



自然资源保护协会  
NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL



交通运输部水运科学研究院  
China Waterborne Transport Research Institute

# 低零排放船用燃料的 发展概况及对我国的启示

冯淑慧 彭传圣

2022年9月

## 致谢

---

我们感谢抽空审阅本报告并提供了宝贵信息和建议的同行，包括程世东（发改委综合运输研究所）、Barbara Finamore（牛津能源研究所）、Tristan Smith（伦敦大学学院）、Faig Abbasov（欧洲交通与环境机构）、冒晓立和 Bryan Comer（国际清洁交通委员会）以及 Michael Walsh（国际顾问）。我们也感谢 Dorthe Jacobsen 和 Peter Kirkeby（曼恩能源方案）对替代燃料解决方案章节提供了很多有用的信息。我们特别感谢自然资源保护协会的吴琪和杨君帮忙审阅本报告。

## 自然资源保护协会

自然资源保护协会（NRDC）是一家国际公益环保组织，成立于 1970 年。NRDC 拥有 700 多名员工，以科学、法律、政策方面的专家为主力。NRDC 自上个世纪九十年代中起在中国开展环保工作，中国项目现有成员 40 多名。NRDC 主要通过开展政策研究，介绍和展示最佳实践，以及提供专业支持等方式，促进中国的绿色发展、循环发展和低碳发展。NRDC 在北京市公安局注册并设立北京代表处，业务主管部门为国家林业和草原局。

## 交通运输部水运科学研究院

交通运输部水运科学研究院成立于 1956 年，是我国成立最早、规模最大的水路交通运输科研机构，也是唯一的综合性水路交通运输科研机构。经过多年发展，水运院形成了以“水运经济、安全应急、环保节能、现代物流、智能水运”五大科研领域为主、基本全面覆盖水路交通运输各个方向的专业体系，集咨询服务、装备研发、工程设计、航运服务、交流培训五大产业板块于一体的业务领域。水运院拥有 400 多名员工，包括运输经济学家、计量经济学家、交通 / 运输工程师、法律、政策和制度专家、信息和通信技术专家和培训专家。

# 目录

执行摘要 .....	1
1. 全球气候行动的紧迫性 .....	6
2. 国际海事组织温室气体控制的初步战略 .....	8
3. 替代燃料解决方案概述 .....	11
3.1. 替代船用燃料 .....	14
3.1.1. 氢基燃料：氢和氨 .....	14
3.1.1.1. 背景 .....	14
3.1.1.2. 应用 .....	15
3.1.2. 甲醇 .....	20
3.1.2.1. 背景 .....	20
3.1.2.2. 应用 .....	22
3.1.3. 天然气（甲烷） .....	25
3.1.4. 电力 .....	28
3.1.4.1. 背景 .....	28
3.1.4.2. 应用 .....	28
3.2. 碳基合成燃料：合成碳氢化合物燃料和生物燃料 .....	29
3.2.1. 合成碳氢化合物燃料 .....	29
3.2.1.1. 背景 .....	29
3.2.1.2. 大气污染影响 .....	32
3.2.1.3. 应用状态 .....	32
3.2.2. 生物燃料 .....	32
3.2.2.1. 背景 .....	32
3.2.2.2. 应用 .....	34
3.3. 小结：对比各类替代船用燃料的表现 .....	36
4. 对中国的启示 .....	39
4.1. 开发和应用低零碳船用燃料实现航运脱碳的路径逐渐明晰 .....	39
4.2. 中国造船企业和发动机企业开展的试点项目和研究为开发低零排放解决方案 奠定了基础 .....	41
4.3. 确立针对性发展措施，确保低零排放的船用燃料的充足供应 .....	42
4.4. 替代燃料的成本较高是一个主要挑战，但最大限度地提高能源效率可以减少 转型中的障碍 .....	43
4.5. 综合考量替代燃料的发展方案，投资更具长远发展价值的燃料类型 .....	44

5. 建议.....	46
5.1. 制定适用于国内船队的温室气体和能源效率规章条例.....	47
5.2. 支持一批试点港口地区扩大低零温室气体排放燃料动力船舶示范项目.....	48
5.3. 确保航运成为中国向碳中和经济转型的重要组成部分.....	49
6. 结束语.....	50
参考文献.....	51

## 图录

图 1. 主要气候污染物对全球变暖的贡献.....	7
图 2. 国际海事组织应对气候变化行动.....	9
图 3. 与欧洲的船用轻柴油和液化天然气价格相比，可再生氢、氨、电制甲醇、 电制柴油和电制液化天然气的平准化成本.....	14
图 4. 氢和氨生产来源.....	19
图 5. 甲醇生产来源.....	22
图 6. 柴油和双燃料发动机的全生命周期二氧化碳当量 (CO <sub>2</sub> e) 排放.....	26
图 7. 生产碳基电制燃料的潜在途径.....	30
图 8. 使用不同电力来源的电制甲烷温室气体强度.....	31
图 9. 先进生物燃料、传统生物燃料和化石基替代燃料的全生命周期温室气体排放.....	34

## 表录

表 ES1. 替代燃料的气候与环境表现、成本以及采用这些能源载体的优点和挑战.....	4
表 1. 常规和替代船用燃料的特性.....	12
表 2. 氨、氢、甲醇和甲烷燃烧产生的大气排放和泄漏特性.....	13
表 3. 由亚洲造船商设计或建造的以氨为燃料的船舶.....	17
表 4. 由亚洲造船商建造的以甲醇为燃料的船舶.....	24
表 5. 替代燃料的气候与环境表现、成本以及采用这些能源载体的优点和挑战.....	36

# 执行摘要

包括中国在内的多个国家今年夏天经历了严重洪水和创纪录高温热浪，反映出全球气候变化所导致的极端天气事件正在变得日益频繁。地球的平均温度已经比工业化前水平上升了 1.1°C，预计到本世纪末升幅将达到 2.4°C。为了避免气候变化对人类社会造成不可逆转的威胁，2021 年第 26 届联合国气候变化大会通过的《格拉斯哥气候协定》重申了《巴黎协定》的温度控制目标，承诺努力将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上 1.5°C 的范围内。根据《格拉斯哥气候协定》，为实现这些目标，全球需要到 2030 年将二氧化碳排放量在 2010 年的水平上减少 45%，并在本世纪中叶左右实现零排放，同时大幅减少其他温室气体的排放。

为积极参与全球应对气候变化的治理，中国已把协同控制空气污染和应对气候变化影响提升到其政策议程的首位。力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和，同时深入打好污染防治攻坚战已成为中国经济、发展和环境规划的总体目标。

尽管目前《巴黎协定》没有涵盖国际航运的排放，但若把国际航运视为一个国家，其二氧化碳排放量将位居世界第六。同时航运业的甲烷排放量（一种强效温室气体）从 2012 年到 2018 年激增了 150%。国际海事组织 (IMO) 已承诺到 2050 年国际航运年度温室气体总排放量将至少比 2008 年减少 50%，但这一目标被质疑远未达到实现《巴黎协定》1.5°C 目标所需的力度。

为了填补这一空白，许多国家和私营部门已采取一系列行动促进低排放或零排放（简称低零排放）船用燃料和推进技术的开发和应用，并刺激市场对这些燃料和技术的需求。最值得注意的行动包括主要海运客户呼吁航运企业提供更多气候友好型海运服务，以及越来越多的金融机构和保险公司开始根据脱碳标准跟踪和评估他们的航运贷款和保险的投资组合。

中国作为世界航运大国可以在支持航运业向零排放转型方面发挥重要作用。为了支持政策制定者制定推动航运业加快低或零排放转型的行动，本文回顾了船用替代燃料解决方案的最新发展，并提供了政策建议，以促进这些新燃料和技术的采用，并实现国家的碳中和、空气质量改善和经济发展目标。

迄今为止，氨、氢、甲醇、天然气和电力是获得最多关注的船用替代能源载体。这些能源

载体如使用可再生资源生产，可以达到低零排放(如表ES1所示)。它们现处于不同的发展阶段，在用作船用燃料方面各有优势和挑战。

虽然哪一种能源载体将在未来占据主导地位尚未有定论，但迄今为止启动的研究和示范项目表明，电池推进系统和氢燃料电池系统用于内河和短途沿海船舶上技术上可行，也是可扩展应用的零排放技术。船舶驱动技术直接使用电力或氢燃料可避免生产更复杂的电制燃料(如电制氨、电制甲醇和电制甲烷)所产生的能量损失，能够让航运业以更节能的方式利用可再生能源减排降碳。对于远洋航运，因为可再生甲醇和氨具有更高的能量密度并且相对更易于运输和在船上储存，这两种燃料已成为未来十年内最有前途的近零排放船用燃料。长远来看，氢能可以是一种更有优势的零排放解决方案：其在泄漏时对环境的潜在威胁最小。但氢能应用于船舶有先决条件：沿着繁忙的航道并最好在容易获得廉价可再生能源的地点，战略性地建设加氢基础设施。

航运业成功向零排放转型不仅需要零排放燃料，还需要零排放船舶和燃料加注基础设施。为了让全球航运能在本世纪中叶达到零排放，航运业将不可避免地需要建造大量零排放新船，并在2030年代开始大规模改造在役船舶以使用零排放燃料。中国是世界上为数不多的同时拥有领先造船业以及巨大可再生能源发电潜力的国家之一，也是拥有多个世界最大港口的重要航运枢纽。这些因素使中国处于有利地位，可以通过以下方式推动航运业的能源转型：

- 研发零排放船舶及其关键部件(例如燃料电池、电池和替代燃料发动机)，
- 加快研发和生产低零排放船用燃料的技术(例如电解槽)，并扩大燃料生产能力，以及
- 建立港口基础设施以供应低零排放燃料。

因此，全球对低零排放航运服务需求的不断增长将会为中国的造船、航运和港口行业带来宝贵的机遇。为了帮助这些行业抓住这一机遇，中国应制定政策来促进零排放燃料和推进技术的开发和应用，验证其技术和商业可行性，并加快通过法规和指引以确保这些新燃料的安全使用。这些政策可包括：

1. 针对本地船舶实施温室气体和能效法规，包括：
  - 在船用发动机排放标准中增加温室气体相关要求，确保在发动机设计时能考虑协同控制空气污染物和温室气体排放
  - 为新船和在用船舶制定能效要求，以降低转型到替代燃料的成本障碍
  - 根据全生命周期排放量为船用燃料制定温室气体强度标准，以推动真正低零排放燃料的生产和使用

2. 支持试点港口地区扩大低零温室气体排放燃料船舶示范项目，包括：

- 增加资金以扩大示范项目规模
- 提供资金支持开发生产和供应低零排放燃料的核心技术
- 为选定的国内船种设定长期零排放目标
- 参与双边或多边航运绿色走廊计划

3. 确保航运业成为推动中国碳中和经济转型行动的一个组成部分，从而使航运业能利用新开发的可再生能源和可再生氢的供应。

鉴于全球航运业向零排放能源转型势在必行，支持中国的造船业、航运业和港口业建立生产、使用和供应零排放燃料和技术的能力对于保持这些行业的全球竞争力至关重要。这样做不仅可确保中国保持其作为全球航运大国的地位，还可以使中国航运业能够轻松获得应对国内外减排降碳挑战至关重要的低零排放燃料和技术。

表 ES1. 替代燃料的气候与环境表现、成本以及采用这些能源载体的优点和挑战

能源载体	相对于船用轻柴油，全生命周期温室气体排放比例		使用过程相对于常规燃料的大气污染物排放量			产自可再生能源的电力燃料相对船用轻柴油价格的成本比例 <sup>h</sup>		技术、安全和燃料供应需考虑的因素	
	化石燃料 <sup>a</sup>	产自可再生能源的电力燃料 <sup>b</sup>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	2030	2050	优势	挑战
液氨	140%	6%	0 <sup>d</sup>	可能比常规燃料多，需要应用NO <sub>x</sub> 减排措施	0 <sup>d</sup>	3.2	2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>低可燃风险</li> <li>容易储存和运输</li> <li>生产可再生电制氨的成本比生产其他可再生电制燃料低</li> <li>已在全球交易的商品</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>毒性很高</li> <li>可能产生N<sub>2</sub>O 排放和氨逃逸</li> <li>发动机发展处于设计阶段</li> <li>燃烧特性差</li> <li>缺乏燃料供应基础设施</li> <li>还未有安全法规</li> <li>对某些物料有腐蚀性</li> </ul>
液氢	166%	0%	0 <sup>d</sup>	根据发动机的设计而变化	0 <sup>d</sup>	3.7	2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>低毒性</li> <li>如泄漏对环境影响低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高储存和运输成本</li> <li>爆炸风险</li> <li>缺乏燃料供应基础设施</li> <li>纯氢气发动机刚推出市场，营运经验有限</li> </ul>
甲醇	101%	1%	比常规燃料低 <sup>e</sup>	~35% <sup>f</sup> 至100% <sup>g</sup>	0 <sup>d</sup>	4.5	3.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲醇动力发动机已商业化</li> <li>容易储存和运输</li> <li>如泄漏对环境危害也比传统燃料低</li> <li>只需轻微改造便能使用现有燃料供应基础设施</li> <li>改造现役发动机使用甲醇的费用比其他替代燃料低</li> <li>国际海事组织已通过临时安全导则</li> <li>已在全球交易的商品</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比传统燃料需要更多储存位置</li> <li>爆炸风险高</li> <li>有毒，但比氨毒性低</li> <li>可再生电制甲醇的生产成本比其他可再生电制燃料高</li> <li>对某些物料有腐蚀性</li> </ul>

液化天然气	83-103% <sup>c</sup>	2-12% <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	~75% 至 100% <sup>g</sup> (狄塞尔循环)	0 <sup>d</sup>	4.0	2.9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 毒性低</li> <li>• 天然气动力发动机已商业化</li> <li>• 几个大海港已有燃料供应基础设施</li> <li>• 国际海事组织已通过安全导则</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 易燃性高</li> <li>• 甲醇逃逸和上游甲醇泄漏可大幅抵消燃烧时二氧化碳减排的效益</li> <li>• 生产和使用可再生电制甲烷的成本比生物甲烷的可扩展性值得怀疑</li> <li>• 储存和运输成本高</li> </ul>
锂离子电池	取决于使用电力的温室 气体强度	0	0	0	0	不适用	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 随着各国可再生能源占比增加全生命周期排放会越来越低</li> <li>• 技术成熟</li> <li>• 比内燃机更静和无气味</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 能源密度非常低；有限的续航力与电池能量将是约束全电动船舶发展的主要因素</li> <li>• 缺乏充电基础设施</li> </ul>	

来源：温室气体 – Lindstad et al. (2020), Lindstad et al. (2021), Pavlenko et al. (2021), Lindstad et al. (2020) and Martin (2021); 大气污染物 – Zhou et al. (2020), Anderson et al. (2015), Lewis (2021), Fridell et al. (2021), RINA (2020), Maritime Knowledge Center et al. (2018), Ellis (2020); 成本 – Ash et al. (2020); 其他考虑 – Kass et al. (2021); Alfa Laval et al. (2020).

PM 为颗粒物, NO<sub>x</sub> 为氮氧化物, SO<sub>x</sub> 为硫氧化物, N<sub>2</sub>O 为一氧化二氮。

**备注：**

- 产自天然气的氨、氢和甲醇的全生命周期排放。对于液化天然气, 包括燃料生产和燃烧过程的排放。
- 假设最佳情景, 则所有电制燃料均产自可再生能源, 而且生产电制甲醇和电制甲烷使用的碳原料是通过空气捕集获得。
- 上和下界分别代表奥托循环和狄塞尔循环发动机的排放量。
- 不包括先导燃料的大气污染物排放; 先导燃料的排放量与其使用量成正比。
- 发动机颗粒物排放量因采用不同的发动机燃烧技术而异 (Maritime Knowledge Center et al., 2018, Fridell et al., 2021)。
- 未采用 NO<sub>x</sub> 排放控制技术以优化能效 (Ellis, 2020); 由于甲醇燃烧温度低, NO<sub>x</sub> 排放量相对使用传统船用燃料低 (RINA, 2020)。
- 若应用 NO<sub>x</sub> 排放控制措施, 发动机设计可设定以最优化能效和减少颗粒物排放为目标, NO<sub>x</sub> 排放量会与传统船用燃料相当。NO<sub>x</sub> 排放控制措施包括选择性催化还原系统、废气再循环系统; 甲醇动力发动机还可使用燃料加水技术减少 NO<sub>x</sub> 排放。下界代表无使用 NO<sub>x</sub> 排放控制措施情况下发动机排放水平。
- 成本比率定义为生产电子燃料的平准化成本相对 2020 年 11 月 24 日在鹿特丹销售的船用轻柴油价格的平准化成本比率 (<https://shipandbunker.com/prices>)。

# 全球气候行动的紧迫性

为了避免气候变化可能对人类社会和地球造成的不可逆转的威胁，197个国家于2021年通过了《格拉斯哥气候协定》，重申了《巴黎协定》的温度控制目标，同时承诺努力将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上1.5°C的范围内。《格拉斯哥气候协定》承认，要实现这些目标，就需要到2030年将二氧化碳(CO<sub>2</sub>)排放量在2010年的水平上减少45%，并在本世纪中叶左右实现零排放，同时大幅减少其他温室气体的排放(UNFCCC, 2021年)。地球的平均温度已经比工业化前水平上升了1.1°C，如果不做改变的话，到本世纪末地球的平均温度将比工业化前水平上升2.4°C，且极端天气已在世界各地肆虐，因此，在未来十年及以后采取进一步更具雄心的行动以增大减排力度至关重要(Climate Action Tracker, 2021)。

国际航运目前不包括在《巴黎协定》的国家承诺范围内，但其在2018年排放了超9亿吨二氧化碳，排放规模超过了除世界5大排放国之外的任何一个国家。除二氧化碳之外，航运也排放甲烷。2012年至2018年，由于使用液化天然气(LNG)动力的船舶(包括LNG运输船)数量增加，且使用柴油/LNG双燃料船用发动机的船舶数量显著增加，国际航运的甲烷排放量急剧上升150%(Faber et al., 2020年)。相对于二氧化碳在大气中的滞留时间，甲烷的“寿命”要短得多，但甲烷是一种更强大的温室气体。自前工业化时代以来，甲烷对全球变暖的贡献率约为四分之一。因此，甲烷已成为全球应对气候变化努力的一个关键控制目标(图1)(IPCC, 2021年)。

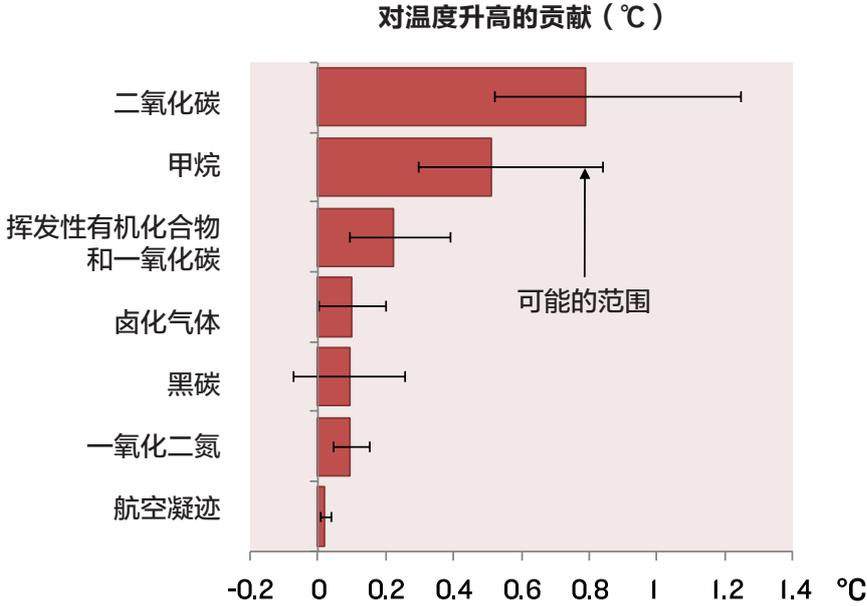
我国正在坚定不移地推进双碳目标<sup>1</sup>，还需要进一步加强生态环境保护，深入打好污染防治攻坚战<sup>2</sup>，因此，当前我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期<sup>3</sup>。在这一背景下，研究、开发并推广应用有利于减少污染物排放的低排放乃至零排放(简称低零排放)船用燃料，已成为推进我国航运适应国际应对气候变化和我国生态文明建设要求的重要途径。

1 详情请参阅中国政府网站：[http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm)

2 详情请参阅中国政府网站：[http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content\\_5649656.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-11/07/content_5649656.htm)

3 详情请参阅中国政府网站：[http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/01/content\\_5604364.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-05/01/content_5604364.htm)

图 1. 主要气候污染物对全球变暖的贡献



数据来源: IPCC (2021)

数据是 2010-2019 年相对于 1850-1900 年变暖的贡献。

## 2. 国际海事组织温室气体控制的初步战略

为了遏制航运温室气体排放，国际海事组织 (IMO) 成员国于 2018 年 4 月通过了一项减少国际航运温室气体总量的初步战略，旨在实现《巴黎协定》的目标。初步战略设定了以下几个层次的目标<sup>4</sup>。

- **新造船舶：**通过加强能效设计指数 (EEDI) 的要求，降低碳强度 (以单位运输工作的二氧化碳排放量衡量)。
- **在役船舶：**通过到 2030 年将单位运输工作<sup>5</sup>的二氧化碳排放量在 2008 年的基础上至少减少 40%，并争取到 2050 年减少 70%，从而改善航运的碳强度。
- **整个船队：**促使航运的温室气体排放尽快达到峰值，到 2050 年将年度温室气体总排放量比 2008 年减少至少 50%，同时努力在符合《巴黎协定》温控目标的减排路径上逐步消除航运温室气体排放。

自初步战略正式通过以来，国际海事组织已开始审议一系列近期、中期和远期的备选措施，目的是在近期内促进港口和船舶能源效率的提高，支持中远期采用替代低零排放燃料<sup>6</sup>和创新减排机制 (如图 2 所示)。

---

4 详情请参阅国际海事组织网站：<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>

5 航运单位运输工作的二氧化碳排放量目标以国际航运碳强度平均值估算。

6 本文提及的低或零碳燃料是指全生命周期 (从油井到尾流温室气体) 排放近乎零或零的船用燃料。

图 2. 国际海事组织应对气候变化行动



改编自 Oftedal (2020).

2019 年, 国际海事组织同意加强并提前实施能效设计指数( EEDI ), 对包括天然气运输船、普通货船、液化天然气运输船和集装箱船在内的几种新造船舶设定了能效标准。2021 年, 国际海事组织通过了另外两项近期措施, 即基于新的现有船舶能效指数( EEXI )的技术要求和基于碳强度指标( CII )的操作要求。EEXI 是以每艘现有船舶的设计参数衡量其能源效率, 并对比基准值得出其能源效率表现。CII 对每艘船的碳强度( 由实际年度燃料消耗、航行距离和运输能力得出 ) 进行评分, 并跟踪一段时间后的改进进展<sup>7</sup>。

7 现有船舶能效指数测量的是每单位运输工作的二氧化碳排放量( 以每吨英里克二氧化碳为单位 ), 只考虑一艘船的设计参数, 就像 EEDI 测量新船一样。现有船舶能效指数以主机功率、船舶的参考速度和台架试验燃油消耗量等 3 个因素为基础。为了提高全球船舶的能源效率, 国际海事组织规定船舶的现有船舶能效指数必须低于设定的最大阈值水平。该规定将于 2023 年 1 月生效, 追溯到适用于所有 400 总吨及以上的船舶。碳强度指标以船舶的年耗油量和行驶距离为基础, 监管船舶实际操作或实际生活中的二氧化碳排放。从 2023 年 1 月 1 日起, 所有总吨位在 5000 吨以上的船舶每年都要申报燃料消耗量。根据船舶的年度碳强度指标, 将给予从 A 到 E 的评级。有关现有船舶能效指数和碳强度指标的更多信息参见: <https://www.napa.fi/the-basics-of-eexi-from-2023-all-existing-ships-must-meet-new-energy-efficiency-standards/>, <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/answers-to-frequent-questions.html> 及 <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/answers-to-frequent-questions.html>。

虽然 EEXI 和 CII 是推动在役船舶提高能效的重要工具，但一些国际海事组织成员国、航运公司和环保组织担心，给这两个指标设定的要求相当宽松<sup>8</sup>，不足以促使能效提高到国际海事组织的 2030 年目标水平。这可能导致中远期措施（比如加快应用低或零碳燃料）在推动航运业实现国际海事组织 2050 年及以后的目标方面承受更大压力 (Safety4Sea, 2021; Valleur, 2021; Smith et al., 2021)。

即使针对在役船舶的要求符合国际海事组织 2030 年的目标，围绕国际海事组织既定目标是否具有足够雄心的质疑声越来越大。越来越多的国家、联合国和主要的航运利益攸关方都注意到，国际海事组织目前制定的 2050 年温室气体排放目标远低于全球二氧化碳净零排放的要求。而净零排放是科学家们警告为避免灾难性的气候影响而需要达到的要求 (Harvey, 2021)。联合国秘书长、12 个国家以及代表整个海洋价值链的 230 多个行业领袖和组织已呼吁国际海事组织将目标提升至到 2050 年全面脱碳 (Abnett et al., 2021; Global Maritime Forum, 2021)。

目前订购的新船很可能到 2050 年仍在运行，因此有必要在 2030 年前加快开发和应用低零排放燃料和推进技术，使国际航运符合《巴黎协定》将全球平均气温升幅控制在比工业化前水平高 1.5°C 范围内的目标。

作为世界领先的海洋国家之一，中国可以成为推动发展和采纳低零排放船舶解决方案的重要力量。过去十年，通过扩大光伏电池板和电池的生产规模并降低成本，中国在加速国内和世界其他地区使用可再生电力和电动汽车方面发挥了关键作用。中国可以用同样的方式支持其造船企业、港口设备制造商和潜在的燃料供应商在低零排放航运价值链的各个环节建立专业知识，促使全球航运业在本世纪中叶实现零排放转型。

为了帮助中国决策者采取行动以促进低零排放航运，本报告概述了最常讨论的替代船用燃料解决方案，探讨了在中国应用这些燃料的机遇和挑战，并分析了可能通过哪些政策来促进发展和采用低零排放船用燃料解决方案。

---

8 预计约 70% 的能效设计指数实施后的船舶将符合目前的现有船舶能效指数要求 (Veritas Bureau, 2021 年)，分析表明，2019 年至 2026 年碳强度指标的年度改进不足 2%，远远低于国际海事组织 2050 年目标所需的削减量 (Comer, 2021a)。

# 3. 替代燃料解决方案概述

全球航运几乎完全由化石燃料驱动。重燃料油 (HFO)、极低硫燃料油 (VLSFO) 和船用轻柴油 (MGO) 合计占国际、国内和渔业船舶燃料消耗的 96% 以上，液化天然气 (LNG) 约占 3% (Faber et al., 2021)。业界正在研究和试验一系列可以减少船舶温室气体排放的替代燃料和能源载体。表 1 列出了与常规燃料相比较最具前景的替代燃料 / 能源载体的特性。表 2 列出了这些替代燃料燃烧时空气污染物排放和泄漏的特性。表 1 列出的温室气体排放数据包含上游油井到油箱阶段 (WTT) 和下游油箱到尾流阶段 (TTW) 的温室气体排放。上游排放包括燃油开采、加工、储存、运输和加注时所产生的温室气体排放。

如表 1 所示，上述的替代燃料 / 能源载体若使用可再生电力以及可再生能源生产的原料生产（产自可再生能源的合成燃料，3.2 节有更详细讨论），其全生命周期温室气体排放会很低或近乎零。基于欧洲的研究，图 3 对比传统船用燃料现在的价格以及各种可再生替代燃料现在和未来预测的平准化成本。

本节概述了这些最受关注的替代燃料的特点，并讨论了与现有燃料基础设施和船舶兼容的合成燃料（电制燃料和生物燃料）的最新进展。

表 1. 常规和替代船用燃料的特性

能源载体	重量能量密度, 低位发热值 (MJ/kg)	体积能量密度 (GJ/m <sup>3</sup> )	储存压力 (bar)	储存温度 (°C)	全生命周期 (WTW) 温室气体排放量 (gCO <sub>2</sub> e/MJ)		相对于船用轻柴油 (MGO), WTW 温室气体排放比例 <sup>a</sup>		使用方式	
					化石燃料 <sup>b</sup>	产自可再生能源的合成燃料 <sup>c</sup>	化石燃料 <sup>b</sup>	产自可再生能源的合成燃料 <sup>c</sup>	内燃机	燃料电池
极低硫燃料油	41	38.7	1	20	92.1	—	101%		√	×
船用轻柴油	43	36.6	1	20	90.8	1.3	100%	1%	√	√ <sup>e</sup>
液氨	18.6	12.7	1 或 10	-34 或 20	126.7	5.3	140%	6%	√	√ <sup>e</sup>
液氢	120	8.5	1	-253	150.8	0	166%	0%	√	√
甲醇	19.9	15.8	1	20	92	0.9	101%	1%	√	√ <sup>e</sup>
液化天然气 (LNG)	50	23.4	1	-162	75.2 - 94	1.7 - 11.1	83 - 103% <sup>d</sup>	2 - 12% <sup>d</sup>	√	√ <sup>e</sup>
锂离子电池	0.9	2.4	不适用	不适用	取决于使用电力的温室气体强度				n.a.	n.a.

来源: 燃料特性: ABS (2019), Alfa Laval et al. (2020), de Vries (2019) 和 Manthiram (2017); 温室气体排放: Lindstad et al. (2020), Lindstad et al. (2021), Pavlenko et al. (2020) 和 Martin (2021)。

备注:

- a. 涵盖上游排放、燃烧排放和甲烷排放并包括二氧化碳、甲烷和一氧化二氮 (N<sub>2</sub>O) 等温室气体, 所有评估都基于 100 年的时间跨度 (全球变暖潜能值 GWP100)。假设氢用于燃料电池, 所有其他燃料都在内燃机中燃烧。
- b. 对于氨、氢和甲醇, 估算值是从天然气中提取燃料和液化天然气这两种常规燃料的全生命周期排放包括燃料生产和运输过程的排放以及其燃烧时的排放。
- c. 假设所有的电制燃料都是 100% 使用可再生能源生产的, 这代表最好的情况。对于船用轻柴油, 其全生命周期排放量是基于可再生电制柴油的数据。
- d. 下界估算代表了高压狄塞尔循环发动机的排放, 上界估算代表了低压奥托循环发动机的排放。
- e. 高温燃料电池, 如固体氧化物和熔融碳酸盐燃料电池, 可以在没有外部转换器的情况下直接使用液化天然气、船用轻柴油、氨和甲醇作为燃料。直接甲醇燃料电池以纯甲醇为燃料。更多关于不同类型燃料电池的信息参见 <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>。

表 2. 氨、氢、甲醇和甲烷燃烧产生的大气排放和泄漏特性

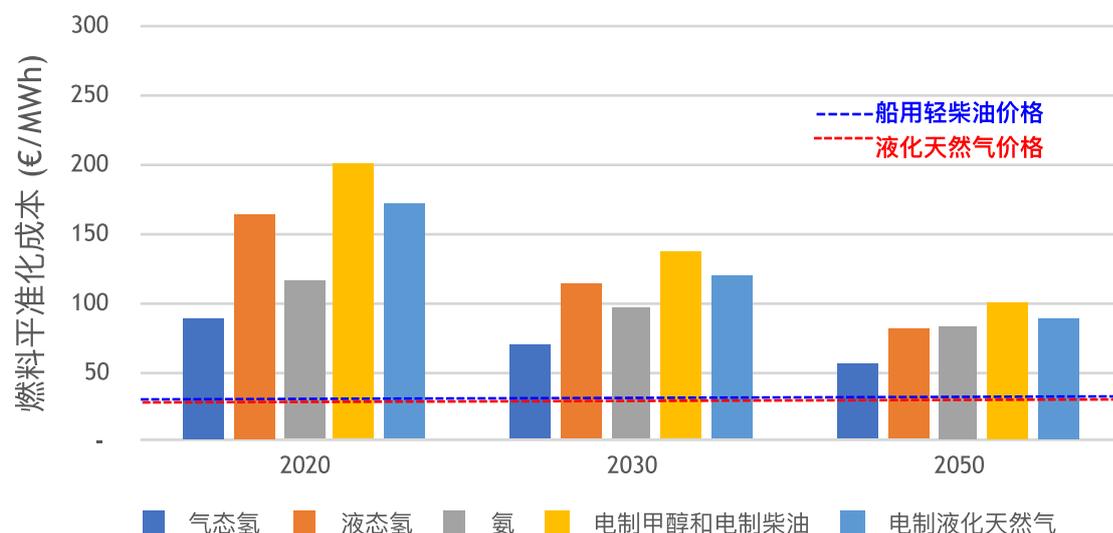
能源载体	使用过程相对于常规燃料的大气排放量			大量和突然释放燃料的泄漏特性					
	颗粒物	氮氧化物	硫氧化物	毒性	耗散降解率	易燃性 / 爆炸风险	机组人员空气置换和窒息	生态影响	泄漏污染物的清除
氨	0 <sup>a</sup>	可能比常规燃料多，需要后处理	0 <sup>a</sup>	很高		低	高	无长期影响； 泄漏区域附近的海洋生物可能会被烧伤或中毒	将在清理工作开始前消散
氢	0 <sup>a</sup>	根据燃料与空气的混合比例和其他发动机的设计而变化 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	低	快	很高	可能	无长期影响； 泄漏区海面的海洋生物可能会窒息或受冻	
甲醇	比常规燃料低 <sup>c</sup>	~35% <sup>d</sup> 至 100% <sup>e</sup>	0 <sup>a</sup>	高，但仅限于泄漏区域		高	低	无长期影响；水生生物接触泄漏物可能中毒	
液化天然气	0 <sup>a</sup>	~75% 至 100% <sup>e</sup> (狄塞尔循环) ~10% (奥托循环)	0 <sup>a</sup>	低	高	可能	泄漏区海面的海洋生物可能会窒息或受冻		

来源: Kass et al. (2021) Table 2; Zhou et al. (2020); Anderson et al. (2015); Alfa Laval et al. (2020); Lewis (2021); Fridell et al. (2021); RINA (2020); Maritime Knowledge Center et al. (2018); Ellis (2020)。

备注:

- a. 先导燃料是必需的，其使用导致与其使用量成正比的少量的颗粒物和硫氧化物排放。此处不包含先导燃料导致的污染物排放。
- b. 目前的氢燃烧技术还不成熟，氮氧化物的排放随控制峰值燃烧温度的方法而变化，如燃料与空气比和发动机设计（如燃料和空气预混）等。更多的讨论可以在 Lewis (2021) 中找到。
- c. 发动机颗粒物排放量因采用不同的发动机燃烧技术而异 (Maritime Knowledge Center et al., 2018, Fridell et al., 2021)。
- d. 未采用 NO<sub>x</sub> 排放控制技术以优化能效 (Ellis, 2020); 由于甲醇燃烧温度低, NO<sub>x</sub> 排放量相对使用传统船用燃料低 (RINA, 2020)。
- e. 若应用 NO<sub>x</sub> 排放控制措施, 发动机设计可设定以优化能效和减少颗粒物排放为目标, NO<sub>x</sub> 排放量会与传统船用燃料相当。NO<sub>x</sub> 排放控制措施包括选择性催化还原系统、废气再循环系统; 甲醇动力发动机还可使用燃料加水技术。下界代表无使用 NO<sub>x</sub> 排放控制措施情况下发动机排放水平。

**图 3. 与欧洲的船用轻柴油和液化天然气价格相比，可再生氢、氨、电制甲醇、电制柴油和电制液化天然气的平准化成本**



图表提取自 Ash et al. (2020)。

作为对比，蓝色和红色虚线分别表示船用轻柴油和液化天然气的价格（分别为每兆瓦时 30 欧元和 27 欧元）。这是截至 2020 年 11 月 24 日鹿特丹的价格，是 Ship&Bunker 公司提供的最新可资使用的 2020 年的数据 (<https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam>)。假设所有的电制燃料都是使用可再生电力生产的，用于合成碳氢燃料生产的碳是通过直接空气捕获的，捕获成本可以从 2020 年的每吨二氧化碳 222 欧元，下降到 2030 年的 105 欧元和 2050 年的 54 欧元。

## 3.1 替代船用燃料

### 3.1.1 氢基燃料：氢和氨

#### 3.1.1.1 背景

氢和氨都被认为是有前景的无碳能源载体，因为它们不含碳。当被用作为燃料电池的燃料时，氢和氨转化为电能只产生水。如果在内燃机中使用，氢只产生二氧化氮 (NO<sub>2</sub>) 和一氧化二氮 (N<sub>2</sub>O)。在内燃机中燃烧氨会产生一氧化二氮、二氧化氮和排出未燃烧的氨。此外，由于需要先导燃料来克服氨的不良燃烧特性<sup>9</sup>，因此先导燃料的空气污染特性需要结合其使用比例考虑在内 (Duynslaegher, 2011)。

<sup>9</sup> 由于氨的燃烧特性差，氨燃料发动机需要使用先导燃料。氨作为燃烧燃料不太理想的特性包括：自燃温度高、燃速低、可燃性极限窄和汽化热高 (Alfa Laval et al., 2020)。应该指出的是，大多数替代燃料，如液化天然气和甲醇，也需要使用先导燃料来启动燃烧。

氨燃烧副产品的管理尤其重要，因为它是有毒的，也是二次生成细颗粒物的前体物，同时也对土地和水有害，特别是会引起富营养化和土壤酸化（Wang et al., 2015; Shen et al., 2016）。故此需要对未燃烧氨的释放进行严格控制。此外，二氧化氮是生成臭氧的前体物，对人体健康有害，而一氧化二氮是一种威力强大的温室气体，其全球变暖潜能值 (GWP) 是二氧化碳的 300 倍。现有的后处理系统，如选择性催化还原 (SCR)，结合增效燃油喷射技术，似乎在控制二氧化氮、一氧化二氮和未燃烧氨排放方面颇有前景（Dimitriou and Javaid, 2020）。目前，评估和证明商业上可用的后处理系统的有效性研究正在进行之中。

由于氨对人类和海洋生物的毒性很高，极易水溶，且对空气质量和环境有恶劣影响（如表 2 所示），使用氨作为船用燃料需要进行安全规范，并制定适用特殊船舶设计要求和安全手册以避免氨泄漏，并在发生事故的情况下控制氨燃料的潜在泄漏。船级社<sup>10</sup>与发动机制造商在设计燃料储存和处理系统以及开发安全和减排措施方面发挥着主导作用<sup>11</sup>。

### 3.1.1.2 应用

氨和氢作为船用燃料的广泛应用取决于可兼容的船舶推进系统是否已为市场化做好准备，以及这些燃料是否有可靠的供应、安全的运输和处理。

与氢相比，氨被认为是远程海运应用的首选，因为它具有更高的能量密度，可以很容易地压缩并以液体的形式存储在常压罐（-34°C 时压力 1bar）或加压罐（20°C 时压力 10bar）中（de Vries, 2019）。此外，氨是一种已经在全球交易的商品（主要用于生产化肥）。目前世界各地有近 40 个港口出口氨和近 90 个港口进口氨（包括在南京和湛江），因此氨作为船舶燃料供应所需的一些基础设施（例如分销网络端口和储油罐）已经存在（Alfa Laval et al., 2020）。

另一方面，由于氢气的体积能量密度低和船上存储成本高，短期内被认为在小型船舶上应用更具可行性。与其他替代燃料相比，船载氢燃料的储存成本昂贵，这为广泛应用氢作为船用燃料带来了一个困难的选择题——即是选择较小的储存罐但需经常补充燃料，还是选择较大的储存罐但承担更高燃料储存设备的资本和运营成本。这样的权衡使得氢能的竞争力低于其他替代燃料，在近期内燃料加注基础设施尚未广泛建立的情况下尤其如此。

---

10 船级社是建立和维护船舶及航运设备相关技术标准以保障航行安全和保护环境的非政府组织。船级社通常以船舶监造和定期检查等措施确保船舶和设施持续符合规范要求。

11 查看案例：Guide for Ammonia Fueled Vessels issued by ABS ([https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/325\\_guide\\_ammonia\\_fueled\\_vessels/ammonia-fueled-vessels-sept21.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/325_guide_ammonia_fueled_vessels/ammonia-fueled-vessels-sept21.pdf)) and Ammonia as a Marine Fuel Safety Handbook issued by DNV (<https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2021/01/Ammonia-as-a-Marine-Fuel-Safety-Handbook.pdf>)。

研究显示，几乎所有服务于美国西海岸与中国之间的集装箱长途航线，只需在船载燃料存储容量（牺牲 5% 的货物空间）或操作（添加一个加注站）方面进行一些小的调整，就可以使用氢作为动力（Mao et al., 2020）。后续研究表明，液体氢燃料电池搭配风力助航可以在中国、北美和北欧的 3 艘尺寸各异的散货船上替代传统燃料，只有 1 艘船需要额外占用一小部分货运空间来储存氢燃料（Comer et al., 2022）。这些研究表明，氢燃料电池可以为沿海和远洋航线的大型船舶提供动力，而且若能策略地规划主要航道上的补给点提高补给频次，其成本将更有竞争力。

使用氢或氨作为船用燃料仍处于初级阶段。虽然目前还没有运行中的氨燃料动力船舶，但推进系统和船舶设计方面的开发进展迅速。全球最主要船用动力装置制造商之一的瓦锡兰宣布，2021 年已完成能使用含至少 70% 氨混合燃料的船舶发动机测试，到 2023 年将推出使用纯氨的船舶发动机原型机（Wärtsilä, 2021）。全球两大二冲程发动机制造商——曼恩能源方案公司 (MAN Energy Solutions) 和温特图尔发动机有限公司 (WinGD, 中国船舶工业集团公司的子公司)——计划分别在 2024 年和 2025 年推出氨燃料发动机，曼恩公司还计划到 2025 年推出一套在役船舶改造方案（Bahtić, 2021; Lindstrand, n.d.）。

为满足客户和金融机构对零排放航运服务日益增长的需求，越来越多的船东正在订购以氨为燃料或在新造船阶段就为将来改装成氨燃料动力船舶或氨燃料预留（ammonia-ready）船舶。世界上第一艘可以部分使用氨的船舶最早将于 2023 年末下水 (Maritime Executive, 2021)。比利时油船公司 Euronav NV 也在建造两艘新的氨燃料预留船舶，将于 2023 年和 2024 年交付<sup>12</sup>。韩国、中国和日本的主要造船厂正在竞相设计新的氨燃料动力船以满足需求，这些船已获得船级社原则性认可 (Approval in Principle, AiP)，包括超大型集装箱船、超大型原油船、超大型气体船、氨燃料加注船、散货船以及一艘将于 2024 年商业化的远洋油船（见表 3）<sup>13</sup>。为了确保氨燃料动力船领域的竞争优势，韩国造船企业三星重工和大宇造船与海洋工程公司将分别在 2024 年和 2025 年实现氨燃料推进系统的商用化<sup>14</sup>。

12 参见新闻报道：<https://www.greencarcongress.com/2021/07/20210707-euronav.html>.

13 参见新闻报道：<https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-fueled-ships-entering-the-design-phase/>; [http://news.sohu.com/a/500112987\\_624484](http://news.sohu.com/a/500112987_624484); <https://en.yna.co.kr/view/AEN20200924003200320>.

14 参见新闻报道：<http://www.ajudaily.com/view/20210525131541139>; <https://www.kedglobal.com/newsView/ked202108190015>.

表 3. 由亚洲造船商设计或建造的以氨为燃料的船舶<sup>15</sup>

已获得原则性认可的氨动力船舶设计				
造船厂 / 船舶设计机构	国家	获批准的概念设计	船级社	批准日期
上海船舶设计研究院 (SDARI)	中国	散货船 (180,000 DWT)	LR	2019 年 12 月
大连船舶重工集团		超大型集装箱船 (23,000 TEU)	LR	2019 年 12 月
江南船厂		大型气体船	LR	2020 年 10 月
江南船厂		液化气体船	LR	2021 年 3 月
SDARI		风力助航集装箱船 (2,500 TEU)	Bureau Veritas	2021 年 5 月
上海外高桥造船公司		散货船	ABS	2021 年 8 月
中远航运船舶设计研究院 (MARIC)		特大型油轮 (VLCC)	CCS 及 ABS	2021 年 11 月
现代尾浦造船 (HMD)*		油船	LR	2020 年 7 月
三星重工 (SHI)	韩国	油船	LR	2020 年 10 月
大宇造船与海洋工程公司		超大型集装箱船 (23,000 TEU)	LR	2020 年 10 月
韩国船级社 (KR), KMS EMEC and Navig8		氨加注船 (8,000 m <sup>3</sup> )	KR	2021 年 3 月
SHI		VLCC	DNV	2021 年 8 月
韩国造船海洋工程 (KSOE), 韩国现代重工集团 (HHI) 及 HMD		氨运输 / 加注船 (38,000 m <sup>3</sup> )	KR	2021 年 12 月
KSOE, HHI 及 HMD		氨运输船 (60,000 m <sup>3</sup> )	KR	2021 年 12 月
新来岛造船厂及川崎汽船株式会社		日本	汽车运输船	ClassNK

15 参见新闻报道：<https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-fueled-ships-entering-the-design-phase/>; <https://www.xindep-marinenews.com/topic/yazaishuiguangli/24507.html>; [http://www.eworldship.com/html/2021/classification\\_society\\_0313/168947.html](http://www.eworldship.com/html/2021/classification_society_0313/168947.html); <https://www.163.com/dy/article/GA7IOSGG05521RL7.html>; <http://www.cansi.org.cn/cms/document/16594.html>; <https://www.offshore-energy.biz/aip-for-samsungs-ammonia-fuelled-tanker-design/>; <https://www.offshore-energy.biz/samsung-heavy-gets-aip-for-basic-design-of-ammonia-fuel-ready-ship/>; <https://www.lr.org/en/latest-news/lr-awards-aip-to-ammonia-fuelled-23000-teu-ultra-large-container-ship/>; <https://www.offshore-energy.biz/hyundai-mipo-dockyard-wins-lr-approval-for-ammonia-powered-ship/>; <https://pulsenews.co.kr/view.php?sc=30800028&year=2021&no=852515>; <https://www.maritime-executive.com/article/k-line-is-developing-an-ammonia-powered-car-carrier>; <https://splash247.com/iino-kaiun-orders-ammonia-carrier-at-hyundai-mipo-for-mit-sui-charter/>; <https://splash247.com/euronav-doubles-down-on-ammonia-fitted-tankers/>; <https://safety4sea.com/hoegh-autoliners-to-receive-four-more-multi-fuel-and-zero-carbon-ready-vessels/>; <https://www.maritime-executive.com/article/construction-begins-on-world-s-first-ammonia-ready-tanker>

已经订购的双燃料氨燃料预留 (Ammonia-Ready) 船舶				
船厂	国家	船舶类型 (规格; 预订艘数)	船东	交付日期
招商局重工	中国	汽车运输船 (9,100 CEU; 8)	Höegh Autoliners	2024-2026
新时代造船		苏伊士性油船 (1)	Avin International	未公布
现代尾浦船厂	韩国	氨运输船 (23,000 m <sup>3</sup> ; 1)	lino Kaiun	2023
现代重工集团		苏伊士性油船 (3)	Euronav	2023-2024
现代三湖重工		特大型油船 (1)		

LR= 英国劳埃德船级社, ABS= 美国船级社, CCS= 中国船级社, KR= 航船级社, DWT= 载重吨位, TEU= 标准箱, CEU= 乘载车辆数量。

\* 为韩国海洋工程公司所属的造船单位, 海洋工程公司是现代重工业集团的子公司。

氢燃料动力船舶开发的进展较为迅速。欧美和亚洲 (包括中国) 已经有 10 多艘以氢燃料电池为动力的船舶进行了海试或正在建造拟于 2025 年前交付, 这些船舶涵盖广泛的细分市场 (滚装船、海上服务船、货船、游轮、拖船、渡轮、旅游船)<sup>16</sup>。韩国和日本的燃料电池制造商 (包括现代汽车、丰田和东芝) 正在开发用于船舶的氢燃料电池推进系统, 计划最早于 2023 年底推出商用模式。韩日两国政府也正在大力投资建设氢经济<sup>17</sup>。

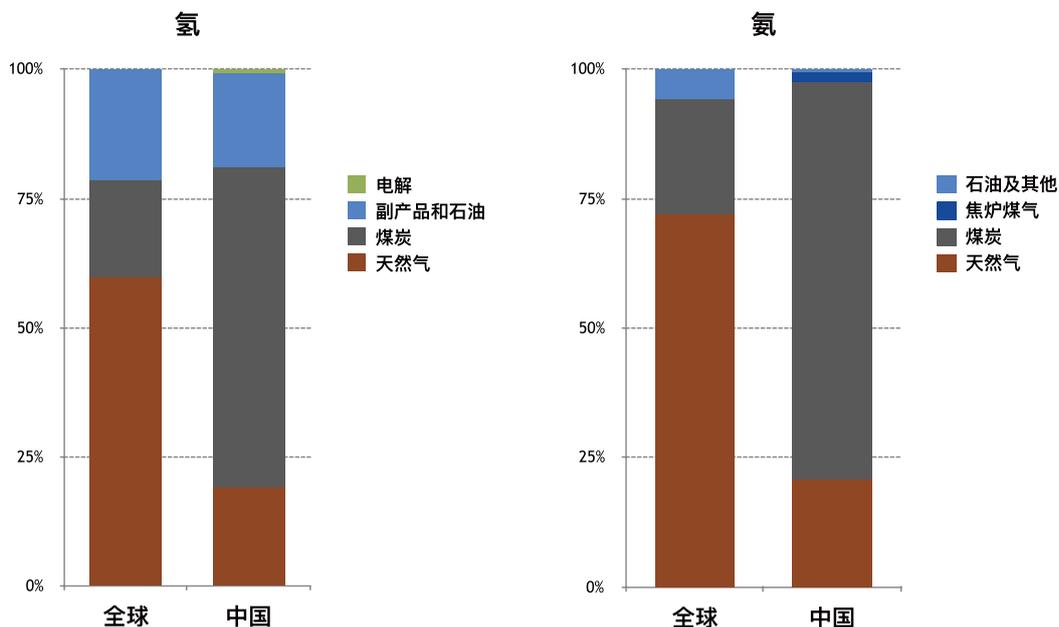
推动氢和氨燃料动力船舶的普及应用并确保这些船舶能大幅减缓气候变化影响的一个先决条件是要保障低零排放氢基燃料有可靠供应以及这些燃料能安全地储存、运输和加注。目前氨和氢的生产主要使用天然气和煤炭。在中国, 超过 60% 的氢产自煤炭, 19% 产自天然气; 超过四分之三的氨产自煤炭, 五分之一产自天然气 (如图 4 所示)。产自煤炭的氢和氨的全生命

16 其中包括中国的两艘游轮 (仙湖一号和蠡湖) 和挪威的一艘游轮, 加州的一艘渡轮 (Sea Change), 挪威和法国开始运营的两艘货船, 欧洲的一艘以甲醇燃料电池为动力的拖船, 以及日本的一艘旅游船。来源: [http://www.qibebt.cas.cn/xwzx/kydt/202101/t20210126\\_5877430.html](http://www.qibebt.cas.cn/xwzx/kydt/202101/t20210126_5877430.html); <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1700830362705871797&wfr=spider&for=pc>; <https://www.seetao.com/details/85599.html>; <https://meethydrogen.com/resource/hydrogen-fuel-cell-cruise-ship-for-norways-fjords>; <https://www.businesswire.com/news/home/20210818005674/en/5032461/SWITCH-Maritime-and-All-American-Marine-Announce-the-Launch-and-Operational-Trials-of-the-Sea-Change-the-World%E2%80%99s-First-Commercial-Vessel-Powered-100-by-Hydrogen-Fuel-Cell>; <https://flagships.eu/2021/04/07/worlds-first-hydrogen-cargo-vessel-set-for-paris-debut/>; <https://www.cnbc.com/2021/06/24/statkraft-lined-up-to-provide-green-hydrogen-for-zero-emission-ship.html>; <https://www.svitzer.com/press-and-media/news-and-releases/2021/11/08/maersk-svitzer-to-develop-carbon-neutral-methanol-fuel-cell-tug>; <https://www.maritime-executive.com/article/nyk-leads-project-to-develop-hydrogen-powered-ferry>.

17 参见新闻报道: <https://www.ship-technology.com/news/hyundai-motor-signs-pact-for-hydrogen-fuel-cell-propulsion-systems/>; <https://www.offshore-energy.biz/samsung-heavy-bloom-energy-push-forward-with-developing-fuel-cells-for-ships/>; <https://www.electrive.com/2021/02/02/corvus-to-develop-fuel-cell-system-for-ships/>; <https://www.maritime-executive.com/article/first-high-pressure-hydrogen-fueling-demonstrated-in-japan>.

周期排放高于直接燃烧常规船用燃料<sup>18</sup>。因此，为实现温室气体减排效益，中国需要扩大产自可再生电力或能源的氢基燃料应用于氢或氨动力船舶的范围。

图 4. 氢和氨生产来源



数据来源：IEA (2021b)；EV100 (2021)；Giddey (2020)；Tu (2020)；Dolan (2020)。

一个令人鼓舞的趋势是，全球利用可再生能源从水电解制氢（以下简称可再生氢）的能力预计将稳步增长。越来越多的国家支持推动发展可再生氢，将其作为替代煤或天然气的主要能源或原料，用于发电，为交通运输提供动力，以及作为钢铁、水泥、化肥等高碳强度产品生产的原料和热能来源。已制定低零排放氢（可再生氢和化石源氢的碳捕获和封存技术）发展战略的国家从 2019 年的 3 个增加到 2021 年的 17 个（IEA, 2021b）。

其中一些国家已经在利用不断增长的可再生氢生产能力为海运业服务。以挪威为例，该国政府资助企业沿着海岸建立 2 至 4 个氢能枢纽中心，为海运业供应绿色氢能 (Ocean Hyway Cluster, 2021)。在丹麦，马士基和 DFDS 公司（一家丹麦渡轮和物流公司）正在投资一家合成氨厂的开发，该合成氨厂将利用海上风力发电产生的氢来合成电制氨<sup>19</sup>。

18 煤制氨和制氢的二氧化碳排放量分别为 240g 二氧化碳当量 /MJ 和 166g 二氧化碳当量 /MJ (Brightling, 2018; ABS, 2021), 这远高于二冲程船用柴油发动机的全生命周期温室气体排放量 (90.8g 二氧化碳当量 /MJ) (见表 1)。

19 参见新闻报道：<https://www.maritime-executive.com/article/dfs-maersk-commit-to-launch-of-europe-s-largest-green-ammonia-plant>。

与此同时，主要港口对绿色氨能和绿色氢能全球物流链的开发也在进行中。几个工业财团目前正在为波罗的海和挪威的船舶建立运输和供应绿色氨能的物流链（Ship & Bunker, 2021; Mandel, 2021）。另外，澳大利亚、新加坡、日本和英国的公司在政府的支持下，正在研究建设用于船舶和港口的氢和氨的进出口和供应基础设施，同时制定使用绿色氢和氨的安全手册和要求<sup>20</sup>。

## 3.1.2 甲醇

### 3.1.2.1 背景

甲醇不含硫，热值比传统燃料低，导致其氮氧化物的排放量也较少，因此被宣传为清洁的船用燃料（表 2）。上世纪 80 年代和 90 年代，甲醇在美国加州的公路运输中已经试点应用。2012 年起，中国五个省份也开始甲醇试点应用，以解决空气污染和能源安全问题<sup>21</sup>。

甲醇作为一种更可行的低温室气体排放解决方案，已经引起了航运部门越来越多的兴趣，主要有以下几个方面的原因：

- 1) 甲醇容易储存和运输，对现有基础建设稍加改造即可建立其供应链：甲醇在环境温度和压力下是液态的，这使其可以比气体或低温燃料（如液氢、液化天然气）更容易且更低成本地运输和在船上存储。由于甲醇和柴油的物理性质相似，现有的常规燃料运输和储存基础设施只需要进行轻微改造，便可用于供应甲醇作为船用燃料（ETC, 2020a）。同时，过去几十年来，化工和其他行业已积累了在世界各地运输甲醇的经验。目前全球有 100 多个港口可以装卸甲醇，因此在很多港口有可运输和供应甲醇作为船用燃料的基础设施。
- 2) 以甲醇为燃料的双燃料发动机已经商业化：双燃料甲醇动力发动机现已被用于为 11 艘化学油轮、一艘滚装旅客渡轮和一艘引航船提供动力（Wärtsilä, 2020; Offshore Energy, 2020; Ellis, 2020）。

---

20 参见新加坡海事及港口管理局发布的 Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050 (<https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home/maritime-singapore/green-efforts/decarbonisation>) 和新闻报道：<https://www.miragenews.com/australia-partners-with-singapore-on-hydrogen-575583/>; <https://www.fuelsandlubes.com/singapore-explores-hydrogen-low-carbon-alternative/>; <https://www.itochu.co.jp/en/news/press/2020/200612.html>; <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/111521-h2-green-to-develop-hydrogen-and-ammonia-hub-in-shoreham-uk-to-decarbonize-port>.

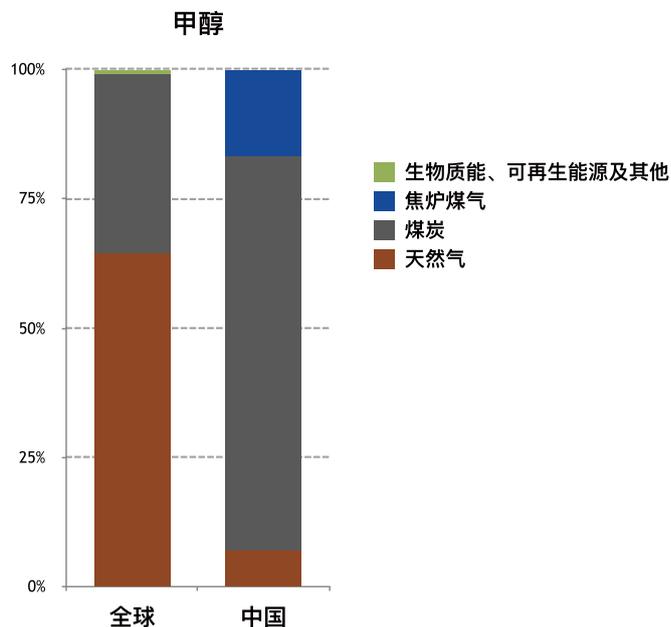
21 为了控制车辆空气污染，加州在 20 世纪 80 年代和 90 年代推出了一个示范项目，推广在乘用车上使用甲醇，在高峰时期在 100 多个地点建立了甲醇加注站，但没有成功。在中国，自 2012 年以来，在包括山西、陕西、上海、贵州、甘肃在内的 5 个省（市）启动了轻、重型汽车上使用甲醇的试点项目（Joyce, n.d.; Zhao, 2019）。这些试点被认为是成功的，八个部委联合发布了一份指导文件，在试点省份支持在汽车上扩大甲醇的使用（OFweek, 2019）。

- 3) 已有国际导则为安全应用甲醇作为船用燃料提供指引：国际海事组织批准了《船舶上使用甲醇和乙醇临时导则》(ShipInsight, 2020)。该导则已经被加入到国际海事组织的《船舶使用气体和其他低燃点燃料的国际安全规则》(IGF 规则)中，规定了使用甲醇 / 乙醇作为燃料的船舶机械、设备和系统的布置、安装、控制和监控标准。修订后的 IGF 规则允许航运公司在规划新建项目或改造现有船舶时考虑以甲醇为船用燃料。
- 4) 甲醇对人类健康和海洋环境的威胁比传统燃料和氨要小：甲醇有毒但其毒性较氨低。而且，与柴油或重燃料油相比，甲醇对环境的危害较小，因为其可以溶于水，在发生泄漏时可以迅速生物降解（参见表 2）。

至于对空气污染的影响，已有研究表明，在燃烧过程中向甲醇燃料中加水，可以帮助发动机达到国际海事组织 III 级（Tier III）氮氧化物排放控制标准，而无需使用更昂贵的选择性催化还原（SCR）或废气再循环系统（RINA, 2020）。因此，相对于需要使用 SCR 后处理装置控制二氧化氮和一氧化二氮排放的氨燃料，甲醇是近期内控制大气污染成本相对较低的船用燃料选择。

目前，使用甲醇作为低排放船用燃料最大的障碍不是船上的操作，而是找到低零排放甲醇的供应来源。与氢和氨一样，甲醇目前主要由天然气和煤炭生产（如图 5）。在中国，甲醇主要由煤炭生产（超过 75%），只有 7% 来自天然气（Tu, 2020）。产自天然气的甲醇全生命周期温室气体排放量略高于馏分燃料。煤制甲醇的排放量甚至更高。即使与碳捕获与封存技术应用（CCS）相结合，产自天然气的甲醇全生命周期的温室气体排放量也仅略好于馏分燃料（Martin, 2021）。因此，要想让甲醇燃料船舶对气候产生实质性的好处，就必须有稳定的低排放 / 零排放甲醇供应。

图 5. 甲醇生产来源



数据来源：Dolan (2020); Tu (2020)。

通过使用从可持续生物质原料中提取的甲醇（纤维素生物甲醇）（更多讨论见第 3.2.2 节），航运企业可达到大幅减少生命周期温室气体排放量的目的。然而，由于可持续获得的生物质原料供应有限，纤维素生物甲醇的生产受到限制，而航空等其他难以减排的部门也迫切需要生物质原料，因此生物甲醇是否可以进行规模化生产应用于航运业令人怀疑。

甲醇也可以将氢和碳化学合成生产。这类称为电制甲醇的合成燃料若是使用可再生氢和产自可再生原料的碳（如从空气中或可持续获得的生物来源捕获的碳）而生成，其排放可接近零（更多讨论见第 3.2.1 节）。虽然氢可以通过电解产生，但可再生能源生产的碳或二氧化碳则很难获得大量供应，而且成本很高。此外，电制甲醇的成本很高（如图 3）。目前，电制甲醇的成本大约是化石甲醇的两倍（Wittels, 2021）。因为需要额外的碳分子，低碳的电制甲醇总是比相当的氢和氨燃料（例如，在相同的电价下生产的氢和氨）更昂贵（Ash et al., 2020）。

### 3.1.2.2 应用

尽管在采购低排放甲醇方面存在挑战，但由于甲醇动力系统已发展成熟，并且国际海事组织已通过甲醇船用燃料的临时安全导则，甲醇动力船舶可于近期投入使用，因而不少航运公司视甲醇为零排放的下一步过渡燃料。

除了前面提到的已经在运行的甲醇动力船，在 2022-2024 年期间，将有几十艘新建造的甲醇双燃料船下水。世界最大的集装箱运输公司马士基预订了 2023 年交付的甲醇双燃料集装箱支线船和 2024 年开始投入使用的 8 艘 16,000 TEU 甲醇双燃料集装箱船。油轮航运公司 Proman Stena Bulk 将在 2022 年至 2023 年期间加入运营 6 艘新的甲醇双燃料油轮。世界最大的甲醇生产商和供应商 Methanex，除了目前已经投入使用 11 艘甲醇双燃料运输船外，到 2023 年将有 8 艘甲醇双燃料化学品运输船投入使用。总部位于新加坡的集装箱运输公司 X-Press Feeders 最近订购了 16 艘 1,176TEU 的新建造集装箱船，这些船可以使用甲醇和常规燃料<sup>22</sup>。

让在役船舶能够使用甲醇的改造解决方案也在开发中。瑞典船东集团 Stena 和瑞士甲醇生产商 Proman 正在联合开发一种用于在役远洋船舶的甲醇改装和供应解决方案 (Ajdin, 2021)。丹麦一个由海事工程公司、技术大学和可持续生物燃料生产商组成的团队也在开发一种可以适用于现有船舶柴油发动机的甲醇燃料系统 (F&L Asia, 2021) (表 4)。

---

22 参见新闻报道：<https://splash247.com/x-press-feeders-signs-for-16-methanol-powered-newbuilds/>.

**表 4. 由亚洲造船商建造的以甲醇为燃料的船舶<sup>23</sup>**

已经订购的甲醇双燃料动力船舶 *				
船厂	国家	船舶类型 (规格; 预订艘数)	船东	交付日期
广船国际 (GSI)	中国	油船 (49,900 DWT; 3)	Proman Stena Bulk	2022-2023
GSI		油船 (49,900 DWT; 3)	Proman	2022-2023
新大洋造船		集装箱船 (1,170 TEU; 8)	X-Press Feeders	2023-2024
宁波新乐造船集团		集装箱船 (1,170 TEU; 8)	X-Press Feeders	2023-2024
大连船舶重工集团		集装箱船 (7,100 TEU; 2)	Danaos	2024
泰州三福船舶工程		集装箱船 (1,300 TEU; 2)	MPC Container Ships	2024
大连船舶重工集团		集装箱船 (15,000 TEU; 6)	达飞集团	2025
现代尾浦造船 (HMD) *	韩国	化学品运输船 (49,999 DWT; 8)	Waterfront Shipping Company **	2021-2023
HMD		集装箱船 (2,100 TEU; 1)	马士基	2023 年中
韩国现代重工集团 (HHI)		集装箱船 (16,000 TEU; 12)	马士基	2024-2025
大韩造船		集装箱船 (7,200 TEU; 8)	Danaos	2024

TEU= 标准箱, DWT= 载重吨位。

\* 为韩国海洋工程公司所属的造船单位, 海洋工程公司是现代重工业集团的子公司。

\*\* 一家大型甲醇生产商和供应商, 为 Methanex 的子公司。

23 参见新闻报道: <https://www.offshore-energy.biz/proman-stena-bulk-1st-methanol-powered-tanker-launched-in-china/>; <https://splash247.com/x-press-feeders-signs-for-16-methanol-powered-newbuilds/>; <https://www.maersk.com/news/articles/2021/07/01/container-fueled-by-carbon-neutral-methanol>; <https://www.maersk.com/news/articles/2021/08/24/maersk-accelerates-fleet-de-carbonisation>; <https://www.offshore-energy.biz/danaos-orders-four-more-methanol-ready-containerships/>; <https://lloydlist.maritimeintelligence.informa.com/LL1141124/CMA-CGM-orders-six-methanol-fuelled-box-ships>; <https://splash247.com/mpc-container-ships-orders-methanol-powered-boxship-duo-for-norwegian-charter/>。

### 3.1.3 天然气（甲烷）

天然气通常由 85–90% 的甲烷组成<sup>24</sup>，作为一种替代船用燃料正变得越来越受欢迎。但与电力系统低碳转型不同的是，从煤炭发电转换到天然气发电可以减少大量的二氧化碳排放 (Gould and McGlade, 2017)，而用天然气替代船用燃油带来的二氧化碳减排效益要小得多。同时，由于甲烷的温室效应显著，如甲烷在燃烧、上游开采、生产和传输过程中有轻微的释放，那么船舶使用天然气对于缓解气候变化仅有的效益就会进一步减弱或消失。关于天然气缓解气候变化作用的争议在第 4 节中有更多讨论。

在空气质量方面，人们普遍认为液化天然气在减少硫和颗粒物污染方面具有优势，因为液化天然气在燃烧过程中不产生硫，颗粒物排放也更少（见表 2）(Anderson et al., 2015; Lindstad et al., 2020)。然而，氮氧化物排放水平取决于峰值燃烧温度，并随发动机类型而变化。除液化天然气运输船以外，目前大多数船用液化天然气动力发动机都是双燃料的，主要使用低压奥托循环或高压狄塞尔循环发动机技术（以下分别称为奥托循环和狄塞尔循环发动机）<sup>25</sup>。使用液化天然气的奥托循环发动机无需尾气后处理（如选择性催化还原系统）即可达到国际海事组织 III 级氮氧化物排放控制标准，但狄塞尔循环发动机需要使用后处理系统才能达到国际海事组织 III 级氮氧化物排放控制标准。

在 2021 年全球天然气价格飙升之前，液化天然气的价格通常低于符合国际海事组织排放控制区（ECA）硫氧化物排放控制标准的最大硫含量为 0.1% 的馏分燃料，而从 2016 年起，在一些地区甚至比重燃料油更便宜（DNV, n.d.-a）。因此，液化天然气被视为满足排放控制区要求的具有成本竞争力且技术成熟的解决方案。随着更严格的排放控制区要求在北美和欧洲生效以及亚洲国家对船用燃料的硫含量控制标准逐步加严，各类液化天然气动力船舶的数量稳步增加，特别是在渡轮、近海、油轮和集装箱领域 (Pavlenko et al., 2020, DNV, n.d.-b)。截至 2021 年 9 月底，有 704 艘具有使用液化天然气的能力的船舶（包括液化天然气运输船），占全球船队的 0.7%，而新船订单中有更大份额（总吨位为 28%）的船舶具有使用液化天然气的能力<sup>26</sup>。

---

24 指商业天然气的组成，参见 Britannica, n.d., Composition and properties of natural gas. In Britannica online. <https://www.britannica.com/science/natural-gas/Composition-and-properties-of-natural-gas> (2021 年 12 月 22 日访问)。

25 液化天然气运输船以沸腾后的甲烷为燃料，通常使用汽轮机进行推进，因此不包括在上述讨论中。液化天然气发动机最常用的两种燃烧技术是低压稀薄燃烧奥托循环发动机和高压狄塞尔循环发动机 (Jääskeläinen, 2020)。奥托循环发动机在不使用后处理装置的情况下可以达到国际海事组织 III 级氮氧化物排放控制标准，而狄塞尔循环发动机的氮氧化物排放量仅比传统发动机低 25%，如果不使用后处理系统，则无法达到国际海事组织 III 级氮氧化物排放控制标准 (Andersen et al., 2015)。

26 根据克拉克森的数据，参见 Chambers (2021)。

液化天然气也被许多人视为船舶脱碳的过渡解决方案，因为如果只考虑燃料燃烧产生的二氧化碳排放（从储罐到尾流的排放），使用液化天然气可以比使用传统燃料减少约 25% 的二氧化碳排放 (Lindstad et al., 2020 年)<sup>27</sup>。但在天然气的提取、加工、输送和分配过程中，甲烷会泄漏，未燃烧的甲烷会从发动机中释放出来（甲烷逃逸）。甲烷是一种强烈的温室气体，在释放后的头 20 年里，其吸热能力是同等重量二氧化碳的 84 倍，即使以 100 年的尺度来衡量，其吸热能力也是二氧化碳的 30 倍<sup>28</sup>。故此以甲烷取代传统船用燃料虽能减少燃料燃烧时的二氧化碳排放，但甲烷逃逸和泄漏产生的负面影响远大于甲烷的二氧化碳减排效益。

奥托循环发动机就是一个例子。在使用液化天然气的情况下，在未来 20 年 (GWP20) 内，其全生命周期温室气体排放量比使用船用轻柴油的二冲程柴油发动机高 20%，比使用船用轻柴油的四冲程柴油发动机高 48%（见图 6）。即使考虑到 100 年 (GWP100) 的气候变暖效应，对于四冲程奥托循环发动机而言，液化天然气仍然比传统燃料排放更多的温室气体，而对于二冲程发动机，仅减少 4% 的温室气体排放。狄塞尔循环发动机的表现较好，二冲程和四冲程发动机的温室气体排放都比传统发动机低——GWP20 和 GWP100 分别减少了 9% 和 15% (Lindstad et al., 2020; Pavlenko et al., 2020)。

目前，甲烷逃逸更严重的奥托循环发动机销量比狄塞尔循环发动机更好，因为其购买和操作成本较低，因此，截止到 2019 年，大多数在役或订购的液化天然气动力船舶都是使用奥托循环发动机。事实上，目前所有商业化的四冲程液化天然气动力船用发动机均未使用狄塞尔循环技术。

图 6. 柴油和双燃料发动机的全生命周期二氧化碳当量 (CO<sub>2</sub>e) 排放

i) 二冲程发动机：前 20 年（左）和 100 年（右）的吸热能力



27 液化天然气燃料燃烧二氧化碳排放量较低的主要原因是甲烷的氢碳比高于重燃料油和船用轻柴油。

28 用来衡量温室气体影响的指标之一是全球变暖潜能 (GWP)，以相当于同等重量二氧化碳导致温度升高的倍数表示。一种温室气体的 GWP 20 代表其在 20 年内的短期气候影响，而 GWP 100 代表其在 100 年内的长期气候影响。

## ii) 四冲程发动机：前 20 年 (左) 和 100 年 (右) 的吸热能力



数据提取自 Lindstad et al. (2020)

WTW: 油井到尾流, 全生命周期; WTT: 油井到油箱, 生产和运输过程; TTW: 油箱到尾流, 使用过程; DF: 双燃料; MGO: 船用轻柴油; VLSFO: 超低硫燃料油; LNG: 液化天然气; GWP: 全球变暖潜能值。

### 备注:

1. 低压奥托循环发动机通常比高压狄塞尔循环发动机有更高的甲烷逃逸。
2. 全球变暖潜能值以二氧化碳当量表示, 代表在给定的时间范围内温室气体相对于同等重量的二氧化碳的吸收热量的能力。GWP20 表示 20 年短期内对的气候影响; GWP100 表示 100 年长期的气候影响。
3. 目前所有商业化的四冲程液化天然气发动机均未使用狄塞尔循环技术。

业内正在积极开展控制甲烷逃逸的研究。例如, 温特图尔发动机有限公司表示, 其升级版奥托循环发动机提供了一个减少甲烷逃逸的技术选项, 可以比前一代减少高达 50% 的甲烷逃逸 (gCaptain, 2021)。然而, 船舶发动机的甲烷排放还没有按国际标准进行管制。如果没有奖励气候友好发动机解决方案的规章条例, 仅凭市场本身不太可能推动航运企业采用甲烷逃逸较少的发动机技术, 因此, 即使转换为天然气所能带来的有限的气候效益也不能得到保证。

由于液化天然气的气候效益不确定, 世界银行和全球领先船东 (例如马士基和比利时油船船东 Euronav) 呼吁减少对液化天然气动力船和加注基础设施的进一步投资, 以减少搁浅资产的风险, 避免将航运业受与之相关的温室气体排放影响, 否则将使向零排放解决方案的过渡更加困难 (Englert et al., 2021; Adamopoulos, 2021)。

## 3.1.4 电力

### 3.1.4.1 背景

过去 10 年，混合动力和全电动船舶的数量一直在稳步增长，主要得益于政府致力减少航运大气和气候污染<sup>29</sup>。与使用传统燃料的船舶相比，使用电池的船舶具有零尾气排放、更安静、更无气味的优点。此外，电动机比内燃机结构更简单，因此维修和维护成本更低。

然而高昂的初始资本投资以及对岸上连接和充电基础设施所需的投资都将是电动船舶应用面临的挑战。此外，由于电池的体积能量密度低（见表 1），有限的航程和容量是现在全电动船舶的主要制约因素。由于这些原因，全电动船舶目前仅限于内陆和近海作业。

电动船舶的生命周期对大气和气候的益处主要取决于所使用电力的温室气体强度。虽然目前投入使用的大多数电动船舶使用电网电力，即其减排和缓解气候效益取决于当地发电的构成组合，但一些电动船舶试点项目努力确保使用无碳电力。例如，丹麦全电动渡轮 Ellen 是真正的零排放，因为其从艾尔岛 (Ærø) 电网充电，而岛上的电力完全来自风能 (Cerny, 2021)。从更宏观的角度来看，随着包括中国在内的越来越多的国家承诺在本世纪中叶实现碳中和，可再生能源的份额势必会增加，从而推动电动船舶对大气和气候的污染逐步减少。

### 3.1.4.2 应用

截至 2021 年，全球已经有 337 艘全电动和混合动力船舶投入使用，199 艘正在建造中。在这 536 艘采用电池电力推进的船舶中，全电动和插电式船舶各占 24%(130 艘)，混合动力船舶约占一半(248 艘) (DNV and Maritime Battery Forum, n.d.)。在已投入使用或在建的混合动力和全电动船舶中，固定航线和相对较短航程的汽车和客运渡轮占最多（占全球总数的 43%），其次是近海补给船(12%) (DNV, n.d.-b)。

随着电池技术的快速发展和成本的下降，载有大容量电池的电动船舶正在进入市场，从而使电力推进系统能够提供更长续航或满足更高能源需求的服务。举例来说，世界最大的在役纯电动渡轮“巴斯特号”（Bastø）使用的电池容量为 4.3 兆瓦时，可以装载 600 名乘客和 200 辆轿车或 24 辆卡车。其电池容量是 2015 年投入商用的世界首艘纯电动汽车渡轮“安培号”（Ampere）(Siewers, 2021) 的 4 倍，载客量是后者的近 2 倍。在中国，超过 50 艘全电动

29 现在几乎所有运行中的电力船都由电池供电，尽管有使用超级电容器的示范项目。请看中国和法国的示范项目：<https://www.ship-technology.com/news/china-test-homegrown-electric-cargo-ship/>、<https://min.news/en/economy/1c562966b6ff8ddd4a1d1cb-fa3dc5f9d.html>、<https://www.nidec-industrial.com/document/supercapacitor-energy-storage-system-electric-ferry-case-study/>。

船舶已投入使用或正在建造。全球载电量最大的电动内河游轮“长江三峡 1 号”，电池容量为 7.5 兆瓦时（是“巴斯特号”容量的近两倍），于 2022 年 3 月投入使用，服务于长江热门旅游线路 (Doll, 2022)。

## 3.2 碳基合成燃料：合成碳氢化合物燃料和生物燃料

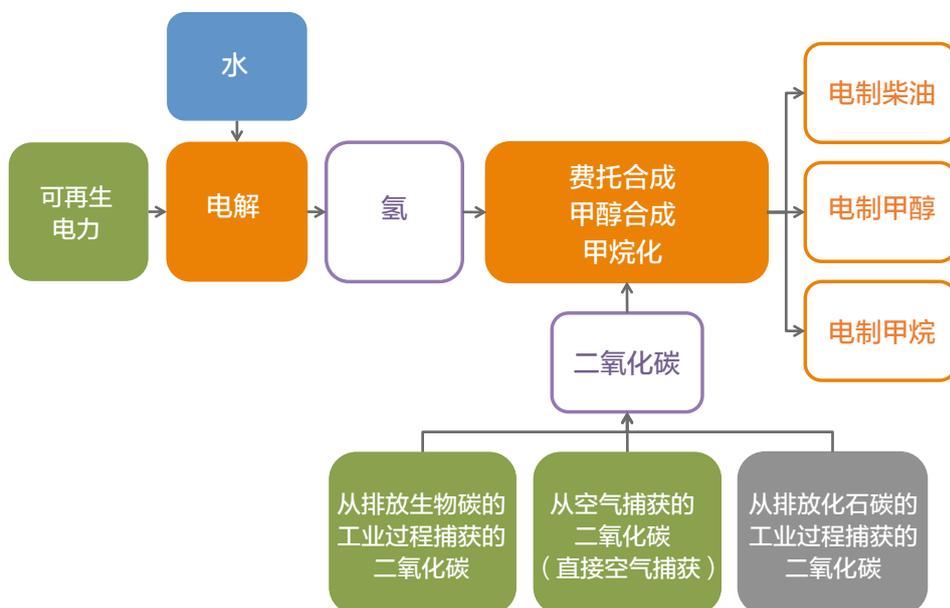
利用脱石化 (defossilized) 二氧化碳源（如直接从空气中捕获碳）或生物源，通过化学转化过程合成的燃料，不仅能量密度高，易于存储，还与现有发动机和燃料基础设施兼容。与化石燃料相比，碳基合成燃料燃烧起来更清洁，产生的大气污染物更少。本节讨论两种类型的碳基合成燃料，合成碳氢化合物燃料和先进的生物燃料（也被称为第二代生物燃料）。随着航运业在加速从化石燃料过渡方面承受的压力越来越大，这两种碳基合成燃料也变得越来越有吸引力。

### 3.2.1 合成碳氢化合物燃料

#### 3.2.1.1 背景

电制燃料（也称 e-fuels, power-to-x）是一种合成燃料，它可以通过电解水把电转换成氢。所产生的氢可以直接用作最终的能量载体（氢燃料，如第 3.1.1 节所述），也可以与其他分子结合，通过化学合成生产其他形式的电制燃料。例如，合成碳氢燃料 (SHCF) 可以通过氢与捕获的碳反应来制造。最常被讨论的船用燃料是电制柴油、电制甲醇和电制甲烷（如图 7 所示）。氨是另一种形式的电制燃料，由从空气中分离的氢和氮合成（如第 3.1.1 节所述）。

图 7. 生产碳基电制燃料的潜在途径



**备注：**排放生物碳的工业过程例子是废物处理、纸浆和纸张工业，排放化石碳的工业过程例子是燃煤和燃气发电厂。

合成碳氢燃料的成分和能量与传统燃料相当，因此可以很容易地在现有燃料基础设施和船舶发动机中使用（或只需对设备稍加改造），从而取代化石燃料。由于制造合成碳氢燃料可利用可再生能源制氢作为原料，制造过程所需能源也可以使用可再生能源，这使合成碳氢燃料成为一种可能的气候友好型燃料解决方案。但合成碳氢燃料在使用时排放二氧化碳。要使其成为近乎无碳的燃料，需要使用可持续来源的碳原料。这些原料可以从空气中捕获的二氧化碳（直接空气捕获，DAC），但成本高昂。另一种是来自可持续生产的生物质碳原料，但其来源非常有限，因此不太可能规模化（见第 3.2.2 节的讨论）。

虽然兼容性是合成碳氢燃料一个巨大的优势，但由于其生产过程涉及多个步骤且需要大量的电力，因此能源转换损失巨大。由可再生氢和可持续碳源（例如直接空气捕获）制成的低碳合成碳氢燃料目前的生产成本也高于无需二氧化碳捕获的可再生氢和可再生氨。生产合成碳氢燃料现在的平准化成本是常规燃料的五倍多<sup>30</sup>（如图 3 所示）。

30 由于乌克兰战争引发的化石燃料价格飙升，作者选择了 2020 年 11 月船用轻柴油和液化天然气的价格进行更公平的比较。

合成碳氢燃料全生命周期的温室气体强度主要取决于电解所用的电力的温室气体强度。如果采用零碳可再生电力，碳强度可接近于零。如果使用不可再生的电力（例如，燃煤、石油或天然气发电厂）生产，合成碳氢燃料的温室气体强度估计比化石燃料高数倍（如图 8 所示，信息提取自 Malins（2018），以比较使用不同电力来源产生的电制甲烷的温室气体强度）。对于电制甲烷来说，燃料的输送和使用将导致上游和燃烧过程中出现一定程度的甲烷逃逸。如果不能有效控制甲烷逃逸，将减少电制甲烷缓解气候变化的效益（Malins, 2018）。

由于转换损耗，使用合成碳氢燃料总是比直接用电成本更高。如图 3 所示，生产合成碳氢燃料对可持续生产碳原料的需求也导致合成碳氢燃料的生产成本可能比生产可再生氢和可再生氨更高。因此，从整个系统的能源效率角度来看，只要存在电气化的可能性，应优先直接使用可再生电力（Agora Verkehrswende et al, 2018; Malins, 2018）。在航运方面，合成碳氢燃料只能作为电气化和氢基电子燃料的补充解决方案，只适用于不适合电气化的船舶，或是电气化或使用氢基电制燃料成本太高的船舶。在当地电网容量短缺或近中期内无法使用氢基燃料的地区，服务于长途和非固定航线的在役船舶可使用合成碳氢燃料。

**图 8. 使用不同电力来源的电制甲烷温室气体强度**



信息提取自 Malins（2018）。

基于欧盟数据的道路运输 e-甲烷温室气体强度分析船舶温室气体强度应略高。

IGCC: 煤气化综合联合循环, CC: 碳捕获, CCGT: 联合循环燃气轮机。

### 3.2.1.2. 大气污染影响

合成碳氢燃料不含硫，燃烧时不产生二氧化硫，颗粒排放比传统燃料更少，但产生的氮氧化物排放与传统燃料相当。为确保氮氧化物排放达标，使用合成碳氢燃料时还需要配备选择性催化还原或废气再循环等排放控制装置 (Royal Society, 2019)。

### 3.2.1.3. 应用状态

合成碳氢燃料还没有投入商业使用。过去两年中，航运企业已启动多个合成碳氢燃料试点项目，以证明其可行性。2021 年 9 月，一艘集装箱支线船从汉堡附近的布伦斯巴特尔到俄罗斯圣彼得堡进行了世界首次试航，使用的是由风力发电产生的氢和从沼气厂捕获的二氧化碳制成的电制甲烷 (Bundesregierung, 2021)。

一些港口和航运公司现在正与燃料供应商合作，以加快合成碳氢燃料的开发。例如，包括安特卫普港在内的一个商业财团正在建设一个电制甲醇示范工厂。该厂将使用可再生氢和从一个碳捕获和使用 (CCU) 工厂捕获的二氧化碳生产电制甲醇，预计将于 2022 年投产 (Port of Antwerp, 2020)。

马士基一直积极与燃料生产商合作，以确保低零排放甲醇的供应，为其甲醇动力集装箱船队提供动力。迄今为止，马士基的行动包括与使用可再生氢和生物碳生产电制甲醇的生产商 Reintegrate 签署协议，为 2023 年推出的第一艘甲醇双燃料船提供低零排放甲醇 (Maersk, 2021)。直接空气捕捉技术的初创公司 Prometheus Fuels 也获得了马士基的投资，将用于生产碳中和电制甲醇 (Port Technology, 2021)。最近，马士基与六家公司建立了战略合作伙伴关系，以扩大绿色甲醇生产规模，并打算在 2025 年底前每年至少采购 73 万吨甲醇。三家战略合作伙伴位于欧洲，将为马士基提供电制甲醇，其中一家合作伙伴将既供应电制甲醇，也供应生物甲醇。其他三家战略合作伙伴将为马士基提供生物甲醇 (Maersk, 2022)。

## 3.2.2 生物燃料

### 3.2.2.1 背景

生物燃料是由生物质能产生的燃料，包括植物、农业废弃物、废油和藻类。

第一代生物燃料 (也称为传统生物燃料) 由含糖、淀粉或油性粮食作物 (如玉米或葡萄籽) 生产，已实现商业规模生产，并广泛用于世界各地的公路运输。然而，利用粮食作物作为原料会对粮食生产构成竞争，引起严重的环境和可持续性问题，并直接影响水资源稀缺地区的可用

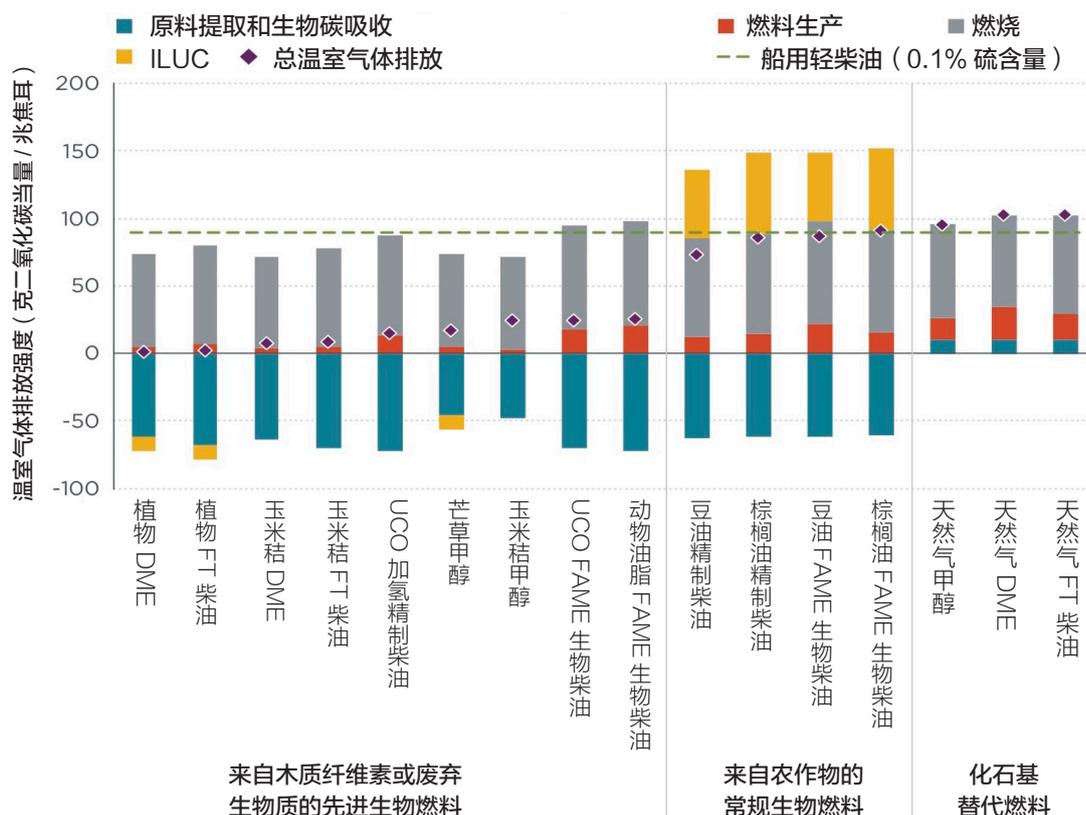
水资源 (Yeh et al., 2011)。此外,越来越多的文献认为,第一代生物燃料产量的增加推动了全球范围内用于原料生产的农业用地的扩张,导致了额外的温室气体排放(称为间接土地利用变化效应)(Valin et al., 2015)。受此影响,包括欧盟国家在内的各国政府缩减了面向第一代生物燃料生产的激励措施(ABS, 2019)。

第二代生物燃料(也称为先进生物燃料)由非食品原料生产,如能源作物(如柳枝稷)、农业和林业残留物(如玉米秸秆和树枝)和废物(如用过的食用油和城市固体废物)。在美国,受道路运输可再生燃料强制性政策的推动,第二代生物燃料的商业生产于2010年代初开始,但由于生产成本高,生产规模远低于预期(Rapier, 2018)。第三代生物燃料以藻类为原料,但目前还没有商业化生产。

与传统燃料相比,生物燃料排放的颗粒物和硫要低得多,但氮氧化物排放量与重燃料油相近,略高于船用轻柴油(Gilbert et al, 2018; MAN Energy Solutions, 2022)。生物燃料的温室气体排放主要取决于其原料的类型、燃料的生产过程以及额外的生物燃料需求是否会导致土地使用的转变。与第一代生物燃料相比,第二代和第三代生物燃料带来的间接土地使用方式变化的风险要小得多。

研究发现,相对于船用轻柴油,由可持续来源的原料制成的生物燃料,例如由废物或残留物制成的第二代生物燃料,可以实现70%至近100%的“油井至尾流”(WTW)温室气体减排量。而第一代生物燃料的温室气体排放量在考虑了土地利用的间接变化效应后,与船用轻柴油的温室气体排放量接近(见图9中紫色点表示的各种生物燃料和化石基替代燃料的温室气体强度)(Zhou et al., 2020; Searle, 2019)。

图 9. 先进生物燃料、传统生物燃料和化石基替代燃料的全生命周期温室气体排放



图表提取自 Zhou et al. (2020)。

DME：二甲醚；FT = 费托合成；UCO：二手油；FAME：脂肪酸甲酯；ILUC：土地利用间接变化。

### 3.2.2.2 应用

在过去的几年中，许多航运公司已经尝试使用从废物中提取的第二代生物燃料，包括达飞、马士基、东太平洋航运和 Stena Bulk 公司<sup>31</sup>。生物燃料被纳入一些航运公司航运脱碳战略的一部分，包括马士基和 Stena Bulk 公司 (Prevljak, 2021; Kennedy, 2021)。如前所述，马士基最近与六家公司建立了战略合作伙伴关系，到 2025 年供应甲醇。其中四家公司（包括两家中国公司）计划供应生物甲醇 (Maersk, 2022)。

31 参见关于生物燃料试验的新闻报道：<https://www.maritime-executive.com/article/ikea-cma-cgm-and-goodshipping-test-biofuels>; [https://www.joc.com/maritime-news/maersk-trials-biofuel-drive-decarbonize\\_20190620.html](https://www.joc.com/maritime-news/maersk-trials-biofuel-drive-decarbonize_20190620.html); <https://www.marinelink.com/news/eastern-pacific-shipping-trial-biofuels-482566>; <https://biofuels-news.com/news/company-embarks-on-bulk-carrier-biofuel-trial-in-quest-for-carbon-neutral-shipping/>

尽管市场对生物燃料的兴趣日益浓厚，但考虑到可持续性来源的原料数量有限，生物燃料的可扩展性令人担忧。尤其是在面临航空和塑料等其他难以减排的行业的竞争时，可持续原料生产的生物燃料的产量是否能扩大至完全满足未来海运业需求的水平，仍存在疑问（ETC, 2020b）。

在中国，第二代生物燃料的发展一直受到限制，主要原因是难以以低成本找到可靠的原料供应以及建设和运营纤维素工厂的成本高于第一代生物燃料工厂（USDA, 2020）。国务院于2021年10月发布的《2030年前碳达峰行动方案》将先进生物燃料列为交通运输行业脱碳战略之一，但预计先进生物燃料可能用于航空业，因为航空业的脱碳选择更有限（国务院, 2021；生物质能观察, 2021）。

### 3.3 小结：对比各类替代船用燃料的表现

基于以上讨论表 5 总结了最受关注的替代燃料的温室气体和大气污染物排放水平、生产成本以及采用这些燃料的优势与挑战。

表 5. 对比各类替代船用燃料的表现、成本以及其用作船用燃料的优点和挑战

能源载体	相对于船用轻柴油，全生命周期温室气体排放比例		使用过程相对于常规燃料的大气排放量			产自可再生能源的电力燃料相对船用轻柴油价格的成本比例 <sup>h</sup>		技术、安全和燃料供应需考虑的因素	
	化石燃料 <sup>a</sup>	产自可再生能源燃料 <sup>b</sup>	PM	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	2030	2050	优势	挑战
液氨	140%	6%	0 <sup>d</sup>	可能比常规燃料多，需要用 NO <sub>x</sub> 排放控制措施	0 <sup>d</sup>	3.2	2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 低可燃风险</li> <li>• 容易储存和运输</li> <li>• 生产可再生电制氨的成本比生产其他可再生电制燃料低</li> <li>• 已在全球交易的商品</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 毒性很高</li> <li>• 可能产生 N<sub>2</sub>O 排放和氨逃逸</li> <li>• 发动机发展处于设计阶段</li> <li>• 燃烧特性差</li> <li>• 缺乏燃料供应基础设施</li> <li>• 还未有安全法规</li> <li>• 对某些物料有腐蚀性</li> </ul>
液氢	166%	0%	0 <sup>d</sup>	根据发动机的设计而变化	0 <sup>d</sup>	3.7	2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 低毒性</li> <li>• 如泄漏对环境影响低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高储存和运输成本</li> <li>• 爆炸风险</li> <li>• 缺乏燃料供应基础设施</li> <li>• 纯氢气发动机刚推出市场，营运经验有限</li> </ul>

甲醇	101%	1%	比常规燃料低 <sup>e</sup>	~35% <sup>f</sup> 至100% <sup>g</sup>	0 <sup>d</sup>	4.5	3.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲醇动力发动机已商业化</li> <li>容易储存和运输</li> <li>如泄漏对环境危害比传统燃料低</li> <li>只需轻微改造便能使用现有燃料供应基础设施</li> <li>改造现役发动机使用甲醇的费用比其他替代燃料低</li> <li>国际海事组织已通过临时安全导则</li> <li>已在全球交易的商品</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比传统燃料需要更多储存位置</li> <li>爆炸风险高</li> <li>有毒，但比氨毒性低</li> <li>可再生电制甲醇的生产成本比其他可再生电制燃料高</li> <li>对某些物料有腐蚀性</li> </ul>
液化天然气	83-103% <sup>c</sup>	2-12% <sup>c</sup>	0 <sup>d</sup>	~75%至100% <sup>g</sup> (狄塞尔循环) ~10% (奥托循环)	0 <sup>d</sup>	4.0	2.9	<ul style="list-style-type: none"> <li>毒性低</li> <li>天然气动力发动机已商业化</li> <li>几个大海港已有燃料供应基础设施</li> <li>国际海事组织已通过安全导则</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>易燃性高</li> <li>甲醇逃逸和上游甲醇泄漏可大幅抵消燃烧时二氧化碳减排的效益</li> <li>生产和使用可再生电制甲醇的成本比生产其他可再生电制燃料高</li> <li>生物甲烷的可扩展性值得怀疑</li> <li>储存和运输成本高</li> </ul>
锂离子 电池	取决于使用电力的温室气体强度		0	0	0	不适用		<ul style="list-style-type: none"> <li>随着各国可再生能源占比增加全生命周期排放会越来越低</li> <li>技术成熟</li> <li>比内燃机更静和无气味</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>能源密度非常低；有限的续航力与电池能量将是约束全电动船舶发展的主要因素</li> <li>缺乏充电基础设施</li> </ul>

来源：温室气体 – Lindstad et al. (2020), Lindstad et al. (2021), Pavlenko et al. (2020) and Martin (2021); 大气污染物 – Zhou et al. (2020), Anderson et al. (2015), Lewis (2021), Fridell et al. (2021), RINA (2020), Maritime Knowledge Center et al. (2018), Ellis (2020); 成本 – Ash et al. (2020); 其他考虑 – Kass et al. (2021); Alfa Laval et al. (2020).

PM 为颗粒物,  $\text{NO}_x$  为氮氧化物,  $\text{SO}_x$  为硫化物,  $\text{N}_2\text{O}$  为一氧化二氮。

**备注：**

- a. 产自天然气的氨、氢和甲醇的全生命周期排放。对于液化天然气, 包括燃料生产和燃烧过程的排放。
- b. 假设最佳情景, 所有电制燃料均产自可再生电力, 而且生产电制甲醇和电制甲烷使用的碳原料是通过空气捕集获得。
- c. 上和下界分别代表奥托循环和狄塞尔循环发动机的排放量。
- d. 不包括先导燃料的大气污染物排放; 先导燃料的排放量与其用量成正比。
- e. 发动机颗粒物排放量因采用不同的发动机燃烧技术而异 (Maritime Knowledge Center et al., 2018; Fridell et al., 2021)。
- f. 未采用  $\text{NO}_x$  排放控制技术以优化能效 (Ellis, 2020); 由于甲醇燃烧温度低,  $\text{NO}_x$  排放量相对使用传统船用燃料低 (RINA, 2020)。
- g. 若应用  $\text{NO}_x$  排放控制措施, 发动机设计可设定以最优化能效和减少颗粒物排放为目标,  $\text{NO}_x$  排放量会和使用常规传统船用燃料相当。 $\text{NO}_x$  排放控制措施包括选择性催化还原系统、废气再循环系统; 甲醇动力发动机还可使用燃料加水技术减少  $\text{NO}_x$  排放。下界代表无使用  $\text{NO}_x$  排放控制措施情况下发动机排放水平。
- h. 成本比率定义为生产电子燃料的平准化成本相对 2020 年 11 月 24 日在鹿特丹销售的船用轻柴油价格的比例 (<https://shipandbunker.com/prices>)。

# 4. 对中国的启示

## 4.1 开发和应用低零碳船用燃料实现航运脱碳的路径逐渐明晰

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第一工作组的最新报告《气候变化 2021：自然科学基础》发出了严厉警告，如果 2050 年前无法实现全球二氧化碳净零排放，同时大幅减少非二氧化碳温室气体排放，全球将无法实现将平均气温升幅控制在工业化前水平以上 1.5 °C 范围内的目标（IPCC，2021）。考虑到航运业是全球贸易的支柱，占全球排放量的 3%，因此如果航运业到 2050 年做不到完全脱碳，届时全球经济也无法完全脱碳。

在认识到国际海事组织最初的气候战略远未能达到将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上 1.5 °C 范围内的目标（Comer, 2021b; Smith et al., 2021）后，许多国家和私营部门已经根据《巴黎协定》加大了行动力度并宣布了一系列支持航运向零排放转型的举措和承诺（见专栏 1）。

## 专栏 1. 宣布支持航运业实现到 2050 年零排放转型的行动和承诺<sup>32</sup>

- (1) 14 个国家发布了《2050 年零排放航运宣言》，承诺将推动国际海事组织把气候目标提高一倍，到 2050 年实现二氧化碳零排放。
- (2) 易受气候影响脆弱国家论坛的 55 个发展中国家成员呼吁国际海事组织加快对国际航运征收强制性温室气体排放费的工作，以确保国际海事组织的措施与将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上 1.5°C 范围内的目标保持一致。
- (3) 22 个国家承诺在其港口之间建立清洁航线（克莱德班克宣言），以证明海运脱碳是可能的。
- (4) 包括亚马逊、联合利华和宜家在内的主要海运客户加入了零排放船舶货主（CoZEV）倡议，承诺到 2040 年只购买零碳燃料驱动的海运服务。
- (5) 加入“先行者联盟”倡议的货主承诺到 2030 年使用零排放燃料运输 10% 的货物，参与该倡议的船东和租船人承诺到 2030 年其使用的燃料中 5% 为零排放燃料。
- (6) 6 家世界主要海运保险公司推出了“波塞冬海上保险原则”，旨在提供一个定量评估和披露海上保险公司承保业务组合与气候目标一致性的框架。

这些声明表明，越来越多国家的政府和私营部门对于采取气候行动的迫切性正在达成共识，并愿意通过合作建立监管确定性和市场需求，并提供绿色金融和保险保护，以激励第 3 节讨论的气候友好型燃料和推进技术的应用。

总之，随着航运公司和主要海运国家考虑投资未来的燃料和推进解决方案，低零排放推进技术的开发已经取得令人瞩目的进展。

32 参见新闻报道 <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/denmark-us-12-other-nations-back-tougher-climate-goal-shipping-2021-11-01/>; <https://www.seatrade-maritime.com/regulation/ics-sets-out-plan-deliver-net-zero-shipping-2050>; <https://www.offshore-energy.biz/intertanko-backs-shippings-net-zero-emissions-path-by-2050/>; <https://thecvf.org/our-voice/statements/dhaka-glasgow-declaration-of-the-cvf/>; <https://www.gov.uk/government/publications/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shipping-corridors/cop-26-clydebank-declaration-for-green-shipping-corridors>; <https://www.aspeninstitute.org/news/press-release/first-movers-coalition-2030-commitments/>; <https://www.aspeninstitute.org/news/press-release/first-movers-coalition-2030-commitments/>; <https://www.poseidonprinciples.org/insurance/>; <https://www.globalmaritimeforum.org/news/cop26-will-summits-ambitions-for-ship-ping-translate-to-progress-at-imo>。

在内河航道和短途沿海航运中，电池电力推进技术已成为最有前景的零排放技术。对于没有固定航线的沿海船舶，或者需要的动力和容量超出电池所能提供的能力，氢燃料电池是一种很被看好的推进解决方案，可能实现零空气污染物和温室气体排放。在政府的大力支持下，特别是在挪威、日本和韩国，电力推进和船用燃料电池海运系统正在快速发展。商用燃料电池推进模型预计将于 2023 年推出<sup>33</sup>。

对于远洋航运来说，由于氨和甲醇能量密度更高，并且相对容易存储和处理（不需要低温存储），因此是未来 10 年最有前景的低零温室气体排放的燃料解决方案。由于商业化的甲醇动力发动机已上市，同时国际海事组织已通过了一整套保障甲醇燃料在船上安全应用的临时导则，船东们也订购了多艘新建的甲醇动力船舶，并将在 2024 年左右投入使用。在氨燃料方面，全球主要船用发动机制造商都正在积极研发氨能动力发动机，预计第一部发动机原型将于 2023 年推出。在 2023 年至 2025 年期间，至少会有 10 艘为将来改装成氨燃料预留（ammonia-ready）的新船舶下水。从长远来看，可行性研究表明，如果能对繁忙航线上的燃料供应基础设施进行战略性规划和发展，氢动力船舶也可以成为远洋航运的一种解决方案。

## 4.2 中国造船企业和发动机企业开展的试点项目和研究为开发低零排放解决方案奠定了基础

鉴于越来越多的航运客户和租船商要求提供零排放货运服务，同时越来越多的国家积极推动航运脱碳，因此作为一个海运和造船大国，中国参与这一转型符合自身利益。好消息是，中国中央和地方政府，以及造船业和设备制造商已经启动了一些试点项目，以测试低零排放海运解决方案的可行性，并开始加强提供这些解决方案的能力建设。

在内河和沿海航运方面，截至 2020 年夏季，中国运营或订购的纯电动船舶超过 50 艘（主要是沿长江和珠江运行）。2021 年，三艘氢燃料电池示范船在大连和广东佛山进行了海试<sup>34</sup>。中国船级社还批准了两套船用燃料电池系统的型号（70kW 和 50-80kW），其中一套将在一艘

---

33 参见挪威绿色航运行动计划 (<https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/the-governments-action-plan-for-green-shipping/id2660877/>)，韩国 2030 Green Ship-K Initiative (<https://www.maritime-executive.com/article/south-korea-to-invest-870-million-developing-eco-friendly-shipping>)，日本 Roadmap To Zero Emission from International Shipping ([https://www.mlit.go.jp/en/maritime/GHG\\_roadmap\\_en.html](https://www.mlit.go.jp/en/maritime/GHG_roadmap_en.html)) 和 日本公司 Yanmar Power Technology 的公告 (<https://www.maritime-executive.com/article/first-high-pressure-hydrogen-fueling-demonstrated-in-japan>)。

34 参见 Rui (2020), and news report: <https://www.163.com/dy/article/G05IFQFD05509P99.html>; <https://h2.in-en.com/html/h2-2409258.shtml>; <https://www.chinaautoms.com/a/new/2021/1110/20153.html>; <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/11/468801.shtml>。

专门建造的 2,100 载重吨位的散货船上进行测试<sup>35</sup>。

中国造船企业和发动机制造商也在发展以甲醇或氨为动力的推进系统和船舶方面取得了进步（见表 3 和表 4）。最新的进展是中国船舶重工动力工程研究所和发动机制造商温特图尔发动机有限公司联合建立了一个新的全球测试中心，开展包括氨和甲醇在内的未来燃料推进系统的研究。另外，中国船级社正在与马士基合作，开展碳中和技术和标准的研究<sup>36</sup>。

这些研发工作对于测试和评估新解决方案至关重要，为其在国内和国外的更广泛应用铺平了道路。未来五年，交通运输部计划积极探索使用氢、氨、甲醇和混合电力推进为船舶提供动力<sup>37</sup>。2022 年 3 月发布的中国《氢能产业发展中长期规划》也提出于未来五年内积极探索燃料电池在船舶领域的应用。<sup>38</sup> 这些都是为了实现 2060 年碳中和目标的重要举措。

## 4.3 确立针对性发展措施，确保低零排放的船用燃料的充足供应

要实现低零排放推进技术的广泛应用和实质性的温室气体效益，面临的一大障碍是确保低零排放燃料的充足供应。

为了实现双碳目标，中国政府已经制定了促进可再生能源发电的明确目标，旨在到 2030 年将风能和太阳能的总装机容量增加到 1,200GW 以上（相当于目前装机容量的三倍）（国务院，2021）。与此同时，由于氢是炼油和工业部门脱碳的关键抓手，地方政府和国有能源企业也在增加对关键技术的投资，以支持氢的生产、储存和运输技术（IEA，2021a）<sup>39</sup>。然而，可再生能源发电总装机容量目标主要是为了满足电网的电力需求，目前的氢能发展措施是为了使工业和公路运输部门脱碳，还没有开发可再生氢、氨或甲醇燃料供应航运业的计划。

35 参见新闻报道：<https://www.offshore-energy.biz/ccs-awards-chinas-1st-hydrogen-fuel-cell-type-approval/>; <http://wap.eworldship.com/index.php/eworldship/news/article?id=174932>.

36 WinGD. 2021. WinGD expands engine technology investment with Global Test Centre. December 17. <https://www.wingd.com/en/news-media/press-releases/wingd-expands-engine-technology-investment-with-global-test-centre/>; Maersk. 2021. Maersk partners with China Classification Society on carbon-neutral technologies and standards. September 27. <https://www.maersk.com/news/articles/2021/09/27/maersk-partners-with-china-classification-society>.

37 交通运输部. 2021. 绿色交通“十四五”发展规划. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content\\_5669662.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm).

38 国家发展改革委和国家能源局. 2022. 氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323\\_1320038.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html).

39 例如参见中国最大炼油厂扩大氢燃料生产的雄心的相关新闻报道：<https://www.scmp.com/news/china/science/article/3158005/china-sinopec-banks-green-hydrogen-xinjiang-solar-powered-plant>

在航运业方面，市场上对零排放航运的需求日益增多，推动低零排放推进技术和燃料的应用也逐渐增多。这可能为生产和供应可再生氢和氢衍生燃料核心技术（如电解槽）创造一个规模庞大的出口市场。中国可以考虑采用有针对性的措施来推动低零排放船用燃料的供应。这些措施既能引领国内可再生氢和氢衍生燃料供应、运输和储存相关的产业发展，抢抓国内外低碳燃料发展机遇，还可避免国内航运企业未来需要依赖海外生产甚至进口低零排放的船用燃料。

## 4.4 替代燃料的成本较高是一个主要挑战，但最大限度地提高能源效率可以减少转型中的障碍

无论最终哪种低零排放的船用燃料将被广泛使用，在短期内这些燃料的成本预计将高于常规燃料。新燃料的低能量密度也会带来挑战，特别是对在役船舶，因为需要更多的空间来放置燃料箱。成本差异和额外燃料存储空间的需求对向低零排放燃料转型提出了重大挑战，并可能使先行者处于不利地位。

解决成本差异问题的一个可靠解决方案是将在役和新船队的燃料效率最大化，从而减少燃料消耗、二氧化碳排放和大气污染。提高燃料效率的技术已经存在，实践证明一些技术甚至对改造船舶也有成本效益，例如利用风力发电（如转子帆）、改善流体动力（如船体空气润滑）或混合动力推进系统的技术。尽管国际海事组织已经提出了能效改进要求（船舶能效设计指数 EEDI、现有船舶能效指数 EEXI 和碳强度指标 CII，如第 1 节所述），但不少专家和业内人士认为这些要求过于宽松，难以发挥激励采用燃料效率技术的作用（Smith et al., 2021）。中国可以考虑出台政策，推动国内和国际船队更广泛地应用提高效率的技术，以应对向低零排放燃料转型的挑战，并直接降低碳和空气污染排放。

## 4.5 综合考量替代燃料的发展方案，投资更具长远发展价值的燃料类型

对替代燃料的投资和发展计划，应当综合考虑全生命周期的气候效益、能源依赖等综合因素，长远布局非化石的、无污染的、国内生产的燃料。一些行业将液化天然气推进技术视作为一种过渡性解决方案，因为天然气及其推进技术已经商业化，有助于二氧化碳减排，并可能允许在未来低零排放的生物甲烷或电制甲烷燃料可用时从液化天然气转而使用这些新燃料<sup>40</sup>。但另一方面，如前所述，最新文献的研究表明，使用 20 年全球变暖潜能值进行测算时，天然气的温室气体排放量最多只能比船用轻柴油少 9%，而使用基于当前天然气发动机技术的 100 年全球变暖潜能值进行测算时，温室气体排放量最多比船用轻柴油减少 15%。（如图 6 所示，Lindstad et al., 2020）。

由于甲烷是造成气候危机的第二大温室气体，发动机设计机构和制造商正在寻找减少甲烷逃逸的方法，一些油气公司已经自愿承诺减少上游的甲烷泄漏<sup>41</sup>。然而，无论是国内温室气体排放法规或是国际海事组织的法律框架都尚未订立控制船舶发动机甲烷排放或全生命周期温室气体排放的规则框架，因而没有明确的措施来推动使用泄漏较少的液化天然气发动机技术。为此，评估液化天然气动力船舶和燃料加注基础设施的气候变化效益，要放在全生命周期综合考量。

如前所述，世界银行和一些航运公司对液化天然气的长期前景表示关切。可持续来源的生物甲烷供应有限，因此缺乏价格竞争力，这让人们对液化天然气动力船舶和基础设施向可再生生产的生物甲烷转型的可行性产生了质疑。虽然液化天然气发动机可以使用液化电制甲烷，但与可再生氨和氢等其他低 / 零碳替代品相比，电制甲烷的生产成本更高（World Bank, 2021）<sup>42</sup>。石油输出国组织（OPEC）在《世界石油展望》中也表示，由于担心天然气的长期可持续性，2021 年部分液化天然气船订单被取消。2021 年 9 月，赫伯罗特航运公司还搁置了对另外 16 艘正在服役的船舶进行改造以便使用液化天然气做动力的计划。此前，该公司为一艘船安装了液化天然气双燃料系统，发现改造成本高出预期（3500 万美元），因而改变了原

40 参见新闻报道：<https://cmacgm-group.com/en/launching-cmacgm-jacques-saad%C3%A9-world%27s-first-ultra-large-vessel-powered-by-lng>.

41 参见 温特图尔发动机有限公司 iCER 技术 (<https://www.alfalaval.com/media/news/2020/new-alfa-laval-purecool-developed-with-engine-designer-wingd-enables-up-to-50-methane-slip-reduction/>), and the Methane Guidance Principle initiative (<https://methane-guidingprinciples.org>);

42 OPEC. 2021. 2021 World Oil Outlook 2045. [https://www.opec.org/opec\\_web/en/publications/340.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm).

来的计划<sup>43</sup>。故此世界银行建议，有丰富可再生能源资源并邻近繁忙航运路线的发展中国家应把握航运业低碳转型的机遇，加快投资发展可再生氢或氨燃料的生产，以满足未来对越来越大的低零排放船用燃料需求，同时减少对进口化石能源的依赖。

从全生命周期的角度看，液化天然气的气候效益还不确定，同时将液化天然气作为船用燃料还可能进一步加大对天然气的依赖。因此，国际社会开始关注减少对液化天然气动力船和基础设施的投资。从长远来看，投资于国内生产的、非化石的、无污染的燃料，如可再生的氢和氨，以支持航运脱碳，是一个性价比较好的方案。

---

43 Thomsen, Jens. 2021. Hapag-Lloyd scraps further LNG retrofitting of vessels: More expensive than expected. Shipping-Watch. October 1. <https://shippingwatch.com/carriers/Container/article13330724.ece>.

# 5. 建议

推动航运业向零温室气体排放转型需要零排放船舶、零排放燃料以及这些燃料的储存和加注基础设施，也需要市场对零排放航运服务的需求。中国是世界上为数不多的拥有领先造船产业的国家之一，还拥有巨大的可再生能源生产潜力，以及世界上最繁忙的港口，是重要的全球航运中心。庞大的航运活动，再加上在整个航运价值链都占据了行业领先地位，使中国拥有先发优势，能够：

- (1) 开发无排放船舶及其关键部件（如燃料电池、电池和替代燃料发动机）
- (2) 加强低零排放船用燃料生产技术的研发，扩大燃料生产能力
- (3) 建设供应低零排放燃料的港口基础设施

中国将能够在引领这样的转型中受益。首先，这将有助于实现双碳目标以及生态文明目标。其次，这将有助于加强国家船舶制造商、船厂、船舶及海洋设备制造企业在全球的竞争力。

为了使全球航运业在 2050 年达到零排放，整个行业将不可避免地需要大量的新建零排放船舶，并在 21 世纪 30 年代对在役船舶进行大规模改造，以便使用零排放燃料（Smith et al., 2021）。中国庞大的国内航运市场可以作为低零排放新船舶或在役船舶改造的核心技术的试验平台。通过“边做边学”，本地船厂以及航运零排放价值链中的企业在研发服务国内市场的低零排放船舶和设备的同时，可以发展自身的能力，扩大规模，降低成本，并提升向国际市场出口其服务和产品的竞争力。在燃料方面，随着对零排放船用燃料需求的增长，中国也可以从投资开发零排放燃料生产、储存和加注设备的能力中受益，这不仅可以服务于国内市场，也可以服务于全球市场。

为了实现这些目标，中国需要进一步加大对研发和示范项目支持，并实施推动研发和促进早期采用低零排放解决方案的法规。与此同时，地方监管机构需要与船级社密切合作，制定操作惯例和标准，以确保安全可靠地使用新的低零排放燃料。以下是一些可供考虑的具体政策建议：

## 5.1 制定适用于国内船队的温室气体和能源效率规章条例

监管的确定性将刺激对替代燃料和推进系统以及能效技术的研究、开发和应用（RD&D）的投资。虽然激励措施对于支持先行者展示可行性的努力至关重要，但强制性规章条例对于促进这些解决方案的广泛采用不可或缺。

### (1) 在船用发动机标准中增加温室气体相关要求

在更新适用于新造船的国内船用发动机排气污染物排放标准时，监管机构可考虑增加温室气体排放要求（包括甲烷和二氧化碳）。将温室气体相关排放限制纳入自 2020 年起生效的船用发动机标准，可以推动低零排放燃料和推进系统的发展，以确保温室气体和大气排放的协同控制。

### (2) 设定新造和在役船舶能效要求

提高效率本身就可以降低每艘船给气候带来的负面影响和对大气的污染，还可以减少向低零排放燃料转型的障碍。鉴于中国在役船舶数量庞大（内河船舶 11.5 万多艘，沿海船舶 1 万多艘），为新造和在役国内船舶制定能源效率标准，有助于推动能源效率技术成为主流，从而形成降低成本所需的规模。国际海事组织已通过针对远洋船舶的新造和在役船舶能效要求（EEDI、EEXI 和 CII），可为制定中国国内在役船舶能效标准提供参考。

### (3) 探索制定基于全生命周期排放的船舶燃料的温室气体强度标准

中国的电力、氢气、氨和甲醇生产仍严重依赖煤炭。这些燃料 / 燃料载体的生产方法不会影响其化学性质。故此产自化石原料的氢能与可再生氢在船舶上使用时都是一样。氢能、甲醇、电能亦然。有效区分低零排放燃料并促进其应用，开发全生命周期船用燃料的温室气体排放量认证计划并对船上使用燃料引入碳排放强度限制，是推动航运业逐步使用低零排放燃料的关键。欧盟正在审议中的《船用燃料指令》(FuelEU Maritime) 可为中国制定船用燃料温室气体强度标准提供参考。

## 5.2 支持一批试点港口地区扩大低零温室气体排放燃料动力船舶示范项目

示范项目对于验证生产低零排放燃料的技术以及应用此类燃料的船舶推进技术在技术和商业化方面的可行性至关重要。这些项目还有助于监管机构开发和制定新燃料供应的标准和操作规范，以确保安全的交付、存储和加注，从而建立公众对转向这些新燃料的信心。

### (1) 加大资金投入，扩大示范项目规模

中国已经开展了一批电池动力船舶和氢燃料电池船舶试点。这些试点遇到的主要挑战包括投资和运营成本高、建造燃料补给 / 充电基础设施的成本高以及燃料补给 / 充电操作期间存在的安全问题等 (Yang, 2020)。

气候问题现在已成为政策优先事项，臭氧和颗粒物污染仍然是一个主要问题，因此有必要增加资金，支持以低零排放燃料和可共同控制空气和气候污染物的技术为重点的示范项目。这些项目还应与价值链上的主要参与者 (造船商、港口、燃料供应商和船舶运营商) 合作，以解决经济、技术和操作方面的挑战和安全问题。如前所述，短期来看，电池电力推进和氢燃料电池系统将最适合中国内陆和沿海航运，而氨和甲醇动力系统将很有希望用于远洋航运，因此，新项目可以专注于这些技术的研发示范。

### (2) 提供资金支持低零排放燃料生产和供应核心技术的开发，并通过示范项目进行测试和完善

缺乏低零排放燃料供应基础设施将是推进航运业绿色转型面临的主要障碍。对新的船用燃料的生产、运输、存储和加注等核心技术的开发以及通过试点项目进行测试，能够有效加强中国组件制造商的技术和能力，随着未来对这些燃料需求的增长，这些本地供应商将更有竞争力成为全球供应商。

过去十年，中国的决策者在支持电池制造商成为电动汽车 (EV) 电池全球主要供应商方面取得了巨大成功。这得益于通过启动试点项目以开发和完善核心技术，通过政策激励新能源汽车在广阔的国内市场进行大规模的应用，使生产企业能够通过规模经济来降低生产成本。同样，政府政策可以支持电解槽和燃料供应链核心部件的发展。通过启动示范项目，使设备制造商能够通过实践学习加强能力建设，通过扩大规模服务国内市场来降低生产成本，使制造商具有全球竞争力。在此基础上，中国生产商能够助力全球海运领域从化石燃料向新的清洁技术转型。

### (3) 选择为试点地区的部分国内船舶设定长期零排放目标

制定长期目标可以确保未来对低零排放技术和燃料的需求，也为发动机和设备制造商的研发投资提供监管确定性。试点地区可以为那些更有条件采用新燃料的船舶，如渡轮、游轮和固定航线的货船设定零排放目标。试点地区的监管部门可以考虑向在购买新船舶和建造燃料基础设施方面率先采用低零排放技术的船东和港口提供资金支持，并向受该政策影响最大的贫困社区提供补贴。

### (4) 参与建立绿色航运通道的双边和 / 或多边合作计划 ( 如克莱德班克宣言 )

国际绿色航运通道项目可以为中国港口试点城市提供宝贵的交流机会，通过与相关政府和行业领袖合作，共同开发清洁港口基础设施和燃料处理规章条例和协议，并制定激励性方案和要求，以刺激市场对零排放航运的需求。这种合作对于中国航运技术供应商通过试验将本地开发的低零排放技术用于国际海运尤为重要。“上海 - 洛杉矶绿色航运走廊伙伴关系”为中国更多港口树立了榜样。

## 5.3 确保航运成为中国向碳中和经济转型的重要组成部分

可再生氢被广泛认为是诸多行业脱碳战略的核心部分，包括炼油、氨和甲醇合成、钢铁生产和航运。在中国，包括中石化、宁夏宝丰能源集团、宝武钢铁集团在内的主要国有企业，都开始建设可再生氢生产厂，并投资于氢能储存和运输基础设施的研发。这些项目可以帮助产业集群扩大可再生氢的生产并增加供应。而这些工业产业集群很多都靠近中国主要港口。为了使航运示范项目能够利用这些可再生氢、氨和甲醇的新供应，确保中央和地区政府协调航运示范项目与其他行业的低碳转型项目将是关键。

# 6. 结束语

公共和私营部门正在形成一种共识，即到 2050 年，航运业应该完全脱碳，与《巴黎协定》将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上 1.5 °C 范围内的目标保持一致。为了促进低零排放船舶燃料和技术的普及，大型航运客户和租船公司对零碳燃料的最低使用量做出了承诺。主要航运金融机构和保险公司也承诺在其投资组合评估中纳入与国际海事组织脱碳目标相一致的内容。各城市正在探索建立绿色航运走廊，使零排放船舶能够在主要海运航线上服务，如上海、洛杉矶和业界伙伴将在 10 年内建立绿色走廊。

虽然目前还不确定未来哪一种零排放燃料将占主导地位，但在评估每种潜在燃料的长期温室气体减排潜力、成本效益和可扩展性时，形势已经变得更加清晰。电力和氢燃料电池已被证明是技术上可行和可扩展的潜在的内河和沿海船舶零排放燃料解决方案。从整个系统的角度来看，它们也更节能。对于远洋航运来说，氨和甲醇是未来十年最有前途的低零排放解决方案。从燃料基础设施的战略规划角度来看，氢可以作为一个前景看好的长期解决方案。尽管天然气仍然受到一些行业利益相关者的欢迎，但人们对能源安全的担忧程度不断增加，同时天然气在温室气体减排方面的效益也在遭受更多质疑。

鉴于中国既有规模庞大的船队，又有世界领先的造船厂和发动机制造商，还有广阔的大型港口网络，中国可以成为加快航运业绿色转型的重要推动者并将从中受益，因为这意味着减少船舶和港口活动造成的大气污染和缓解气候变化影响。通过出台政策，刺激提高能源效率，鼓励研究、开发和采用低零排放燃料和技术，中国可以提高技术能力，加大国内造船企业、设备制造商和港口运营商的竞争优势。这些部门对于生产负担得起、可获得的气候友好型燃料和技术至关重要，而这些燃料和技术也在全球航运脱碳中扮演着重要的角色。

# 参考文献

- Abnett, Kate, et al. 2021. Denmark, U.S. and 12 Other Nations Back Tougher Climate Goal for Shipping. Reuters. November 3. <https://www.reuters.com/business/sustainable-business/denmark-us-12-other-nations-back-tougher-climate-goal-shipping-2021-11-01/> (2021 年 11 月 18 日访问).
- ABS. 2021. Hydrogen as Marine Fuel. Sustainability Whitepaper. June.
- Adamopoulos, Anastassios. 2021. Shipping Leaders Disagree on Future of LNG in Shipping. Lloyd's List. May 12. <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1136761/Shipping-leaders-disagree-on-future-of-LNG-in-shipping> (2021 年 11 月 1 日访问).
- Agora Verkehrswende et al. 2018. The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels. See [https://www.agora-energiwende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynKost\\_Study\\_EN\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiwende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf) (2019 年 4 月 18 日访问).
- Ajdin, Adis. 2021. Stena Gets into the Methanol Retrofit Business. Splash247. October 21. <https://splash247.com/stena-gets-into-the-methanol-retrofit-business/> (2021 年 11 月 17 日访问).
- Alfa Laval et al. 2020. Ammonfuel – An Industry View of Ammonia as a Marine Fuel. August.
- American Bureau of Shipping (ABS), 2019. Setting the Course to Low Carbon Shipping – 2030 Outlook | 2050 Vision.
- Anderson, Bruce et al. 2015. Study of Emission Control and Energy Efficiency Measures for Ships in the Port Area. International Maritime Organization (IMO) London, UK. February.
- Ash, Nick et al. 2020. Renewable Electricity Requirements to Decarbonize Transport in Europe with Electric Vehicles, Hydrogen and Electrofuels. Report for Transport and Environment.
- Bahtić, Fatima. 2021. WinGD Engines to Run on Methanol and Ammonia by 2025. Offshore Energy. November 23. <https://www.offshore-energy.biz/wingd-engines-to-run-on-methanol-and-ammonia-by-2025/> (2021 年 11 月 24 日访问).
- Bundesregierung. 2021. Maritime Energiewende Klimaneutral auf See unterwegs. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/klimaneutrale-betankung-1964314> [in German] (2021 年 10 月 14 日访问).
- Bureau Veritas. 2021. New IMO Decarbonization Measures: EEXI and CII. May 3. <https://www.bvsolutions-m-o.com/magazine/understanding-new-imo-decarbonization-measures-eexi-and-cii> (2021 年 11 月 16 日访问).
- Cerny, Philip. 2021. “All Aboard!” E-Ferry Ellen and the Future of Electric Shipping. Heinrich-Böll-Stiftung European Union. <https://eu.boell.org/en/2021/07/07/all-aboard-e-ferry-ellen-and-future-electric-shipping> (2021 年 11 月 10 日访问).
- Chambers, Sam. 2021. Global Methane Pledge to be Unveiled at COP26 Heaps More Pressure on LNG Fuel Proponents. Splash247. November 2. <https://splash247.com/global-methane-pledge-to-be-unveiled-at-cop26-heaps-more-pressure-on-lng-fuel-proponents/> (2022 年 3 月 15 日访问).
- Climate Action Tracker. 2021. Glasgow's 2030 Credibility Gap: Net Zero's Lip Service to Climate Action. <https://>

[climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/](https://climateactiontracker.org/publications/glasgows-2030-credibility-gap-net-zeros-lip-service-to-climate-action/) (2021年11月15日访问)。

Comer, Bryan. 2021a. Choose Wisely: IMO's Carbon Intensity Target Could be the Difference Between Rising or Falling Shipping Emissions This Decade. ICCT blog. <https://theicct.org/blog/staff/updated-imo-carbon-intensity-target-may2021> (2021年11月16日访问)。

Comer, Bryan. 2021b. Zero-emission Shipping and the Paris Agreement: Why the IMO Needs to Pick a Zero Date and Set Interim Targets in its Revised GHG Strategy. ICCT blog. <https://theicct.org/blog/staff/marine-shipping-imo-ghg-targets-global-sept21> (2021年12月12日访问)。

Comer, Bryan et al. 2022. Decarbonizing Bulk Carriers with Hydrogen Fuel Cells and Wind-assisted Propulsion: a Modeled Case Study Analysis. <https://theicct.org/publication/hydrogen-and-propulsion-ships-jan22/>.

Dimitriou, Pavlos and Rahat Javaid. 2020. A Review of Ammonia as Compression Ignition Engine Fuel. International Journal of Hydrogen Energy. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209>.

DNV. n.d.-a. Current Price Development Oil and Gas. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/current-price-development-oil-and-gas.html> (2021年10月29日访问)。

DNV. n.d.-b. Alternative Fuels Insight. <https://store.veracity.com/alternative-fuels-insight-platform-afi> (2021年12月30日访问)。

DNV and Maritime Battery Forum, n.d. Alternative Fuels Insight - Battery Statistics. <https://store.veracity.com/alternative-fuels-insight-platform-afi> (2021年10月29日访问)。

Dolan, Gregory. 2020. Methanol: Emerging Global energy Markets [PowerPoint], Methanol Institute. 16th Annual State of the Energy Industry Forum, Washington, DC. January 23.

Doll, Scooter. 2022. 'World's Largest Electric Cruise Ship' Makes Maiden Voyage in China With a Whopping 7,500 kWh in Battery Power. Electrek. March 31. <https://electrek.co/2022/03/31/worlds-largest-electric-cruise-ship-makes-maiden-voyage-in-china-with-a-whopping-7500-kwh-in-battery-power/> (2022年3月31日访问)。

Duynslaegher, C. 2011. Experimental and Numerical Study of Ammonia Combustion. <http://hdl.handle.net/2078.1/89103>.

Ellis, Johanne. 2020. GreenPilot – Guiding the Way to Low-emission and Fossil-free Operation of Small Vessels. SSPA Highlights, Issue 67.

Energy Transitions Commission (ETC). 2020a. The First Wave, a Blueprint for Commercial-scale Zero-Emission Shipping Pilots. Report for the Getting to Zero Coalition. <https://www.globalmaritimeforum.org/publications/the-first-wave-a-blueprint-for-commercial-scale-zero-emission-shipping-pilots>.

ETC. 2020b. Sectoral Focus: Plastics. [https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2020/08/FETC-sectoral-focus-Plastics\\_final.pdf](https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2020/08/FETC-sectoral-focus-Plastics_final.pdf).

Englert, D. et al. The Role of LNG in the Transition Toward Low- and Zero-Carbon Shipping. World Bank, Washington DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35437>.

EV100. 2021. 中区氢能发展路线图 1.0.

Faber, Jasper. et al. 2020. Fourth IMO GHG Study – Final Report. Delft, CE Delft. July.

Fridell, Erik et al. 2021. Measurements of Emissions to Air from a Marine Engine Fueled by Methanol. Journal of Marine Science and Application. <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00150-6>.

F&L Asia. 2021. Alfa Laval to Start Large-scale Methanol Testing. March 8. <https://www.fuelsandlubes.com/alfa-laval-to-start-large-scale-methanol-testing/> (2021 年 12 月 21 日访问).

Harvey, Fiona. 2021. UN Chief Urges Airlines and Shipping Firms to Do More to Cut Emissions. Guardian. October 14. <https://www.theguardian.com/environment/2021/oct/14/un-chief-urges-airlines-and-shipping-firms-to-do-more-to-cut-emissions> (2021 年 11 月 18 日访问).

gCaptain. 2021. Interview: WinGD Discusses New Engine Tech to Help Tackle Methane Slip. January 8. <https://gcaptain.com/interview-wingd-discusses-new-tech-to-help-tackle-methane-slip/> (2021 年 12 月 23 日访问).

Giddey, Sarb. 2020. Next Generation Ammonia Synthesis [PowerPoint]. Nov 19th. AEA 2020 Conference. <https://www.ammoniaenergy.org/paper/introduction-to-next-generation-ammonia-synthesis-panel/>.

Gilbert, P. et al. 2018. Assessment of Full Life-cycle Air Emissions of Alternative Shipping Fuels. Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.165>.

Global Maritime Forum. 2021. Call to Action For Shipping Decarbonization. <https://www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition/call-to-action> (2021 年 12 月 17 日访问).

Gould, Tim and Christophe McGlade. 2017. The Environmental Case for Natural Gas. IEA commentary. October 23. <https://www.iea.org/commentaries/the-environmental-case-for-natural-gas> (2022 年 2 月 23 日访问).

IEA. 2021a. An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>.

IEA. 2021b. Global Hydrogen Review 2021. October. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.

IPCC. 2021. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

Joyce, Mary. n.d. “Developments in U.S. Alternative Fuel Markets” . U.S. Energy Information Administration. [https://www.eia.gov/renewable/alternativefuels/issues\\_trends/altfuelmarkets.html#N\\_1](https://www.eia.gov/renewable/alternativefuels/issues_trends/altfuelmarkets.html#N_1) (2021 年 1 月 17 日访问).

Kass, Michael D. et al. 2021. Spill Behavior, Detection, and Mitigation for Emerging Nontraditional Marine Fuels. March. Oak Ridge National Laboratory.

Kennedy, Helena Tavares. 2021. Stena Bulk’s Zero-emission Vessels on Water by 2035, GoodFuels, Tufton’s 100% Biofuel Voyage and More Maritime Magic. Biofuels Digest. September 26. <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/09/26/stena-bulks-zero-emission-vessels-on-water-by-2035-goodfuels-tuftons-100-biofuel-voyage-and-more-maritime-magic/> (2021 年 11 月 8 日访问).

Lewis, Alastair C. 2021. Optimising Air Quality Co-benefits in a Hydrogen Economy: a Case for Hydrogen-specific Standards for NO<sub>x</sub> Emissions. Environ. Sci.: Atmos., 2021, 1, 201. <https://doi.org/10.1039/D1EA00037C>.

Lindstad, Elizabeth et al. 2020. Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su12218793>.

Lindstad, Elizabeth et al. 2021. Reduction of Maritime GHG Emissions and the Potential Role of E-Fuels. Transport Research Part D. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>.

Lindstrand, Nils. n.d. Unlocking Ammonia’s Potential for Shipping. MAN Energy Solutions website. <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine> (2021 年 11 月 24 日访问).

Maersk. 2021. Maersk Secures Green E-methanol for the World's First Container Vessel Operating on Carbon Neutral Fuel. August 19. <https://www.maersk.com/news/articles/2021/08/18/maersk-secures-green-e-methanol> (2021年1月6日访问).

Maersk. 2022. A.P. Moller - Maersk Engages in Strategic Partnerships Across the Globe to Scale Green Methanol Production by 2025. Press Release. March 10 (2022年3月15日访问). <https://www.maersk.com/news/articles/2022/03/10/maersk-engages-in-strategic-partnerships-to-scale-green-methanol-production>.

Malins, Chris. 2018. What Role for Electromethane and Electroammonia Technologies in European Transport's Low Carbon Future? Cerology report for Transport and Environment. [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2018\\_06\\_Cerology\\_What-role-electromethane-and-electroammonia\\_June2018.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2018_06_Cerology_What-role-electromethane-and-electroammonia_June2018.pdf).

MAN Energy Solutions. 2022. NOx emissions from operation on biofuels – two-stroke engines. TWL.08.2022. 3月28日.

Mandel, Ethan. 2021. Norway Approves Grant for World's First Green Ammonia Bunkering Terminal. <https://www.h2bulletin.com/norway-approves-grant-for-worlds-first-green-ammonia-bunkering-terminal/> (2021年9月3日访问).

Manthiram, Arumugam. 2017. An Outlook on Lithium Ion Battery Technology, ACS Cent. Sci. 3, 10, 1063-1069. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.7b00288>.

Mao, Xiaoli, et al. 2020. Refueling Assessment of a Zero-emission Container Corridor Between China and the United States: Could Hydrogen Replace Fossil Fuels? <https://theicct.org/publications/zero-emission-container-corridor-hydrogen-2020>.

Maritime Executive. 2021. Ammonia-Fueled Engine Conversion Planned by 2023 for OSV. October 8. <https://www.maritime-executive.com/article/ammonia-fueled-engine-conversion-planned-by-2023-for-osv> (2021年10月12日访问).

Maritime Knowledge Center et al. 2018. Public Final Report – Methanol as an Alternative Maritime Fuel for Vessels.

Martin, Abigail. 2021. A Step Forward for “Green” Methanol and its Potential to Deliver Deep GHG Reductions in Maritime Shipping. ICCT blog. <https://theicct.org/blog/staff/green-methanol-ghg-reductions-marine-sept21> (2021年12月12日访问).

Motorship. 2020. MAN ES Targets 2024 for Delivery of First Ammonia Engine. August 14. <https://www.motorship.com/news101/alternative-fuels/man-es-targets-2024-for-delivery-of-first-ammonia-engine> (2021年3月12日访问).

Ocean Hyway Cluster. 2021. Enova Supports 15 Hydrogen Projects in Maritime Transport. September 27. <https://www.oceanhywaycluster.no/news/enova-supports-15-hydrogen-projects-in-maritime-transport> (2021年11月17日访问).

Offshore Energy. 2020. Waterfront Shipping Orders 8 Methanol Dual-fuel Ships from Hyundai Mipo Dockyard. December 1. <https://www.offshore-energy.biz/waterfront-shipping-orders-8-methanol-dual-fuel-ships-from-hyundai-mipo-dockyard/> (2022年3月22日访问).

Oftedal, Sveinung. 2020. Driving Shipping Decarbonization – The IMO Greenhouse Gas Strategy and Norwegian Policies and Actions [PowerPoint]. Advancing Shipping Decarbonization in China Webinar. August 18.

OFweek. 2019. 《关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见》解读, 3月22日. <https://nev.ofweek.com/2019-03/ART-71008-8120-30313741.html> (2021年12月21日访问).

Pavlenko, Nikita et al. 2020. The Climate Implications of Using LNG as a Marine Fuel. <https://theicct.org/publication/the-climate-implications-of-using-lng-as-a-marine-fuel/>.

Port of Antwerp. 2020. New Milestone in Sustainable Methanol Production in the Port of Antwerp. May 7. <https://newsroom.portofantwerp.com/new-milestone-in-sustainable-methanol-production-in-the-port-of-antwerp> (2021 年 10 月 14 日访问).

Port Technology. 2021. Maersk Invests in Prometheus Fuels to Utilise Electrofuels in Shipping. September 27. <https://www.porttechnology.org/news/maersk-invests-in-prometheus-fuels-to-utilise-electrofuels-in-shipping/> (2021 年 10 月 14 日访问).

Prevljak, Naida Hakirevic. 2021. Maersk to Ship Bestseller's Products Using Sustainable Biofuel. Offshore Energy. June 29. <https://www.offshore-energy.biz/maersk-to-ship-bestellers-products-using-sustainable-biofuel/> (2021 年 11 月 8 日访问).

Rapier, Robert. 2018. Cellulosic Ethanol Falling Far Short Of The Hype. Forbes. February 11. <https://www.forbes.com/sites/rrapier/2018/02/11/cellulosic-ethanol-falling-far-short-of-the-hype/> (2021 年 11 月 8 日访问).

Royal Institute of Naval Architects (RINA). 2020. Emulsified Methanol as Two-stroke Fuel. [https://www.rina.org.uk/Emulsified\\_methanol\\_as\\_two-stroke\\_fuel.html](https://www.rina.org.uk/Emulsified_methanol_as_two-stroke_fuel.html) (2021 年 12 月 27 日访问).

Royal Society. 2019. Sustainable Synthetic Carbon Based Fuels for Transport: Policy Briefing. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/synthetic-fuels/synthetic-fuels-briefing.pdf> (2021 年 9 月 27 日访问).

Searle, Stephanie. 2019. Will Someone Please Tell Me if Biofuels are Good or Bad for the Environment? <https://theicct.org/blog/staff/will-someone-please-tell-me-if-biofuels-are-good-or-bad-environment> (2021 年 10 月 18 日访问).

Shen, Jianlin et al. 2016. Ammonia Deposition in the Neighbourhood of an Intensive Cattle Feedlot in Victoria, Australia. Sci Rep 6, 32793. <https://doi.org/10.1038/srep32793>.

Ship & Bunker. 2021. Bunker Holding Backs Green Ammonia Marine Fuel Project in Baltic. June 14. <https://shipandbunker.com/news/emea/523676-bunker-holding-backs-green-ammonia-marine-fuel-project-in-baltic> (2021 年 10 月 26 日访问).

ShipInsight. 2020. Approval of Methanol Guidelines by IMO Will Release ‘Pent-up Demand’ for Low Carbon Alternatives. November 9. <https://shipinsight.com/articles/approval-of-methanol-guidelines-by-imo-will-release-pent-up-demand-for-low-carbon-alternatives/> (2021 年 1 月 20 日访问).

Siewers, Hans Eivind. 2021. Charging into Tomorrow Today. DNV. March 3. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Charging-into-tomorrow-today.html> (2021 年 11 月 5 日访问).

Smith, Tristan, et al. 2021. A Strategy for the Transition to Zero-Emission Shipping - An analysis of Transition Pathways, Scenarios, and Levers for Change. Report prepared for the Getting to Zero Coalition. <https://www.globalmaritimeforum.org/publications/a-strategy-for-the-transition-to-zero-emission-shipping>.

Tu, Kevin Jianjun. 2020. Prospect of a Hydrogen Economy with Chinese Characteristics. Études de l'Ifri, Ifri. October. <https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/prospects-hydrogen-economy-chinese-characteristics>.

UNFCCC. 2021. Glasgow Climate Pact. November 13. <https://unfccc.int/documents/310475>.

Valeur, Idha Toft. 2021. “Klaveness CEO Expects that the Next MEPC Meeting will Produce ... Nothing” , ShippingWatch. September 28. <https://shippingwatch.com/carriers/article13315451.ece> (2021 年 9 月 29 日访问).

Valin, Hugo et al. 2015. The Land Use Change Impact of Biofuels Consumed in the EU. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final\\_Report\\_GLOBIOM\\_publication.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Final_Report_GLOBIOM_publication.pdf).

de Vries, Niels. 2019. Safe and Effective Application of Ammonia as a Marine Fuel. Delft University of Technology and C-JOB. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:be8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8?collection=education>.

Wang, Shanshan et al. 2015. Atmospheric Ammonia and its Impacts on Regional Air Quality Over the Megacity of Shanghai, China. Sci Rep 5, 15842. <https://doi.org/10.1038/srep15842>.

Wittels, Jack. 2021. Maersk Makes \$1.4 Billion Green Bet on Methanol-Fueled Ships. Bloomberg. August 24. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-08-24/maersk-makes-1-4-billion-green-bet-on-methanol-powered-ships> (2021年10月27日访问)。

World Bank. 2021. Reduction of GHG Emissions from Ships. The Potential of Zero-carbon Bunker Fuels in Developing Countries and the Role of LNG in the Transition Toward Low- and Zero-carbon Shipping. MEPC/77/7/19. September 17.

Wärtsilä. 2020. Industry Celebrates Five-year Anniversary of World's First Methanol-powered Commercial Vessel. Trade press release. <https://www.wartsila.com/media/news/14-04-2020-industry-celebrates-five-year-anniversary-of-world-s-first-methanol-powered-commercial-vessel-2684363> (2022年3月22日访问)。

Wärtsilä. 2021. Wärtsilä Launches Major tTest Programme Towards Carbon-free Solutions with Hydrogen and Ammonia. Trade press release. July 14. <https://www.wartsila.com/media/news/14-07-2021-wartsila-launches-major-test-programme-towards-carbon-free-solutions-with-hydrogen-and-ammonia-2948017> (2022年3月22日访问)。

Yang, Rui. 2020. Research on the Application of New Energy Pure Battery Powered Ships in the Yangtze River [PowerPoint]. Advancing Shipping Decarbonization in China Webinar. September 16.

Yeh, Sonia et al. 2011. Evaluation of Water Use for Bioenergy at Different Scales. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 5, 361–374. <http://doi.org/10.1002/bbb.308>.

Zhao, Kai. 2019. A Brief Review of China's Methanol Vehicle Pilot and Policy. Methanol Institute. March 20. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/03/A-Brief-Review-of-Chinas-Methanol-Vehicle-Pilot-and-Policy-20-March-2019.pdf>.

Zhou, Yuanrong, et al. 2020. The Potential of Liquid Biofuels in Reducing Ship Emissions. <https://theicct.org/publication/the-potential-of-liquid-biofuels-in-reducing-ship-emissions/>.

生物质能观察 . 2021. 碳达峰行动方案助推生物质能迈入新时代 . 10月28日 . <http://www.chinapower.com.cn/tan-zhonghe/dongtai/2021-11-03/112778.html> (2021年12月24日访问)。

国务院 . 2021. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 . 10月24日 . [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm) (2021年12月24日访问)。





## 联系我们

地址：中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706

邮编：100026

电话：+86 (10) 5927-0688

传真：+86 (10) 5927-0699