



WHEN TRUST MATTERS

能源转型展望2026

到2050年的 航海预报

航运脱碳之路的深度探索



前言

航运业能源转型仍面临关键抉择。

随着我们发布《至2050年海事展望》第十版报告，我们不禁感叹该行业在相对较短的时间内发生了多大演变。当第一版发布时，如今围绕替代燃料、碳定价和大规模脱碳路径的许多讨论仍处于萌芽阶段。自那时以来，新的法规已被引入，技术不断发展成熟，行业抱负也已确立。

然而，过去十年最重要的教训或许在于，转型很少是直线进行的。进步仍在继续，但所走的路线和变化的步伐仍然难以预测。

国际海事组织（IMO）净零框架（NZF）周围持续的不确定性，已为全球行业创造了更复杂的决策环境。FuelEU Maritime和欧盟ETS等区域措施已开始影响燃料选择、运营决策和投资优先事项。然而，亟需的全球协调仍然难以实现，且多种未来路径仍有可能。对于围绕通常运营数十年的资产而建立的行业而言，这构成了重大挑战。许多船东正在做出决策，这些决策将塑造远超2050年的船队，要求他们平衡当前的合规要求与适应不断变化的监管环境的需求。

这凸显了灵活性的重要性。今年的报告概述了四种监管情景，范围从完全采用最初批准的NZF到其被拒绝以及长期的政局僵局。它们共同揭示了不断变化的政策信号如何塑造投资、加速或延缓燃料转型，以及影响全球航运中能效措施的实施。

在此背景下，能效成为船东最直接、最实用的手段，无论未来如何发展，它都能创造价值。正如本报告所示，更强的全球监管信号可能加速能效措施的推广，使全球船队到2050年的能源消耗比主要受区域法规驱动的转型减少高达25%。

减少能源消耗可降低排放、节约成本，并改善使用更昂贵的低温室气体燃料的运营经济性。这是当今决策能在几乎任何未来情景下创造效益的少数领域之一。同样重要的是，它能在能源市场、燃料成本和地缘政治状况可能迅速变化的世界上，增强韧性。

发展低碳燃料市场仍然是另一个关键挑战。在扩大替代燃料能力方面已取得重大进展。

船舶和开发新的燃料路径。但未来燃料生产的规模将取决于对需求确实会出现的信心，同时船东需要信心，即燃料在需要时能够获得。创造这些条件将需要持续的投资、支持性的政策框架以及整个能源供应链的持续进步。

这一挑战的规模强化了一个重要教训：单一利益相关者无法独自推动转型。船东可能投资于船舶，但燃料供应商、港口、承租人、货主、金融机构、技术提供者和监管机构在塑造成功条件方面都扮演着同等重要的角色。价值链某一环节的进展取决于其他许多环节的进展。只有通过协同行动，供应链、基础设施和生产能力才能以支持行业雄心的速度发展。

例如欧盟的可持续交通投资计划，以及其他地区的公共资金、风险共担和长期政策承诺，对于实现大规模低碳燃料生产至关重要。

本年度报告最强烈的讯息无疑是，应对不确定性并准备多种可能的未来，仍然是其中最重要的战略能力之一。不同的监管结果，

市场状况和技术发展可能导致不同的转型路径。行业不应依赖单一的未来预测，而应专注于制定能够随着状况演变而调整的策略。通过在不同情景下对策略进行压力测试，船东可以识别出平衡成本、风险和灵活性的路径，避免那些在一种结果下表现良好但在其他情况下却会使船队暴露风险的决策。

值得鼓舞之处很多。该行业的投资、创新和合作意愿依然强劲。新的解决方案不断涌现，经验不断积累，宝贵的教训也正在被吸取。尽管前路或许并非一帆风顺，但航运业一次次证明，当利益相关方为共同目标而努力时，它能够有效应对复杂挑战。

回顾《至2050年海洋展望》提出的十年，我们可以看到我们的行业已取得了长足的进步。下一个十年将致力于将这一进步转化为规模、韧性和持久变革。而要实现这一目标，离不开一个均衡、务实且全球性的监管框架。让我们希望，国际海事组织成员国能以合作的精神应对这一挑战。



克里斯蒂娜·萨恩斯·德·圣玛利亚 海事DNV首席执行官

目录

前言二

执行摘要4

1 简介 10

2 法规及其他驱动因素展望

2.1 国际海事组织发展 13

2.2 区域和国家发展 15

3 航运脱碳解决方案及其采纳情况 22

3.1 海洋脱碳化现状概览

3.2 全球船队的节能采用

3.3 全球船队替代燃料的采用

12

23

26

32

4 低温室气体燃料的航运市场

4.1 海洋低温室气体燃料市场的关键影响因素 40

4.2 低温室气体燃料的供应 42

5 应对转型 59

5.1 管理转型风险的新框架 60

5.2 示例：用于更新的VLCC船队 62

附件A——低温室气体燃料的海洋市场

附件B – VLCC船队案例假设 71

参考文献73

脚注

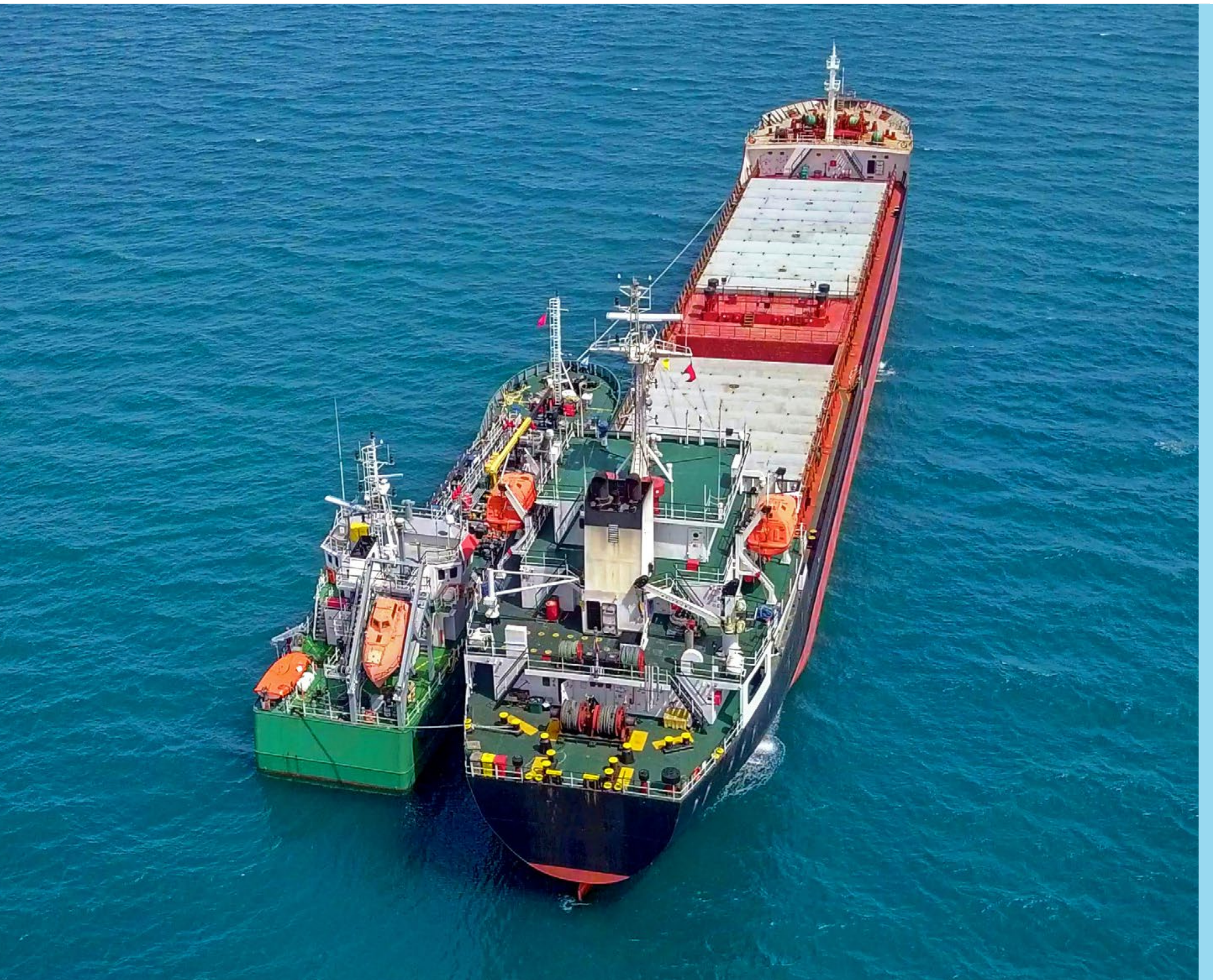
39

69

75

点击您想探索的部分！





执行摘要

航运业正在经历一场前所未有的技术和燃料转型，旨在将行业引向净零温室气体（GHG）排放的道路。国际和地区的监管要求对于确定海上脱碳的规模和速度至关重要，推动着燃料和技术采用方式的转变。鉴于图3-1

当今新建船舶的使用寿命往往超过2050年，因此必须设计船舶以满足未来的法规要求，从而降低整个船队的风险和成本。这增加了结合短期行动（如提高能效）与长期灵活性以使用低温室气体排放燃料的重要性。

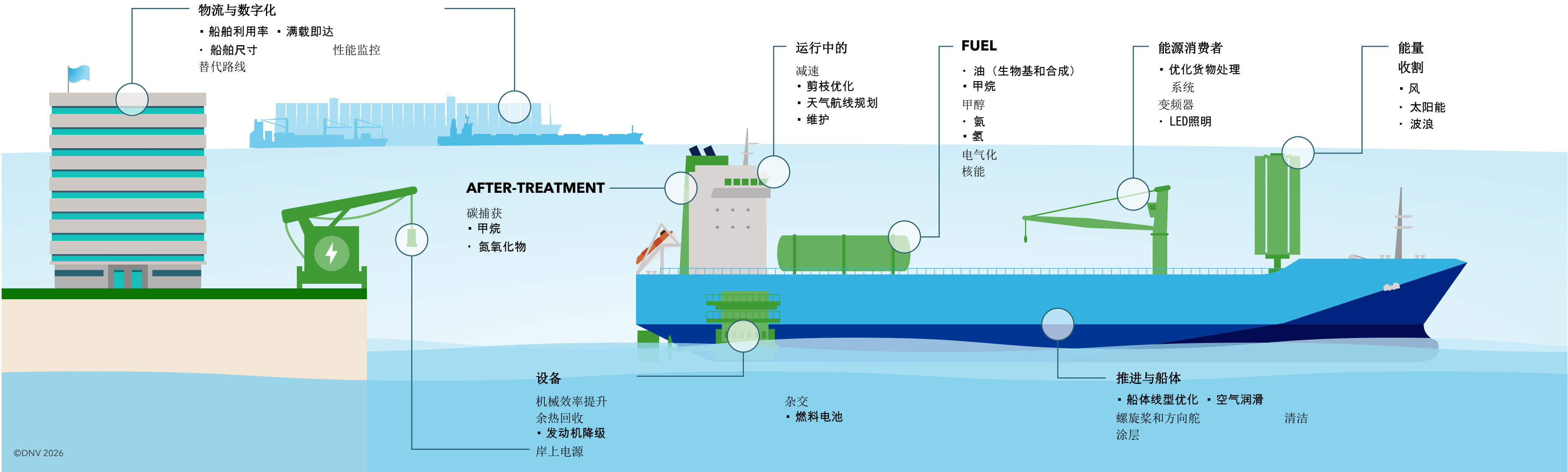
过渡状态

本报告首先从监管环境入手，就这一转型现状提供最新进展。国际海事组织（IMO）关于净零框架（NZF）的决策延迟——该框架旨在到2050年左右实现净零温室气体排放——正在延长不确定性。然而，欧盟法规和商业压力已开始产生影响。

投资决策与运营选择。鉴于国际层面的不确定性，我们提出了四种关于未来监管发展的可能情景。关键启示不仅在于多种监管路径仍有可能，而且在于国际海事组织（IMO）的长期不确定性可能增加针对国际航运的额外区域法规出台的可能性。

脱碳解决方案，可减少船舶和船队的能源消耗与排放 图1

能够减少船舶和船队能源消耗和排放的脱碳解决方案



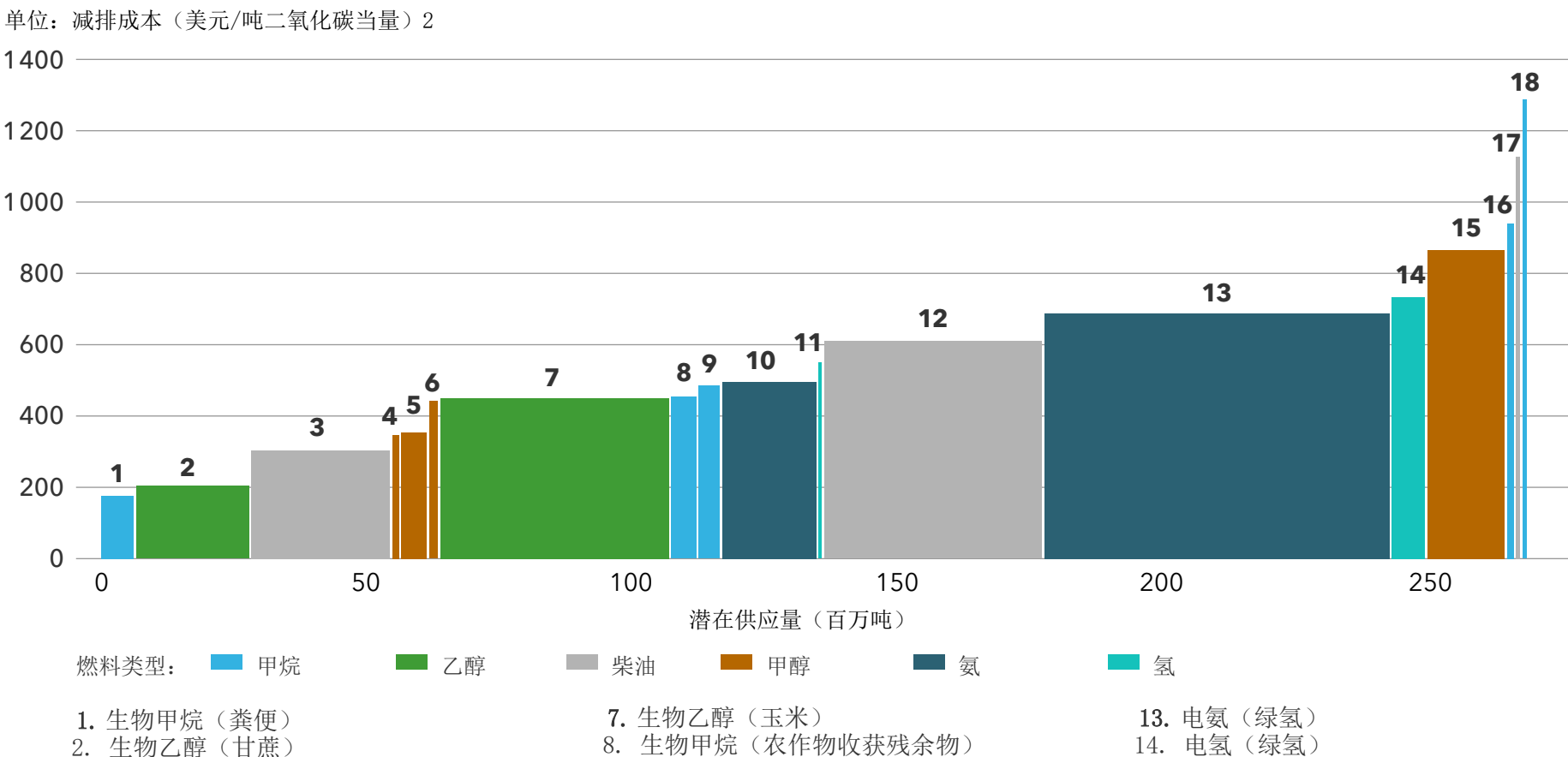
此外，本报告评估了现有脱碳措施组合的现状，重点关注能效措施和替代燃料（措施概述参见图1）。能效日益重要：它可立即减少燃料使用和排放，同时也能降低使用更昂贵的低温温室气体燃料的运营成本。对于全球船队而言，与现状相比，能效措施和航速降低可在2030年将能源使用量减少高达16%，而到2050年的潜力则更大。然而，实现完全的海上脱碳需要从化石燃料转向低温温室气体燃料，并辅以其他解决方案，例如船上碳捕获与封存（OCCS）以及潜在的核能。

接下来，本报告就航运业新兴的低温温室气体燃料市场提供了更新视角。如今，船用燃料市场由化石燃料主导，能源价格是主要的市场决定因素。未来，温室气体法规将通过惩罚未能达到温室气体强度目标的燃料来重塑这一格局。因此，减排成本（美元/

每种燃料的避免的tCO2当量也将决定其竞争力，这不仅涉及价格，还涉及该燃料减少温室气体排放的程度。我们发现，到2030年，全球低碳燃料供应可能达到最高270 Mtoe（见图2），但市场上的实际供应可能较少，因为许多计划中的项目仍取决于最终

投资决策。据估计，到2030年，约62兆吨油当量（Mtoe）的低温温室气体燃料供应将与最初商定的国际海事组织（IMO）新西兰燃料Tier 2整改单元价格380美元/吨二氧化碳当量（tCO2eq）具有成本竞争力。在《FuelEU Maritime》框架下，相应的成本门槛更高。预计到2030年，船舶对低温温室气体燃料的需求量将在4至22兆吨油当量（Mtoe）之间。到2050年，需求量可能达到33至185兆吨油当量（Mtoe）。下限反映了由欧盟法规驱动的采用情况，而上限则与最初批准但现已延迟的IMO新西兰燃料Tier 2相关。

图2
图4-4 各燃料路径在2030年的潜在最大全球低GHG燃料供应量（x轴）和减排成本（y轴）。各路径按减排成本增加的顺序排列，供应量主要基于生产能力数据，而减排成本则结合了DNV估算的燃料成本和假设的GHG强度值。



重要的是，低碳燃料市场不仅受航运业内部发展的影响，也受其他直接使用这些燃料或争夺相同原料的行业发展的影响。我们发现，虽然许多生物燃料在短期内提供最低的减排成本，但它们的可扩展性受生物质的原料供应限制，而这些原料在竞争性行业和应用中也被需要。随着航运业和其他行业对低碳燃料的需求增长，成本最低的生物燃料路径可能会首先被利用，而额外的需求将越来越多地由成本更高的路径（如电燃料和蓝燃料，包括甲醇和氨）来满足。

即使在成熟的市场中，也难以形成单一的全球燃料价格，因为每种燃料类型都通过不同的生产路径制造，具有不同的转化效率、成本、温室气体排放和基础设施需求。这些差异意味着，不同燃料分子和地区的燃料价格可能会持续存在差异，并且通常相互脱钩。

平稳过渡

在监管、技术和燃料市场环境不确定的背景下，为船队制定稳健的技术与燃料战略对船东而言正变得日益重要。本报告介绍了一个用于管理转型风险与成本的分步框架（见图3），指导船东定义潜在战略、在多种情景下进行测试，并识别能够保障船队净收益能力的弹性选择：

- 1. 为船队制定一套潜在的燃料和技术战略
- 2. 制定一套描述关键参数（包括法规和燃料市场）发展的可能情景

该框架旨在捕捉可量化成本和更广泛的转型风险，将塑造车队脱碳的关键因素整合起来：温室气体法规、可用的脱碳措施组合以及低碳燃料市场。

以下，我们简要概述框架的每个步骤，并以一个说明性的超大型原油运输船（VLCC）船队案例研究为例，展示在不同场景下不同船队策略的表现，并突显其对外部监管发展的敏感性。我们考虑的时间范围是至2050年。

第一步：策略
可行的燃料和技术策略因船舶类型和运营区域而异。

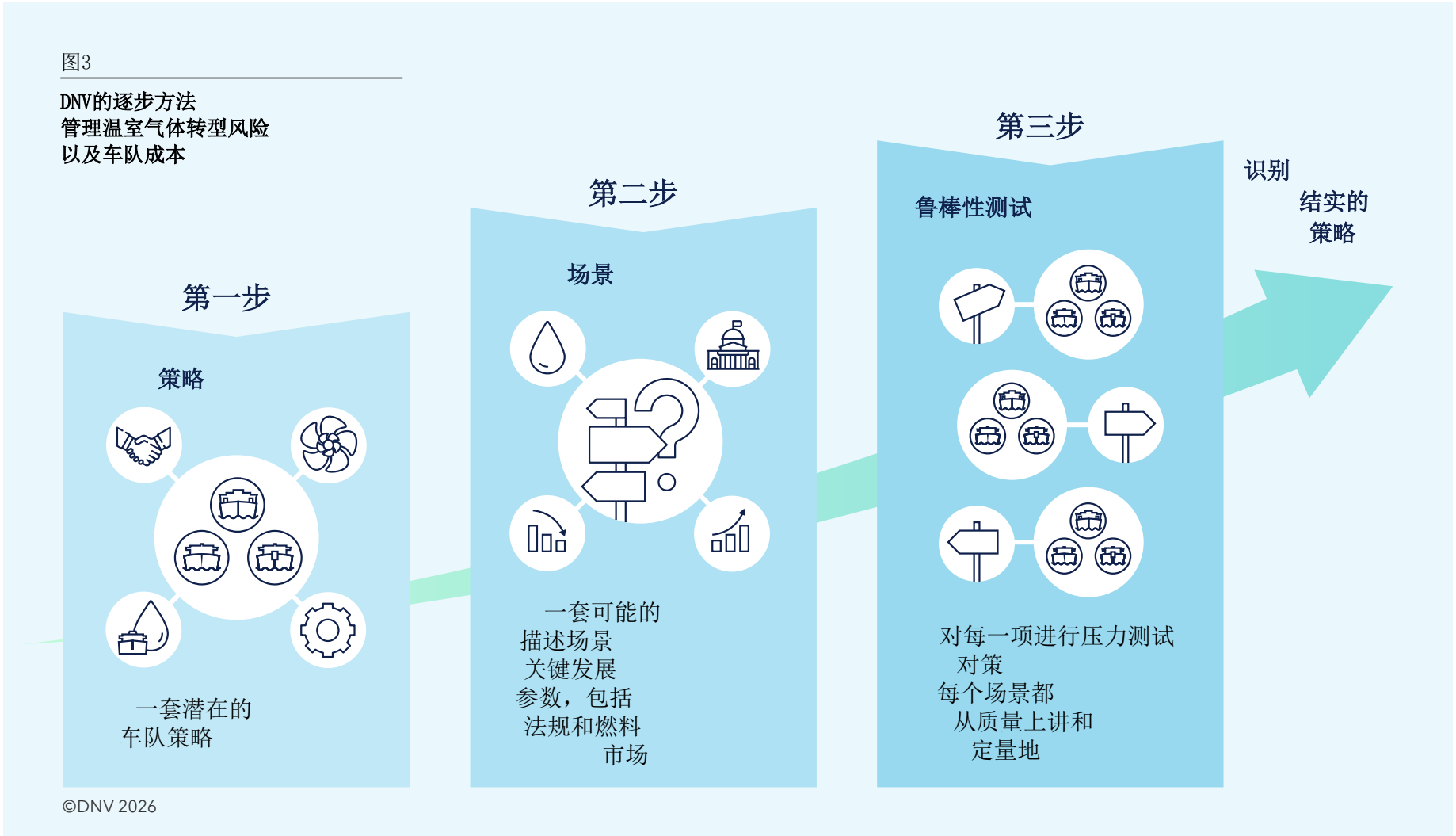


投资决策也受到投资期限、财务能力和风险承受水平等因素的影响。为说明实际操作中策略选择可能存在的差异，可以针对五艘超大型油轮船队定义两种此类策略。

一种策略是继续使用配备有排气净化系统（脱硫塔）的高硫重燃油（HSFO）进行常规燃料的船舶运营，并结合标准

能效提升措施（策略A：采用HSHFO燃料+洗涤器）。另一个是逐步推广LNG双燃料船舶吨位，并将其与更雄心勃勃的能效改进相结合（策略B：逐步推广双燃料LNG船舶）。还可以考虑更多策略，包含广泛多样的解决方案。

第二步：场景
情景描述了通往例如2050年的各种但可能发生的未来，并有助于船东。



应对外部环境的不确定性。目标并非涵盖所有可能结果，而是定义一套内部一致的未来情景，用于测试战略绩效。例如，对于VLCC船队，宏观发展可转化为对比情景，如缓慢转型与快速转型情景：

在缓慢转型情景下，国际海事组织（IMO）的延误演变为长期的监管停滞。区域和国家层面的法规持续推进，但全球船舶低碳燃料市场的进展依然缓慢。生物燃料仍然是航运业最具经济竞争力的低碳燃料选择。承租人和金融机构对其价值链和投资组合的绿色化重视程度有限。

— 在快速转型情景下，国际海事组织（IMO）新西兰燃料标准（NZF）将于2029年重回正轨，并在随后几年得到进一步加强。生物燃料在航运领域的需求急剧增长，同时其他领域的需求也在增长，这给价格带来上涨压力，并限制了航运业的可用性。从2040年起，电子燃料成为低温室气体甲烷和低温室气体柴油的主要定价因素。承租人和金融机构越来越重视绿色运输。

步骤 3：鲁棒性检验

稳健性检验是对每种策略在不同场景下的表现进行的评估，包含两个部分：

一项成本评估，重点关注在所有投入保持不变的情况下，各项策略的经济表现，包括燃料供应、技术可靠性、法规清晰度以及稳定的市场环境。

— 一份风险评估，提供系统化方法，用于识别并定性评估在每个情景（场景）下可能影响每种策略的风险（类似于安全分析中使用的危险识别（HAZID）流程）。

总而言之，针对包含五艘VLCC的典型案例进行的比较稳健性检验表明，在所考虑的所有情景中，没有哪种单一策略具有明显的优势（见图4）。在此，结果以1-5分的统一标准表示，其中1分代表表现强劲，5分代表表现较弱，从而可以直接比较成本与风险。

在缓慢转型情况下，传统的HSHFO+洗涤器策略在成本方面表现更优，这主要是因为其资本成本较低，双燃料LNG带来的合规性收益适中，以及能够持续使用低成本HSHFO。在这种情况下，双燃料LNG船舶的额外资本成本是

未能得到燃料和合规成本节约的充分抵消。同时，两种策略的风险都被评估为相似且较低。

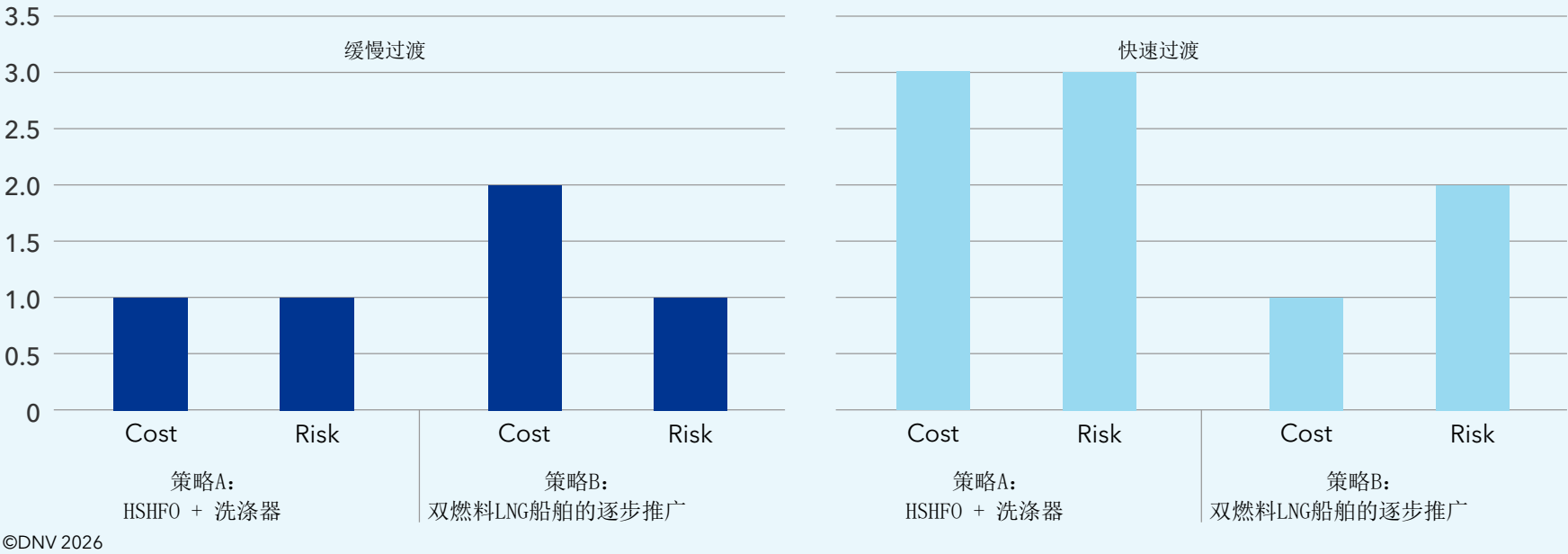
在快速转型情景下，结果会逆转。更严格的温室气体（GHG）监管会显著增加洗涤器策略面临的高合规成本、昂贵的低GHG柴油或罚款的风险，而双燃料LNG路径则受益于较低的燃料消耗和获取低成本低GHG甲烷的途径。在这种情况下，成本差距可能会随着时间的推移而显著扩大，并且LNG策略展现出更强的整体成本性能。在这种条件下，涉及HSHFO和洗涤器的策略被认为风险更高。

此类分析结论——即选择何种策略的决定——将取决于对各种情景发生可能性的判断以及风险的处理方式。该风险管理框架为船东提供了结构化的策略比较，并能够评估成本效率与转型风险暴露之间的权衡。需要注意的是，此处为VLCC案例呈现的结果仅用于说明目的；全面分析应包含更多策略（例如，更多燃料技术和情景）。

图4 图5-6

评估了缓慢过渡（左侧）和快速过渡（右侧）的成本和风险评估

单位：计分



航运业者的建议

根据本报告的调查结果，我们建议船东关注以下三个优先事项：

首先，应将节能措施作为近期无需后悔的行动来加速推广，因为这些措施能立即减少燃料消耗和排放，同时也有利于推广低温温室气体燃料的使用。这适用于新建船舶和现有船舶，因为改造机会依然重大，并且可以

即使是对于老旧船舶而言，也具有经济上的吸引力。对于有欧盟/欧洲经济区贸易业务往来的船舶来说，商业案例可能更为有力，因为FuelEU Maritime和欧盟ETS（欧盟碳排放交易体系）为燃油节约和减排增添了更多价值。

其次，在燃料和技术选择上要保持灵活性。燃料决策应考虑减排成本，而不仅仅是能源成本，因为燃料的竞争力取决于价格和温室气体强度。

根据新兴法规。船东还应考虑将共池作为《FuelEU Maritime》项下的一种有效合规工具，这既为使用低温温室气体燃料的船舶提供了商业理由，也支持了其余船舶的合规。在面临监管或商业压力较大的情况下，也应考虑通过伙伴关系和收购协议尽早采取行动，以确保获得低温温室气体燃料。

第三，制定基于情景规划的舰队战略。本研究提出了一种实现方式。监管和燃料市场的不确定性意味着，仅凭单一预测无法确定稳健的战略选择。因此，舰队战略应针对多种可能的未来进行测试，包括不同水平的监管雄心、燃料可用性以及燃料价格发展。在每种情景下，都应评估成本和风险，因为仅考虑成本无法捕捉与燃料可用性、租船市场、运营和融资相关的重大转型风险。在快速变化的格局下，持续监测监管和技术发展，并重新评估燃料和技术战略至关重要。



在不确定的监管和燃料市场环境下，稳健的车队战略必须在多种可能的未来情景下进行测试，以反映不同的监管雄心、燃料可用性和燃料价格发展趋势。



1 | 引言

《到2050年的海事预测》第十版是DNV 2026能源转型展望（ETO）报告系列的一部分。通过最新版报告，我们旨在为船东在不确定的未来监管和燃料市场条件以及不断变化的技术环境下，为其船队制定稳健的技术和燃料策略提供支持。

航运业正经历着技术和燃料的双重转型。与早期主要由市场驱动的转变不同，如今的转型主要由法规塑造，这将决定海运脱碳化的速度和规模。

尽管关于国际海事组织净零框架（NZF）——该框架旨在于2050年左右实现净零温室气体排放——的延迟决策正在延长不确定性，但欧盟法规和商业压力已开始影响投资决策和运营选择。此外，最近的供应链中断事件，包括霍尔木兹海峡封锁，都凸显了能源安全与绿色转型之间的联系，因为减少对化石燃料的依赖可能降低地缘政治风险，同时支持替代燃料和更具韧性的海上系统的投资。

满足监管要求将需要一套涵盖船舶设计、运营和燃料的广泛脱碳措施。能效是其中的关键部分。

投资组合，因为它能立即减少燃料使用和排放，同时还能改善使用更昂贵的低碳燃料的运营经济性。然而，完全的海上脱碳需要从化石燃料转向低碳燃料，并辅以其他解决方案，例如船上碳捕获与封存（OCCS）以及潜在的核能。

随着转型加速，为船队识别稳健的技术和燃料策略对船东而言日益重要。为支持此目标，本报告汇集了塑造航运脱碳化的三个核心要素：监管发展（第2章）、脱碳解决方案和燃油基础设施的采用（第3章），以及低碳海运燃料的兴起市场（第4章）。随后，这些见解被应用于一个分步框架中，用于管理转型成本和风险，指导船东制定潜在策略、在多种情景下进行测试，并识别能够保障船队净盈利能力的韧性选择（第5章）。报告的结构如图1-1所示。

图1-1

报告结构：内容进展自法规起见

FIGURE 1-1 以及关键驱动因素，通过脱碳解决方案和报告结构：内容，从法规和关键驱动因素，到低碳船用燃料市场，再到它们在船东实际决策中的整合。



©DNV 2026

阐明低碳燃料与替代燃料的区别

本报告使用“低碳燃料”一词，指与传统化石燃料油相比，在井到轮（WtW）温室气体排放方面有显著改善的燃料。替代燃料是指需要不同能量转换技术的燃料，例如液化天然气（LNG）、液化石油气（LPG）、甲醇、氨和氢气，无论其WtW温室气体强度如何。

2 法规及其他驱动因素展望

亮点

在国际航运温室气体排放监管环境不确定的背景下，我们的分析发现：

随着国际海事组织（IMO）就净零框架继续进行谈判，仍有几种监管途径是可能的。

国际海事组织（IMO）长期的不确定性可能会增加出台更多区域性法规的可能性。

— FuelEU Maritime和欧盟碳排放交易体系（EU ETS）仍然是航运脱碳的最强监管驱动力，覆盖了全球船队燃料消耗的估计10%至15%。

承租人仍然是采用替代燃料技术、低碳燃料和节能措施的重要推动力。

2025年10月推迟了采纳国际海事组织净零框架（NZF）的决策后，温室气体排放的监管环境变得不确定。本章回顾了最近的监管发展，并提出了情景以探索可能的未来。这些情景勾勒了NZF的潜在结果以及随之而来的区域监管发展。



2.1 国际海事组织的发展

净零框架

2025年对国际海事组织（IMO）而言是动荡的一年。2025年4月，IMO的海事环境保护委员会（MEPC）批准了《净零框架》（NZF），该框架是成员国精心协商的妥协方案，旨在将航运业引向实现IMO 2023年温室气体（GHG）战略的净零排放目标，即在或约2050年实现。这一开创性的监管框架对船舶的GHG燃料强度提出了要求，并结合了定价与奖励机制，是首个覆盖全球行业的此类机制。NZF原定于2025年10月的MEPC特别会议上予以采纳，但由于自4月以来主要成员国的立场发生变化，尤其是在收入征缴和分配方面的主要关切，该议题未能通过。在10月IMO前所未有的会议的最后一天，由于成员国在前进道路上存在显著分歧，最终进行了投票决定将会议休会一年。

尽管会议延期，国际海事组织（IMO）仍继续制定指南的工作，旨在就新西兰燃料（NZF）提供明确性，并通过跨会期工作组和非正式会议支持其实施。这包括以下方面的指南：1）温室气体（GHG）燃料强度（GFI）的计算和验证，包括正在进行的关于如何核算风能推进系统、岸电以及船上碳捕获与储存的工作；2）燃料认证；以及3）零或近零温室气体排放技术和燃料。

（ZNZs）¹ 这项持续性的工作包括了成员国之间的建设性技术讨论。

新西兰燃油基金（NZF）于2026年4月的第84届海上环境保护委员会（MEPC）会议上再次审议，会议就此可能的前进方式进行了广泛讨论。尽管在建立国际海事组织净零基金等关键要素上仍存在分歧，但MEPC同意继续讨论以确保达成共识。会议未预期或预计就NZF的设计特征做出任何决定，但同意在2026年12月第一周举行的第85届MEPC会议前，再召开两次临时工作组会议以继续进行谈判。

如果关于新西兰燃料标准（NZF）的关切通过制定实施指南来处理，并且《国际防止船舶造成污染公约》第六附则（MARPOL Annex VI）草案没有重大修改，那么NZF有可能在2026年12月被采纳。然而，很可能需要做出实质性修改，届时必须就新的法律文本进行谈判、批准和传播，才能在至少六个月后才能生效。这意味着该法规最早可能于2029年生效。然而，谈判也可能在2026年之后继续进行，从而进一步延长生效时间。

过去一年，在IMO，其他关于温室气体（GHG）的工作领域仍在继续。其中包括进一步制定《IMO 2024海洋燃料生命周期温室气体强度指南》（LCA指南）。

下文将重点介绍这些工作重点中的一些关键进展，以及为何航运利益相关方应关注即将开展的工作，这涉及碳强度指标（CII）评级评审的第二阶段以及船舶能效管理计划（SEEMP）机制的评审启动。

生命周期评估指南

2023年国际海事组织（IMO）温室气体（GHG）战略中的减排目标，以及新西兰燃料标准（NZF）对单艘船舶的要求，均基于“井到舷”（Well-to-Wake, WtW）的温室气体排放，旨在防止排放从航运业转移到其他行业。因此，2024年生命周期评估（LCA）指南是IMO温室气体监管框架的关键组成部分，规定了如何计算提供给船舶的海上燃料和电力的“井到罐”（Well-to-Tank, WtT）和“罐到舷”（Tank-to-Wake, TtW）的温室气体排放。

过去一年，国际海事组织（IMO）持续完善这些指南，重点在于细化计算方法，包括讨论如何设定默认排放因子以及如何核算土地利用变化和船上碳捕集。这项工作还包括讨论如何进一步制定和实施海洋燃料的可持续性标准，以及如何建立燃料供应链可追溯性的履约链模型。

还需要进一步工作来为超过100种燃料路径填写默认排放因子的占位符。目前，生命周期评估指南为化石重油（HFO）和船用柴油（MGO）燃料提供了默认的Well-to-Tank（WtT）排放因子。



化石燃料的主要类型及其途径的TtW（Well-to-Wheel）因素。为解决这些差距，已成立一个科学工作组，以评估新的默认排放因子建议，并向MEPC（海上环境保护委员会）提供建议，包括针对化石液化天然气（LNG）和几种生物燃料途径。

预计未来几年将继续开展LCA指南方面的工作，并会定期更新。与默认排放因子、土地利用变化、可持续性标准以及产品责任追溯模式相关的决策将具有特别重要的意义，因为它们将影响不同燃料路径的资格和相对竞争力。

MEPC 84还采纳了有关测量船舶发动机甲烷（CH4）和一氧化二氮（N2O）排放的指南。这些指南创建了一个工具包，可用于确定实际的船舱至船尾甲烷和一氧化二氮排放值。它们目前尚未与任何强制报告框架挂钩，但预计将在生命周期评估（LCA）框架下以及在新西兰燃料指数（NZF）下的GFI计算中支持实际排放因子的使用。这些指南也可用于确定欧盟排放交易体系（EU ETS）和FuelEU Maritime下的实际甲烷和一氧化二氮排放。³

短期温室气体减排措施评估（CII和SEEMP）

碳强度目标。MEPC 84会议启动了这些短期措施的二期审查，计划于2028年完成，并讨论了替代碳强度指标（CII）的潜在发展、对节能减排管理计划（SEEMP）框架的完善，以及如何确保国际海事组织短期措施与净零燃料（NZF）之间的协同效应。该审查与NZF的进展相关联，因为只有当NZF的设计清晰时，才能考虑NZF与CII/SEEMP之间的协同效应。

2.2 区域和国家发展

EU

尽管国际海事组织（IMO）存在动荡，欧盟（EU）仍持续推进其在欧盟及欧洲经济区（EEA）内航运的监管工作，并针对欧盟/EEA之间以及来自/前往欧盟/EEA的部分国际航运进行监管。自2025年1月1日起，《FuelEU Maritime Regulation》（EU 2023/1805）开始对在欧盟或EEA进行货运或客运商业运输的5000总吨（GT）以上的船舶设定温室气体（GHG）排放强度（gCO₂eq/MJ）要求，并适用于欧盟/EEA航线中使用的50%能源（DNV，2024c）。日益严格的GHG排放强度目标和岸电要求，结合不合规的巨额罚款，将激励驶入欧盟/EEA港口的船舶转向低GHG燃料和岸电使用。《FuelEU Maritime Regulation》将于2027年12月31日前进行审查。审查将考虑包括新型船舶和尺寸、可能将范围扩展至海上船舶和5000总吨以下的船舶；根据欧盟加强的气候目标设定更严格的GHG排放强度目标；以及将船上碳捕获纳入合规方法等事宜。



甲烷（CH₄）和氧化亚氮（N₂O）排放。根据欧洲委员会于2026年7月发布的提案，欧盟碳排放交易体系（EU ETS）目前正在进行审查，预计将于2027年第一季度达成政治共识。该提案包括将欧盟监测、报告和核查（MRV）以及ETS的适用范围扩展到更多类型的船舶、尺寸和活动，并通过将MRV体系作为欧盟ETS和FuelEU Maritime数据收集和报告的共同框架，简化报告要求。此外，该提案引入了一种基于配额的新支持机制。

加快可持续海运燃料的推广和零排放推进技术的部署。欧盟碳排放交易体系（EU ETS）和FuelEU Maritime均包含规定，即如果国际海事组织（IMO）采取类似措施，将审查这些法规。欧洲委员会在其《工业海运战略》中强调，将“根据国际海事组织（IMO）采取的全球措施，修订相关欧盟立法，以避免重复支付”（EUC，2026）。

其他地区和国家计划

此外，还有其他一些涵盖国际航运的区域性及国家监管体系。这些体系单独来看，对全球燃料和技术转型的影响有限，但汇集起来则增加了监管压力和合规复杂性。

欧盟碳排放交易体系（EU ETS）现已完成其履约期。自2026年1月1日起，航运业必须为其在欧盟碳排放交易体系范围内的100%排放提交配额，该体系现已涵盖

根据船舶报告的数据显示，FuelEU Maritime与排放定价相结合

这包括英国碳排放交易体系（英国ETS），涵盖5000总吨及以上的货船和客船，自2026年7月1日起。与…一样

欧盟碳排放交易体系（EU ETS）将从2027年1月1日起将5000总吨（GT）及以上的离岸船舶纳入英国方案。英国碳排放交易体系适用于国内航次，即始发和终到英国港口的航次，以及所有船舶在英国港口的挂靠，包括进行国际航行的船舶。英国也正考虑在后期将英国/欧洲经济区航次的50%纳入体系（能源安全与净零部门，2025年）。虽然仅从事国际航行的经营者可能不会面临很高的英国碳排放交易体系成本，但如果他们航行至英国港口，仍需参与所有必要的行政活动。体系范围内的排放（二氧化碳、甲烷、一氧化二氮）与欧盟碳排放交易体系相同，所有排放均从全生命周期（TtW）角度进行考虑，并可能在后期转向运营与制造（WtW）角度。欧盟和英国正考虑将其碳排放交易体系相衔接，但时间表和影响仍不明确（欧洲联盟委员会，2025年）。

挪威也针对特定船舶类型和运营区域制定了具体要求。这包括对世界遗产峡湾运营的零排放要求：2026年1月1日起适用于小于10,000总吨的客船，以及2032年1月1日起适用于10,000总吨及以上的客船。此外，自2025年1月1日起，渡轮和渡轮服务的公共采购原则上必须明确零排放解决方案，在技术或经济上不可行或必要基础设施缺乏的情况下有明确例外。最后，自2029年起，挪威大陆架的海上作业者必须降低石油活动中使用的船舶的温室气体强度。这些要求

在规定的合规期内在操作员所属的整个船队层面，而不是在个别船舶层面应用。 10

通过非洲主权碳注册倡议，吉布提和加蓬也对进出其港口航行的部分排放征收了每吨二氧化碳当量17美元的碳税。更多非洲国家正在考虑加入这一碳税计划（非洲主权碳注册基金会，2026年）。

其他国家也在制定国家层面的碳排放交易体系（ETS）和监测报告核查（MRV）方案，目前的范围尚不明确，或仅聚焦于国内航运。土耳其已批准将其航运业纳入其ETS（TR ETS），预计将于2026年作为试点方案启动。T R ETS的适用范围，包括船舶类型、尺寸门槛和报告程序等，尚待制定。此外，一系列国家ETS方案涵盖了国内海运，但尚未明确计划将其范围扩展至国际航运。例如上海试点ETS和韩国排放交易体系（K-ETS）。巴西正在制定其国家ETS，并将海运列为覆盖领域。该体系处于分阶段实施中，目前侧重于报告环节，尚未投入运行。中国于2022年建立了其MRV体系，2026年4月一项关于航运绿色低碳转型的最高级别政策重申了进一步发展该体系的意愿。然而，该政策并未明确是否将引入ETS体系，亦未

全球航运相关二氧化碳排放量在不同国家的占比

通过欧盟碳排放交易体系（EU ETS）和FuelEU，欧盟已引入针对港口停泊、欧盟/欧洲经济区内部航行以及进出该区域航行的排放要求。其他国家正在考虑根据类似范围或仅针对国内航行（例如英国）制定相关规定。

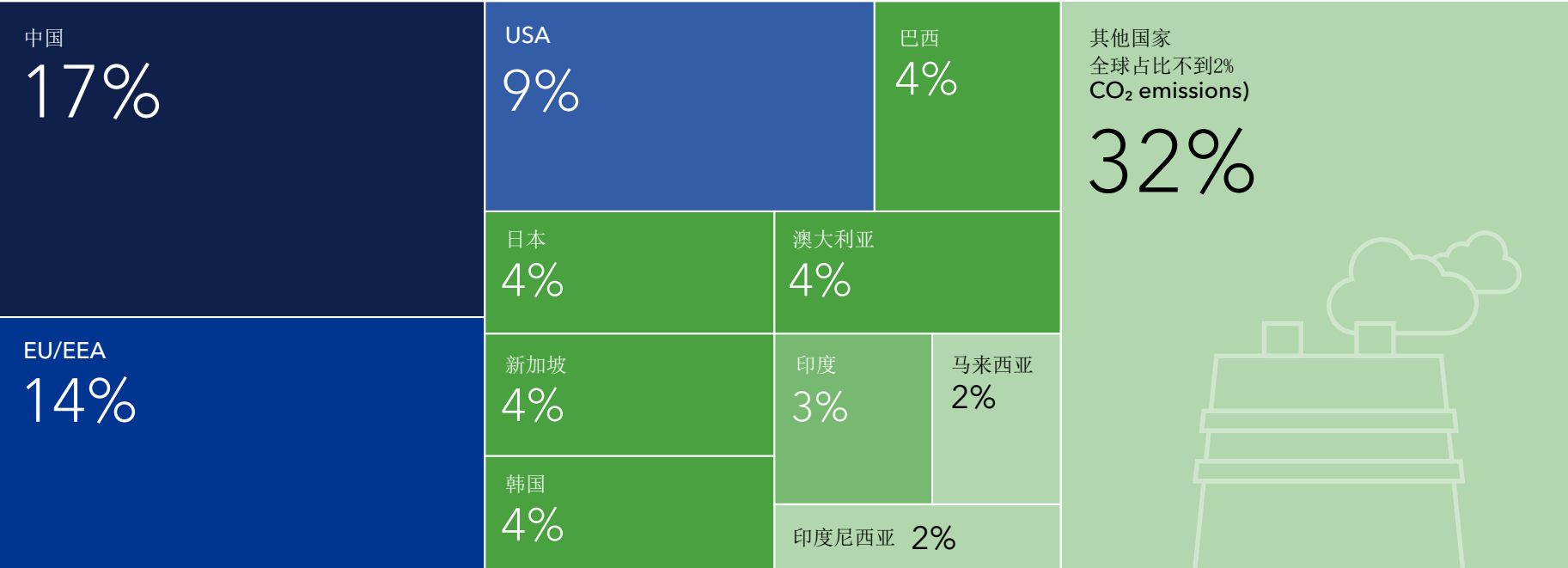
来自超过5,000总吨、归不同国家及欧盟/欧洲经济区所属的船舶，包括100%的国内/欧盟/欧洲经济区航次排放以及50%的进出航次排放。

为说明此类计划将涵盖多少排放量，图4-1概述了全球油轮至船舶排放的CO2份额。

该数据显示，中国（17%）、欧盟/欧洲经济区（14%）和美国（9%）占据主导地位，而前10名国家和欧盟/欧洲经济区合计占四分之三（68%）。

图2-1 全球船舶燃油消耗占比概述（按不同国家及欧盟/欧洲经济区划分）

本图概述了全球船舶燃油消耗占比，涉及不同国家及欧盟/欧洲经济区。数据基于2025年全球船舶自动识别系统（AIS）数据、DNV MASTER（船舶航迹、排放与减排潜力测绘）数据库及航次模型估算。仅包含总吨位（GT）超过5,000的船舶。



由于四舍五入，百分比可能无法完全加总至100%； 数据来源：2025年全球AIS数据及DNV的MASTER（船舶航迹、排放与减排潜力映射）和航次模型

©DNV 2026

是否适用于外国籍船舶。我们强调，通常而言，制定ETS的时间表相对较长。国际航运可能被纳入的时间表取决于是否存在一个可以在此基础上扩大的现有体系，或者是否必须从零开始开发新体系。

图2-2总结了截至2026年生效的温室气体（GHG）法规，并涵盖了国际航运。如第三章将进一步讨论的，现有的国际海事组织（IMO）能效法规迄今为止一直是全球船队能效提升的一个相当重要的推动力。

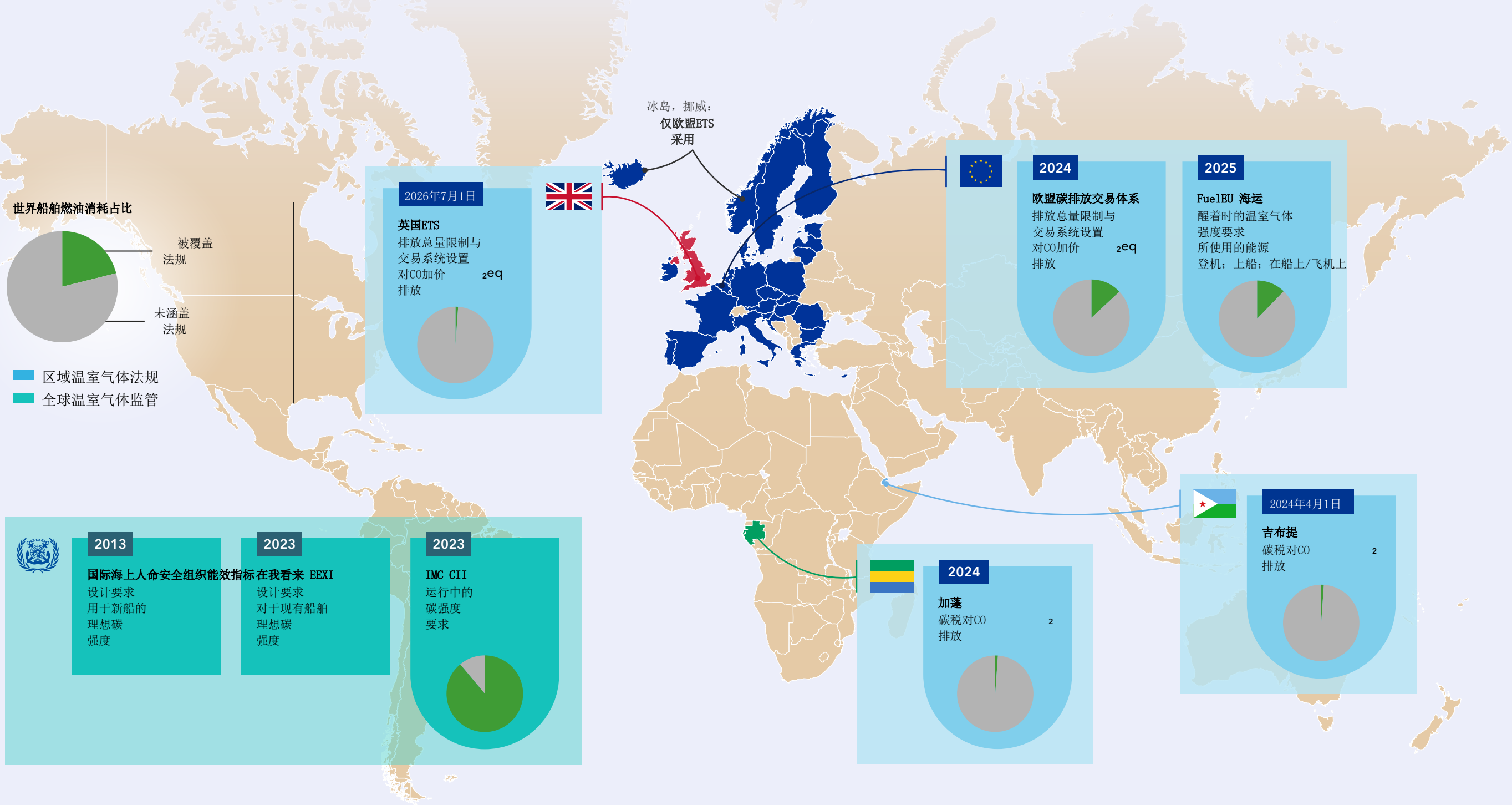
供给侧的低温室气体燃料和基础设施政策

尽管鼓励减少温室气体排放的法规仍然是航运脱碳化的主要驱动力，但供给侧政策可以通过降低低碳燃料的成本、提高其供应能力，同时推动配套基础设施（包括岸电设施）的部署来提供帮助。

例如，欧盟的可持续交通投资计划（STIP）旨在释放超过2000万吨可持续的低温室气体燃料，以满足ReFuelEU和FuelEU Maritime产生的需求。¹⁷ 这将通过降低生产者风险、筹集资金和增加长期市场确定性来实现。欧盟的替代燃料基础设施法规（AFIR）¹⁸为部署互操作的替代燃料基础设施以及岸电基础设施设定了具有约束力的目标。

图 2-2

截至2026年生效的选定温室气体法规及其对全球船队总燃油消耗的覆盖范围。 本图不包括国际海事组织数据收集系统（DCS）和欧盟监测、报告和核查（MRV）等报告要求。



©DNV 2026

港口。根据《非化石燃料船舶和港口岸电使用管理办法》（AFIR），到2030年，相关的欧洲运输网络（TEN-T）核心及综合港口需要提供岸电，以覆盖至少90%的5,000总吨及以上的集装箱和客船的相关年度港口调用。

中国强调长期规划，并通过试点项目推广低碳燃料，同时通过多个框架而非单一统一计划提供政策支持。例如，2025年，中国国家发展和改革委员会（NDRC）推出一项国家投资计划，为低碳示范项目提供高达20%的公共联合资助，明确涵盖可持续航空燃料（SAF）、绿色甲醇以及利用碳捕获、利用与封存（CCUS）技术生产的二氧化碳燃料作为案例。

在美国，通过《降低通胀法案》（IRA）为支持低温温室气体燃料生产提供的税收抵免和清洁氢能激励措施已被大幅削减或取消。然而，某些要素仍然有效，例如环保署（EPA）清洁港口计划直接促进替代海洋燃料及相关基础设施的采用。

这些政策有望随着时间的推移降低生产成本，特别是针对目标燃料，从而实现大规模产能扩张。第四章详细讨论了未来低碳燃料市场。另见DNV《氢能至2060展望》第三章，以获取有关氢能相关政策与监管框架的更详细分析（DNV，2026a）。

其他塑造技术和燃料选择的规定

除了旨在直接减少温室气体排放的法规外，其他措施也影响着全球船队的燃油和技术选择。关键例子包括岸电要求和针对氮氧化物（NO_x）及硫氧化物（SO_x）排放的法规。

岸电要求正日益被强制执行，以减少停泊时的排放（DNV，2026d）。例如，加利福尼亚州的停泊地法规要求特定类型的船舶使用岸电或等效措施，中国规定，能力充足的船舶在河港停泊超过两小时或在沿海港口停泊超过三小时时，必须使用岸电，仅有有限的豁免。根据FuelEU Maritime计划，从2030年起，集装箱船和客船将被要求在欧盟主要港口连接岸电，仅有有限的豁免，且对不合规行为处以高额罚款。

氮氧化物（NO_x）和硫氧化物（SO_x）的排放根据国际海事组织（IMO）的《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL）第六附则，通过全球燃油硫含量限制和分级的NO_x发动机标准进行管理。船舶可以通过使用合规燃油或使用洗涤器作为等效措施来满足SO_x排放限值，其中开式系统将洗涤水排放至大海，而闭式系统则将其循环利用。



自2020年起，全球硫排放上限为0.50%，在硫排放控制区（SECAs）降至0.10%。适用于在氮氧化物排放控制区（NECAs）运营的新船的NO_x Tier III标准，比早期标准严格约80%。国际海事组织（IMO）已指定了八个SECAs和七个NECAs，其中包括于2027年生效的北大西洋东北部ECA。

（油）；此外，巴拿马运河要求过境船舶使用船用馏分油。类似地，欧盟的硫排放指令要求停靠在欧盟港口的船舶燃烧硫含量低于0.10%的燃料，与欧洲水域的ECA标准相呼应。

越来越多的港口和沿海司法管辖区正在限制或禁止洗涤塔排放，特别是开式循环系统的排放。例如，根据《北大西洋海洋环境保护公约》（OSPAR），欧洲西北部的几个国家将从2027年7月1日起在内陆水域和港口区域禁止开式循环排放。

除国际海事组织（IMO）外，一些司法管辖区实施了地方性控制措施。例如，中国的国内排放控制区（ECA）规定一般沿海水域燃油硫含量上限为0.5%，特定区域则为0.1%；加利福尼亚州24海里宽度的排放控制区仅允许硫含量低于0.10%的蒸馏燃料（因此禁止重油）。

2.3 商业行动推动脱碳

国际和区域层面的监管要求对于确定海上脱碳的规模和速度至关重要。承租人和货主的需求端行动也在加速对能效措施、替代燃料技术和低温室气体燃料的使用方面发挥着重要作用。

一些承租人和货主支持实施替代燃料和节能措施。他们通过发布招标，为新造船指定燃料或设计要求；在承租的船舶上启动试点项目以测试新兴技术；并通过增加租船合同条款，与船东共享投资成本和节油收益。此类安排主要限于长期定期租船合同。

承租方支持采用低碳燃料并支付溢价以减少排放的意愿，受监管要求、公司内部温室气体减排目标、客户压力以及公司层面和/或产品层面的范围三排放信息披露要求驱动，且差异显著。

航运市场。21 一般来说，面向客户的承租人，尤其是在集装箱航运和汽车运输领域，面临着更高的声誉风险和范围三信息披露要求，这使得他们更愿意并且有能力为低碳运输支付更高的运费。相比之下，散货和油轮承租人则处于成本驱动的市场，缺乏差异化，利润微薄，且对最终客户缺乏可见性，这限制了他们进行减排的能力和动力，除非有法规强制要求，否则这种行为不太常见。这些差异也可能导致了

全球船队中不同船型替代燃料使用率不均，如第三章所示。

货主方的行动也可以采取集体倡议的形式。一个显著的例子是零排放海运买家联盟（ZEMBA），该联盟汇集了货主的货运需求，并支持在早期行动中采用低温室气体燃料。ZEMBA发出的第二份招标专注于电子燃料，并于2025年12月决出两家获胜者：赫伯罗特将在跨洋航线上使用电子甲醇于大型甲醇双燃料集装箱船上，而北海集装箱公司（NCL）将在世界上首艘氨燃料化集装箱船——亚拉·艾德号——于北欧航线上使用电子氨（ZEMBA，2026）。对于亚拉·艾德号而言，与ZEMBA的合同将有助于缩小燃料成本差距。

尽管金融业继续通过可持续及传统融资为航运脱碳提供资金支持，但目前鲜有证据表明私人融资是迄今为止实现脱碳的关键驱动力。公共资金和融资方案对于支持低碳燃料的生产和推广，以及降低私人融资风险仍然至关重要。

承租人愿意为较低排放支付溢价，主要受监管压力、公司内部温室气体减排目标、客户压力以及公司层面和/或产品层面的范围三排放信息披露要求所驱动，并且这种意愿在航运细分市场中差异显著。

未来，尤其考虑到监管不确定性，我们在第4.1节强调，所有海上利益相关者之间采取战略性和协调一致的行动，对于解决诸如燃料技术采用受燃料可用性（生产、分销、供油基础设施）影响以及反之亦然等障碍至关重要。解决这一“鸡生蛋还是蛋生鸡”挑战的需求方，例如可以由ZEMBA等买家联盟、绿色航运走廊伙伴关系以及全球产业联盟和全球海事论坛等行业合作论坛来协助。

雅拉·艾德，世界上首艘可运输氨气的集装箱船。

2.4 国际航运温室气体监管发展的四种情景

随着国际航运进入监管不确定性时期，我们制定了四种监管情景，将其作为“思维工具”，用以探索可能的结果并支持决策制定。针对每种情景，我们勾勒了国际海事组织（IMO）的发展趋势，并在此基础上，探讨了欧盟及其他地区监管的潜在发展。图2-3提供了概述，包括监管时间线，随后是对每种情景的简短描述。

2026年12月将导致《新西兰自由贸易协定》（NZF）于2028年4月生效，首个实施年份预计为2029年。

鉴于国际海事组织（IMO）的最新发展，该情景假设欧盟将修订《FuelEU Maritime》和欧盟碳排放交易体系（EU ETS），以避免双重支付，这符合欧盟的工业海洋战略。该情景还假设英国将与欧盟碳排放交易体系（EU ETS）保持一致，并且不会出台进一步的区域法规。

针对国际航运。在此情况下，新西兰基金会将成为海洋脱碳化的主要推动力。

国际海事组织将在《新西兰法案》生效五年后（2033年）进行审查，以考虑（除其他外）修订全球燃料指数（GFI）削减系数、补救单元（RU）价格，以及纳入400总吨及以上的船舶。

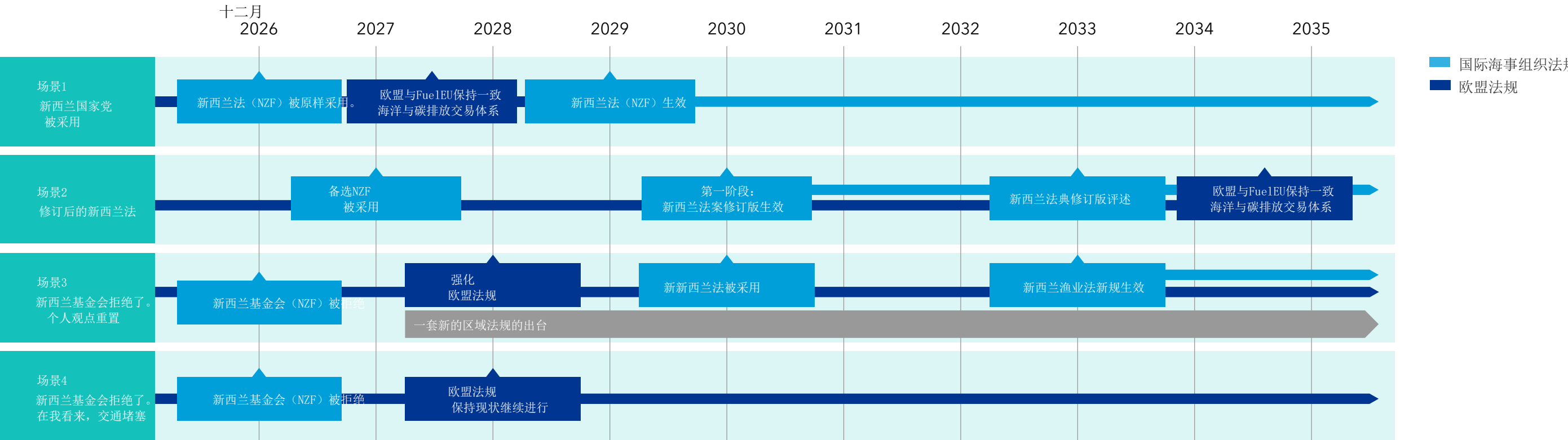
场景2：修订版NZF

在场景2中，国际海事组织（IMO）成员国就新西兰燃料标准（NZF）达成妥协，该标准于2026年12月在海上环境保护委员会（MEPC）第85次会议上获得批准，并于2027年在海上环境保护委员会（MEPC）第86次会议上通过。这一时间表意味着NZF最早将在2030年生效。对NZF的担忧通过修改或调整法规中的要素来解决，可能包括分阶段引入，首先从技术要素开始，并在几年后进行审查。

这些情景涵盖了从2026年12月MEPC再次会议时采纳NZF现状，到拒绝NZF并在IMO内出现政治僵局的情况。我们关注的是在已采纳的法规之上，法规的变化。

图 2-3

国际航运温室气体监管发展的四种情景



©DNV 2026

鉴于国际海事组织（IMO）的这些发展，该情景假设欧盟将推进FuelEU Maritime和欧盟ETS，直至第二阶段全面实施NZF后的至少两年——换句话说，将延续至2030年代中期。这符合欧盟的计划，即根据IMO的发展情况审查这些法规，以考虑可能的协调。该情景还假设英国将遵循与欧盟相同的时间表，并且其他地区不会出台进一步的地方性法规来规范国际航运。

场景3：新西兰基金会拒绝，国际海事组织重置

在场景3中，新西兰法案于2026年12月被否决，国际海事组织（IMO）将启动与未知监管设计和时间表的新的框架谈判进程。例如，这可能涉及仅包含技术要求的监管措施谈判，而排除涉及收入征收和分配的经济要素。该场景假设新的监管措施将于2029年谈判达成，2030年通过，并于2032年生效。根据全球地缘政治形势及其对IMO谈判的影响，这一时间表很容易被延长。

如果当前的NZF被拒绝，并且新的谈判进程时间表未知，这一情景假设欧盟将加强FuelEU Maritime和欧盟ETS，以弥补全球行动的不足，设定更严格的减排目标，并对排放配额设定更严格的上限。这一情景还假设一系列区域将出现

受FuelEU Maritime和欧盟ETS启发的法规，导致形成了一片船东需要应对的法规拼凑局面。

在此情况下，我们还会看到对国际海事组织（IMO）短期措施的更多关注——例如，实施EEDI第四阶段、实施新的EEXI第二阶段、进一步加强SEEMP，以及将CII改造为具有更强执行力的工厂和设施技术性温室气体法规。

场景4：新西兰工党被拒，国际海事组织陷入僵局

在场景4中，新西兰提案于2026年12月被否决，国际海事组织（IMO）在全球变暖谈判中进入无限期的僵局。这意味着在关于船舶温室气体排放的议题下，将不会进行实质性的谈判，而IMO将继续对现有法规进行修补，但不会有大型的改动。

在此IMO僵局下，该情景假设欧盟继续按现状推进FuelEU Maritime和欧盟ETS，并未因缺乏全球机制而进一步加强。它还假设欧盟无意实施将国际航运纳入其范围的其他区域或国家法规。

我们强调，IMO可能存在此处未涵盖的其他潜在结果。重要的是，此处概述的监管时间表可能根据谈判的进展而延长。有关IMO监管流程的更多详情，请参见“全球监管需要时间”框。

全球法规需要时间。

国际海事组织是联合国的一个专门机构，其成员国在利益分歧的情况下努力寻求基于共识的解决方案，以确保通过的各项法规得到广泛实施和执行。

与之前的国际海事组织（IMO）温室气体排放法规一样，新西兰法案已被纳入《国际防止船舶造成污染公约》（MARPOL公约）第六附则的修正案中。

监管流程遵循特定的节奏，设有固定的会议日程以及监管发展的程序和步骤。它从提案提交开始，经过起草、批准、circulation（注：此处英文原文为circulation，根据上下文推测可能意为“传阅”或“发布”，若需精确翻译请提供上下文）、采纳、接受，最终进入生效阶段。谈判是动态的，并受到国际政治其他发展的影响，这些影响会波及到国际海事组织（IMO）。

考虑到提案和起草可能需要数年，一份包含对MARPOL第六附则修订的文本才能进入批准阶段。即便最终在IMO（这属于例外情况）通过投票做出决定，最终投票前的谈判过程



这涉及一系列大小妥协。对于新西兰（NZF），从通过修订的2023年国际海事组织（IMO）温室气体（GHG）战略开始谈判，到2025年在海上环境保护委员会（MEPC）第83次会议上获得文本批准，大约花费了两年时间。然而，在谈判开始之前，相关理念和总体建议已经流传了数年。



3 脱碳解决方案及其在航运领域的应用

亮点

随着船东在提高效率和准备使用低碳排放燃料方面面临日益增长的压力，我们的分析发现：

根据相继实施的EEDI各阶段交付的船舶，其二氧化碳排放效率均表现出持续提升。

即使是船龄15年的船舶，也可以提出一项极具说服力的节能改造商业方案。

替代燃料能力总吨位将从2020年全球船队的0.4%跃升至2026年的5.2%。

液化天然气和甲醇主导替代燃料技术；其已安装的产能并未得到充分利用，但它们的使用增长正推动对燃料加注基础设施的需求。

低温温室气体燃料 bunkering 活跃的港口集中在欧洲和东亚的主要贸易航线上。

今天的造船决策将对合规性、成本、运营灵活性和长期竞争力产生长期影响。本章强调综合系统方法，回顾了能效采用情况，提出了15年干坞坞修期的商业案例和改造时间表，并强调了量化效率影响的重要性。我们考察了替代燃料的采用情况，涵盖了技术现状、实际使用情况、燃油加注能力的增长以及港口低碳燃料的可用性。

3.1 海洋脱碳现状概览

如图3-1所示，脱碳解决方案涵盖广泛措施。这些措施范围从运营和技术节能措施到提高燃料灵活性和采用低碳气替代燃料（DNV）。

2026c；DNV，2025b；DNV，2025d；DNV，2025e；DNV，2025f；DNV，2025i）。此外，还包括在混合机械配置中使用内燃机、燃料电池和电池部署先进的能源转换技术。

图3-1
能够减少船舶和船队能源消耗与排放的脱碳解决方案

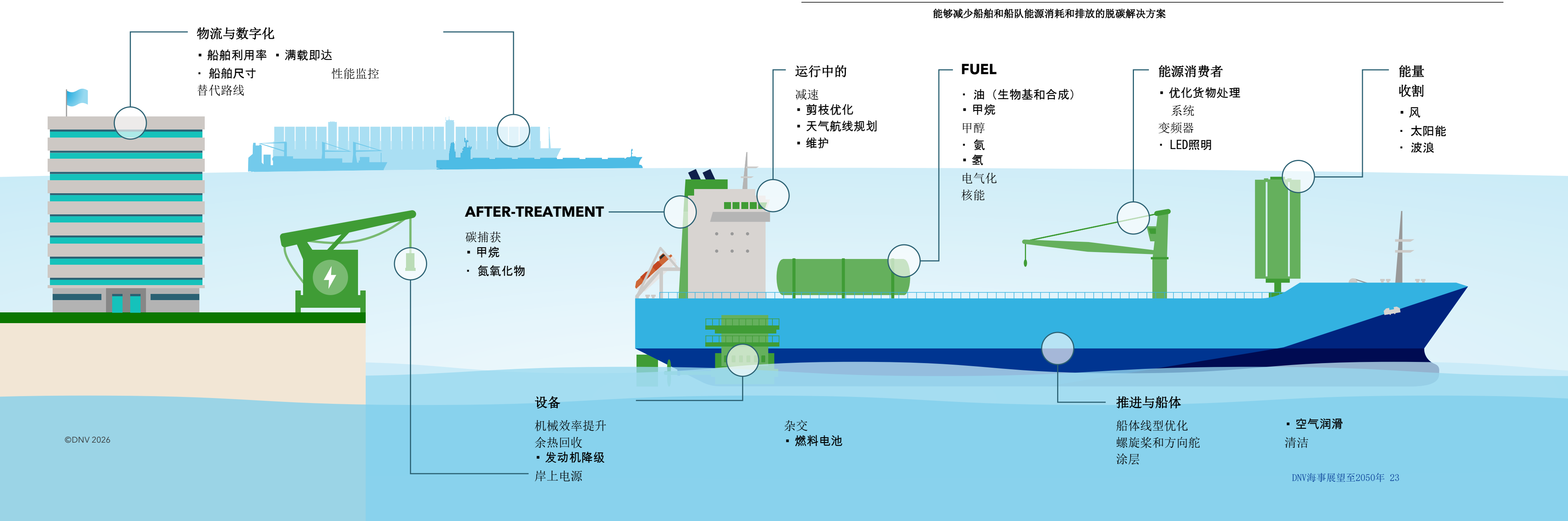
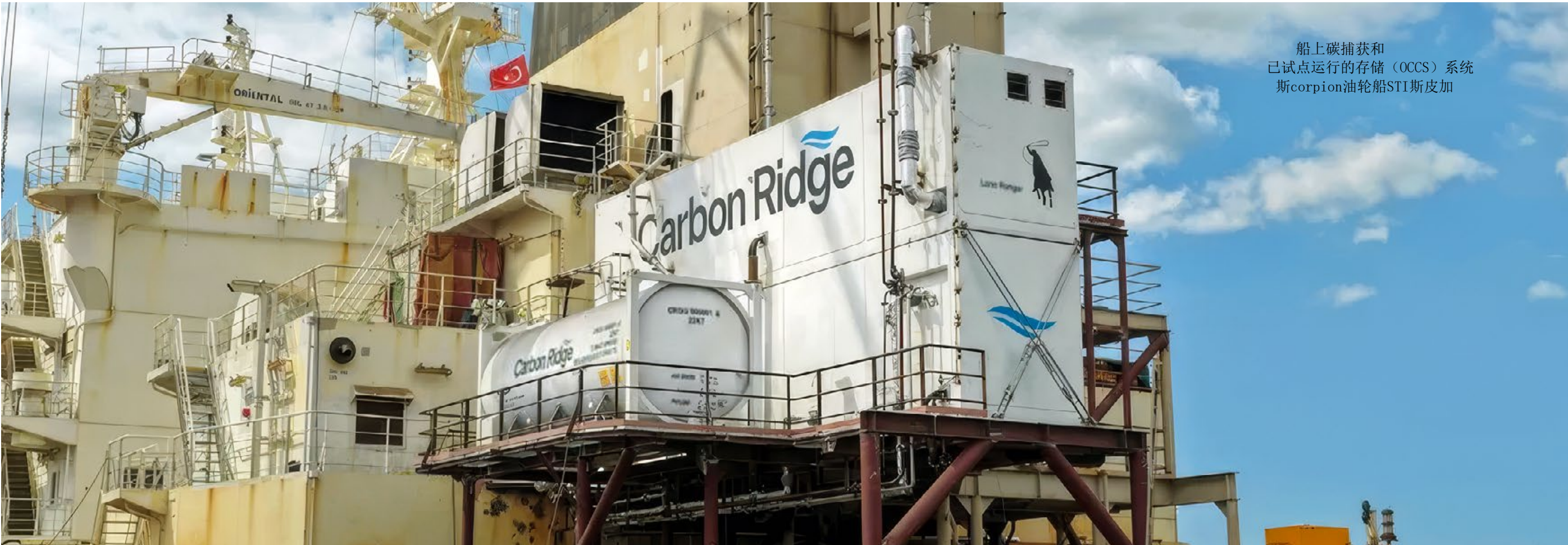


图3-1

在港口停泊期间，当可用时，可连接岸电进行充电，以及风辅助推进系统（WAPS）（DNV，2026d；DNV，2025c）。新兴选项包括船上碳捕获与封存（OCCS），以及从更长远的时间尺度来看，将核动力纳入商业船队的可能性（DNV，2025h；DNV，2024c）。此外，停泊期间直接使用岸电是一种众所周知的做法，并且有可能实现显著的温室气体减排，尽管目前其可用性尚不普及（DNV，2026d）。

实施运营节能措施可以通过根据现有条件调整速度和运营决策来减少燃油消耗。这些措施可能需要较低的投资和适中的运营成本，但通常需要对船舶管理进行变更并提供培训。作为物流优化的组成部分，在岸上基础设施方面的投资也可能是必要的。



船上碳捕获和
已试点运行的存储（OCCS）系统
斯corpion油轮船STI斯皮加

超过50项运营和技术效率措施共同构成了基础，以实现整个船队能耗和排放的降低。

能够实现速度降低和/或更好的船舶利用，这通常需要其他利益相关者（如货主和港口）的参与。利用高质量数据和实时洞察，可以实现海事物流的数字化和人工智能驱动优化，支持准时制（JIT）运营，从而减少等待时间、提高航行效率、降低燃油消耗和排放（IMO，2022a；UCL & UMAS，2024）。这一点尤为重要，因为基于AIS的研究表明，船舶有相当一部分时间处于停泊或低速状态。

由于运输链协调效率低下导致的速度问题（DNV，2018；UCL & UMAS，2024）。

技术节能措施可降低发动机功率需求或提高燃料转换效率。尽管这些措施通常需要更高的投资，但它们能够显著减少燃料消耗和排放，并且随着燃料价格和与排放相关的成本上升，预计将更具吸引力。所有这些措施加在一起，包括超过50项运营和技术效率措施。

为整个机队（DNV，2025b）的能源使用和排放减少提供基础

节油效果、温室气体减排潜力、措施成本及适用性取决于船舶是新造船还是现有船舶、其类型和年龄、运营特性，以及其运营区域岸电、低温室气体燃料基础设施的可用性，以及从OCCS（船舶二氧化碳捕集系统）捕获的二氧化碳的接收能力（DNV，2025a；DNV，2026e）。为确保脱碳解决方案

要实现预期的温室气体减排潜力、降低合规成本并获得令人满意的回报率，重要的是要采取基于全面分析的系统方法。船舶脱碳的集成系统方法要求将船舶及其系统作为一个相互关联的能源系统进行分析，该系统依赖于船舶外部的基础设施，并属于一个船队的一部分。通过这种方法，我们可以评估能源在整个船舶运营过程中是如何供应、储存、转换和消耗的。利用有关机械配置（主发动机、辅助发动机和锅炉）、推进和船体性能的信息，以及船舶运营概况（包括航行、操纵和港口停泊）

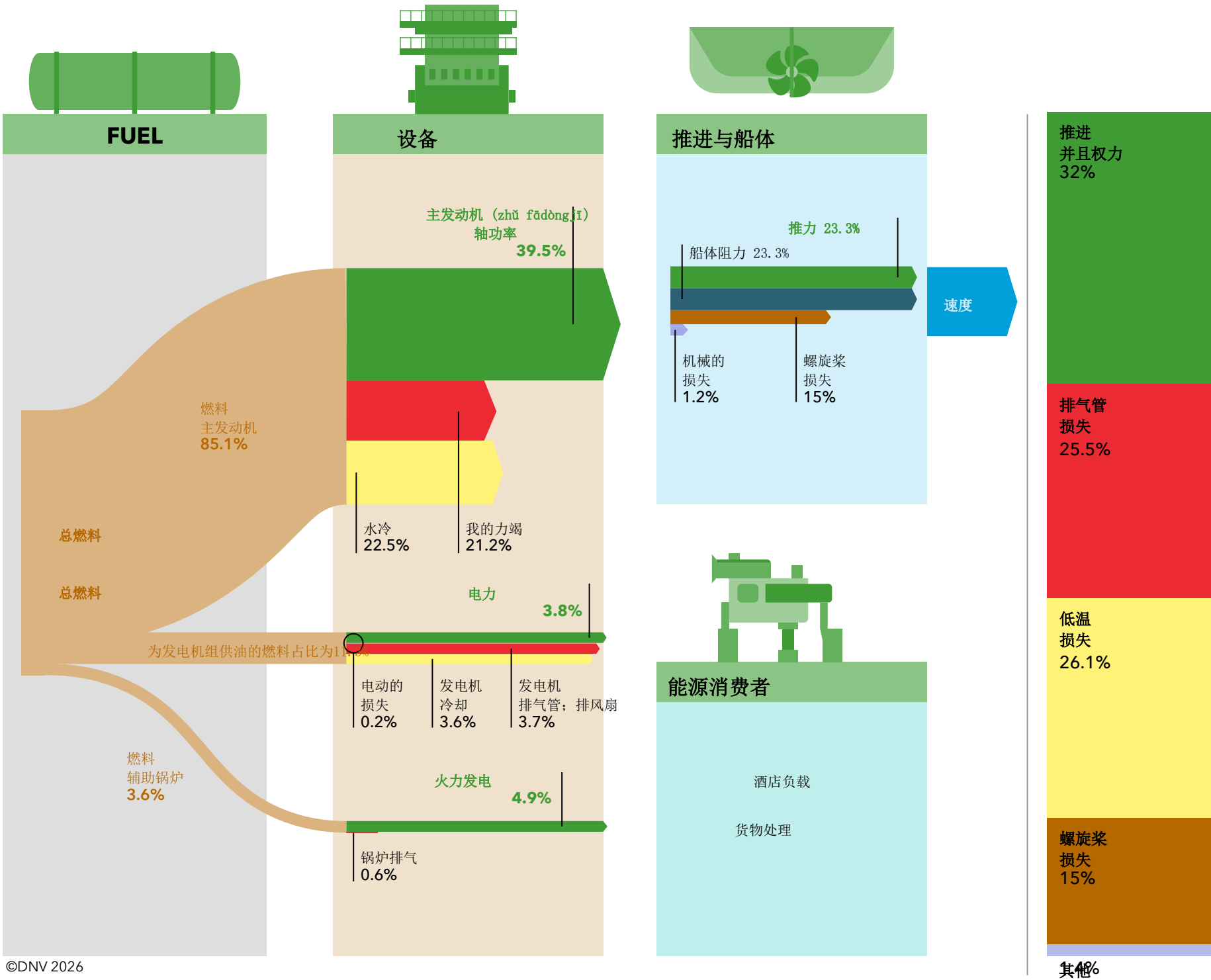
在货物装卸作业中，我们可以绘制船舶的能量流动和损失图，并识别出提高能源效率的机会，如图3-2中的能源效率图所示。DNV的COSSMOS等工具可用于船舶能源系统的建模、仿真和优化。

该映射可用于新造船阶段和船舶整个生命周期中，以评估潜在的节能措施。对于现有船舶，标准维护（船体清洁、重新涂装、机械大修）可带来节能效益，而在这些时期进行改造则能解锁额外节能量。干坞窗口至关重要。当船舶作为更大船队的一部分运营时，脱碳战略还应考虑船队层面的机制，例如共享、共同合规方案和集体排放核算。船队共享可以使一艘船实现的减排量抵消其他船舶的排放量，从而在采用新技术或新燃料的时间和方法上提供灵活性。它还有助于在整个船队中更有效地分配低碳燃料、岸电码头或节能技术。数字化和智能船队管理系统正日益成为关键使能者，提高运营效率，提升船队利用率，并能够收集、核实和报告可靠的排放数据。DNV的Emissions Connect平台通过提供集成的数字解决方案来满足这一需求，该方案能够从原始数据到运营控制对排放绩效进行持续监控和管理。



图 3-2

基于船舶的机械配置和运行剖面，对其从燃油到有用功的能量损失进行可视化。例如：超大型原油运输船（VLCC）。



3.2 全球机队节能技术的应用

对于全球船队而言，包含充分监管和温室气体排放定价的模拟显示，与常规业务情景相比，能效措施和航速降低可在2030年将能源消耗降低高达16%，并在2050年上升至高达25%至28%（DNV，2024a）；另见第4.3.1节。2030年的16%减排潜力相当于节省约400百万吨燃料和120百万吨二氧化碳当量，相当于运营2500艘最大船舶（或400总吨以上的55000艘最小船舶）（DNV，2025b）。这反过来又意味着，在每吨580美元的燃料价格下，每年可节省约230亿美元燃料成本，若考虑使用更昂贵的低温温室气体燃料，则可实现更大的成本节约。

一项DNV近期研究，针对所有400总吨以上的船舶到2050年的二氧化碳减排潜力和成本进行了建模分析，表明到2030年，有很大一部分通过能效措施实现的减排潜力是具有成本效益的，并且到2050年这一比例将持续增长，这主要是由采用更昂贵的低温温室气体燃料所驱动（Longva等人，2024）。这凸显了航运船队和订单簿中存在大量尚未开发的潜力，尽管仍然存在显著的经济、技术和运营障碍。世界银行（World Bank，2025）的估计支持了这些发现。改造升级对于释放该行业的全部能效潜力至关重要。正如第27页文本框所示，即使是15年的老旧船舶也能提供极具吸引力的商业价值。

加装节能设备之必要。该文件还概述了将此类改造从概念阶段推进至实施阶段的一种实用、分步方法。

提高能效技术的采用率需要克服若干关键障碍。研究表明存在诸如资金限制、技术挑战、管理及组织实践以及法律约束（例如 Rehmatulla & Smith, 2015; DNV, 2025b）等障碍。这些可能包括组织目标冲突和租船合同中的利益分割。效率升级资金提供者与燃油费用支付者之间的脱节，以及倾向于速度而非效率的标准合同，都阻碍了节能解决方案的投资，并维持了对低效运营方式的高度依赖。另一个障碍是对实际运营条件下燃油节约的不确定性，以及对供应商节油声明的信任有限。最近全球海事论坛的一项研究（GMF，2026）强调了组织内部战略协同的重要性，以及在整个海事价值链内进行协作以大规模释放效率的必要性。使用船舶技术指数（VTI）等技术性能指标也有助于降低采用障碍，通过使能效措施的影响更容易量化和核实。由 DNV 推荐实践 DNV-RP-0675 引入的 VTI，展示了船舶相对于其初始状态的技术性能，排除了外部运营因素（见第 28 页）。



杂货船，海因茨
配备增强型
船体设计和吸力帆以
减少燃料消耗。

5000 TEU集装箱船节能设备改造的商业方案和时间表

根据一项水动力优化研究，一艘2013年建造的5000 TEU 集装箱船，通过结合进行船首改造、螺旋桨改造以及安装螺旋桨 boss盖鳍，预计可节省燃油约16%，总投资成本约为235万美元。我们假设该船舶改造后符合EEXI要求。

为评估改造方案的商业可行性，我们应用了两个财务指标：投资回收期和累计净现金流（均按8%的折现率计算）。这些指标是在基于历史低硫燃料价格的三种燃料价格情景下进行评估的。

新加坡从2024年1月1日到2026年4月30日的重燃料油（LSHFO）价格：每吨420美元（最低），每吨580美元（平均），以及每吨1,120美元（最高）。高价情景反映了地缘政治事件可能引发的燃料价格波动风险。评估未包含对国际海事组织净零框架和/或欧盟ETS以及FuelEU Maritime的敞口，但纳入这些因素将进一步加强商业案例。

图3-3的结果表明，在2028年初船舶进行为期15年的干坞期间实施16%的节约措施，且无需额外停租时间，则根据假设的燃油价格，投资回收期约为1至4年。预计到2038年，燃油节约的净现值总额将在200万美元至1000万美元之间，具体取决于燃油价格。



水动力措施的改造工程通常应在计划进干坞之前至少六个月启动。主要流程步骤和预估时间表如图3-4所示。如果改造计划周密，安装工作通常可以在标准更新干坞的范围内完成。但无论如何，都应包含充足的时间缓冲，以应对资源可用性、项目协调和船厂规划方面的限制。

图 3-3

5000 TEU集装箱船在第三次干坞期间进行流体动力学措施改造（节油16%）的累计净现金流和回收期

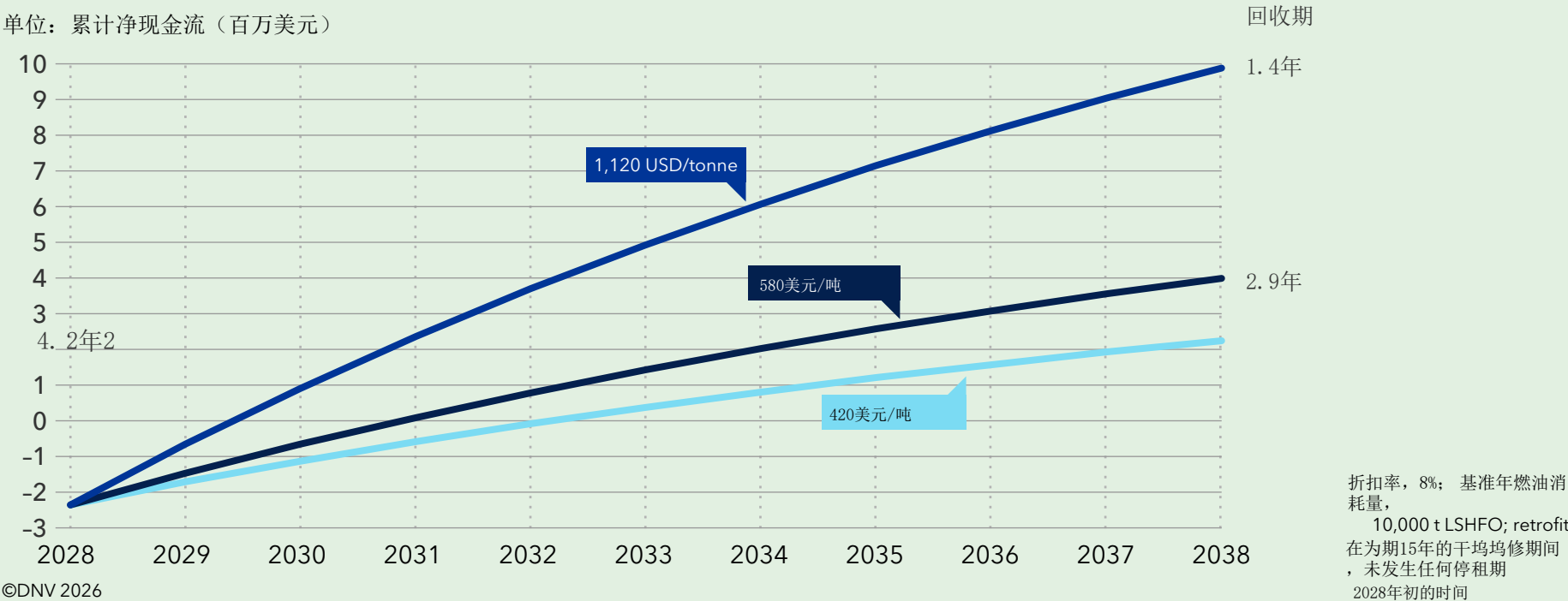
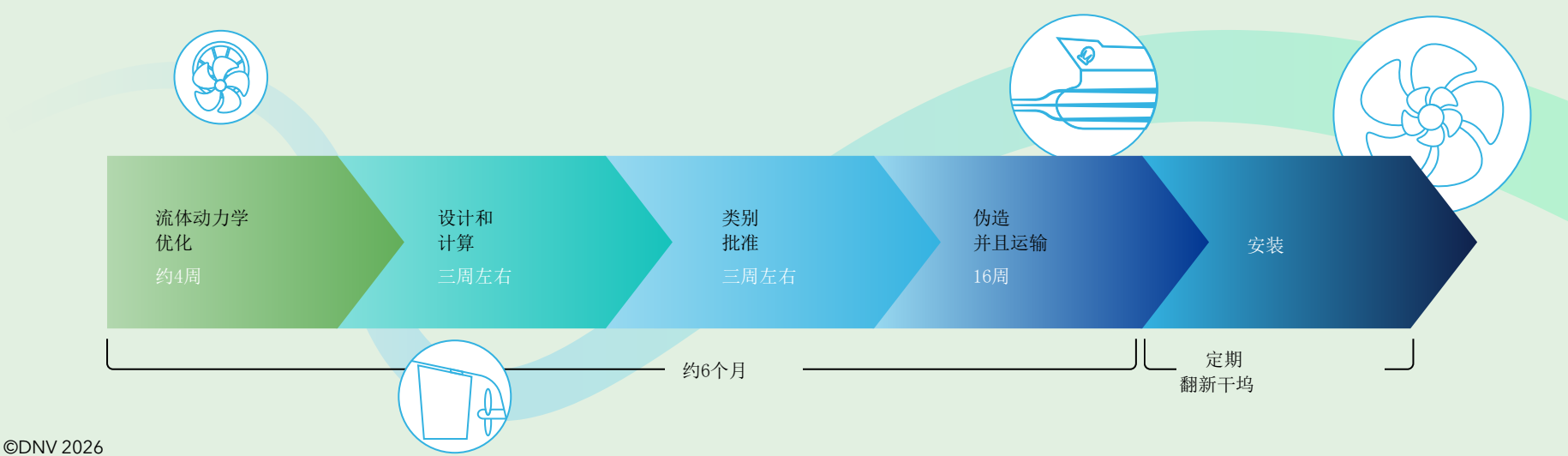


图 3-4

船舶加装水动力措施（如升级螺旋桨、船首和螺旋桨帽鳍）的典型流程步骤和参考时间表



验证节能措施的影响——船体和螺旋桨清洁

验证节能措施在实际中的燃油节省效果对于有信心地评估商业案例至关重要，但这具有挑战性，因为节省效果取决于运营和环境条件。建立可靠的估算需要可靠的传感器、高质量和高分辨率的数据，以及对已验证运营数据的全面分析，以建立对结果的充分信任。

DNV推荐实践DNV-RP-0675《船舶技术性能》介绍了船舶技术指标（VTI），该指标展示了船舶相对于初始状态的技术性能，并将运行因素（速度和装载条件）、天气以及船体或螺旋桨磨损的影响区分开来。VTI没有单位——它是一个归一化的、无维度的推进功率指标；较低的VTI意味着船舶在特定装载条件下维持相同速度所需的推进功率更少，直接表明燃油消耗减少。

图3-5中，使用满足《推荐实践》所有程序要求的经核实的VTI值，展示了在Cargill租用的船舶上进行船体和螺旋桨清洁后实现的性能提升。航次1在清洁前进行，航次2在清洁后进行，每次航次持续33天。VTI估算显示，从航次1到航次2，VTI存在统计学上的显著降低；平均值（ μ ）从1.32降至1.14，相对

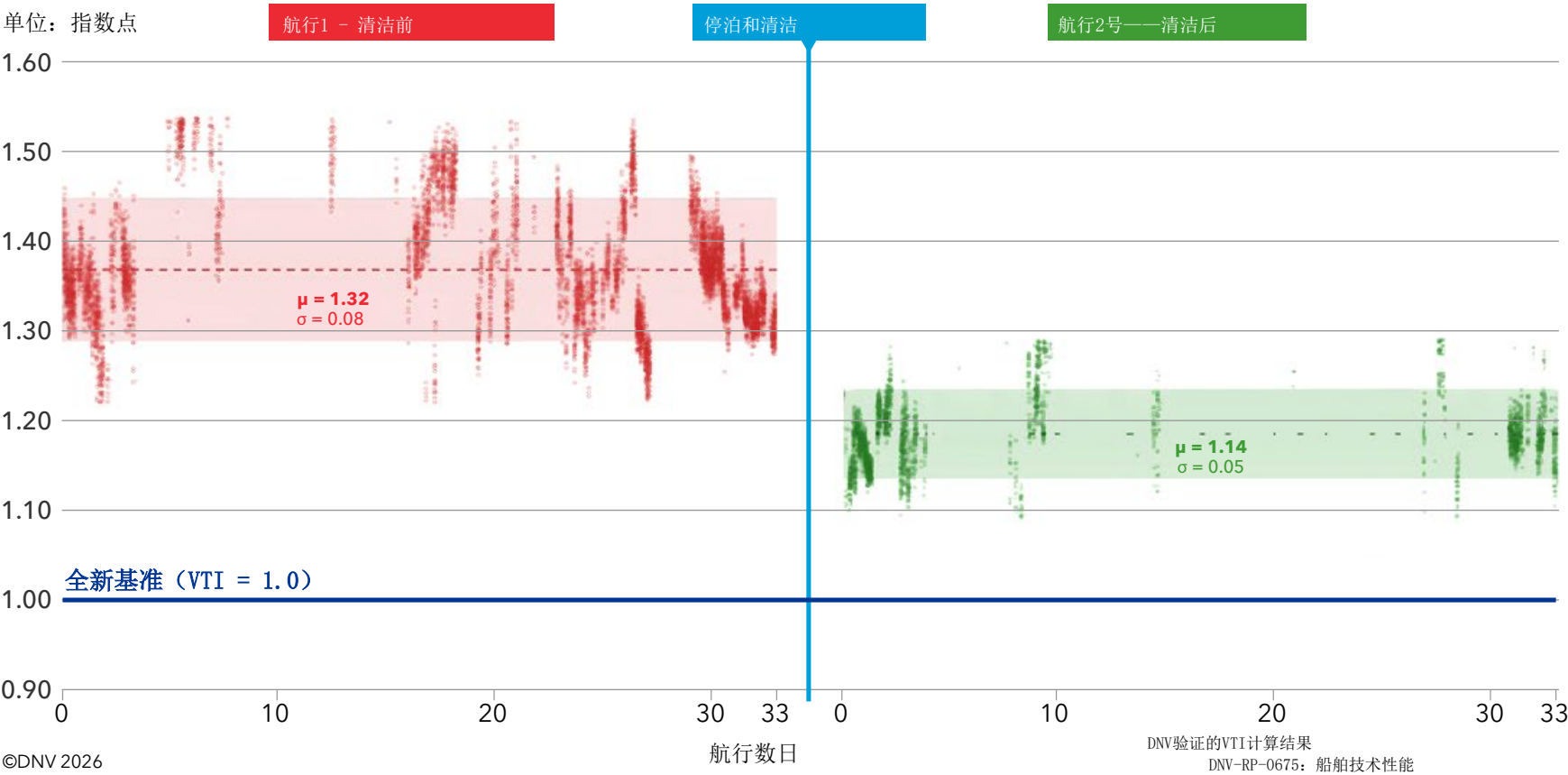
达到“全新”基准（1.00）。这一改进相当于在33天的航程中节省了约120吨燃油，燃油成本节省约为56,000美元（假设燃油价格为470美元/吨），远超过约14,000美元的清洁费用。

更普遍地说，要获得对结垢状况的可靠理解，仅仅安装传感器是不够的。除了要确保VTI的正确计算外，测量数据可能是不完整的、有偏差的或不准确的，这可能导致错误的决策。一个稳健的计划对于...

因此，数据质量评估与验证至关重要，需要结合技术洞察力与其他数据源的交叉核验。在确信输入数据质量的前提下，船东可以就船体和螺旋桨的清洁做出更明智的决策，最终降低运营成本。

图 3-5

用于计算船舶技术指标（VTI）的传感器数据显示，清洁工作降低了实际燃油消耗。结果（左侧为清洁前，右侧为清洁后）表明，清洁后VTI有所改善。当数据不符合《推荐实践》（DNV-RP-0675船舶技术性能）的程序要求时，VTI值将被排除。 μ 表示均值， σ 表示标准差。





瓦伦纽斯·威廉森公司的制形级船舶配备了空气润滑系统。

3. 2. 1 各细分市场节能技术的采纳

行业缺乏关于节能技术普遍应用的综合数据（世界银行，2025年）。然而，克拉克森研究的数据表明，在建船舶比现有船队更大程度地采用了节能技术。²³ 这种采用情况因深海细分市场而异：集装箱船、汽车运输船、LNG运输船和邮轮由于运营可预测性强以及强大的商业或监管压力，率先采用先进的资本密集型节能技术。散货

承运人和油轮公司倾向于采取低成本运营措施和选择性改造，并且与其他领域一样，大型船舶的采用率更高。定期船体和螺旋桨清洁以及气象航线等运营措施在整个船队中普遍应用。以下是基于克拉克森和其他公开数据，针对不同船型的常见节能措施的建议性状态更新：

— 集装箱船：主要承运商正对其船队中的数百艘船舶进行重大升级。^{24, 25, 26} 主要重点是通过将球艏进行改造、提升螺旋桨性能等方式，在较低的服务航速下提高流体动力学效率。

安装预旋装置。通过应用挡风玻璃和导流板，气动效率也得到了提升。它们还通过多种结构和技术改进增加了货舱容量，例如抬高绑扎桥和甲板室，加固压载以实现更深吃水，以及升级绑扎系统和装卸计算机功能。²⁷

— 液化天然气（LNG）运输船：LNG运输船正迅速集成以减少燃料消耗和管理闪蒸气（BOG）为核心的高效技术。新造船通常配备双燃料二冲程发动机、轴带发电机、具有更低闪蒸率的燃料 containment 系统（或译：燃料围闭系统）以及BOG再液化系统。常见的流体动力学改进措施包括双船龙骨、推进改进装置（PIDs）和空气润滑系统（ALS）。数字优化工具、速度管理和吃水调整进一步提高了航次效率。^{28, 29}

— 汽车运输船：该细分市场已成为能源效率技术的最积极采用者之一。新造船经常集成ALS，该技术能与汽车运输船的运营设计很好地配合。优化的船体形状、空气动力学设计和改进的水动力附体有助于提高效率。^{30, 31}

— 航行：在此，先进的余热回收系统、岸电能力和空气润滑系统在新造船上得到广泛应用，而电池和混合动力系统则提供支持

零排放港口停泊和低速操纵。此外，邮轮公司非常重视减少酒店负荷的能源消耗。减少能源需求的主要措施包括优化供暖、通风和空调（HVAC）以及照明系统。³²

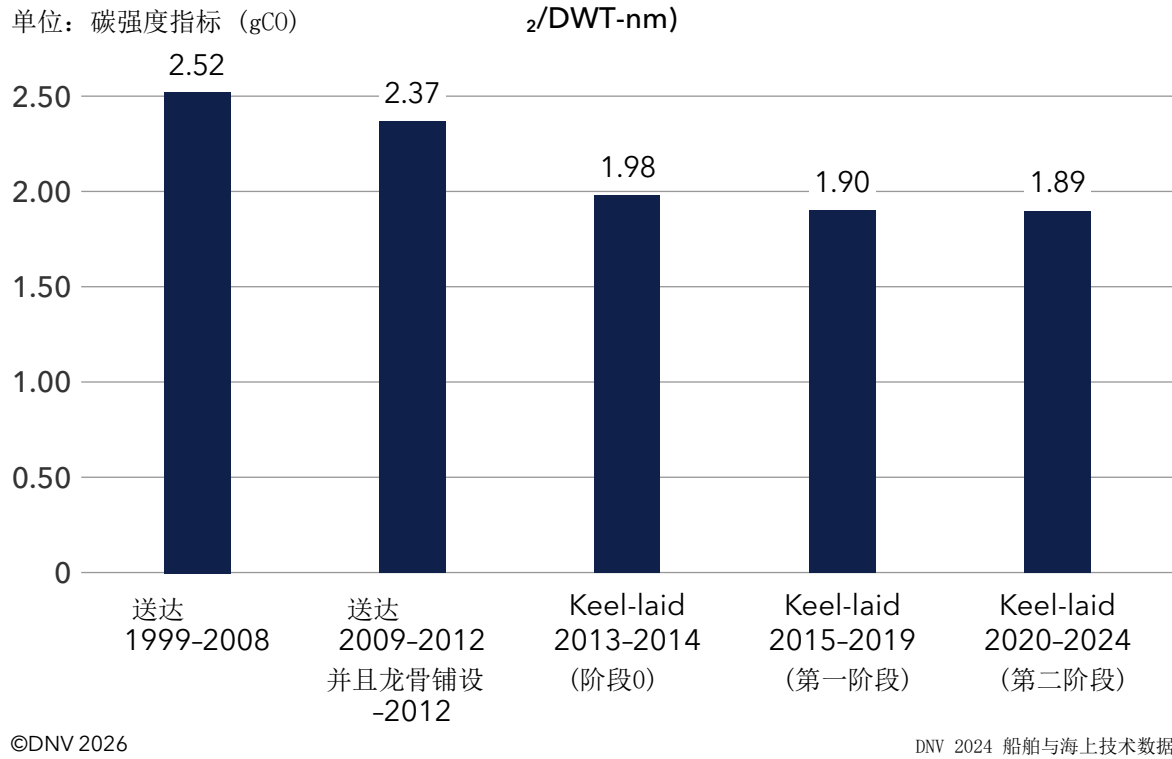
— 散货船：在散货船领域，水动力改造如螺旋桨轴帽鳍（PBCF）和预旋导管在干坞期间很常见，同时还包括低摩擦涂层和升级的舵。发动机功率限制是EEXI普遍采用的合规工具。具备替代燃料能力的散货船更常实施综合节能措施，例如旋翼帆、预旋静叶鳍、螺旋桨后部涡流消散鳍、轴带发电机和变频电机。³³

由于运营模式可预测且面临强大的商业或监管压力，集装箱船、汽车运输船、LNG运输船和邮轮率先采用先进且资本密集型的节能技术。

— 油轮：在该领域，节能策略侧重于水动力改进和运营优化。推进系统改进装置——包括梅维斯管道（Mewis ducts）、PBCF以及优化舵设计——是应用最广泛的改造方案。慢速航行和压载/纵倾管理能带来快速且低成本的效率提升，而诸如发动机功率限制、余热回收和变频驱动器（VFDs）等机械升级则有助于进一步降低油耗。³⁴

在我看来，短期措施在提高能源效率和排放性能方面发挥着重要作用。在相继的EEDI阶段下交付的船舶，其二氧化碳排放效率表现出系统性的提升。这种结构性的改进体现在CII性能上，正如基于DNV 2024年运营船舶数据（OVD）所报告的132艘VLCC（1999年至2024年不同年龄段）的2024年CII值所示（见图3-6）。较新的船舶表现优于较旧的船舶，所有年龄段船舶的CII均有所改善，整体提升了近25%，这突显了设计驱动效率提升的影响。

图3-6
2024年VLCC平均CII绩效表现，按船舶交付日期和EEDI阶段（如适用）分组



3. 2. 2 风辅助推进系统应用

风辅助推进系统（WAPS），包括旋翼帆、吸力帆和翼帆，为船东在欧盟和IMO框架下降低燃料成本和温室气体相关监管风险提供了另一种选择。一项最近的建模研究表明，到2050年，在适合风能的船队中广泛部署弗莱特纳旋翼，可将国际航运的年二氧化碳当量排放减少约4%至5%（Seas at Risk, 2026）。随着温室气体法规的收紧，预计WAPS的采用将会

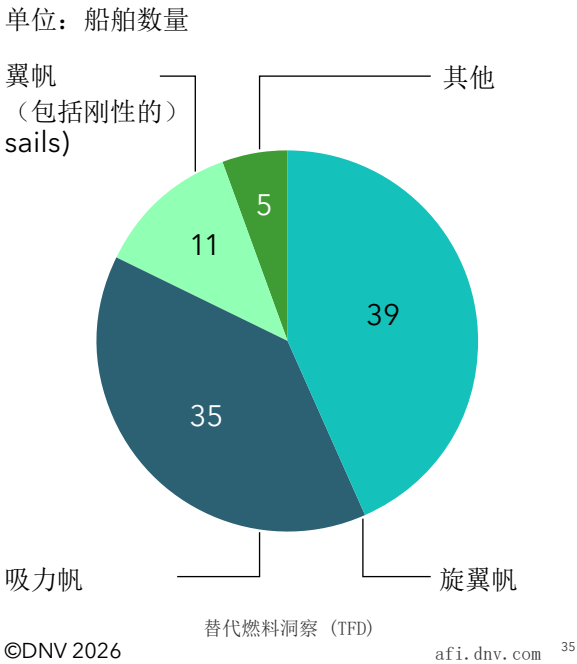
未来几十年将显著增加（DNV，2025c）。

除纯粹的燃油节省外，WAPS根据《FuelEU Maritime》法案提供合规性优势，仅安装即可通过风能奖励因子提升船舶的温室气体强度。³⁷ 这为技术的早期采用提供了强有力的激励，监管机构还可以进一步利用这一点来加速技术的推广。³⁸

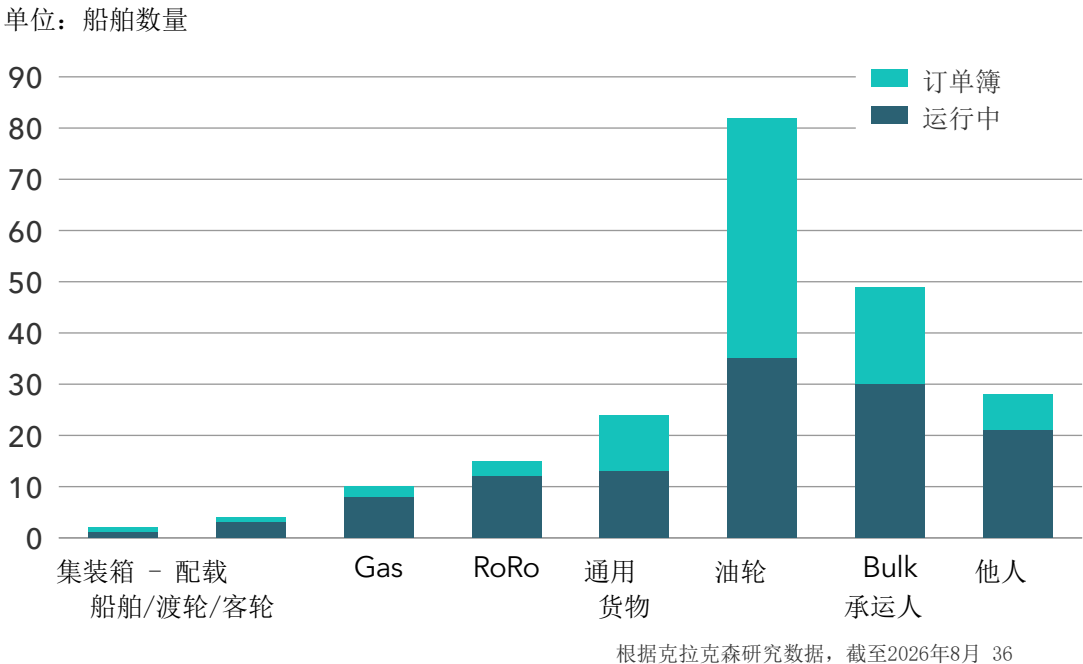
截至2026年8月，WAPS船队由90艘船舶组成，其中39艘正在运营，另有约91艘船舶待

图 3-7
正在运行中的WAPS技术和预订中的WAPS技术

正在运营的船舶选用的WAPS技术



按船舶类型划分，已投入运营及在订单中配备或订购了WAPS系统的船舶数量



40型（见图3-7）。配备WAPS的船舶在全球深海贸易中运营，其安装设备主要分布在散货船、油轮和普通货船上。由于甲板空间有限和帆布通风受限等实际限制，集装箱船上的WAPS应用几乎不存在。迄今为止，仅有唯一一艘集装箱喂给船配备了WAPS。

当前WAPS的采用情况反映了技术成熟度和船舶设计限制的混合影响，而非明确的细分市场偏好。然而，在运营船舶中，旋翼帆占据了近一半的WAPS采用量。对于油轮而言，在建订单主要选择刚性翼帆，而吸力帆和旋翼帆则在现有船队中占据主导地位。这似乎更多地由船舶尺寸驱动，而非船舶类型，因为目前的旋翼帆产品更适合小型安装，尽管更大尺寸的设备正在开发中，并可能改变这一格局。在散货船细分市场中，旋翼帆持续获得关注，最近在325,000 DWT超大型矿砂船（VLCC）“先锋号”上的安装——该船配备了四具35米×5米旋翼帆——突显了它们大规模应用的适用性。⁴¹ 对于杂货船而言，WAPS的采用取决于特定的船舶设计限制，可用甲板空间与现有设备的相互作用在确定技术可行性和可实现性能方面发挥着重要作用。在集装箱船细分市场中，活动仍处于探索阶段，运营者如赫伯罗特⁴²的研究以及产品开发工作都集中在翼帆解决方案⁴³上，这些方案更适合较高的船舶速度。



无线接入点（WAPS）已从概念阶段果断过渡到已展示的性能阶段，但其效率范围和效果通信需要仔细解读。模拟结果强调了WAPS性能的变异性。功率增益因季节、年份和行驶方向而有显著差异，冬季月份尤为典型。

多次显著高于夏季时段的增益。即使在同一条路线上考察五年期，平均功率增益也可能发生显著波动。这进一步表明，WAPS应被视为概率性、与路线相关的能效指标，而非固定百分比解决方案。

奥林匹斯山号散货船，装备了四座经过改装的翼帆。

尽管当前的资本支出（CAPEX）仍然相对较高，但随着生产量的增加，通过产业规模化及供应链成熟化降低成本的空间十分明确。对现有船舶进行WAPS（风帆辅助推进系统）改造几乎适用于任何拥有足够甲板空间且气流无阻碍的船舶，即使其最初并非为安装风帆而设计；尽管如此，新造船舶的集成能通过从一开始就优化设计来提供更大的节省潜力。⁴⁴近期在船龄长达19年的船舶上的安装案例表明，WAPS在除新造船之外的商业应用中同样可行。在特定市场，如提高速度或增强运营灵活性等性能改进，能进一步强化其商业价值。围绕租赁⁴⁵和模块化安装的新商业模式正在发展，使船舶能够成为“风帆就绪”状态，并在有利的风向上选择性地部署风帆。这种灵活性降低了承诺风险，并使船舶能够与不断变化的贸易模式保持一致。

总体而言，最大的价值并非孤立的高峰节能，而在于经过验证的长期性能，这种性能得益于标准化的测量和验证实践。在设定现实预期并进行透明沟通时，WAPS代表着对近期脱碳化和合规路径的稳健贡献。

3.3 全球船舶替代燃料的采用

自2020年以来，全球船队的替代燃料能力已迅速增长。虽然LNG和甲醇主导着船队的替代燃料技术组合，但已安装的产能并未得到充分利用。尽管如此，这种增长仍在推动对燃料加注基础设施的需求。低温温室气体燃料加注活动较多的港口地理分布多样，但显然集中在欧洲和东亚。

小型船舶上的技术占据主导地位，共有185艘船，同时有538艘LNG运输船、12艘甲醇运输船和14艘LPG运输船可以将货物用作燃料。自那以后，其他燃料技术的采用显著增加。

截至2026年8月，813艘LNG运输船和929艘其他船舶可以使用LNG作为燃料，其中大部分是大型船舶，对能源存储需求较高。

虽然液化天然气（LNG）和甲醇在船舶替代燃料技术组合中占据主导地位，但已安装的产能并未得到充分利用。

目前有42艘甲醇运输船和112艘其他能够使用甲醇作为燃料的船舶正在航行。经过轻微改装，甲醇型船舶也可以燃烧乙醇——一种具有相似分子特性的物质——这为未来的燃料路径提供了灵活性。234艘LPG运输船可以使用其LPG货物作为燃料。此外，有8艘船舶可以使用氢气作为燃料，而另外4艘已经展示了使用氨作为燃料的应用。

3.3.1 替代燃料技术采用现状

替代燃料技术是指船上机械和燃料系统，使其能够使用除传统石油基燃料或其低温温室气体排放的等价替代品（即生物柴油）以外的燃料。受新船交付的推动，具备替代燃料能力的总吨位（不包括LNG运输船）的份额已从2020年全球船队的约0.4%增加到2026年8月的5.2%，如图3-8所示。向大型船舶发展的趋势体现在这样一个事实上：虽然船舶数量增加了六倍，但总吨位增加了近15倍。实际上，所有具备替代燃料能力的船舶都配备了双燃料技术，因此也能够使用传统石油基燃料。

图3-9更详细地分解了包括液化天然气船在内的世界船队。2020年，液化天然气燃料

图 3-8

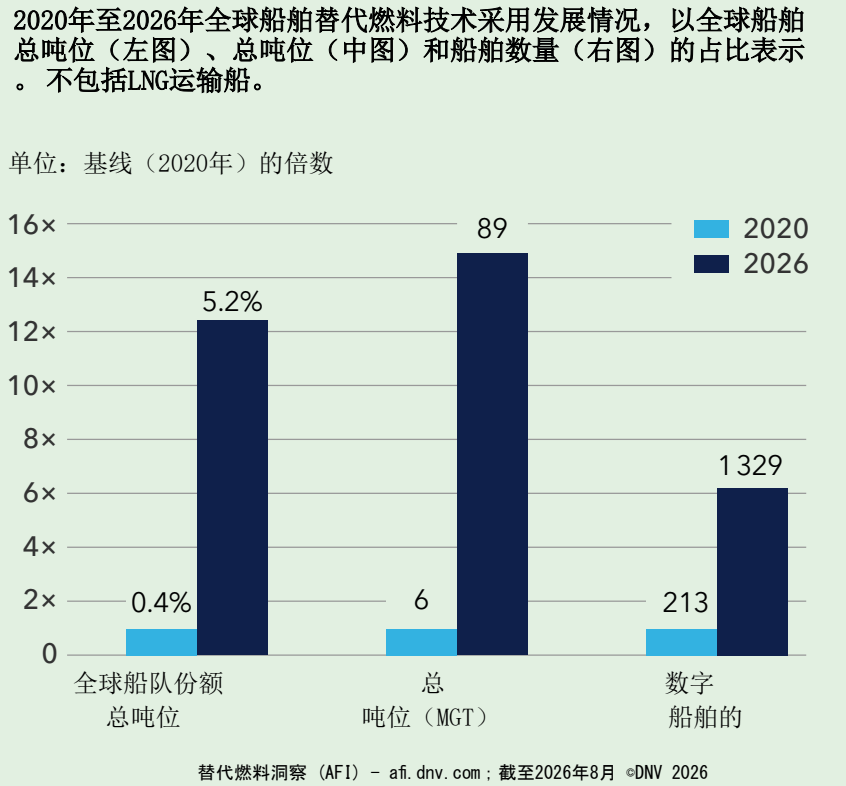


图3-9

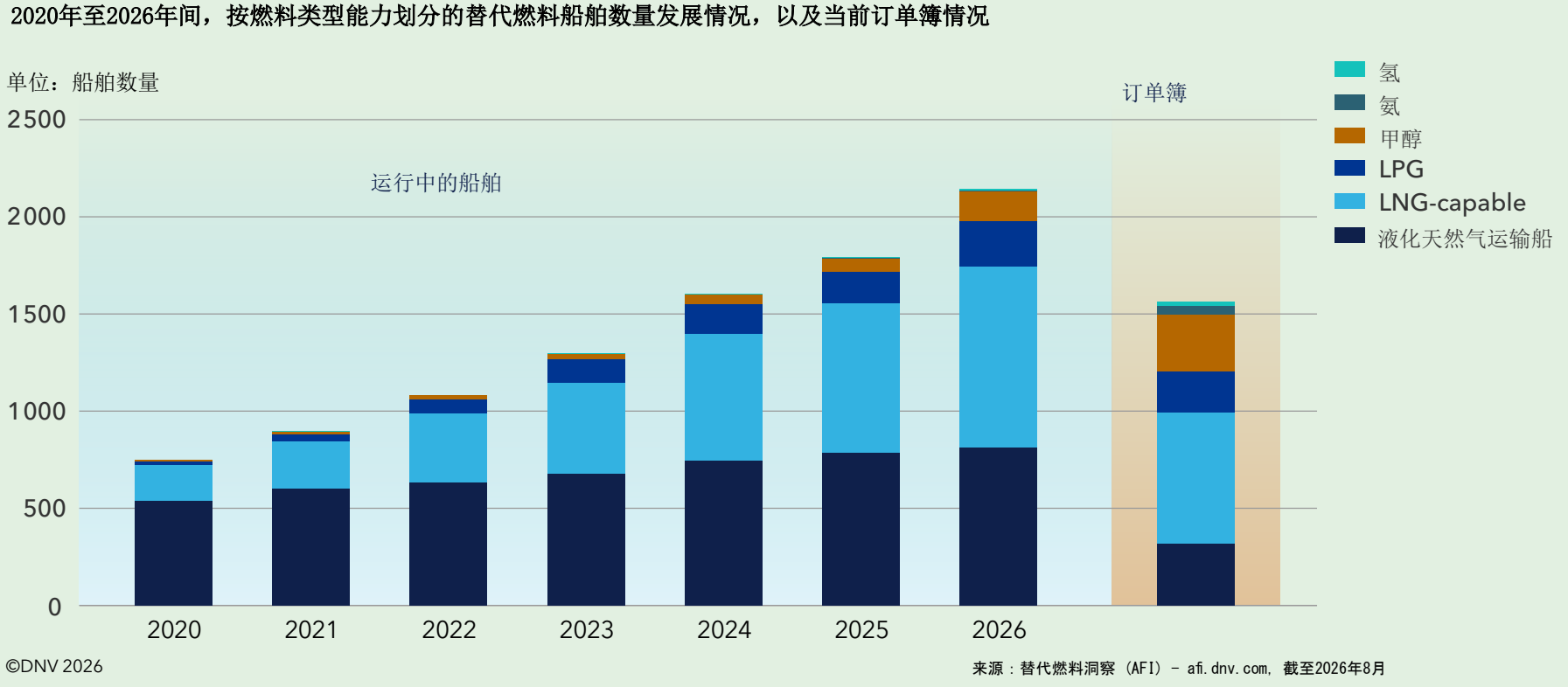


图3-10展示了截至2026年8月全球船队46中替代燃料技术的应用现状及订单情况。LNG动力船在订单中占据明显领先地位，共有672艘船和319艘液化气运输船。甲醇动力船的订单依然强劲，目前已有超过294艘船的订单。配备氨燃料系统的船舶总数为42艘，而氢动力船的数量为25艘。按总吨位计算，今年订单中可使用替代燃料（除燃油外）的船舶比例为39.4%，较去年的49.5%有所下降。

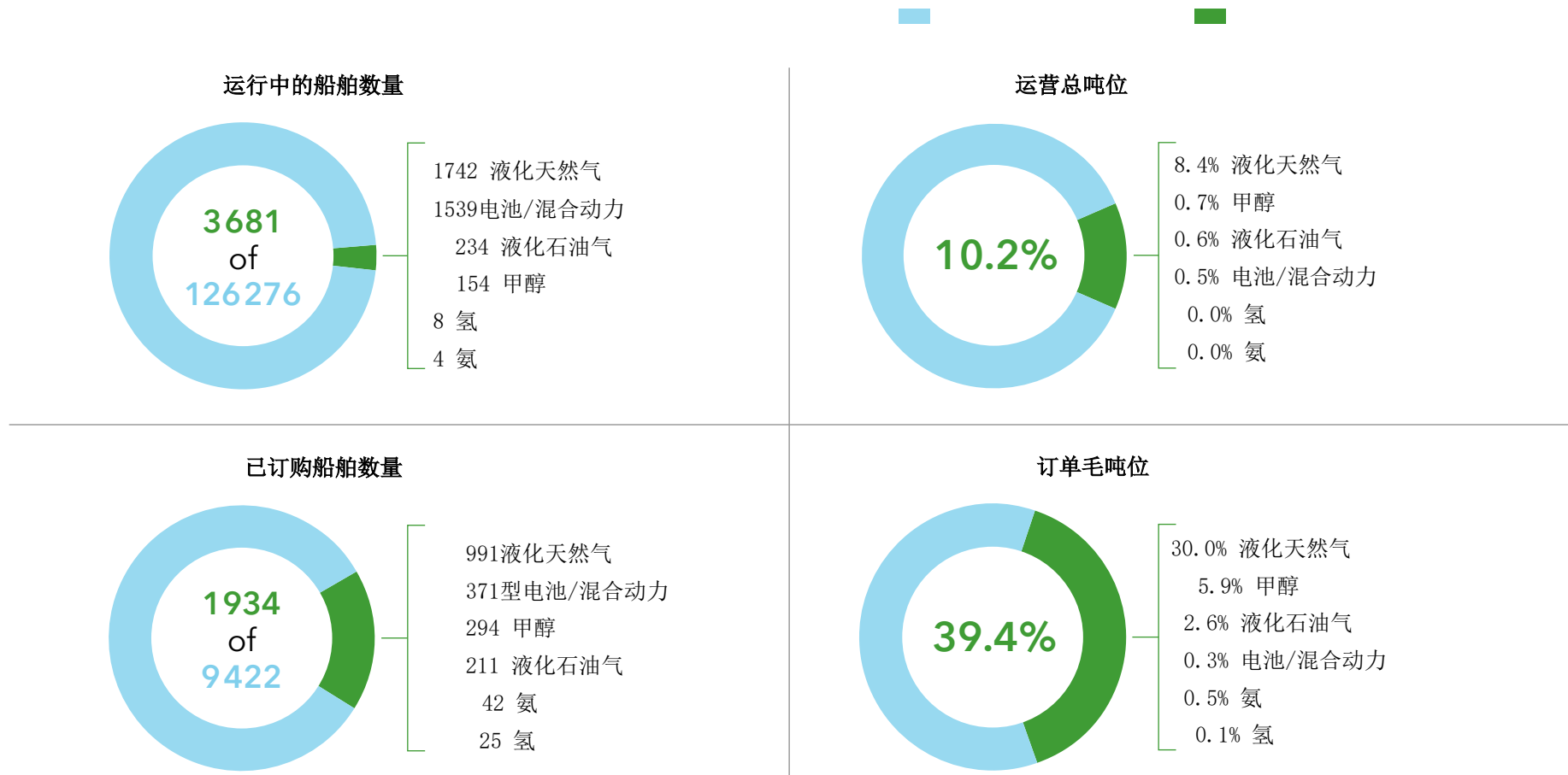
订单减少可能部分是由于监管不确定性，许多船东推迟了订单决策，等待国际海事组织净零框架的明确。然而，主要驱动因素是订单结构的变化。替代燃料主要在集装箱船、邮轮和汽车运输船等细分市场得到采用，而当前的订单结构正越来越多地由 uptake 较低的油轮和散货船主导。因此，尽管领先细分市场仍在取得进展，整体份额仍呈下降趋势。



NCL Vestland 是一艘甲醇双燃料集装箱喂喂船。

图 3-10

全球运营及待交付船舶队的替代燃料技术采用情况（按船舶数量，左图；按总吨位，右图）



由于运营模式、商业结构和燃料可用性的差异，船舶细分市场的替代燃料能力存在显著差异（见图3-11）。我们的分析表明，具备替代燃料能力的船舶份额——以运营中船舶和订单船舶数量衡量——从散货船的1.1%到汽车运输船的26%不等，几乎所有LNG运输船都使用货物蒸发气作为燃料。

在审查适用于操作船和已订购船的优选燃料技术选项后，我们发现：

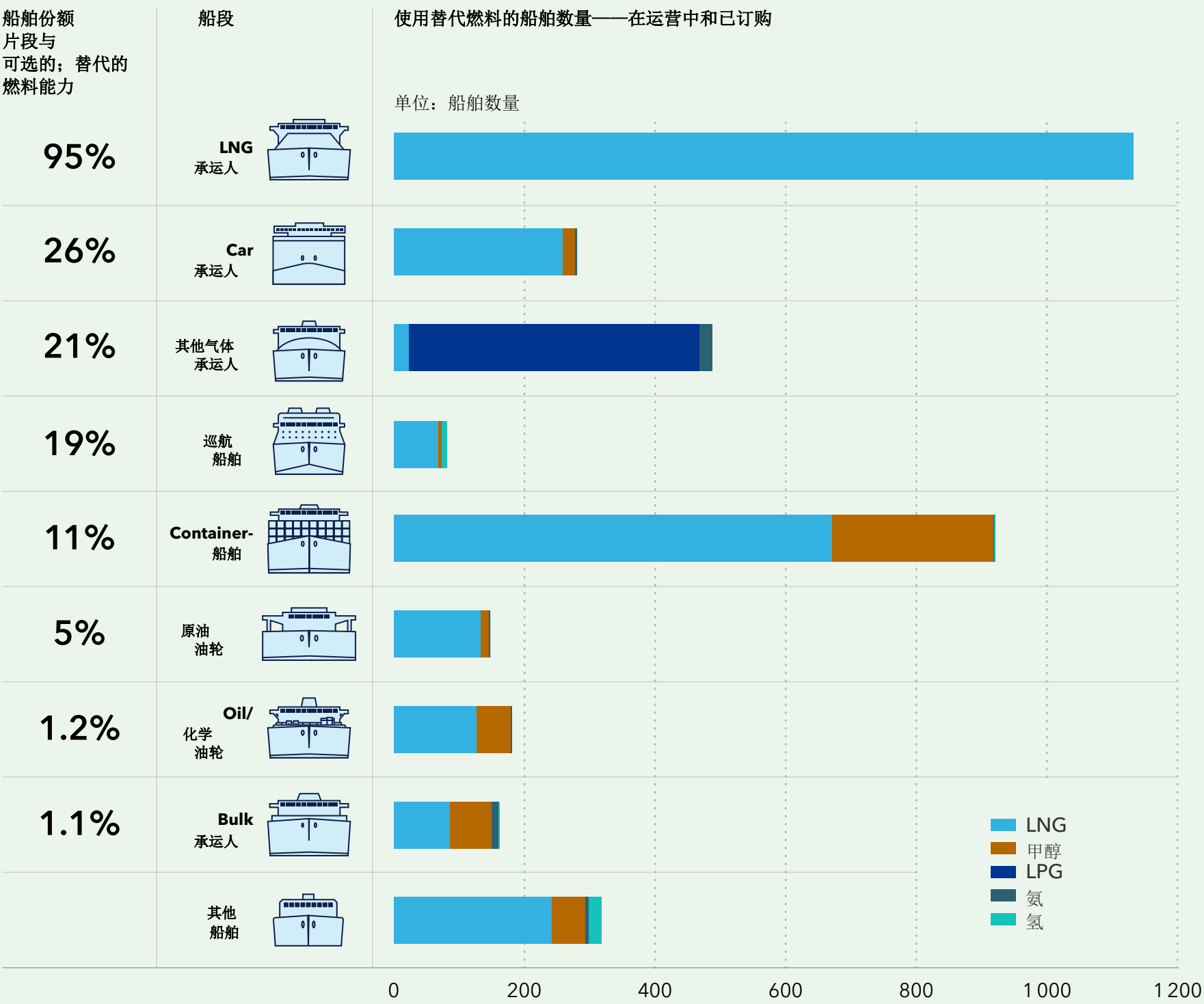
— 在世界船队中，89.8%的运营总吨位只能使用燃油燃料。这意味着，除非这些船舶转换为使用替代燃料或配备船上碳捕获和储存设备，否则它们需要依赖生物柴油（FAME）或加氢植物油（HVO）等替代燃料进行脱碳。对于目前订购的船舶，60.6%的

吨位和79.5%的船舶数量面临相似的限制。

几乎所有液化天然气（LNG）运输船都具备使用替代燃料的能力。目前运营中的LNG燃料船舶中，有813艘是LNG运输船，另外还有319艘正在订购。LNG运输船利用其货物作为燃料，主要目的是在运输过程中管理液化天然气的自然蒸发，以防止货舱内压力积聚。

— 其他21%的天然气运输船可以使用其LPG或氨货物作为燃料。目前，将LPG作为船用燃料的使用仅限于LPG运输船。其他船型的采用情况尚不明朗。目前，在运营的约1,800艘LPG运输船中，有234艘可以使用其LPG货物作为燃料。正如预期的那样，在氨运输船领域也有早期采用者，目前已有1艘在运营，另有19艘已订单的船舶能够使用氨货物作为燃料。

图 3-11



©DNV 2026 来源：S&P Global，替代燃料洞察（AFI）- afi.dnv.com；截至2026年8月

— 26%的汽车运输船具备替代燃料能力：该细分市场是全球航运领域替代燃料的主要采用者之一，其双燃料技术的应用率最高。汽车行业日益要求低碳物流路径，促使运输船东投资于面向未来的推进系统。在约940艘航行船队中的汽车运输船中，149艘可以使用LNG作为燃料，3艘具备甲醇燃料能力。当前的订单簿中列有109艘LNG船、15艘甲醇船和4艘氨船。

— 11%的集装箱船具备替代燃料能力：集装箱船是目前最积极采用替代燃料技术的船舶类型。向LNG、甲醇和氨燃料能力的快速转变受到监管和商业压力（范围3）、货主期望以及避免未来碳成本的策略驱动。在技术采用方面，LNG技术与甲醇技术最近曾争夺领先地位；此后LNG技术重新获得青睐，目前已有424艘具备LNG燃料能力的船舶订单。集装箱船 segment 继续拥有最多（158艘）甲醇燃料能力船舶的订单。在小型的区域集装箱船 segment 中，还有2艘具备氢燃料能力的船舶和1艘具备氨燃料能力的船舶正在订购。就整体 segment 的采用情况而言，目前约有6,700艘集装箱船在运营，其中335艘配备了替代燃料能力，主要是在大型船舶上。预计到2030年，订单簿将再增加585艘替代燃料船，使船队达到11%的双燃料能力，按船舶数量计算。

— 19%的邮轮船舶具备替代燃料能力：目前运营中的远洋邮轮约有350艘，其中包括35艘LNG（液化天然气）动力型和1艘甲醇动力型。采用替代燃料的趋势正在迅速增长，现在超过一半的新船订单都具备替代燃料能力。邮轮船舶的订单统计数据显示，有32艘具备LNG动力能力，4艘可以使用甲醇，还有9艘计划不同程度地使用氢能。

— 5%的原油油轮具备替代燃料能力：对于约2,400艘原油油轮船队而言，液化天然气（LNG）是最广泛采用的替代燃料技术；目前有91艘LNG燃料油轮在运营，另有41艘正在订购。目前有一艘甲醇燃料原油油轮在运营，另有11艘正在订购。目前没有氨燃料原油运输船在航行，但有3艘氨燃料油轮已列入订购计划。

— 1.2%的油化船具备替代燃料能力：在近13,500艘油化船中，有98艘具备LNG燃料能力，另有28艘正在订购。有32艘甲醇船可以使用其货物作为燃料，其中1艘正在订购。此外，还有10艘其他具备甲醇燃料能力的油化船正在运营，另有9艘正在订购。首批两艘具备氨燃料能力的油化船也正在订购。

— 1.1%的散货船具备替代燃料能力：在运营的约13,000艘散货船中，有72艘具备LNG燃料能力，3艘具备甲醇燃料能力。订单簿还将增加13艘LNG燃料、60艘甲醇燃料和11艘

氨气处理能力船舶。LNG技术主要应用于大型散货船。订单中包括10艘可使用甲醇的32.5万吨级矿砂船，以及2艘可使用乙醇的船舶。

— 其他船型：在其他船型中，LNG技术是最受欢迎的选择，已有241艘船舶投入运营或处于订购状态。RoPax/RoRo/渡轮船型约占其中近一半。

这些。其余部分包括51艘可使用甲醇的船舶、5艘可使用氨的船舶以及21艘可使用氢气的船舶。氢燃料技术的应用仅限于短途海运的小型船舶。目前有三艘船舶正在使用氢燃料质子交换膜（PEM）燃料电池运行：挪威渡轮Hydra、美国渡轮Sea Change以及一艘小型日本客船Hanaria。此外，

三艘船员转运船和两艘拖船使用氢燃料内燃机。其他船型的氨订单包括一艘散货船和一艘近海供应船。

除可使用替代液体和气体燃料的船舶外，目前还有超过1,500艘船舶使用电池。 电池应用

从发动机运行能量优化（不靠岸充电）到不同程度电动运行（靠岸充电），通常以插电式混合动力配置实现电池和内燃机双重运行——换句话说，是一种“双燃料”解决方案。大多数被称为“全电动”运行的船舶也将依赖燃油发电机组作为备用。此外，还有371艘已订购的船舶。

船上碳捕获与封存技术的应用

船上碳捕获与封存（OCCS）这一减排技术的核心概念，是在船舶运行期间从其排气中捕获二氧化碳，并将其储存在船上，以便在接收点交付。虽然OCCS可以降低排放，但它涉及能源损耗，并且需要额外的船上储存能力来储存捕获的碳。它还依赖于一个能够接收并永久将捕获的碳从环境中储存起来的供应链（见图3-12）。

目前，有32艘船舶正在使用化学物质（胺类）从排气管中吸收二氧化碳的系统航行。其中3艘配备了能够在船上储存液态二氧化碳并运往接收点的系统。其余船舶则储存富含二氧化碳的胺类，在二氧化碳进一步用于使用或永久储存之前，将其运往岸上处理。欲了解更多信息，请参阅DNV的AFI平台。

试点项目——例如索尔文格（Solvang）和瓦锡兰（Wärtsilä）在“clipper eris”号上的OCCS安装、GCMD在“ever top”号和“everlong”号上的CAPTURED系统——已证明OCCS在真实海洋环境下的可行性。在各种船舶类型上测试的化学吸收系统显示出高效捕集二氧化碳并保持稳定运行的潜力。矿物化试点项目验证了将二氧化碳转化为固体碳酸盐的过程。这些举措为系统性能、集成挑战和监管考量提供了有价值的见解，支持OCCS作为减少航运排放（EMSA，2026）的实用解决方案。

技术提供方正积极开发概念验证和试点项目，以证明OCCS替代方案的技术可行性。然而，重要的是要认识到，他们的成功实施...

碳捕获与封存（CCS）的部署取决于监管机构的批准以及下游基础设施的建设，用于接收、运输和永久封存或利用二氧化碳。目前，欧盟排放交易体系（EU ETS）是唯一为碳捕获与封存系统（OCCS）提供明确激励措施的政策工具。

在海上温室气体法规方面，尽管国际海事组织正在制定专门的监管架构，包括基于生命周期评估的捕获二氧化碳信用机制，但船级社也提供了临时的安全指南。

图 3-12

机上碳捕获价值链

The diagram illustrates the on-board carbon capture value chain. It starts with a ship performing '登船：在船上碳捕捉' (On-board carbon capture). The captured CO2 is then '登船：在船上临时存储' (On-board temporary storage). It is then 'CO的卸载在接待处' (CO unloading at the reception point) onto a shore-based facility. From there, it can be 'CO分布船舶或管道运输' (CO distribution via ship or pipeline transport) to another location. Finally, it can be 'CO的利用/储存' (CO utilization/storage), which includes 'CO的使用' (CO use) and '2作为原料来制造产品' (2 as raw material to manufacture products), or '永久地下储存' (Permanent underground storage).

©DNV 2026

Source: DNV (2024c)

将配备电池。海上电池船队的增长主要由汽车渡轮和客渡轮推动，它们仍然主导着全球电池的采用，主要集中在大半个欧洲和中国。澳大利亚船厂Incat Tasmania已建造了世界上最大的全电池电动船——一艘用于Buquebus、容量超过40兆瓦时的轻型渡轮，计划于2026年投入运营。海上支持船舶和拖船是电池的第二大采用者。沿海和短途通用货船及喂料集装箱船越来越多地采用电池。

电池，尤其是在港口提供激励措施和岸电供应的地方。一些探险船和近海邮轮配备了大容量电池组，以便在敏感区域进行静音航行和零排放运营。德国船厂梅耶·韦尔特（Meyer Werft）最近公布了一艘全电池动力大型邮轮的概念设计。对于深海航运而言，电池的应用通常仅限于发动机优化和辅助负载。从船体到船尾的整体角度来看，发电相关的温室气体排放原则上应当被计入。



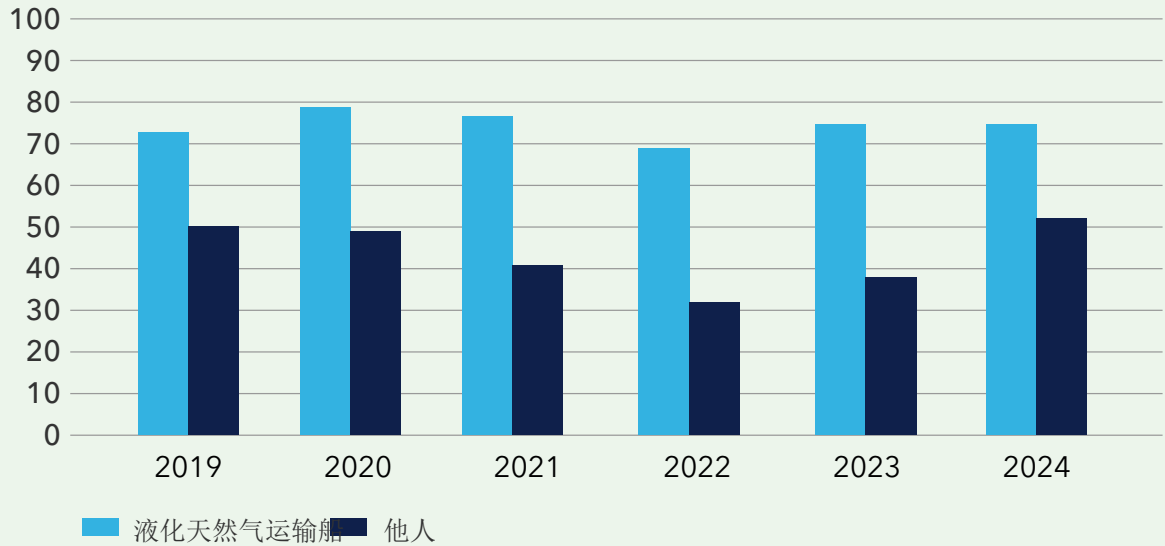
3.3.2 可替代燃料的实际使用

若船舶队的替代燃料能力得到充分利用，在当前订单得到交付时，替代燃料消耗量到2030年或将达到近6000万吨油当量（Mtoe）。液化天然气（LNG）的潜力最大，约为4800万吨油当量（Mtoe）（或4200万吨LNG），这主要得益于LNG运输船队，该船队约占2030年潜在LNG消费量的60%。在替代低碳燃料的背景下，应注意的是，若无灵活的货物保管链系统，LNG运输船难以实现液化低碳甲烷的温室气体减排。这一要求是因为该类船舶依赖消耗货舱中化石LNG产生的蒸发气来管理舱压，通常用于推进（DNV，2026c）。若排除LNG运输船，集装箱船段的LNG消耗量可能超过其余具备LNG接收能力的船队，约占整个船队总消费能力的30%。

FIGURE 3-13

液化天然气（LNG）船的液化天然气（LNG）消费能力预计利用率，区分液化天然气（LNG）运输船和其他船型。51 利用率按液化天然气（LNG）运输船和其他船型区分进行衡量。利用率以报告的液化天然气（LNG）消耗量百分比衡量，该百分比是报告的液化天然气（LNG）消耗量的预计最大值，也是液化天然气（LNG）预计最大潜在使用量的百分比。

单位：LNG消费能力利用率（%）

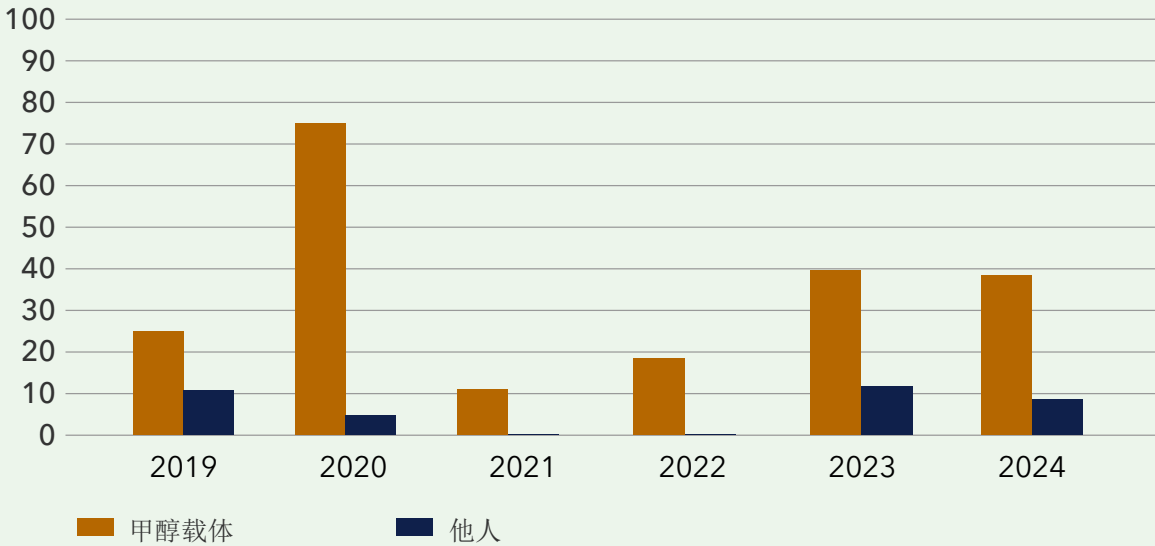


©DNV 2026

图 3-14

图 3-14 甲醇适用船舶的甲醇消耗能力预计利用率，区分甲醇运输船和其他船型。52 利用率按报告的甲醇消耗量占甲醇预计最大潜在使用量的百分比衡量。

单位：甲醇消耗率（%）



©DNV 2026

液化天然气之后，甲醇是2030年消费潜力第二大的燃料，约为7000万吨油当量（5000万吨甲醇）。集装箱船占甲醇燃料总能力的80%，散货船占5%。甲醇消费能力增长的大部分来自超大型集装箱船 segment 和新的巴拿马级集装箱船，两者合计占预测甲醇总消费能力的60%。

然而，从国际海事组织（IMO）数据收集系统（IMO，2020；IMO，2021；IMO，2022b；IMO，2023；IMO，2024；IMO，2025）的历史数据来看，2019年至2024年间，替代燃料的实际报告消费量仍显著低于其潜在最大值（见图3-13和图3-14）。这主要归因于高燃料价格以及当前缺乏限制温室气体（GHG）排放的监管驱动因素。

2019年至2024年期间，液化天然气（LNG）运输船的年利用率为69%至79%，其他船型的年利用率则为32%至52%。在这两种情况下，2022年的利用率均较低，随后至2024年有所上升。2022年，主要加注中心如新加坡和鹿特丹的LNG加注价格远高于燃油价格。根据租船合同，选择以燃气模式或柴油模式运营通常由船东或承租人决定。当LNG加注价格较高时，以柴油模式运营可能更具成本效益，导致许多船东和承租人限制LNG使用。一些运营商也更优先选择燃油加注而非LNG，以避免与LNG加注相关的较长时间停租（DNV，2026c）。迄今为止，消耗的绝大多数LNG仍是化石基的。

2019年至2024年期间，甲醇运输船的年利用率为11%至75%，其他船型的年利用率则为0%至12%。对于甲醇运输船而言，2020年的利用率较高，2021年较低，随后在2023年至2024年期间逐渐上升。2020年出现了崩溃现象。

甲醇价格主要由新冠疫情对工业活动和甲醇需求的影响所驱动。迄今为止，绝大多数消费的甲醇都是化石基的。

3. 3. 3 柴油船船队增长及港口低碳燃料供应情况

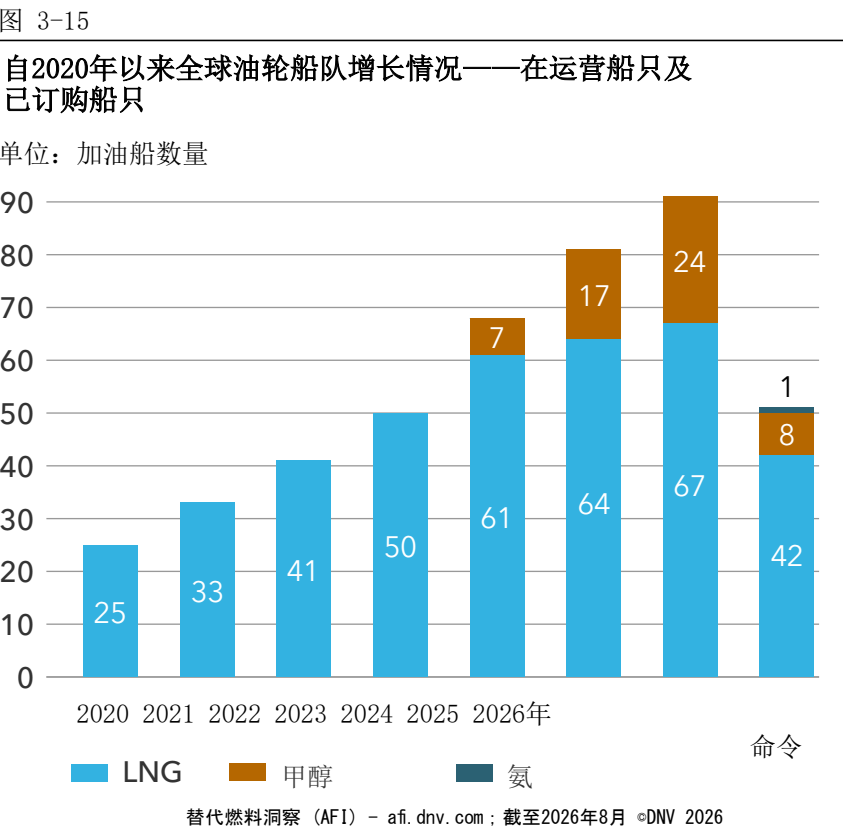
具备替代燃料能力的船舶的快速增长正推动对 bunkering 基础设施的需求数量增加，其中包括专门的燃料驳船和船舶之间的燃料转运作业。

加注船的数量迅速增长，从2020年的25艘增加到目前的67艘（见图3-15）。加注船遍布全球，主要集中分布在液化天然气（LNG）船舶贸易航线上的主要港口附近。在过去五年中，欧洲的加注船数量从15艘增加到33艘，亚洲从6艘增加到20艘，美洲从3艘增加到13艘。据报道有一艘船在全球运营。

自2020年以来，LNG燃料船的数量和规模显著增加，从而提高了其潜在的LNG消耗量。为了满足这一需求，LNG加注船的规模也随之增加。

过去五年中持续上升。目前运营的67艘LNG加注船中，有23艘的容量超过10,000立方米（m3）。已订购的大多数加注船容量超过18,000 m3（DNV，2026c）。

2020年，甲醇燃料补给服务的需求非常低，因为当时运营中的大多数甲醇适用船舶都是甲醇运输船，它们对传统补给基础设施的依赖程度较低。自那以后，需求潜力显著增加，出现了燃料舱容量超过16,000立方米的更大甲醇燃料船。为此，已有24艘不同容量的甲醇补给船投入使用。



现已投入运营，另有8艘正在订购（见图3-15）。其中大部分将运营于新加坡，有4艘从中国港口出发，5艘从欧洲港口出发。

为氨燃料船建立加注基础设施，需要投资具备为大型远洋船舶加注能力的运力。2020年，尚无用于加注氨燃料船的基础设施（DNV，2025i）。如今，我们已看到首艘用于氨加注的5000立方米加注船订单，该船将运营于新加坡（图3-15）。

尽管氨燃料加注基础设施尚未建立，且存在新的复杂问题

自2020年以来，在应对安全挑战方面取得了显著进展，像新加坡和鹿特丹这样的主要燃料加注中心正为安全氨燃料加注做准备，同时其他港口也取得了重大进展（DNV，2025i）。

通过系统收集全球港口公开的低温温室气体燃料加注数据，DNV已绘制出2015年至2026年4月期间，至少发生过一次低温温室气体燃料加注操作（使用纯低温温室气体燃料或混合燃料）的地点。如图3-16所示，结果表明，进行低温温室气体燃料加注活动的港口在地理上分布广泛，但主要集中在欧洲和东亚地区。

总计，全球近90个港口已储存了各种低碳燃料变体。生物燃料FAME和HVO是最普遍的，已在近70个港口供应。生物甲烷液化燃料已在至少20个港口进行储存，主要分布在欧洲，此外还有北美和东亚的地点。低碳甲醇（包括电甲醇和生物甲醇）已在至少16个港口供应，主要分布在东亚和西欧部分地区。在东亚的三个港口记录了低碳氨的储存。

某些项目可能涉及小型船舶，因此不一定表明适用于远洋船舶的商业可用性。此外，一些作业使用符合质量平衡要求的燃料——特别是液化生物甲烷和低温温室气体甲醇——这些燃料在欧盟ETS（碳排放交易体系）和FuelEU Maritime法规下是被允许的。

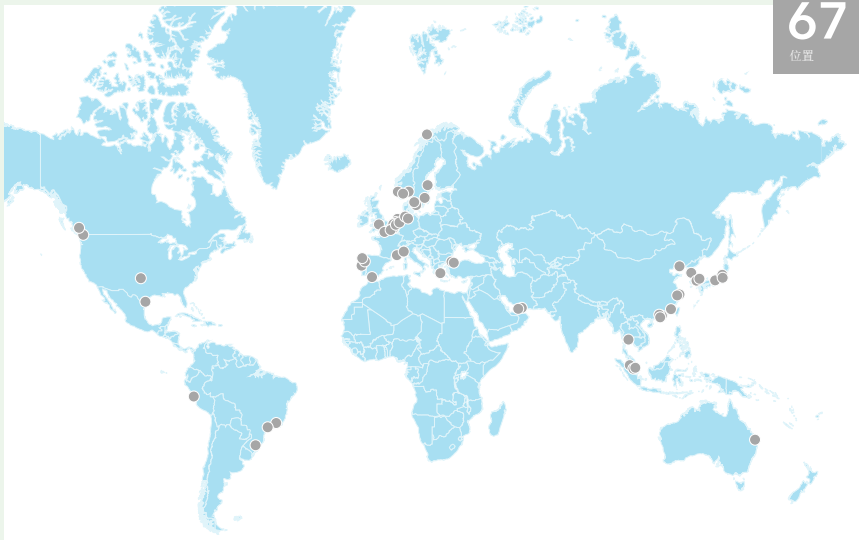
理解新兴的低温温室气体燃料海洋市场的动态，对于航运和燃料生产的所有利益相关者都至关重要。在下一章中，我们将描述这个市场以及塑造它的主要因素。

应指出的是，本数据集中包含的几项燃油加注作业是试点项目。

图 3-16

已报告进行低温温室气体 bunkering 操作的地点。每个点代表一个港口。包括 FAME、HVO、低温温室气体氨、液化生物甲烷和低温温室气体甲醇的 bunkering。

FAME和HVO（生物）



©DNV 2026

低温温室气体氨



液化生物甲烷



低碳甲醇



Source: DNV (2026)



4

低温温室气体燃料的海洋市场

亮点

未来低碳燃料的市场将由航运业及其他行业的发展共同塑造。本章回顾了影响该市场的主要因素，并提供了新的数据和DNV建模结果，包括：

到2050年实现净零排放的未来，全球跨部门对低碳燃料的需求可能达到2,200兆吨油当量，这将需要大规模部署生物燃料、蓝燃料和电燃料。

到2030年，全球低碳燃料供应量最多可达270兆吨油当量。

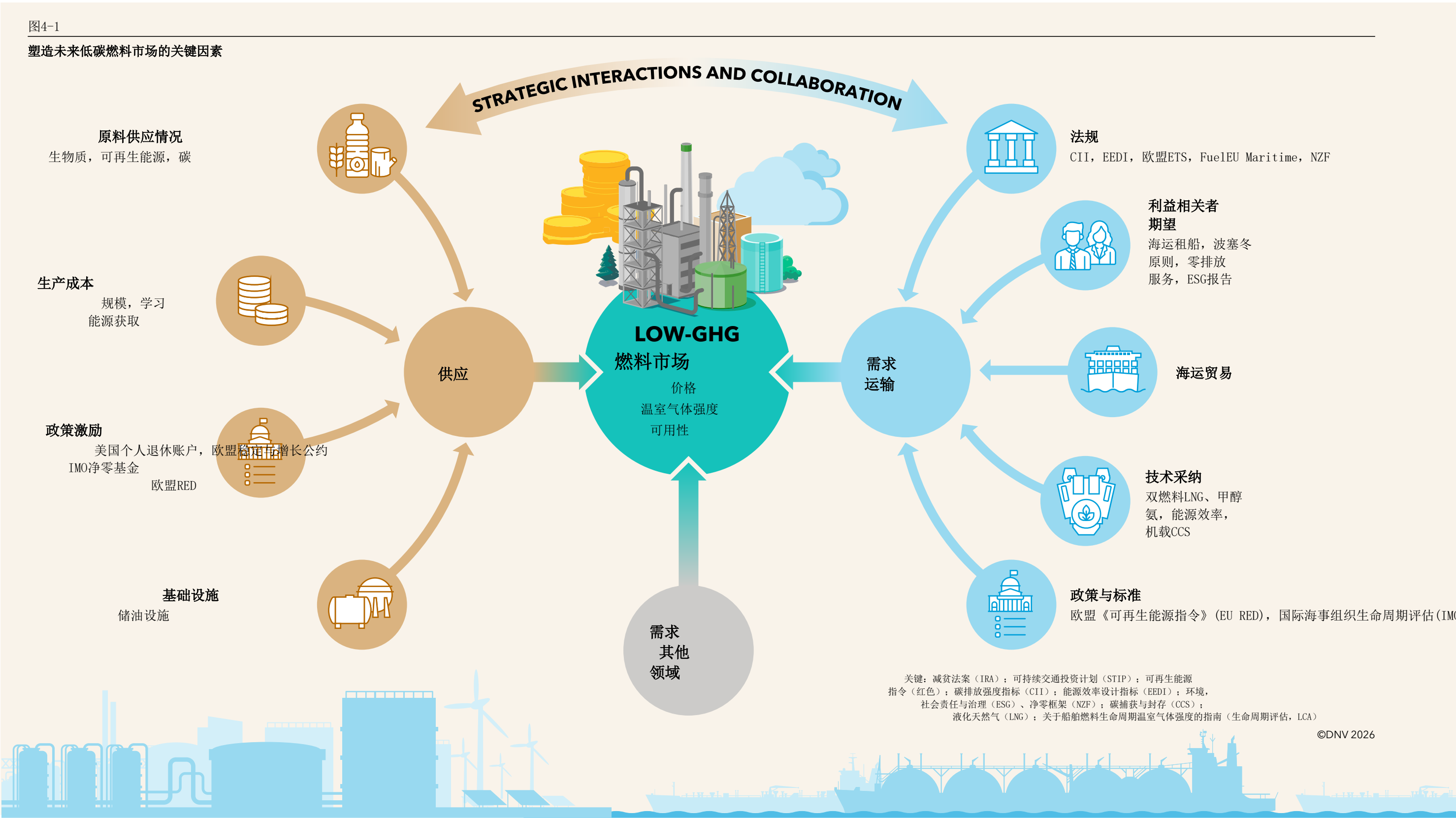
– 低碳燃料的航运需求将从2030年的4–22百万吨油当量增长至2050年的33–185百万吨油当量。

低温温室气体燃料类型之间的价格差异将仍然存在，并且通常会相互脱钩。

化石燃料主导着当今的船舶燃料市场，能源价格是决定其竞争力的主要因素。随着航运业中低温室气体燃料的使用日益增多，本章将探讨其未来供应与成本、需求，以及航运业和其他行业愿意为其支付的意愿。我们将结合这些见解，分析未来船舶低温室气体燃料市场可能如何发展以及价格可能如何演变。

4. 1 影响海洋低碳燃料市场的关键因素

目前，关于系统描述和量化塑造海洋低碳燃料市场关键供需因素的研究文献有限。现有大多数研究倾向于关注市场单个组成部分，例如成本和燃料供应潜力，或不同行业的需求，有时甚至仅针对特定燃料类型——例如，可参见MMMCZCS（2026）；BCG（2025）；IEA（2025c）和Ricardo & DNV（2023）的最新研究。其他研究则从更广泛的能源系统视角出发，探讨海上脱碳问题，通过模型模拟船舶使用低碳燃料，使其与全球脱碳情景保持一致——例如，可参见Kramel等人（2026）；Kanchiralla等人（2026）；DNV（2025g）。



没有任何单一的解析模型能够完全描述未来海洋燃料市场的动态。运用核心经济原理，海洋低碳燃料市场将由燃料产品的供应以及航运业和其他行业的需求所塑造，并在供需平衡时达到价格均衡。这些核心动态受到多种因素的影响，如图4-1所示。

潜在的全球低碳燃料供应和成本主要取决于原料的可用性、生产工艺以及配套的分销基础设施。总体需求主要受法规驱动，并在一定程度上受商业相关方的预期影响。市场价格将由供需平衡以及低碳燃料产品在实现合规方面的价值评估所决定。

满足利益相关者的期望。预期会因当地和区域市场条件及政策而存在显著差异。

技术与采用在供给侧和需求侧都发挥着重要作用。技术学习和规模经济将降低燃料生产成本。海运领域对燃料技术的采用，例如双燃料LNG、甲醇和氨发动机，使全球船队能够使用具有不同生产成本和供应能力的替代燃料。采用能效措施和其他脱碳解决方案，如岸电、船上碳捕获与封存（OCCS）和风辅助推进系统（WAPS），可以进一步减少对低温室气体燃料的需求。

低碳燃料的潜在全球供应和成本主要取决于原料的可用性、生产工艺以及配套的配送基础设施。



海洋燃料市场将受到政策设计的影响，这种影响超越了直接的监管要求。生命周期排放评估（LCA）和认证标准将决定哪些燃料和原料符合合规要求。作为替代性合规机制的经济处罚为船东愿意接受的燃料价格设定了上限。投资支持计划和风险分担机制可以将资金调动至燃料生产项目，这些项目通常具有较长的建设周期和高额的前期风险，同时也包括分销基础设施。全球对能源安全的日益关注将通过加速对替代能源的投资来推动绿色转型，从而减少对化石燃料的依赖并降低地缘政治风险。

在一个新兴市场，船东、燃料供应商、港口和监管机构之间的战略互动与合作对于解决燃料供应、船舶燃料技术采用以及分销和加油基础设施之间存在的“鸡生蛋还是蛋生鸡”的挑战等障碍至关重要。为了实现低GHG燃料的初始使用，所有这些要素都需要同步发展。

早期部署可能会集中在路线和货流可预测的行业，通常见于集装箱和汽车运输班轮行业，以及某些油轮和散货行业，在这些行业中，燃料供应可以在港口和船队之间进行协调。绿色航运走廊和类似倡议可以通过降低协调风险来加速早期规模扩大。

4.2 低温温室气体燃料供应

理解低碳燃料的未来供应是评估海洋燃料市场发展的核心。本分析涵盖主要燃料类型——柴油型燃料、甲烷、甲醇、乙醇、氢气和氨——这些燃料由多种原料生产，包括生物质以及绿氢和蓝氢（参见第43页的框图）。在分析中，我们不区分可持续与非可持续生物燃料。同样，我们也不区分

我们试图应用诸如“先进”或“传统”等相关类别，因为定义和可持续性标准在不同法规和认证标准之间存在差异，并且尚未在IMO生命周期评估框架下确定。

HV0（56百万吨油当量），以及生物甲烷（10百万吨油当量），其余供应由生物喷气燃料、氨、甲醇和氢气构成。⁵³ 仅有一小部分用于海事领域，估计每年约为1百万吨油当量量级。⁵⁴

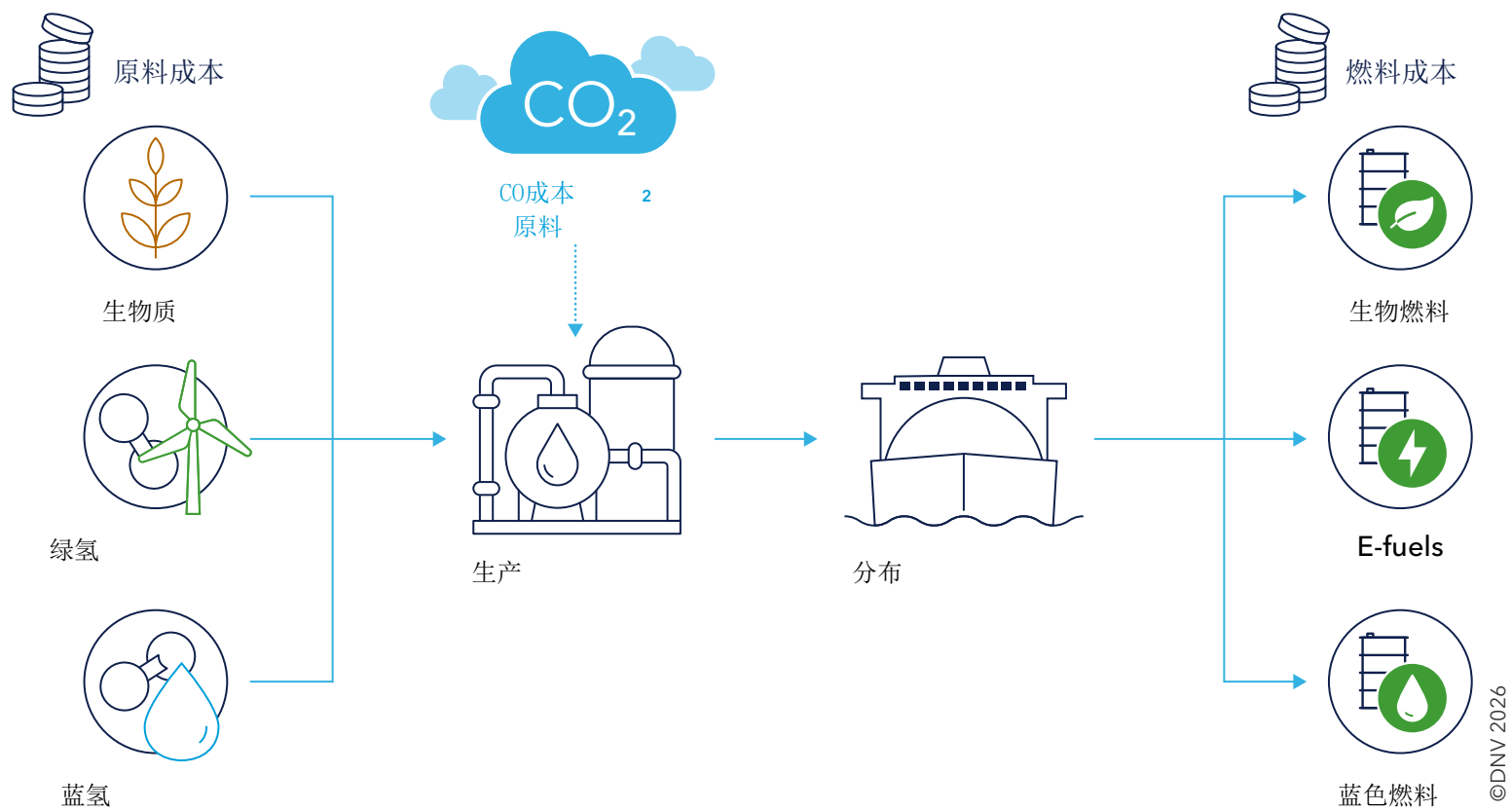
某些燃料类型的供应预测。此估计综合了多种来源的数据，包括DNV替代燃料洞察平台（AFI）的生产能力数据以及IEA（2025b）的数据。此外，我们基于DNV（2023a）和其他来源对的可再生原料评估情况，提供了2040年和2050年生物燃料最大潜在供应量的长期预测。

2025年，低碳燃料的全球供应量约为135百万吨油当量，主要由乙醇（64百万吨油当量）和生物柴油（包括FAME）构成。

我们根据已运营或宣布的生产项目数据，估算2030年全球低碳燃料的最大供应量，并考虑短期因素。

图4-2

DNV的船舶燃料成本映射工具用于对低碳燃料生产和交付链中的成本进行建模，更多详情请参见DNV（2024b）。



我们使用DNV的船舶燃料成本地图仪（见图4-2）计算了2030年、2040年和2050年的燃料供应成本，该地图仪模拟了完整的生产和交付链。供应成本，以单位能量的成本衡量，包括原料的投资和运营成本、原料到燃料的转换成本以及分销成本。我们关注生产成本，并未考虑任何可能影响低碳燃料成本和供应的政策，例如补贴和税收抵免计划。有关此类政策的讨论，请参见第2.2节。

然后，我们根据欧盟可再生能源指令（EUC，2024）和其他资料，结合每种燃料的温室气体（GHG）强度，计算了2030年、2040年和2050年每种燃料路径的减排成本（每减少一吨GHG的成本）。这表明了相对于化石燃料基准，每种燃料类型和原料在减少GHG排放方面的成本效益——有关减排成本的说明，请参见第44页。附录A提供了更多关于我们方法以及关键建模假设的信息。

低碳燃料路径包含在供应分析中

低碳燃料可以从三大主要原料类别中生产：生物质、绿氢和蓝氢。

生物质原料（例如生物废弃物、农作物残留物、粪便、甘蔗和废弃油脂）为生物燃料（如生物甲烷、生物甲醇、生物柴油和生物乙醇）提供主要能源。此处将“生物柴油”作为统称。它涵盖所有可在柴油发动机中直接使用的生物基燃料，这些燃料由可再生生物质和废弃物原料生产，包括脂肪酸甲酯（FAME）、加氢植物油（HVO）以及其他生物基柴油生产途径。

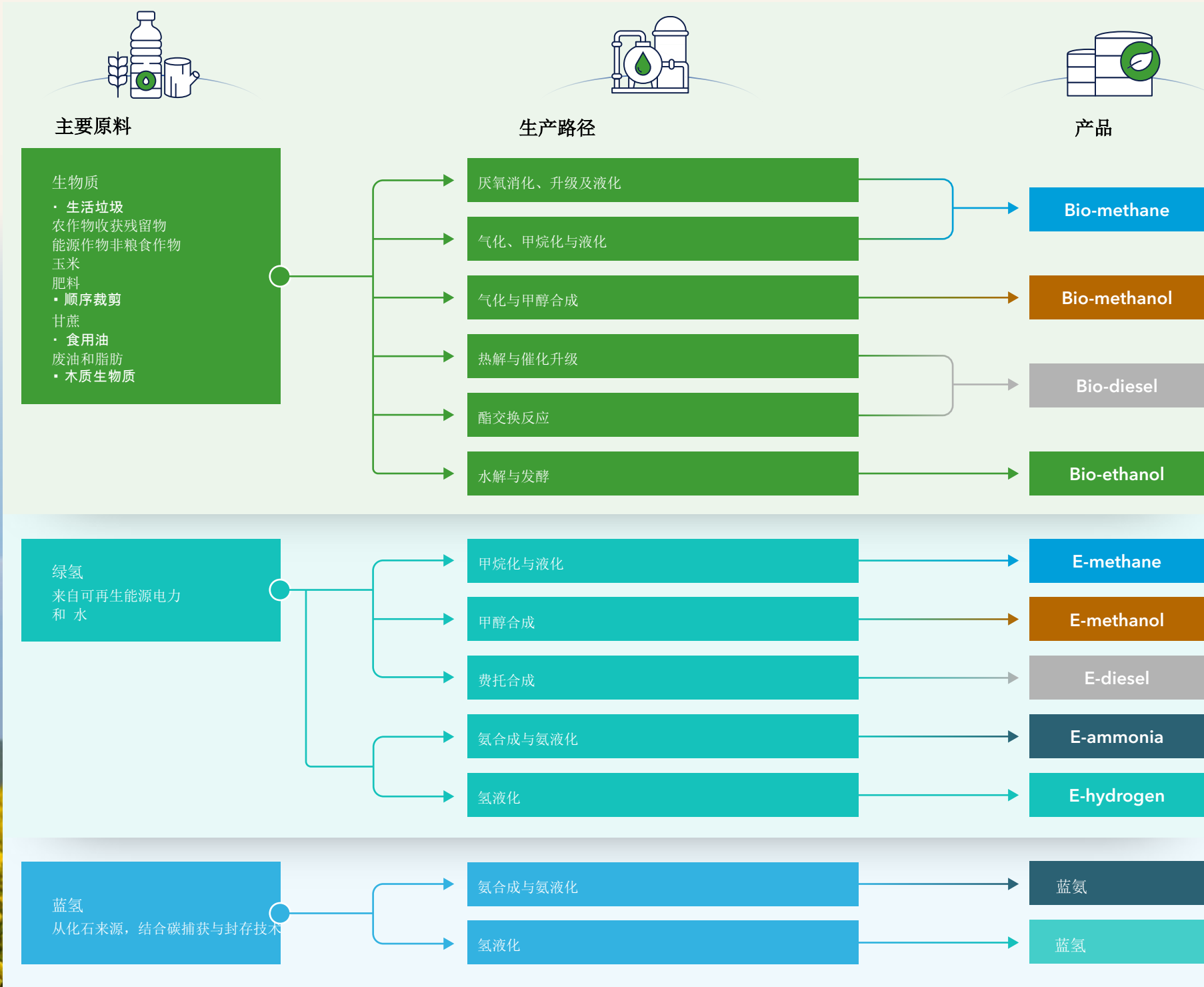
绿氢（来自可再生电力）和蓝氢（来自化石燃料且含碳）

碳捕获与封存（CCS）分别是电燃料和蓝燃料的关键原料。为合成含碳电燃料，需要从生物源点源或直接从空气捕获（DAC）获取二氧化碳原料，以提供合成电甲烷、电甲醇和电柴油所需的碳分子。对于氨的生产，需要氮气作为额外的合成投入。

图4-3展示了在供应分析中包含的低温室气体燃料路径，这些路径被认为与航运相关。该图并非详尽无遗，并未展示所有燃料分子和生产路径。例如，压缩氢气未被纳入分析，尽管它有助于船舶脱碳，特别是在短途海运航段。

图4-3

低碳燃料路径已包含在供应分析中。此外，CO和氮等额外原料输入已被考虑，但未在图中显示。



单位与度量衡说明

低温室气体燃料市场预计将包含多种不同低热值的热值燃料，这些燃料由不同的原料和生产路径生产，导致产生不同的温室气体强度（GFI），以每兆焦耳能量含量多少克二氧化碳当量（gCO2eq/MJ）表示。热值为18.6 GJ/吨、温室气体强度为50 gCO2eq/MJ的吨级蓝色氨，其价格将与热值为37 GJ/吨、温室气体强度为16 gCO2eq/MJ的废弃食用油生物柴油不同。

为了比较各种燃料类型和生产途径，我们需要使用可比较的指标。

对于能源，我们使用油当量（toe），单位为公吨。1 toe = 41.868 GJ = 1.02 公吨 LFO（轻燃料油）= 0.98 公吨 MGO（船用柴油）

对于温室气体强度，我们使用 gCO2eq/MJ，其中CO2eq包括CO2、CH4和N2O，并采用100年全球变暖潜能值（GWP）。这符合国际海事组织（IMO）的生命周期评估（LCA）指南。

减排成本是指通过从基准化石燃料转换来减少一吨二氧化碳当量（CO2eq）所产生的成本。

将燃料转化为低碳燃料。在本研究中，除低碳甲烷外，所有燃料的减排成本均相对于化石低硫重油（LSHF0）进行计算，采用假设的LSHF0能源价格分别为2030年的502美元/吨油当量（USD/toe）、2040年的389美元/吨油当量（USD/toe）和2050年的394美元/吨油当量（USD/toe），以及95.48 gCO2eq/MJ的温室气体强度。对于低碳甲烷，我们假设其替代化石液化天然气（LNG）的成本分别为2030年的410美元/吨油当量（USD/toe）、2040年的440美元/吨油当量（USD/toe）和2050年的473美元/吨油当量（USD/toe），以及77.19 gCO2eq/MJ的温室气体强度。减排成本计算为基准化石燃料与低碳燃料之间的成本差除以温室气体强度差（见下方公式）。

例如，一种GFI为16 gCO2eq/MJ、价格为1,800美元/吨油的FAME生物柴油，到2030年的减排成本将约为390美元/吨CO2eq。该减排成本可以直接与IMO新西兰修复单元（RU）价格和FuelEU罚款进行比较。如果一种低温室气体燃料的减排成本低于其价格，

成本 - 减排成本 = 低碳化石成本（化石燃料固定排放因子 - 低碳燃料固定排放因子）× 0.0419



若使用IMO生命周期评估默认排放因子和欧盟RED及FuelEU排放因子，减排成本略有不同。但为简化起见，我们仅使用基于IMO生命周期评估因子的减排成本。

计算低碳燃料相对于基准化石燃料的减排成本公式。成本单位为美元/吨油当量（USD/toe），全球温室气体强度（GFI）单位为克二氧化碳当量/兆焦耳（gCO2eq/MJ）。因子0.0419将GFI差异转换为吨二氧化碳当量/吨油当量（tCO2eq/toe），从而得出以美元/吨二氧化碳当量（USD/tCO2eq）表示的减排成本。

4. 2. 1 2030年短期潜在供应

我们的估算显示，如果所有已宣布的燃料生产项目按计划实现并投产，到2030年，全球低碳燃料的供应量可能达到270 Mtoe，比2025年翻了一番以上。这一潜力在图4-4的水平轴上有所体现。其中，柴油型燃料将占69 Mtoe，甲烷将占19 Mtoe，两者均从当前水平有显著增长。甲醇和氨分别可能达到24 Mtoe和84 Mtoe，尽管其当前水平非常低。乙醇预计将更温和地增长至65 Mtoe，而氢气可能达到8 Mtoe。上述估算代表最大、上限的潜力，由于项目延迟、取消以及其他不确定性，实际供应量可能会显著低于此。

在图4-4中，我们还展示了针对本研究考虑的每种燃料生产路径的潜在供应量与减排成本的关系图。这些路径按减排成本从低到高排序。与供应成本不同，减排成本也考虑了具体燃料路径的温室气体强度（有关单位详情，请参见方框说明）。重要的是要强调，在成本和温室气体强度方面，综合结果掩盖了每种燃料类型在区域以及项目之间的显著差异。

总体而言，预计到2030年，生物燃料的减排成本最低，包括来自粪便的液化生物甲烷、来自甘蔗的乙醇和生物柴油

从废油和废脂肪中减排成本最低，估计大约在180至300美元/吨二氧化碳当量之间。然而，这部分仅占总潜力的不到20%。据估计，到2030年，约6200万吨油当量的低温室气体燃料供应将与国际海事组织新西兰燃料Tier 2 RU的380美元/吨二氧化碳当量价格具有成本竞争力，这意味着这些燃料可以

在采用新西兰燃料（NZF）的情况下，采用合规方案比不合规的代价更低。目前没有燃料的减排成本估计低于每吨二氧化碳当量100美元的Tier 1参考价格。使用约490美元/吨二氧化碳当量的减排成本，可以生产1800万吨蓝色氨；而使用估计成本为680美元/吨二氧化碳当量的减排成本，可以生产6600万吨电子氨。

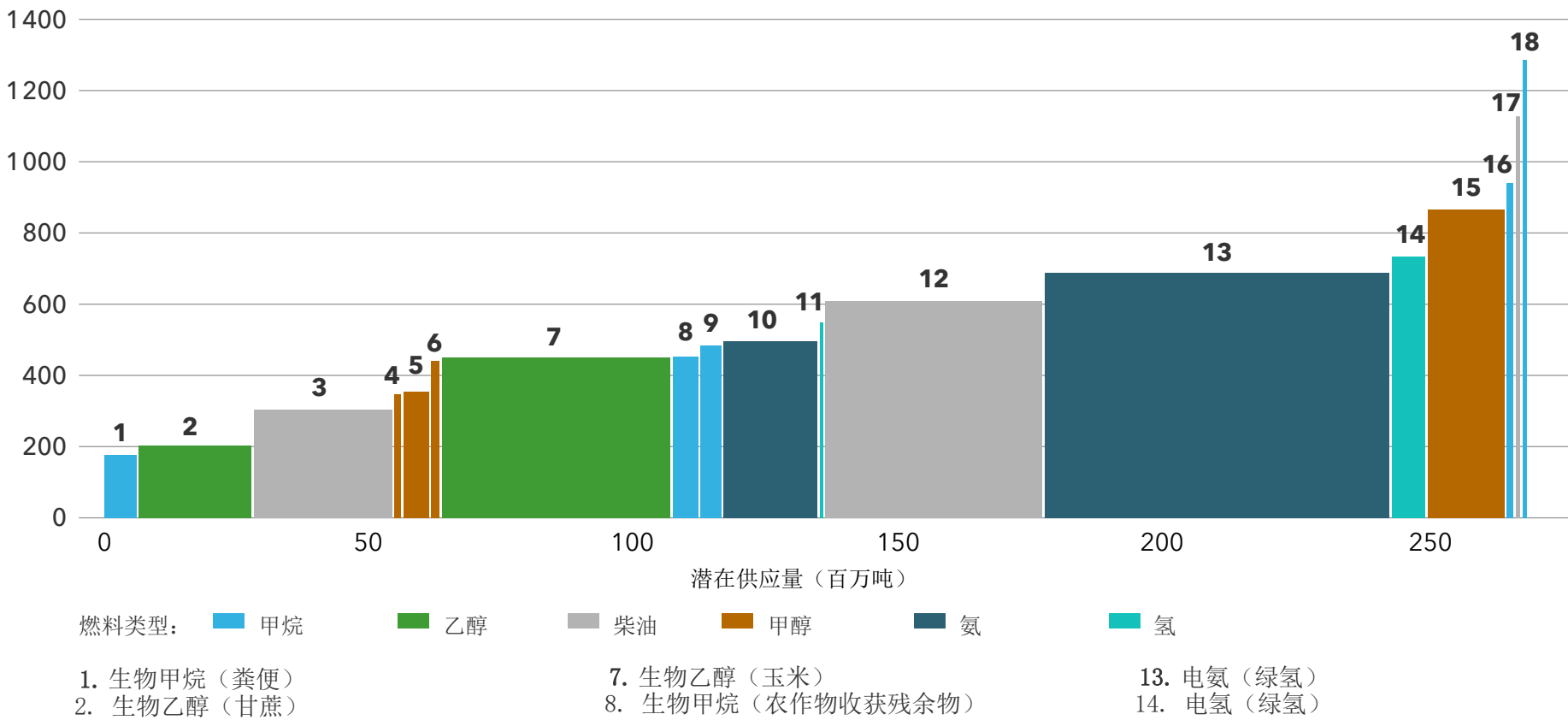
我们预测的燃料供应和减排成本估算存在若干不确定性，这些因素可能对结果产生实质性影响。这些因素包括，例如，原料价格、生产装置的资本成本、电网电力和其他能源成本、分销距离，以及 bunkering 基础设施的类型（例如，油罐至船、bunkering 船舶或卡车至船）。此处未考虑的某些原料和处理残渣可能提供不适合其他部门的海洋燃料，例如腰果壳液体（CNSL）和脂肪酸甲酯（FAME）残渣。

据估计，到2030年，约62兆吨油当量（Mtoe）的低温室气体燃料供应，其成本将与国际海事组织（IMO）新西兰燃料Tier 2 RU价格具有竞争力。

图 4-4

2030年各燃料路径的潜在最大全球低GHG燃料供应量（x轴）和减排成本（y轴）。各路径按减排成本递增排序；供应量主要基于生产能力数据，而减排成本则结合了DNV估计的燃料成本和假设的GHG强度值。

单位：减排成本（美元/吨二氧化碳当量eq）



除燃料供应成本外，估计的减排成本还取决于每个建模燃料路径所假设的温室气体强度，该强度可能在供应链中存在显著差异。我们使用全球平均假设来估算燃料供应成本和温室气体强度；然而，地区和项目特定的差异是存在的。供应成本基于净现值（NPV）评估，包括资本成本，应被视为最低供应成本，不包括任何针对项目特定或市场风险的可交易配额。此外，未考虑任何补贴或其他项目特定的财政支持。

4. 2. 2 2040年和2050年的长期潜在供应

对于到2040年和2050年的长期展望而言，供应并非受当前项目管道所限制，而是受可持续原料的可用性以及基础设施发展速度等因素的限制。根据原料的可用性，可以估算生产潜力，然而，由于相同的原料（例如木质生物质）可以转化为多种燃料（例如柴油、甲醇、乙醇、甲烷），因此这并非一件简单直接的事。

重要的是，呈报的估算中包含的许多项目尚未做出投资决策，这给最终将有多少供应量实现带来了不确定性。项目的融资和投产依赖于明确的需求信号，包括明确表明替代合规选项（如罚款）成本更高。

因此，我们并非试图量化到2040年和2050年低碳燃料生产的最大潜力，而是为生物燃料作为一个整体提供最大生产潜力。

我们预计，到2040年，全球生物燃料的最大潜力可能达到约1000百万吨油当量（Mtoe），到2050年将增加到1300 Mtoe。这些估计基于适合的原料（如农业残渣和城市垃圾）的可用性所面临的物理限制，并包括传统原料和基于废物的原料（详见附录A）。这些数值代表每种原料具有最高转换效率的生物燃料生产路径。如果使用效率最低的转换过程，那么产量可能会降低约20%。

蓝色燃料和电燃料的供应潜力没有明确的上限。然而，蓝色燃料依赖于碳捕获与封存技术的应用，这可能是关键的限制因素。电燃料则依赖于可再生能源电力，这也可能成为关键的限制因素。对于使用生物碳的电燃料生产路径而言，生物质供应可能是一个重要的限制因素。更广泛地说，生产的增长受限于获取许可以及开发必要的生产、分销和基础设施的能力。

表4-1中，我们标明了每种原料组（即生物燃料、蓝色燃料和电燃料）内不同燃料类型的减排成本估算范围。预计减排成本将下降。

面向2040年和2050年，蓝色燃料和电燃料的减排幅度预计将显著增加，其中电燃料的减排幅度最为陡峭。这主要是由技术进步和生产基地的规模化扩张所驱动，从而降低了单位产出的资本成本。因此，这些电燃料成本降低取决于大规模部署，以实现学习效应和规模效应的显现（DNV，2026a）。到2040年，大多数生物燃料路径的减排成本预计将低于电燃料和蓝色燃料，潜在产量可达约870 Mtoe，减排成本低于500美元/吨CO2当量。在电燃料中，成本最低的是电氨，约为550美元/吨CO2当量，而使用生物基CO2原料生产的电甲醇、液化电甲烷和电柴油的成本大致在710至1000美元/吨CO2当量之间。到2040年，蓝色氨的减排成本约为520美元/吨CO2当量。到2050年，电燃料成本的进一步下降将缩小这些差距，电氨成本将降至约380美元/吨CO2当量。

表4-1

到2040年和2050年，各燃料原料组别的减排成本估算范围		
燃料原料组	减征成本（美元/吨二氧化碳当量eq）	
	2040	2050
生物燃料	160-880	130-810
蓝色燃料	520-580	420-490
E-fuels	550-1 440	380-890



4.3 航运低碳燃料需求

海上部门低温室气体燃料需求的主要驱动力将是针对向欧盟贸易船舶的法规，例如FuelEU和欧盟船舶排放交易体系（EU ETS），以及潜在的国际海事组织净零框架（NZF），该框架正在重新谈判，并可能增加具有全球范围的温室气体强度要求（参见第2.1节和第2.2节）。由商业驱动需求仍然有限，主要与利益相关者的脱碳目标和环境、社会及治理（ESG）报告相关（参见第2.3节）。除了直接法规之外，需求还将受到与化石燃料相比使用低温室气体燃料所带来的额外运营成本，以及全球船队对不同燃料类型运营能力的影响。政策的实施和标准的执行可以对特定燃料类型和原料提供激励或限制；例如，FuelEU为电燃料（非生物来源的可再生燃料）提供奖励系数，并将基于食物和饲料作物的生物燃料视为化石燃料。这些问题也是在国际海事组织生命周期评估指南（LCA）工作中讨论的议题（参见第2.1节）。

在下一节中，我们首先使用定义于第二章中的两种监管情景，调查航运业中低碳燃料的潜在总需求。然后，我们通过考察船队中替代燃料技术的潜在采用情况，评估使用液化天然气、甲醇和氨等替代燃料类型的潜力。最后，我们分析支付意愿以及

不同类型和温室气体强度的低碳燃料，以及监管机制和替代燃料技术成本对此的影响。

4.3.1 2050年需求场景

航运业中低温室气体燃料的总需求主要取决于设定排放轨迹的法规、海运贸易增长决定航运总量，以及能源效率及其他措施（例如，风辅助推进系统、岸电和插电混合船舶的岸侧充电）的采用对能源使用的影响。为评估这些因素的相互作用，我们使用DNV的温室气体路径模型（DNV，2024a；DNV，2024b）模拟至2050年的船队，并推导出低温室气体燃料的总需求。我们的目标不是评估个别燃料类型的采用情况，而是估算低温室气体燃料的总体需求。该模型包含了当前运营于国际航线的400总吨以上的船队，并输入相关的温室气体法规、海运贸易增长、能源效率和燃料技术选项以及燃料排放因子。然后，模型模拟了为满足相关法规所需的低温室气体燃料的所需数量。更多详情，请参见附录A。

由于未来法规存在不确定性，我们为低碳燃料需求设定了一个范围。

图4-5

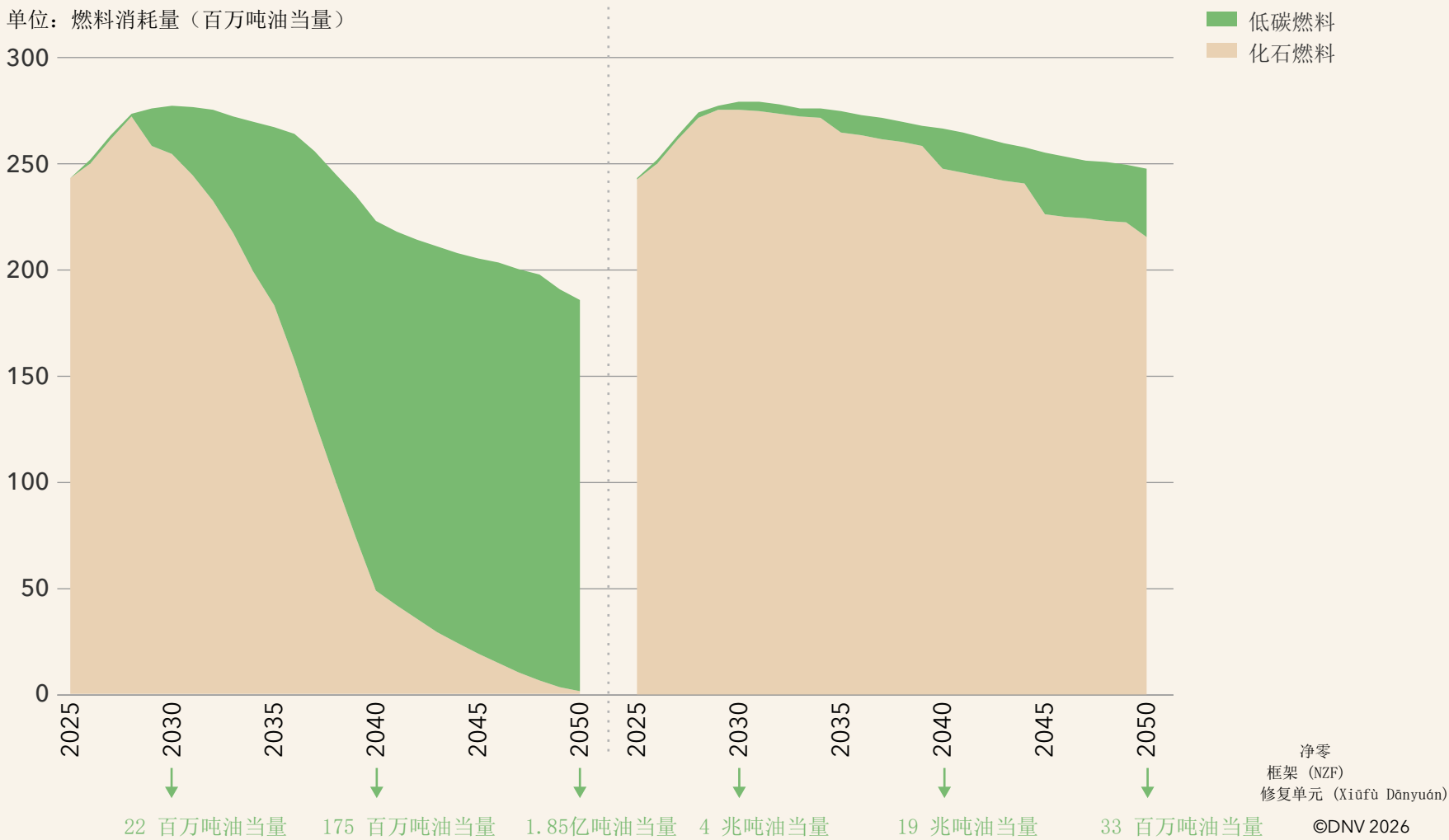
到2050年，低温室气体燃料和化石燃料的高需求（左侧面板）和低需求（右侧面板）情景

高需求场景——采用当前的NZF

国际海事组织新西兰燃料标准（IMO NZF）自2029年起正式生效并保持原样。RU价格将足够高，以推动船舶在船队层面实现年度基准减排目标。

低需求情景——新西兰金融管理局无限期拒绝

目前没有新的全球温室气体法规，现存的区域法规仅有现行《FuelEU Maritime》和欧盟碳排放交易体系（EU ETS）框架。



使用第2章中的两种情景进行运输，分别导致最高和最低需求。图4-5简要描述了这两种情景，并展示了由此产生的低碳燃料和化石燃料的需求情况。

两种情景下，低碳燃料的总体普及程度差异显著，高需求情景下的普及程度大约是低需求情景下的六到九倍。采用低甲烷泄漏发动机使用化石液化天然气会降低对低碳燃料的需求。更高的燃料和监管相关的温室气体成本会推动能效措施和减速措施的进一步普及，这些措施对总能源使用有显著影响，进而影响对低碳燃料的需求。在高需求情景下，2050年的总能源使用量比低需求情景低25%，相当于6200万吨油当量（Mtoe）的燃料能源。普及程度将取决于实施能效措施的成本及其对能源使用的影响，与低碳燃料的价格相比较而言。

除了能效提升之外，能够减少对低温室气体燃料需求的技术还包括岸电、插电式混合动力、核能和车载碳捕获系统等。这些解决方案在模拟中并未被考虑。

在燃油需求高的情景下，2050年的总能源使用量比低需求情景低25%，相当于6200万吨油当量（Mtoe）的燃料能源。

4. 3. 2 支持使用替代燃料的能力

现有的船舶燃料技术和分销网络对现有燃料类型（如燃油和在一定程度上LNG）产生了强大的锁定效应。如第4.2节所述，未来的低碳燃料和燃料类型（如甲烷、乙醇、甲醇、氨和氢气）将具有不同的供应和减排成本。不同燃料类型之间市场价格的显著差异将推动对替代方案的投资。

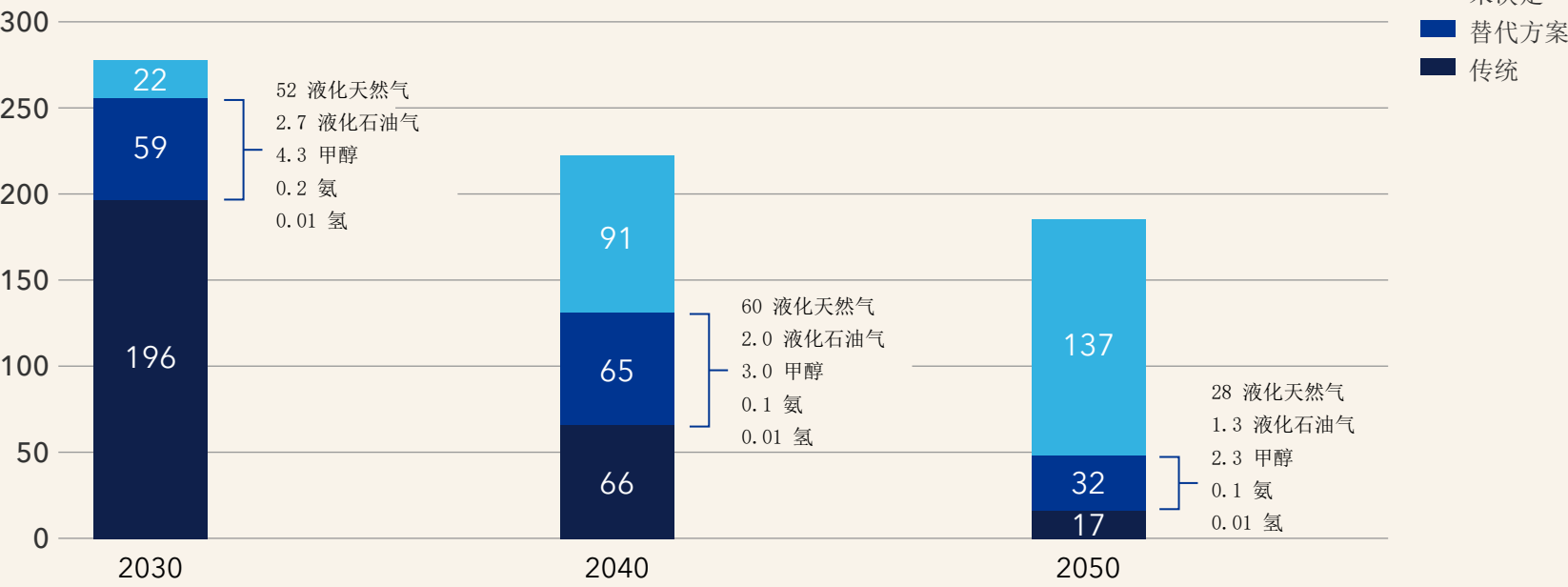
船上燃料技术。未来使用替代燃料的能力将取决于为船舶配备或改造相关燃料技术。

第三节3.3介绍了全球船队替代燃料的使用现状。基于前节中高需求情景下的船队发展和能源使用情况，图4-6展示了到2030年、2040年和2050年，按燃料技术划分的潜在燃料消耗分布。替代燃料消耗的占比基于...

图4-6

到2030年、2040年和2050年，使用高需求情景并假设不进行改造，模拟世界舰队使用常规燃料和替代燃料的运行能力

单位：百万吨油当量



©DNV 2026



现有船舶和订单。消费能力的日益增长中，有越来越多的部分被标记为不确定——这意味着那些预计将加入船队但尚未订购、因此燃料技术尚不明确的船舶。我们假设这些船舶除必要的引航燃料外，将完全使用替代燃料。在本场景中，我们假设现有船舶不会进行改造。低需求场景将呈现类似的趋势，但由于速度降低幅度较小，因此需要额外的新造船来替代损失的能力较少，从而导致不确定燃料类型的比例较低。

到2030年，采用特定燃料类型的能将主要取决于现有船队和订单簿的技术，因为到那时之前再订购新船已经所剩无几。替代燃料总产能为5900万吨油当量，其中大部分是LNG，还有少量LPG和甲醇。根据预期的船队增长，我们估计大约还有2200万吨油当量的燃料产能尚未确定。

展望2040年和2050年，整个机队在燃料技术方面存在发生更重大变革的潜力，但这取决于技术发展。



香港中集（CM Hong Kong），全球首艘甲醇适用型汽车运输船。

船东选择的技术。到2040年，未确定燃料技术的份额将增加到91百万吨油当量（Mtoe）的产能，到2050年将增加到137 Mtoe。即使在2050年，仍有17 Mtoe的产能来自当今正在航行的现有船舶，而且这是基于传统燃油技术的。鉴于当前造船中的燃料选择偏好（图3-10），我们预计2040年和2050年未确定产能的大部分将被传统燃油和LNG双燃料船舶所占据。这将进一步将船队锁定在使用低温室气体柴油和甲烷以实现脱碳。

为实现替代性低碳燃料和燃料技术的成功，必须存在明确的财务或结构优势，以克服增加的投资成本和其他潜在的转换成本。车队技术将根据替代燃料类型是否能够以低于传统燃料的成本进行生产和分销而发展。通过基础设施建设、标准化、学习效应或补贴和奖励计划，投资成本和其他转换成本可以下降，采用率可以加速。在下一小节中，我们讨论激励车载燃料技术转换所需的燃料成本差异，并将随后将其与不同燃料类型的预期生产成本相结合。

将2030年潜在的全球低GHG燃料供应量（第4.2节）与该船队应用这些燃料的最大能力（图4-6）进行比较表明，低GHG甲烷的航运能力（52百万吨油当量）大于潜在供应量（19百万吨油当量）。

到2030年，采用特定燃料类型的能力将主要取决于现有船队和订单簿的技术，因为距离在那之前下新船订单并交付的时间已经不多了。

另一方面，该船队的氨和甲醇消耗能力（分别为0.2百万吨油当量和4.3百万吨油当量）低于其潜在供应量（分别为84百万吨油当量和24百万吨油当量）。然而，这些供应量估计假设所有已宣布的生产项目都能按计划实现并投产，尽管其中一些可能会延迟或取消，可能没有与航运公司签订稳固的收购协议，并且最终可能会供应给与其他部门争夺相同燃料和原料的领域。

除了通过新建船舶来增加运力之外，对现有船舶进行改造也是一种选择。然而，改造的成本更高，并且很大程度上取决于船舶是否已为改造做好了准备（即所谓的“准备就绪”的设计）。船东可能倾向于通过订购准备就绪的设计来降低风险，并在未来根据替代性低温室气体燃料类型的可用性和成本，再决定改造是否经济可行。

4. 3. 3 愿意为低碳燃料付费

船东或承租人愿意为特定类型和温室气体强度（GFI）的低温室气体燃料支付的价格反映了该燃料产品在市 场上的价值。金融、技术和监管因素将影响航运业的支付意愿（WTP）。被要求减少温室气体的船舶，根据监管机制的不同，将拥有多种合规选择，其中之一是使用低温室气体燃料。FuelEU和IMO NZF（已批准但尚未采纳）都引入了定价机制：继续使用化石燃料且超过温室气体强度限值的船舶必须支付罚款（依据FuelEU）或购买纠正单元（依据IMO NZF）。若使用化石燃料油，IMO NZF下的价格为380美元/吨CO2当量，FuelEU下的价格约为740美元/吨CO2当量。这些机制有效地为低温室气体燃料的支付意愿（WTP）以及随之而来的需求设定了上限。

1. 按照NZF标准，仅使用足够的低温室气体柴油以满足基准目标，并购买Tier 1减排单位以符合规定。
2. 最大限度地使用低温室气体氨和必要的试验燃料油，并将由于未达到直接合规目标而产生的盈余单位（SUs）（假设其价格为380美元/吨CO2当量）出售。

对于这些计算，低温室气体柴油和氨均假设其全球变暖潜能值（GFI）为15 gCO2eq/MJ。我们为氨燃料船舶（选项2）增加了一项资本成本。

由于燃料价格将按每吨燃料或能源单位给出，而不是按每吨二氧化碳当量减排量给出，因此该示例使用每吨油当量的美元燃料价格。价格差异和GFI（可能指某种指标或系数，原文未提供具体全称，根据上下文推测）与NZF（可能指某种框架或计划，原文未提供具体全称）中的减排成本和RU（可能指某种价格或比率，原文未提供具体全称）价格直接相关——请参见关于单位的单独方框（第44页）。

我们计算出低碳柴油的支付意愿（WTP）为每吨1,780美元，比LSHF0价格高1,280美元/吨。由于额外的资本成本，低碳氨的WTP比低碳柴油低340美元/吨。这些燃料价格表明船东愿意为低碳燃料支付的最高价格。

运行时，船舶会选择可用的最低价燃料。然而，从长远来看，价格差异将是一个关键因素。

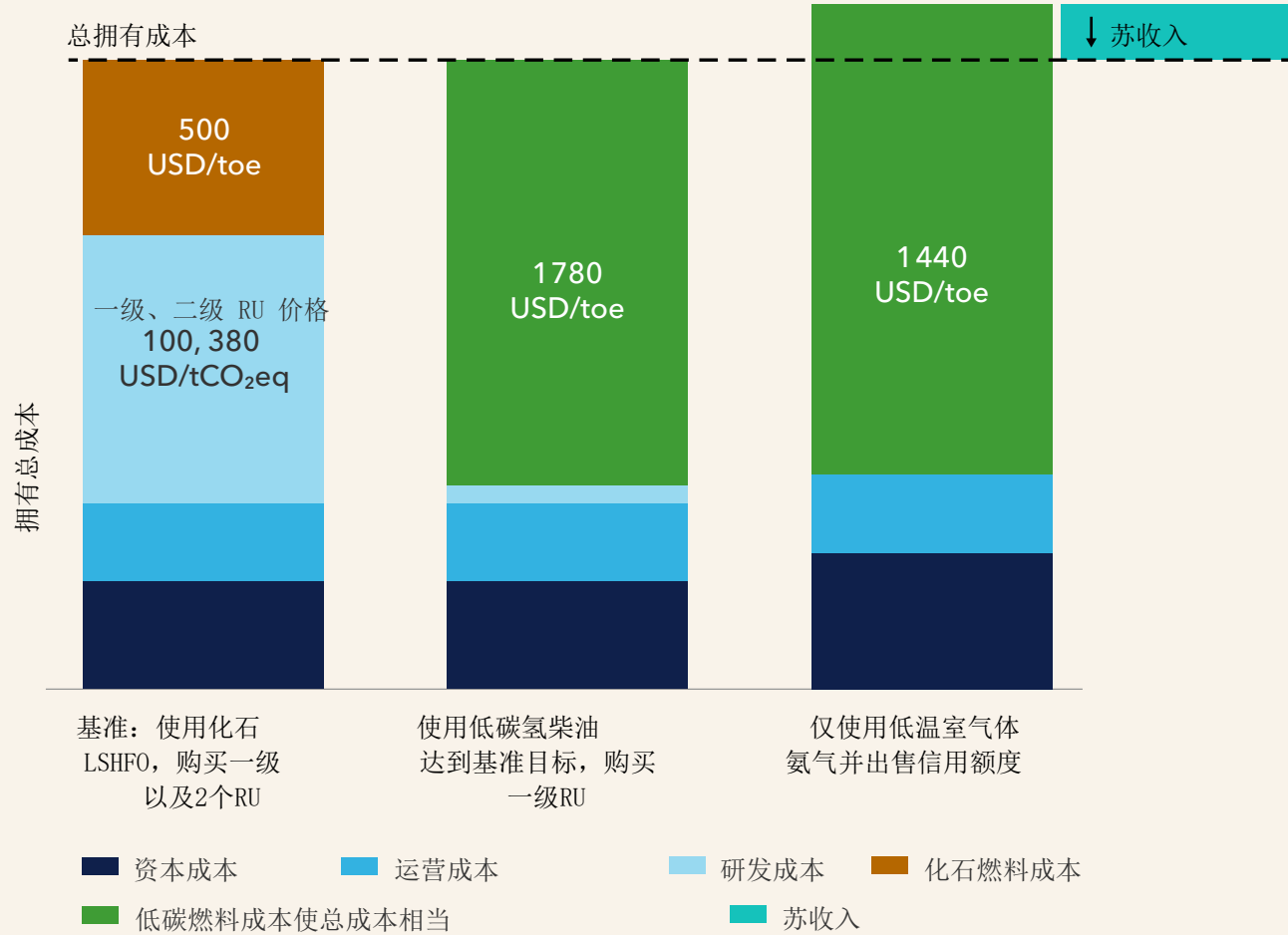
投资替代燃料技术的决定因素。燃料价格之间的相对差异决定了该燃料在长期内的竞争力。如果其价格相对于其他燃料类型足够低廉，船东可能会考虑使用该燃料技术建造新船。最初，价格差异还需要覆盖低供应量所带来的额外风险以及缺乏 bunkering 基础设施的风险。

对于低GFI的燃料，船舶达到相同的年度GFI要求所需的燃料会较少。这意味着与GFI较高的燃料相比，此类燃料将享有价格溢价。该溢价将取决于船舶合规的替代成本，即罚款/纠正单元的成本，以及从其他船舶汇集或购买多余单元（SU）。较高的替代成本意味着低GFI燃料的价值和溢价会更高。

图4-7

图示显示，在最初商定的IMO NZF框架下，低温室气体燃料的低价格导致不同合规策略的总拥有成本相同。这些燃料价格表明，船东愿意为低温室气体燃料支付的最高价格。

关键：低硫重油（LSHF0）；修复单元（RU）；备用单元（SU）



©DNV 2026

关键：低硫重油（LSHF0）；修复单元（RU）；备用单元（SU）

4.4 来自其他部门的低碳燃料需求

其他终端用能部门的需求在塑造低碳燃料的供应可用性和价格方面发挥着关键作用，因为这些部门与海运部门竞争有限的燃料和原料数量。本节首先概述了各行业的主要脱碳替代方案。然后，我们量化了相关非海运部门未来对低碳燃料的需求。该分析主要基于能源转型展望全球模型以及能源供应和使用预测，以及所有部门的技术发展（DNV，2025g；2023b；2026a；2026b），并辅以其他展望研究（例如，IEA，2025a；IRENA，2024）。最后，我们讨论了各行业对低碳燃料的支付意愿。

4.4.1 跨部门脱碳选择与低温温室气体燃料需求

在所有终端使用领域，直接电气化通常是经济上最可行的脱碳途径，因为与其他脱碳替代方案相比，电力通常能更高效地使用。在直接电气化难以实施的地方，低温温室气体燃料则变得更为重要；例如，由于能源密度需求、高温热需求、长期资产寿命或对现有液态和气态基础设施的依赖。这意味着

因此，对低碳燃料的竞争将主要来自难以电气化的航空、道路交通、制造业、电力生产以及建筑领域。关键问题在于，在应用其他更经济可行的减排选项（例如电气化、能效提升、碳捕获与封存）后，哪些行业在2050年之前仍将需要低碳燃料或其原料。由于资产寿命周期长，可能会将行业锁定在特定解决方案上一段时间，这意味着随着资产和基础设施逐步更新，最具可行性的脱碳路径可能会随时间变化。下方，我们简要概述了各行业在2050年前低碳化的主要潜在路径，重点关注低碳燃料。

航空业是低温温室气体液体燃料不可或缺性的最明确案例。飞机需要能量密度高、与现有发动机和机场基础设施兼容的煤油型燃料，这使得可持续航空燃料（SAF）成为主要途径，其中生物燃料-SAF率先发展，而合成电燃料-SAF未来可能变得更为重要。由于电池重量的限制，电动化仅限于短途飞行，而氢气被视为一种长期选择，可能使部分中短途应用成为可能。

道路运输，涵盖从乘用车和摩托车到公共汽车和重型卡车的一切，预计将主要通过对碳进行脱碳。



电动化，特别是在轻型汽车领域，但由于电池技术的发展，重型汽车领域也日益普及。由于现有柴油和汽油车队替代需要时间，生物燃料如生物乙醇和生物柴油在短期到中期内可以发挥适度作用。续航里程限制意味着生物能源和基于氢的燃料在长途运输中可能但作用甚微。生物甲烷也能支持已使用天然气运行的重型卡车脱碳化，而甲醇已被用作道路运输燃料。

制造业涵盖众多行业，从轻型制造到钢铁、水泥和化工等高耗能子行业，这些行业都难以脱碳。对低碳燃料的需求集中在需要高温热能的子行业，在那里可以应用氢气和甲烷。钢铁制造将在未来几十年中成为纯氢的主要用户。氢及其衍生物，包括甲醇和氨，也可以作为化工和化肥行业的原料，而目前这些行业占据了这些分子的大部分需求。

除用于饮料外，乙醇还可以作为工业和化学原料，尽管目前这类应用仅占总需求的一小部分。

发电越来越多地基于风能和太阳能等可再生能源，同时也在利用废物、生物质和生物燃料。生物能源对于按需发电仍能保持重要地位，并且当与碳捕获技术结合时，可以实现负排放。生物甲烷可以掺入天然气基础设施，并在现有燃气电厂中使用。氢气和氨气也可能做出贡献。

用于峰值负荷和系统平衡，但其整体作用预计将保持次要地位。其他燃料类型，如柴油和甲醇，可用于发电应急或在电网限制区域供电。

建筑物，包括住宅和商业地产，依赖于供暖、制冷、热水和烹饪服务的组合。这一需求领域已经消耗了大量的电力和生物质能，但天然气是供暖的主要能源载体。提高能效和电气化是主要的脱碳选择，

在电气化仍然具有挑战性的地区使用低碳燃料，例如生物甲烷混合物。氢被认为在建筑中作用微乎其微。

图4-8总结了低温温室气体燃料在非海运部门直接使用的相关性，并说明了当前各部门燃料使用的相对程度，以提供规模感。所示终端用途是说明性的，而非详尽的，反映了当前和潜在未来的应用。某些燃料也可能用于图中未包含的部门。所指示的终端用途是

并非详尽无遗；仅展示了主要直接应用，而未包含其他用途（例如发电用的氨或炊事炉用的甲醇）。结果表明，与航运相关的低温温室气体燃料也可用于许多其他领域，这将导致燃料供应方面的竞争。例如，柴油在公路运输中仍然相关，特别是对于现有车队。甲烷可用于制造业、发电和建筑。氨是化肥生产（制造业的一部分）的主要原料。

图4-8

低碳燃料在非海运领域的直接应用相关性。所示终端用途并非详尽无遗。它们反映了当前及潜在的未来应用，且某些燃料也可能用于图中未包含的领域。

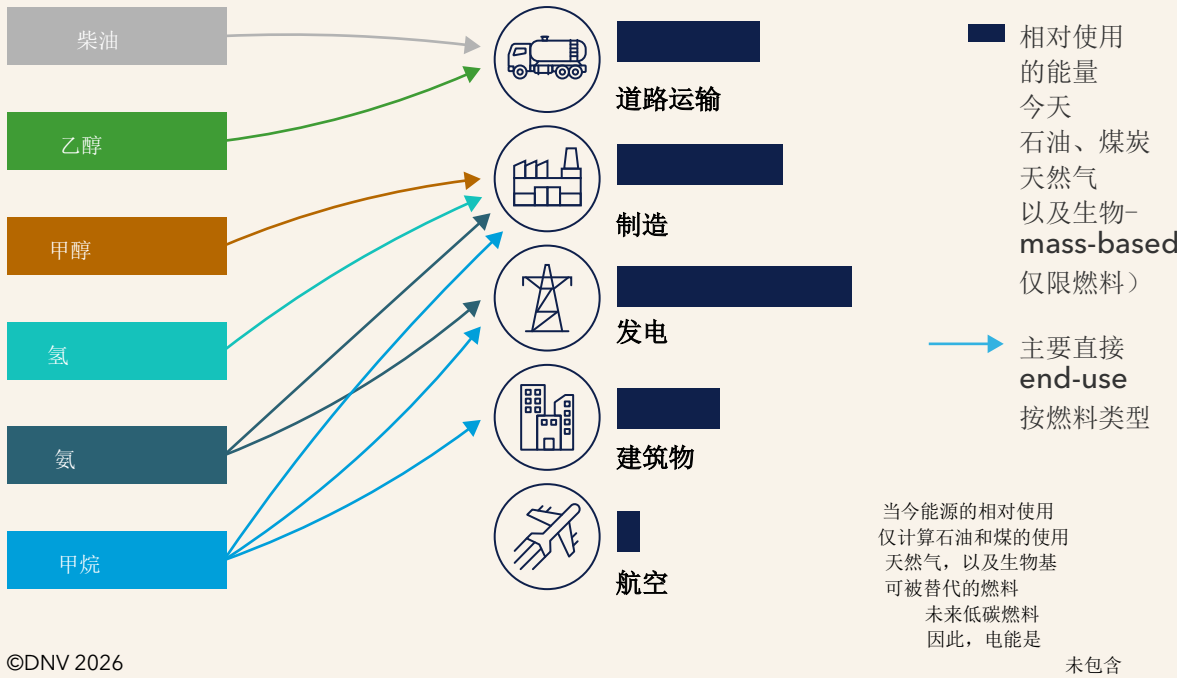
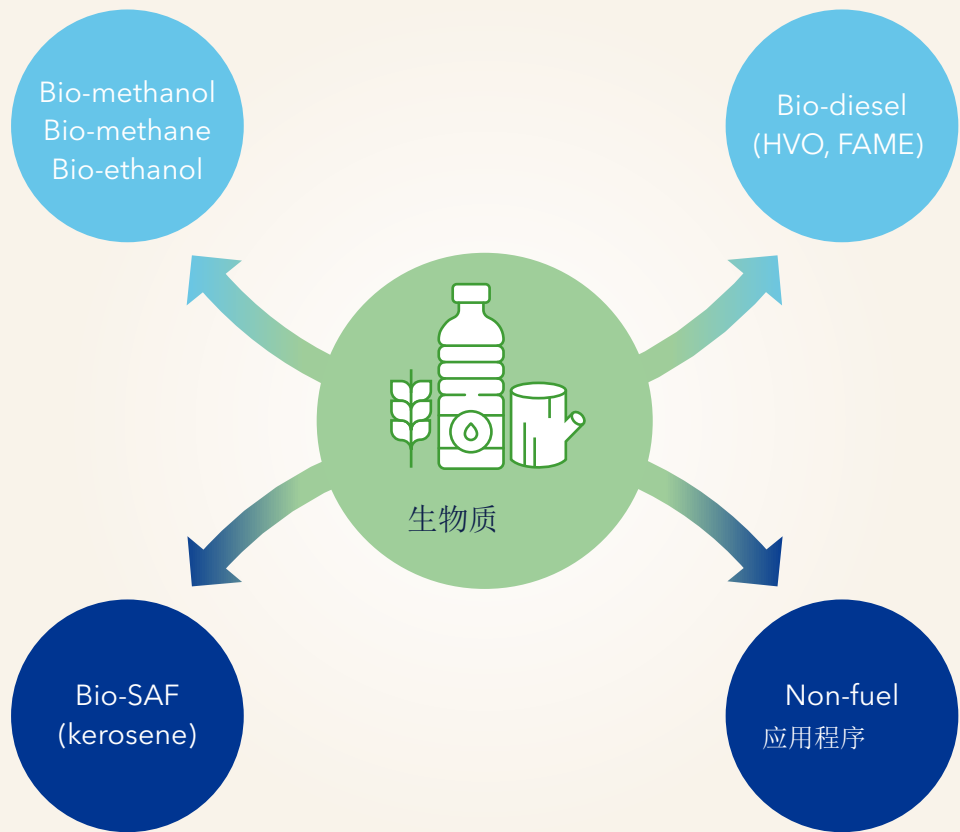


图4-9

对生物质原料的竞争。航运业在广泛使用生物燃料方面具有巨大潜力，包括生物柴油、生物甲醇、生物乙醇和生物甲烷（浅蓝色）。除了对这些燃料本身的直接竞争外，也存在对于生产它们的原料的竞争（深蓝色）。



除了对低碳燃料的直接竞争外，对生产这些燃料所需原料也存在激烈竞争。这一点对于生物质原料尤其相关，因为与到2030年的电燃料和蓝燃料路径相比，生物质原料通常能以更低的减排成本转化为低碳燃料（见图4-4）。相关原料包括生物废弃物、农作物残渣、木质生物质、粪便、玉米、甘蔗和废油。正如关于低碳燃料原料和生产路径的框内所述（第43页），这些生物质资源为生物甲烷、生物甲醇、生物柴油（包括FAME和HVO）和生物乙醇等生物燃料提供主要能源输入，而所有这些燃料都与航运相关。

这些原料也适用于多种其他用途（见图4-9），包括生物-SAF的生产。虽然航空和航运并非就相同的燃料分子直接竞争，但它们利用了许多相同的生物质。

资源，在某些情况下，甚至是相同的生产能力，可以在生物-SAF 和生物柴油等产出之间转移。此外，这些原料还面临着除燃料生产之外的其他应用带来的广泛竞争性需求。生物质原料用于食品和饲料、化学品和生物塑料、润滑剂和涂料、热能和发电，以及纸张和纸浆等众多应用领域。

生物柴油的原料供应尤其重要，因为它是最多船舶的近期主要解决方案，并且由于技术锁定效应（参见第4. 3. 2节），在短期到中期内可能仍将保持这一地位。与此同时，生物 Sustainable Aviation Fuel（生物航油）也依赖于许多与生物柴油相同的原料，包括废油和脂肪、残留物、木质生物质和其他废弃物。

4. 4. 2 展望2050年的需求场景

为量化到2050年相关非海运部门未来低碳燃料需求，我们应用了基于DNV能源转型研究的两种情景。首先，我们使用了主要的《能源转型展望2025》（ETO 2025）（DNV，2025g），称之为“最可能”情景。该情景基于各地区各行业的观测到的和预期的监管趋势、技术部署率和市场行为，预计到2050年全球温室气体排放量将比现在减少约43%。其次，为提供一个高需求预测，我们使用了《净零路径》

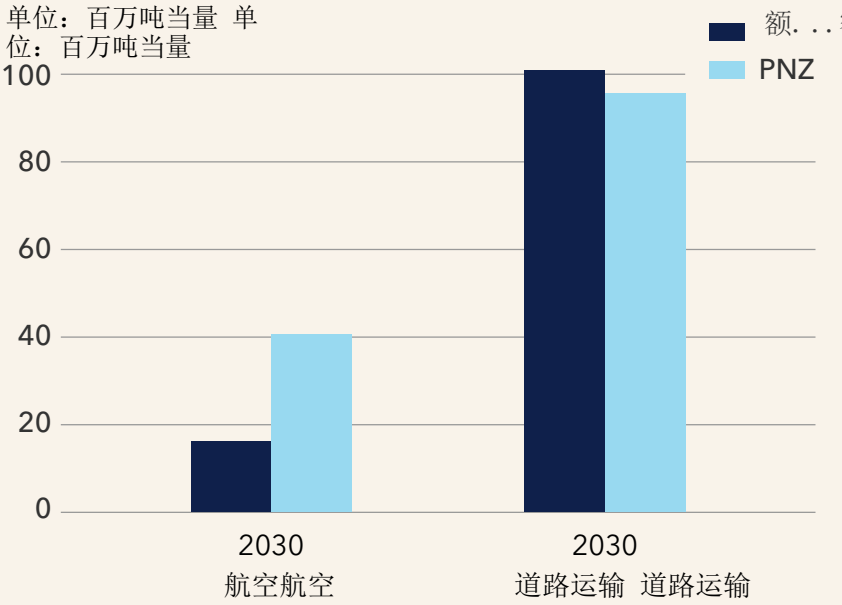
零排放（PNZ）情景（DNV，2023b），这是一个逆向推演的练习，旨在探索到2050年实现全球净零排放所需具备的条件。在此情景下，政策、强制规定和碳价被假设以足够的规模和速度推出，以减少与1. 5℃路径一致的温室气体排放量。与主要的ETO情景相比，PNZ意味着更早、更强地淘汰化石燃料，更高的有效碳成本，以及更快速地（在所有部门）推广电气化、低温室气体燃料和配套基础设施。

如今，大多数低碳燃料消耗于交通领域，尽管某些燃料类型，特别是生物甲烷，也被用于发电等其他领域。为简化比较，图4-10仅展示了航空和公路运输领域的2030年低碳燃料需求。在ETO情景下，这两个领域的总需求在2030年达到近120百吨油当量，其中公路运输占较大份额。航空领域的绝对需求量较小但增长迅速，到2030年将达到16百吨油当量。在PNZ情景下，航空与公路运输的总需求...

运输需求将增长至2030年的近140兆吨油当量。值得注意的是，由于电气化程度提高，道路部门的需求数量低于ETO情景，而航空部门的需求数量则显著更高。

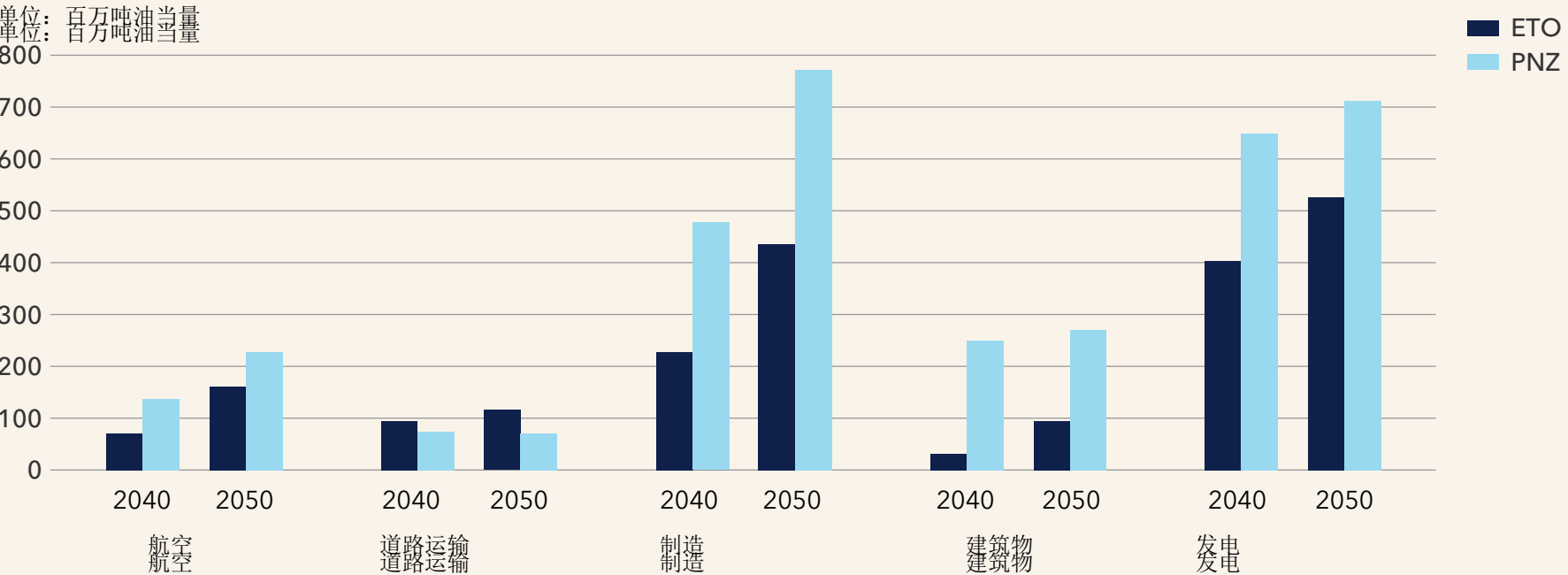
航空和公路的120 – 140 Mtoe需求范围大致对应了2030年潜在的低温室气体燃料供应量的一半（小节4. 2. 1）。然而，若排除甲醇和氨（合计108 Mtoe），航空和公路将占剩余供应量的约80%。

FIGURE 4-10
来自DNV能源转型展望（ETO）和净零路径（PNZ）情景下，航空和公路运输在2030年的低温室气体燃料需求预测



©DNV 2026
来源：DNV（2023b，2025g）来源：DNV（2023b，2025g）

FIGURE 4-11
到2040年和2050年，来自DNV能源转型展望（ETO）和净零路径（PNZ）情景下其他部门的低温室气体燃料需求预测



©DNV 2026
来源：DNV（2023b，2025g）来源：DNV（2023b，2025g）

从另一个角度来看，低温室气体乙醇和柴油的供应总量（134百吨油当量）刚好足以满足其需求。

对于2040年和2050年的长期需求，我们关注所有相关非海运部门的低温室气体燃料需求，如图4-11所示。

在ET0情景下，非海运部门的总低GHG燃料需求在2040年约为830百万吨油当量（Mtoe），到2050年增至1,300 Mtoe，其中制造业和发电厂的需求量最大。航空和公路运输的需求合计在2040年约为160 Mtoe，在2050年达到280 Mtoe，其中航空需求占比因公路运输电气化程度提高而持续增长。

在PNZ情景下，所有非海运部门的能源需求增长更为显著，到2040年约为1600百万吨油当量（Mtoe），到2050年约为2100百万吨油当量（Mtoe）。其中，航空需求到2050年将接近230百万吨油当量（Mtoe），而公路运输需求则保持稳定，约为70百万吨油当量（Mtoe）。

在解读这些结果时，应牢记若干局限性和不确定性。我们的分析未包含可再生电力或未加工的传统生物质能的直接使用。传统生物质通常在低收入地区用于烹饪和取暖，不被视为燃料生产的原料。我们还应用了一些假设，以界定我们所称的现代生物能源，包括交通和制造业的生物燃料、与天然气混合的生物甲烷等。

建筑和制造业使用的天然气，以及用于发电的生物能源。

PNZ情景是在2023年开发的，正如2025年ET0中所指出的，它已不再完全可实现。因此，此处呈现的需求范围应被视为最可能发展轨迹和净零发展轨迹下要求的指示，而非精确预测。

4. 4. 3 跨行业的支付意愿

上一节所述的需求主要受法规和政策驱动，例如强制性规定、燃料标准及碳价，但也受商业驱动因素影响，如自愿减排和碳市场。每个驱动因素都提供不同的激励措施，并影响低温室气体燃料的支付意愿（WTP）。WTP会因驱动因素以及如4. 4. 1小节所述的低成本脱碳替代方案的可用性而在不同部门、地区和国家之间有所差异。如果低温室气体燃料的价格高于WTP，需求将会减少。

当需要使用低碳燃料以满足强制性规定、维持市场准入或作为促进能源安全政策的一部分时，相关行业将表现出更高的支付意愿（WTP）。而在电气化、能效提升或其他减排方案能够以更低成本实现类似减排效果，或法规提供替代合规途径的地方，则能看到较低的支付意愿（WTP）。

以罚款形式的选项。融合型强制措施，例如欧盟可再生能源指令所实施的，要求使用低温室气体燃料，但未考虑最终用户的支付意愿。然而，当供应仍然有限且价格仍然高昂时，此类政策可能难以长期维持。排放交易系统为某个行业或地区设定排放上限，市场价格决定排放价格，进而决定低温室气体燃料的支付意愿。如今，已有38个排放交易系统

全球范围内均有效，且尚有更多处于开发或考虑阶段，涵盖不同领域（ICAP，2025）。

在ET0情景下，非海运部门的总低GHG燃料需求量到2040年约为830百万吨油当量（Mtoe），到2050年将增加到1,300百万吨油当量（Mtoe）。

航空业在所考虑的部门中，可能拥有最高的支付意愿（WTP），因为它缺乏低温室气体液体燃料的近期替代品，并且受到日益明确的规定约束；特别是欧盟的RefuelEU Aviation计划。

监管以及在一定程度上全球计划 CORSIA（国际航空碳抵消与减排计划）。道路运输的总体WTP较低，因为电气化越来越多地为该领域提供可信的替代方案，包括中重型运输，因为电动选项的发展速度远快于其他低GHG选项。制造业则更为复杂，其中一些难以减排的工业子部门，特别是钢铁行业，可能对低GHG燃料表现出较高的WTP。

发电和建筑通常对低碳燃料的支付意愿较低，因为其他脱碳选择往往更便宜。在发电领域，可再生能源通常比生物能源、氢气或氨更具竞争力。

尽管氨气或许可用于远距离输送能量，以供后续发电使用。

4.5 海洋低碳燃料市场与定价发展

结合我们对供需的分析，在此探讨海洋低碳燃料市场可能如何发展以及价格可能随时间如何演变。如果存在足够的监管需求驱动因素，海洋低碳燃料市场通常预计将经历三个阶段，其普及率将呈现S形曲线（Nordic Roadmap，2024）。我们目前处于第一阶段，即缓慢的初步普及阶段，需要开展工作以克服当前阻碍低碳燃料快速普及的障碍。

随后，随着对低碳燃料的需求足够强劲，以及船舶技术、燃料生产和分销基础设施的成熟，将迎来一个更快的增长时期。随着时间的推移，预计随着市场接近饱和，这种增长将放缓。在下文中，我们将讨论分为两个阶段：一个迈向2030年的新兴市场，以及一个迈向2050年的扩展市场。

到2030年的新兴市场

到2030年，低温温室气体燃料市场可能在航运和其他领域保持分散。在早期规模化扩张期间，供应将有限且分布不均，并进一步受到当地基础设施和物流的限制。船用燃料技术将继续将船舶锁定在特定的燃料类型上，尽管双燃料能力的船舶可以使用燃油。获取燃料的途径等等。

甲醇和氨气的应用可能取决于生产商与早期采用者之间的长期销售协议。早期部署可能会集中在航线和货流可预测的航运贸易中——通常见于集装箱和车辆班轮贸易以及某些油轮和散货贸易——在这些领域，燃料供应可以在港口和船队之间进行协调。绿色航运走廊和类似倡议可以通过降低协调风险来加速早期规模化扩张。

直到最近，航运业对低碳燃料的需求和支付意愿主要由自愿碳信用市场以及满足货主的脱碳目标所驱动。欧盟ETS和FuelEU Maritime的近期推出将推动需求预计达到2030年的4千万吨油当量。若采用全球框架，并且最初批准的IMO NZF得到采纳，则可能进一步推动这一需求，总计可能达到22千万吨油当量。

需要建立监管框架和嵌入定价机制，以扩大低温温室气体燃料市场，发出强烈的供需和价格信号，从而界定船东的支付意愿和燃料生产商的投资激励。根据当前的监管设计，船东对船用低温温室气体燃料的支付意愿将由监管定价机制界定，其中最显著的是FuelEU的约740美元/吨CO₂当量罚款以及最初批准的IMO NZF下的Tier 2 RU价格380美元/吨CO₂当量。



应采纳此项规定。这些价格是航运中低温室气体燃料价格的最高限价。

由于市场碎片化且需求有限，与当今燃油市场不同，海上低碳燃料将不会形成全球现货市场价格。大部分价格将通过长期购销协议进行谈判，但可能会有针对生物柴油和液化生物甲烷的本地及区域现货市场，因为大量船舶可以使用这些燃料。我们的供应分析表明，在短期至2030年期间，某些途径（例如来自粪便的生物甲烷、甘蔗乙醇、废油生物柴油）可能实现减排。

约180至300美元/吨二氧化碳当量（tCO₂eq）的成本，尽管可持续性标准可能限制基于传统食品和饲料作物的生物燃料。蓝色燃料处于一个中间成本区间，早期项目约为490美元/吨二氧化碳当量。短期内，电燃料是最昂贵的类别，约为680美元/吨二氧化碳当量或更高。这些成本水平，加上监管处罚机制引入的价格上限，表明了未来市场价格的可能范围。

向2050年拓展市场

2030年以后，船舶低碳燃料市场可能进入快速增长阶段，并可能在2050年左右达到饱和。相关燃料类型

可能存在足够的需求，以支持建立液态现货市场并实现全球普遍供应，尽管某些特定燃料类型的供应可能有限。哪些燃料类型保持相关性，哪些则保持特定化，取决于许多因素，包括（但不限于）原料供应、生产成本、分销基础设施、船用燃料技术发展以及其他需求领域的竞争。

许多生物燃料生产路径在2050年可以将燃料成本控制在每吨二氧化碳当量500美元以下。然而，成本最低的生物燃料路径的规模化潜力是有限的，我们的分析表明，到本世纪中叶，全球生物燃料的最大生产潜力为1.3亿吨油当量。在符合实现净零排放目标的脱碳情景下，到2050年，包括航运在内的所有行业对低碳燃料的需求将超过2.2亿吨油当量。一个实现约43%温室气体减排目标的情景至少需要1.3亿吨油当量。这表明生物燃料的需求可能会超过供应，从而对生物燃料价格形成上涨压力。

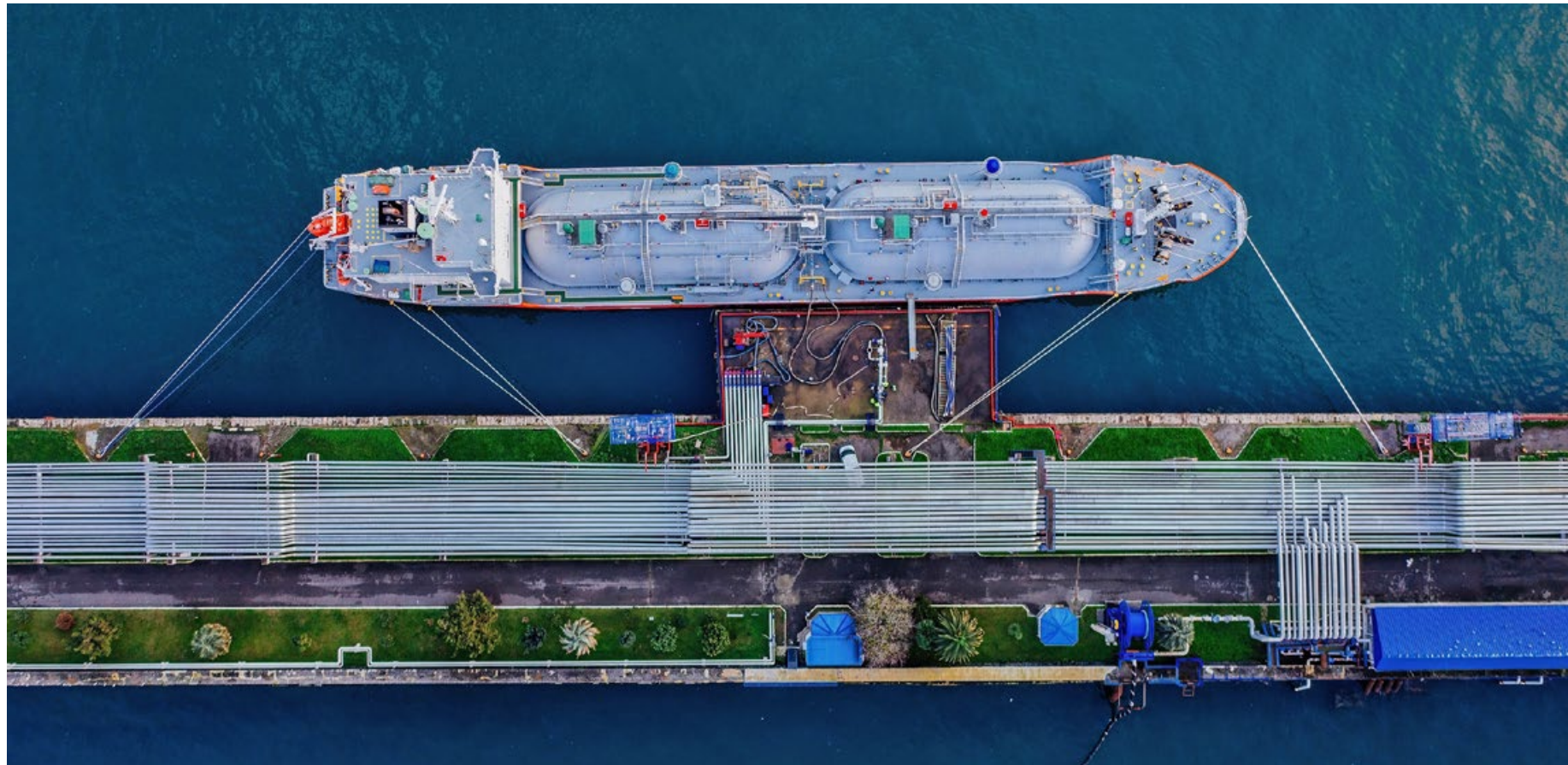
由于对海洋低碳燃料的需求仅占总量的一小部分（到2050年为3300万至18500万托尼油当量），航运业很可能能够确保其所需的生物燃料。然而，其他行业也愿意支付相当高的费用。虽然航空业需要煤油型燃料，但该行业将与其他行业争夺与生物柴油相同的原料。道路运输可以在更大程度上直接使用生物柴油，但电动化的潜力意味着其支付意愿可能较低。低碳甲烷的价格将被塑造

根据对化石液化天然气（LNG）已广泛使用的领域（如发电、制造和建筑）的需求。

随着航运及其他领域的需求增加，因此必须部署非生物燃料路径，将边际减排成本和低碳燃料价格推升至蓝色燃料和电燃料的成本水平。到2050年，蓝色燃料仍处于大约420美元/吨二氧化碳当量的中间水平（以蓝色氨为例）。规模化和学习效应可能导致电燃料成本大幅下降，缩小其与蓝色燃料和生物燃料之间的差距。例如，在我们的分析中，电氨的减排成本从2040年左右的550美元/吨二氧化碳当量下降到2050年的380美元/吨二氧化碳当量。

实现电燃料的预期减排成本取决于可再生电力资源的可用性和成本，以及大规模部署，而大规模部署又反过来取决于各行业强有力的持续需求信号。在航运领域，这取决于国际海事组织（IMO）法规的雄心与可信度，包括任何补救单元（RU）的定价信号。在其他领域，不同的监管设计和政治动态将塑造需求。因此，对脱碳化的持续政治承诺是低温室气体燃料需求及其价格的前提条件。

即使在成熟的市场中，我们也不期望针对不同燃料类型的低碳燃料会出现单一的全球价格。相反，价格更有可能保持差异化，并且至少在部分上实现脱钩。



即使在成熟的市场中，我们也不期望针对不同燃料类型的低碳燃料会形成一个统一的全球价格。它们很可能会保持差异化，并与区域及本地市场至少部分脱钩。

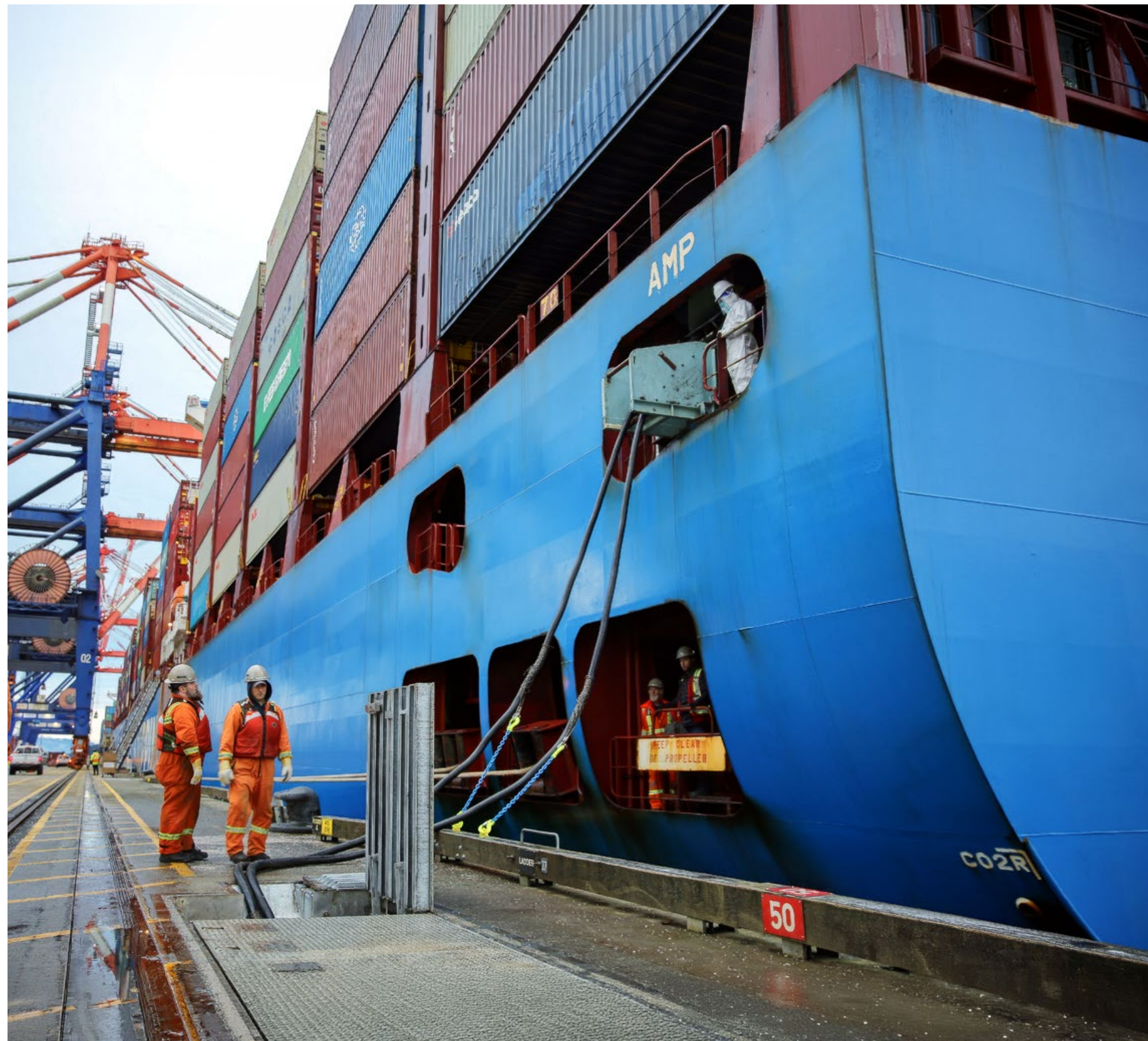
生产所需的物料均就地采购，即便存在价格差异，某些燃料类型在地区间运输也并不可行。

此外，对于大多数最终用户而言，它们并非可互换的选择。这适用于大多数行业，包括航运业。我们已经证明，技术锁定限制了船舶使用氨或氢等燃料的近期潜力，但这种限制随着更多具备替代燃料能力的船舶能够被订购和建造而得到缓解。

最后，到2050年的燃料市场也将受到那些可能对航运业对低碳燃料的需求产生重大影响的技术的普及所塑造。例如，岸电、混合动力插电和全电动船舶、核能以及船上碳捕获系统。此外，我们发现船东对不同燃料类型的最高支付意愿有所不同，这反映了船上燃料技术所需投资成本的不同。这些差异可以通过合规性集合和超额单位交易来部分缓解，这为减排成本设定了市场价格。

与区域及地方市场相关。以低温室气体甲烷与柴油的关系为例。这些燃料通过不同的生产路径制造，具有不同的转换效率、温室气体强度、能源投入以及基础设施和储存要求，导致其生产与分销成本存在显著差异。这种价格动态反映了液化天然气与原油历史上的关系，其中价格随时间推移时而关联时而脱钩，这是对原料供应、生产、基础设施和区域市场状况等基本因素的响应（Hupka等人，2023）。预计价格也将不同区域有所差异，因为原料和

总之，本章提出的分析仅代表理解未来燃料市场的起点。随着时间的推移，该分析可以进一步完善，新的数据将能够支持更复杂、更定量的分析。在下一页，我们总结了航运业低碳燃料使用和定价的概念框架。



航运业低碳燃料使用与定价的概念框架

原则上，海洋低碳燃料的接受程度和定价可以基于以下因素理解：代表供给曲线的产量和减排成本，以及代表需求曲线的航运及其他领域的需求和支付意愿。下面，我们在简化的框架下，从概念上概述了如何进行这种分析。尽管本研究缺乏应用此方法所需的全套数据，但它提供了一个有用的框架，用以理解跨部门竞争如何塑造未来海洋低碳燃料市场。

需要进一步考虑，因为它将不会被使用。在示意图中，燃料1中最便宜和次便宜的变体，以及燃料3和燃料2中最便宜的变体，都低于运输的WTP（可接受价格）。

对于通过第一项测试的燃料，下一步是评估它们是否也适用于其他领域，如果是，这些领域是否愿意支付超过航运的费用。这取决于两个



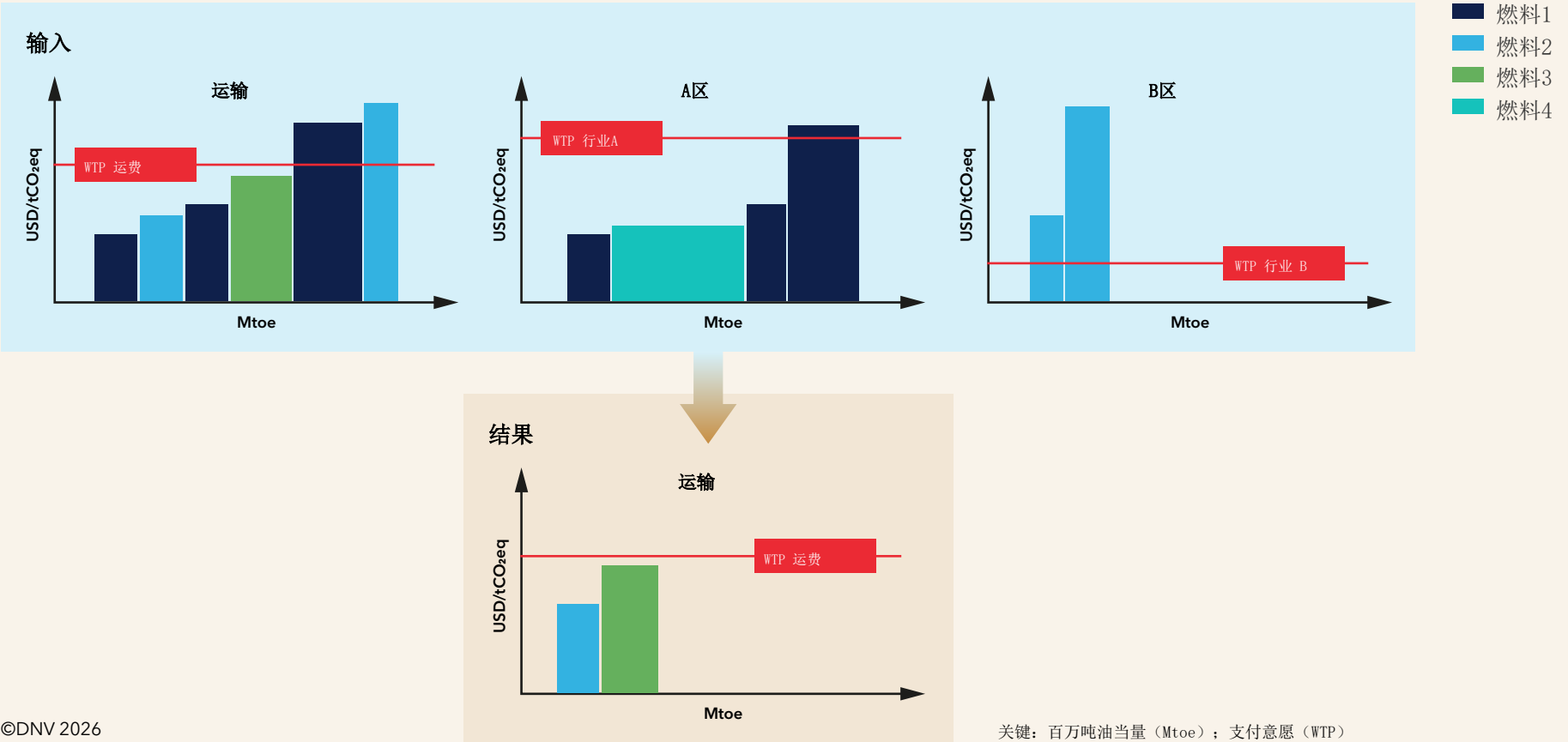
因素：燃料在另一部门是否具有物理适用性，以及该部门的支付意愿（WTP）。在图示中，燃料1适用于A部门，且A部门的支付意愿高于没有其他替代选择的航运。因此，A部门将凭借该燃料胜过航运，因为价格将上涨以与A部门的支付意愿趋同。燃料2不适用于A部门，但与B部门相关。然而，B部门的支付意愿低于航运，或存在其他成本更低的选项，因此将不会凭借该燃料胜过航运。燃料3除航运外没有竞争性需求。

图4-12

航运业低碳燃料使用与定价的概念框架

作为输入，该方法需要相关低温温室气体燃料的边际减排成本曲线，不仅针对航运业，也包括预计将争夺相同燃料的其他部门（参见图4-4中提供的海运低温温室气体燃料示例）。在示意图中，航运业和两个竞争部门（A和B）被一同列出，包括四种燃料（1、2、3和4），每种燃料通过不同的生产路径生产，因此其减排成本各不相同。

从运费成本最低的燃料开始（图表中最左侧的燃料），第一步是评估航运是否愿意为其付费。这需要衡量航运的付费意愿（WTP），例如IMO新西兰燃料标准Tier 2整改单元价格380美元/吨CO2当量。如果某燃料的减排成本高于航运的WTP，则可将其排除。



结果是，燃料1因价格过高而被排除，不会用于航运。相比之下，最便宜的燃料2变体将被用于航运，燃料3也将被使用。燃料4不适用于航运。虽然燃料2和3的成本在航运中会低于其可接受价格（WTP），但实际市场价格可能会根据航运中的总需求和其它脱碳化选择更接近航运的可接受价格。

最后，每个部门的需求受到部门规模、脱碳雄心水平以及减少温室气体排放和能源使用的其他选择可用性的限制，这些因素共同对总燃料摄取量设定了上限。然而，在图示中，假设这些需求限制足够高，以至于它们不会影响结果。



5 | 平稳过渡

亮点

运用更新的温室气体转型风险管理框架，我们对原油运输船在向2050年过渡的缓慢和快速转型情景下进行案例研究，结果显示：

基于场景的框架能够管理转型风险，通过识别可最小化车队层面成本与风险的动力与技术策略。

成本与风险评估结果可以整合为总体战略评分，用于决策。

船舶技术与燃料策略在缓慢过渡和快速过渡情景下的表现有所不同。

围绕未来温室气体（GHG）法规的不确定性、不断变化的技术格局以及 marine fuel 市场等因素，驱动着不确定性转化为实质性风险，进而影响企业的竞争力、收入、成本、融资及日常运营。我们的温室气体转型风险管理框架旨在通过平衡短期和长期（至 2050 年）的转型风险与成本，为船东识别出稳健的燃料和技术船队战略。我们通过一个案例研究来说明该框架的价值，重点阐述了如何联合评估成本与风险，以支持更稳健的战略决策。

5.1 一套管理转型风险的更新框架

航运脱碳化可能给船东带来重大的转型风险：

— **租赁风险：**船舶在租赁市场上的竞争力对于获取稳定的租赁收入至关重要。根据租赁合同类型，船东必须确保其船舶在燃油和合规成本以及运营灵活性方面对承租人具有吸引力，同时也要最大限度地降低停租的可能性。

— **燃料成本与合规风险：**所有者和运营商必须管理温室气体合规成本，要么通过使用更昂贵的低碳燃料，要么通过支付可能很高的罚款，这会影响燃料成本和温室气体合规成本。

— **财务风险：**投资新型燃料技术或节能设备时，资本成本（包括融资成本）通常会上升。

获得有竞争力的融资对于维持成本效益车队至关重要。

— **运营风险：**引入新技术，包括数字化和数据驱动系统，需要配备称职的船员和岸基组织，并实施有效的维护实践。技术转型可能导致因新且不够成熟的技术解决方案带来的挑战而增加技术闲置。它也可能增加维修保养需求，并影响保险费率，从而影响整体运营成本。

这些风险通常因新法规（例如温室气体排放法规、岸电强制要求）、承租方的要求或其他因素而产生和演变。此外，船东为保持合规而选择的燃料和技术，可能同时降低风险并引入新的风险。这些风险也受到船东竞争对手、客户以及服务、燃料和技术供应商所选择解决方案的影响。重要的是要认识到，这些风险适用于传统技术



在技术和燃料方面，以及向较不成熟的替代方案转变方面，但方式不同，程度也不同。行为研究表明，决策者可能比继续使用现有方案所面临的那些风险（通常被称为“现状偏见”）更重视新选项的风险。除了本框架涵盖的风险外，显然还存在着与气候变化和跨部门脱碳相关的其他重要风险。其中最重要的一项是与贸易模式和数量变化相关的风险，特别是对于石油和煤炭等商品。我们在此将其省略，因为它们仅受燃料和技术选择的影响很小。

除增加成本和带来新风险外，转型也将创造机遇。例如，率先行动的船东可以通过销售绿色服务和利用共享经济来降低成本，从而增强其竞争优势并吸引关注气候的客户。

我们管理温室气体转型风险的框架旨在通过平衡短期和长期（至2050年）的转型风险与成本，为船东识别稳健的船队战略。使用该框架需要跨学科的专业知识，结合对船东具体情况和优先事项的理解，以及对海洋燃料市场的洞察（第4章），等等。

如相关技术（第三章）和塑造风险监管发展（第二章）。此处提出的温室气体风险管理框架借鉴了之前的DNV工作（例如DNV，2021年）并汲取了金融气候稳健性框架（如TCFD 56）的灵感。更新后的框架主要新特征在于它能够捕捉难以用货币量化的风险，并提供一种结合成本量化共同评估此类风险的方法。它包含三个步骤（图5-1）：

（例如，面向2050年）用以理解和应对不确定性。它应捕捉影响净收益能力的最相关外部因素，这些因素也受战略选择的影响。这些因素包括燃料供应和价格、燃油加注基础设施、温室气体法规以及竞争对手行为。由于这些因素的发展相互依存，因此所描述的发展情况必须内部一致。应定义一系列情景，涵盖一系列潜在的未来情况。

评估。它还涵盖了更广泛的风险范围，包括那些难以量化的风险。

框架的使用非常灵活。它可以应用于广泛的舰队战略，也可以应用于非常有限的一组；可以评估一套全面的未来方案，也可以仅评估少数几个。用于对性能进行压力测试的工具和方法可以是

定量与定性——详尽或宏观。结果可定期更新，以反映法规、技术和燃料市场的最新发展。一系列可能的KPI可用作稳健性的衡量标准。在实践中，可采用迭代方法，逐步探索、完善和细化分析。

1. 为船队制定一套潜在的燃料和技术策略

在此语境中，“战略”是指从燃料能力和性能角度对船队主要特征的宏观描述。它可以包括针对新造船和现有船舶实施节能措施和/或替代燃料能力（包括“随时可用”选项）。此外，它还可以包含船队更新换代的要素，包括船舶出售、回收、采购、运营区域以及租船合同类型（即现货交易或定期租船）。该战略可能反映公司特定的脱碳目标（例如，到2030年将船队碳强度降低30%）。应制定一系列战略，以确保涵盖最相关的潜在燃料和技术。

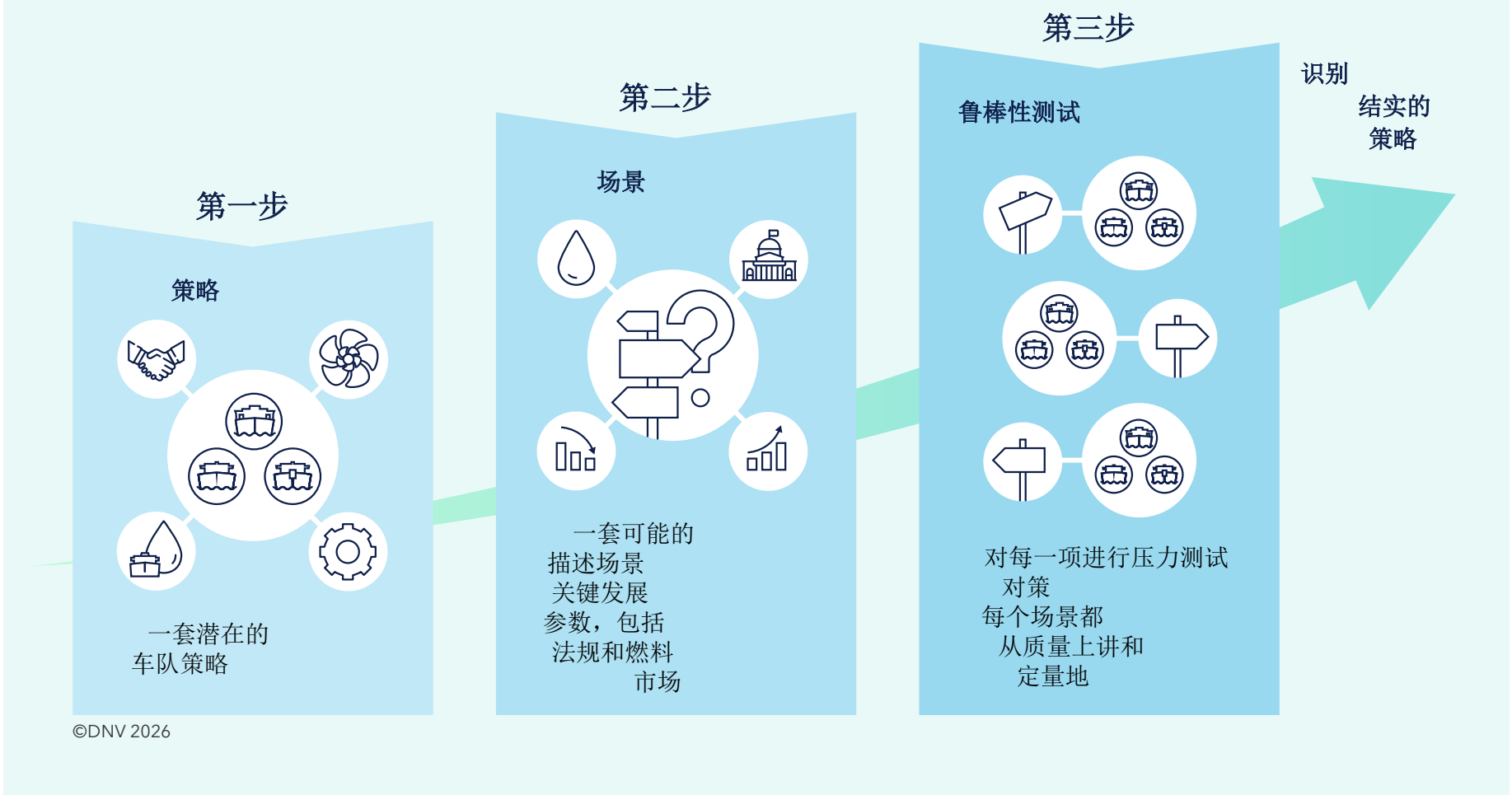
2. 定义一组可能场景，描述关键参数（包括法规和燃料市场）的发展。

在此语境中，“场景”是指对一种可能未来情况的结构化描述（例如）。

3. 针对每种策略，针对每种情景进行稳健性检验，并考虑上述定义的风险因素。在此上下文中，稳健性检验是对每种策略在不同情景及其时间线下的表现进行的评估，揭示在单一预测方法中可能无法显现的脆弱性和风险。它由两部分组成：成本评估和风险评估。成本评估显示了在所有投入（燃料供应、技术可靠性、监管清晰度和稳定的市场条件）都保持不变的情况下，每种策略的经济表现。可以使用关键绩效指标（KPI），例如盈亏平衡日租金，反映船东为盈利并获得净正收益而必须每天每艘船拥有的租船收入。风险评估可以按照风险识别（HAZID）57 的结构进行，系统地识别和定性评估在每个情景中影响每种策略的潜在风险。它确定了现实世界的不确定性可能导致成本模型结果出现偏差的地方。

图 5-1

DNV针对船队管理温室气体转型风险与成本的分步方法



5.2 举例说明：用于更新的VLCC船队

为说明我们框架的实际应用，我们提供一个示例。我们选择了一位运营着五艘超大型油轮（VLCC）的船东。

超大型油轮贸易的特点是长途运输大量原油，通常将主要出口地区（尤其是中东和大西洋盆地）与亚洲及其他地区的大型进口中心连接起来（见图5-2）。它是一个动态的

一个市场，其中运费率会随着吨英里需求的变动、运力可用性、重新定位以及关键瓶颈或装货区域出现的干扰而急剧波动。

在以下小节中，针对一位拥有超大型油轮（VLCC）[58]且具有长期拥有雄心的完全整合型所有者，对图5-1中提出的三步框架进行了实例说明。该船队由五艘船组成；其中两艘是2010年建造的较旧船只，一艘是中龄船只，建于

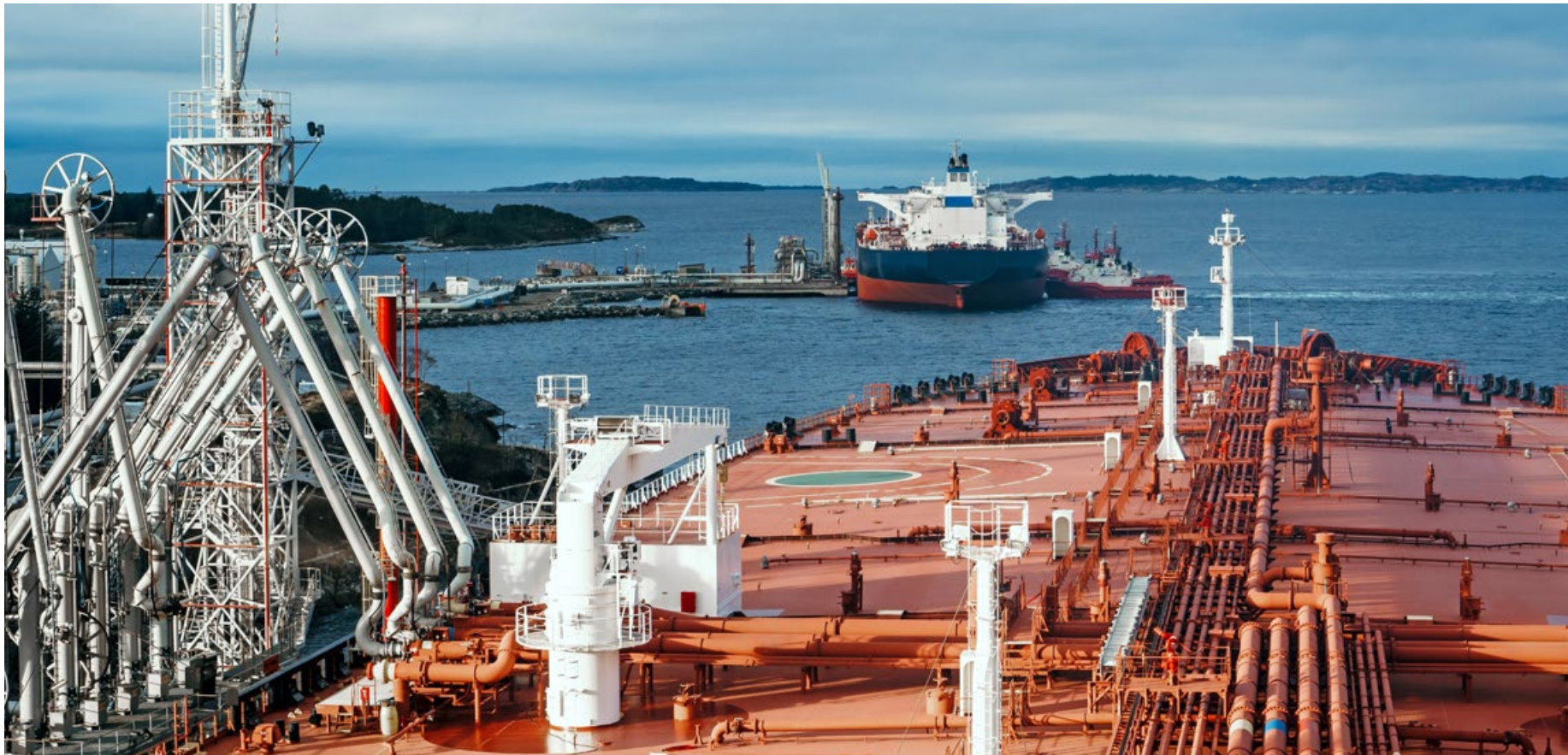
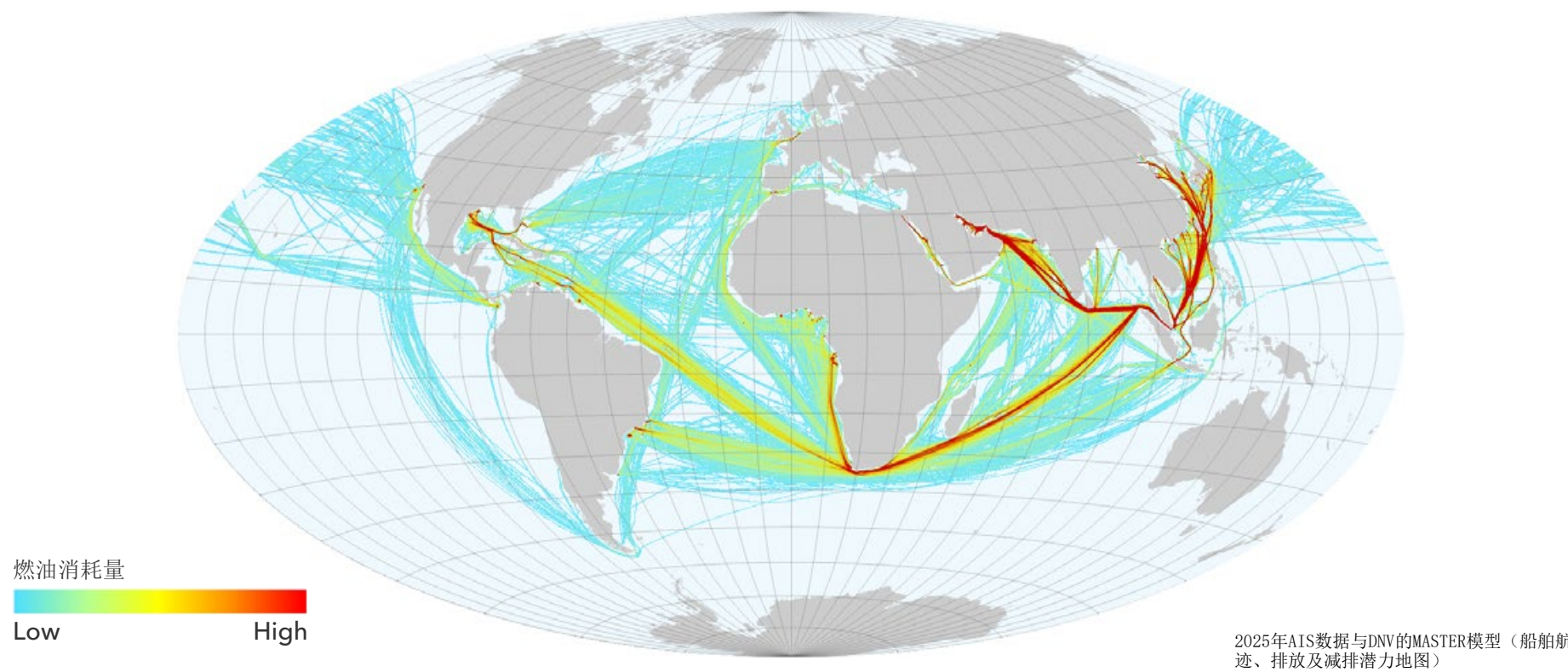
2015年建造，以及2020年交付的两艘现代化船舶。现有船队中的所有船舶均为传统船舶，配备了开式洗涤器，但没有岸电连接设备。

所呈现的案例研究是简化的，仅用于说明目的。因此，我们强调，为了支持现实世界的决策，该研究应涵盖更广泛的潜在车队策略，甚至更重要的是，更广泛的潜在情景。

更新后的框架的主要新功能在于，它能够捕捉那些难以用货币单位衡量的风险，并提供了一种共同评估此类风险的方法，同时进行成本量化。

图 5-2

2025年度VLCC运营热力图，基于AIS数据





5.2.1 Step 1: Strategies

船主可以采取多种燃料和技术策略来维持船队的净盈利能力。重要的是，可以为现有船队和新造船分别制定不同的策略。在此，我们考虑了众多潜在策略中的两种，其中包括一系列广泛的解决方案。

对于两者，我们均假设这五艘船在现货市场进行国际贸易，并受到一定的欧盟/欧洲经济区限制。

59 曝光。船队运力通过一项结构化的更新计划保持不变，该计划规定每艘超大型油轮在使用20年后进行更换，从2030年开始，从最老的船只着手，并持续进行，直至船舶达到使用寿命终点。

策略A： HSHFO + 清洁器

在“HSFO（高硫重油）+洗涤器”策略中，所有新造船均配备采用传统燃油技术的开式循环排烟洗涤器（见图5-3）。

对于现有船队，已实施行业标准的节能措施。这包括定期进行船体和螺旋桨的清洁，以控制

生物污损，以及根据天气预报、风向和波高确定最有效航线和速度的气象航线规划。在每次五年干坞检修期间，船体进行局部喷砂，并涂装新的标准船体涂料。不进行任何需要船上实际安装的改造。

新造船按照船坞的标准规范建造，融入了当时适用的行业标准的节能措施，并满足最新的国际海事组织能源效率设计指数（EEDI）法规。这包括旨在优化船体流体特性的推进改进装置，以及其他

当时被视为标准的措施。所有船舶均采用常规燃油技术订购，包括废气洗涤器，能够使用HSHFO，并且它们没有配备岸电连接设备。

策略B： 双燃料LNG船舶的逐步推广 在“双燃料LNG船舶逐步推广”策略中，所有新订单船舶均包含双燃料LNG技术（见图5-4）。

对于现有船队，最新船只（VLCC 3、VLCC 4 和 VLCC 5）将在 2026 年的干坞期间安装前置和后旋节能装置，以提升

图 5-3

策略A概述： HSHFO + 清洁器

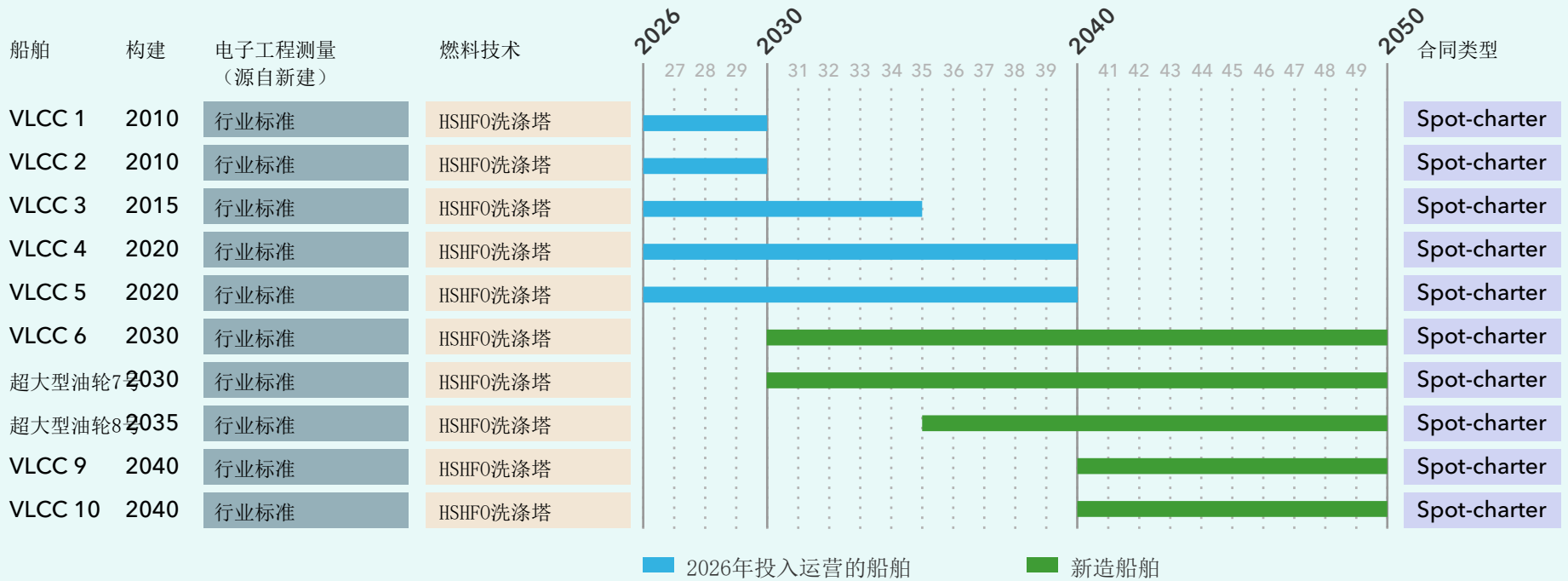
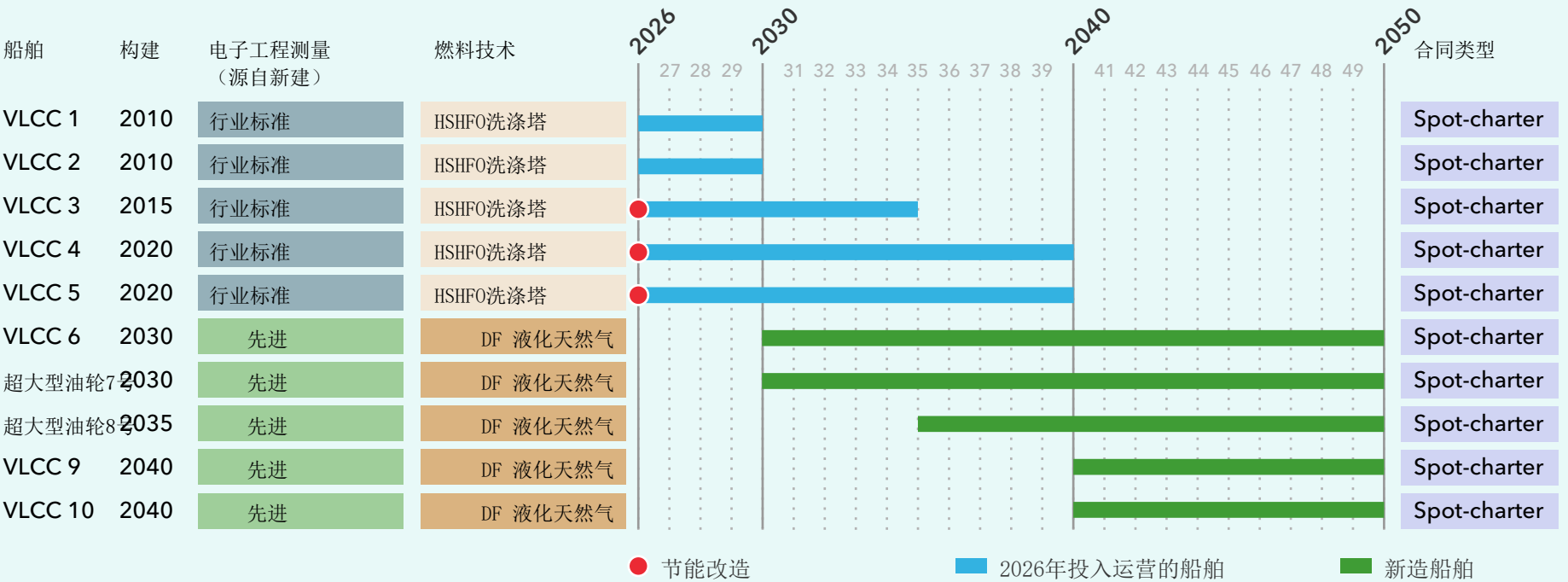


图 5-4

策略B概述： 双燃料LNG船舶的逐步推广



鲁棒性策略场景检查

5.2.2 Step 2: Scenarios

船体流场性能。同时，将在海水泵和机舱风扇上安装变频驱动器（VFDs）以降低电力负荷和燃油消耗。所有船舶还将进行全船体喷砂处理，并应用低摩擦硅基涂层。

新造船舶均采用先进的节能措施，其能效标准超越了当时行业平均水平。其中包括安装轴带发电机等。所有新造船舶均配备LNG双燃料技术，可使用传统燃油、LNG、生物柴油以及液化生物天然气和液化天然气，同时也配备了岸电连接设备。

我们定义了在众多潜在情景中两个，着眼于2050年左右的时间段。它们被选出是因为它们对我们策略有显著不同影响，从而说明了该框架。它们不被认为比其他情景更有可能。也可以考虑其他情景。这里选出的两个情景定义如下：

场景1：缓慢过渡

全球应对气候变化的行动大幅放缓，且2025年在国际海事组织（IMO）观察到的延误进一步演变为长期的监管停滞。尽管如此，区域和国家层面的法规仍在推进，FuelEU Maritime和欧盟ETS仍是航运领域的主要监管驱动力。

因此，全球海洋低碳燃料市场的发展仍然迟缓。燃料供应和相关基础设施主要集中在大型的燃油中转枢纽以及受温室气体法规约束的地区。生物燃料仍然是航运业最具经济竞争力的低碳燃料选择，其价格由于航运及其他行业的需求增长有限，大体上与当前水平持平。

在全球对温室气体排放的关注有限的背景下，VLCC的承租方对其船只的环保价值并不十分看重。

链条和金融机构对降低投资组合碳强度关注甚少。配备洗涤器的超大型油轮等传统燃油技术仍然是行业标准。

场景2：快速过渡

全球气候监管大幅收紧。国际海事组织（IMO）的延误是暂时的，其净零框架从2029年起重回正轨。净零框架进一步加强，其中二级减排单位（RU）价格将从2033年起从380美元/吨二氧化碳当量（tCO2eq）上涨至500美元/吨二氧化碳当量，并在2040年上涨至700美元/吨二氧化碳当量。

随着监管趋严，燃料市场发展迅速。生物燃料在航运业的需求急剧增长，在其他行业也持续增长，给价格带来上涨压力，并限制了其在航运方面的可用性。从2040年起，电子燃料将成为低温室气体甲烷和低温室气体柴油的主要定价者。

随着全球对温室气体排放的关注日益加剧，VLCC承租人越来越重视绿色价值链，而金融机构则寻求降低其投资组合的碳强度。这推动着订船行为逐渐转向具备液化天然气和甲醇运输能力的船舶，使其能够在传统燃油、低温室气体排放燃油以及低碳柴油之外，使用这些燃料的化石燃料和低温室气体排放变体进行运营。





5.2.3 Step 3: Robustness check

稳健性检验包含两部分：成本评估和风险评估。下面，我们先介绍成本评估的关键结果，然后是风险评估。最后，我们为每种策略计算总得分。关于假设的更多信息，请参见附录B。

成本评估

我们使用盈亏平衡日费率来表示每种策略在每种情景下的成本绩效，将其所有相关成本反映为每日平均数，包括温室气体合规成本、燃料成本、运营费用和资本成本。在我们的案例研究中，我们假设所有船舶都在现货市场交易，并且船东承担所有相关成本（包括燃料和温室气体合规成本）。结果表明，不同船舶的盈亏平衡日费率差异显著。

图 5-5 展示了在缓慢转型（左）和快速转型（右）两种情况下，每种策略的成本绩效。到 2026 年，两种策略的盈亏平衡点率均约为每天 52,000 美元。在缓慢转型中，成本适度上升，到 2049 年达到约每天 61,000 美元（HSHFO + 洁净器）和约每天 67,000 美元（LNG）——均处于正常市场波动范围内。在快速转型中，成本急剧增加，达到约每天 167,000 美元（HSHFO + 洁净器）和约每天 144,000 美元（LNG）。

远超典型波动性。总体而言，在缓慢转型中，HSHFO + 洁净器成本更低，而LNG在快速转型中表现更优，且随着时间的推移，差异将逐渐扩大。

驱动这些差异的关键因素因具体情况而异。在“缓慢过渡”情景下，“双燃料LNG船舶的逐步推广”策略面临的资本成本显著高于“重油+洗涤器”策略，主要是因为双燃料LNG新船比传统配备洗涤器的船舶更昂贵。虽然双燃料LNG船舶在前往欧盟的航线上确实能获得一些合规性优势，但这些好处相对有限。

并且不足以抵消较高的资本成本。此外，安装了脱硫器的船舶可以使用HSHFO，据信其成本低于LNG。虽然液化生物甲烷与生物柴油相比是一种更便宜的燃料，但在缓慢转型情景下其使用有限，因此它不会显著影响总体成本或弥补更高的费用。在快速转型情景下，情况发生了巨大变化。安装了脱硫器的VLCC无法完全从使用HSHFO中获益，因为船队开始使用低GHG柴油以满足监管目标。“HSHFO + 脱硫器”策略在2049年之前面临极其高昂的燃料价格，导致支付罚款而非

采用低温温室气体柴油（按假定价格计算）。与此同时，“双燃料LNG船舶逐步推广”战略受益于更低的燃料消耗（更高的能源效率）以及使用低温温室气体甲烷，其价格远低于低温温室气体柴油。

风险评估

风险评估突出了现实世界的不确定性可能导致结果与成本评估中预测结果相背离的领域。它还纳入了更广泛的风险范围，包括那些难以量化的风险。

为进行风险评估，我们采用结构化的HAZID方法，识别每个策略所涉及的事件和风险。风险根据可能性和后果，在1到3的量表上被评定。必须强调的是，所提供的示例并不全面；许多事件尚未评估。我们关注那些在不同策略下，其可能性与/或后果有所变化的事件。为展示风险评估过程，我们从每个风险类别（见第60页）中选取了一些说明性事件——包括特许权风险、燃料成本、合规风险、财务风险和运营风险。

各项事件的评估风险因策略和情景而异，如表5-1所示。例如，在快速转型情景下，对于策略A：HSHFO+洗涤器，无法使用低GHG柴油被识别为高风险事件，而在缓慢转型情景下，其影响被认为可能性较低。

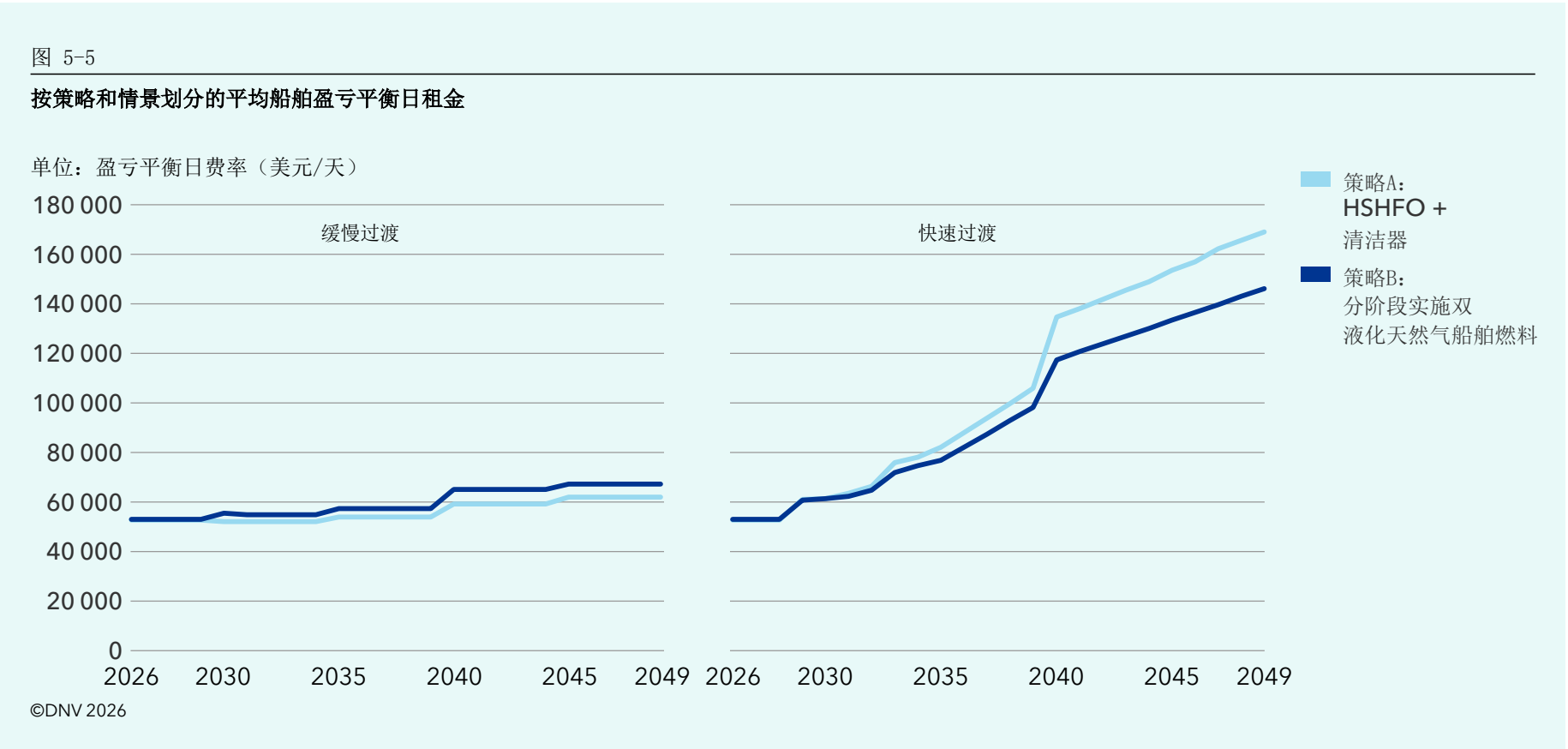


表 5-1

HAZID结果。所选事件为例，还有许多其他事件可以被识别和评估。

类别	事件	原因	影响	场景	策略A： HSHFO + 清洁器			策略B： 双燃料LNG船舶的逐步推广		
					概率	后果	Risk	概率	后果	Risk
燃料成本与合规风险	无法储存足够的 低温室气体柴油（生物柴油/电动柴油）	缺乏可用性或价格过高 加注油港口	更高的温室气体合规成本	缓慢过渡	1	1	Low	1	1	Low
				快速过渡	2	3	High	2	2	中等
	无法储存足够的 低碳温室气体甲烷（生物甲烷/电甲烷）	缺乏可用性或价格过高 加注油港口	更高的温室气体合规成本	缓慢过渡				1	1	Low
				快速过渡				2	2	中等
	无法连接到岸上电源 规定的；强制的；授权的	船上缺乏岸电设备	交易区域受限，可能较低 租船费	缓慢过渡	2	2	中等	1	2	Low
				快速过渡	2	2	中等	1	2	Low
	不利重量吨温室气体强度因子 分配给液化天然气	监管流程	降低温室气体强度效益 使用液化天然气	缓慢过渡				1	1	Low
				快速过渡				2	2	中等
	开环洗涤器在...使用受限/禁止 一些港口和领海	国家法规	更高的燃料成本，改用LSHF0或 需要MGO	缓慢过渡	2	2	中等	2	1	Low
				快速过渡	3	2	High	3	1	中等
操作风险	机上设备系统损坏	非标生物柴油加注 微生物在燃料中的生长	更短的组件寿命，技术停租 租赁收入降低	缓慢过渡	1	2	Low	1	2	Low
				快速过渡	2	2	中等	1	2	Low
	招募合格船员的挑战 双燃料船	合格船员短缺	更高的人工成本	缓慢过渡	1	2	Low	2	2	中等
				快速过渡	1	2	Low	2	2	中等
	缺乏可用备件	燃油系统部件故障	零件成本更高。技术设备租赁	缓慢过渡	1	2	Low	2	2	中等
				快速过渡	1	2	Low	2	2	中等
宪章 risk	船舶在租船市场上的竞争力不强。 市场	承租方ESG政策不包括 高排放船舶	较低的租船收入	缓慢过渡	1	2	Low	1	2	Low
				快速过渡	2	2	中等	1	2	Low
金融风险	无法为车队获得融资 新造船舶	金融机构的焦点在于减少 碳强度	更高的资本成本	缓慢过渡	1	1	Low	1	1	Low
				快速过渡	2	2	中等	1	2	Low
	船舶二手价值递减 在舰队中	与...相比， 船队缺乏竞争力。 竞争船队	更高的资本成本和二手价格低 销售价格	缓慢过渡	1	1	Low	2	1	Low
				快速过渡	2	2	中等	1	1	Low

以及风险较低。对于策略B：双燃料LNG船舶的逐步推广，由于其对低GHG柴油的依赖程度较低，因此该事件的风险较低。然而，对于此策略而言，无法使用低GHG甲烷作为燃料则代表着几乎同等高风险事件。对于策略A：高硫燃料油+洗涤器，已识别出对开式循环洗涤器使用的限制也是一个重大风险，因为它们可能会限制高硫燃料油的使用，并迫使转向更昂贵的低硫燃料替代品，从而增加成本。在快速转型情景中，此类限制的概率更高，尽管在两种情景中，其严重程度均被评估为同等高度。

存在多种方法来帮助降低上述已识别的关键风险事件的发生概率或后果。例如，在考虑无法加注低碳柴油的风险时，可以采取若干措施来缓释此风险：

— 合规池：通过加入一个合规池与其他运营商合作，可以共同管理燃料可用性和合规义务，从而降低个人因供应短缺而面临的风险。

— 在主要加注中心建立长期承购协议：在主要加油地点锁定低碳燃料的远期合同，可以提高供应的确定性，并有助于确保获得所需的数量。

— 将温室气体合规成本责任转移给承租人：构建协议结构，使合规成本的责任在于

承租人可以降低船东和运营商的财务风险。

— 主动采购多余合规单元：通过签订早期协议以获取额外合规单元，可以提供缓冲以应对未预见的短缺，并支持持续的合规。

评估总分

成本与风险评估输出可以通过多种方式整合为总体策略评分。一种实用的方法是，将每种策略在每种情景下的结果转换为标准化的1至5分，其中1代表优异表现（成本低）。

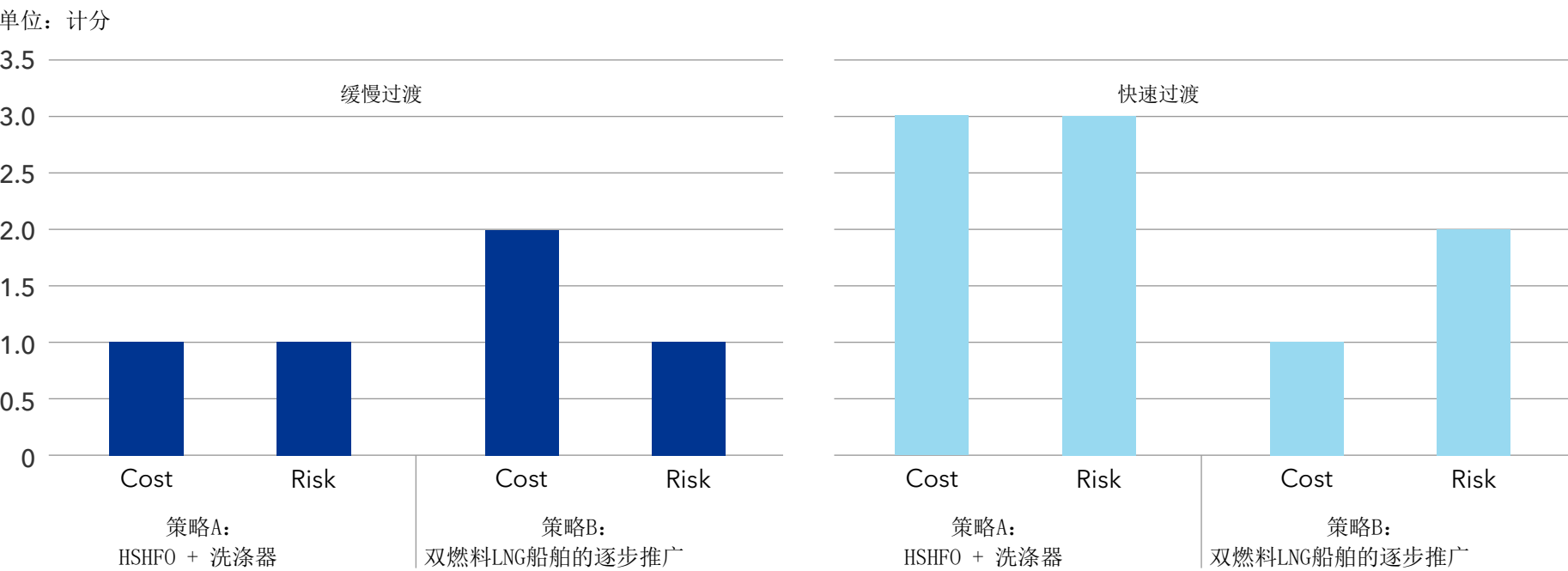
或更低风险）代表5分，表示表现较弱。例如，成本可以参照该场景下最低成本策略进行评分，而风险则根据已识别风险的综合可能性和影响进行评分。使用统一的1-5分制对两者进行评分，可以确保它们直接可比。

图5-6说明了在缓慢和快速过渡场景下，策略A与策略B采用该方法的效果。60 在缓慢过渡下，两种策略的风险评分相似（表明风险水平相当），但由于成本更高，策略B的成本评分更高。在快速过渡下，情况则相反：策略A的成本和风险评分均高于策略B，表明

在快速转换下，策略A在这两个维度上的表现相对较差。

可针对每种策略计算单一的成本和风险评分。情景可能性可作为权重因子，使该框架能反映对未来可能发展方式的不同看法（例如，如果判断快速转型比缓慢转型更可能发生，则总体评分会给予快速情景评分更多权重）。这支持了对策略进行结构化比较，并使成本效率与转型风险暴露之间的权衡关系变得明确。由此产生的总评分提供了衡量每种策略稳健性的相对指标。

图 5-6：缓慢过渡（左）和快速过渡（右）的评估成本和风险评分



©DNV 2026





附录A

低温温室气体燃料的航运市场

获取低碳燃料潜在供应与成本的方法

估计每种燃料路径的潜在供应量和减排成本的整体方法如图A-1所示。

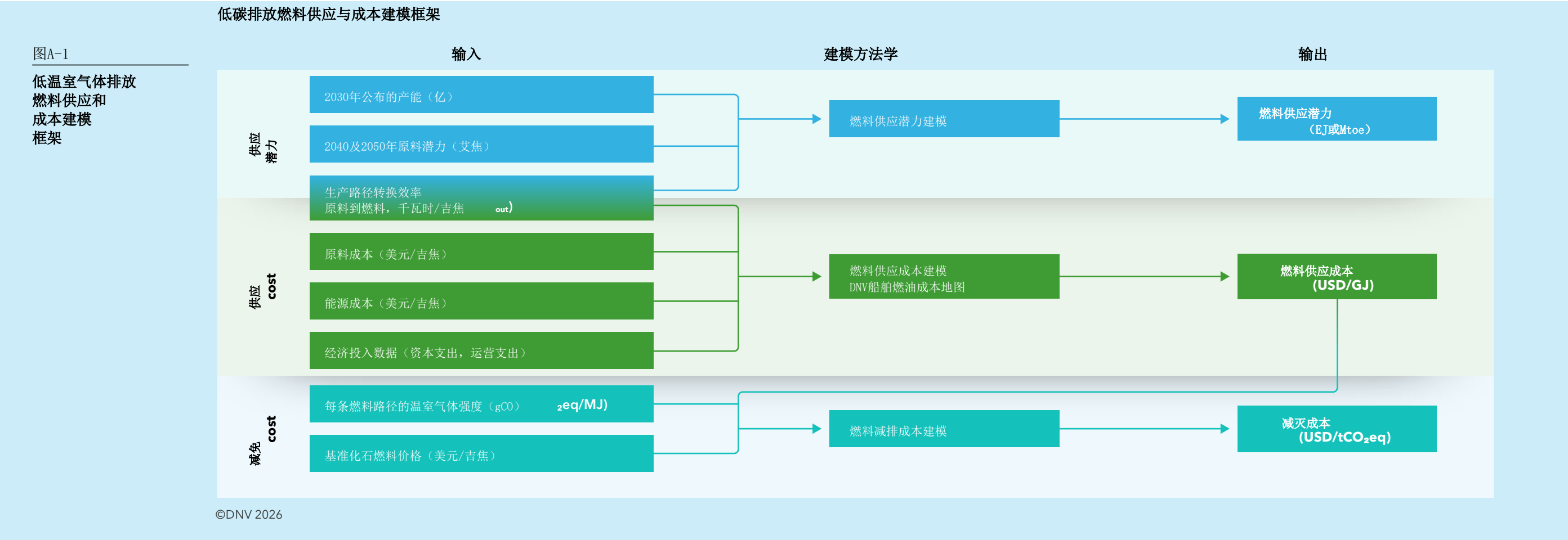
短期和长期展望采用不同方法估算燃料供应潜力。对于2030年，采用项目式方法对已宣布的...进行汇总。

并制定了生产产能计划。在此方法下，每种燃料路径的燃料供应潜力是根据从行业报告和数据库中汇编的信息，从已确定的生产项目推导出来的。⁶¹ 它考虑了关键的项目级信息，包括技术路径、项目状态、投产年份和计划产能。我们仅包含与交通部门相关的低温温室气体氢气生产项目。

由于缺乏关于在建生产装置的数据，我们使用预计产量来评估生物甲烷和生物柴油。

对于2040年和2050年，我们主要通过DNV（2023a）的数据来推算生物燃料的潜在供应量，采用低情景和高情景的平均值。这些估算基于适合的原料供应的物理限制——例如

图A-1



考虑经济边界条件和技术限制，处理农业废料和城市垃圾。

该潜力已通过（经合组织，2025年）预测的甘蔗、玉米和（清洁燃料，2023年）植物油等生物燃料生产，以及其他来源，以考虑所有相关的原料来源而得到补充。

含碳电燃料的转换效率（定义为单位燃料能量输出所对应的原料能量输入）和CO2输入需求（定义为单位燃料质量输出所对应的CO2输入）的假设，与DNV船舶燃料成本映射器（该映射器也用于燃料供应成本预测）中应用的假设一致。

DNV的船舶燃料成本映射器模型模拟了完整的生产和交付链条。该模型的一般方法论在《DNV海事展望至2050年》（2024版）（DNV，2024b）中有描述，并持续更新。在今年的分析中，模型输入已通过区分不同原料类别及其相应的成本假设，并基于多个来源（DNV，2025g；Fast Markets，2026a；Fastmarkets，2026b；IEA，2021；IMO，2026；MESD CoE，2022；MMMCZCS，2024；SPHERA，2024；世界银行集团，2026）进行了进一步细化。

根据由此产生的燃料供应成本，通过将供应成本输出与来自监管机构和行业来源（EBA，2024；EUC，2024；IFEU，2022；MMMCZCS，2022）的低温温室气体燃料GFI值相结合，进而推导出减排成本。减排成本公式参见第44页。该分析提供了一种结构化的供给侧评估，并非旨在预测实际市场结果。

温室气体路径模型输入假设

该模型基于2025年的AIS数据，包含了总吨位超过400的全球国际运营船舶队。该模型逐年模拟船队发展、燃油和技术采用情况，并根据法规、海运贸易增长、燃油排放因子以及燃油和技术价格等输入，选择净现值最低的方案。

2025年至2050年的海运贸易增长情况见表A-1。

该模拟的目的是评估各类燃料的吸收情况——而不是估算低碳燃料的总体需求量。因此，模型中包含的燃料和技术种类有所减少，同时还将能效措施和减速作为其他减排选项纳入考量。我们未将车载碳捕获和核动力等减排技术纳入模型。

我们使用来自DNV船舶燃料成本地图（DNV，2024b）的燃料价格。在2025年至2050年期间，假设的化石燃料价格范围约为300至590美元/吨油当量（USD/toe），而低碳燃料价格范围约为1,100至2,200美元/吨油当量。这些价格假设被用作推导总低碳燃料需求的起点，因此与第4.2节中提出的各燃料路径的详细供应成本不一致。假设的低碳燃料价格较高主要导致能源效率措施的采用增加，进而减少对低碳燃料的总需求。

低温温室气体燃料在2025年至2040年期间假定具有15 gCO2eq/MJ的端到端温室气体强度，然后从2041年至2050年线性下降至0 gCO2eq/MJ。这一假设是由于建模限制而做出的，目的是使船舶队能够在2050年达到《国际海事组织净零燃料框架》下的假定基准目标。接近2050年的燃料温室气体强度和监管要求具有高度不确定性。

其他所有假设，包括燃料技术和能效措施的成本，均如国际海事组织中期温室气体减排措施的综合影响评估（DNV，2024a）所述。

表A-1

基于DNV《2025年能源转型展望》的海上贸易增长（DNV，2025g）

海运段	2025—2030年增长 (吨英里)	2031 - 2040年增长 (吨英里)	2041 - 2050年增长 (吨英里)
原油轮	14%	-16%	-24%
油轮	2%	-17%	-12%
液化气运输船	28%	28%	-19%
散货船	3%	-4%	-1%
集装箱运输	13%	13%	9%
其他货船	12%	7%	3%

©DNV 2026

附录 B

超大型油轮船队案例假设

关键输入假设

以下我们概述了在第5章中用于说明性VLCC船队示例所应用的关键输入假设。所有成本建模均使用DNV的FuelPath模型进行。表B-1显示了用于“缓慢转型”和“快速转型”情景的假定低温温室气体燃料价格假设，而表B-2则表明了假定每种燃料类型的温室气体强度。

在B-3表中，我们根据不同情景，列出了适用的法规、欧盟碳配额（EUA）价格以及Tier 2 RU成本的主要假设。⁶²

我们根据克拉克森研究对VLCC新船价格的评估，对每艘船舶采用交付年份前两年的新船价格。我们假设基础新船成本为...

表B-1

基于DNV船舶燃料成本地图的低温温室气体燃料价格假设（按场景，美元/吉焦耳）

场景	Fuel	2026	2030	2040	2050
场景一：缓慢过渡	低温温室气体柴油	44	44	44	44
	低温温室气体甲烷	38	38	38	38
	LNG	11	11	11	11
	HSHFO	9	9	9	9
	LSHFO	12	12	12	12
场景二：快速过渡	低温温室气体柴油	44	44	79	71
	低温温室气体甲烷	38	38	60	56
	LNG	11	11	11	11
	HSHFO	9	9	9	9
	LSHFO	12	12	12	12

©DNV 2026

表B-2

各相关燃料类型的温室气体强度

海运片段	法规的温室气体强度（gCO ₂ e/兆焦耳）		2每兆焦耳的eq值
	欧盟碳排放交易体系（EUA）（TtW）	海运（WtW）	在我看来，新西兰国家党（WtW）
低温温室气体柴油	1	18	18
低温温室气体甲烷	4	19	19
LNG	59	77	78
HSHFO	78	92	93
LSHFO	78	92	95

©DNV 2026

表B-3

各情景下适用法规、欧盟航空单位排放交易体系（EUA）价格及 tier 2 碳排放配额（RU）成本的假设

场景	适用法规	欧盟航空安全局价格假设	二级 RU 成本假定：假设；臆断
缓慢过渡	FuelEU 海事 欧盟碳排放交易体系	89美元/固定 欧盟代表 截至四月份的价格 2026 ⁶²	不适用
快速过渡	FuelEU 海事 欧盟ETS，国际海事组织NZF (from 2029)	逐渐增加 从 89 美元/欧元起 2026年，229美元/ 2049年实现欧盟统一，与此 与DNV能源合作 过渡展望 study (DNV, 2025f)	2029-2032: 380 USD/RU 2033- 2039: 500 USD/ 自2040年起： 700美元/卢布

©DNV 2026

所有未来新建船舶均约为1.3亿美元（代表2026年第一季度当前价格）。双燃料LNGVLCC预计将额外增加2000万美元的资本支出。

每艘VLCC的年燃油消耗量根据其策略（及相关节能措施）和新船建造年份的不同，在12,300至17,900吨油当量之间变化。

实施于新建阶段或改造阶段的节能措施（“双燃料LNG船舶战略的逐步实施”）的资本成本，基于DNV的减排洞察数据库。

VLCC的非燃料运营支出成本，涵盖人员配备、保险、润滑油等，数据来源于（Drewry，2024）。

海斯潘能源在温哥华港进行船舶间的LNG加注作业。



参考文献

非洲主权碳注册基金会。(2026). 主权碳倡议。https://asc-registry.org/en

BCG. (2025). 超越航运：其他行业将如何推动海运脱碳. 波士顿咨询集团. https://www.bcg.com/publications/2025/how-other-sector-s-will-fuel-maritime-decarbonization

清洁燃料。(2023)。废二氧化碳（UCO）供应展望。https://cleanfuels.org/wp-content/uploads/GlobalData_UCO-Supply-Outlook_Sep2023.pdf

能源安全与净零部门。（2025）。英国ETS范围扩大：国内海运 - 主要当局回应。https://www.gov.uk/government/consultations/uk-ets-scope-expansion-maritime-sector/outcome/uk-ets-scope-expansion-domestic-maritime-main-authority-response-accessible-webpage

DNV. (2018). 《到2050年的海事展望——能源转型展望2018年》. https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast/

DNV. (2021). 《到2050年的海事展望——能源转型展望2021年》. https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast

DNV. (2023a). 探索生物燃料在航运中的潜力. https://www.dnv.com/expert-story/maritime-im pact/Exploring-the-potential-of-biofuels-in-shipping

DNV. (2023b). 《净零排放路径图》. https://www.dnv.com/publications/pathway-to-net-zero-emissions-report-2023-249543

DNV. (2024a). 候选中期温室气体减排措施组合的全面影响评估——任务2：对船队的影响评估、为国际海事组织工作、最终报告。DNV报告编号2024-1567 - 版本2。

DNV. (2024b). 《至2050年海事展望——能源转型展望2024》. https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast

DNV. (2024c). 白皮书. 航运船舶机载碳捕集潜力. https://www.dnv.com/maritime/publications/the-potential-of-onboard-carbon-capture-in-shipping-download

DNV. (2025a). 《到2050年的海事展望——能源转型展望2025》. https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast

DNV. (2025b). 白皮书. 节能措施与技术. www.dnv.com/maritime/publications/energy-efficiency-report-download

DNV. (2025c). 白皮书. 风力辅助推进系统 (WAPS)：WAPS 如何助力合规 GHG 法规. www.dnv.com/maritime/publications/waps-white-paper-download

DNV. (2025d). 白皮书. 航运中的甲醇燃料. 低温温室气体甲醇作为船用燃料的障碍与路径. https://www.dnv.com/maritime/publications/methanol-fuel-in-shipping-download

DNV. (2025e). 白皮书. 航运生物燃料. 当前市场及使用与报告指南. https://www.dnv.com/maritime/publications/biofuels-in-shipping-white-paper-2025-download

DNV. (2025f). 白皮书. 可替代燃料的安全引入：聚焦氨和氢作为船舶燃料. https://www.dnv.com/maritime/publications/safe-introduction-of-alternative-fuels-focus-on-ammonia-and-hydrogen-as-ship-fuels-download

DNV. (2025g). 能源转型展望2025. https://www.dnv.com/energy-transition-outlook

DNV. (2025h). 白皮书. 海上核动力 - 核动力船舶的技术、商业可行性与监管挑战. https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-nuclear-propulsion-download

DNV. (2025i). 白皮书. 航运中的氨. 探索一种新燃料的诞生. https://www.dnv.com/publications/ammonia-in-shipping-white-paper

DNV. (2026a). DNV能源转型展望2026——氢能至2060年. https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/hydrogen/download

DNV. (2026b). 《能源转型展望2026》（即将出版）。https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/

DNV. (2026c). 白皮书. 航运中的甲烷. 使用液化天然气燃料的船舶及向温室气体甲烷的转型. www.dnv.com/publications/methane-in-shipping

DNV. (2026d). 白皮书. 船舶岸电. 技术、法规与实施. https://www.dnv.com/maritime/publications/shore-power-in-shipping-download

DNV. (2026e). 五艘集装箱船在北欧-亚洲航线上应用OCCS的二氧化碳减排潜力，文件编号：2025.260，网址：www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2026-02/DNV-Liners-OCCS-Report.pdf

德鲁里。(2024)。船舶运营成本 - 年度回顾与预测。德鲁里。

EBA. (2024). 2040年通过生物甲烷实现减排. https://www.europe-anbiogas.eu/wp-content/uploads/2025/06/Common-Futures-Biomethane-for-emission-abatement-by-2040.pdf

EMSA. (2026)。船上碳捕获与封存系统研究，欧洲海事安全局，里斯本。www.emsa.europa.eu/publications/item/5634-onboard-carbon-capture-technologies.html

EUC. (2024). 欧盟可再生能源指令. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/zh-Hans

欧盟-英国合作共同理解新议程。EUC. (2025)。https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_25_1267

脚注

点击脚注编号，即可跳转到相关页面



- 1 关于MEPC 84的讨论详情，请见...
参见MEPC 84会议报告
从 IMODOCS 处提供
<https://webaccounts.imo.org>
- 2 IMO Resolution MEPC.377(80), 2023
我方关于减少温室气体排放的战略
船舶排放。来源：
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>
- 3 阅读更多：
<https://www.dnv.com/news/2026/imo-mepc-84-revisiting-the-net-zero-framework>
- 4 阅读更多：
www.zerocarbon-shipping.com/news/countdown-what-did-we-learn-from-the-first-year-of-fue-leu
- 5 欧洲提供的信息
在向……的演示中佣金
欧洲可持续航运论坛
2026年5月19日。
- 6 更多详情请参阅 Hecla 的网站：[https://www.hecla-em.com/blog/compliance-market-indicator-\(cmi\)-week-22](https://www.hecla-em.com/blog/compliance-market-indicator-(cmi)-week-22)
- 7 例如：<https://et-fuels.com/article-ref-ocean-secures-e-methanol-from-etfuels>
- 8 阅读更多：
[零排放要求](#)
[关于世界客船的说明](#)
[遗产峡湾 - regjeringen.no](#)
- 9 阅读更多：
[从1月1日起将](#)
[政府采购免于招标的要求](#)

- [渡轮及渡轮服务 - 政府。](#)
[no](#)（挪威语）
- 10 在此处阅读更多：[引入气候要求](#)
[离岸船 - regjeringen.no](#)
（挪威语）
- 11 更多内容请访问：<https://carbonaction.com/en/ets/turkish-emission-trading-system>
- 12 在此处阅读更多：<https://carbonaction.com/en/ets/china-shanghai-pilot-ets>
- 13 更多内容请访问：<https://carbonaction.com/en/ets/korea-emissions-trading-system-k-ets>
- 14 更多内容请访问：<https://icapcarbonaction.com/en/ets/brazilian-green-house-gas-emissions-trading-system>
- 15 在此处阅读更多：<https://msa-standard.com/insights-and-resources/resources/archive/articles/china-msa-regulation-on-ship-energy-consumption-data-and-carbon-intensity-management-measures-effective-from-22-dec-2022-valid-for-5-years-4829>
- 16 如需更多来自海事的信息
人民安全管理局
中华人民共和国参见：
<http://msa.gov.cn/html/cnmsa/xxgk/article/2026/b096e4423f2947cab0db-94c383b95c97.html?hav=1JnAGGcEug-nOhbjbyC>
- 17 在此处阅读更多：<https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-trans->

- [港口/可持续交通投资计划_en](#)
- 18 详见：https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-eu-rope/alternative-fuels-infrastructure_en
- 19 详见：https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_12406/202511/content_7048917.html
(中文)
- 20 详见：<https://www.irs.gov/inflation-reduction-act-of-2022>
- 21 例如，波士顿咨询公司
BCG集团，百亿美元机遇
绿色航运的ty，可在以下地址获取：
<https://www.bcg.com/publications/2025/the-10-billion-opportunity-in-green-shipping>
- 22 基于新加坡2024年1月1日至2026年4月30日的
平均低硫重油（LSHF0）价格
- 23 基于克拉克森研究（Clarksons Research）的船
舶级数据，世界船队登记簿
- 24 参见MSC示例：
<https://www.msc.com/en/newsroom/press-releases/2024/msc-sustainability-report-highlights-alignment-of-new-operations-and-achievement-of-key-milestones>

- 25 参考马士基的示例：<https://www.maersk.com/news/articles/2025/10/02/maersk-rolls-out-efficiency-programme-for-its-time-chartered-fleet>
- 26 参考Hapag-Lloyd的示例：<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/hapag-lloyd-tackles-huge-fleet-upgrade-programme-with-dnv-support>
- 27 详见：<https://smartmaritimenet-works.com/2026/03/20/hapag-lloyd-报告称通过发动机优化实现5%的燃油节省>
- 28 例如：https://www.renewableenergymagazine.com/energy_saving/dnv-study-validates-energy-efficiency-gains-for-20240212
- 29 详见：<https://www.iea.org/reports/assessing-emissions-from-lng-supply-and-abatement-options>
- 30 参见瓦伦纽斯·威廉森的示例：
<https://www.walleniuswilhelmsen.com/insights/our-new-shaper-class-vessels-pave-the-way-for-our-journey-to-near-zero>
- 31 参见Höegh Autoliners的示例：
<https://www.offshore-energy.biz/hoegh-autoliners-taps-kongsberg-for-propulsion-upgrade-of-10-pctcs>

- 32 更多内容请访问：<https://cruising.org/news/cruise-lines-international-association-clia-releases-annual-environmental-technologies#:~:text=Uptake%20of%20alternative,%20zero%20and,%20船队采用替代燃料的比例为65%，容量采用的比例为65%。>
- 33 例如：<https://www.seatrade-maritime.com/dry-bulk/shandong-shipping-orders-10-methanol-fuelled-vlcs>
- 34 更多内容请访问：<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/maximizing-energy-efficiency-in-the-tanker-segment#:~:text=at%20optimum%20loads.,%E2%80%A2,by%20large-angle%20rudder%20movements>
- 35关于船队采用情况（*AFI*）的数字包括500
总吨以上的船舶上的所有帆系统，但不包括风
筝系统。此外，由于一些早期的WAPS试点案例
和原型可能已从船舶上卸下，因此列出的项目
均已通过DNV验证，确认目前船舶上安装了WAPS
系统。由于风筝系统的验证存在挑战，因此该
系统被排除在概述之外。

应注意的是，船队和订单数据来自两个不同的来源。由于订单信息未细化到具体船名，因此存在某些船舶和设施同时出现在两者中的风险，例如若某设施将在近期进行。然而，所提供的订单数量可以很好地反映未来设施规模的量级，这为市场对WAPS技术的定位提供了重要见解。

37 更多内容请访问：https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fuel-maritime/questions-and-answers-regulation-eu-20231805-use-renewable-and-low-carbon-fuels-maritime-transport_en

38 例如：<https://www.seatrade-maritime.com/wind-powered-ships/regulations-and-shipowner-experience-driving-wind-power-adoption>

39 DNV AFI, <https://afi.dnv.com>, 2026年8月访问

克拉克森研究，全球船队登记册，2026年8月查阅

41 更多内容请访问：<https://anemoimarine.com/> 阿涅米奥旋翼帆成功安装在U-Mings“环球先锋”VLOC号上，该船位于中远集团舟山造船厂

42 详见：<https://mykn.kueh-ne-nagel.com/news/article/hapagloyd-studies-windassisted-propulsion-f011-Nov-2024>

43 例如：<https://www.ocean-wings.com/product/ow-re-rigid-elevator-wingsail>

44 更多内容请访问：<https://www.dnv.com/news/2025/Rapid-WAPS-uptake-driven-by-strict-emission-regulations-and-industry-innovation>

45 例如：<https://www.rivieramm.com/news-content-hub/rotor-sail-leasing-initiative-aims-to-improve-access-to-wind-assisted-power-78375>

46 在运营中：仅包括100总吨（GT）及以上的船舶。仅包括1980年或之后交付的船舶（这是与前两次《海事展望》相同的截止年份）。除海军舰艇外，所有船舶类型均包括。在订单中：仅包括100总吨（GT）及以上的船舶。仅包括2017年或之后签约的船舶（在前两次《海事展望》中，我们使用2016年和2015年作为截止年份）。除海军舰艇外，所有船舶类型均包括。为避免重复计算，并与前两次《海事展望》保持一致，订单中的替代燃料船舶不包括改造项目以避免重复计算（与往年相同）。

47 DNV AFI, <https://afi.dnv.com>, 2026年8月访问

48 详见：<https://incat.com.au/> 创历史：世界最大电动船启动发电

49 更多内容请访问：<https://www.buquebus.com/info/buque-electrico>

50 更多阅读请访问：<https://interestingengineering.com/innovation/vision-battery-electric-cruise-concept>

51 年度利用率根据从DCS数据中报告的LNG消耗量计算得出（IMO，2020；IMO，2021；IMO，2022b；IMO，2023；IMO，2024；IMO，2025），该消耗量被用于在船舶持续以燃气模式运行时的理论最大LNG消耗量（根据DNV的AFI平台数据计算）所除。

52 年度利用率根据从DCS数据中报告的甲醇消耗量计算得出（IMO，2020；IMO，2021；IMO，2022b；IMO，2023；IMO，2024；IMO，2025），该甲醇消耗量被除以船舶若连续以甲醇模式运行时的理论最大甲醇消耗量，该理论最大甲醇消耗量使用DNV的AFI平台数据计算。

53 根据 DNV 的替代燃料洞察平台（<https://afi.dnv.com>）、国际能源署（IEA）可再生能源进展追踪器（<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progression-tracker>）以及 e-NG 联盟（<https://www.eng-coalition.org/news/first-global-project-map-of-electric-natural-gas-fa>）

相关设施），以及国际能源署（IEA）的《天然气2025》报告（<https://www.iea.org/reports/gas-2025>）。对于氢能，我们仅包含10%的假设份额，该份额与交通领域相关，数据源自国际能源署（IEA）的《氢能生产与基础设施项目数据库》（<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#hydrogen-production-projects>）。

根据《可再生能源进展追踪器》，2024年船舶消耗了约70万吨的FAME生物燃料。相比之下，国际海事组织报告生物混合燃料的消耗量约为120万吨，尽管具体的混合成分未作说明（国际海事组织，2025年）

55年总拥有成本（TCO）涵盖了船舶从2029年至2048年这20年期间的成本，包括资本成本、运营成本、燃料成本和监管成本。

56 更多内容请访问：<https://www.fsb-tcfd.org>

57 风险识别（HAZID）是一种结构化的定性风险评估方法，用于系统地识别系统或操作中潜在的风险及其原因、后果和防护措施。

58 所有者负责内部管理所有权、技术运营、船员配备及商业活动。

我们假设有20%的燃料能源消耗发生在往返欧盟港口的航次上，这意味着大约10%的总燃料消耗和温室气体排放属于欧盟碳排放交易体系（EU ETS）和FuelEU Maritime的监管范围。

评分标准基于：(i) 成本，表示为相对于所评估策略中最低成本策略的船队平均盈亏平衡日费率，以及 (ii) 风险，以跨情景和策略的指数平均值表示。成本评分定义如下：1 = 100 - 104%；2 = 104.1 - 110.0%；3 = 110.1 - 120.0%；4 = 120.1 - 150.0%；5 = >150.0%。风险评分基于指数量表：1 = 1.00 - 1.39；2 = 1.40 - 1.79；3 = 1.80 - 2.19；4 = 2.20 - 2.59；5 = 2.60 - 3.00。单个风险事件被分配1（低）、2（中）或3（高）的评分，并通过在相关情景和策略中取平均值进行汇总。

基于DNV替代燃料洞察平台（<https://afi.dnv.com>）、国际能源署（IEA）可再生能源进展追踪器（<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>）、e-NG联盟（<https://www.eng-coalition.org/news/first-global-project-map-of-electric-natural-gas-facilities>）、IEA《天然气2025》报告（<https://www.iea.org/reports/gas-2025>）以及SIA国际e燃料观测站2025（<https://www.sia-partners.com/>）。

系统/文件/文档下载/文件/2025-04/2025国际观象台电子燃料.pdf

对于氢能，我们仅包含一个假设的10%份额，该份额与交通领域相关，数据源自国际能源署（IEA）的氢能生产与基础设施项目数据库（<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#hydrogen-production-projects>）。

62 关于欧盟排放配额历史价格发展情况，请访问：<https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>



点击脚注编号，即可跳转到相关页面

项目团队

DNV核心贡献者

指导委员会：Knut Ørbeck-Nilssen, Cristina Saenz de Santa Maria, Trond Hodne

主要作者：Øyvind Sekkesæter, Kjersti Aalbu, Linda S. Hammer, Tore Longva, Magnus S. Eide, Øyvind Endresen

合作作者：张弛, Marius Leisner, Ola G. Skåre, Grace Q. Zheng, Astrid Langsrud, Ingrid B. Løken, Dorte A. A. Slotvik, Olav Tveit, Simen L. Heggen, Susanne S. Myrene

审稿人：哈肯·胡斯塔德, 扬·克瓦尔斯沃德, 艾瑞克·奥鲁姆, 李丽, 斯韦雷·阿尔维克, 杰森·斯特凡诺斯, 哈恩斯·冯·克诺林, 艾瑞克·纽厄斯

DNV提供的ETO报告



为2026年海事展望至2050年：
www.dnv.com/maritime-forecast

《到2050年的航海预报》的早期版本可在以下网址获取：
www.dnv.com/publications

《2025年能源转型展望》：
www.dnv.com/publications

能源转型展望：氢能至2060：
www.dnv.com/publications

能源转型展望英国2026：
www.dnv.com/publications

别错过我们的即将发布的报告：《能源转型展望2026》，发布日期为2026年10月6日。

2026年12月2日《挪威能源转型展望》

订阅DNV最新能源转型洞察：
www.dnv.com/energy-transition/subscribe

由DNV AS出版

设计：printprojekt, 汉堡 | 图片：AI生成：1、10、11、43、59、60、68 | | Berges Bulk：31 碳岭：24 CMES：49 | | DNV：2 Getty Images：6 Gerd Fahrenhorst, CC BY | 4.0, 通过维基共享资源：37 Hasenpusch Photo | | 制作：33 HS Bereederungs GmbH：26 IMO | | (CC BY 2.0)：14、21 Meyer Werft：36 Shutterstock：3、4、12、15、25、27、30、39、40、41、42、44、46、48、51、55、56 | | 62、64、67 哥德堡港：9、18、58 普林斯鲁珀特港管理局：57 Scandlines：22 Seaspan：72 | | Tsuneishi造船厂：28 英国海道测量局：13 | Wallenius Wilhelmsen：29 Yara国际：19



WHEN TRUST MATTERS

关于DNV

DNV是一家独立的风险管理及认证机构，业务遍及100多个国家，致力于保障生命、财产和环境安全。作为全球众多成功企业的信赖之选，我们助力其把握机遇、应对全球转型带来的风险。凭借丰富的经验和深厚的专业知识，我们推动安全与可持续发展，制定行业标准，并激发创新思维，提供解决方案。

DNV是全球领先的船级社，也是海事行业的公认顾问。我们致力于提升全球航运业的安全水平、质量标准、能源效率和环保表现——涵盖所有船舶类型和海上结构。我们大力投入研发，与行业伙伴携手合作，共同寻求应对战略、运营或监管挑战的解决方案。

www.dnv.com

Headquarters:

DNV AS NO-1322 Høvik, Norway
电话: +47 67 57 99 00
www.dnv.com