release-samsung>.

(c) Core Power MSR 动力
大型散货船¹



图 3-2-9 基于 MSR 技术的核动力船舶概念设计

2022 年 4 月，挪威乌斯坦（Ulstein）集团推出了两款新一代零排放船舶设计——Thor 号和 SIF 号²。其中，SIF 号为全电力推进的探险邮轮；而 Thor 号为海上补给、科考、救助船（Replenishment-Research-Rescue, 3R 概念），采用钍基熔盐堆核能系统（Thorium Molten Salt Reactor, MSR）作为其动力来源，被形象的称之为核动力海上“充电宝”。2022 年 4 月，三星重工（SHI）与 Seaborg 签署协议，基于 Seaborg 的紧凑型熔盐堆技术（Compact Molten Salt Reactor, CMSR）开发浮式核反应堆用于氢、氨生产，800MW 的 CMSR 装置运行寿命达到 24 年³。类似的概念设计还包括英国 Core Power 以及美国 Lucid Catalyst 等，通过布置在战略性燃料加注节点的浮式核反应堆生产电制燃料，并服务低碳海上运输。

IV. 电池电力系统

近年来，随着陆地汽车工业电动化的快速发展，混合动力以及纯电

¹ <https://corepower.energy/report/red-white-blue>.

² <https://ulstein.com/news/ulstein-thor-zero-emission-concept>.

³ <https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-production-from-offshore-nuclear-power/>.

动船舶的应用示范也在稳步推进中。根据 DNV AFI 平台数据,截止 2022 年底,全球电动船舶共 555 艘,以滚装/客运船舶为主,其中混合动力占比 52%,插电混动占比 20%,纯电动占比 22%,且超过 1/3 在挪威,另有 1/4 在欧洲¹。纯电动船舶受限于电池(或超级电容)的功率容量,仅适用于内河及近海小型船舶;当功率需求增大时,使用柴油机、燃料电池、风力辅助系统、太阳能光伏系统等与储能电池组成混合动力系统成为必然选择。在已投入使用或在建的电动船舶中,固定航线和相对较短航程的滚装渡轮占比最多,其次是近海补给船²。

高昂的初始投资、匮乏的基础设施、潜在的火灾风险均是电动船舶发展的关键障碍,质量/体积能量密度低尤其是电池电力系统在深远海和大型船舶应用的主要制约。面向 2050 年,电动化虽然是陆路交通运输工具的主流选择之一,但据 DNV《Energy Transition Outlook 2022》报告,电池电力在海运和航空运输领域各自总的能源消耗中仅占比约 2%,如图 3-2-10 所示,在深远海航运中发展潜力有限。

¹ <https://afi.dnv.com/statistics/>.

² 冯淑慧,彭传圣.低零排放船用燃料的发展概况及对我国的启示.2022年9月.

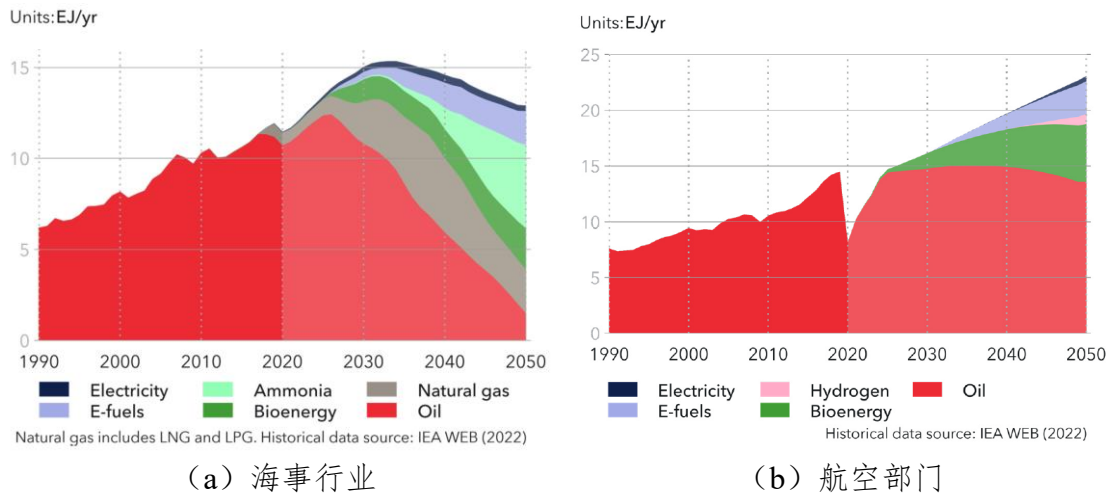


图 3-2-10 海事与航空部门的能源需求¹

在中国，超过 50 艘电动船舶已投入使用或正在建造。2022 年 3 月，全球载电量最大的纯电动旅游客船“长江三峡 1”号（如图 3-2-11）在宜昌首航，该轮设计总长 100 米，总宽 16.3 米，可容纳 1,300 客位，配备 7.5MWh 动力电池，一次充电可续航 100 公里，每年可替代燃油 530 吨。



图 3-2-11 “长江三峡 1”号

¹ <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download.html>.

V. 碳捕集与储存

碳捕集是减少二氧化碳排放的技术选项之一，通常包含 3 类方法：燃烧后处理，将排气中的二氧化碳分离出来；燃烧前处理，将燃料中的碳重整为二氧化碳和氢，预先分离二氧化碳，纯氢参与燃烧；富氧燃烧，空气中的氧气预先分离出来参与燃烧，燃烧排放为纯二氧化碳便于捕集和处理。

海事行业目前也已经有多个关于船用碳捕集利用与储存（CCUS）的研发和验证项目（如图 3-2-12），例如：欧盟 Horizon 2020 研发创新计划资助的 HyMethShip 项目¹；日本 K Line、MHI、ClassNK 等联合开展的 CC-OCEAN（Carbon Capture on the Ocean）项目²；DNV 与 Deltamarin、Minerva Marine 和 Total 联合开展的零排放油轮项目³，以及随后 Deltamarin 与 Wärtsilä 联合开展的在 Ro-pax 渡轮上应用该 CCUS 系统的项目⁴；全球海事脱碳中心（GCMD）、油气行业气候倡议组织（OGCI）、Stena Bulk、Alfa Laval 以及其他来自能源与航运业的企业/组织共 7 家成员单位联合发起的 ReMarCCABLE 项目⁵；荷兰 VALUE MARITIME 公司的“CO₂ 电池”实船验证项目⁶；等。二氧化碳在船捕集、液化、储存，并最终输送到岸上供永久储存或进一步使用，其技术可行性是得到充分验证的，对于提升船舶能效也具有一定的前景，但捕

¹ <https://www.lr.org/en/insights/strategic-research/eu-hymethship/>.

² <https://www.kline.com/>.

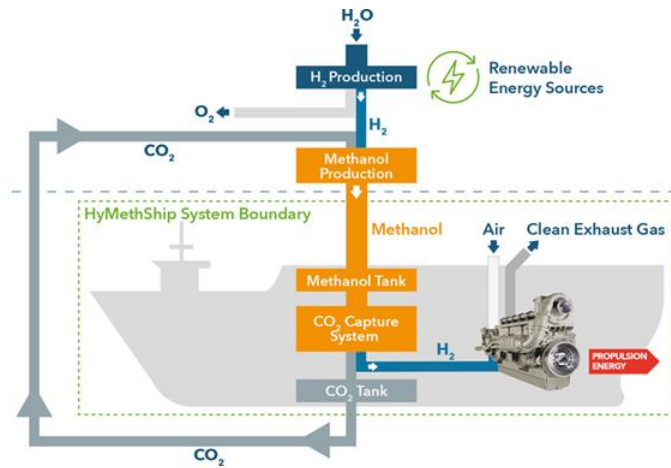
³ <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Which-tanker-fuels-are-best-for-profits-and-the-environment.html>.

⁴ <https://deltamarin.com/blog/carbon-capture-case-study-for-a-ropax-ship/>.

⁵ <https://www.alfalaval.com/media/news/2022/alfa-laval-to-be-a-technology-partner-for-the-world-s-first-project-to-demonstrate-end-to-end-shipboard-carbon-capture-at-scale/>.

⁶ <https://valuemaritime.com/news/value-maritime-announces-co2-capture-unit-2/>.

集率、经济性、系统运维等方面的考量使得 CCUS 技术似乎无法成为航运脱碳的终极解决方案。



(a) 欧盟 HyMethShip 项目
©LEC GmbH¹



(b) 日本 CC-OCEAN 项目²



(c) DNV, Deltamarin, Minerva Marine 和 Total 联合项目³

¹ <https://www.lr.org/en/insights/strategic-research/eu-hymethship/>.

² <https://www.mhi.com/news/21080501.html>.

³ <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Which-tanker-fuels-are-best-for-profits-and-the-environment.html>.

(d) Deltamarin 与 Wärtsilä 联合项目¹



(e) ReMarCCABLE 项目²



图 3-2-12 船用 CCUS 研发和验证项目

3.3 替代船用燃料

基于前述探讨，在可预见的未来，还没有一种清洁动力方案能完全替代柴油机推进动力装置的中心地位。基于某一船型、某一航线甚至某一具体船舶配置个性化的推进动力方案，就成为一种顺理成章的理性选择。然而多样化的、去中心化的船舶推进动力方案，对于总量 10 万艘左右的世界海运船队而言，显著不具有规模效应；此外，随之而来的多样化的基础设施配套、更宽泛的船员技能要求、更分散的资金投入强

¹ <https://deltamarin.com/blog/carbon-capture-case-study-for-a-ropax-ship/>.

² <https://www.alfalaval.com/media/news/2022/alfa-laval-to-be-a-technology-partner-for-the-world-s-first-project-to-demonstrate-end-to-end-shipboard-carbon-capture-at-scale/>.

度，预期都将显著削弱航运业的去碳化进程和绿色低碳技术的更新迭代速度。因此，未来航运业依然强烈呼唤一种中心化的船舶推进动力方案——“内燃机+替代船用燃料”。

诚然，正如前文所述，燃料电池拥有比内燃机更高的热效率，尤其是当它与 Rankine 循环、Brayton 循环或冷-热-电联产系统组成混合动力系统时。但燃料电池的功率容量、经济性、可靠性、耐久性还面临诸多挑战，对于深远海大型商船而言，燃料电池替代内燃机的前景尚不明朗。因此，本报告中关于替代船用燃料的讨论，主要针对内燃机而言。

传统的船用燃料主要包括 HFO、MDO 和 MGO 等化石燃料，在航运绿色低碳发展背景下，化石基 LSHFO、LNG、LPG 和甲醇也被认为是低碳燃料。仅考虑燃烧端排放，减碳潜力排在前两位的是 LNG 和甲醇，相比燃油理论上分别能实现 25%和 10%的碳减排；但若考虑甲烷逃逸和上游排放，减碳潜力将显著降低。因此，面向碳中和航运，同时考虑全生命周期排放，零碳或碳中和合成燃料和生物燃料是必然趋势，进入公众视野的包括可再生氢、氨、甲醇、生物质燃料（例如，乙醇、生物甲烷、生物柴油）等。各种燃料典型物理化学和排放特性如表 3-1 所示。甲醇、天然气、氢、氨在空气中的自燃温度渐次升高且远高于柴油/燃料油。因此，对于大型内燃机而言，先导点火燃料（柴油/生物柴油）不可或缺。

对于燃料电池而言，目前进入公众视野的 AFC、(HT)PEMFC、PAFC、DMFC、MCFC、SOFC 本质上均为氢燃料电池，直接参与电化学反应

的是氢，如表 3-2 所示。当使用甲醇、天然气、氨等氢基燃料时，外置或内置的重整装置不可或缺。

表 3-1 船用燃料的典型物理化学特性及排放性能

燃料	密度 @15°C kg/m ³	十六烷 值	沸点 °C	自燃温 度 °C	可燃极 限 vol%	燃烧排放			
						CO ₂	SO _x	NO _x	PM
轻柴油	796-841	>35	>180	210	0.6-7.5	高	低	高	低
天然气	0.78	130 *	-162	540	5.0-15.0	中	低	中	低
甲醇	792	<5	65	464	6.7-36.0	中	低	中	低
乙醇	789	5-15	78	365	3.3-19.0	中	低	中	低
氢气	0.09	>130 *	-253	585	4.0-75.0	低	低	高	低
氨气	0.73	120 *	-33	651	15.0- 28.0	低	低	高	低
生物柴 油	860-900	45-55	>180	261	0.6-7.5	高	低	高	低

注：*-辛烷值。

表 3-2 典型燃料电池电化学反应及其电极和电解质的常用材料

类型	典型的电极材料		电解质	典型燃料	电化学反应	
	阳极	阴极			阳极	阴极
AFC	镍	银	氢氧化钾	H ₂	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$
PEMFC	铂	铂	水基聚合物膜	H ₂	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O}$
HT-PEMFC	铂	铂	无机酸基聚合物膜	H ₂	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O}$
PAFC	铂-碳	铂-碳	磷酸	H ₂ , LNG和甲醇	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
DMFC	铂-钌	铂-钌	水基聚合物膜	甲醇	$2\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12\text{H}^+ + 2\text{CO}_2 + 12\text{e}^-$	$3\text{O}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow 6\text{H}_2\text{O}$
MCFC	镍合金	氧化镍-锂	熔融碳酸盐	H ₂ , 甲醇 碳氢化合物	$2\text{H}_2 + 2\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$
SOFC	镍合金	锰酸锶镧	多孔陶瓷材料	H ₂ , 甲醇 碳氢化合物	$2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$

本报告力求探寻一种中心化的船舶推进动力方案，因此，在种类繁多的替代船用燃料中选择并推荐一种最具潜力的燃料，并推动海事产业链上下游更广泛的利益相关方达成普遍共识、采取一致行动，正是本报告的价值追求。生物质燃料因为存在土地、淡水资源的争夺以及供应可靠性的挑战，在本报告中不作为主流选择，但并不排除其在局部、细分市场的应用潜力。本报告完全认可氢、氨、甲醇燃料内燃机的技术可行性，这里仅针对其供应链展开讨论。

1. 氢

氢是地球上最简单、最丰富的元素，且在所有燃料中具有最高的质量能量密度。但氢通常是以化合物的形式存在，也就意味着氢的提取将要消耗能量。氢的生产原料包括天然气、煤、生物质和水，且具有多种不同的工艺流程，如图 3-3-1 所示。

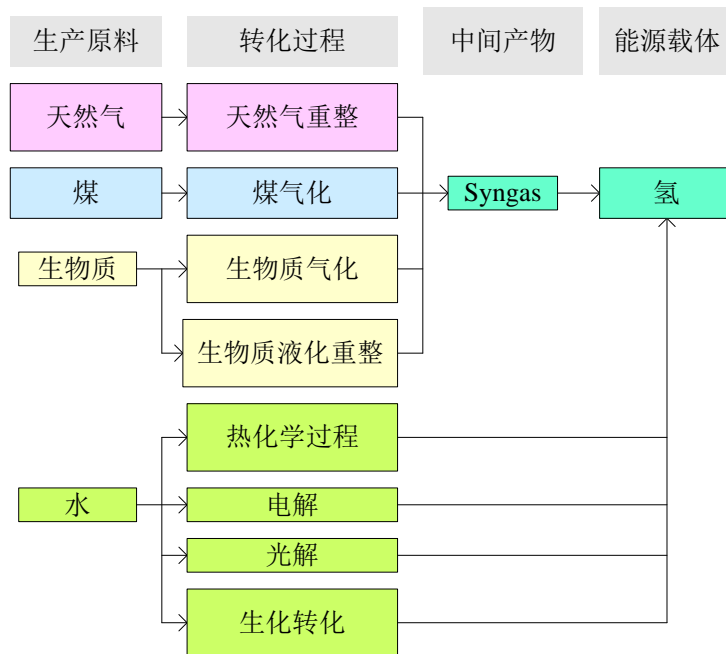
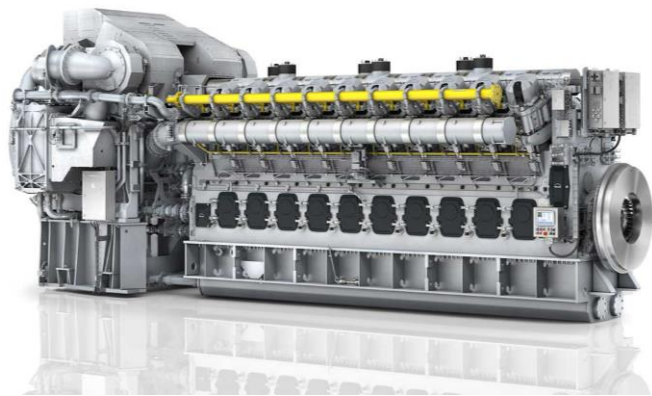


图 3-3-1 氢的原料与生产过程

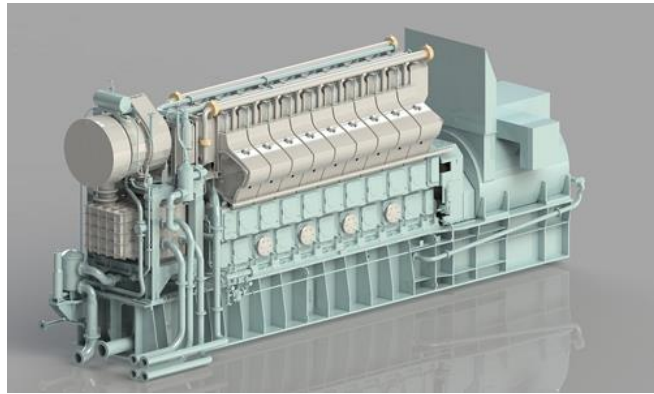
氢的运输、储存和配送显著受到其体积能量密度的影响。对于20MPa、70MPa的压缩氢气和常压低温下(-253°C)的液化氢而言,体积能量密度为轻质柴油的5.0%、12.3%和23.2%。也就是说,对于同样的能量释放,其体积需求是轻质柴油的20.1、8.1和4.3倍,考虑加压或制冷条件下燃料围护系统更大和更规整的空间需求(传统的燃料舱可使用不规整的双层底舱、边舱、深舱等),船舶的有效载货容积将在一定程度上被削减。

就终端使用而言,氢内燃机(如图3-3-2所示)的有害排放仅有NO_x,但其功率容量、燃烧、运转平顺性方面在技术上仍然存在较大的挑战,相比较而言,氢燃料电池似乎更具竞争力。总而言之,氢燃料在储运和终端使用方面的缺陷,限制了其在远洋商船上的直接应用,而以氢作为能量载体的可再生氨和甲醇被寄予厚望。



(a) MAN 35/44G & 51/60G
氢预留气体发动机¹

¹ <https://www.man-es.com/discover/buildung-a-hydrogen-engine>.



(b) Kawasaki 绿色气体发动机¹



(c) BeHydro 双燃料氢发动机²

图 3-3-2 潜在的船用氢发动机

II. 氨

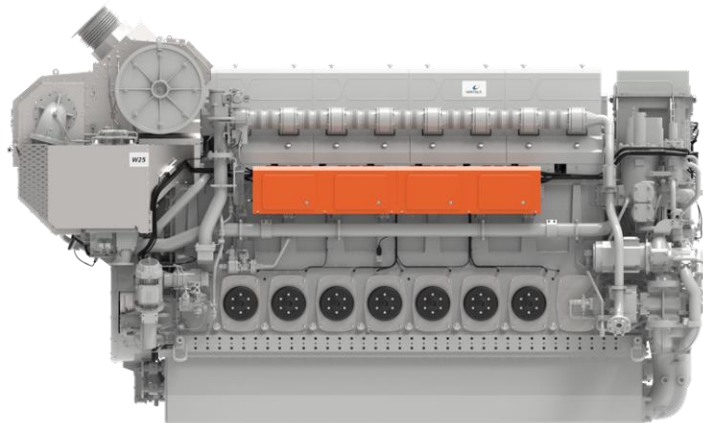
氨是全球范围内具有最大产量的合成化学品，但目前主要用作化肥生产。氨的生产原料是氢气和氮气，通常基于 Haber-Bosch 过程，在铁基催化剂、300-500 °C 的高温和 20-35MPa 的高压条件下反应而成；其他的氨合成工艺包括电化学过程和光催化过程。氢气的生产如前所述，而氮气通常采用变压吸附(PSA)或膜过滤技术从空气中分离得来。虽然氨本身是无碳燃料，但绿氨的获得还是取决于所使用的生产原料和生产过程中可再生能源的使用。

¹ https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20220316_5173.

² <https://www.lr.org/en/latest-news/behydro-dual-fuel-hydrogen-engine-awarded-approval-in-principle/>.

大规模的氨储存通常在常压和-33°C条件下液化储存；而少量的氨则采用与 LPG 类似的储运方式——常温加压至 8bar 存放于不锈钢压力容器。液氨具有较高的爆炸风险和毒性，储运安全考量尤其重要。就终端使用而言，较高的自燃温度、较低的火焰传播速度、较窄的可燃极限、较高的 NO_x 排放都是氨燃料发动机开发中所面临的挑战。

氨燃料发动机、氨动力船舶目前均还未见商用，但全球三大船用发动机生产商均在积极推进氨燃料发动机的研发，如图 3-3-3 所示。2022 年 9 月，Wärtsilä 四冲程中速多燃料发动机 W25 型发动机成功发布，可燃用柴油和 LNG；预期到 2023 年，通过可商用的技术升级，W25 型发动机可燃用气态或液态替代燃料，例如氨。二冲程低速发动机生产商 MAN、WinGD 均计划在 2024-2025 年推出自己的氨燃料发动机¹²。



(a) Wärtsilä 25 型发动机³

¹ <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>.

² <https://www.wingd.com/en/news-media/press-releases/wingd-sets-development-timeframe-for-methanol-and-ammonia-engines/>.

³ <https://wartsila.prod.sitefinity.fi/media/news/07-09-2022-launch-of-wartsila-25-engine-paves-the-way-towards-maritime-decarbonisation-3152432>.



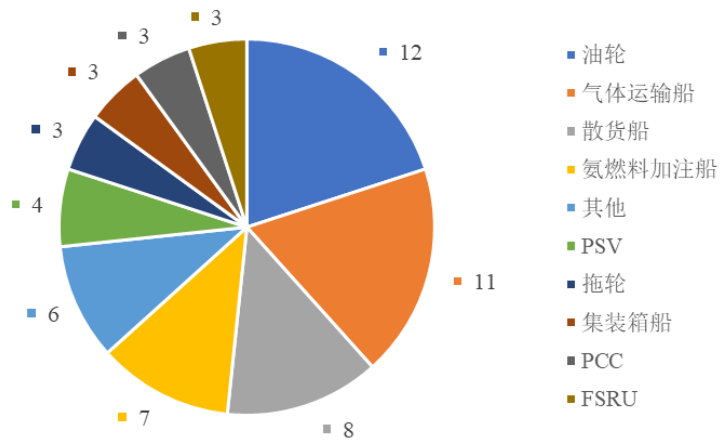
(b) MAN 二冲程氨发动机

1

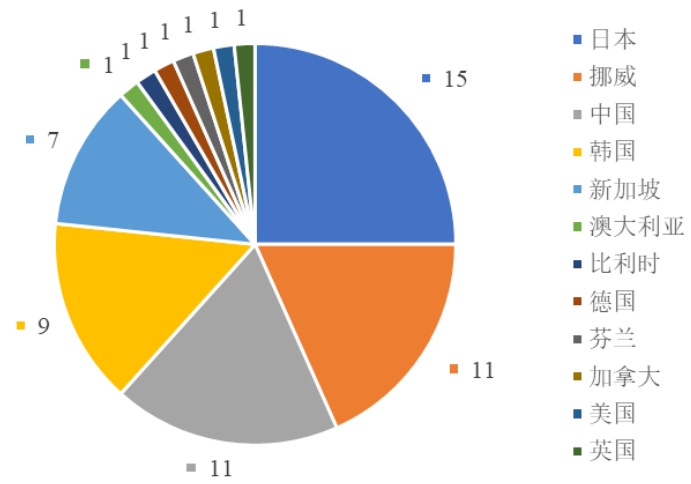
图 3-3-3 潜在的船用氨发动机

而在氨动力船舶的开发方面，目前多家船舶设计公司、造船厂、航运企业的氨动力或氨预留船舶设计已经获得船级社的 AiP 证书，也有多家船东公司宣布了开展氨动力船舶的开发，包括 VLCC、拖轮、驳船、平台供应船（PSV）等。据不完全统计，近 3 年来，全球氨燃料船舶开发项目超过 60 个，其中已获得船级社 AiP 证书的船型设计已超过 42 项。基于所统计的氨燃料船舶开发项目，如图 3-3-4 所示，就船舶类型而言，排在前几位的是油轮、气体运输船、散货船和氨燃料加注船；就项目分布的国家而言，排在前几位的分别是日本、挪威、中国、韩国和新加坡；就授予 AiP 证书数量而言，排在前几位的船级社分别是 LR、ClassNK、DNV 和 ABS。

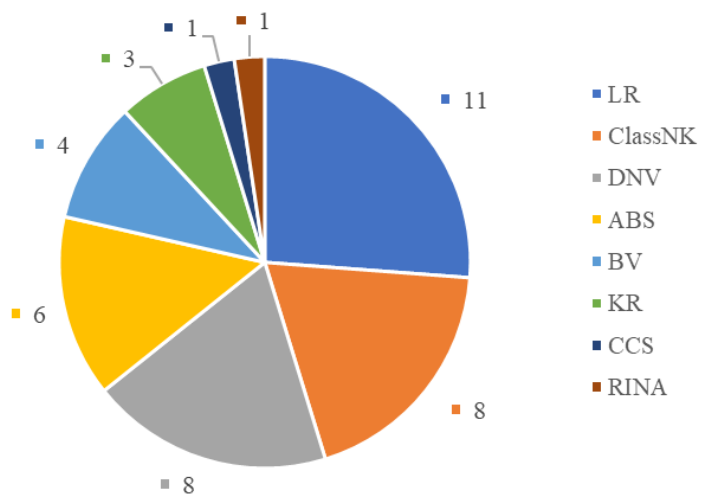
¹ <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>.



(a) 主要船舶类型



(b) 项目主导国家



(c) 船级社 AiP 证书

图 3-3-4 氨燃料船舶开发设计项目统计

目前，全球范围内日本、挪威、中国、新加坡等主导开发的氨燃料动力船舶典型设计案例如图 3-3-5 至图 3-3-9 所示。

(a) Sumitomo & Oshima 氨燃料散货船¹



(b) LPG/氨双燃料 VLGC²



(c) MOL&MHI 氨/LCO₂ 兼装船概念设计³



¹ <https://www.sumitomocorp.com/en/jp/news/release/2021/group/15330>.

² <https://www.mhi.com/news/22060902.html>.

³ <https://www.mol.co.jp/en/pr/2022/22045.html>.

(d) MHI&MOL
氨燃料 FSRU¹



(e) NYK 氨动力 FSRU²³



(f) NYK 氨燃料动力氨运输船⁴



¹ <https://www.mhi.com/news/22020302.html>.

² https://www.nyk.com/english/news/2022/20220822_02.html.

³ https://www.classnk.or.jp/hp/zh-tw/hp_news.aspx?id=8442&type=press_release&layout=1.

⁴ https://www.nyk.com/english/news/2022/20220907_02.html.



(g) NYK 氨燃料拖轮¹



(h) NYK 氨燃料加注船²



(i) K Line 氨燃料散货船³



(j) K Line 和 Shin Kurushima Dockyard 氨燃料汽车运输船⁴

¹ https://www.nyk.com/english/news/2022/20220712_02.html.

² https://www.nyk.com/english/news/2022/20220928_01.html.

³ <https://www.kline.com/>.

⁴ https://www.classnk.or.jp/hp/zh-tw/hp_news.aspx?id=7022&type=press_release&layout=1.

(k) GSC 氨燃料巴拿马型散货船¹

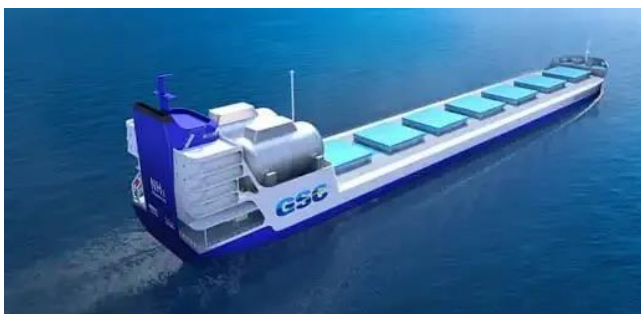
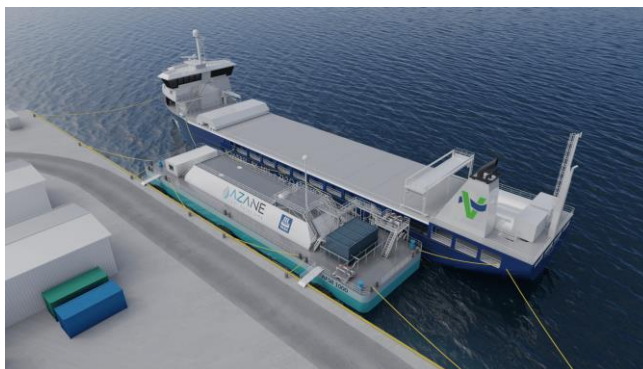


图 3-3-5 日本主导开发的氨燃料动力船舶

(a) Amon Maritime
氨动力 PSV²



(b) Azane 氨燃料加注驳船³



(c) 氨燃料 Aframax 油轮⁴



¹ <https://new.qq.com/rain/a/20220125A088B200>.

² <https://www.amonmaritime.com/offshore/launch-of-amon-offshore-carbon-free-supply-ships-approved-by-class-and-flag/>.

³ <https://www.econnectenergy.com/articles/azane-receives-dnv-approval-for-ammonia-bunkering-terminals>.

⁴ <https://www.breeze.no/pilot-for-an-ammonia-powered-oil-tanker>.

(d) Griegedge 氨动力
油轮¹



(e) 燃料电池动力
多功能海工船²



(f) ZeroCoaster 燃料电池动力
货轮³



(g) 燃料电池动力
Viking Lady 氨燃料改装⁴



(h) Høegh's Aurora 级
氨燃料汽车运输船⁵



图 3-3-6 挪威主导开发的氨燃料动力船舶

¹ <https://griegedge.com/a-major-milestone-in-the-transition-to-sustainable-shipping/>.

² <https://www.vard.com/articles/vard-secures-contract-for-a-series-of-six-multi-purpose-offshore-vessels-for-ocean-infinity>.

³ <https://www.ammoniaenergy.org/articles/zerocoaster-ammonia-fueled-cargo-shipping/>.

⁴ <https://www.ammoniaenergy.org/articles/fortescue-lmg-marin-and-eidesvik-to-launch-ammonia-powered-ships/>.

⁵ <https://presse.enova.no/images/faerder-tankers-pctc-2542771>.

(a) DSIC 氨/LNG 双燃料
VLCC¹



(b) DSIC 氨动力 210k DWT
散货船-A 型燃料舱²



(c) DSIC 氨动力 210k DWT
散货船-C 型燃料舱³



(d) NACKS 氨燃料
16,000TEU 集装箱船⁴



(e) SDARI 甲醇/氨燃料
油轮⁵



¹ <https://new.qq.com/rain/a/20220928A04B9O00>.

² <http://www.cssc.net.cn/n135/n171/n181/c22108/content.html>.

³ <http://www.cssc.net.cn/n135/n171/n181/c22108/content.html>.

⁴ <https://3g.163.com/dy/article/HKCC1K370514C1PI.html>.

⁵ <https://www.rina.org/en/media/press/2021/02/12/sdari-ship-design>.

(f) SDARI 氨燃料动力
7,000CEU PCTC



(g) NTS 氨预留 Suezmax 油轮¹



图 3-3-7 中国主导开发的氨燃料动力船舶

(a) MISC AET Aframax 氨动力油轮²



(b) Sembcorp 氨燃料加注船³



¹ <https://www.marineinsight.com/shipping-news/worlds-first-ammonia-ready-vessel-kriti-future-delivered/>.

² <https://www.aet-tankers.com/media-centre/ptt-and-aet-ink-mou-for-zero-emission-afamaxes/>.

³ <https://www.sembmarine.com/2022/01/11/taking-another-step-towards-a-decarbonised-future-sembcorp-marine-and-partners-attained-aip-from-abs-to-design-an-ammonia-bunkering-vessel>.

(c) PaxOcean 氨燃料
加注船¹



(d) Keppel 氨燃料加注船²



图 3-3-8 新加坡主导开发的氨燃料动力船舶

(a) 韩国 HHI
氨燃料 VLGC³



(b) 英国 Navigator Gas
氨燃料气体运输船⁴



¹ <https://www.honglam.com.sg/news/paxocean-hong-lam-marine-and-bureau-veritas-sign-mou-to-develop-ammonia-bunker-vessel-design/>.

² <https://www.ammoniaenergy.org/articles/first-approval-in-principle-for-project-sabre-in-singapore/>.

³ <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/hhi-ksoe-receive-approval-principle-ammonia-carrier-ammonia-fuel-propulsion>.

⁴ <https://navigatorgas.com/navigator-gas-awarded-approval-in-principle-for-ammonia-fuelled-gas-carrier-by-classification-society-dnv/>.

(c) 美国 Southern Devall 氨动力油驳¹



(d) 澳大利亚 MMA Leveque 轮²



图 3-3-9 其他国家主导开发的氨燃料动力船舶

¹ <https://amogy.co/amogy-and-southern-devall-announce-partnership-and-first-commercial-maritime-deployment-in-tank-barge-industry/>.

² <https://www.ammoniaenergy.org/articles/fortescue-lmg-marin-and-eidesvik-to-launch-ammonia-powered-ships/>.

III. 甲醇

甲醇是一种关键基础化学品，主要用于生产甲醛、乙酸和塑料等其他化学品；同时，甲醇也是一种用于车辆、船舶、工业锅炉的低闪点液体酒精燃料。与传统燃料相比，可再生甲醇可减少高达 95% 的 CO₂ 排放和 80% 的 NO_x 排放，且完全没有 SO_x 和 PM 排放。甲醇有一定的毒性但低于氨，且由于较强的挥发性和生物可降解性，其对人类健康、海洋和大气环境的威胁要低于燃油和氨。

传统上甲醇的生产过程包括 3 步：合成气（Syngas, =CO+H₂）生产；甲醇的合成；甲醇的处理。甲醇的生产原料主要是天然气和煤，但生物质、森林残渣、市政固体废弃物、捕集的 CO₂ 等都可以作为甲醇的生产原料，其主要的生产路径如图 3-3-10 所示。

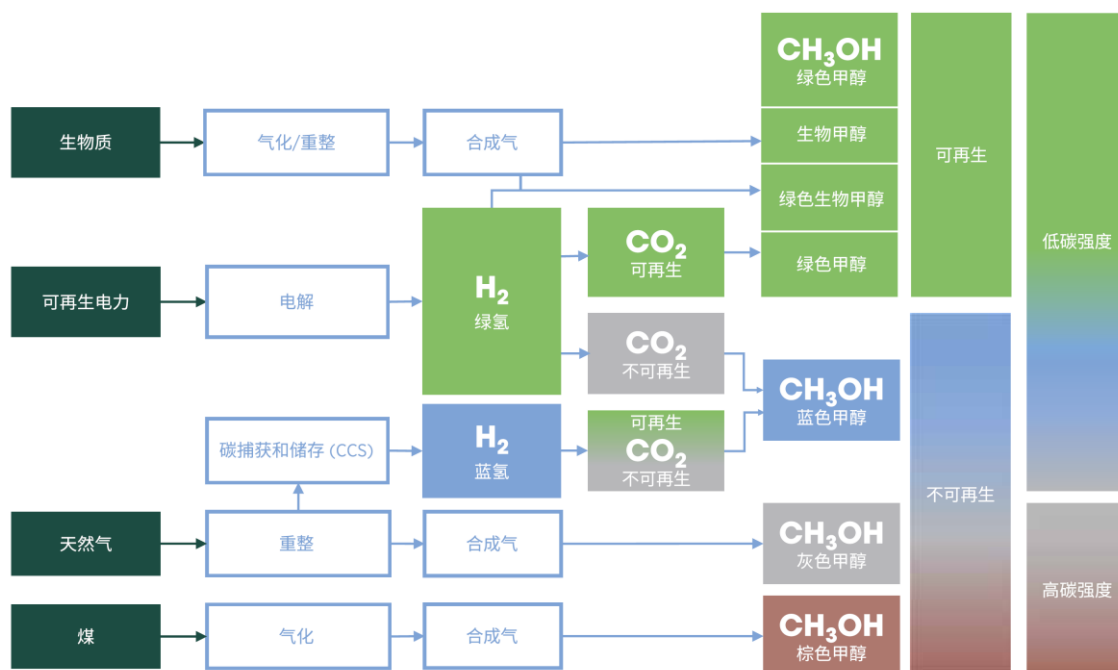


图 3-3-10 甲醇的主要生产路径¹

¹ <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol-ZH>.

相较于其他气体燃料，甲醇易于运输、储存和配送，对现有船用燃料储运设施稍作改造即可建立完整供应链。对于终端使用而言，甲醇适用于内燃机和燃料电池。当前，直接甲醇燃料电池（DMFC）的效率还比较低，还有待进一步研发和提升；而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。

目前，传统的船用发动机生产商 MAN、WinGD、Wärtsilä、Rolls-Royce MTU、Caterpillar 等均开展了甲醇发动机的研发或生产，如图 3-3-11 至图 3-3-13 所示；国内淄柴动力、中船动力等甲醇发动机也在研发中。2021 年，Rolls-Royce 动力系统业务部门宣布拟于 2023 年开始推出新一代四冲程、高速、使用甲醇的 MTU 2000 系列和 4000 系列发动机，并计划尽快用于商船和游艇领域¹。2022 年，Caterpillar 对外宣布正在开展甲醇发动机研发工作，以探索采用甲醇发动机作为船舶动力设备的解决方案；淄柴动力开发出的四冲程 Z6170 甲醇发动机完成样机试验；中船动力集团研发的 6M320DM 甲醇发动机首次点火成功。

甲醇内燃机燃用甲醇时 NO_x 排放相较于其他燃料也是偏低的，例如，MAN 甲醇燃料发动机通过混入特定比例的水，配合废气再循环系统即可达到 IMO NO_x Tier III 标准，而无需配置 SCR 装置。良好的储运、燃烧和排放性能使得甲醇成为最具前景的替代船用燃料之一。

¹ <https://www.mtu-solutions.com/cn/en/pressreleases/2016/rolls-royce-celebrates-20th-anniversary-of-the-mtu-series-4000.html#>.

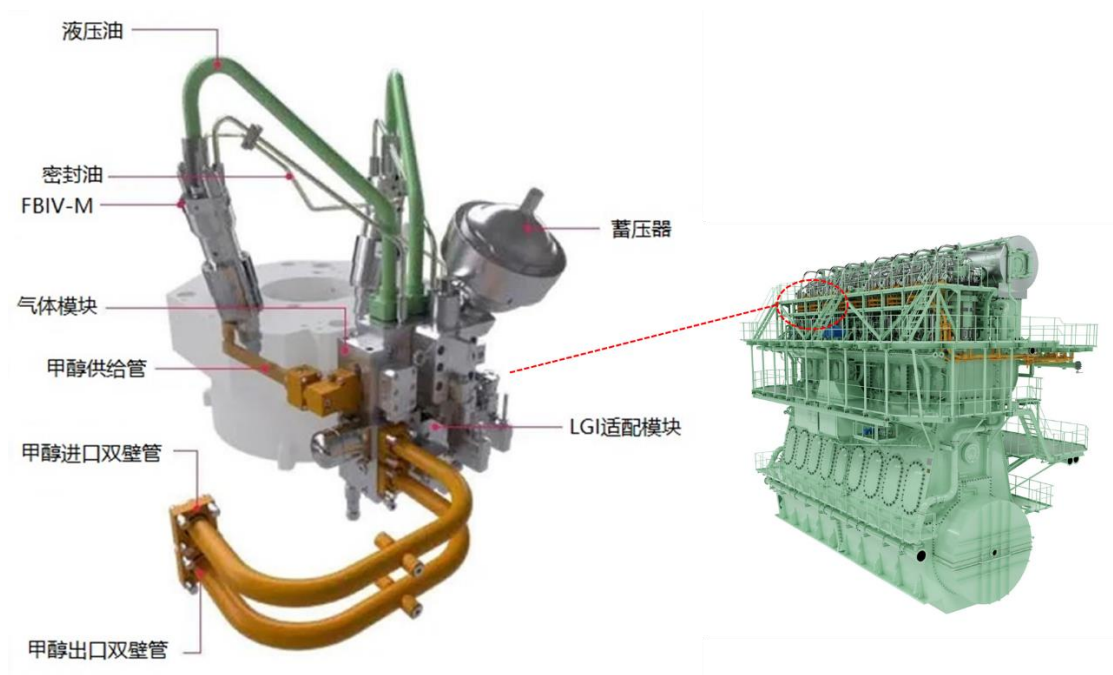


图 3-3-11 MAN 8G95ME-C 10.5 LGIM 甲醇燃料发动机¹

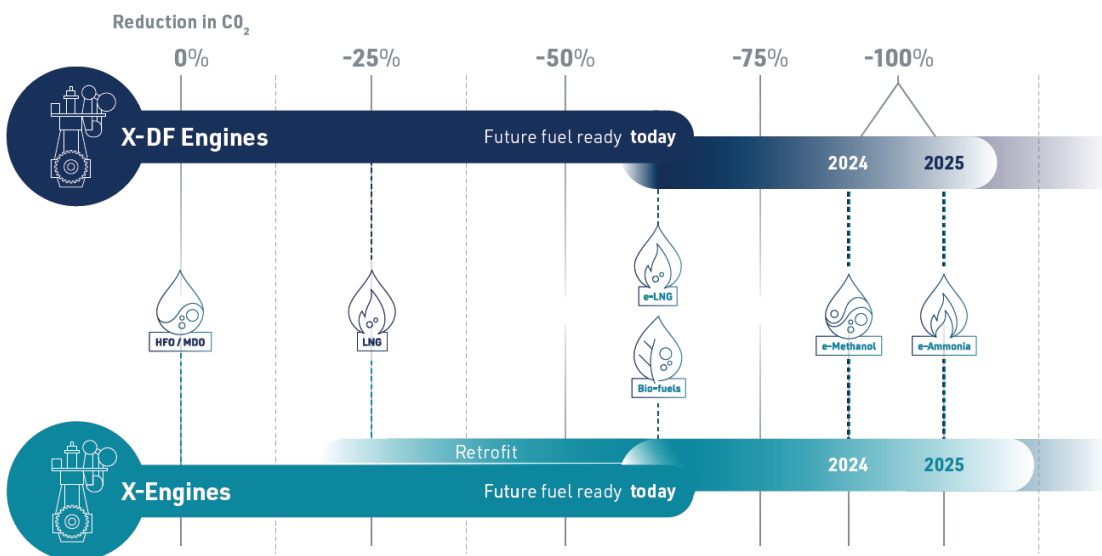


图 3-3-12 WinGD 替代燃料发动机开发计划²

¹ <https://www.man-es.com/marine/products/man-b-w-me-lgim>.

² <https://www.wingd.com/en/fuel-flexibility/>.



图 3-3-13 Wärtsilä 32 型甲醇发动机¹

2015 年 3 月，Wärtsilä 和 Stena 联合将汽车渡轮 Stena Germanica 的 4 台 8ZAL40S 发动机中的 1 台改装成依靠甲醇燃料运行，并成为世界上第一艘甲醇动力船舶，如图 3-3-14 所示。截止 2022 年底，世界船队中新造甲醇燃料船舶已达 21 艘²，如表 3-3 所示，且主要为 50k DWT 级化学品/油轮。其中，Methanex 全资子公司 Waterfront Shipping 经营着全球最大规模的甲醇燃料船队——17 艘化学品/油轮。而目前已宣布的甲醇燃料新船订单达 60 艘，其中尤其以 Maersk、CMA CGM、中国远洋海运集团的系列大型集装箱船订单尤其受到业界关注。

¹ <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/wartsila-32-methanol-engine>.

² <https://afi.dnv.com/>.

(a) Stena Germanica



(b) 甲醇燃料化学品/油
轮¹



图 3-3-14 甲醇燃料船舶

¹ <https://www.waterfront-shipping.com/fleet/fleet-list>.

表 3-3 世界甲醇燃料船队

序号	船名	建造年份	造船厂	船舶吨级	船舶类型	船东	船级社
1	Cajun Sun	2016	日本 Minaminippon	51,457 DWT	化学品 /油轮	日本 MOL	NK
2	Leikanger	2016	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	挪威 Westfal-Larsen Management AS	DNV
3	Lindanger	2016	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	挪威 Westfal-Larsen Management AS	DNV
4	Manchac Sun	2016	日本 Minaminippon	51,458 DWT	化学品 /油轮	日本 MOL	NK
5	Mari Boyle	2016	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	加拿大 Waterfront Shipping & Marinvest Joint Venture	DNV
6	Mari Jone	2016	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	加拿大 Waterfront Shipping & Marinvest Joint Venture	DNV
7	Taranaki Sun	2016	日本 Minaminippon	49,994 DWT	化学品 /油轮	日本 MOL	NK
8	Creole Sun	2019	韩国 Hyundai Mipo	49,760 DWT	化学品 /油轮	日本 Iino Kaiun Kaisha & Mitsui Joint Venture	NK
9	Mari Couva	2019	韩国 Hyundai Mipo	49,765 DWT	化学品 /油轮	加拿大 Waterfront Shipping & Marinvest Joint Venture	DNV
10	Mari Kokako	2019	韩国 Hyundai Mipo	49,765 DWT	化学品 /油轮	加拿大 Waterfront Shipping & Marinvest Joint Venture	DNV
11	Takaroa Sun	2019	韩国 Hyundai Mipo	49,849 DWT	化学品 /油轮	日本 NYK	DNV

12	Capilano Sun	2021	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	日本 MOL	DNV
13	Mari Innovator	2021	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	瑞典 Marininvest AB	DNV
14	Andean Sun	2022	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	日本 Meiji Shipping	DNV
15	Bayou Sun	2022	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	日本 Meiji Shipping	DNV
16	Grouse Sun	2022	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	日本 NYK	DNV
17	Seymour Sun	2022	韩国 Hyundai Mipo	49,999 DWT	化学品 /油轮	日本 NYK	DNV
18	Stena Pro Marine	2022	中国 GSI Nansha	49,990 DWT	化学品 /油轮	瑞典 Proman Stena Bulk	DNV
19	Stena Pro Patria	2022	中国 GSI Nansha	49,900 DWT	化学品 /油轮	瑞典 Proman Stena Bulk	DNV
20	Stena Prosperous	2022	中国 GSI Nansha	49,900 DWT	化学品 /油轮	瑞士 Proman Shipping AG	DNV
21	Stena Promise	2022	中国 GSI Nansha	49,900 DWT	化学品 /油轮	瑞典 Proman Stena Bulk	DNV

注：带黄色底纹标注的 17 艘船舶均由 Waterfront Shipping 经营；带蓝色底纹标注的 3 艘船舶均由 Proman Shipping AG 经营；带绿色底纹标注的 1 艘船舶由 Stena Bulk AB 经营。

4 中国海运船队与船舶工业

4.1 中国海运船队基本情况

基于 Clarksons Research SIN 数据库¹，中国海运船队现有船舶 11,795 艘²，3.76 亿载重吨，各类型船舶的数量如图 4-1-1 所示³，平均吨位如图 4-1-2 所示⁴。散货船、杂货船、油轮为三大主力船型，在中国海运船队中数量占比 67%；各种类型拖轮有 1,300 余艘，考虑拖轮功率需求大、近岸区域性作业为主等特点，在推进转型中可单独考虑；集装箱船相对于数量庞大的杂货船队而言数量偏低，我国船队的集装箱化还有较大的潜力可挖；滚装/客船、工程船、工作船在其船型、航区、吨级上有各自的特点，在推进转型中也可单独考虑；现有气体运输船 162 艘，主要为 LNG/LPG 运输船，考虑未来全球范围内的能源转型，LNG、LH₂、LNH₃、LCO₂、甲醇等气态或低闪点货物运输预期将明显增长，相应用于运输和燃料加注的船队规模势必也将显著膨胀。

¹ <http://www-clarksons-net-cn-s.svnpn.dlmu.edu.cn:8118/n/#/sin/register#Fleet/Fleet>.

² 截止 2022 年 11 月数据。根据《2021 年交通运输行业发展统计公报》，截止 2021 年末，全国拥有水上运输船舶 12.59 万艘，其中内河运输船舶 11.36 万艘，沿海运输船舶 10,891 艘，远洋运输船舶 1,402 艘。本报告基于 Clarksons SIN 数据，与《2021 年交通运输行业发展统计公报》略有出入。

³ 其中，散货船包含散货船、矿砂船等；杂货船包含普通货船、重型甲板船、重吊船、甲板运输船、半潜船、多用途船、冷藏船、木材船等；油轮包含原油船、成品油轮、化学品船、穿梭油轮、加油船、FPSO 等；拖轮包含港作拖轮、消防拖轮、打捞拖轮、起锚拖轮、多用途拖轮、平台供应船等；集装箱船包含集装箱船和集装箱驳船；滚装/客船包含客船、客货船、滚装客船、滚装船、汽车运输船等；工程船包含挖泥船、打桩船、铺缆铺管船、采矿船、打捞船、浮吊船等；工作船包含海洋调查船、科研船、防污染船、维修船、垃圾回收船、加水船、应急搜救船、浮标船、潜水支持船等；气体运输船包含 LNG/LPG 运输船、加注船等。

⁴ 数据缺失船舶未参与计算。

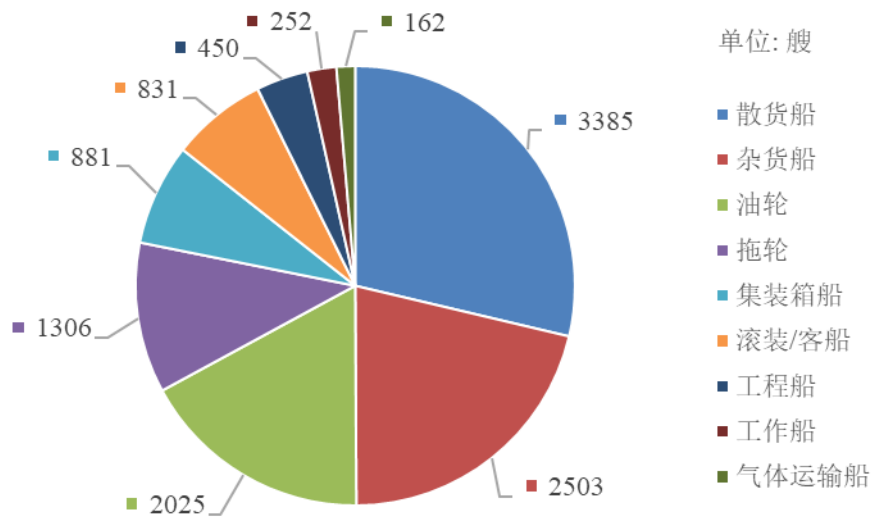


图 4-1-1 中国海运船队主要船舶类型及数量

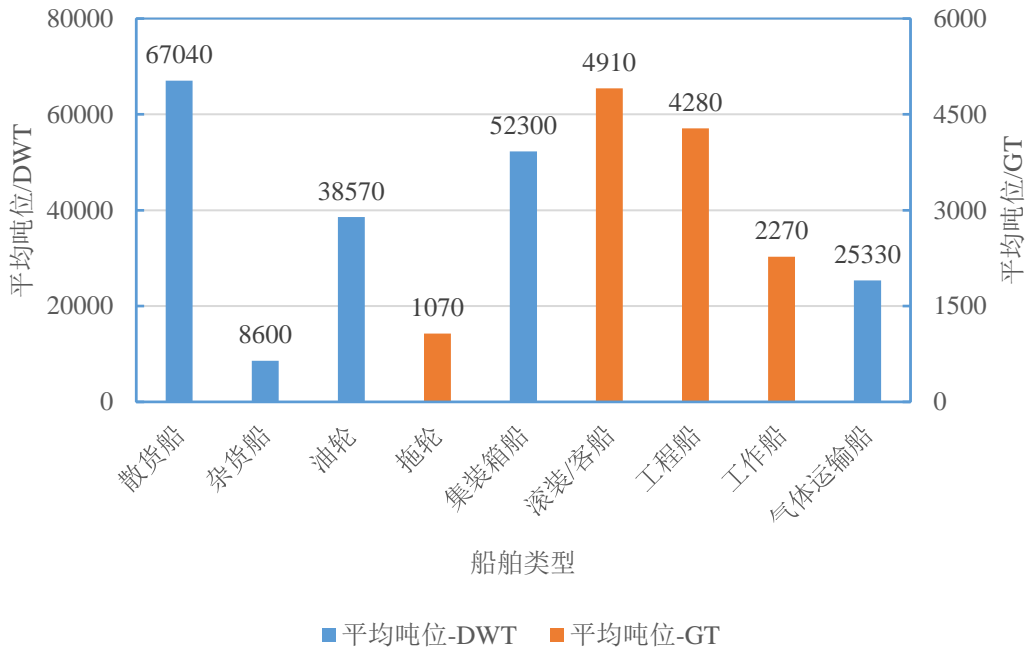


图 4-1-2 中国海运船队主要船舶类型及平均吨级

对各类型船舶船龄分布进行统计分析，结果如图 4-1-3 所示。老旧船舶数量排在前几位的是散货船、杂货船、油轮、拖轮和滚装/客船。船龄 23 年以上的散货船达 291 艘，逾 1,470 万 DWT，平均吨位 50,550DWT；船龄 23 年以上的杂货船达 739 艘，逾 332 万 DWT，平均吨位 5,030DWT；船龄 23 年以上的油轮达 227 艘，逾 263 万 DWT，平均吨位 13,440DWT；船龄 23 年以上的拖轮达 267 艘，总吨逾 14.7 万吨，平均吨位 550GT；船龄 23 年以上的滚装/客船达 232 艘，总吨逾 114 万吨，平均吨位 4,930GT。这些船舶船龄大、数量多、吨位相对偏小，估计主要以国内航行为主，更新换代的需求比较强烈，在面向 2050 年低碳推进转型的当下，选择合适的转型路径就首当其冲了。船龄 23 年以上的工程船和工作船在各自船队中的数量占比达到 27-28%，更新换代的需求也比较强烈，但单船吨位较小，且总数量均在百艘上下。船龄 23 年以上的集装箱船和气体运输船在各自船队中的数量占比分别为 10%和 17%，相对属于船队较新的两类船型。

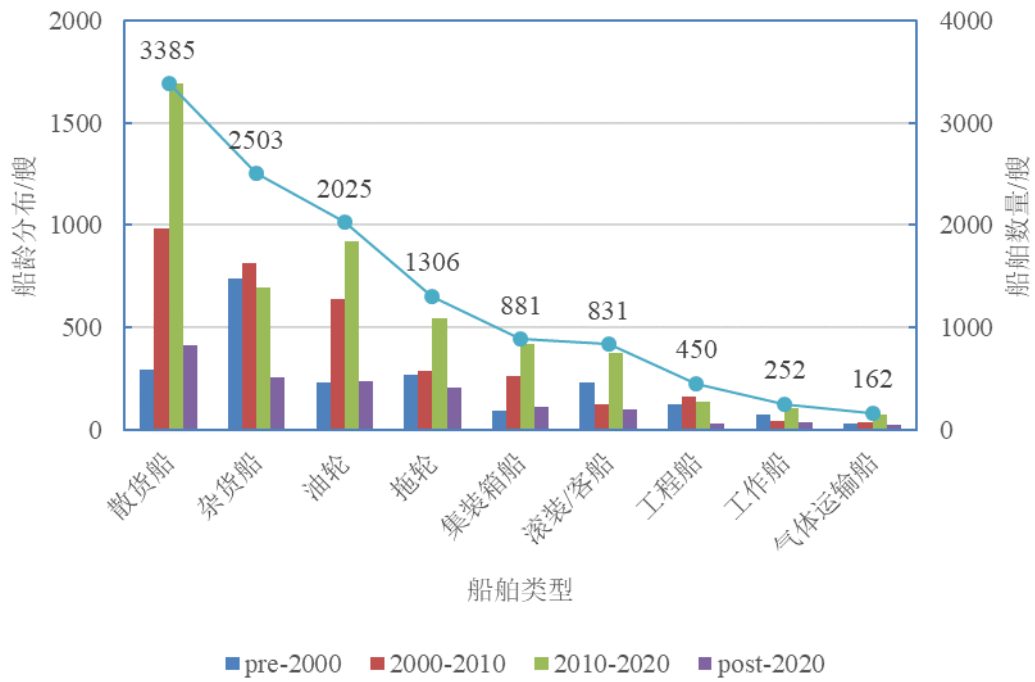


图 4-1-3 中国海运船队主要船舶类型及船龄分布

就散货船、杂货船、油轮、集装箱船、滚装/客船、气体运输船等 6 种类型的运输船队而言，其吨级分布如图 4-1-4 所示。散货船队以中大型船舶为主，中型、大型、超大型船舶数量占比达到 99%。杂货船、油轮、滚装/客船、气体运输船 4 类船队中，小型船舶数量占比较大，分别达到 81%、65%、85%和 62%。集装箱船船队相对呈正态分布。

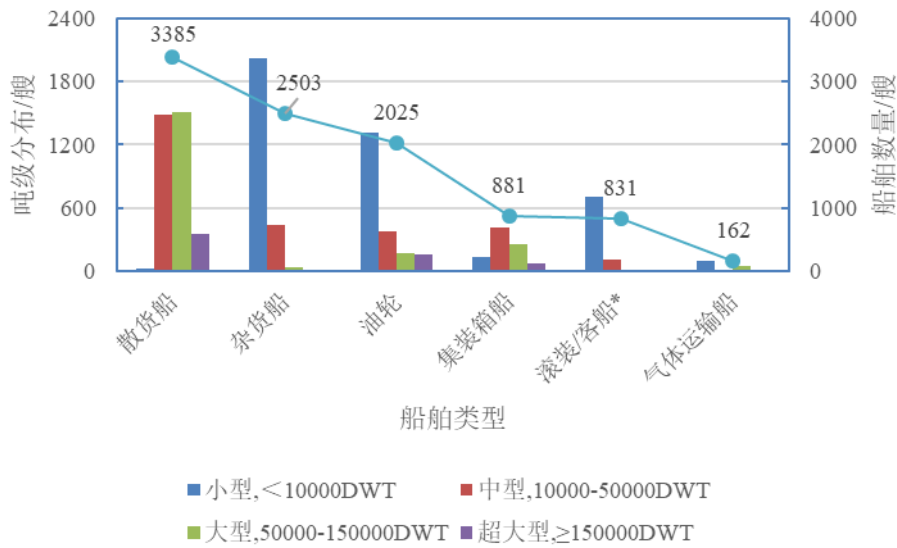


图 4-1-4 中国海运船队主要运输船舶及吨级分布¹

4.2 中国船东及其船队基本情况

就 11,795 艘船舶构成的中国海运船队而言，其船舶所有人——船东（按集团公司计）合计 2,773 家。以拥有的船舶数量和吨位计，Top50 船东分别如图 4-2-1 和图 4-2-2 所示。

按船舶类型进行统计，散货船船东 847 家，平均每家拥有散货船 4 艘、26.8 万载重吨；以拥有的船舶数量和吨位计，Top50 散货船船东分别如图 4-2-3 和图 4-2-4 所示。油轮船东 507 家，平均每家拥有油轮 4 艘、15.4 万载重吨；以拥有的船舶数量和吨位计，Top20 油轮船东分别如图 4-2-5 和图 4-2-6 所示。杂货船船东 1,067 家，平均每家拥有杂货船 2.3 艘、20,174 载重吨；以拥有的船舶数量计，Top20 杂货船船东如

¹ 图中滚装/客船以总吨计，其余为载重吨。

图 4-2-7 所示。拖轮船东 295 家，平均每家拥有拖轮 4.4 艘，Top20 拖轮船东如图 4-2-8 所示。集装箱船船东 162 家，平均每家拥有集装箱船 5.4 艘、28.4 万载重吨；以拥有的船舶数量和吨位计，Top20 集装箱船船东分别如图 4-2-9 和图 4-2-10 所示。滚装/客船船东 234 家，船东 162 家，平均每家拥有滚装/客船 3.6 艘、1.7 万总吨；以拥有的船舶数量和吨位计，Top20 滚装/客船船东分别如图 4-2-11 和图 4-2-12 所示。工程船船东 138 家，平均每家拥有工程船 3.3 艘，Top10 工程船船东如图 4-2-13 所示。工作船船东 76 家，平均每家拥有工作船 3.3 艘，Top10 工作船船东如图 4-2-14 所示。气体运输船船东 45 家，平均每家拥有气体运输船 3.6 艘、9.1 万载重吨；以拥有的船舶数量和吨位计，Top10 气体运输船船东分别如图 4-2-15 和图 4-2-16 所示。

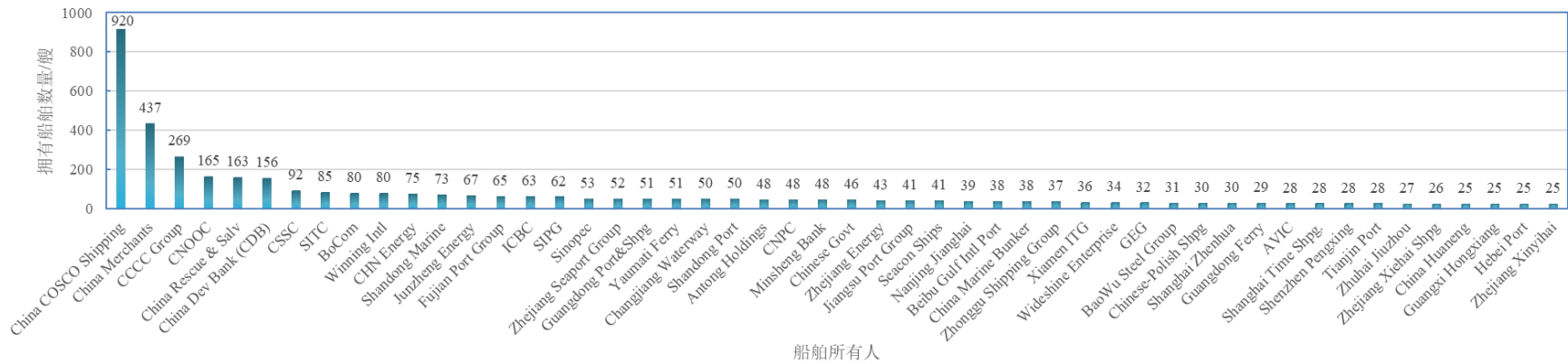


图 4-2-1 中国海运船队 Top50 船东 (以数量计)

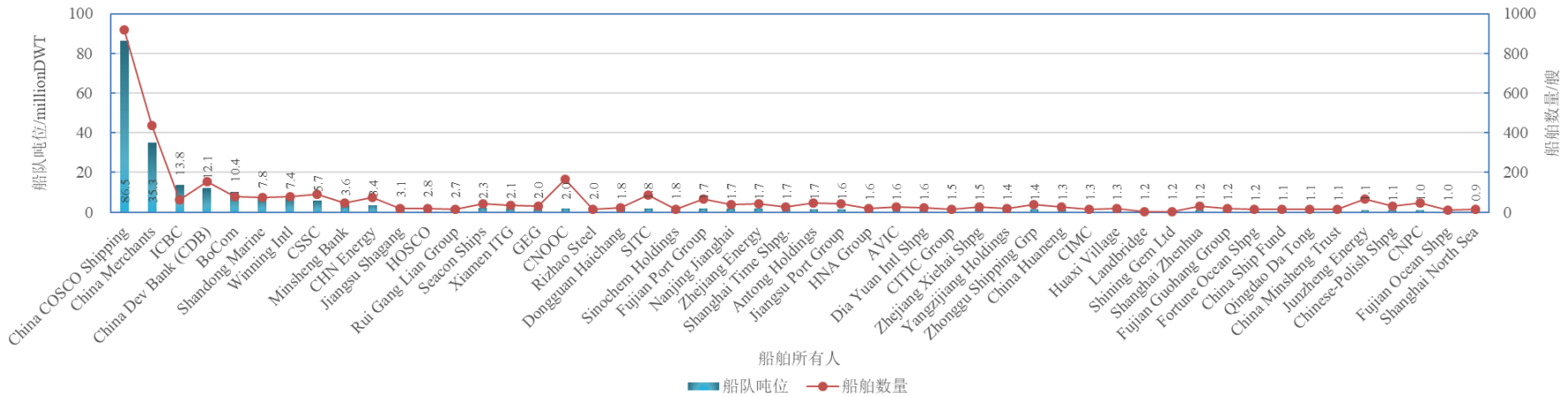


图 4-2-2 中国海运船队 Top50 船东 (以吨位计)

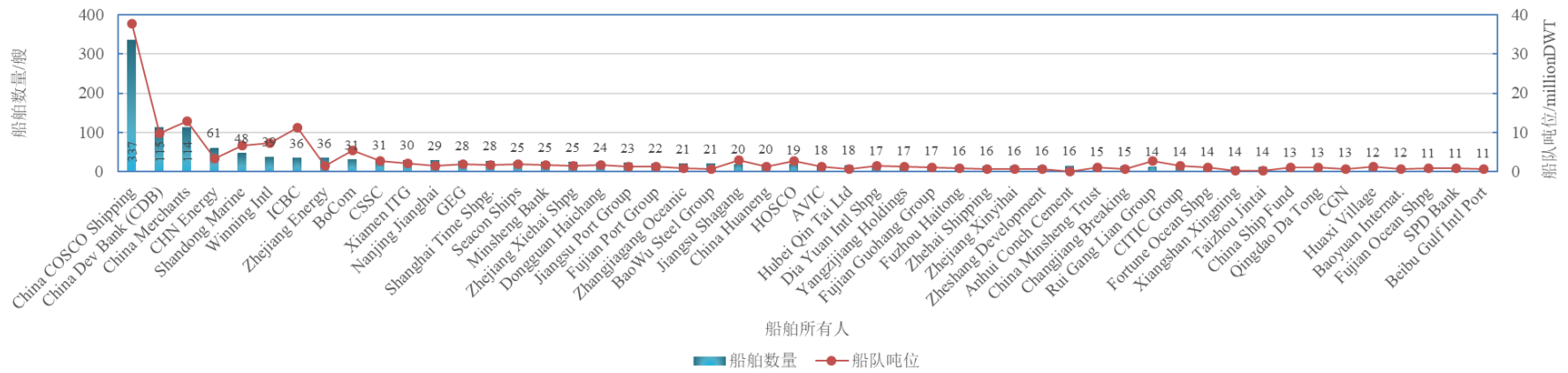


图 4-2-3 散货船船东 Top50 (以数量计)

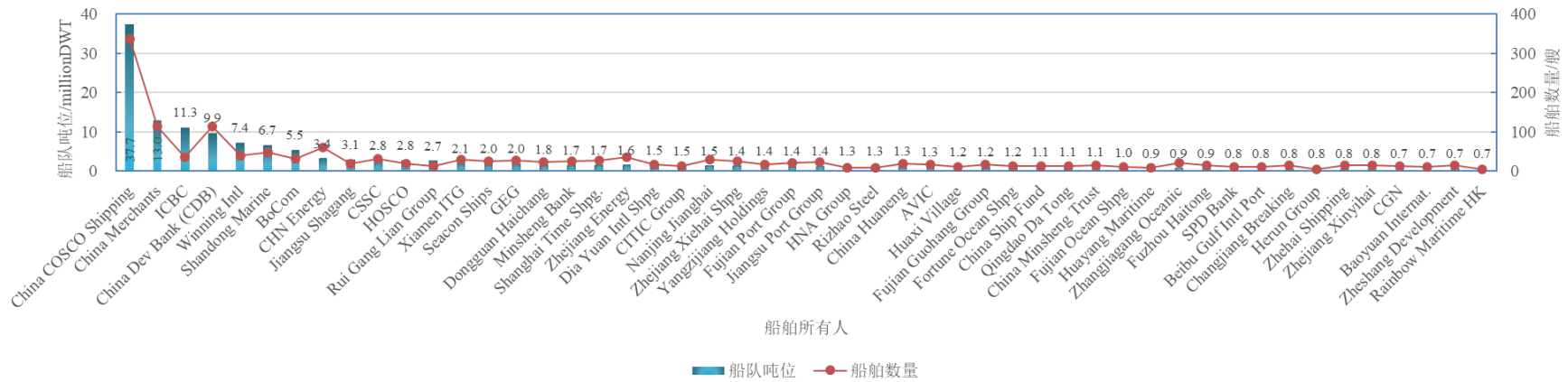


图 4-2-4 散货船船东 Top50 (以吨位计)

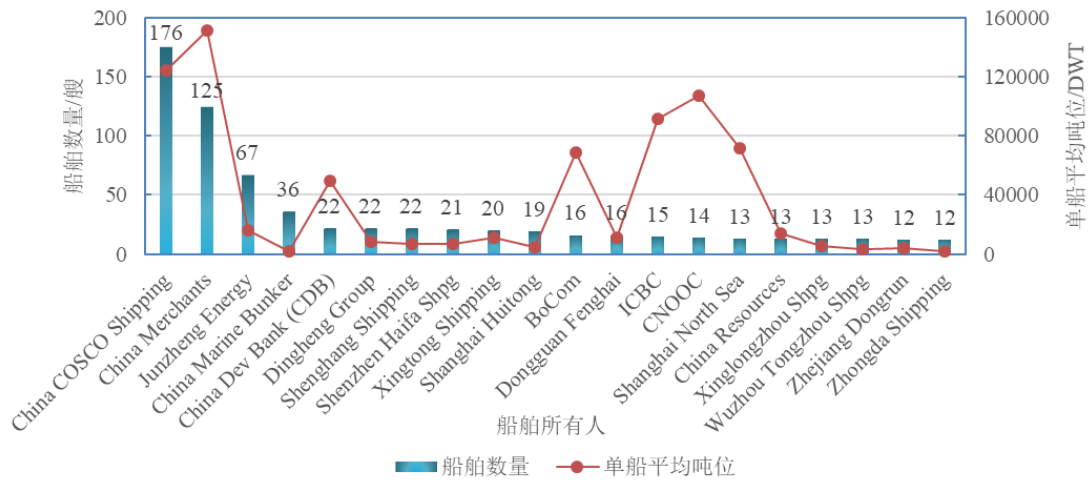


图 4-2-5 油轮船东 Top20 (以数量计)

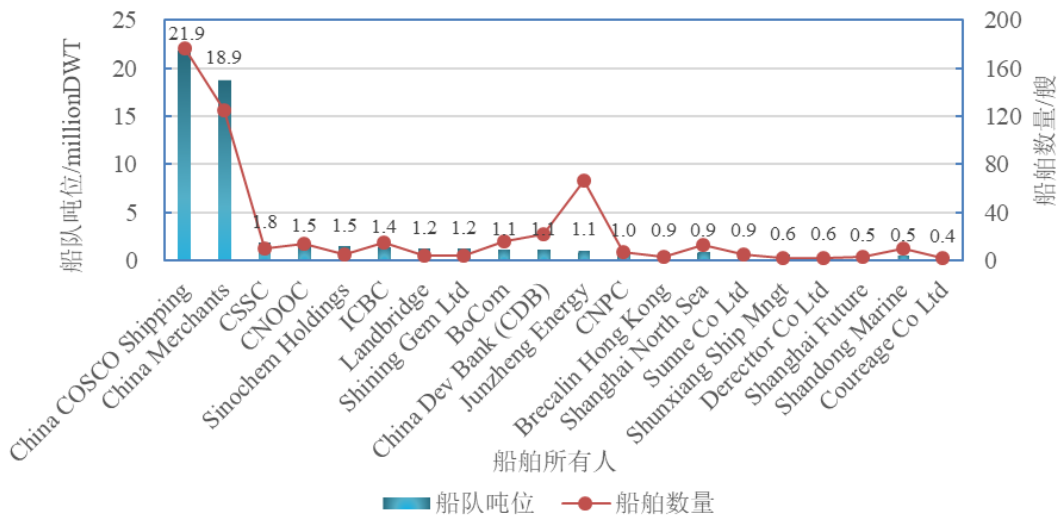


图 4-2-6 油轮船东 Top20 (以吨位计)

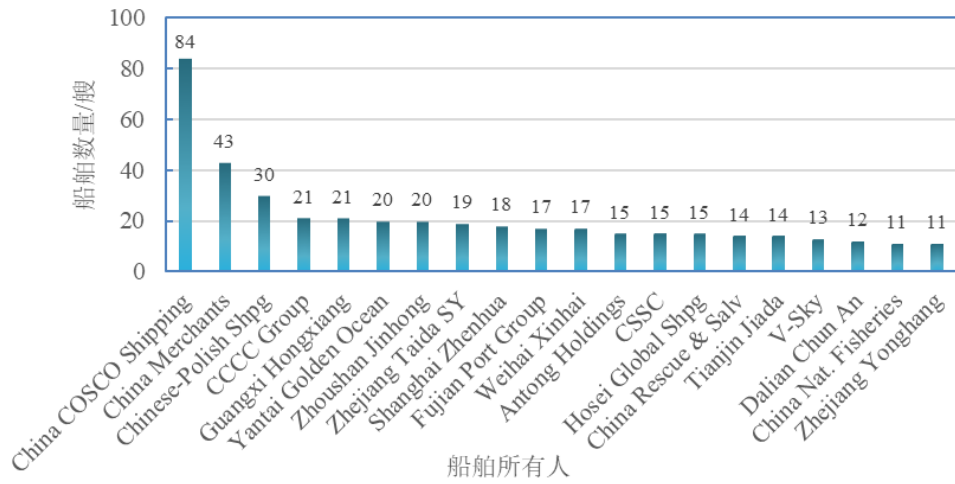


图 4-2-7 杂货船船东 Top20 (以数量计)

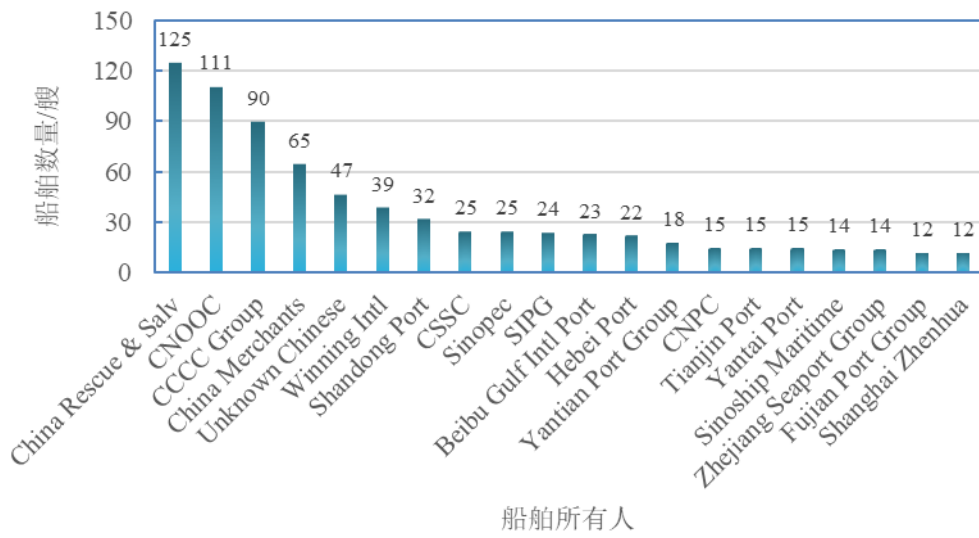


图 4-2-8 拖轮船东 Top20 (以数量计)

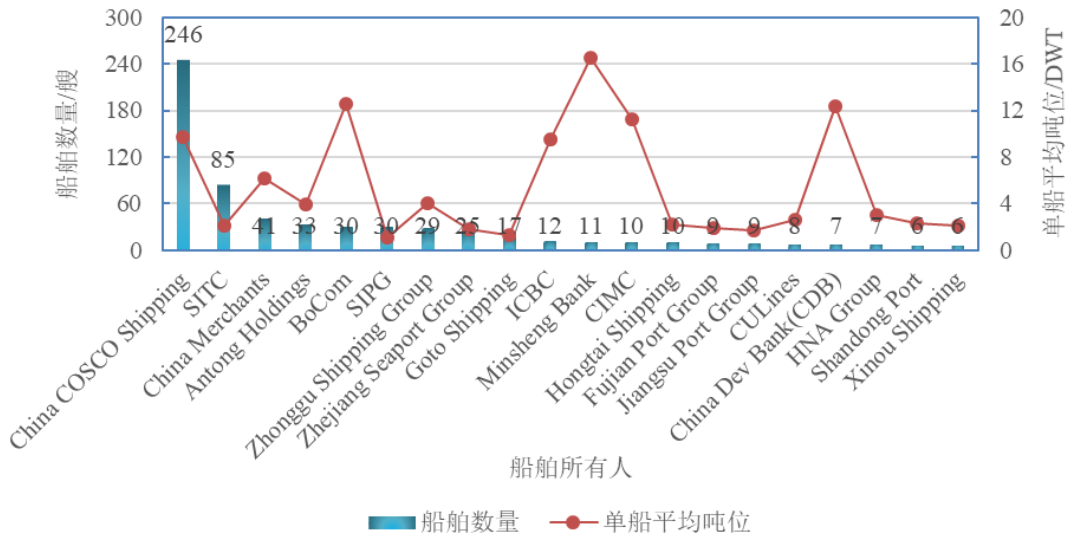


图 4-2-9 集装箱船船东 Top20 (以数量计)

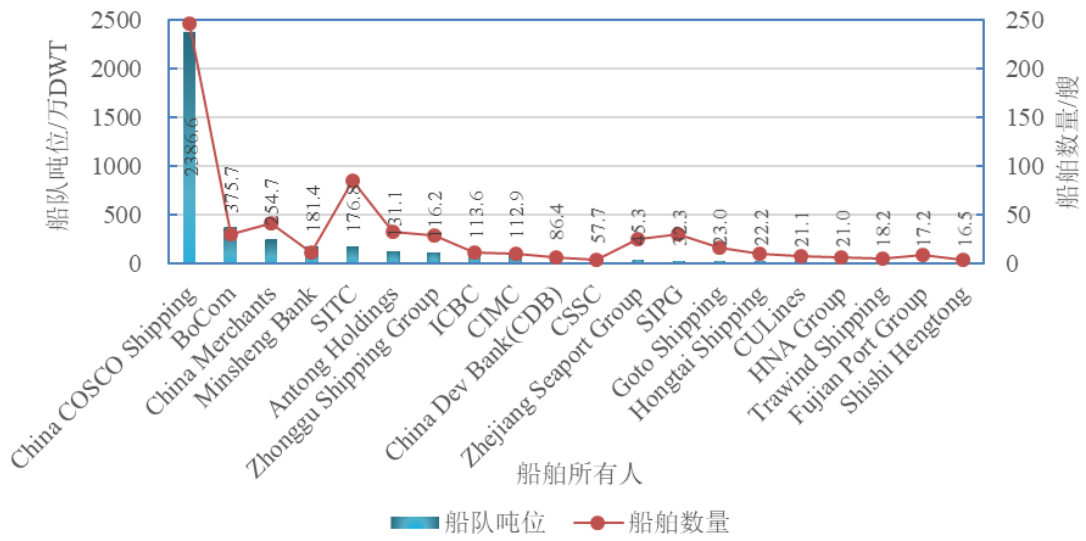


图 4-2-10 集装箱船船东 Top20 (以吨位计)

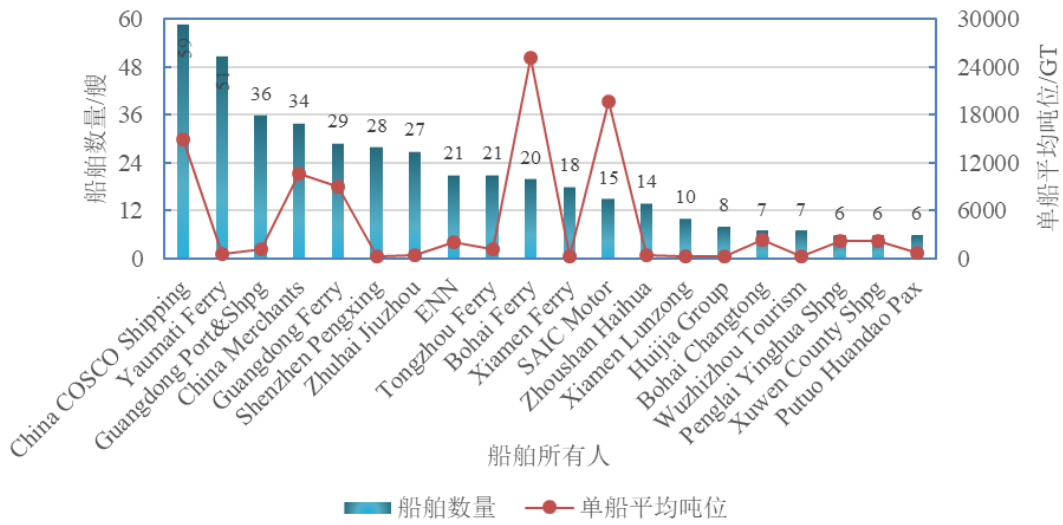


图 4-2-11 滚装/客船船东 Top20 (以数量计)

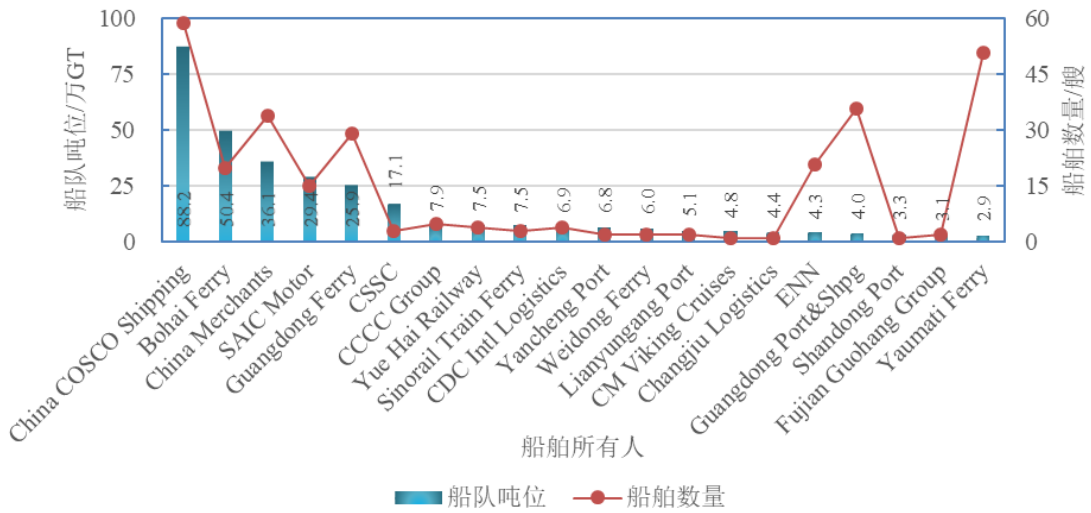


图 4-2-12 滚装/客船船东 Top20 (以吨位计)

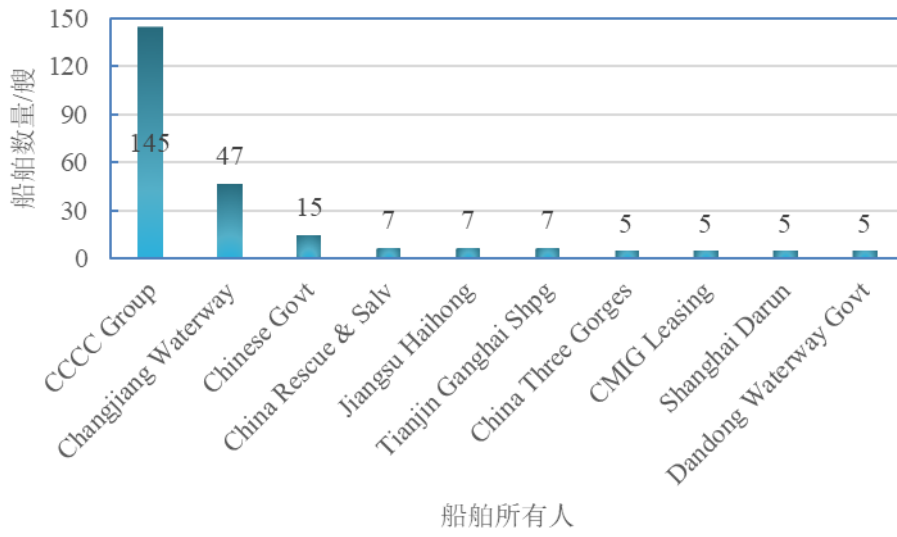


图 4-2-13 工程船船东 Top10 (以数量计)

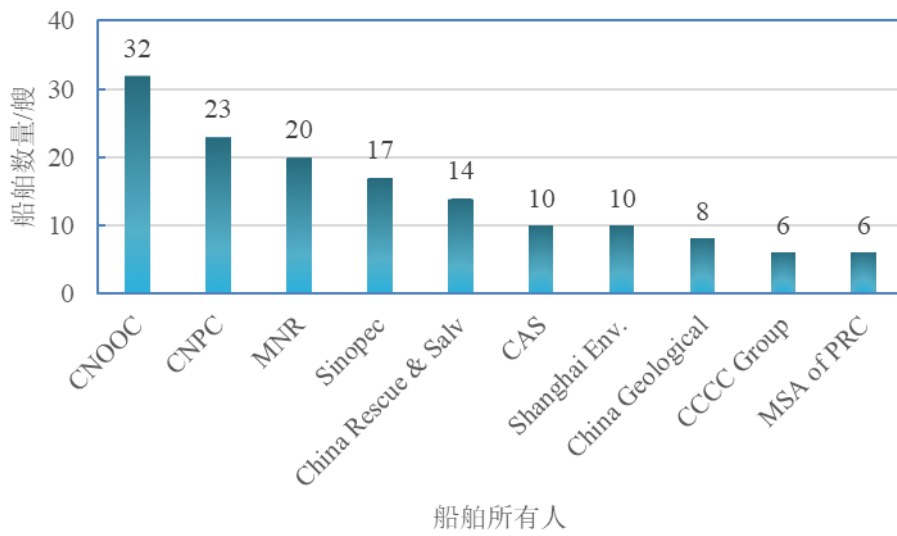


图 4-2-14 工作船船东 Top10 (以数量计)

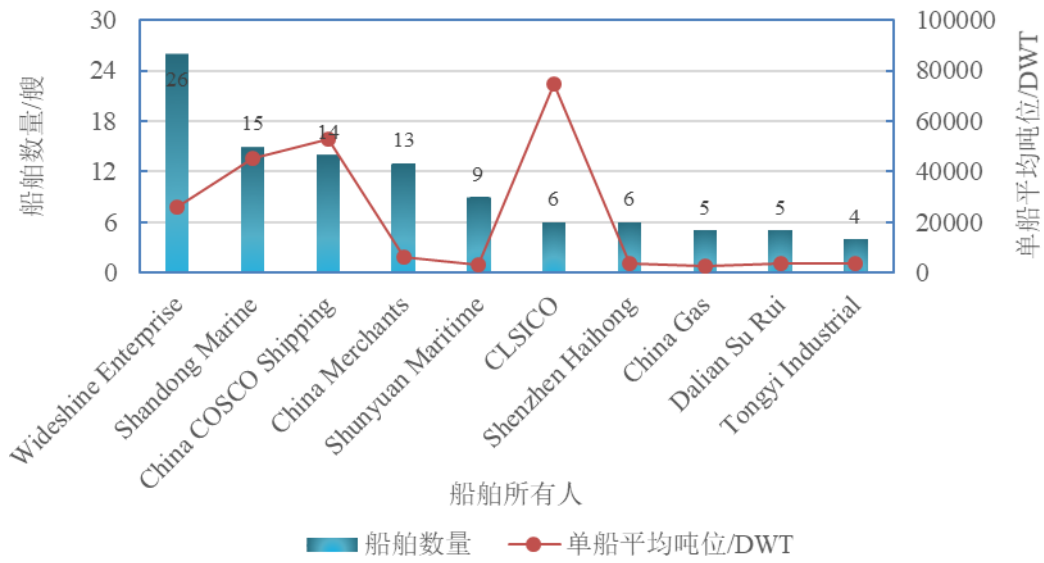


图 4-2-15 气体运输船船东 Top10 (以数量计)

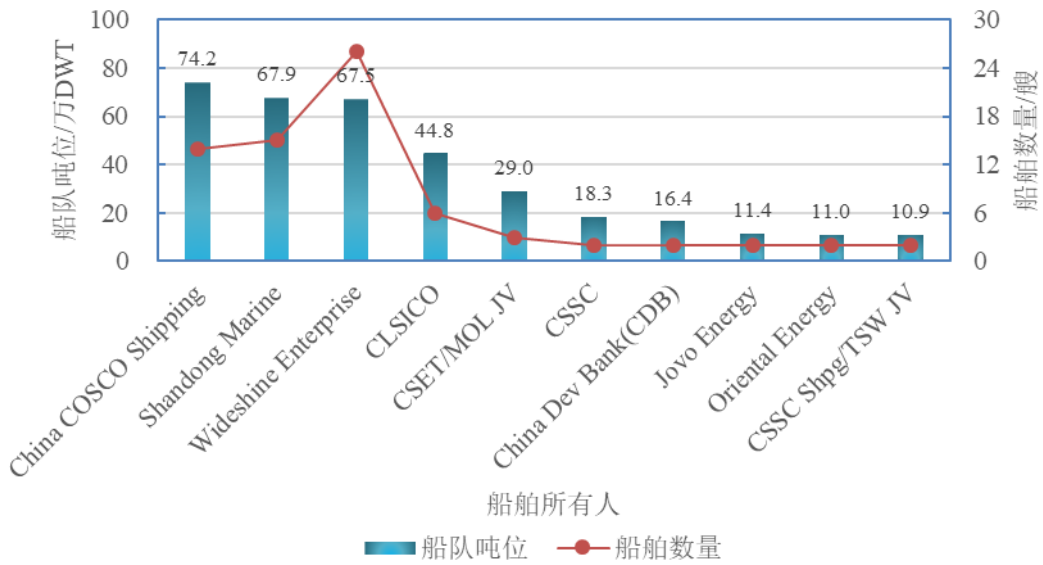


图 4-2-16 气体运输船船东 Top10 (以吨位计)

4.3 中国船舶工业基本情况

基于 Clarksons Research SIN 世界海运船队数据的统计，中国现有造船厂超过 970 家，新造船总数达到 23,379 艘¹。根据新造船数量和新造船吨位进行统计，排在前 50 位的分别如图 4-3-1 和图 4-3-2 所示。这些造船厂分布在全国超过 100 个城市，造船厂数量、新造船数量和新造船吨位排在前 50 位的分别如图 4-3-3、图 4-3-4 和图 4-3-5 所示。

按省域来划分造船竞争力，造船能力分布在全国 20 个省/直辖市，各省/直辖市造船厂数量、新造船数量和新造船吨位分别如图 4-3-6、图 4-3-7 和图 4-3-8 所示。

这些造船厂中，具有 LNG 动力/预留船舶建造案例的造船厂包括：AVIC Dingheng SB; Beihai Shipyard; Bonny Fair Heavy Industry; Chengxi Shipyard; Chongqing Zhongjiang; CIMC SOE; CMHI (Jiangsu); CMJL (Nanjing); CMJL (Weihai); CMJL (Yangzhou); COSCO HI (Dalian); COSCO HI (Qidong); COSCO HI (Yangzhou); CSC Jiangdong; CSC Qingshan SY; Dalian COSCO KHI; Dalian Liaonan; Dalian Shipbuilding; Damen Yichang; Fujian Southeast SB; GSI Liwan; GSI Nansha; Huangpu Wenchong; Hudong Zhonghua; Hunan Jinhang SB; Jiangnan Changxing; Jiangnan SY Group; Jiangsu New YZJ; Jiangsu Zhenjiang SY; Keppel Nantong; Nanjing Haiyueliang; Nantong COSCO KHI; Nantong Xiangyu;

¹ <https://www.clarksons.net.cn/n/#/sin/register#Builders/Builder-Country-Region/Builder-Country-Region/documentId/1>

New Times SB; Ningbo Xinle SB; Qingdao Beihai SB; SCS Shipbuilding; Shanghai Edward; Shanghai Waigaoqiao; Sinopacific Offshore; Taizhou Sanfu; Tianjin Xingang HI; Tsuji H.I.; Wuchang SB Group; Xiamen Shipbuilding; Yangzhou Ryuwa SB; Yangzi Xinfu SB; Yantai CIMC Raffles; Zhejiang Hongsheng; Zhejiang Yangfan; Zhongbo Offshore; Zhoushan Dashenzhou 等 50 余家。

具有 LPG/ Ethane 动力船舶建造案例的造船厂包括：Jiangnan SY Group; Sinopacific Offshore; CIMC SOE; DSIC Offshore 等。

具有甲醇动力船舶建造案例的造船厂包括：GSI Nansha。

具有氨预留船舶建造案例的造船厂包括：New Times SB。

具有电池电力或电池混合动力系统船舶建造案例的造船厂包括：AVIC Dingheng SB; China Merchants Cruise Shipbuilding (CMCS); Chongqing Chuandong; CMHI (Jiangsu); CMJL (Yangzhou); COSCO HI (Guangdong); Dayang Offshore; Fujian Baima; Guangdong K-Link SB; Jiangnan SY Group ; Jiangsu Zhenjiang SY ; Jingjiang Nanyang ; Lianyungang Hongyun; Mawei SB (Mawei); Qingdao Shipyard; Wuhu Shipyard; Wuxi Dongfang S&E; Yantai CIMC Raffles; Yiyang Zhonghai SY; Yunnan AnErKe SY; Zhejiang Kailing; Zhuhai Jianglong 等 20 余家。

具有生物质燃料动力系统船舶建造案例的造船厂包括：Hin Lee Shipyard; Mawei SB (Mawei) ; Yangzi Changbo; Zhejiang Yangfan 等。

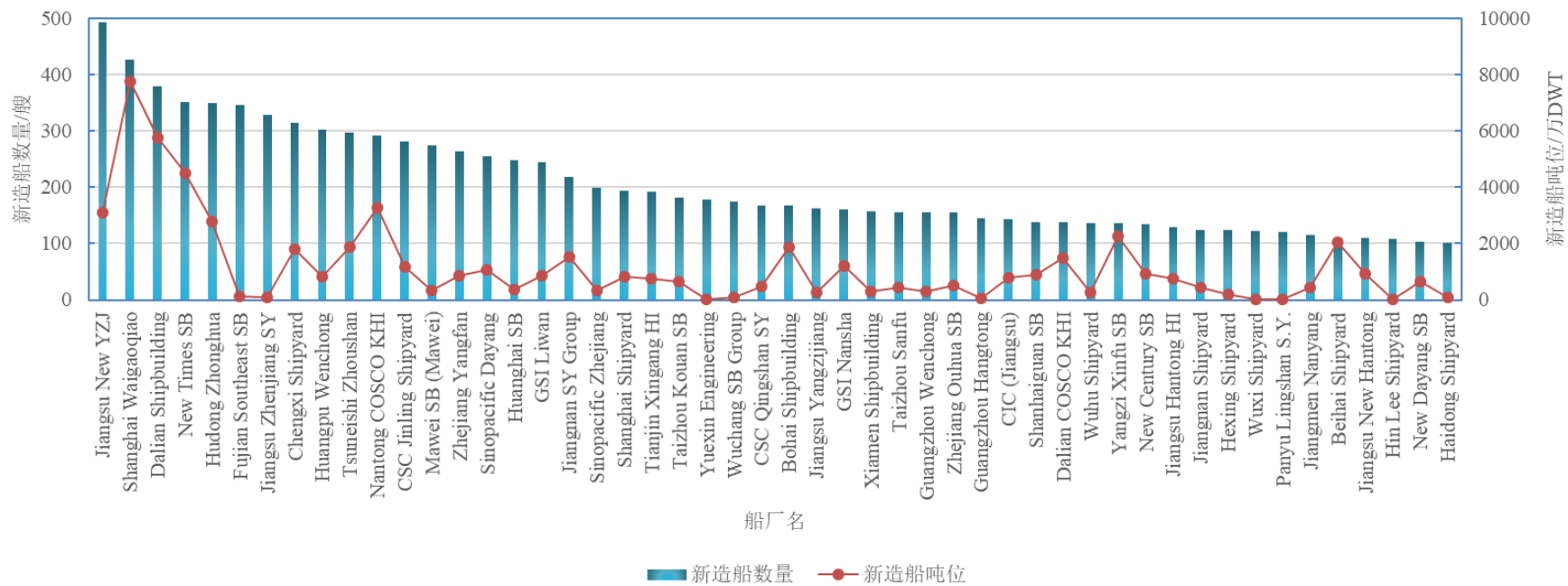


图 4-3-1 新造船数量 Top50 船厂

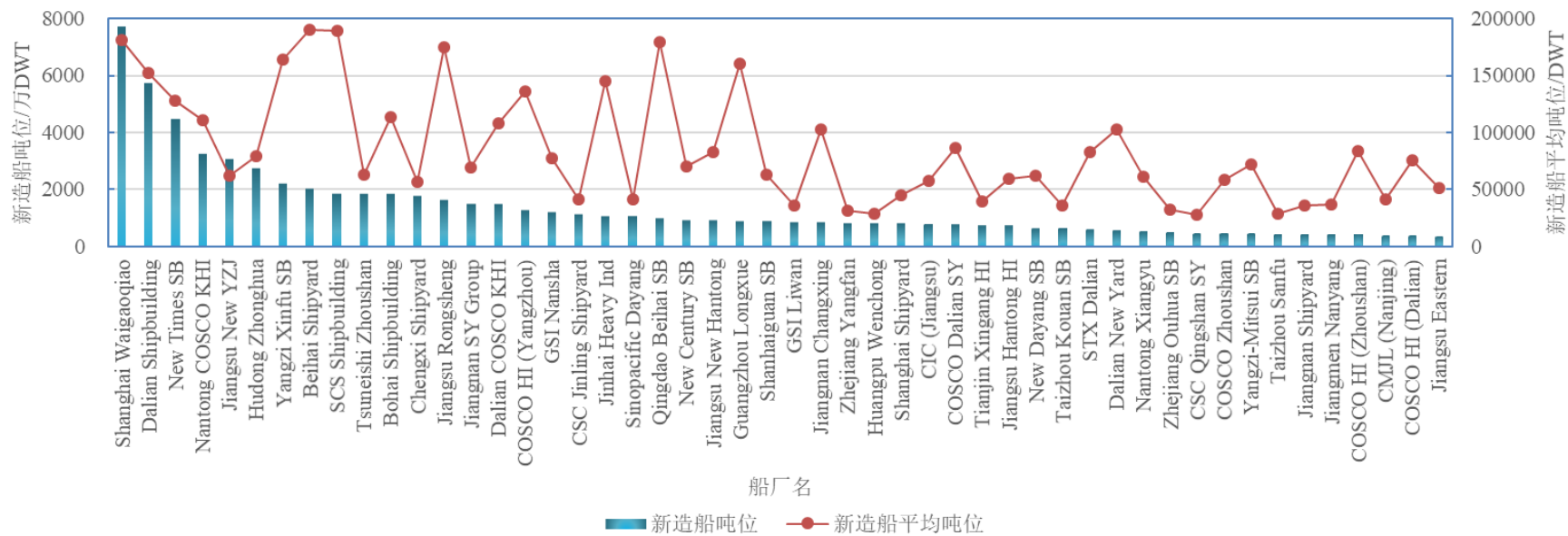


图 4-3-2 新造船吨位 Top50 船厂

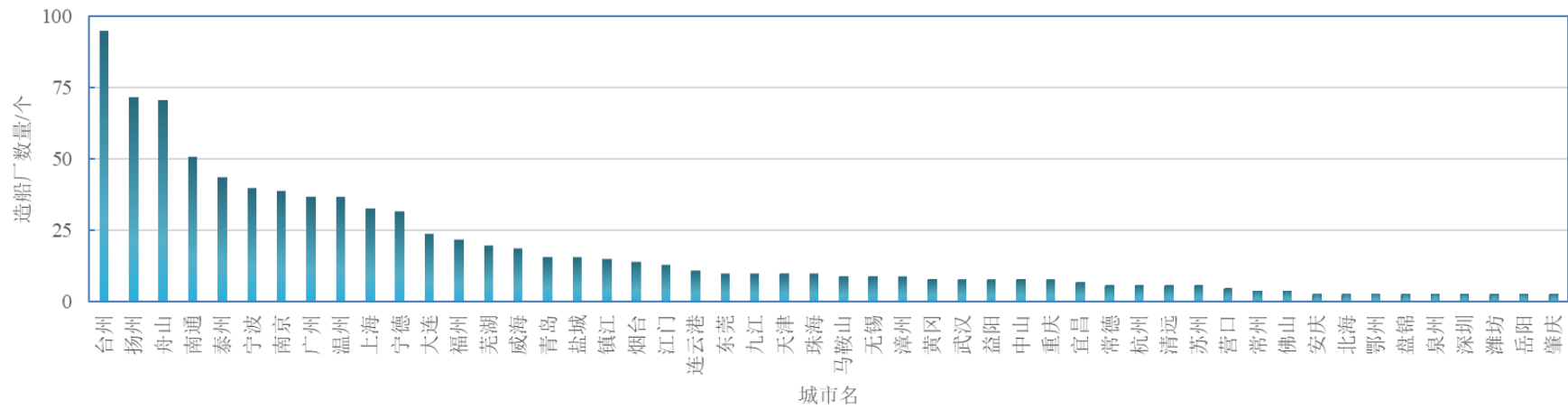


图 4-3-3 造船厂数量 Top50 城市

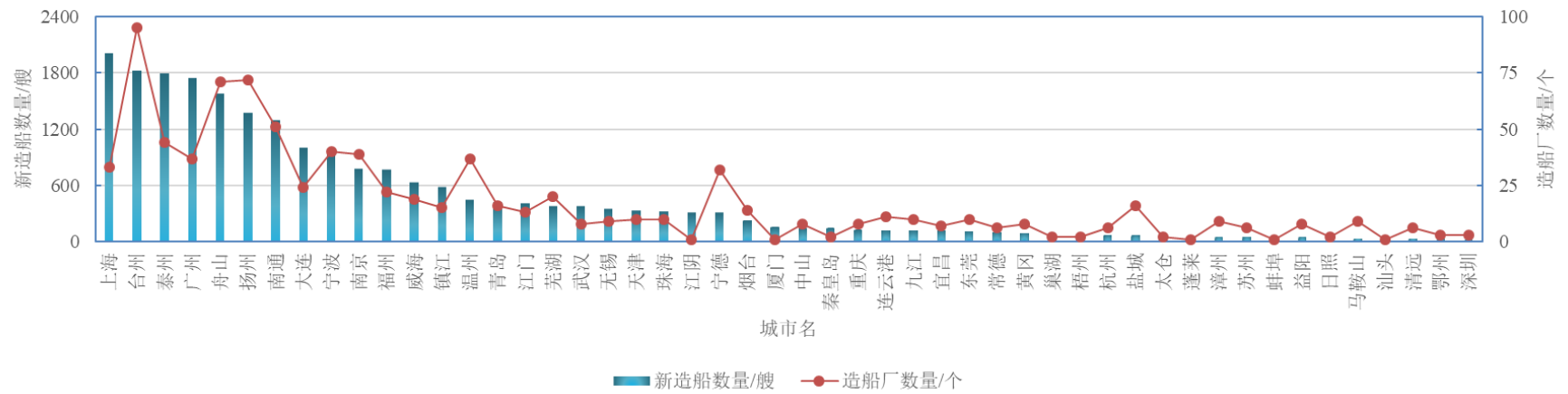


图 4-3-4 新造船数量 Top50 城市



图 4-3-5 新造船吨位 Top50 城市

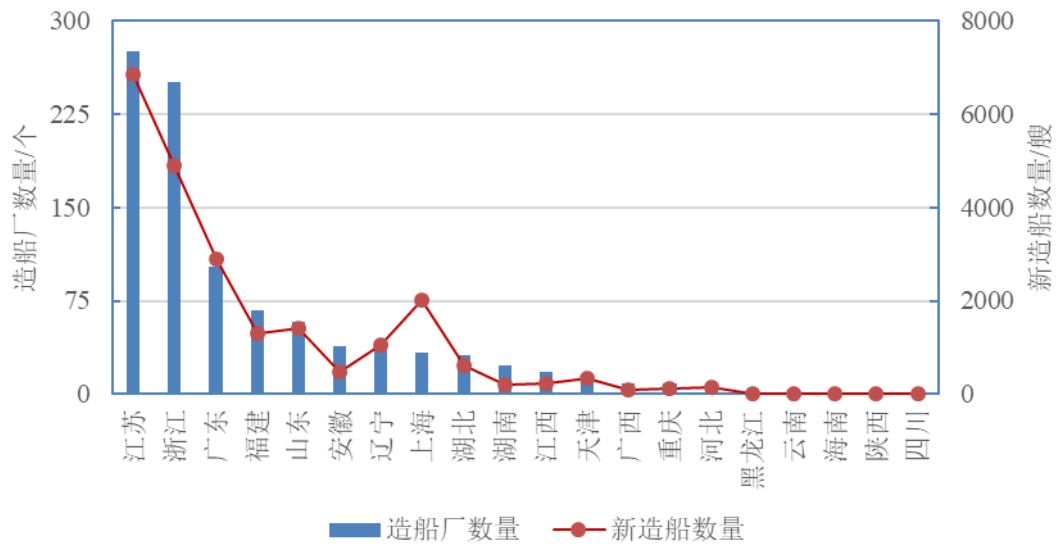


图 4-3-6 各省/直辖市造船厂数量和新造船数量

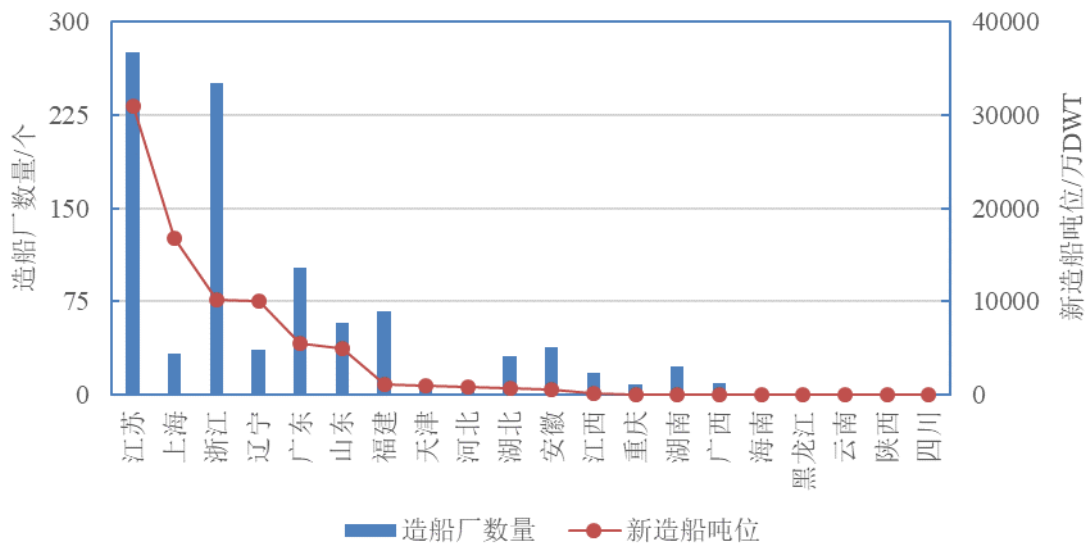


图 4-3-7 各省/直辖市造船厂数量和新造船吨位

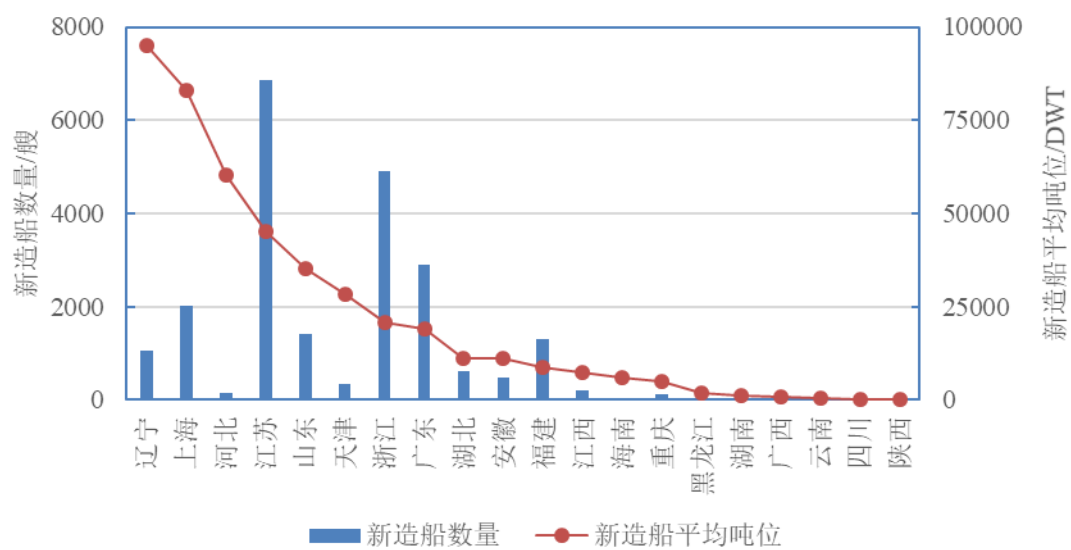


图 4-3-8 各省/直辖市新造船数量和平均吨位

5 绿色航运供应链分析

5.1 世界海运船队主要贸易航线分析

船队在线 HiFleet 监测的具有 MMSI 标识码的世界船队达 19.6 万余艘，其中具有 IMO 识别码的船舶 8.6 万余艘，5,000DWT 及以上船舶将近 3.8 万艘¹。据 HiFleet 针对全球 5,000DWT 以上船舶航行轨迹的统计分析，2022 年全球散货船队、油轮船队、集装箱船船队、滚装/客船船队、气体运输船队航迹热力图如图 5-1-1 至图 5-1-5 所示。



图 5-1-1 全球散货船队航迹热力图

¹ <https://www.hifleet.com/vessels/>.

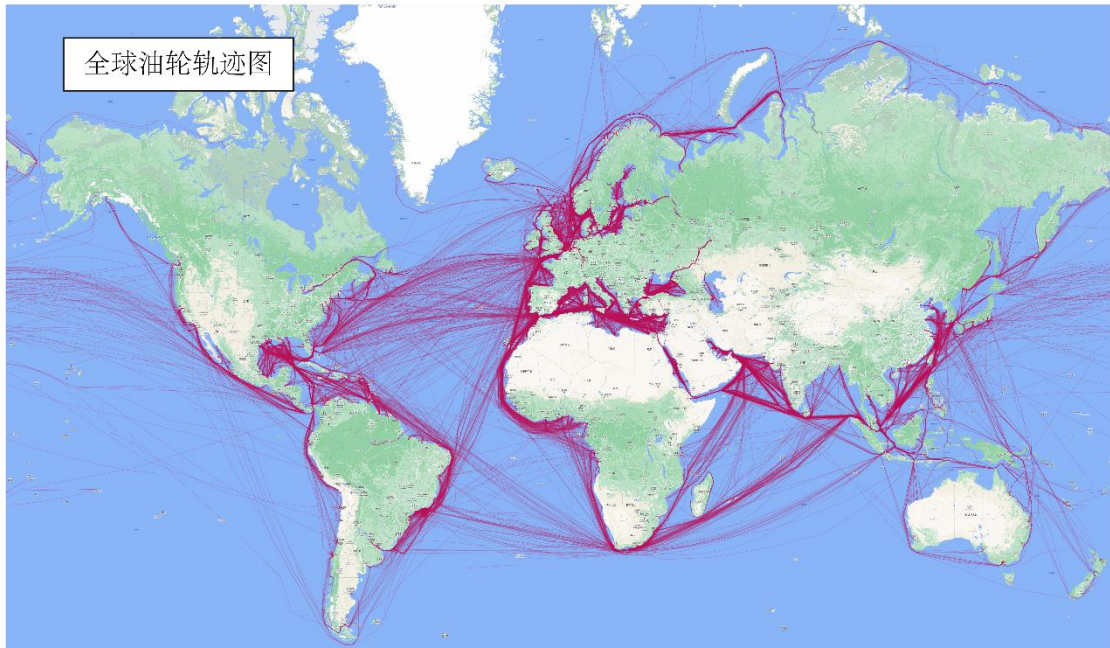


图 5-1-2 全球油轮船队航迹热力图

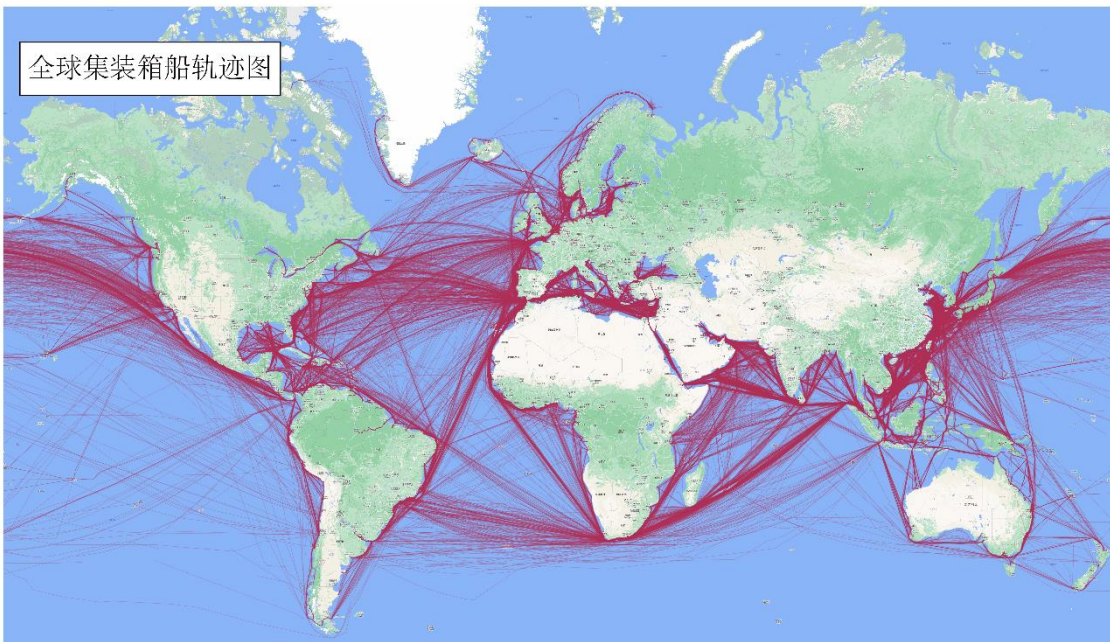


图 5-1-3 全球集装箱船船队航迹热力图

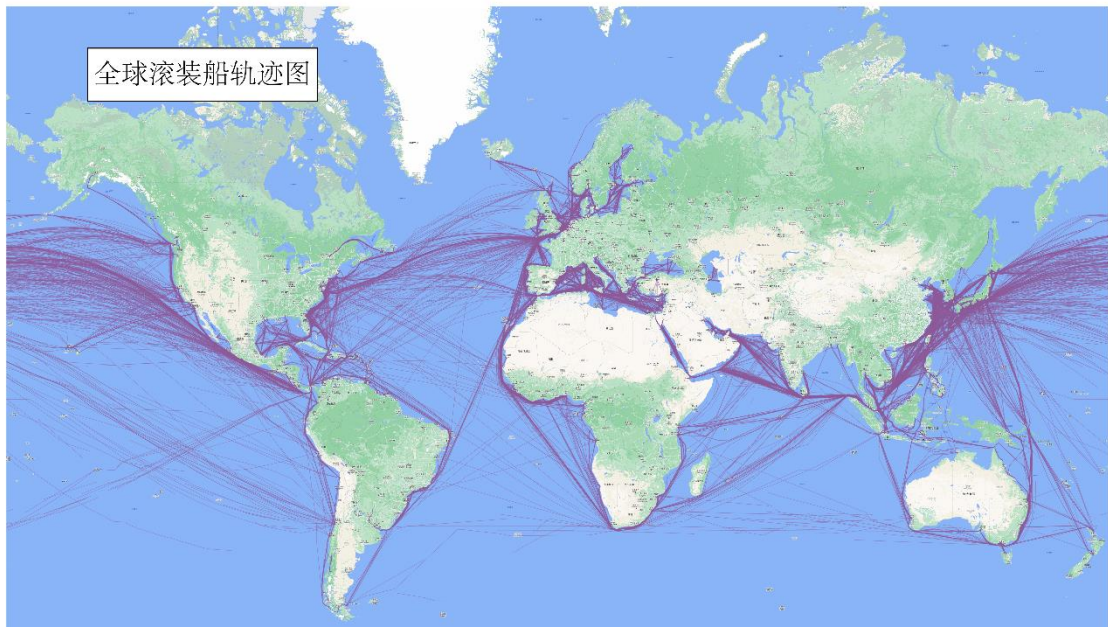


图 5-1-4 全球滚装/客船船队航迹热力图

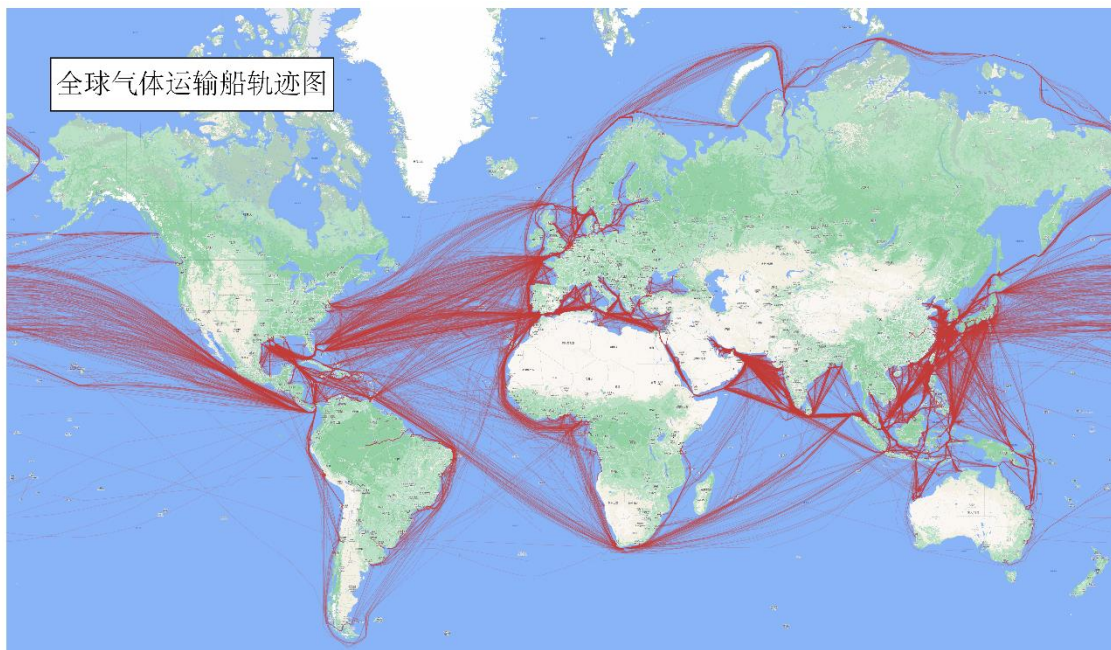


图 5-1-5 全球气体运输船队航迹热力图

1. 全球散货船队

就全球散货船队的主要营运航线而言，南美-东亚/南亚/西亚/南欧、北美东-东亚/西北欧/南欧、北美西-东亚/东南亚、西北欧-远东/中东、南欧-远东/中东、澳大利亚-东亚/东南亚等。航线分布比较复杂，主要的终端港口包括东亚、南亚、中亚、澳大利亚、印度尼西亚、地中海、波罗的海、北海、黑海、西非几内亚湾、北美五大湖、墨西哥湾、巴西、智利、阿根廷等国家或地区的主要港口，而主要的途经港口则包括新加坡（Singapore）、雅加达（Jakarta，印尼）、登巴萨（Kota Denpasar，印尼）、巴布亚新几内亚（东部海上通道，暂无港口基础设施）、富查伊拉（Fujairah，阿联酋）、斯里兰卡（Sri Lanka）、吉布提（Djibouti）、塞得（Said，埃及）、伊斯坦布尔（Istanbul，土耳其）、直布罗陀（Gibraltar）、开普敦（Cape Town，南非）、巴拿马（Panama）等。

据船队在线 HiFleet 针对全球 300k DWT 以上的散货船绘制的航迹图，营运航线非常集中，即巴西-远东航线。该航线上的主要经停的港口可能包括韩国釜山（Busan）、光阳（Gwangyang），中国大连、曹妃甸、烟台、青岛、日照、连云港、宁波/舟山、广州，新加坡，印尼雅加达和登巴萨，阿联酋富查伊拉，南非开普敦，巴西圣路易斯、维多利亚。超大型散货船航线相对固定，同样的在开普敦、新加坡 2 个节点布局燃料加注点可满足航程需求，额外增加巴西圣路易斯/维多利亚、阿联酋富查伊拉、印尼雅加达、宁波/舟山等节点港口布局替代燃料基础设施，可增加燃料加注的灵活性。

II. 全球油轮船队

就全球油轮船队的主要营运航线而言，南美-东亚/西北欧/南欧、北美东-东亚/西北欧/南欧、北美西-东亚、西非几内亚湾-西北欧/远东、中东-东亚/南亚/欧洲、澳大利亚-东亚/东南亚、俄罗斯-欧洲/东亚等。航线分布比较复杂，主要的终端港口包括东亚、南亚、中亚、澳大利亚、地中海、波罗的海、北海、黑海、西非几内亚湾、北美五大湖、墨西哥湾、美国东海岸、巴西、智利、阿根廷等国家或地区的主要港口，而主要的途经港口则包括新加坡、雅加达（Jakarta，印尼）、登巴萨（Kota Denpasar，印尼）、巴布亚新几内亚（东部海上通道，暂无港口基础设施）、富查伊拉（Fujairah，阿联酋）、斯里兰卡（Sri Lanka）、吉布提（Djibouti）、塞得（Said，埃及）、伊斯坦布尔（Istanbul，土耳其）、直布罗陀（Gibraltar）、开普敦（Cape Town，南非）、巴拿马等。

据船队在线 HiFleet 针对全球 300k DWT 以上的 VLCC 绘制的航迹图，营运航线非常集中，即中东-远东航线和美东-好望角-远东航线。该航线上的主要经停的港口可能包括日本千叶（Chiba）、名古屋（Nagoya）、大阪（Osaka）、鹿儿岛（Kagoshima），韩国釜山（Busan）、光阳（Gwangyang）、仁川（Incheon），中国大连、营口、曹妃甸、青岛、日照、宁波/舟山，新加坡，富查伊拉（Fujairah，阿联酋），开普敦（Cape Town，南非），安格拉杜斯雷斯（Angra dos Reis，巴西），新奥尔良（New Orleans，美国）、加尔维斯敦（Galveston，美国）。其中，航线若不经停则最长的航程为东亚至加尔维斯敦，全程约 16,000 海里，对于传统的

以燃油作为燃料的船舶，设计续航力可覆盖该航程。但对于 LNG、甲醇、液氨、液氢等替代燃料而言，同样的续航力其燃料舱体积需求为传统燃油的 2-6 倍。若以不显著增加燃料舱容积需求为标准，则在该航线上至少需要布局 2-4 个燃料补给点为宜。超大型油轮航线相对固定，美国新奥尔良/加尔维斯敦、开普敦、新加坡 3 个节点布局燃料加注点可满足航程需求，额外增加巴西安格拉杜斯雷斯、阿联酋富查伊拉等节点港口布局替代燃料基础设施，可增加燃料加注的灵活性。

III. 全球集装箱船船队

就全球集装箱船船队的主要营运航线而言，北美西-东亚/东南亚、北美东-西北欧/南欧/中东、南美-东亚/南亚/中东/西北欧/南欧、西北欧-西非/南欧/中东/南亚/东亚、澳大利亚-东亚/东南亚等。航线分布比较复杂，主要的终端港口包括东亚、东南亚、南亚、中亚、澳大利亚、地中海、波罗的海、北海、黑海、东非、西非几内亚湾、北美五大湖、墨西哥湾、美国东海岸、北美西海岸、巴西、智利、阿根廷等国家或地区的主要港口，而主要的途经港口则包括新加坡（Singapore）、雅加达（Jakarta，印尼）、登巴萨（Kota Denpasar，印尼）、巴布亚新几内亚（东部海上通道，暂无港口基础设施）、富查伊拉（Fujairah，阿联酋）、斯里兰卡（Sri Lanka）、吉布提（Djibouti）、塞得（Said，埃及）、伊斯坦布尔（Istanbul，土耳其）、直布罗陀（Gibraltar）、开普敦（Cape Town，南非）、伊丽莎白港（Port Elizabeth，南非）、巴拿马（Panama）等。

据船队在线 HiFleet 针对全球 15k TEU 以上的超大型集装箱船绘

制的航迹图，营运航线非常集中，即远东-中东-欧洲航线。该航线上的主要经停的港口可能包括韩国釜山（Busan）、光阳（Gwangyang），中国大连、天津、青岛、上海、宁波/舟山、厦门、深圳、广州、香港、高雄，新加坡，阿布扎比（Abu Dhabi，阿联酋），吉达（Jeddah，沙特阿拉伯），塞得（Said，埃及），雅典（Athens，希腊），里耶卡（Rijeka，克罗地亚），直布罗陀（Gibraltar），勒阿佛尔（Le Havre，法国），鹿特丹（Rotterdam，荷兰），汉堡（Hamburg，德国）。其中，航线若不经停则最长的航程为天津至汉堡，全程约 12,000 海里，对于传统的以燃油作为燃料的船舶，设计续航力可覆盖该航程。但对于 LNG、甲醇、液氨、液氢等替代燃料而言，同样的续航力其燃料舱体积需求为传统燃油的 2-6 倍。若以不显著增加燃料舱容积需求为标准，则在该航线上至少需要布局 2-4 个燃料补给点为宜。因此，上海、宁波/舟山、香港、新加坡、阿布扎比、塞得、直布罗陀、汉堡等可作为关键节点港口布局替代燃料基础设施。

IV. 全球滚装运输船队

就全球滚装运输船队的主要营运航线而言，北美西-东亚/东南亚、北美东-西北欧/南欧/中东/南美、东亚-南亚/中东/西北欧/南欧/大洋洲、西北欧-西非/南欧/中东等。航线分布比较复杂，主要的终端港口包括东亚、东南亚、南亚、中亚、澳大利亚、地中海、波罗的海、北海、黑海、东非、西非、墨西哥湾、美国东海岸、北美西海岸、巴西、智利、阿根廷等国家或地区的主要港口，而主要的途经港口则包括新加坡

(Singapore)、雅加达(Jakarta, 印尼)、登巴萨(Kota Denpasar, 印尼)、巴布亚新几内亚(东部海上通道, 暂无港口基础设施)、富查伊拉(Fujairah, 阿联酋)、斯里兰卡(Sri Lanka)、吉布提(Djibouti)、塞得(Said, 埃及)、伊斯坦布尔(Istanbul, 土耳其)、直布罗陀(Gibraltar)、开普敦(Cape Town, 南非)、伊丽莎白港(Port Elizabeth, 南非)、巴拿马(Panama)等。

V. 全球气体运输船队

就全球气体运输船队的主要营运航线而言, 北美东-西北欧/南欧/东亚/东南亚、西非几内亚湾-西北欧/南欧/东亚/东南亚、中东-西北欧/南欧/东亚/东南亚、澳大利亚-东亚/东南亚、俄罗斯-欧洲/东亚等。航线分布比较复杂, 主要的终端港口包括东亚、南亚、中亚、澳大利亚、地中海、波罗的海、北海、黑海、俄罗斯、西非几内亚湾、墨西哥湾、美国东海岸、巴西、智利、阿根廷等国家或地区的主要港口, 而主要的途经港口则包括新加坡(Singapore)、雅加达(Jakarta, 印尼)、登巴萨(Kota Denpasar, 印尼)、东帝汶(Timor Leste)、白令海峡、巴布亚新几内亚(东部海上通道, 暂无港口基础设施)、富查伊拉(Fujairah, 阿联酋)、斯里兰卡(Sri Lanka)、吉布提(Djibouti)、塞得(Said, 埃及)、伊斯坦布尔(Istanbul, 土耳其)、直布罗陀(Gibraltar)、开普敦(Cape Town, 南非)、巴拿马(Panama)等。

5.2 中国海运船队主要贸易航线分析

Clarksons Research SIN 数据库监测的世界船队 11 万余艘，截止 2022 年 11 月底，中国拥有的船舶 11,795 艘。因中国拥有的部分船舶悬挂方便旗，针对中国拥有的海运船队进行统计分析存在一定的技术难度，本节将针对悬挂五星红旗和中国香港旗的船舶进行分析。中国拥有的 11,795 艘船舶中，悬挂这两类船旗的船舶占到总数的近 78%。Clarksons Research SIN 数据库中，悬挂中华人民共和国五星红旗的船舶 7,935 艘（其中中国拥有的船舶约 7,812 艘），悬挂中国香港旗的船舶 2,558 艘（其中中国拥有的船舶约 1,340 艘）。

据船队在线 HiFleet 针对五星红旗和中国香港旗 5,000DWT 以上船舶航行轨迹的统计分析，2022 年中国散货船队、油轮船队、集装箱船队、滚装/客船船队、气体运输船队航迹热力图如图 5-2-1 至图 5-2-5 所示。中国散货船队、油轮船队、集装箱船队与世界船队有类似的经营航线，归纳为如表 5-1 所示；而滚装/客船船队、气体运输船队规模相对较小，经营航线也相对单一，如表 5-2 和表 5-3 所示。

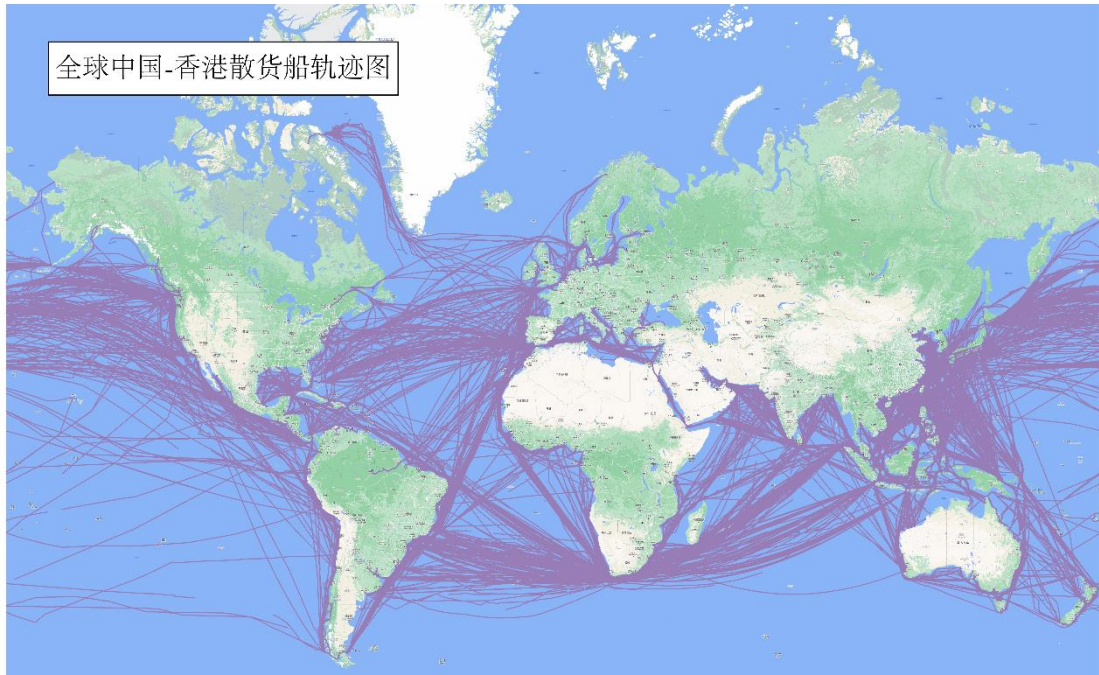


图 5-2-1 中国散货船队航迹热力图

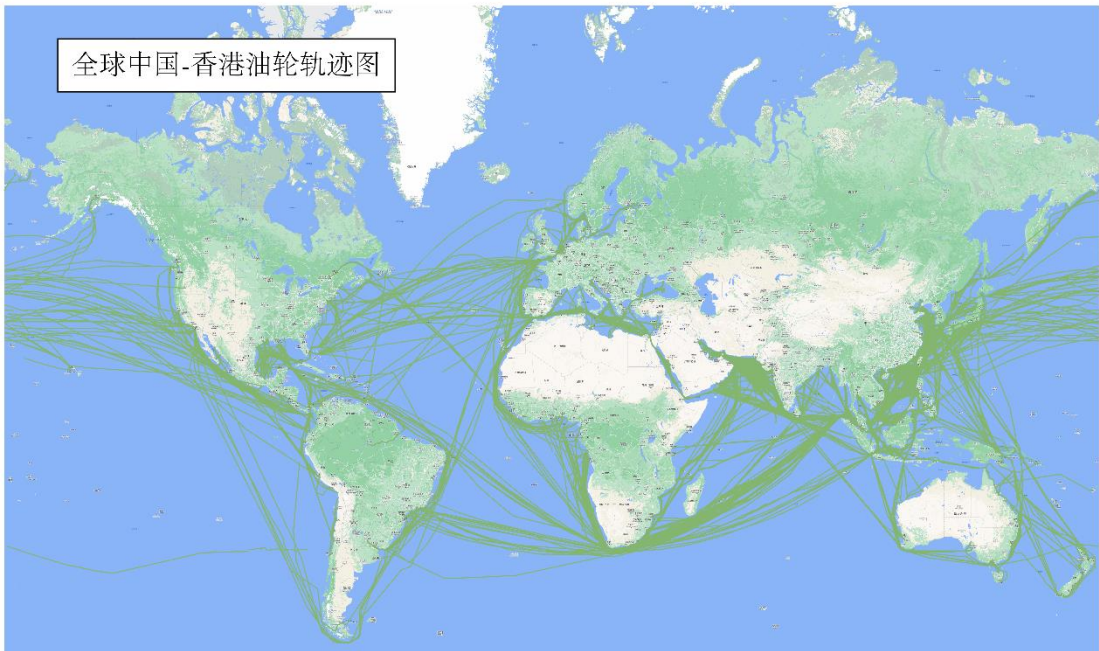


图 5-2-2 中国油轮船队航迹热力图

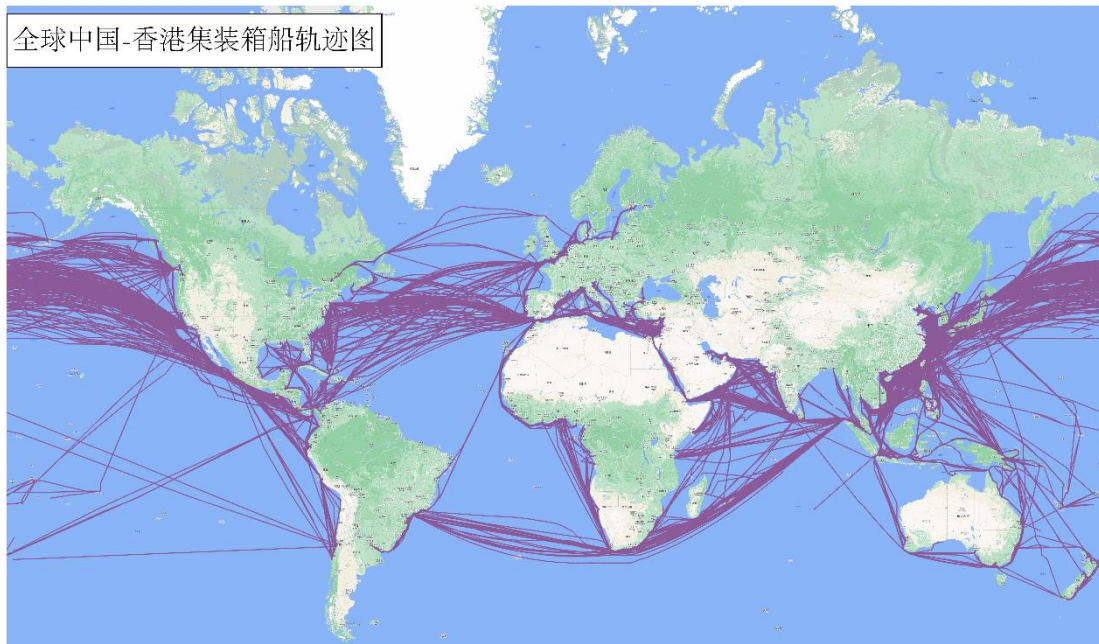


图 5-2-3 中国集装箱船船队航迹热力图

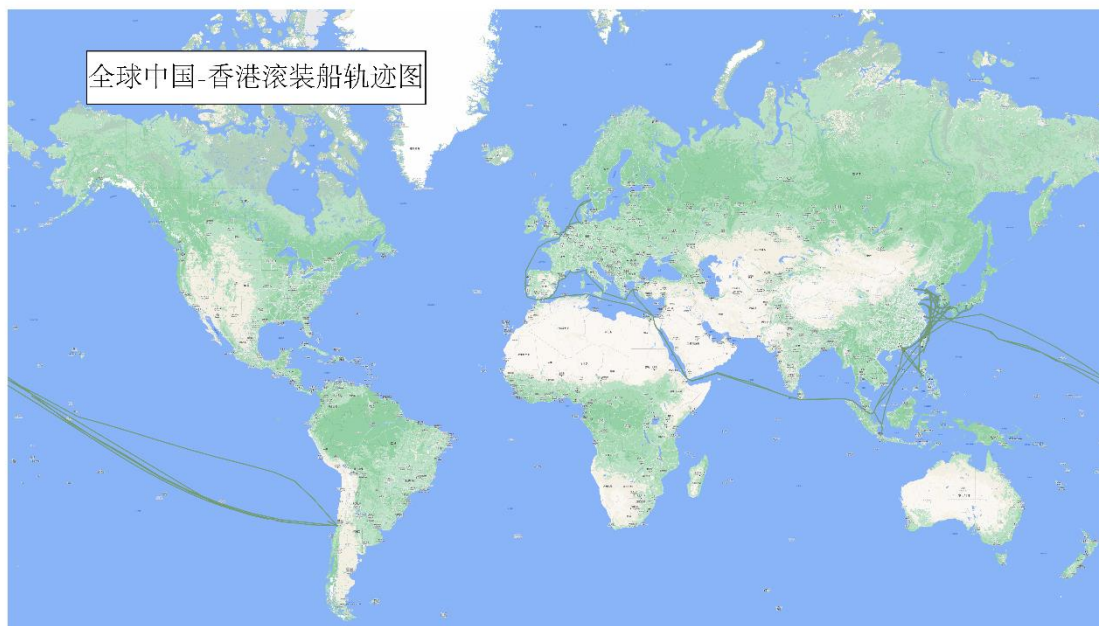


图 5-2-4 中国滚装/客船船队航迹热力图

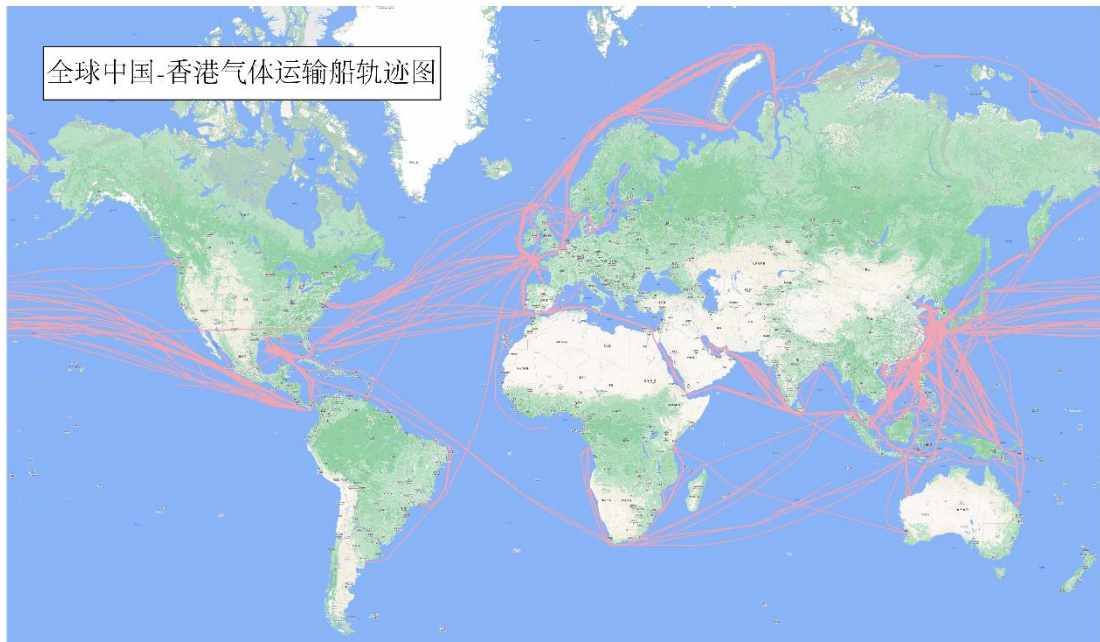


图 5-2-5 中国气体运输船队航迹热力图

表 5-1 中国散货、油轮和集装箱船船队主要经营航线

序号	中国散货船队主要经营航线	中国油轮船队主要经营航线	中国集装箱船船队主要经营航线
1	南美西-欧洲	北美西-合恩角-西北欧	北美西-东亚
2	南美东-欧洲	北美西-东亚	北美东-西北欧
3	北美东-欧洲	北美东-欧洲	北美东-南欧
4	南亚-欧洲	北美东-苏伊士-马六甲-东亚	北美东-苏伊士-马六甲-中东/南亚
5	北美东-苏伊士-马六甲-东亚	墨西哥湾-欧洲	北美东-苏伊士-马六甲-东亚
6	北美西-东亚	墨西哥湾-苏伊士-马六甲-东亚	中东/南亚-马六甲-东亚
7	墨西哥湾-苏伊士-马六甲-东亚	墨西哥湾-好望角-马六甲/登巴萨-东亚	南美东-好望角-马六甲-东亚
8	墨西哥湾-好望角-马六甲/雅加达/登巴萨-东亚	南美东-好望角-马六甲/登巴萨-东亚	西非-好望角-马六甲-东亚
9	墨西哥湾-巴拿马-东亚	西非几内亚湾-好望角-马六甲/登巴萨-东亚	东非-马六甲-东亚
10	南美东-苏伊士-东亚	波斯湾-马六甲-东亚	西北欧-苏伊士-马六甲-中东/南亚
11	南美东-好望角-马六甲/雅加达/登巴萨-东亚	澳大利亚-东亚	西北欧-苏伊士-马六甲-东亚/东南亚
12	南亚-马六甲-东亚	-	地中海沿岸-苏伊士-马六甲-东亚/东南亚
13	澳大利亚/新西兰-雅加达/登巴萨/巴布亚新几内亚-东亚	-	澳大利亚/新西兰-雅加达/巴布亚新几内亚-东亚/东南亚

表 5-2 中国滚装/客船船队主要营运航线

序号	航线	节点港口 1	节点港口 2	节点港口 3
1	中国-智利	上海/连云港/宁波		圣地亚哥 (Santiago, 智利)
2	中国-韩国	天津/大连/烟台/青岛		仁川
3	中国-日本	天津/上海		福冈/名古屋
4	中国-印度尼西亚	广州/深圳		雅加达 (Jakarta, 印尼)
5	中国-菲律宾	广州/深圳		马尼拉 (Manila, 菲律宾)
6	中国-欧洲	天津/大连/上海	新加坡/斯里兰卡/苏伊士/直布罗陀	伊兹密尔 (Izmir, 土耳其) / 里窝那 (Livorno, 意大利) / 马赛 (Marseille, 法国) / 塔拉戈纳 (Tarragona, 西班牙) / 布鲁塞尔 (Brussels, 比利时) / 不莱梅 (Bremen, 德国) / 哥德堡 (Gothenburg, 瑞典)
7	中国-中国	天津		广州/深圳

表 5-3 中国气体运输船队主要营运航线

序号	航线	节点港口 1	节点港口 2	节点港口 3
1	北美西-东亚	温哥华		天津/上海/深圳
2	北美东-西北欧	新泽西		布鲁塞尔
3	墨西哥湾-西北欧	休斯敦		布鲁塞尔
4	墨西哥湾-东亚	休斯敦	巴拿马	天津/上海/深圳
5	墨西哥湾-东亚	休斯敦	好望角, 登巴萨	天津/上海/深圳
6	墨西哥湾-东亚	休斯敦	直布罗陀, 苏伊士, 马六甲	天津/上海/深圳
7	西非-东亚	几内亚湾	好望角, 马六甲	天津/上海/深圳
8	波斯湾-东亚	波斯湾	富查伊拉, 马六甲	天津/上海/深圳
9	俄罗斯-西北欧	萨别塔 (Cabetta, 俄罗斯)		布鲁塞尔/毕尔巴鄂
10	俄罗斯-东亚	萨别塔 (Cabetta, 俄罗斯)	白令海峡	天津/上海/深圳
11	西澳-东亚	卡拉萨 (Karratha, 澳大利亚)	登巴萨/东帝汶	天津/上海/深圳
12	东澳-东亚	格拉德斯通 (Gladstone, 澳大利亚)	巴布亚新几内亚	天津/上海/深圳

5.3 替代燃料的可扩展性和基础设施

甲醇常温常压下为液态，在技术成熟度、安全性、储运基础设施（传统化石燃料储运设施经过简单改造即可用于甲醇储运）、燃烧 NO_x 排放等方面相比氨明显有优势，且可再生甲醇同样是碳中性的。通过多个维度指标的综合评价，本报告撰写人对将可再生甲醇作为未来船用燃料有独特的偏好，因此本节仅对甲醇供应链进行分析。但受时间和能力所限，整个甲醇产业链详情还有待进一步挖掘，目前的理解还相当粗浅。

1. 甲醇的生产与供应

传统的甲醇生产原料为天然气（欧美）和煤（中国），全球产能达到 1.6 亿吨/年，年消费量近 1 亿吨。化石甲醇虽然价格便宜，但其碳足迹相对船用燃油并不具有优势。因此，未来甲醇的应用，主要还是基于生物质甲醇，尤其是利用风能、太阳能、水能、核能等清洁能源和捕集 CO_2 合成电制甲醇的发展，目前业界对其前景的不看好主要还是基于 CO_2 来源和生产成本考虑。

据 Methanol Institute 统计，目前全球范围内可再生甲醇生产基础设施建设项目超过 80 个，预计到 2027 年可实现 800 万吨的年产量，其地理分布如图 5-3-1 所示。当前的可再生甲醇生产基础设施建设项目主要分布在中国、丹麦、德国、美国等国家，虽然通过供应链网络构建和甲醇的海上运输，可再生甲醇生产基础设施的分布不是主要障碍，但基于供应链网络优化的视角，推动在主要贸易航线和关键节点港口布

局可再生甲醇生产基础设施，仍然十分重要。根据上一节的研究结论，在新加坡、波斯湾、直布罗陀、开普敦、澳大利亚、巴西等关键节点港口，基于自身的资源禀赋，发展生物质或电制可再生甲醇生产基础设施，对于全球低碳航运转型是迫在眉睫的。

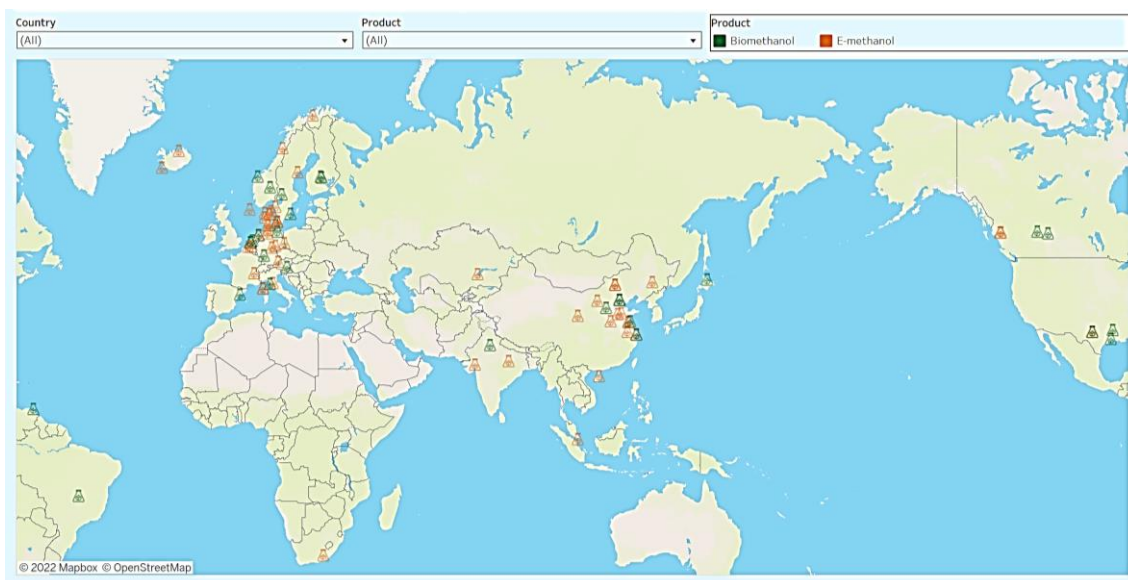


图 5-3-1 全球可再生甲醇生产基础设施¹

II. 甲醇的加注

当前，全球范围内已有超过 100 个港口可供应甲醇，其地理分布如图 5-3-2 所示。同样，DNV AFI 平台数据也显示全球甲醇接驳终端达到 132 个²，接驳终端数量排在前几位的中国、欧洲、北美和中东分别达到 38、29、19 和 16 个。但现有的这些接驳终端的地理分布与前两节关于世界主要贸易航线和节点港口的分析并没有完全吻合，或现有基础设施的甲醇供应量还难以满足预期的需求量。上海、宁波/舟山、

¹ <https://www.methanol.org/renewable/>.

² <https://afi.dnv.com/map>.

香港、新加坡、雅加达/登巴萨、富查伊拉、塞得、直布罗陀、开普敦以及波斯湾、西非几内亚湾、墨西哥湾、荷兰、巴西、澳大利亚等诸多关键节点还需要巨大的基础设施建设和投入。

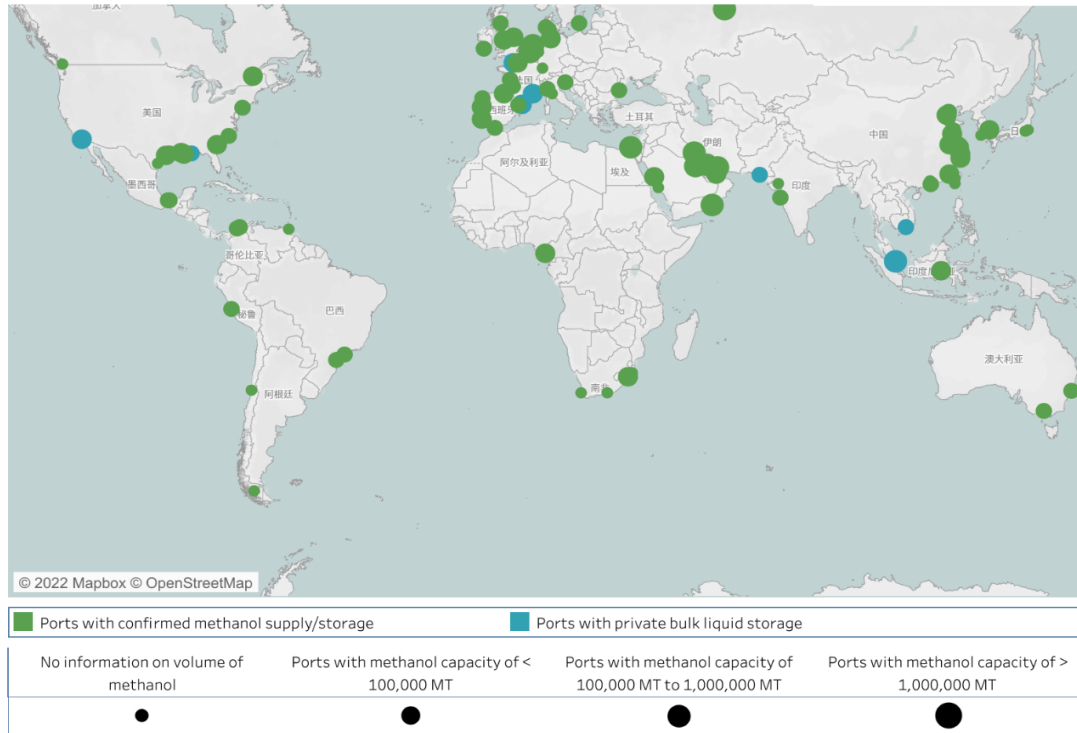


图 5-3-2 全球可供应甲醇燃料港口的分布¹

虽然甲醇燃料已具备一定的供应可靠性，但目前主要以化石甲醇为主。且由于全球甲醇燃料船舶仅 20 艘左右，实际的加注需求是相当有限的。基于 Clarksons Research SIN 平台数据，过去 12 个月全球靠港船舶累计总吨排名前 100 位的港口中，其 LNG、生物燃料、氨、甲醇、氢、岸电基础设施的状态如表 5-4 所示。虽然可能存在数据延迟或统计不完全的影响，但整体而言替代燃料/能源基础设施及使用还相当有限。

1

<https://public.tableau.com/app/profile/quantzig/viz/MethanolAvailabilityDataTopGlobalMaritimePorts/MethanolFuelAvailabilityatPorts>.

表 5-4 全球主要港口的替代燃料/能源基础设施使用情况

序号	港口	LNG	生物燃料	氨	甲醇	氢	岸电
1	Singapore	A	P	P	P	P	A
2	Shanghai, China	A					A
3	Rotterdam, Netherlands	A	A		A	P	A
4	Fujairah, U.A.E.	P					A
5	Busan, South Korea	P				P	UC
6	Beilun, China	A					A
7	Qingdao, China						A
8	Port Said, Egypt	P					
9	Yangshan, China	A					A
10	Hong Kong	P					
11	Gwangyang, South Korea	P					UC
12	Dover, UK						
13	Algeciras, Spain	A					
14	Tianjin, China						A
15	Calais, France						
16	Antwerp, Belgium	A	A		P	A	A
17	Kaohsiung, Taiwan						A
18	Port Klang, Malaysia	A					
19	Tangier-Mediterranee, Morocco						
20	Barcelona, Spain	A					P
21	Tanjung Pelepas, Malaysia						
22	Yantian, China	A					A
23	Suez, Egypt	P					
24	Dalian, China						A
25	Zhoushan, China	UC					A
26	Port Hedland, Australia	P					
27	Ras Tanura, Saudi Arabia						
28	Piraeus, Greece	P					
29	Nansha, China				A		A
30	Jebel Ali, U.A.E.	A					
31	Galveston, US	P					
32	Santos, Brazil						
33	Taicang, China						A
34	Xiamen, China						A
35	New York/New Jersey, US						A
36	Valencia, Spain	A					A
37	Yokohama, Japan	A		P		P	P
38	Zeebrugge, Belgium	A					A

39	Helsinki, Finland	A					A
40	Houston, US	P					A
41	Hamburg, Germany	A					A
42	Caofeidian, China						A
43	Genoa, Italy	P					A
44	Nagoya, Japan	A	P				
45	Jeddah, Saudi Arabia						
46	Malta Freeport, Malta						P
47	Long Beach, US	A					A
48	Yantai, China						A
49	Las Palmas, Canary Islands						
50	Tallinn, Estonia	A				P	A
51	Gibraltar	A					
52	Daishan, China						
53	Livorno, Italy	A					A
54	Merak, Indonesia						
55	Bakauheni, Indonesia						
56	Istanbul, Turkey						
57	Dublin, Ireland						
58	Gothenburg, Sweden	A			A		A
59	Ras Laffan, Qatar						
60	Le Havre, France	A					UC
61	Panama City, Panama						
62	Colombo, Sri Lanka						
63	Mundra, India						
64	Huanghua, China						A
65	Incheon, South Korea	A					UC
66	Bremerhaven, Germany	A					
67	Dunkirk, France	A					A
68	Laem Chabang, Thailand	P					
69	Rizhao, China						A
70	Civitavecchia, Italy	A					
71	Miami, US	A					P
72	Liuheng, China					P	A
73	Kiel, Germany						A
74	Kobe, Japan	A					
75	Jing Tang, China						A
76	Marseilles, France	A					A
77	Trelleborg, Sweden	P					A
78	Nassau, Bahamas						
79	Southampton, UK	A					A

80	Manila, Philippines						
81	Jakarta, Indonesia						A
82	Lianyungang, China						A
83	Rostock, Germany	A					A
84	Jiangyin, China	P					A
85	Jawaharlal Nehru, India						
86	Taichung, Taiwan						
87	Shekou, China						A
88	Dampier, Australia	A					
89	Palma De Mallorca, Spain						
90	Stockholm, Sweden	A					A
91	San Miguel De Cozumel, Mexico						
92	Los Angeles, US					P	A
93	Virginia, US						
94	Onsan, South Korea						
95	Napoli, Italy	P					
96	Belfast, UK						P
97	Ho Chi Minh City, Vietnam						
98	Savannah, US						A
99	Daesan, South Korea						
100	Chiba, Japan						
注: A = Active, UC = Under Construction, P = Potential.							

6 中国海运船队低碳转型战略与路径

6.1 船队更新与结构优化：低碳转型的必由之路

首先就船队船龄而言，老旧船舶数量排在前几位的是散货船、杂货船、油轮、拖轮和滚装/客船。船龄 23 年以上的散货船、杂货船、油轮、拖轮、滚装/客船分别达到 291 艘、739 艘、227 艘、267 艘和 232 艘。加上其他类型老龄船舶将近 2,000 艘老旧船舶的更新换代，对于我国航运业来说是负担，但对于船舶工业而言却是利好；高能效、低排放新造船舶投放到航线上，节能减排效果更是相当可观。2023 年，随着 IMO EEXI 和 CII 规则以及中国海事局《船舶能耗数据和碳强度管理办法》的实施，老旧船舶的淘汰预期将进一步加速。

其次就船队船型结构而言，中国海运船队散货船、杂货船、油轮为三大主力船型，这与世界船队三大主力船型为散货船、油轮、集装箱船的状况并不吻合。集装箱作为一种更经济、更高效的件杂货运输方式，逐渐替代杂货船是必然趋势。更进一步地，我国杂货船船队除了具有数量庞大的特征外，还具有船龄老、吨位小的特点，从能源效率、规模效应等多个角度来看，都具有非常强烈的更新换代和集装箱化转型的需求。此外，我国现有气体运输船主要为 LNG/LPG 运输船，且仅有 162 艘、318 万 DWT，相对于全球 2,304 艘、9,000 万载重吨的气体运输船队¹，数量占比为 7%、吨位占比 3.5%；而 2022 年，世界海运气体（含

¹ <https://www.clarksons.net/n/#/portal>.

LNG、LPG、NH₃) 贸易 5.3 亿吨、2.4 万亿吨海里，中国海运气体贸易约 0.9 亿吨，占到全球 17%。考虑未来全球范围内的能源转型，LNG、LH₂、LNH₃、LCO₂、甲醇等气态或低闪点货物运输预期将明显增长，相应用于运输和燃料加注的气体运输船船队规模势必也将显著膨胀。随之而来的，新船型开发、新运力订造对于船舶工业、航运企业都是迫在眉睫的任务。

6.2 能效提升：永恒的价值追求

虽然提升能效无法成为零排放航运的终极解决方案，但无论是何种能源、动力或燃料，提升能效却是亘古不变的价值追求。现有船的技术升级改造、新造船的节能方案应用、营运船的操作措施优化，甚至整个供应链的调整与重构，都将能实现物流供应链全局意义上的能效提升。风能、太阳能、电池电力、燃料电池等系统作为一艘船舶的替代能源动力还不现实，但将其作为一种辅助动力方案，对于主推进动力装置而言将成为一种非常有价值的能效提升方案。尤其是采用风力辅助推进系统，对于航线相对固定的大型散货船和油轮而言，其成本效益是完全可度量的。

6.3 替代船用燃料：路在何方？

可再生氢、氨、甲醇以及碳中性的生物质燃料是当前迈向零碳航运过程中，业界普遍探讨的替代燃料类型。但不得不承认也非常遗憾的是，目前这些燃料中还没有一种具有压倒性优势而成为业界的一致选择。

但无论是哪种燃料，最终都取决于全球和地区性的能源结构转型。

氢是一种排放非常理想的燃料，但其在储运等方面所面临的挑战，决定了它不太可能是替代船用燃料的主流选择。日本、新加坡、挪威均在积极构建氨动力航运，并不能由此就说明氨是未来零碳航运的主流选择，本质上可能还是与这些国家构建氢能社会的战略和愿景息息相关。氢的海上运输存在困难，氨很自然的就成为一种替代选择，发展氨动力氨运输船舶也就成为一种顺理成章的选择，但这类船舶贸易航线必然是相对固定的，因此发展相应的氨动力航运网络有其合理性。

报告撰写团队始终是甲醇动力航运的坚定支持者，这有从中国能源结构现状、中国船舶工业基础、中国甲醇产业基础、船员使用液体燃料的固有习惯等多方面的因素考虑。虽然甲醇也并不完美，但对于中国海运贸易以散货运输、油气运输、集装箱运输为主的现状，针对航线相对固定的大型散货船、油轮、集装箱船率先发展甲醇动力网络有明显的合理性，并可进一步扩展到部分沿海运输船队。

生物质燃料主要包括生物柴油、乙醇和生物甲醇等。生物质燃料始终存在与粮食、农作物、耕地、淡水资源等的竞争，以及地理分布不均衡、显著受到气候条件的影响等。即便第二代、第三代生物质燃料的原料可以是非作物类生物质，但其挑战也是客观存在的。全球 85% 的乙醇产自美国和巴西，与作物、耕地的竞争以及全球供应的不均衡性是显而易见的。生物柴油和生物甲醇的原料更广泛，前者可作为化石燃油的部分替代，而后者可作为电制甲醇的补充。

6.4 推动甲醇作为替代船用燃料对于中国具有重要意义

甲醇能量密度约为燃油的一半，就 3 亿吨的全球船用燃油消耗而言，对应的甲醇需求超过 6 亿吨/年，这对全球甲醇产业的发展具有巨大的推动作用。同时，相对于目前每年约 10 亿吨、3 万亿吨海里的成品油海运贸易¹，甲醇若能实现 3 亿吨船用燃油的替代²也是调整全球能源格局的重要契机。传统甲醇原料为煤（中国）和 LNG（欧美），但甲醇同样可产自森林和农业残渣、市政固体垃圾、纸浆工业产生的黑酒精等生物质；此外，利用可再生电力制氢和工业过程捕集的二氧化碳合成电制甲醇，是未来可再生甲醇生产的重要路径，且价格具有竞争力。因此，应用甲醇作为船用燃料具有当前立即可用、未来可逐步过渡到可再生甲醇的明显优势。

当前，全球甲醇年产量约为 1 亿吨，而中国是全球最大的甲醇生产和消费国，拥有最庞大的甲醇工业基础；与此同时，我国石油对外依存度将近 70%，能源安全面临挑战。此外，在很长一段时间内我国仍将是煤为主的能源消费结构（目前煤在能源结构中占比超过 60%！）³，大力发展 CCUS 技术有其必要性，这也在很大程度上解决了可再生甲醇生产中的 CO₂ 来源问题；同时，随着我国大力发展风能、太阳能、水能、核能等清洁能源，利用清洁能源制取可再生甲醇，既保障了我国的能源安全，又解决了氢能储运难题，同时又有利于做大做强我国甲醇

¹ Clarksons Research. Shipping Review & Outlook. A half yearly review of world-wide shipping trends, September 2022. <https://www.clarksons.net.cn/n/#/portal>.

² 必须承认的是：全部替代不可能、也没必要！细分船型、区域有其更具优势的替代燃料。

³ 数据来源: <https://www.iea.org/countries/china>.

产业，具有重要的战略意义和经济价值。接下来需要开展的工作是，确定可再生能源、可再生氢与捕集的 CO₂ 就近相遇的区位和路径。

6.5 替代燃料船舶与基础设施同步推进：破解“鸡与蛋”的难题

先有鸡还是先有蛋？先建替代燃料船舶还是先发展替代燃料供应基础设施？这样的问题在船舶岸电推广应用、LNG 燃料船舶发展、陆地电动汽车发展等诸多场景中都是相伴相随的。实践表明，跨领域协作、全价值链协同才是破局之道。作为最佳实践的示范，2021 年 7 月，Maersk 订造了首艘以碳中性甲醇为燃料的 2,100TEU 支线集装箱船，接下来的 15 个月时间里，Maersk 甲醇燃料船舶订单总数已达 19 艘；与此同时，2022 年 3 月以后的 9 个月时间里，Maersk 与 CIMC ENRIC、European Energy、Green Technology Bank、Orsted、Proman、WasteFuel、德博能源、Carbon Sink、SunGas Renewables 等 9 家单位达成绿色甲醇合作伙伴关系，锁定了年均超过 140 万吨的绿色甲醇供应。在 CMA CGM 发展 LNG 燃料船队时，锁定 LNG 燃料供应和加注基础设施同样是惯常的操作。对于超大型散货船、油轮和集装箱船，其航线相对单一和固定，而灵活性并非主要追求；因此，通过长期协议锁定节点港口和燃料加注终端，探索替代燃料转型更具可行性。

6.6 燃料、基础设施和设备：跨价值链协作是必不可少的关键

决定低碳航运转型发展速度的关键有三个：可再生燃料；生产、储运和加注基础设施；与可再生燃料相关的设备及系统。绿色航运供应链

依赖于全球性和区域性行业组织、船旗国、港口国以及船东、货主、港口经营者、设备供应商、燃料供应方、金融保险机构等多利益主体的跨地域、跨行业、跨价值链协作。在这方面，日本造船厂、航运公司、船级社、制备制造商等各利益主体在构建氨动力航运方面的实践值得借鉴；Maersk 作为一家航运企业，也早于全行业联合产业链上下游，探索、投资甲醇动力航运的可行性。地上没有路的时候，走下去，也就趟出一条路了，单纯地等待、观望、憧憬结果只会是在原地踌躇不前。锚定方向、目标一致，也就能形成有意义的产出，而始终行进在混沌和模棱两可之中，往往可能也就错过了引领航运绿色低碳转型发展的战略机遇期。

监管机构制定法规和监管要求，市场主体积极履约并主动承担 ESG 责任，以市场法则调动市场资源和要素的合理配置，以产业链、供应链、价值链的全链条互动与协同破解制约低碳航运转型的瓶颈，预期将加速低碳航运健康可持续发展。

6.7 人才：技术创新和产业可持续发展的源泉

科技是第一生产力、创新是第一动力、人才是第一资源，清洁船舶动力与替代船用燃料的快速发展，学校、船厂及设备厂家、设计院、科研单位、船东等都需要相关技术人才。当前的人才培养和知识更新迭代已经表现出没有跟上产业变革创新的需求，学生毕业要求、课程体系、教学资源、实践实训设施和知识更新培训，需要全行业的协同联动。

缩略词和术语

ABS: American Bureau of Shipping	美国船级社
AEA: Ammonia Energy Association	国际氢能协会
AFC: Alkaline Fuel Cell	碱性燃料电池
AiP: Approval in Principle	原理性认可
BV: Bureau Veritas	法国船级社
CCS: China Classification Society	中国船级社
CCUS: Carbon Capture, Utilization and Storage	碳捕集利用与储存
CEU: Car Equivalent Unit	标准车位
CH ₃ OH: Methanol	甲醇
CH ₄ : Methane	甲烷
CHI: COSCO Shipping Heavy Industry	中远海运重工有限公司
CII: Carbon Intensity Indicator	碳强度指标
ClassNK: Nippon Kaiji Kyokai	日本船级社
CMA CGM	达飞集团
CMHI: China Merchants Heavy Industry	招商工业
CO: Carbon monoxide	一氧化碳
CO ₂ : Carbon dioxide	二氧化碳
COP: Conference of the Parties	缔约方大会
CSSC: China State Shipbuilding Corporation	中国船舶集团有限公司
DCS: Data Collection System for fuel oil consumption of ships	船舶燃料消耗数据收集系统
DMFC: Direct Methanol Fuel Cell	直接甲醇燃料电池
DNV: Det Norske Veritas	挪威船级社
DSIC: Dalian Shipbuilding Industry Company	大连船舶重工集团有限公司
DSME: Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering	大宇造船和海洋工程有限公司
DWT: Deadweight Tonnage	载重吨
EEDI: Energy Efficiency Design Index	船舶能效设计指数
EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index	现有船舶能效指数
EJ: Exajoules (=10 ¹⁸ Joules)	艾焦
ESG: Environment, Social and Governance	环境、社会和公司治理

ETS: Emissions Trading System	排放交易机制
EU MRV: EU Regulation for the Monitoring, Reporting and Verification of CO ₂ Emissions from Maritime Transport	欧盟海运碳排放监测、报告和验证机制
EU: European Union	欧盟
FSRU: Floating Storage and Regasification Unit	浮式储存和再气化装置
GCMD: Global Centre for Maritime Decarbonization	全球海事脱碳中心
GGG: Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050	日本《2050年碳中和绿色增长战略》
GHG: Greenhouse Gas	温室气体
GMF: Global Maritime Forum	全球海事论坛
GSC: Planning and Design Center for Greener Ships	绿色船舶规划和设计中心
GT: Gross Tonnage	总吨
H ₂ : Hydrogen	氢
HFO: Heavy Fuel Oil	重质燃油
HHI: Hyundai Heavy Industries	现代重工
HHM: Hudong Heavy Machinery	沪东重机股份有限公司
HMD: Hyundai Mipo Dockyard	现代尾浦船厂
HT PEMFC: High Temperature PEMFC	高温质子交换膜燃料电池
HyMethShip: Hydrogen-Methanol Ship Propulsion Using on-board Pre-combustion Carbon Capture	*研发项目名称
IHI: Ishikawajima-Harima Heavy Industries	IHI 株式会社
IMO: International Maritime Organization	国际海事组织
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change	政府间气候变化专门委员会
IRENA: International Renewable Energy Agency	国际可再生能源署
IWSA: International Windship Association	国际帆船协会
K Line: Kawasaki Kisen Kaisha	川崎汽船株式会社
KHI: Kawasaki Heavy Industry	川崎重工业株式会社
KR: Korean Register	韩国船级社

KSOE: Korea Shipbuilding & Offshore Engineering	韩国造船与海洋工程
LNG: Liquefied Natural Gas	液化天然气
LPG: Liquefied Petroleum Gas	液化石油气
LR: Lloyd's Register	劳氏船级社
LSHFO: Low-sulfur Heavy Fuel Oil	低硫重油
MAN: MAN Energy Solutions	曼恩集团
MMSI: Maritime Mobile Service Identify	海上移动通信业务标识码
M/S: Motor Ship	柴油机动力船舶
M/T: Motor Tanker	柴油机动力油轮
M/V: Motor Vessel	柴油机动力船舶
MARPOL: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships	国际防止船舶造成污染公约
MBM: Market-Based Measures	市场机制
MCFC: Molten carbonate fuel cell	熔融碳酸盐燃料电池
MDO: Marine Diesel Oil	船用柴油
MEPC: Marine Environment Protection Committee	海洋环境保护委员会
Methanol Institute	全球甲醇行业协会
METI: Ministry of Economy, Trade and Industry	日本经济产业省
MGO: Marine Gas Oil	船用轻油
MHI: Mitsubishi Heavy Industries	三菱重工业株式会社
MISC: MISC Berhad	马来西亚国际船运有限公司
MOL: Mitsui O.S.K. Lines	商船三井株式会社
MPA: Maritime and Port Authority of Singapore	新加坡海事与港务管理局
MSGI: Maritime Singapore Green Initiative	新加坡海事绿色倡议
MSR: Molten Salt Reactor	熔盐反应堆
MTI: Ministry of Trade and Industry of Singapore	新加坡贸易与工业部
MW: Megawatt	兆瓦
N ₂ O: Nitrous oxide	一氧化二氮
NACKS: Nantong COSCO KHI Ship Engineering	南通中远海运川崎船舶工程有限公司
NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization	日本新能源产业技术综合开发机构

NMVOCs: Non-methane Volatile Organic Compounds	非甲烷挥发性有机物
NO _x : Nitrogen Oxide	氮氧化物
NS: Nuclear-powered Ship	核动力船舶
NTS: New Times Shipbuilding	新时代造船有限公司
NYK: Nippon Yusen Kabushiki Kaisha	日本邮船株式会社
OGCI: Oil and Gas Climate Initiative	油气行业气候倡议组织
PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell	磷酸燃料电池
PCTC: Pure Car and Truck Carrier	汽车滚装运输船
PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell	质子交换膜燃料电池
PM: Particulate Matters	颗粒物
PSA: Pressure Swing Absorption	变压吸附分离法
PSV: Platform Supply Vessel	平台供应船
ReMarCCABLE: Realising Maritime Carbon Capture to demonstrate the Ability to Lower Emissions	*研发项目名称
RINA: Registro Italiano Navale	意大利船级社
Ro-Pax: Roll-on/Roll-off/Passengers	滚装/客船
Ro-Ro: Roll-on/Roll-off	滚装船
SCR: Selective Catalytic Reduction	选择性催化还原法
SDARI: Shanghai Merchant Ship Design & Research Institute	上海船舶研究设计院
SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan	船舶能效管理计划
SHI: Samsung Heavy Industries	三星重工
SOFC: Solid Oxide Fuel Cell	固体氧化物燃料电池
SO _x : Sulfur oxides	硫氧化物
SWS: Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding	上海外高桥造船有限公司
TEU: Twenty-feet Equivalent Unit	标箱
UN: United Nations	联合国
UNEP: United Nations Environment Programme	联合国环境规划署
UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change	联合国气候变化框架公约
VLCC: Very Large Crude Carriers	超大型油轮

VLGC: Very Large Gas Carrier	超大型气体运输船
VLOC: Very Large Ore Carrier	超大型矿砂船
WAPS: Wind-assisted Propulsion System	风力辅助推进系统
WinGD: Winterthur Gas & Diesel	温特图尔发动机有限公司
WMO: World Meteorological Organization	世界气象组织

参考文献

- [1] Alexandros Glykas, George Papaioannou, Stylianos Perissakis. Application and cost-benefit analysis of solar hybrid power installation on merchant marine vessels. *Ocean Engineering*, 2010,37:592-602.
- [2] Bureau Veritas. Alternative Fuels Outlook for Shipping: An overview of alternative fuels from a well-to-wake perspective. White Paper, September 2022
- [3] Clarksons Research. Shipping Review & Outlook. A half yearly review of world-wide shipping trends, September 2022.
- [4] Department for Transport of UK. Maritime 2050: Navigating the Future. January 2019.
- [5] DNV. Energy Transition Outlook 2022. <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/index.html>.
- [6] DNV. Maritime Forecast to 2050. www.dnv.com/maritime-forecast.
- [7] Domagoj Baresic, Isabelle Rojon, Alison Shaw, Nishatabbas Rehmatulla. Closing the gap: An overview of the policy options to close the competitiveness gap and enable an equitable zero-emission fuel transition in shipping. Prepared by UMAS, January 2022, London.
- [8] European Maritime Safety Agency (EMSA). Guidance on LNG bunkering to port authorities and administrations. January 2018. <https://www.emsa.europa.eu/sustainable-shipping/alternative-fuels.html>.
- [9] European Maritime Safety Agency (EMSA). Potential of ammonia as fuel in shipping. A report by the EMSA under framework contract EMSA/OP/43/2020, September 2022, Lisbon. <https://www.emsa.europa.eu/sustainable-shipping/alternative-fuels.html>.
- [10] European Maritime Safety Agency (EMSA). Update on potential of biofuels in shipping. A report by the EMSA under framework contract EMSA/OP/43/2020, September 2022, Lisbon. <https://www.emsa.europa.eu/sustainable-shipping/alternative-fuels.html>.
- [11] FCBI Energy. Methanol as a marine fuel report. A report prepared for the Methanol Institute, 2015. <https://www.methanol.org/publications/fcbi-methanol-as-a-marine-fuel-report/>.
- [12] Global Maritime Forum. The Next Wave: Green Corridors. A special report for the

- Getting to Zero Coalition.
<https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/11/The-Next-Wave-Green-Corridors.pdf>.
- [13] Hui Xing, Charles Stuart, Stephen Spence, Hua Chen. Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297 (2021): 126651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>.
- [14] Hui Xing, Charles Stuart, Stephen Spence, Hua Chen. Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives. *Sustainability* 2021, 13, 1213. <https://doi.org/10.3390/su13031213>.
- [15] Hui Xing, Stephen Spence, Hua Chen. A comprehensive review on countermeasures for CO₂ emissions from ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134 (2020):110222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110222>.
- [16] IMO. Fourth IMO GHG Study 2020. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20Executive-Summary.pdf>.
- [17] IMO. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, IMO Resolution MEPC.304(72), adopted on 13 April 2018.
- [18] IRENA and AEA. Innovation Outlook: Renewable Ammonia. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn. 2022.
- [19] IRENA and Methanol Institute. Innovation Outlook: Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- [20] IRENA and Methanol Institute. 创新展望：可再生甲醇。国际可再生能源署 (IRENA), 阿布扎比, 2021.
- [21] IRENA. A pathway to decarbonise the shipping sector by 2050. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- [22] IRENA. Innovation Outlook: Renewable Methanol. <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol-ZH>.
- [23] Jesse Fahnestock, Connor Bingham. Mapping of zero emission pilots and demonstration projects. Second edition, March 2021.
- [24] Joanne Ellis, Kim Tanneberger. Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. Report prepared for the EMSA, Final Report Version 20151204.5. <https://www.emsa.europa.eu/sustainable-shipping/alternative->

fuels.html.

- [25] Julia Hansson, Selma Brynolf, Erik Fridell, Mariliis Lehtveer. The potential role of ammonia as marine fuel-based on energy systems modeling and multi-criteria decision analysis. *Sustainability* 2020, 12(8), 3265. <https://doi.org/10.3390/su12083265>.
- [26] Miola A, Marra M, Ciuffo B. Designing a climate change policy for the international maritime transport sector: market-based measures and technological options for global and regional policy actions. *Energy Policy*, 2011, 39: 5490-5498.
- [27] Tomas Tronstad, Hanne Høgmoen Åstrand, Gerd Petra Haugom, Lars Langfeldt. Study on the use of fuel cells in shipping. Report to European Maritime Safety Agency by DNV GL, 2017.
- [28] UNCTAD. Review of Maritime Transport 2022. unctad.org/rmt.
- [29] UNFCCC COP26. Clydebank Declaration for green shipping corridors. <https://www.gov.uk/government/publications/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shippingcorridors/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shipping-corridors>.
- [30] 交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报. 2022-05-25. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html.
- [31] 邢辉,段树林,黄连忠,刘勤安.中国水路运输业能源消耗与废气排放测算. *中国环境科学*, 2016, 36(6):1913-1920.