



低碳燃料：通往净零排放的最后一公里 合成燃料对于航空和航运脱碳的作用

2025年2月

目录

词汇表	03
摘要	04
1. 实现净零排放需要大量低碳燃料	06
2. 最后一公里脱碳：航空业和航运业	09
2.1 航空业脱碳	10
2.2 航运业脱碳	13
2.3 德勤对航空业和航运业脱碳的展望	15
3. 释放合成燃料的脱碳潜力	16
3.1 重大技术障碍有待克服	18
3.2 应对合成燃料的高昂成本	24
3.3 贸易连接供需	27
4. 行动呼吁	29
4.1 推广低碳燃料所面临的挑战	30
4.2 未来展望	31
附录	33
附录1. 氢能路径探索者（HyPE）模型简介	33
附录2. 航空业与航运业效率提升情况的计算方法	34
附录3. 生物燃料供应链中可持续原料可用性的计算方法	35
尾注	36
作者	38
联系人	39
德勤可持续发展进程中心	40

词汇表

缩写	释义	缩写	释义
CAPEX	资本支出	L-DAC	液体直接空气捕获
C ₁₂ H ₂₆	航空煤油	MJ	兆焦耳
CH3OH	甲醇	MSW	城市固体废物
CCUS	碳捕集、利用与封存	MtCO ₂	百万吨二氧化碳
CO ₂	二氧化碳	MtH _{2eq}	百万吨氢当量
DAC	直接空气捕获	MWh	兆瓦时
EU	欧盟	NH ₃	氨
EJ	艾焦耳, 1艾焦耳等于10 ¹⁸ 次方焦耳	NZE	净零排放
FAO	联合国粮食及农业组织	OECD	经济合作与发展组织
FOGS	脂肪、油和油脂	OPEX	运营支出
GHG	温室气体	RTKeq	计费吨公里当量
GtCO ₂	10亿吨二氧化碳	S-DAC	固体直接空气捕获
GW	吉瓦特, 1吉瓦特等于10 ⁹ 瓦特	SAF	可持续航空燃料
HEFA	氢化酯及脂肪酸	t.km	吨公里
HFO	重燃料油	TRL	技术就绪度
H2	氢	TWh	太瓦时, 1太瓦时等于10 ¹² 瓦时
HyPE	氢能路径探索者	US	美国
ICCT	国际清洁交通委员会	WTO	世界贸易组织
IEA	国际能源署		
IMO	国际海事组织		
IPCC	政府间气候变化专门委员会		
IRENA	国际可再生能源署		
ITF	国际运输论坛		
kt	千吨		
kW	千瓦		

摘要

到2050年实现温室气体净零排放需要社会进行根本性变革，从目前以化石燃料为中心的模式转变为高效、高度可再生和电气化的能源系统。

在一些难减排行业（如钢铁和化工），**清洁氢能**可以作为电气化的补充。但是，航空业和航运业脱碳需要比氢能和电力能量密度更高的**低碳燃料**，包括生物燃料和合成燃料。

生物燃料作为一种即用型燃料，可以方便直接地用于现有内燃机和燃料基础设施，在短期内实现大量减排。然而，各行业对生产可持续生物质的有限原料的激烈竞争，阻碍了生物燃料的大规模应用。因此，从长远来看，氨、甲醇和合成煤油等**合成燃料**预计将成为主要使用的低碳燃料。

德勤全球使用数据驱动和基于模型的量化分析进行展望研究，探讨了**合成燃料作为实现航空业和航运业脱碳的关键推动因素的采用情况**。在该展望中，航空业的二氧化碳排放量在2030年前将不再增加，到2050年将减少约75%，而航运业到2050年则几乎实现净零排放，减排95%。这些减排成绩主要得益于增效措施以及低碳燃料的采用，尤其是合成燃料。合成燃料在当前能源组合中的占比微乎其微，到2030年也只扮演边缘角色，在26艾焦耳燃料消耗中占1.6艾焦耳。尽管如此，德勤预计合成燃料到2050年将成为航空业和航运业的主要能源来源，在燃料消耗中约占16艾焦耳。

达到这样的合成燃料供应水平需要约1.5亿吨可持续氢能以及7亿吨气候中性二氧化碳。这是一项重大的工业和技术挑战，因为清洁氢能行业仍处于起步阶段，二氧化碳捕获技术也还未得到大规模发展。

此外，到2050年，氢能生产、燃料合成以及直接空气捕获共需要高达10,000太瓦时（TWh）的清洁电力供应，相当于2023年全球发电量的三分之一。这超出了目前全球可再生能源发电量，因此需要大幅提升可再生能源发电能力，幅度远超迄今所取得的进展。

尽管合成燃料是航空业和航运业脱碳的关键，但其仍处于早期应用阶段，几乎不受监管制约，成本也比化石燃料要高出许多。**全球统一的监管框架**对于航空和航运这些国际化行业开发合成燃料至关重要。如果没有公共支持，合成燃料的价格将继续比传统化石燃料高出两到十倍。这一高价主要由于低成本二氧化碳原料的供应有限，相关生产过程中难以避免的能量损耗，以及各行业对清洁氢能的竞争。此外，要实现合成燃料的充足供应，大量投资也必不可少，到2050年，每年平均需要约1,300亿美元。虽然这一数字相较于全球化石燃料的投资规模（2024年为1.1万亿美元）较为微小，但却与航空业和航运业的燃料总支出持平。全球贸易也是提升经济竞争力的一项不可或缺的重要手段。通过将成本最低的资源地与有限的可再生能源和气候中性二氧化碳资源的需求中心连接起来，**全球贸易可以帮助缓解供需之间的地域失衡**，提高整体经济效率，促进经济发展。

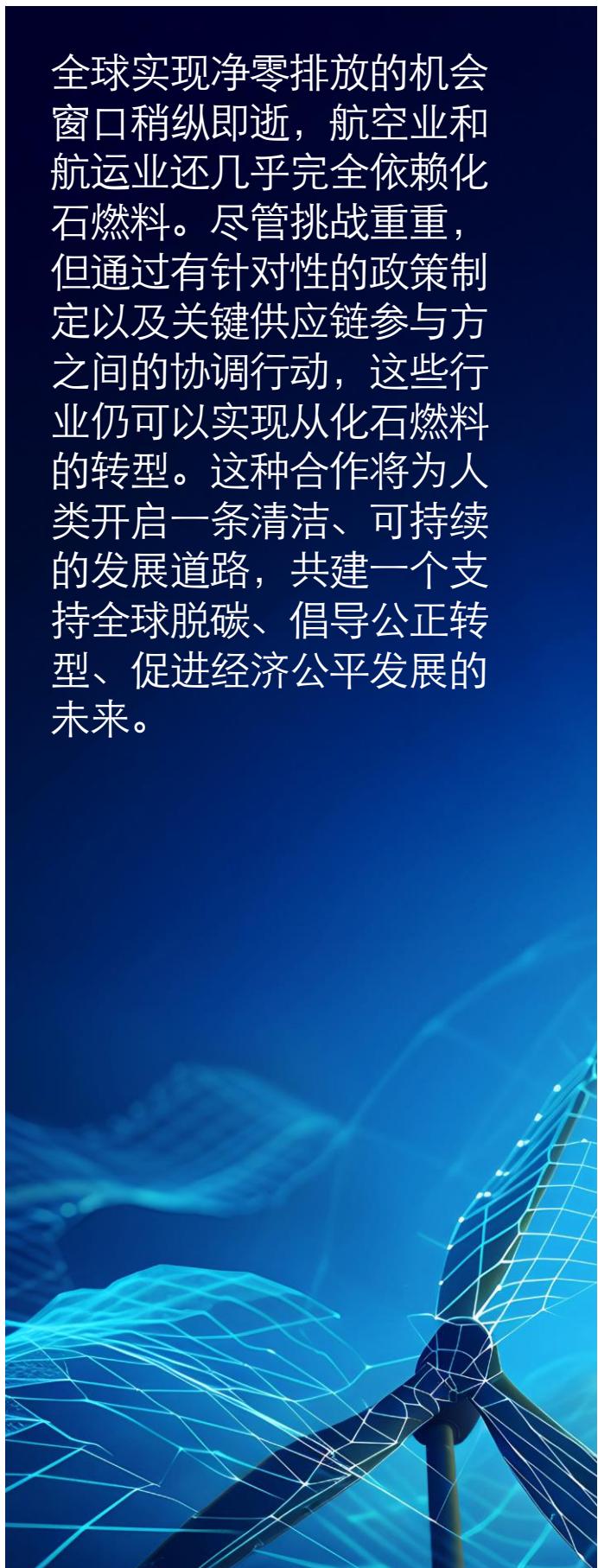
合成燃料的成本效益仅仅是航空业和航运业实现脱碳目标所面临的众多技术挑战中的一环。虽然航空业脱碳不需要对基础设施或发动机进行重大改造，但航运业脱碳则意味着未来需要使用甲醇和氨等**多种燃料**。这就要求在转型期间继续使用现有基础设施，同时研发新型燃料补给技术、发动机解决方案，并建设配套加注基础设施。由此看来，脱碳相关的技术挑战不仅仅局限于能源供应方面，还有更深层次的技术变革和发展。



总而言之，航空业和航运业逐步淘汰化石燃料可能需要价值链上的各参与方着眼长远，携手合作：

- **政策制定者**扮演着关键角色，他们负责营造启动转型的初始条件，构建必要的监管框架，并持续提供前进动力。他们应通过制定国家和行业战略提高政策透明度，通过掺混指令等机制创造需求，并通过低碳燃料补贴来减轻供应链参与方的经济负担，从而推动购买。从长远来看，持续不断地完善政策指令并提供经济支持将是确保顺利转型的关键。
- **国际组织**具备理想的条件，能够通过制定通用的规则框架，支持协调一致的全球能源转型。通过实施严格的认识体系，支持预定和索赔（Book and Claim）机制，这些组织能够促进价值创造，从而推动合成燃料在全球范围内的采用。统一和通用的规则定义有助于避免碳泄漏或套利行为。
- 面对日益增长的合成燃料需求，**燃料供应商**应借助早期投资以及与上游参与方的合作，积极确保低成本的可持续能源原料供应，尤其是清洁氢能和气候中性二氧化碳。在合成燃料价值链的建设阶段，他们可以通过掺混生物燃料，从而支持相关技术的发展和必要基础设施的完善。
- **飞机制造商和船舶制造商**应调整其产品以满足可持续发展需求。这意味着需对飞机和船舶发动机进行改造，以使其分别能使用高比例掺混合成燃料以及氨和甲醇等新燃料。此外，他们还应通过研发投资开发增效措施，并将其纳入生产流程，以降低燃料成本和二氧化碳排放量。
- **机场和港口管理机构**在推广合成燃料的过程中起着至关重要的作用。这些机构通过部署必要的加注基础设施及保障燃料的持续供应，为合成燃料的应用打下坚实基础。对于机场而言，此过程无需开发全新的专门基础设施；然而，对于港口来说，则需发展多燃料兼容的基础设施。
- **航空公司和航运公司**处于能源转型的中心，作为桥梁将上游参与方与终端消费者紧密相连。通过推广可持续的货运和差旅服务，这些公司可以引领技术应用、规模采购低碳燃料，并促进各供应链参与方协同进步。此外，一旦他们在经营活动中实施增效措施，就能立即在短期内在降本减排方面实现显著成效。

全球实现净零排放的机会窗口稍纵即逝，航空业和航运业还几乎完全依赖化石燃料。尽管挑战重重，但通过有针对性的政策制定以及关键供应链参与方之间的协调行动，这些行业仍可以实现从化石燃料的转型。这种合作将为人类开启一条清洁、可持续的发展道路，共建一个支持全球脱碳、倡导公正转型、促进经济公平发展的未来。



1. 实现净零排放需要大量的低碳燃料

要将全球温升控制在1.5° C以内，就必须在2050年前实现温室气体净零排放。¹

鉴于能源消耗和工业流程占全球二氧化碳排放的80%以上，²必须要对整个能源系统进行全面脱碳。为此，一项基本要求是从当前以化石燃料为中心的模式转向高度可再生和电气化的能源系统。³现有的相关研究强调，电气化、大规模可再生能源开发以及效率提升是实现脱碳的关键技术解决方案。⁴

图1展示了全球与能源相关的二氧化碳排放情况，以及主要经济行业的脱碳措施。部分行业，如建筑和轻型公路运输，几乎可以完全依靠电气化来实现脱碳。这些电力全部来自水能、风能和太阳能等可再生能源。⁵

然而，炼钢和水泥生产等重工业需要电气化以外的解决方案，至少在高温加热和工业原料需求方面是如此。^{3,6}此外，大多数重型运输设备，尤其是在航空业和航运业，都需要高能量密度的燃料，这使得它们难以实现电气化。^{6,7,8}

因此，就需要通过清洁来源（低碳电力电解或有减排措施的化石燃料）生产的氢能作为补充，助力实现大幅减排。例如，氢能可用作初级炼钢的还原剂，用作生产其他分子（如合成燃料和化学产品）的原料，或用作生产热能和电力的能源。



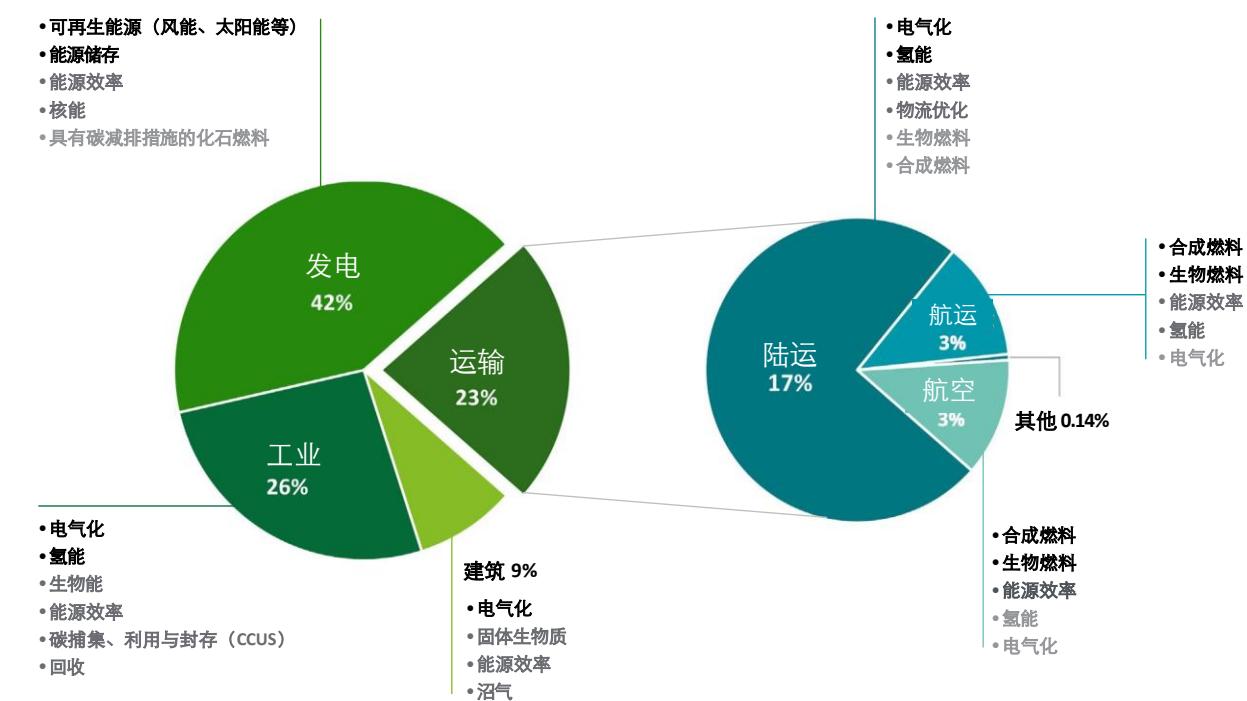
除生物质和沼气以外，清洁氢能在重工业中也有重要的脱碳潜力。它能克服电气化的缺陷，帮助重型公路运输行业实现脱碳。然而，由于能量密度较低，氢不太适合用作航空燃料或船用燃料，因为飞机或船舶上的大多数设备都需要在小体积的燃料箱内产生较高的能量密度。因此，这些重型运输行业的脱碳将依赖低碳燃料——生物燃料和合成燃料，此等燃料与化石燃料的特性相似，但却是以低碳原料制得。

航空和航运作为两大最“难减排”的行业，每年各排放约10亿吨二氧化碳（1 GtCO₂/年，^{11,12} 约占全球二氧化碳排放量的6%¹³）。作为重要的温室气体排放源，这两大行业的脱碳尤其具有挑战性：钢铁和化工等行业可以通过将生产转移到清洁能源丰富的地区，¹⁴ 然后进口终端产品来控制排放；¹⁵ 但航空业和航运业的排放却无法转移，飞机在全球各地飞行，船舶在全球各地航行，直接向大气排放温室气体。因此，它们无法像其他行业能进行供应链优化，只能迎头解决排放问题。这就必须采取多方面的措施，包括提高飞机和船舶的效率、优化物流，以及最重要的，使用生物燃料和合成燃料等更清洁的燃料取代传统的化石燃料。

生物柴油、生物煤油和生物乙醇等形式的生物燃料是从植物生物质、农业残留物甚至藻类等有机材料中提取的可再生燃料。¹⁶ 这些燃料在燃烧时释放出的二氧化碳，要么被生物质在生长阶段所吸收，要么被自然排放。¹⁷ 其生产过程中没有产生其他排放，生物燃料因此被认为是碳中性燃料。这种封闭的碳循环有助于减缓大气中二氧化碳的净增加，使生物燃料成为一种有吸引力的可持续替代燃料。然而，可持续生物燃料的供应有限，因此需要其他燃料作为补充，尤其是在航空业和航运业。¹⁸

合成燃料是以氢为原料，通过化学反应生产的液体或气体燃料。如果使用低碳原料（包括氢气）和能源进行生产，那么这些燃料可被视为传统石油产品的清洁替代品，能够减少运输部门的二氧化碳排放。在合成燃料中，氨、甲醇和合成煤油被广泛认为是最有希望助力航空业和航运业实现脱碳的解决方案。^{19,20} 氨可以通过哈伯-博施反应从氢气和环境中的氮气生成（见图2）；²¹ 合成甲醇和合成煤油分别由二氧化碳和氢气通过甲醇合成反应和费托合成反应合成。²²

图1：全球主要经济行业能源燃烧产生的二氧化碳排放情况以及各行业可用的脱碳战略



资料来源：德勤基于内部³、国际能源署⁹以及Our World in Data数据库¹⁰相关数据进行的分析

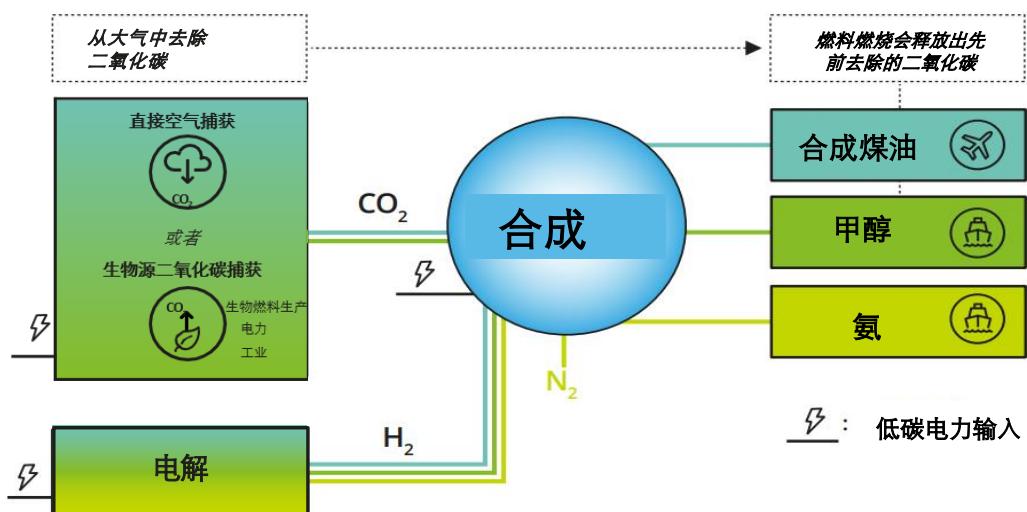
尽管氨中不含碳元素，碳氢化合物（如甲醇和合成煤油）的燃烧会产生二氧化碳排放，这些二氧化碳又可用于这些燃料的生产合成。如果这种二氧化碳产自生物源，²³ 或是经过化学工艺（如直接空气捕获，DAC）直接从空气中捕获，那么就可以被认为是低碳燃料甚至气候中性燃料。在这些情况下，燃料燃烧排放的温室气体会在碳循环中被捕获的/生物源二氧化碳所抵消。

总之，具有高能量密度的低碳燃料（例如生物燃料和合成燃料）对于实现最难消减部门的去碳化至关重要。他们可作为电气化和氢能的补充，助力那些难减排行业实现脱碳。

但是，未来的低碳燃料市场及其兴起却在关键的技术选择、燃料发动机组合以及这些燃料及其原料的来源方面面临着多种不确定性。低碳燃料相对容易运输，也就极有可能显著影响并重塑未来能源贸易，因此很有必要对燃料供应路径进行前瞻性评估，从而最大化这些燃料的整体潜力。

在本报告中，德勤预测并展望了低碳燃料的未来发展，以及其在净零情景下对于航空业和航运业实现脱碳的作用。

图2. 低碳合成燃料的生产路径



利用数据驱动和基于模型的方法，德勤展望以科学视角预测了低碳燃料的发展。在调研分析中，我们具体采用了自有的氢能路径探索者(HyPE)模型²⁴（见附录1）。这是一个针对新兴氢能和低碳燃料市场进行技术经济分析的先进模型，已经过学术同行评审，其研究结果已在知名科学期刊上发表。^{24, 25, 26}德勤构建的情景，基于国际能源署²⁷和政府间气候变化专门委员会（IPCC）¹等的长期展望，并完全符合巴黎协定将全球温升控制在1.5°C以内的目标。在这一情景中，我们假设存在良好的地缘政治环境，稳定高效的金融体系，以及为实现140多个国家设定的净零目标而采取果断的政策行动。

在此背景下，本报告旨在探讨低碳燃料要想蓬勃发展并为实现气候中性做出重要贡献所需满足的条件。因此，这一情景假设可作为公共和私营部门战略决策的“指南针”。同时，它也有助于监控低碳燃料市场的建设进程，识别出领导人需要解决的监管、经济和技术上的差距。但这一情景不应被视为最有可能实现的未来结果。

2. 最后一公里脱碳：航空业和航运业

航空业和航运业脱碳依赖于类似的战略和行动举措。

首先，需要转向温室气体排放量更少的交通模式，²⁸同时改变消费者行为，²⁹以限制潜在的需求增长。其次，通过提高物流和运营效率以及技术（物理）效率，进一步减少燃料消耗。

效率提升和行为改变都能迅速带来显著的燃料节约，因此对于减少碳排放具有重要作用。但是，这些措施并不能完全消除二氧化碳排放，实现气候中性还是需要将传统化石燃料替换成低碳燃料。



2.1 航空业脱碳

大部分航空运输为客运，按计费吨公里当量 (RTKeq) 计算，³¹ 货运约占20%。³⁰受经济增长和航空运输成本下降的影响，航空业近年来迅速发展（2010年至2019年间，客运和货运分别增长约70%和40%）。³⁰此种增长趋势还将继续，因为交通模式转变和采取减量措施等行为手段预计无法弥补航空需求的增长。2023年至2050年间，总航空运输量预计将增长2.5倍，年均增长率为4%。³²这主要得益于全球（尤其是新兴国家）的人口和经济增长，以及商业、旅游和国际合作带动的全球互联性增强。

技术发展和运营措施带来的效率提升

2022年，飞机的平均燃油消耗量为12.1MJ/RTKeq，几乎仅为2000年代初期的一半。³³这一显著改善，主要得益于数十年来燃油效率的不断提高——从1960年到2019年，年均提高1%。³⁴从短期来看，由于新飞机的能效比现有机型高15%左右，在机队中逐步应用新一代飞机技术，可以提高效率。³⁵但考虑到新飞机设计项目数量较少，预计到2030年代中期，已交付飞机的效率可能不会出现明显的飞跃式变化。**德勤根据分析预测，从2022年至2035年，燃油效率每年将提升1.1%**（见附录2）。

从长远来看，目前在空气动力学（如混合翼机身、主动气流控制）、喷气发动机（如开式转子技术）以及通过先进复合材料实现轻量化等方面取得的科研进展，预期可使下一代飞机的效率比目前机型提高30%。³⁶通过在机队中逐步应用这些技术，预计在2035至2050年间，技术效率可实现每年1.5%的提升。

与此同时，在2050年之前，运营措施（如有效载荷最大化³⁷和航线优化³⁸）带来的效率提升，可助力每年减少0.45%的燃料消耗（见附录2）。综合技术带来的效率提升，我们预计**飞机的平均燃油效率在2022至2035年间将每年提高1.6%，从2035年起每年可提高近2%**。因此，相比于2022年，到2035年和2050年，飞机的平均燃油消耗将分别减少18%和39%。

低碳燃料需求

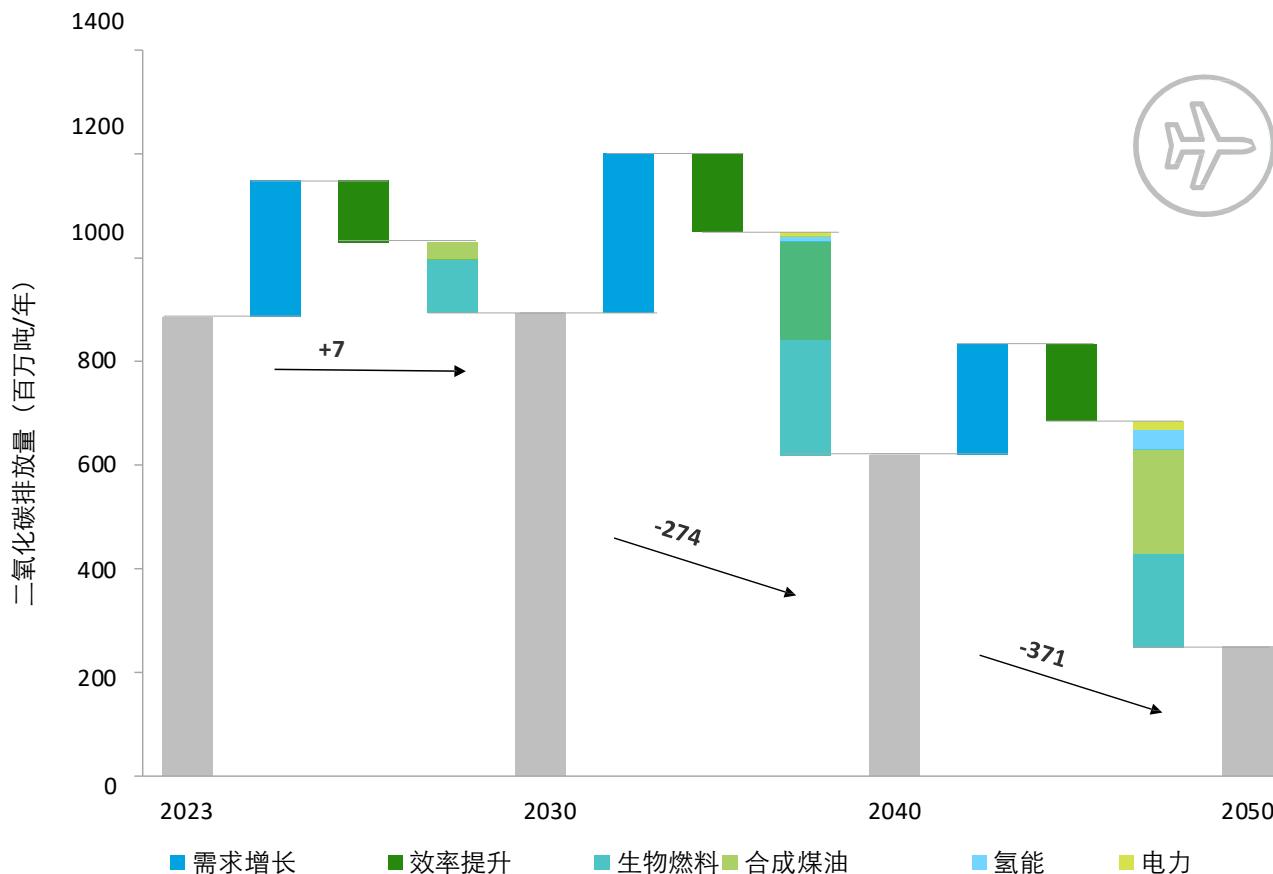
鉴于燃油效率的提升不及航空运输需求的增长，在燃油脱碳尚未实现的情况下，航空业的温室气体排放将会增加。

目前，由化石煤油提炼的喷气燃料几乎满足了所有的航空能源需求，造成了大量的温室气体排放。³⁴实现气候中性意味着需要摆脱化石燃料，³航空业也不例外。目前航空业有两种可行的替代燃料选择：一种是采用需要对飞机设计和推进技术进行重大改变的燃料，如电池和氢气；另一种是使用生物燃料或合成燃料等即用型燃料替代传统燃料。

氢能和电池驱动的飞机仅支持轻量化、短距离的航空运输，因此只能在很小程度上取代化石燃料。³⁹航空业实现燃料转型的关键途径是使用可持续航空燃料 (SAF)，这种燃料在化学和物理特性上与传统的基于煤油的喷气燃料极其相似。⁴⁰只需将其注入现有的基础设施和发动机，便可直接作为传统燃料的替代品。³⁹

低碳航空燃料仍处于早期发展阶段。德勤预测，其大规模发展将从21世纪30年代开始。到2030年，化石燃料在燃料组合中仍占90%左右（13.2艾焦耳），到2050年将降至约20%（3.7艾焦耳）。由于与大多数设备的兼容性有限，氢能和电力的直接使用仅限于特定区域范围内，到2050年分别只占最终航空能源消耗的7%和3%。**可持续航空燃料，到2040年和2050年将分别占航空能源消耗的43%和70%，是航空业实现脱碳的关键因素。**在各种低碳燃料中，生物煤油发展最快，将在2030年前超过1.2艾焦耳。但其应用却受限于生物质原料的供应（见文本框1）。这就使得合成煤油到2050年将成为主要低碳燃料来源，几乎占2050年航空燃料供应量的40%（6.8艾焦耳）。因此，航空业的二氧化碳排放量在2030年前都将保持稳定，到2050年降至2.4亿吨，相比目前的排放量下降75%（见图3）。⁴¹

图3. 2023至2050年航空业二氧化碳排放量预测以及不同减排手段的影响



资料来源：德勤基于附录2所述的效率提升以及第2.3节所述情景进行的分析

“在2023年至2050年间，航空业的排放有望减少75%，这一成就主要得益于从2030年起对可持续航空燃料的采用”



文本框1. 生物燃料生产及其应用潜力

生物燃料在化学性质上与传统化石燃料相似，可直接应用于现有喷气发动机和燃料基础设施。因此，它能极大推动交通行业——包括公路运输、航空运输和海运运输——实现脱碳。目前，一些生物燃料的生产工艺已经相当成熟，已被纳入能源系统。⁴² 2022年，生物燃料供应量达到4.3艾焦耳，占交通行业能源消耗的3.5%。目前几乎所有的生物燃料（生物柴油和生物乙醇）都应用于公路运输，但在净零情景下，生物燃料需求到2030年将翻一番，并拓展应用于包括航空运输和海运运输在内的其他交通领域。²⁷

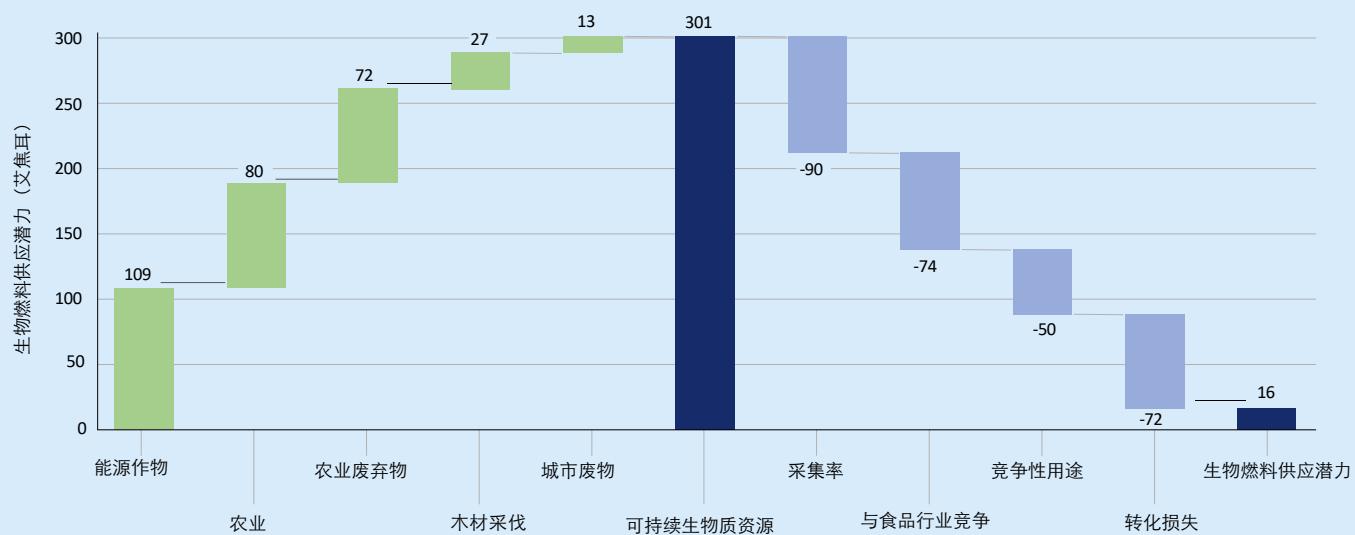
尽管如此，生物燃料的应用仍面临多项挑战，这些挑战限制了它的广泛采用，并阻碍了其成为重型运输领域脱碳的唯一燃料选择：

- 生物燃料的生产可使用农业使用的原料，这可能会对食物的供应造成干扰。^{43, 44} 为促进可持续发展，生物燃料的生产应仅限于使用那些可持续且不会与食品行业发生资源竞争的原料。因此，许多法规禁止使用食用油或甘蔗、大豆、棕榈等原料提炼生物燃料，这就极大限制了这种具有成本效益的燃料的供应潜力。
- 土地用途改变（如森林砍伐）或种植原料（如使用化肥）或燃料合成所需的额外能源消耗都会显著影响生物燃料的环境生命周期评估，减少符合气候中性原则的生物燃料的数量。^{45, 46}

生物燃料生产使用的生物原料可分为五大种类：

- 能源作物
- 农业残留物
- 农业废弃物
- 森林残留物
- 城市固体废物

据估计，可用于各生物能源生产的可持续生物质约达到300艾焦耳（见下图）。由于可用性和采集率的原因，对脂肪、油和油脂（FOGS）的获取可能受到限制。根据国际可再生能源机构（IRENA）的数据，全球废弃食用油潜在总量约为0.8艾焦耳，而被采集的仅为0.2艾焦耳。⁴⁵ 此外，尽管城市固体废物资源充足，但估计其中只有一半来自生物资源，因此需进行预先处理，以提高原料的质量。⁴⁶ 因此，考虑到其他能源用途、食品行业的竞争、采集限制和转换损失，估计约有16艾焦耳生物燃料可供交通行业使用（见附录3），这仅占国际能源署2050年净零情景中预测的交通行业需求的20%。所以，尽管生物燃料在减排方面拥有极大的潜力，但它们需要与合成燃料结合使用，才能促使交通行业，尤其是航空业和航运业，实现最大程度的减排。



资料来源：德勤基于附录3中所述方法进行的分析

2.2 航运业脱碳

航运在全球贸易中扮演着至关重要的角色，占全球货运量的80%以上。⁴⁷在经济增长和全球化的推动下，预计在2050年以前，航运需求将以近2%的年均增长率稳步增长（以吨公里为单位计）。⁴⁸航运业应用场景广泛，拥有多个细分市场，各应用场景和细分市场都有自己的船舶设计要求和形态、航线特征及所面临的脱碳挑战。然而，从排放量来看，约75%的排放来自油船、干散货船、杂货运输船及集装箱船的长途货物运输。⁴⁹与航空业一样，航运业的脱碳也有赖于效率提升措施、消费者行为改变以及转向更为清洁的能源。

技术发展和运营措施带来的效率提升

由于每艘船舶承载的货运量大（通过优化物流）且航速相对较低，航运在运输每吨公里货物时的能耗显著低于其他货运方式：大约为0.1兆焦耳/吨公里，⁵⁰这比卡车运输能效约高10倍⁵¹，比航空运输能效约高100倍。⁵²然而，航运领域的能效仍存在改善的空间，国际海事组织（International Maritime Organization）据此设定了一项高标准的能效指标——船舶能效设计指数（Energy Efficiency Design Index），要求2025年以后投放市场的所有新船舶，其能效须比2000年至2010年期间交付的船舶提高30%。⁵³

提高能效的措施主要集中在优化流体力学（例如，船体设计和空气润滑）及提升推进效率（如发动机余热回收及长远来看的风力辅助推进）方面。然而，由于船舶的使用寿命较长（超过30年），在现役船队中集成最新的技术改进是一个渐进且缓慢的过程。预计到2050年，船队的更新升级及新船的添置将助力技术能效每年提高约0.7%（见附录2）。

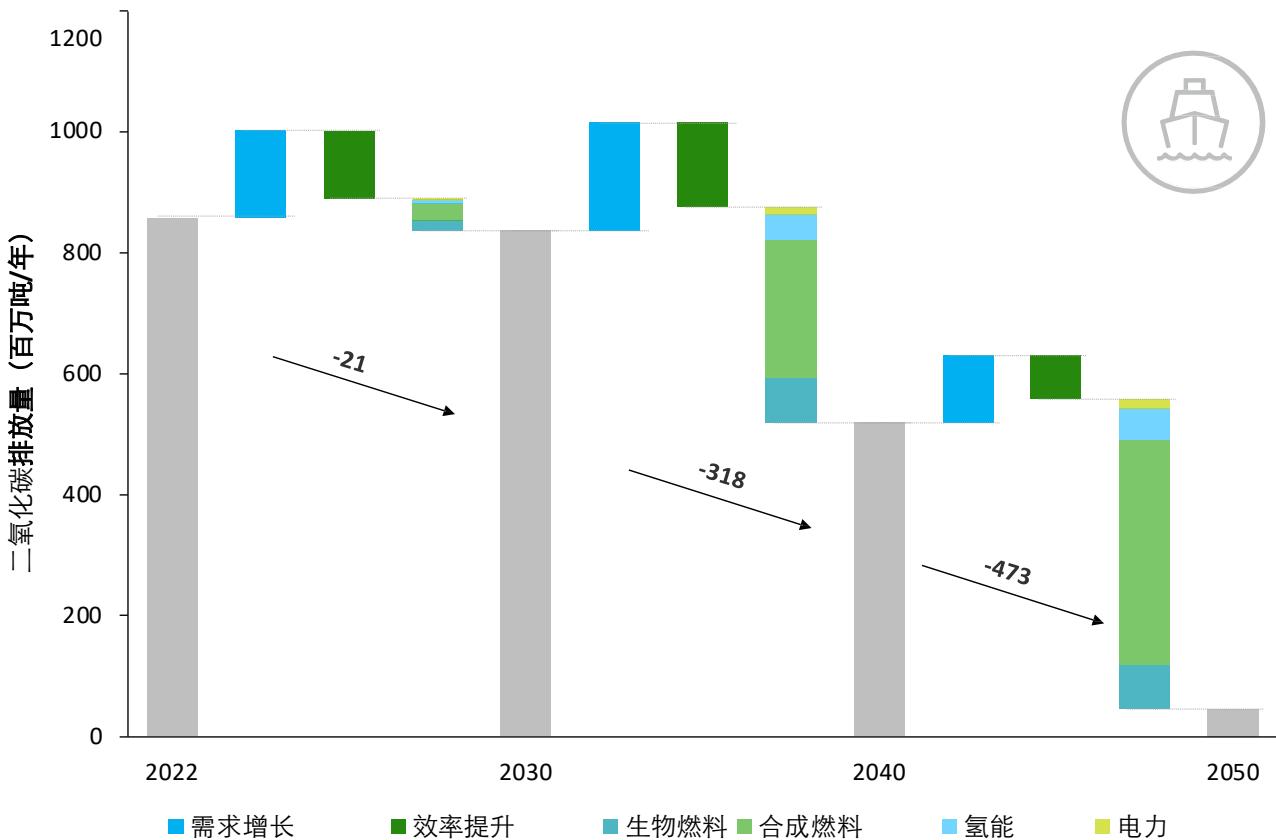
从短期来看，最有可能实现航运能效提升的路径在于优化运营。⁵⁴借力数字化及先进软件技术的发展，对货运承载、航线以及航速进行优化，能够显著降低整体能耗，单艘船舶的能效最高可提高38%。⁵⁵综合运用技术和运营两方面的能效提升措施，预计航运能源强度在2022年至2030年期间将下降13%，到2050年将降至0.06兆焦耳/吨公里以下，相当于船队平均能效将在现有水平上提高三分之一。

低碳燃料需求

与航空业一样，航运业通过技术进步和运营优化预期实现的能效提升，可能会被不断增长的需求所超越。因此，航运业脱碳需要转向清洁能源。虽然电力和氢能可以为部分船舶提供动力，但对于国际航运中常见的长途航运需采用液体燃料，因为其具有较高的能量密度及卓越的长期储存能力。只有那些可频繁停靠港口充电的小型船只，如渡船和沿海船舶，才适合进行电气化改造。尽管氢能的质量能量密度高于电池，但由于其体积能量密度较低，以及液化储存成本较高，对于长途航行而言并不实用。因此，根据德勤的展望，到2050年，在航运业能源消耗中，电力和氢能将分别达到0.4艾焦耳（3%）和1.3艾焦耳（10%）。液体生物燃料因其与现有的发动机和基础设施兼容，可作为航运的一种可行选择。到2030年，在航运燃料供给中，生物燃料占比将达到6%（0.6艾焦耳），这主要得益于与化石燃料混合使用。然而，对可持续生物质的激烈跨行业争夺限制了它们的大规模应用（见文本框1）。生物燃料在航运业中的使用量增长速度在2030年之后会放缓，到2050年在整个行业的燃料消耗中的占比将达到13%（1.7艾焦耳）。

在航运领域，领先的燃料脱碳方案当属合成液体燃料，特别是甲醇和氨。预计到2050年，这两种燃料合计将占航运燃料消耗量的70%（8.9艾焦耳），届时将带动二氧化碳排放减少6亿吨（图4）。甲醇和氨均不是即用型燃料，它们的采用需要新型推进发动机的研发，以及相应的基础设施和供应链建设。因此，将甲醇和氨纳入燃料结构中，需要在整个航运生态系统中进行长期规划并进行协同投资。该行业最终会主要选择氨还是甲醇，亦或者采用更为均衡的多燃料技术路线目前尚不可知（有关氨和甲醇的详细对比，请参阅第3.1节文本框3）。由于担心资产搁浅，这种不确定的环境可能阻碍对相关基础设施的投资。

图4：2022年至2050年航运业二氧化碳排放量预测以及不同减排手段的影响



资料来源：德勤基于附录2所述的效率提升及德勤净零排放场景进行的分析

“到2050年，航运领域的二氧化碳排放量将几乎为零，这在很大程度上要归功于合成燃料，到2040年，合成燃料将开始在航运燃料中占据重要份额。到2050年，在航运业使用的各种燃料中，仅氢和甲醇的占比即可达到70%。”



2.3 德勤对航空业和航运业脱碳的展望

根据德勤的展望，在2030年之前，航空业的二氧化碳排放将不再增加，到2050年将减少约75%，而这将主要归功于效率提升措施（减排30%）及低碳燃料的应用（65%）。据此，到2050年，该行业的二氧化碳年排放量将减少至2.2亿吨。到2050年，航运业的二氧化碳排放量将几乎为零，届时残余二氧化碳排放量约为4,500万吨。这两个行业之所以存在残余二氧化碳排放量，是因为并非所有国家均统一设定了到2050年实现净零排放目标。例如，作为全球第一和第三大二氧化碳排放国的中国和印度，分别计划在2060年和2070年实现净零排放。⁵⁵此外，鉴于净零排放的全球性和跨行业性，这些排放属于最难减排的类型，需要通过直接空气捕获和具有碳捕集和封存能力的生物能源，在其他行业实现负排放以进行抵消。

合成燃料对于航空业和航运业长期的脱碳进程而言不可或缺。先进技术和运营改进带来的效率提升能够减缓燃料消耗的增长，而生物燃料的潜力不足以满足这些行业大部分的燃料需求。合成燃料在当前的燃料结构中几乎无足轻重，到2030年其作用也依旧有限（在26艾焦耳的总能源消耗量中占1.6艾焦耳），但预计到2050年将成为航空业和航运业的主要能源，届时消耗量将达到约16艾焦耳（图5）。实现如此规模的合成燃料生产，将需要超过1.5亿吨的清洁氢和约7亿吨基于DAC或生物源的二氧化碳。这将是一项重大的工业和技术挑战，因为清洁氢行业尚处于发展初期，而二氧化碳捕获技术也尚未发展到工业规模。

图5：德勤展望——航空业和航运业对低碳燃料的需求

燃料类型	燃料	航空业的需求（艾焦耳）				航运业的需求（艾焦耳）			
		2023	2030	2040	2050	2022	2030	2040	2050
生物燃料	船用生物燃料	-	-	-	-	0.0	0.6	1.3	1.7
	生物煤油	0.0	1.2	3.9	6.1	-	-	-	-
合成燃料	氨/甲醇	-	-	-	-	0.0	1.2	3.9	8.9
	合成煤油	0.0	0.4	3.3	6.8	-	-	-	-
化石燃料	煤油	13.1	13.2	9.1	3.7	-	-	-	-
	船用燃油	-	-	-	-	9.4	9.1	5.7	0.5

资料来源：德勤基于第2.1和第2.2节中对航空业和航运业燃料需求变化的预估、附录2中所作的效率提升估算以及自上而下的资源分配情况进行的分析

“在德勤设想的情景中，生物燃料的应用和效率提升措施的实施，抵消了航空业和航运业运输需求增长带来的排放增量，从而航空业和航运业产生的排放量到2030年将不再增加。目前合成燃料尚未纳入航空和航运燃料结构中，但预计到2050年，其将占据近六成的比例，成为这两大行业脱碳转型的关键推动因素。”

3. 释放合成燃料的脱碳潜力

低碳燃料（特别是合成燃料）目前还处于市场起步阶段，相应的监管框架尚未建立或尚不稳定（见图6）。尽管国际组织宣布了一些净零目标，⁵⁶但在全球范围内，对于低碳燃料的生产和使用，并未设定具有法律约束力的目标。然而，在国家层面，越来越多的国家开始出台相关法规。

例如，欧盟制定了相关法规，要求船运企业使用低于特定碳强度阈值的燃料，航空燃料须遵守严格的可持续航空燃料（SAF）掺混指令。⁵⁷

尽管现有的监管框架已经启动了试点项目，但市场仍面临着巨大的不确定性：截至2024年1月，全球宣布的230个合成燃料生产项目中，仅15%的项目进入了最终的投资决策阶段。⁵⁸



图6：全球航空业和航运业脱碳政策环境图谱

澳大利亚

- 相关路线图和行动计划中纳入了SAF相关内容
- “海事减排国家行动计划（Maritime Emissions Reduction National Action Plan）”正在制定之中

巴西

- 预计将在2027年前实施SAF相关强制性规定
- RenovaBio法规写入了有关交通运输低排放燃料的规定

加拿大

- 设定了与SAF掺混相关的“意向性”目标
- 不列颠哥伦比亚省相关燃料法规中写入了与SAF有关的规定

中国

- 预计将出台SAF相关强制性规定
- 已宣布启动一项重要的SAF航班试点项目

欧洲

- ReFuelEU Aviation法规：可持续航空燃料（SAF）掺混指令及合成燃料子目标
- FuelEU Maritime法规：燃料碳强度法定目标
- 英国和挪威的相关政策与欧盟保持一致

印度

- 预计将会出台SAF相关强制性规定

印度尼西亚

- 即将实施潜在的SAF相关强制性规定

日本

- 即将在航空业实施SAF强制性规定
- 针对航运业制定了相关国家计划，在计划中纳入了低排放燃料（但并未作出强制性规定）

马来西亚和新加坡

- 新加坡预计将会出台SAF相关强制性规定，而马来西亚已开始实施相关规定

美国

- 一些州的清洁燃料计划中包含SAF生产目标（“可持续航空燃料大挑战”）、对SAF的生产和使用提供支持（《通胀削减法案》（IRA））以及电子燃料（e-fuels）
- “清洁航运法案”正处于讨论阶段

图例

■ 针对航空业和航运业实施了强有力政策

■ 目前存在针对航空业和航运业的相关政策（并不一定具有约束力）

■ 针对航空业实施了强有力政策

■ 目前存在针对航空业的相关政策（并不一定具有约束力）

资料来源：德勤基于国际能源署政策数据库⁵⁹、国际运输论坛⁶⁰、世界贸易组织⁶¹以及地区和国家法规进行的分析

“首要之举是打造全球统一的监管和认证框架，这对于合成燃料在航空和航运这些本质上具有国际属性的行业的全球推广至关重要。”

3.1 重大技术障碍有待克服

合成燃料的生产尚未实现大规模部署，这一进程依赖于清洁氢的可用性，以及对于烃类合成燃料的生产而言，还需确保的可持续二氧化碳的可用性。虽然电解制氢技术成熟度较高，前景广阔，但其储存和运输相关的挑战阻碍了其广泛应用和规模化发展。⁶ 虽然点源二氧化碳捕获技术早已实现工业规模部署，但像直接空气捕获这样的碳移除技术，由于其处于发展初期而存在极大的不确定性，导致人们对其是否能够确保充足的可持续二氧化碳供应存疑。合成燃料生产技术的成熟度参差不齐，也意味着并非所有合成燃料均已经过认证可用于现有发动机。获得认证需耗费数年，导致投资者和潜在承购商可能会对未经认证的合成燃料持观望态度。此外，对于某些合成燃料（如氨和甲醇）而言，其相应的下游技术（尤其是航运领域的发动机技

术）同样处于早期发展阶段，这进一步扩大了不确定性（见图7）。这些不确定性可能会给航空业和航运业的整个供应链带来巨大的技术风险（如性能不佳、成本超支和施工延误），从而增加财务成本，影响投资决策。⁶² 此外，对于氨和甲醇等非即用型燃料，燃料供应、基础设施开发及兼容发动机技术之间的互依性部署时间表（三重“鸡与蛋”困境）进一步加剧了现有挑战，提高了与之相关的风险溢价。

图 7：航空业和航运业不同脱碳技术的技术就绪度 (TRL)

类别	子类别	主要解决方案	TRL	说明
燃料生产	合成燃料生产	合成煤油生产	6	以氢气和二氧化碳为原料，采用费托合成法生产
		甲醇生产	7	以氢气和二氧化碳为原料生产
		制氨	8	以氢气和氮气为原料，采用哈伯-博施法生产
原料	二氧化碳捕获	电解制氢	9	绿氢——使用可再生能源进行电解
		固体直接空气捕获	7	基于固体吸附剂的直接空气捕获（在低温下）
		液体直接空气捕获	6	使用水溶液进行直接空气捕获（在高温下）
发动机技术	航空业	可持续生物源二氧化碳	11	从点源捕获（集中源）可持续二氧化碳
		电动飞机	5	电动飞机或混合动力飞机
		氢燃料飞机	5	燃料电池或氢直接燃烧
航运业		以煤油为燃料的飞机	11	商用发动机
		氢燃料船	4-5	以氢为燃料的内燃机
		氨燃料船	6	以氨为燃料的内燃机
		甲醇燃料船	9	以液化甲醇为燃料的内燃机
		沼气燃料船	9-10	以液化沼气为燃料的内燃机
		电动船	8	电动船

资料来源：德勤基于国际能源署清洁技术数据库⁶³进行的分析



为合成燃料生产寻找可持续二氧化碳

生产合成煤油和甲醇均需要大量的可持续二氧化碳。二氧化碳的来源在这些燃料的总生产成本中占据较大份额，因此对这些燃料的成本竞争力有重要影响。³⁹然而，所面临的挑战并非仅停留在经济层面：由于二氧化碳的捕获途径对于确保这些燃料与净零排放经济相适应至关重要，因此，低成本、可持续二氧化碳的可得性及其地理分布起着决定性作用。从化石燃料中捕获的二氧化碳，如加以回收利用，可有助于推动相关技术的规模化发展及必要基础设施的开发。然而，鉴于该等二氧化碳在碳循环中并非是气候中性的，因此不能用于合成燃料的可持续生产。因此，本次研究的重点是以生物源二氧化碳及基于DAC的二氧化碳生产合成燃料，实现符合净零排放目标的封闭式碳中性循环评估。

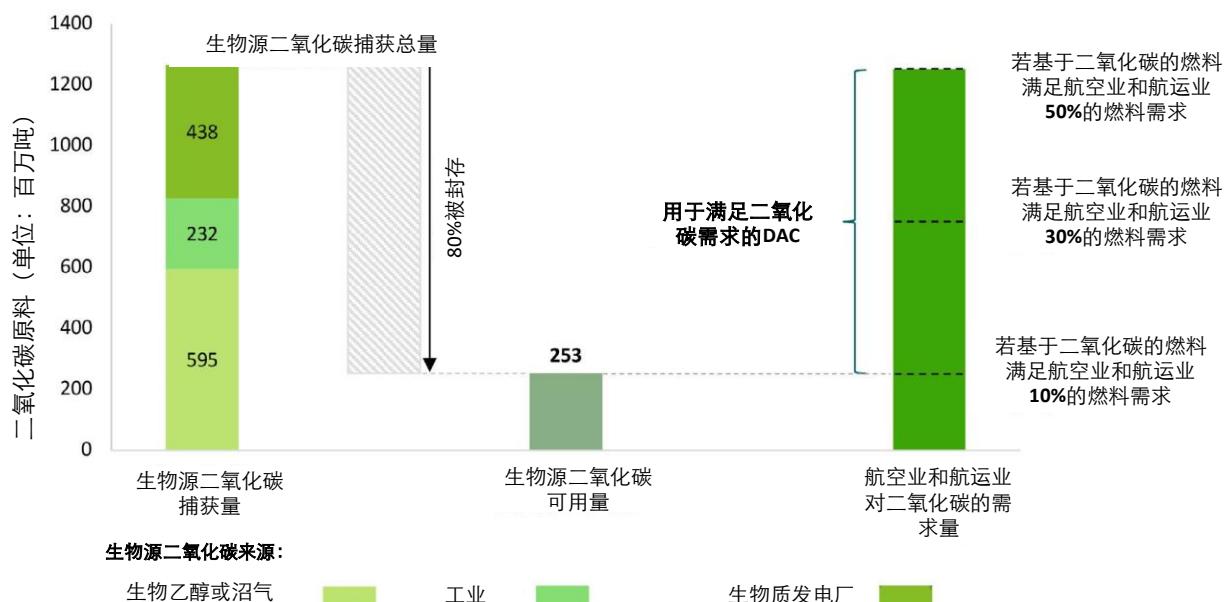
生物源二氧化碳是指通过自然和生物过程（如动物消化和植物呼吸）封存的碳。它是自然碳循环的一部分，这意味着将其释放到大气中并不会增加人为的二氧化碳排放。生物源二氧化碳的两大来源是生物质能源燃烧时捕获的二氧化碳（特别是在工业和电力行业）以及加工副产品二氧化碳封存。目前每年封存和利用的生物源二氧化碳约为200万吨，其中90%来自生物乙醇装置的副产品。³⁹将沼气提纯为生物甲烷产生的二氧化碳是另一个具有前景的二氧化碳来源，即便其当前所占的份额仍然很小。³⁹考虑到二氧化碳几乎是这些过程产生的唯一副产品（在副产品中的浓度达到99%），且对其进行提纯和收集的成本极低，这使其成为最具经济效益的一大二氧化碳来源，成本大约为30美元/吨二氧化碳。⁶⁴

生物源二氧化碳的潜力在全球分布不均，其在中长期内的可获得性极具不确定性。此外，生物源二氧化碳对于实现负排放、抵消最难减排行业中不可避免的温室气体排放⁶⁵，以及生产碳基合成燃料都至关重要。然而，生物源二氧化碳的可用量远低于提供负排放及生产合成燃料所需的水平。

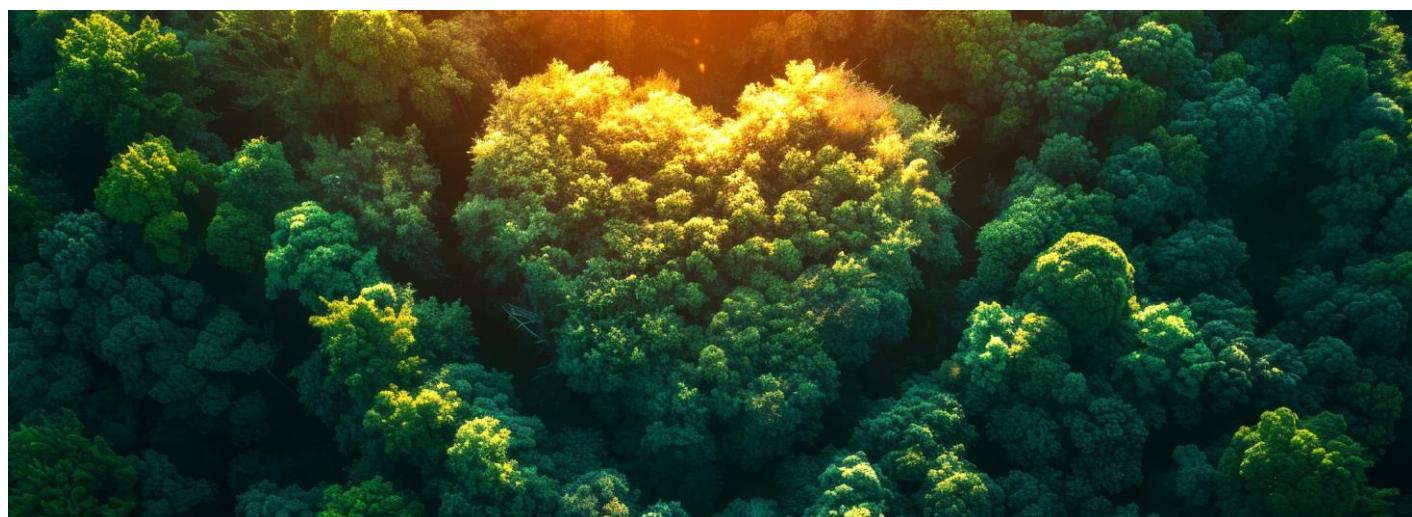
图8显示了生物源二氧化碳的可用量以及航空业和航运业对二氧化碳封存和合成燃料的需求水平。由于存在对生物源二氧化碳的竞争，欲在航空业和航运业显著提高合成燃料的普及率，可能需要其他来源的二氧化碳，特别是基于DAC的二氧化碳。

与生物源二氧化碳不同，直接空气捕获理论上具有无限的二氧化碳供应潜力，可作为一个补充性的二氧化碳供应选择。然而，DAC仍为一项新兴技术，目前捕获每吨二氧化碳的成本超过1,000美元。⁶⁷即使长期成本大幅下降，其也不太可能与生物源二氧化碳相竞争，且预计其成本至少仍将比生物源二氧化碳高出至少五倍（见文本框2）。因此，DAC仅应被视为生物源二氧化碳的一种补充手段，仅在无法获取生物源二氧化碳的情况下选用。

图8：与2025年航空业和航运业预期需求相比的二氧化碳原料可用性



资料来源：德勤基于国际能源署净零排放情景数据²⁷及《2023年世界能源展望》⁶⁶中关于不同来源二氧化碳捕获的研究进行的分析



文本框2. 通过直接空气捕获实现的二氧化碳原料供应情况

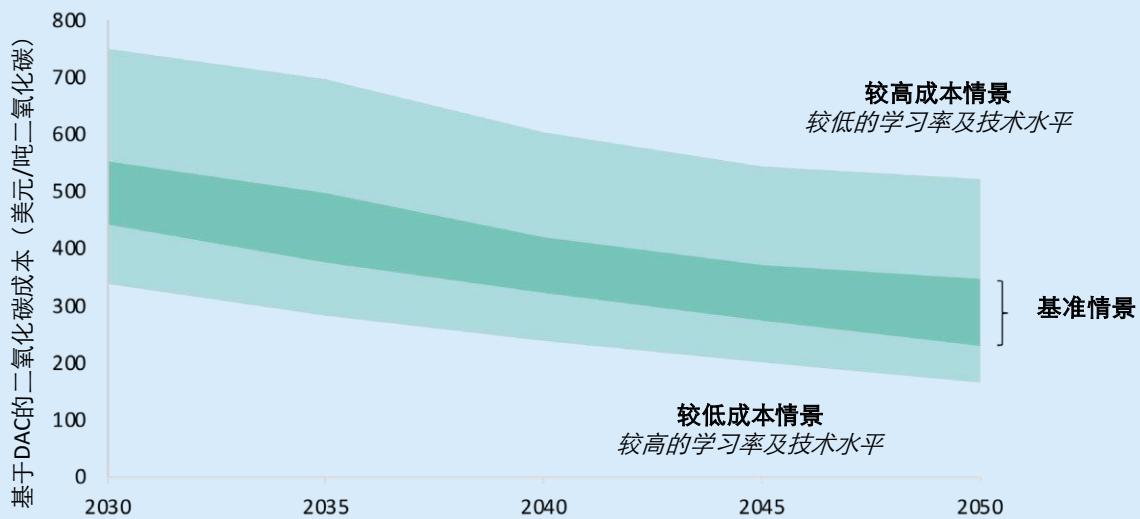
因具有无限的潜力，且只要有充足的低碳电力为相关流程提供动力，其即可以独立于工业设施进行部署，**从空气中直接捕获二氧化碳用于生产合成燃料是一种极具前景的低碳二氧化碳来源**。然而，DAC仍为一项新兴技术，在实现大规模部署之前仍需大力发展。截至目前，已有近30家DAC工厂投入运营，其中大部分工厂位于美国、欧洲和加拿大。2023年，这些工厂总共捕获了1万吨二氧化碳。⁶⁸

目前，DAC技术主要依赖于两种方法：主要由Carbon Engineering开发的液体吸附剂（以下简称“液体直接空气捕获”或“L-DAC”）和主要由Climeworks开发的固定吸附剂（以下简称“固体直接空气捕获”或“S-DAC”）。这两种方法各具特色，两者的一大区别在于所需的工艺温度：L-DAC要求温度高达900°C，而S-DAC要求温度不超过120°C。^{69,70}鉴于与提供高温热能相比，可再生能源技术能够以更多的方式提供低温度热能，S-DAC在以可再生能源为主的低碳能源系统中似乎是一个更合适的选择。因此，本分析报告重点关注利用热泵提供热能的S-DAC。

由于该技术仍处于起步阶段且尚未实现规模化，其成本和发展都伴随着重大的不确定性。⁷¹除高昂的初始投资成本（资本支出）以外，该技术的一大关键成本驱动因素是能源采购。考虑到空气中的二氧化碳浓度较低（0.04%）⁷²，与其他来源（如生物源或工业设施来源）相比，DAC技术在捕获过程中的能耗更高，从而导致整体运营支出（OPEX）增加。

尽管这些因素存在重大不确定性，但由于规模经济、技术革新及能源成本下降，基于DAC的低碳二氧化碳供应成本预计将在未来几十年内逐步降低。⁶⁷技术经济不确定性及地区差异（主要为电力和资本成本方面的差异）导致的预期成本区间如下图所示。在德勤设想的情景中，到2050年，DAC的平均成本将从2030年的500美元/吨二氧化碳左右降至略高于300美元/吨二氧化碳的水平。即便在最乐观的成本发展假设下，到2050年，这一成本也仍将高于200美元/吨二氧化碳，约为合成烃燃料成本的三分之一到一半（见第3.2节）。

直接空气捕获成本变化及相关不确定性（固体DAC）



资料来源：德勤基于国际能源署⁷⁰、IEAGHG（国际能源署温室气体研究与开发计划机构）⁷³及荷兰国家应用科学研究院（TNO）⁷⁴相关数据进行的分析

直接空气捕获未来发展的成本不确定性也会影响预期的转型格局。目前，甲醇因其较高的技术就绪度和在常温条件下的易储存性，被视为是相比氨气更具前景的合成航运燃料选择。近10%的新建船舶被设计为可以采用甲醇作为燃料，而以氨为燃料的在建或运营船舶数量仍然较少。⁷⁵然而，若

生产甲醇所用的二氧化碳来源于直接空气捕获，则其成本将显著增加（见文本框3）。因此，考虑到氨燃料成本仅依赖于氢气成本，受DAC技术发展相关的大不确定影响较小，**对于航运业而言，氨亦为一种具有光明前景的长期燃料选择**。

文本框3. 甲醇或氨：关键竞争驱动因素何在？

虽然为实现长期气候目标，航运业会不可避免地转向合成燃料，但未来燃料结构的组成仍高度不确定，甲醇和氨都被视为是潜在的主要选择。

由于其技术已发展成熟，在短期内，甲醇有望比氨更早、更快地投入使用。由于甲醇能够在常温常压条件下储存，因此只需对现有基础设施和操作流程稍作改动即可。**甲醇在航运业进行广泛使用之路已然铺就：**2020年，甲醇作为航运燃料使用已获得IMO的批准，约有20艘船舶已采用甲醇作为燃料，超120个港口计划增设配套的甲醇加注基础设施。⁷⁶相比之下，**氨在航运业中的应用仍面临一些技术难题**，因为氨发动机尚未实现商业化应用，而氨分子具有的毒性及低温存储要求 (-34°C) 又为其加注和储存带来了新的挑战。

甲醇燃料船在管理环境转型方面为船舶运营商提供了更大的灵活性。由于与传统的船用燃料相比，使用化石甲醇为船舶提供动力仍可减少温室气体排放，因此这一选择可对冲潜在的合成甲醇短缺。其为船舶从化石燃料逐渐过渡到合成燃料提供了机会，并能更好地控制这一过渡进程。目前的船舶订购单证实了这一对甲醇燃料船的偏好（见下图）。船舶所有人更倾向于投资甲醇解决方案，相关订购量已超过240艘，而氨燃料船订单仅为26艘。**这些销售数据表明甲醇在短期内比氨更具优势。**

此外，船舶制造商也在推广具备多种燃料兼容性的船舶，这些船舶的传统发动机经专门设计，可轻松改装为适于采用替代燃料。在这一类别中，“可以氨为燃料”的船舶订单量达到了272艘，仅次于“可以甲醇为燃料”的船舶订单量（353艘）。⁷⁷这表明，甲醇和氨在中期内的竞争仍不确定，业内对应该青睐于哪种解决方案尚无共识。然而，从长远来看，对经济实惠、气候中性二氧化碳可用性的担忧，使甲醇的前景变得不甚明朗。

甲醇只有在以低成本的生物源二氧化碳为原料生产时，方能与氨保持成本竞争力，任何资源限制都将显著增强氨的应用优势。下图显示了甲醇和氨的相对成本与二氧化碳投入成本的函数关系。

甲醇和氨的成本差异



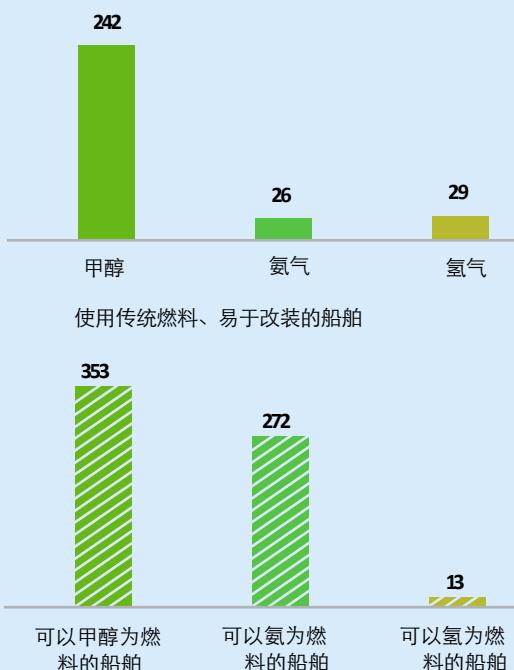
资料来源：德勤基于HyPE模型分析结果进行的分析

以基于DAC的二氧化碳为原料，生产甲醇的成本可能是氨生产成本的两倍以上。因此，由于生物源二氧化碳的可用量可能不足以满足化学品和燃料生产对二氧化碳的预期需求（见图8），合成甲醇在航运业中的应用潜力仍然有限。

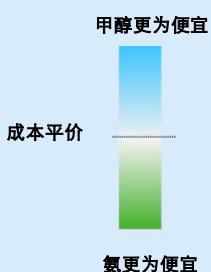
与氨相比，甲醇在处理方面面临的技术限制较少。有鉴于此，甲醇燃料船的投资和运营成本略低于氨燃料船。然而，成本差异如此之大，以至于即便是在总拥有成本框架内进行评估，基于DAC的甲醇生产成本仍将远远高于氨的生产成本。³⁹

当前基于氢的替代燃料船的订购情况（截至2024年7月）

自投入运营时即采用替代燃料的船舶



资料来源：德勤基于Clarksons research⁷⁸的相关数据进行的分析

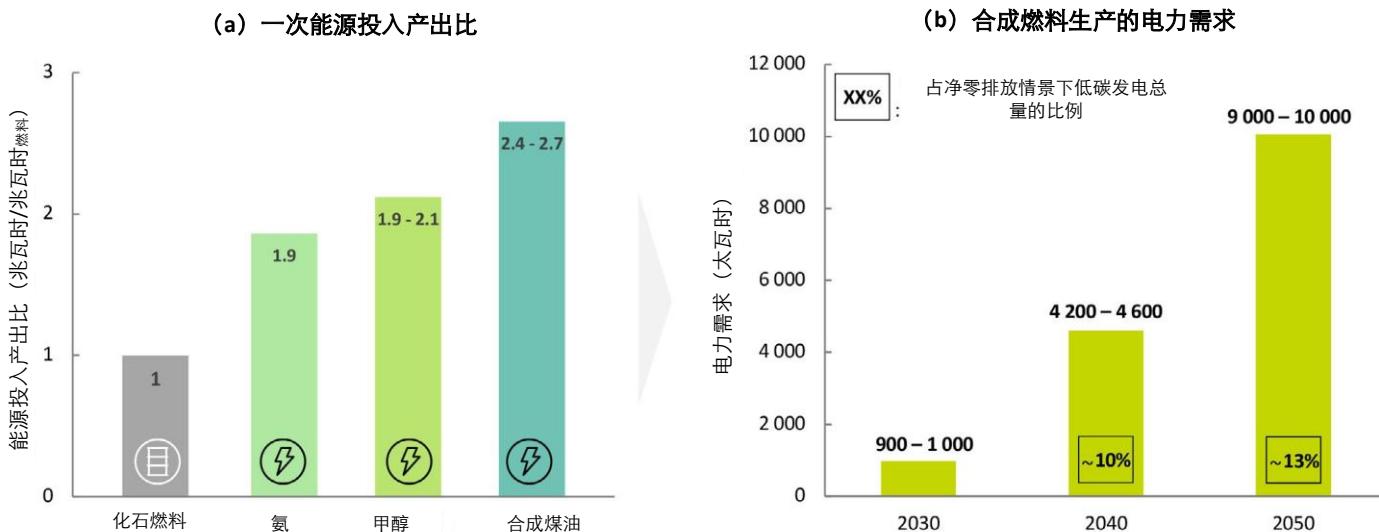


有关合成燃料生产的能源考量

合成燃料生产需要相当高的一次能源投入。氢气制备、燃料合成以及DAC均为高能耗过程，合成燃料生产所需的一次电力投入相当于燃料最终能源产出的1.9至2.7倍（见图9(a)）。随着合成燃料成为航空业和航运业可行的脱碳方案，对清洁电力的需求亦将随之增长。然而，考虑到广泛电气化是能源转型的重要组成部分，合成燃料预计将构成总清洁电力需求中的可控部分（占比最高达到13%），而在迈向净零排放的未来，这一总清洁电力需求预计将大幅增长（见图9(b)）。

扩大合成燃料生产所面临的基础设施挑战不仅仅关乎增加发电能力。合成燃料的应用需要同步打造一整套综合基础设施，包括制氢和氢气输送设施、二氧化碳捕获和运输设施，以及专为甲醇和氨设计的新型储存和加注基础设施，而合成煤油则可以通过现有基础设施进行储存、运输和加注。

图9：2030年、2040年及2050年合成燃料生产的能源需求预测



资料来源：德勤基于丹麦能源署 (Danish Energy Agency)⁷⁷、全球碳捕集与封存研究院 (Global CCS Institute)⁷⁸及国际能源署⁷⁹的相关数据进行的分析。相关范围对应以生物源二氧化碳与基于DAC的二氧化碳为原料生产合成燃料的能源强度差异。总电力需求基于第2.3节所述的相关德勤展望。

“要释放合成燃料的脱碳潜力，就必须大幅提升可再生能源的发电能力，到2050年，年发电量需高达10,000 太瓦时。这超过了当前全球可再生能源产量，也超越了过去20年里取得的进展。”

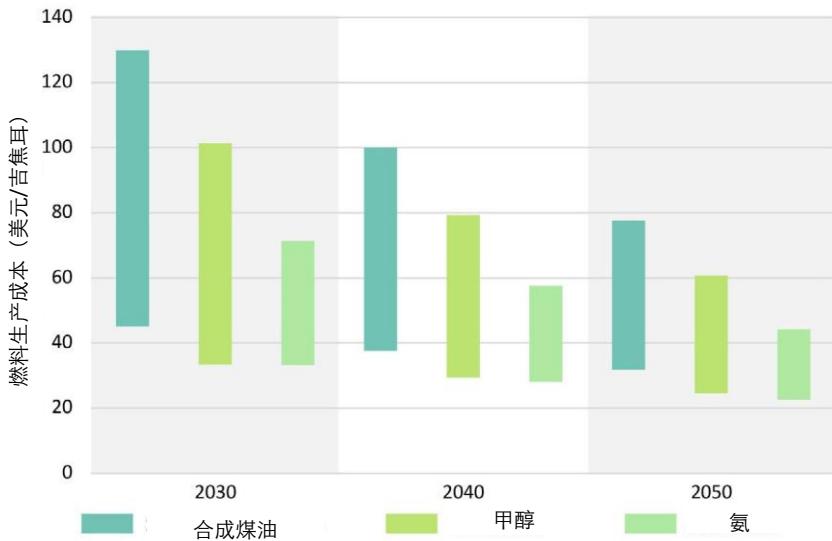
3.2 应对合成燃料的高昂成本

由于燃料成本是航空业和航运业的关键成本组成部分，因此合成燃料的成本竞争力是其实现广泛应用的一大阻碍（见图10(a)）。由于制氨仅需氢气作为原料，其成本主要受制氢成本驱动。而甲醇和合成煤油等合成烃类需二氧化碳作为原料，进而其成本对二氧化碳的来源高度敏感。利用基于DAC的二氧化碳而非生物源二氧化碳进行生产，将使甲醇和合成煤油的生产成本分别增加45%和44%（见图10(b)）。

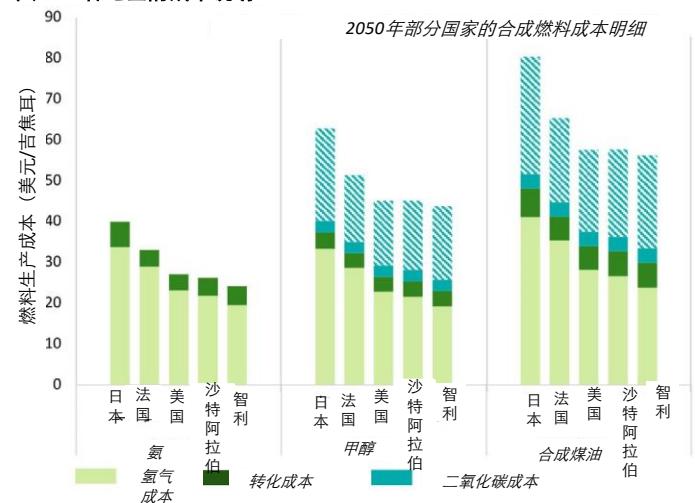
资源在全球范围内分布不均，自然资源（如清洁氢和生物源二氧化碳）可获得性、技术成本和融资条件的地区性差异，导致各地区的合成燃料成本不同（见图10(c)）。特别是绿氢的平准化成本，作为一大关键成本驱动因素，其水平取决于由可再生能源质量驱动的低碳电力的成本和可获得性。因此，不同地区的合成燃料生产成本差异很大。随着技术学习、技术发展和规模经济的推进，预计在未来几十年里，合成燃料成本的主要驱动因素将大幅下降，从而提升其整体竞争力。

图10：按技术、地区和年份分列的合成燃料生产成本差异

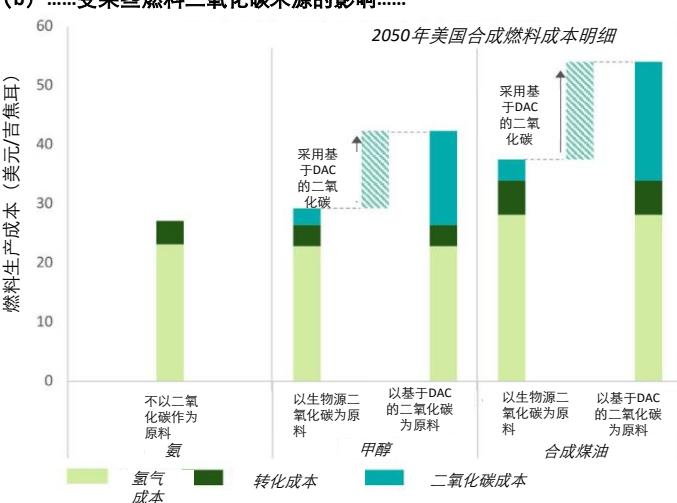
(a) 合成燃料的生产成本差异很大



(c)各地区的成本说明



(b)受某些燃料二氧化碳来源的影响.....



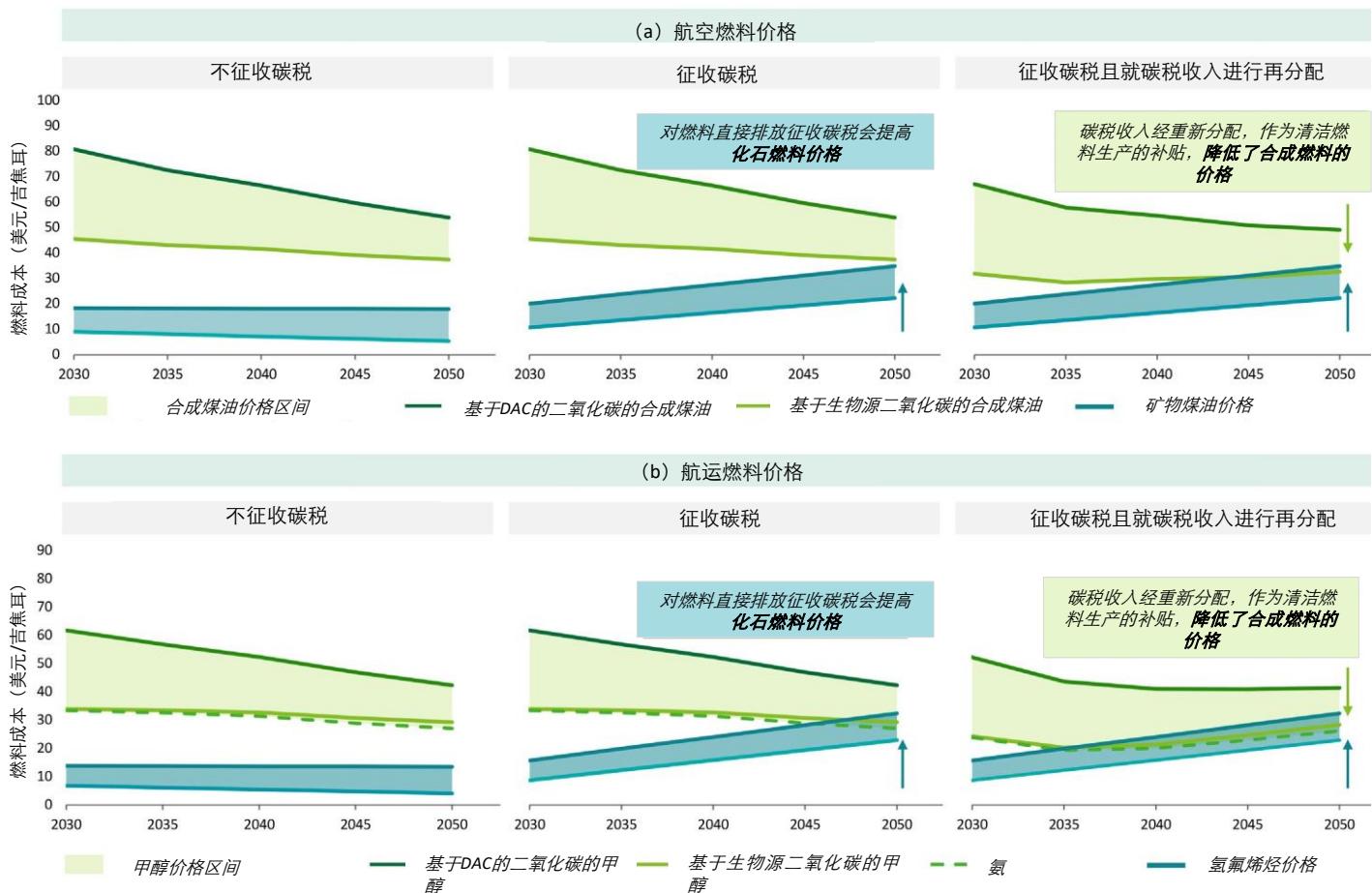
资料来源：德勤基于技术经济建模及HYPE模型分析结果进行的分析

合成燃料的成本比传统化石燃料昂贵得多。根据地理位置和所用二氧化碳来源的不同，航空业和航运业合成燃料的生产成本可能是化石燃料平均价格的两到十倍（见图11左）。尽管合成燃料的成本预计会下降，但在缺乏实质性的政策干预的情况下，这种价格差异预计在长期内仍将持续存在。

在化石燃料价格中考虑碳这一因素后，⁷⁹航运业合成燃料的生产成本仅可在2045年后才能与化石燃料价格持平（见图11中）。将支持性费用纳入合成燃料成本考量，利用碳定价机制产生的收入补贴合成燃料的成本，此举将逐步降低生产成本，并使其趋于平稳。

在短期内，即在成本差距最大时，碳税收入将集中在有限的几个合成燃料项目上。长期来看，尽管碳价会升高，但由于化石燃料使用的减少，碳税将针对较少的排放征收。此种补助计划将缩小成本差距，并加快合成燃料转型步伐。在某些情况下，最早可以在2035年实现在航运业中的成本竞争力，在2045年实现在航空业中的成本竞争力（见图11右）。然而，由于低成本二氧化碳原料的供应有限，以及对清洁氢和可持续二氧化碳的跨行业争夺，从长远来看，合成燃料供应中的重要组成部分（尤其是合成煤油和甲醇），其成本将仍比传统化石燃料昂贵。

图11：航空业和航运业化石燃料与合成燃料之间的成本差异走势



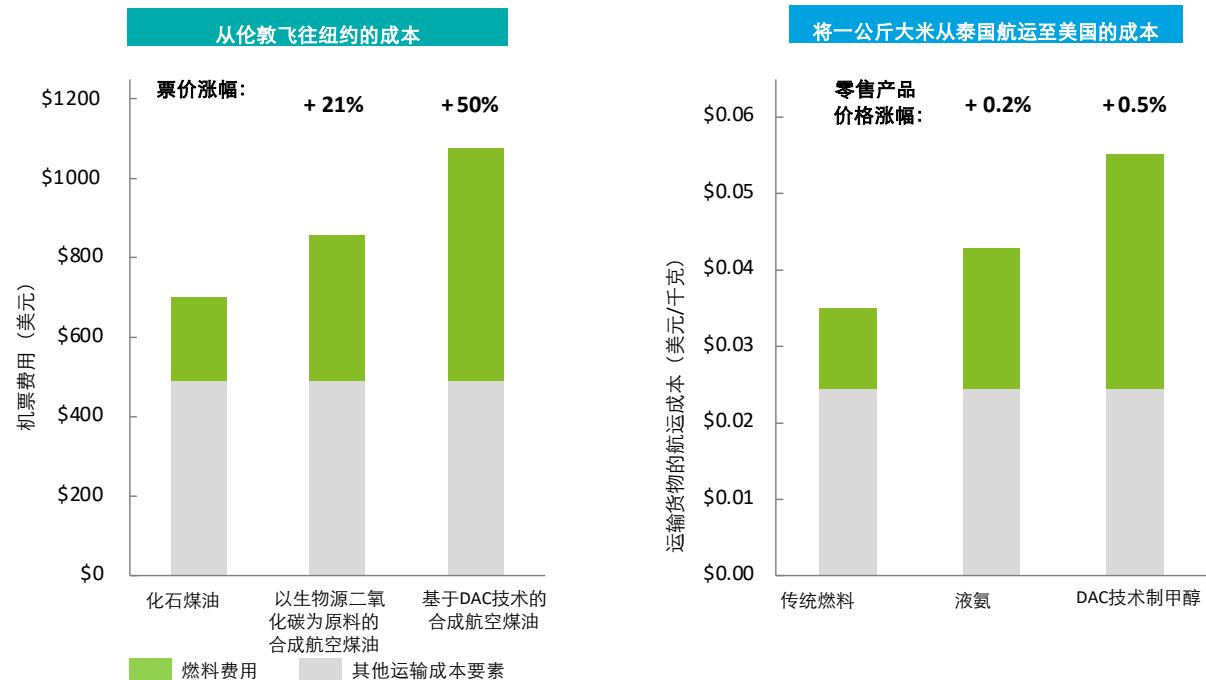
资料来源：德勤基于技术经济建模及HyPE模型分析结果进行的分析。化石燃料价格区间基于国际能源署³⁹的相关数据，并参考了净零排放和既定政策情景下的原油价格趋势。⁶⁶碳税：将从2030年25美元/吨二氧化碳线性增加至2050年的250美元/吨二氧化碳，以与国际能源署的净零排放情景保持一致。合成燃料价格乃基于针对美国进行相关建模得出的成本。

合成燃料的生产虽然涉及额外的财务投入，但相比化石燃料，其所需的投资成本仍在可控范围内。为了满足航空业和航运业对16艾焦耳低碳燃料的需求，我们必须建立相应的供应链，这涉及部署2,500吉瓦的风能和太阳能发电能力、2,000吉瓦电解槽设施，以及7亿吨气候中性的二氧化碳资源，同时还需配备相应的转换工厂。总体而言，预计到2050年累计共需3.2万亿美元投资，折算到每年将不会超过1,300亿美元，在同等供应量规模下，与目前航空和航运燃料的开支水平持平，⁸⁰但比起化石燃料行业的当前投资还是微不足道（预计2024年化石燃料行业的投资额为1.1万亿美元⁸¹）。

考虑到航运和航空公司的利润空间收窄，转向低碳燃料所带来的额外成本很可能将转嫁给终端消费者。尽管如此，合成燃料在航空和航运领域的应用效果依旧呈现出显著差异（见图12）。燃油费用在机票价格构成中占据了很大的比重，约占票价的25-30%。⁸²若以每吉焦35美元⁸³的合成煤油替代化石煤油，那么从伦敦飞往纽约的七小时航班成本可能会增加150美元以上。⁸⁴若生产合成燃料所需的二氧化碳来源于直接空气碳捕获技术，则相关成本涨幅甚至可能翻番，导致机票价格上涨约380美元。不过，合成燃料的应用遵循渐进方式，过程中其成本也会

持续下降，这有助于在短期和长期内减轻对消费者和航空公司的经济影响。相比之下，由于运输成本在货物最终售价中所占比重不大，因此，在航运领域终端消费者受燃料价格波动的影响相对较小。即使是使用氨或甲醇等新型燃料，其带来的成本增加对终端消费者来说几乎无法察觉。举例而言，将一公斤大米从泰国运至美国的成本大约为3.5美分，⁸⁵这还不到其零售价（约4美元/公斤）的1%。即使是使用成本翻倍的燃料，额外成本的增加也不会超过1%（见图12）。总体而言，不同运输行业受能源转型影响的程度各异，与航空业相比，航运业更易于将成本增加转嫁至终端消费者。

图12.改用合成燃料对航空业和航运业中运输费用及终端产品的成本影响



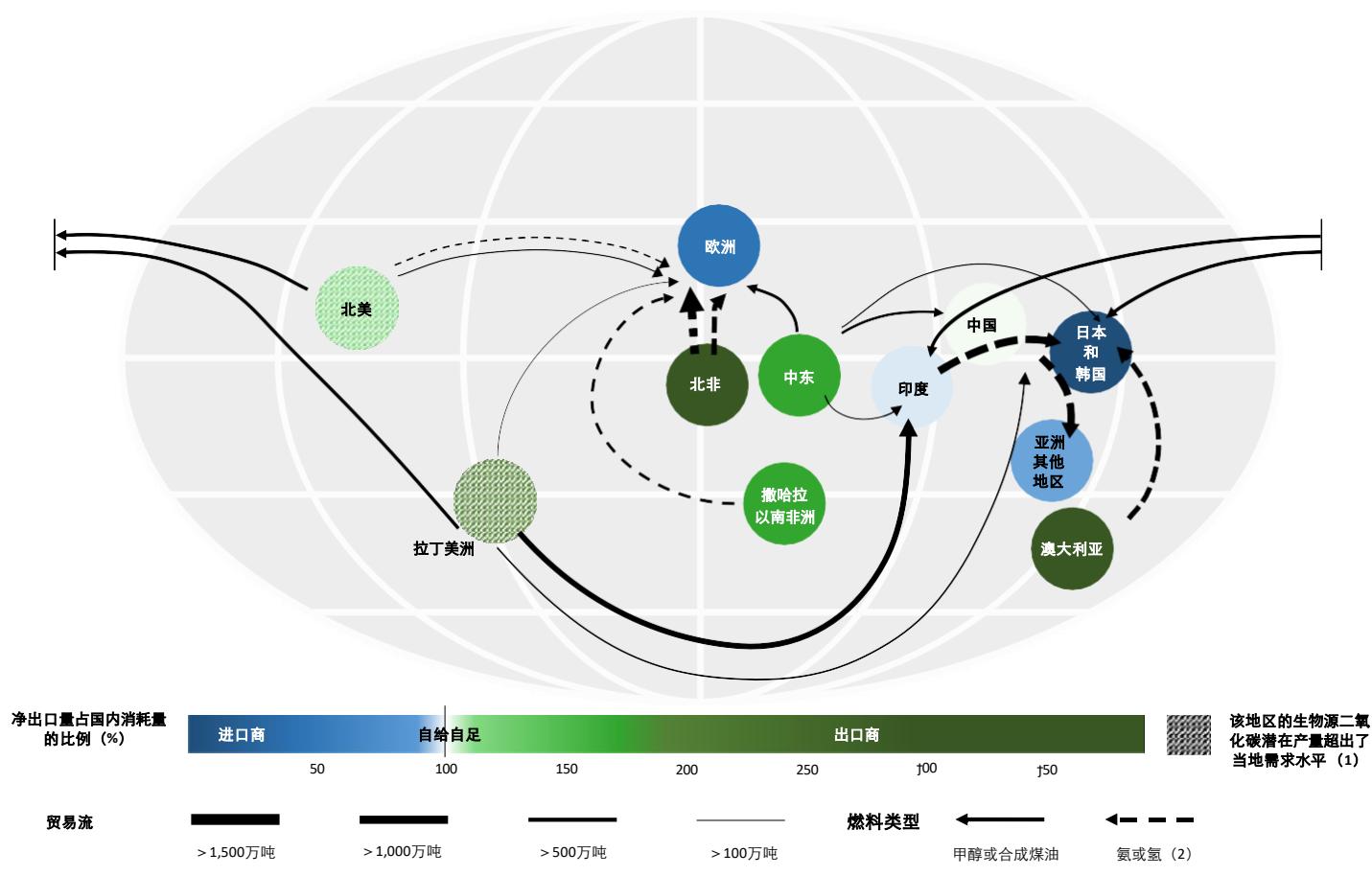
资料来源：德勤基于HyPE模型进行的分析，其中模型预测的合成燃料成本反映了2040年在美国生产这些燃料的平均成本水平。

3.3 贸易连接供需

由于最佳生产地点并非总是临近需求中心，加之合成燃料的运输成本远低于其生产成本，因此全球贸易有助于削减成本，同时缓解区域间的供需失衡。⁶ 拥有丰富可再生能源资源和生物源二氧化碳资源的地区（如北美和南美），有望成为合成燃料的主要生产地，尤其是生产终端产品价值较高而运输成本较低的合成煤油（见图13）。凭借其巨大的生物源二氧化碳潜力，这些地区在生产合成燃料方面具备明显的竞争优势。同时，

可再生能源丰富但生物源二氧化碳资源有限的地区（如北非和撒哈拉以南非洲），则更适宜专注于生产和出口不含二氧化碳成分的氨作为合成燃料。生物源二氧化碳的稀缺限制了这些地区在碳基合成燃料方面的出口能力。不过，其拥有充沛的可再生能源资源，依然有望成为氨的主要出口地。

图13.2050年按最终用途分子划分的氢衍生物全球贸易图



(1) 生物源二氧化碳的供应状况按区域进行评估。

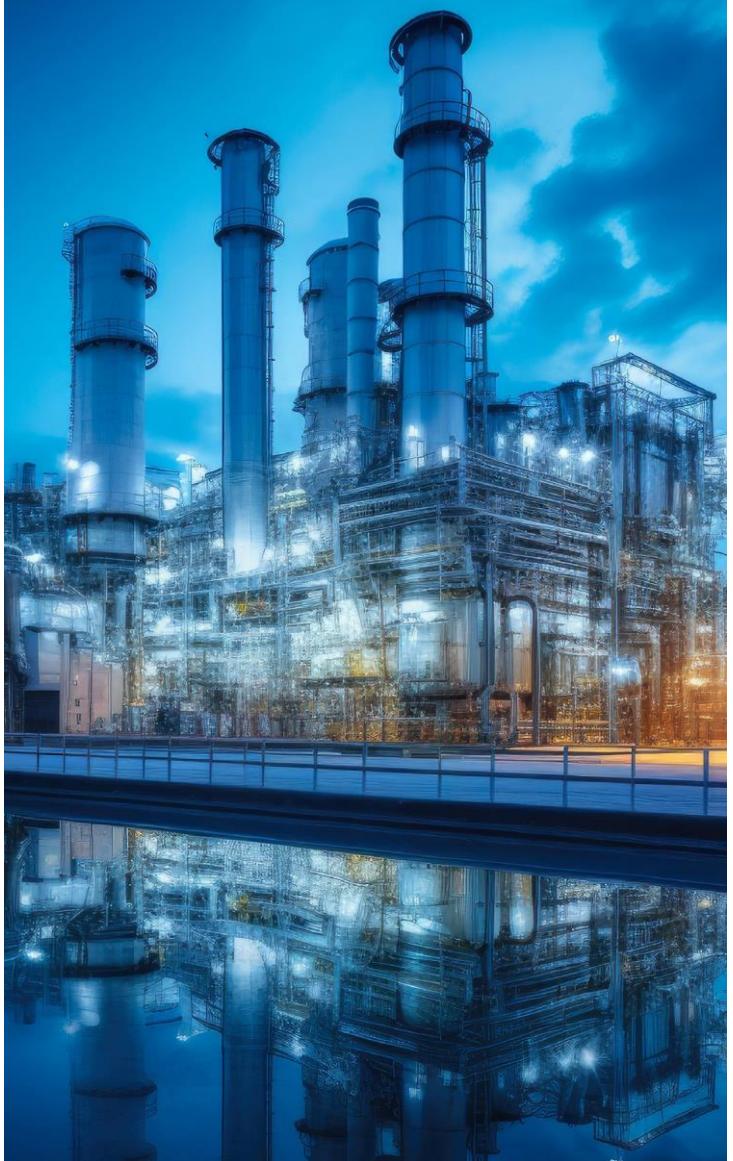
(2) 氨可被用作远距离运输氢气的载体。从北非到欧洲的第二条贸易线路交易的是管道输送的纯氢。

资料来源：德勤基于HyPE模型分析结果进行的分析。

基础设施可用性是合成燃料贸易的关键驱动因素。尽管中东地区并不具备丰富的生物源二氧化碳资源，却凭借其现成的出口基础设施、富饶的低碳氢资源以及雄厚的经济实力（可大规模部署直接空气捕获技术），成为出口甲醇的主要产地。该地区毗邻欧洲等主要需求中心，在甲醇出口方面具备天然优势。尽管甲醇的运输成本高于合成航空煤油，但在短距离运输中，甲醇仍然具有更高的经济可行性。与欧洲、日本和韩国等能源需求旺盛的需求中心不同，中国和印度拥有丰富的可再生能源资源。然而，由于生物源二氧化碳资源短缺，这两个国家预计将进行双向交易：一方面大量进口甲醇和合成煤油，另一方面出口氨和氢，以此实现供需平衡且近乎自给自足的能源经济格局。

合成燃料的全球贸易，受区域特性、资源禀赋、基础设施可用性以及经济实力的综合影响，对于平衡全球供需至关重要。这一复杂贸易网络既能缓解区域间供需失衡，也有助于通过资源优化配置提升整体经济效率。

随着全球迈向净零未来，合成燃料的全球贸易预计将在确保所有参与国的能源安全、经济可行性和环境可持续性方面发挥关键作用。



4. 行动呼吁

航空业与航运业实现脱碳需要大规模生产合成燃料。根据德勤预测，到2030年，合成燃料的需求量将达到1.6艾焦耳，而到2050年将攀升至近16艾焦耳。后者意味着届时需要超过1.5亿吨的清洁氢能，以及近7亿吨的基于DAC技术捕获的二氧化碳和生物源二氧化碳。为了满足这一需求，到2050年，氢能生产、燃料合成以及直接空气捕获技术，将需要9,000至10,000太瓦时的清洁电力

（相当于2023年全球发电量

的三分之一），具体取决于所使用的低碳二氧化碳来源。这一电力需求构成了巨大挑战，超出了当前全球可再生能源发电量逾1,000太瓦时。⁸⁶因此，欲充分发挥合成燃料的脱碳潜力，必须大幅扩展可再生能源发电能力，幅度甚至超过过去20年所取得的进展。⁸⁶

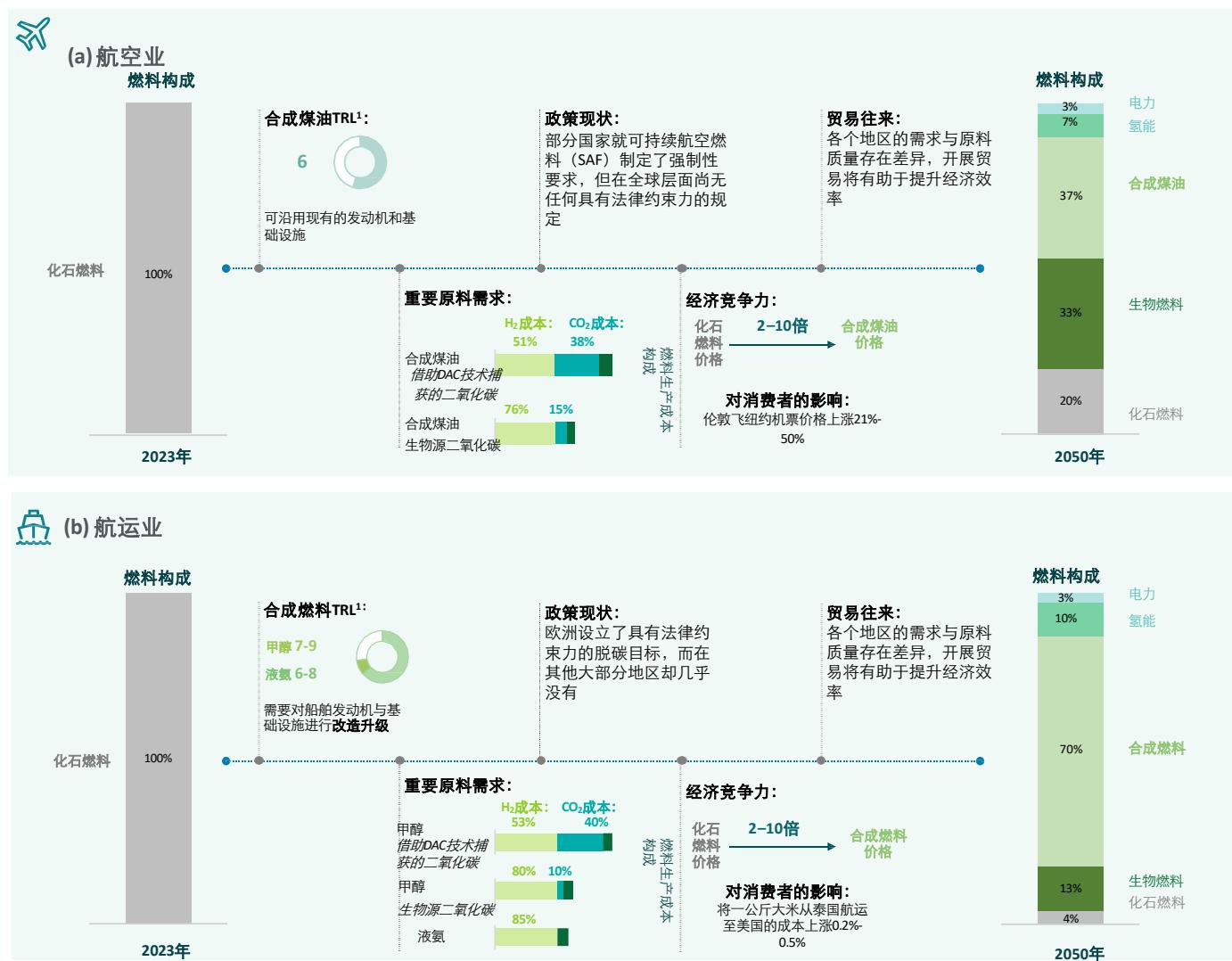


4.1 推广低碳燃料所面临的挑战

目前，航空业与航运业高度依赖化石燃料。合成燃料是推动这两大行业脱碳转型的关键，但相对较低的技术就绪度和高昂的生产成本限制了其快速应用。在航空领域，尽管现有基础设施与飞机制造技术大多已支持使用合成煤油，但其生产仍处于起步阶段（见图14.a）。而在航运领域，尽管氨和甲醇等的相关技术更为成熟，但仍需开发新型燃料补给技术、发动机解决方案以及配套的加注基础设施（见图14.b）。

除了区域与国家层面的政策支持以外，构建全球统一的监管框架对于这些本身具有国际性质的行业实现有效脱碳至关重要。根本而言，航空业与航运业欲实现能源结构转型，摆脱对化石燃料的依赖，必须动员政策制定者、国际机构、燃料供应商、生产商、港口与机场管理机构、航空公司以及航运企业等所有利益相关方协同合作，采取积极行动。

图14. 航空业与航运业的脱碳路径——需求与对策概览



资料来源：德勤基于前文各章节结论进行的综合分析

4.2 未来展望

制定政策为区域市场创建营造条件

政策制定者在营造有利于低碳燃料转型的条件、构建所需的法规环境以及维持转型势头方面发挥着关键作用。他们应制定明确的战略，包括能源与气候战略以及行业转型路线图，为相关行业提供极为重要的前瞻视角，助力企业能够有效应对投资过程中的不确定性和相关风险。通过推行配额制或掺混指令等监管措施，政策制定者能够推动购买低碳燃料并逐步扩大其应用规模，同时动员供应链上的所有参与者采取行动，而这些燃料的成本在很长一段时间内都高于化石燃料。因此，尽管推行配额制或掺混指令是推动购买的关键，但从长远来看，政策制定者可借助税收激励与支持措施来弥合成本差异。依靠这些措施可能还不够，还需引入补充机制（化石燃料定价）并将由此产生的收入用于推动低碳燃料的发展，这将有助于加快实现合成燃料与化石燃料同价。

确立构建全球市场所需的通用规则

行业协会及相关机构等国际组织担任着关键职责，负责制定通用规则与标准，以助力推动全球实现能源有序转型。健全的认证体系通过提供可信的可持续性保障，对于低碳燃料价值链各环节的价值创造至关重要。鉴于合成燃料的碳足迹会因生产路径和所在区域的不同而存在巨大差异，在全球范围内制定协调一致的分类法、定义以及碳定价实践等规则体系和目标，有助于防止碳泄漏或套利行为。⁸⁷ 设定全球统一的可持续燃料定义将有助于防止过往出现的滥用情形，例如为追求成本最小化，航运公司利用“挂旗”⁸⁸策略规避海事环保规定。⁸⁹

积极保障可持续原料供应

航空业的脱碳将依赖可持续航空燃料这一即用型燃料，而航运业则将以氨和甲醇作为主要动力源。鉴于这些新型燃料目前还处于早期开发阶段且供应链较为复杂，其供应准备周期相对较长。燃料供应商需从头构建新的供应链，并且需要通过对战略产地进行早期投资，以及与上游供应链参与者建立合作伙伴关系，确保低成本清洁氢气和二氧化碳原料的供应。技术和市场的不确定性带来了重大风险，这不仅增加了生产及运输设施的融资成本，也阻碍了这些设施的发展。通过采取诸如签订长期采购合同以及引入不同的担保机制（包括性能和收入保障等）等去风险措施，可在一定程度上缓解这些风险，进而促进投资并降低融资成本。最后，在搭建合成燃料供应链的过程中，混合使用生物燃料不仅有助于技术的规模化升级和必要基础设施的建设，也有助于实现脱碳目标。在这一过程中，合成燃料在航空和航运领域的燃料构成中所占的比重将逐渐增加。

搭建充足的基础设施，升级适用的推进技术

港口与机场管理机构作为航空业与航运业采用合成燃料的主要推动者，负责搭建必要的加注基础设施。为使用低碳燃料，机场现有的基础设施仅需稍作调整即可投入使用，而港口基础设施则需要大幅改造，这就构成巨大挑战。港口管理机构需审慎考量供应的燃料类型、供应时间及供应量，并须开发多种燃料兼容的基础设施，既能兼顾传统化石燃料船舶的加油需求，也能为领先航运公司那些采用甲醇和氨作为燃料的船舶提供加注服务。

飞机制造商与船舶制造商应努力推出采用低碳燃料作为动力源的飞机和船舶。对于飞机制造商，这意味着必须确保飞机引擎能够适配高混合比的合成及生物基燃料。对于船舶制造商，这一转型的挑战更为复杂，原因在于其需要开发出以甲醇和氨作为动力源的新型船舶，而这些物质之前从未作为船舶燃料使用。为了减少资产搁浅风险，航空公司和航运企业需积极改造其机队或船队，以满足转型需求。举例而言，配备“双燃料”系统或“合成燃料兼容”的船舶，能够在继续使用传统化石燃料的同时，也为未来切换到以低碳燃料作为动力源做好准备。此外，鉴于全球范围内可持续二氧化碳和清洁氢气原料分布不均，拥有固定港口的大型航运企业在制定燃料采购战略时，还应充分考虑地理位置因素。

效率提升措施效果立竿见影

在长远来看，实现气候目标的唯一途径是告别化石燃料，转而使用低碳燃料。¹²⁷然而，目前相关技术尚未完全成熟，面对气候变化的紧迫性，加速脱碳进程势在必行。无论是运营还是技术方面的效率提升，均能大幅削减燃料消耗，降低相应的运营成本（以保持竞争力），并减少温室气体排放。航空公司和航运企业仅需少量前期资本投入，即可通过诸如路线优化、速度管理和物流改进等效率提升措施，快速取得成效。这些措施不仅有助于减排，还能够通过减少昂贵合成燃料的使用，在长期内维持企业的竞争优势。

技术效率提升，涉及优化空气动力学和流体力学设计、引进更高效的机动化技术以及实现设备轻量化，都须对飞机和船舶技术进行前期投资。对此，飞机制造商与船舶制造商须加大研发投入，推动技术创新，并优化设计，确保能高效适配未来的燃料组合。

通过战略决策与创新商业模式实现协同行动

航空公司与航运企业处于中心地位，负责将设备制造商与燃料供应方（上游）、港口与机场（中游），以及消费者（下游）等所有利益相关方紧密联系起来。这些企业还推出可持续的商业方案，极大促进整个价值链的全面变革。为了克服航空业与航运业所面临的三重“鸡与蛋”困局，必须在整个行业生态系统内展开协同行动。这不仅要求燃料供应商与上游原料生产加工实体、飞机制造商与船舶制造商、机场与港口管理机构、以及航空公司与航运企业之间的战略合作，也须确保终端消费者的积极参与。

航空业与航运业的脱碳（包括合成燃料的推广），是一项艰巨的技术、经济和金融挑战，迫切需要所有利益相关方紧密协作。尽管困难重重，但通过出台有针对性的政策和组织关键参与者紧密协作，我们有能力攻克这一艰巨任务。这种跨领域合作将为实现清洁可持续未来铺平道路，助力全球脱碳，推动公正转型，促进经济发展，尤其是对于那些拥有丰富可再生能源资源但缺少低成本资本支持的全球南方地区。⁶²此举将有助于构筑一个坚韧而繁荣的低碳经济体系，惠及未来世代。

航空业与航运业的脱碳进程（包括合成燃料的推广），是一项艰巨的技术、经济和金融挑战，迫切需要所有利益相关方紧密协作。这种跨领域合作将为实现清洁可持续未来铺平道路，助力全球脱碳，推动公正转型，促进经济发展。



附录

附录1. 氢能路径探索者 (HyPE) 模型简介

氢能路径探索者 (Hydrogen Pathway Explorer, HyPE) 模型是德勤开发的全球清洁氢及其衍生合成燃料供应与贸易模型。该模型旨在识别最具成本效益的路径，以平衡2025至2050年期间点对点氢能及其衍生合成燃料（如甲醇、氨和合成煤油）的需求与供应，并优化不同区域间的运输。该模型所提供的洞察可被视为对合成燃料未来前景的展望。有关HyPE模型的更多信息，可参考德勤最新发布的全球清洁氢展望报告⁶及相关科学出版物。²⁵

本研究使用了先前研究中提及的HyPE模型数据，其中借鉴了德勤最新发布的关于欧盟低碳氢法规影响的出版物，⁹⁰同时轻微修改了氢及其衍生物的需求数据、相关技术的过夜成本以及合成燃料生产所需二氧化碳和电力的成本。图15汇总了在HyPE模型建模过程中用作输入数据的各项成本的最新数值。

根据氢能发展趋势及最新的公开声明和展望，与2023年的全球清洁氢能展望研究报告相比，本研究对氢需求预测值进行了适度下调。在本研究使用的德勤2024年度情景分析中，我们预计到2030年，工业领域对纯氢的需求将达到8,900万吨，而到2050年则将攀升至1.89亿吨。同时，电力领域在2030年和2050年的氢需求分别将达到1,300万吨和6,200万吨氢当量。此外，航空与航运领域的需求预测亦经过重新估算，结果显示，2030年和2050年对合成燃料的需求分别将达到7,500万吨和1.54亿吨氢当量。总体而言，预计到2030年和2050年，全球对清洁氢及其衍生物的需求分别将降至1.3亿吨和4.8亿吨氢当量（德勤2023年全球清洁氢能展望报告中的预测值分别为1.7亿吨和5.98亿吨氢当量）。⁶

图15. 技术成本最新数据

技术成本	单位	2030年	2050年	
碱性电解槽	资本性支出*	美元/千瓦时	620–960 ⁹¹	400–680 ⁷⁷
风力涡轮机	资本性支出*	美元/千瓦时	1050–1350 ⁹²	1000–1250 ⁹²
太阳能光伏	资本性支出*	美元/千瓦时	400–750 ⁹³	300–550 ⁹³
转换成本				
氨合成技术	资本性支出	美元/[吨氨/年]	878 ⁷⁷	551 ⁷⁷
	固定运营成本	美元/[吨氨/年]	26 ⁷⁷	17 ⁷⁷
	可变运营成本	美元/吨氨	0.1 ⁷⁷	0.1 ⁷⁷
合成煤油合成技术	资本性支出	美元/[吨十二烷/年]	2325 ⁹⁴	1369 ⁹⁴
	固定运营成本	美元/[吨十二烷/年]	93 ⁹⁴	55 ⁹⁴
	可变运营成本	美元/吨十二烷	30 ⁹⁴	30 ⁹⁴
甲醇合成技术	资本性支出	美元/[吨甲醇/年]	739 ⁷⁷	591 ⁷⁷
	固定运营成本	美元/[吨甲醇/年]	21 ⁷⁷	18 ⁷⁷
二氧化碳成本				
DAC技术	资本性支出 仅指直接空气捕获装置成本	美元/吨二氧化碳/年	585 ⁷³	398 ⁷³
	固定运营成本 仅指直接空气捕获装置成本	美元/吨二氧化碳	24 ⁷³	18 ⁷³
生物源二氧化碳	捕获每吨二氧化碳的平均成本	美元/吨二氧化碳	30 ⁶⁴	30 ⁶⁴

资料来源：德勤基于表中所示数据来源进行的分析。

*成本数据中涵盖地区差异。所有成本数据均以2022年美元计价。

附录2. 航空业与航运业效率提升情况的计算方法

在本报告中，我们基于对多种减排措施潜在效果的分析论述以及对机队/船队发展的模拟预测，建模计算了航空业和航运业在技术和运营两方面的效率提升情况。这里所构建的情景相对保守：剔除了技术就绪度最低的技术，同时，在净效率提升尚不明确的情况下，选取了潜在提升的中位值作为评估基准。

在航空领域，我们对不同代际、不同效能的飞机进行了建模。所谓“上一代”飞机是指2015年之前交付的机型，约占当前机队的70%。我们预计这批飞机将逐步淘汰，最后一批预计将于2040年退役。而“新一代”飞机则代表当今市场上性能最佳的机型，预计其效率较现有机队平均水平高出16%。我们预计2040年之前，这些新型飞机将逐年加入机队。之后，所有新销售的飞机都将属于“未来一代”飞机。第三代飞机预计将在2035年左右面市，其效率有望比前一代提高30%。根据德勤的分析预测，随着机队的更新换代及新飞机的引入，到2050年，机队将主要由60%的“未来一代”飞机和40%的“新一代”飞机组成。

航空运营效率提升数据，基于国际清洁交通委员会（ICCT）的“转型”情景分析得出。⁹⁵该情景考虑了有效载荷和航班流量的双重效率提升，但未包含编队飞行的影响。

在航运领域，我们预计自2025年起新加入船队的船舶，其效能预计会比现有船舶的平均效率高出20%。这一略显保守的估计符合能源效率设计指数的要求，⁹⁶与多项技术评估的结果一致，^{8,48,53}且能在不依赖尚处在试点阶段的技术解决方案的前提下实现。⁹⁷考虑到航运资产的使用寿命较长，新船的引入将逐步进行。据此，预计到2030年，这类高效船舶将约占船队的20%，到2040年将增至57%，到2050年则将达到93%。

到2050年，航运领域在运营效率方面的潜在提升有望减少19%的燃料消耗。⁵⁴要实现这一效率提升所需的投资较少，主要用于部署数字化解决方案。根据德勤设定的情景，预计在2040年之前，航运领域能够实现80%的运营能源效率改进。

附录3.生物燃料供应链中可持续原料供应潜力的计算方法

对于生物能源所需生物质原料的潜在供应量，各类估计值差异较大。这是由于这些估计值基于多种假设：其中包括对废料和残留物作为原料的经济潜力评估、对可持续发展要求的遵循情况，以及考虑到未来食物需求的不确定性，对能源作物所需土地面积的估算。^{43,45}在计算可持续生物质资源的产出潜力时，综合考虑了不同原料类别，并借鉴众多研究的数据。

- a.首先是能源作物，这类作物主要用于生产生物燃料、沼气和电力，主要包括柳枝草、芒草及部分柳树和杨树品种等生长周期短、生物质产量高的植物。²⁷为了避免与粮食行业争夺土地资源，这些作物应优先在不适宜种植粮食的土地上种植，比如受污染地块或边际地块。预计到2050年，能源作物的潜力将介于7-700艾焦耳之间，而本研究所采用的估算平均值为109艾焦耳。⁴⁵
- b.对于农业原料，其生产应保障粮食供应不受影响，避免引起土地用途发生重大变动，同时应确保在生物多样性和水资源可用性及质量方面保有积极的可持续性评估结果。⁴⁵据国际能源署估计，农业原料的潜力将介于60-100艾焦耳之间，而据经合组织和联合国粮农组织（FAO）预计，到2033年这一数值大约为80艾焦耳。^{43, 98}
- c.农业废弃物类别主要包括玉米、谷物、水稻和甘蔗等主要作物收割期间产生的副产品，以及这些作物在磨坊加工后产生的残留物。农用工业应当确保资源的合理分配，既预留部分资源用于动物饲养，又要确保有充足的残留物以保护土壤。根据国际能源署的预测，到2060年，农业废弃物的潜力预计将介于46-95艾焦耳之间。⁴³

d.木材采伐包括在可持续林业计划框架下的木质生物质利用，其中应明确将保护区划出采伐范围以保障土壤健康。²⁷根据国际能源署的预测，到2060年，其能量产出潜力预计将介于15-30艾焦耳之间。⁴³而根据国际可再生能源机构预测，到2050年，这一潜力预计将介于5-95艾焦耳之间。⁴⁵

e.市政垃圾包含那些不再具有其他用途、必须加以回收与管理的物料。将市政固体废物（MSW）中的生物质部分用作燃料或原料，提供了一种替代传统垃圾填埋处理方式的环保处理策略。根据国际能源署的预测，到2060年，市政垃圾的潜力预计将介于10-15艾焦耳之间。⁴³

在汇总这些数据计算出整体的可持续原料供应量之后，还需综合考虑其他因素以评估生物燃料的生产潜力：收集率适用于部分城市固体废物，对于废弃油脂而言，根据国际可再生能源机构（IRENA）的研究采用了平均为26%的收集率。⁴⁵对于其他城市固体废物，约有一半属于有机废物，被假设是既具有可持续性又适合转化为生物燃料的资源。²⁷

对于农业和林业残留物而言，其也面临着来自食品、制造业和工业等领域的原料竞争。因此，估计仅有约8%的农业产品⁹⁸和11%的能源作物可用于生物燃料的生产。^{43, 94}

转化率考虑了将原料转化为生物燃料过程中的能量损失。在市政垃圾的转化过程中，主要依靠气化/费托合成路径（占比50%）以及加氢处理酯和脂肪酸（HEFA）路径，这两种方式的转化率分别为20%和90%。而对于其他农作物的转化，则将结合使用气体化/费托合成工艺（50%）与酒精喷射技术（alcohol-to-jet，50%）的路径，这两种方式对应的生物燃料转化率分别为20%和13%。²⁷

尾注

1. Intergovernmental Panel on climate Change, “[Global Warming of 1.5° C - Summary for Policymakers](#)”, 2018.
2. World Resources Institute, “[4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors](#)”, 2020.
3. Deloitte, “[Financing the Green Energy Transition – A US\\$50 Trillion Catch](#)”, November 2023.
4. See for instance Julianne DeAngelo, et al., “[Energy systems in scenarios at net zero CO2 emissions](#)”, Nature Communications, 2021, Oytun Babacan, et al., “[Assessing the feasibility of carbon dioxide mitigation options in terms of energy usage](#)”, Nature Energy, 2020 and Behrang Shirizadeh et al., “[The impact of methane leakage on the role of natural gas in the European energy transition](#)”, Nature Communication, 2023.
5. See for instance Marianne Zeyringer, et al., “[Designing low-carbon power systems for Great Britain in 2050 that are robust to the spatiotemporal and inter-annual variability of weather](#)”, Nature Energy, 2018, Behrang Shirizadeh and Philippe Quirion, “[Low-carbon options for the French power sector: What role for renewables, nuclear energy and carbon capture and storage?](#)”, Energy Economics, 2021.
6. Deloitte, “[Green Hydrogen: Energizing the Path to Net Zero – Deloitte’s 2023 Global Green Hydrogen Outlook](#)”, June 2023.
7. Clean air Task Force, “[Decarbonizing Aviation: Enabling Technologies for Net-Zero Future](#)”, April 2024.
8. International Renewable Energy Agency, “[A Pathway to Decarbonise the Shipping Sector by 2050](#)”, October 2021.
9. International Energy Agency, “[Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer](#)”, accessed September 2024.
10. Our World in Data, “Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?”, September 2020.
11. Our World in Data, “[What Share of Global CO2 Emissions Come from Aviation](#)”, April 2024.
12. World Economic Forum, “[If shipping were a country, it would be the world’s sixth-biggest greenhouse gas emitter](#)”, April 2018.
13. Transport and Environment, “[Climate Impact of Shipping](#)”, accessed September 2024.
14. It is worth mentioning that supply chain optimization through production relocation requires significant capacity building and fundamental investments in trade and production capacities, not only for the industrial processes but also clean energy production.
15. Tao Cao, Masahiro Sugiyama and Yiyi Ju, “[Prospects of regional supply chain relocation for iron & steel industry decarbonization: A case study of Japan and Australia](#)”, Resources, Conservation and Recycling, October 2024.
16. European Commission, “[Biofuels](#)”, accessed September 2024.
17. Energy Education, “[Biofuel](#)”, accessed September 2024.
18. Sustainable Shipping Initiative, “[Availability of sustainable biofuels](#)”, June 2021.
19. International Transport Forum, “[The Potential of E-fuels to Decarbonise Ships and Aircraft](#)”, January 2023.
20. Synthetic methane (CH₄) can also be a fuel option in the maritime industry in its liquefied form. It is however unlikely to be competitive for economic (its supply chain is more complex and energy-intensive) and environmental (high methane slips increase its GHG footprint) reasons. It is therefore excluded of this analysis.
21. N_{2(g)} + 3H_{2(g)} → 2NH_{3(g)}
22. 3H₂ + CO₂ ⇌ CH₃OH + H₂O for methanol production, and nCO₂ + (3n + 1)H₂ → C_nH_{2n+2} + 2nH₂O (with n between 10 and 15) for synthetic kerosene production.
23. In other words, originally removed from the atmosphere by natural processes and meant to be remitted naturally due to biogenic degradation processes
24. Gondia S.Seck et al., “[Hydrogen and the decarbonization of the energy system in Europe in 2050: A detailed model-based analysis](#)”, Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 167, October 2022
25. Behrang Shirizadeh et al., “[Towards a resilient and cost-competitive clean hydrogen economy: the future is green](#)”, Energy & Environmental Science Vol. 16(12),2023.
26. Behrang Shirizadeh et al., “[The impact of methane leakage on the role of natural gas in the European energy transition](#)”, Nature Communications Vol. 14,2023
27. International Energy Agency, “[Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 ° C Goal in Reach – 2023 Update](#)”, September 2023.
28. Switching from one to another transport mode (e.g., tourists favoring high-speed rail over regional aviation).
29. Demand reduction with new eco-conscious habits (e.g., rise of virtual meetings reducing business travels).
30. ICAO, “[Air Transport Statistical Results](#)”,2019.
31. Assuming 100 kilograms for each passenger, including his/her baggage.
32. Based on [ICCT, ICF, Air Transport Action Group](#).
33. International Energy Agency, “[Energy intensity of commercial passenger aviation in the Net Zero Scenario, 2000-2030](#)”, July 2023.
34. Fuel burn has historically been reduced at a compound rate of 1%/year over the period from 1960 to 2019;The International Council on clean Transportation, “[Fuel Burn of the New Commercial Jet Aircraft: 1960 to 2019](#)”, White Paper, September 2020.
35. Mission Possible Partnership, “[Making Net-Zero Aviation Possible - An industry-backed, 1.5° C-aligned transition strategy](#)”, 2020.
36. Aerospace Industries Association, “[HORIZON 2050 - A Flight Plan for the Future of Sustainable Aviation](#)”, April 2022.
37. Using fewer vehicles to carry the same number of passengers or the same weight of products, through enhanced capacity factor and filling rate of vehicles.
38. Optimized fuel loading or congestion management to minimize induced extra fuelconsumption.
39. International Energy Agency, “[The Role of E-fuels in Decarbonising Transport](#)”, December 2023.
40. International Energy Agency, “[Aviation and Shipping – Net Zero Emissions Guide](#)”, September 2023.
41. 2023 aviation CO₂emissions have been estimated at 886 MtCO₂ based on IATA, “[Industry Statistics – Factsheet](#)”, June 2024.
42. International Energy Agency, “[Biofuels](#)”, accessed in September 2024.
43. International Energy Agency, “[Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction](#)”, 2019.
44. Behrang Shirizadeh and Philippe Quirion, “[The importance of renewable gas in achieving carbon-neutrality: Insights from an energy system optimization model](#)”, Energy Volume 255, 2022.

45. International Renewable Energy Agency, “[Reaching zero with renewables: Biojet fuels](#)”, 2021.
46. World Economic Forum, “[Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation](#)”, November 2020.
47. United Nations Conference on Trade & Development, “[Review of Maritime Transport 2021](#)”, 2021.
48. Mission Possible Partnership, “[A Strategy for the Transition to Zero-Emission Shipping](#)”, 2022.
49. United Nations Conference on Trade & Development, “[Review of maritime transport 2023](#)”, 2023.
50. International Energy Agency, “[Energy intensity of international shipping in Net Zero Scenario, 2015-2030](#)”, November 2021.
51. IPCC, [Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change](#), 2022.
52. International Maritime Organization, “[Improving the energy efficiency of ships](#)”, accessed September 2024.
53. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, “[Maritime Decarbonization Strategy 2022](#)”, December 2022.
54. Concawe, “[Technological, Operational and Energy Pathways for Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050](#)”, February 2022.
55. Climate Action Tracker, “[Countries](#)”, accessed in September 2024.
56. In 2022, ICAO (International Civil Aviation Organization) member states adopted a “[Long-Term Aspirational Goal](#)” to achieve net zero carbon emissions from international aviation by 2050. Similarly, in 2023, IMO (International Maritime Organization) published its “[Revised GHG Emissions Strategy](#)”, aiming for net-zero GHG emissions from international shipping by or around 2050.
57. European Parliament, “[Cutting emissions from planes and ships: EU actions explained](#)”, accessed in September 2024.
58. International Energy Agency, “[Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database](#)” accessed in September 2024.
59. International Energy Agency, “[Policy database](#)”, accessed in September 2024.
60. OECD-International Transport Forum, “[Sustainable Aviation Fuels Policy Status Report](#)”, July 2023.
61. World Trade Organization, “[Sustainable Aviation Fuels Subsidies meeting report](#)”, April 2024.
62. Deloitte, “[Financing the Green Energy Transition – Innovative Financing for a Just Transition](#)”, May 2024.
63. International Energy Agency, “[ETP Clean Energy Technology Guide](#)” accessed in September 2024.
64. International Energy Agency, “[CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis](#)”, September 2020.
65. According to the IEA Net-Zero scenario CO₂ balances (International Energy Agency, “[World Energy Outlook 2023](#)”, October 2023) and IEA Net-Zero CO₂ capture projections (International Energy Agency “[CCUS – Analysis](#)”, September 2023), most of the CO₂ captured from bioenergy sources will be permanently stored to offset the remaining emissions in 2050 from hard-to-abate sectors. We assume that the biogenic CO₂ used will mainly come from fuel production and fuel transformation (e.g.: biogas upgrading to biomethane).
66. International Energy Agency, “[World Energy Outlook 2023](#)”, October 2023.
67. Katrin Siever, Tobias S. Schmidt and Bjarne Steffen, “[Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture](#)”, Joule Vol. 8(4), 2024.
68. International Energy Agency, “[Direct Air Capture – Energy System](#)”, accessed September 2024.
69. Climeworks, “[Industry snapshot: a focus on direct air capture technology](#)”, July 2023.
70. International Energy Agency, “[Direct Air Capture: A key technology for net zero](#)”, April 2022.
71. In a Horizon 2020 survey, experts provided cost estimates ranging between 130-1500 US\$/tCO₂ in 2030 and 130-880 US\$/tCO₂ in 2050. https://www.negemproject.eu/wp-content/uploads/2023/08/NEGEM_D5.4-Expert-elicitation.pdf
72. CO₂Earth, “[Daily CO₂](#)”, accessed in September 2024.
73. International Energy Agency Greenhouse Gas R&D program, “[Global Assessment of Direct Air Capture Costs](#)”, December 2021.
74. Dutch Organization for Applied Scientific Research (TNO), “[Technology factsheet | Direct Air Capture \(DAC\) of carbon dioxide](#)”, December 2019.
75. Clarksons Research, “[Green Technology Tracker](#)”, July 2024.
76. Longspur Research, “[All At Sea – Methanol AndShipping](#)”, January 2022.
77. Danish Energy Agency, “[Technology data for energy carrier generation and conversion](#)”, April 2024.
78. Global CCS Institute, “[State of the art: CCS Technologies 2024](#)”, August 2024.
79. Assuming a linear growth from US\$25/tCO₂ in 2030 to US\$200/tCO₂ in 2050.
80. ICAO, “[The cost of achieving net-zero carbon in aviation](#)”, September 2022.
81. IEA, “[World Energy Investment 2024](#)”, June 2024.
82. Statista, “[Fuel costs of airlines worldwide from 2011 to 2023, with a forecast for 2024, as percentage of expenditure](#)”, accessed in September 2024.
83. Synthetic kerosene production cost that can be achieved in 2040 using biogenic CO₂.
84. The additional costs are assumed to be passed completely to the customers.
85. Based on bulk freight rates of US\$35/ton on the NOPAC Far East route, from American Journal of Transportation, “[Signal Ocean: Dry Weekly Market Monitor - Week 38 of 2024](#)”, September 2024.
86. EMBER, “[Global Electricity Review 2024](#)”, May 2024.
87. International Energy Agency, “[Towards Common Criteria for Sustainable Fuels](#)”, September 2024.
88. Flagging refers to the practice of registering a vessel in another nation than the true country of origin to benefit from weak environmental and safety regulations or more lenient tax regimes.
89. Quirin Schiermeier, “[Boom in ships that fly ‘fake’ flags and trash the environment](#)”, Nature News, May 2021.
90. Deloitte, “[Assessing the impact of low-carbon hydrogen regulation in the EU](#)”, July 2024.
91. IEA, “[Global Hydrogen Review 2023: Assumption Annex](#)”, September 2023.
92. National Renewable Energy Laboratory, “[Annual Technology Baseline](#)”, 2023.
93. IRENA, “[Future of solar photovoltaic](#)”, 2019.
94. Danish Energy Agency, “[E-kerosene for Commercial Aviation](#)”, September 2022.
95. International Council on Clean Transportation, “[Vision 2050](#)”, June 2022.
96. The [FEDI](#) is a binding IMO regulation requiring new ships introduced as of 2025 to be 30% more efficient compared to 2000-2010 levels
97. Especially wind-assisted propulsion systems.
98. OECD/FAO, “[OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033](#)”, 2024.

作者

Prof. Dr. Bernhard Lorentz

德勤可持续发展进程中心创始主席

德勤德国

+49 15114881437

blorentz@deloitte.de

GeoffTuff

能源、资源及工业行业可持续发展业务领导人

Deloitte Consulting LLP

+16174600647

gtuff@deloitte.com

Dr. Johannes Brauer

Deloitte Economics Institute

德勤法国

Charbel Boulssa

Deloitte Economics Institute

德勤法国

Marc de Froidefond

Deloitte Economics Institute

德勤法国

Dr. Johannes Trüby

Deloitte Economics Institute

德勤法国

+33 155616211

jtruby@deloitte.fr

Dr. Behrang Shirizadeh

Deloitte Economics Institute

德勤法国

+33 670268419

bshirizadeh@deloitte.fr

AurélienAilleret

Deloitte Economics Institute

德勤法国

AugustinGuillon

Deloitte Economics Institute

德勤法国

联系人

Jennifer Steinmann

德勤全球可持续发展业务主管合伙人
jsteinmann@deloitte.com

Prof. Dr. Bernhard Lorentz

德勤可持续发展进程中心创始主席
blorentz@deloitte.de

Geoff Tuff

能源、资源及工业行业可持续发展业务领导人
gtuff@deloitte.com

Dr. Johannes Trüby

Deloitte Economics Institute
jtruby@deloitte.fr

衷心感谢以下诸位为编制本报告所提供的支持：

Adhiraj Sharma, 德勤印度

Anoushka Hooda, 德勤法国

Ashley Pampena, 德勤全球

Ashish Gupta, 德勤全球

Blythe Aronowitz, 德勤全球

Bjoern Mais, 德勤德国

Derek Pankratz, Deloitte Services LP

Dr. Freedom-Kai Phillips, 德勤全球

Kate Hardin, Deloitte Services LP

Kyra Kaszynski, 德勤全球

Lali Loya, 德勤全球

Maya Caron, 德勤加拿大

Michelle Varney, 德勤全球

Nozomu Kokubo Yoshimi, 德勤日本

Olivier Jan, 德勤法国

Pradeep Philip, 德勤全球

Prashanth Nutula, 德勤印度

Rachael Ballard, 德勤全球

Rebekah Susan Thomas, 德勤全球

Richard J Bailey, 德勤全球

Robert Hansor, 德勤中国

SAF Consortium

Torben Gehring, 德勤德国

Tracey McQueary, 德勤全球

Utkarsh Shardool Ashar, 德勤全球

联系人 – 德勤中国

李晓晨

德勤中国可持续发展主管合伙人
lilyxcli@deloittecn.com.cn

谢安

德勤中国可持续发展咨询业务主管合伙人
allxie@deloittecn.com.cn

Robert Hansor

德勤中国可持续发展咨询业务总监
rhansor@deloittecn.com.cn

吴越

德勤中国可持续发展咨询业务经理
elaineywu@deloittecn.com.cn

郭晓波

德勤中国全国行业规划主管合伙人
kguo@deloittecn.com.cn

吕岩

德勤中国能源、资源及工业行业全国主管合伙人
sanlv@deloittecn.com.cn

詹伟祥

德勤中国能源及化学品行业全国主管合伙人
rychieng@deloittecn.com.cn

黄淑雄

德勤中国交通、酒店及服务行业全国主管合伙人
jackywongsh@deloittecn.com.cn

德勤可持续发展进程中心

[德勤可持续发展进程中心 \(DCSP\)](#) 致力于通过推进适应与减缓行动，培育企业韧性，并指导脱碳发展路径，应对气候变化相关挑战，发掘潜在机遇，助力达成《巴黎协定》的气候目标。德勤可持续发展进程中心汇集行业专家和创新人才，共同探究突破性解决方案，携手解决人类所面临的重大全球性挑战。值得注意的是，德勤可持续发展进程中心并不向客户提供服务。

Deloitte.

Deloitte（“德勤”）泛指一家或多家德勤有限公司，以及其全球成员所网络和它们的关联机构（统称为“德勤组织”）。德勤有限公司（又称“德勤全球”）及其每一家成员所和它们的关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，相互之间不因第三方而承担任何责任或约束对方。

德勤有限公司及其每一家成员所和它们的关联机构仅对自身行为及遗漏承担责任，而对相互的行为及遗漏不承担任何法律责任。德勤有限公司并不向客户提供服务。请参阅

www.deloitte.com/cn/about 了解更多信息。

德勤为财富全球500强企业中近90%的企业以及数千家民营企业提供行业领先的审计及鉴证、税务与法律、及咨询业务服务。德勤专业人士致力创造可衡量的长效价值，协助增强资本市场公众信任，助力客户推动变革与发展，引领实现更加强劲的经济增长，迈入更加平等的社会和更具可持续性的未来。凭借逾175年的精诚服务，德勤成员所网络如今遍及全球150多个国家和地区。敬请访问www.deloitte.com/cn/about，了解德勤全球逾457,000名专业人员致力成就非凡的更多信息。

本通讯中所含内容乃一般性信息，任何德勤有限公司、其全球成员所网络或它们的关联机构（统称为“德勤组织”）并不因此构成提供任何专业建议或服务。在作出任何可能影响您的财务或业务的决策或采取任何相关行动前，您应咨询合资格的专业顾问。

我们并未对本通讯所含信息的准确性或完整性作出任何（明示或暗示）陈述、保证或承诺。任何德勤有限公司、其成员所、关联机构、员工或代理方均不对任何方因使用本通讯而直接或间接导致的任何损失或损害承担责任。

© 2024。欲了解更多信息，请联系德勤全球。