



2035年气候适应型社会基本建成愿景下，
化工生物技术赋能绿色燃料价值主张



引言一

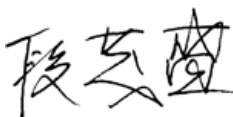
2025年9月，中国政府在第29届联合国气候变化大会上宣布了新一轮国家自主贡献目标：到2035年，中国全经济范围温室气体净排放量比峰值下降7%-10%，非化石能源消费占比达到30%以上，气候适应型社会基本建成。这一目标的提出，标志着中国应对气候变化战略从“强度控制”向“总量控制”的重大跨越，也意味着包括航运、航空在内的“难减排”领域必须找到切实可行的脱碳路径。

在全球气候治理面临信心赤字的关键时刻，绿色燃料作为连接可再生能源与终端用能的关键载体，正从“可选项”变为“必答题”。国际海事组织、国际民航组织等全球治理机构已划定明确的减排时间表，欧盟碳排放交易体系将航运业纳入覆盖范围，碳边境调节机制则进一步将气候成本显性化。在这样的大背景下，绿色燃料已不再是遥远的未来图景，而是摆在面前的刚性市场需求。

生物质绿色燃料因其技术成熟度最高、工程化基础最好，成为填补近期需求缺口的最现实选择。与尚处示范早期的电制燃料相比，生物质路线依托成熟的化工转化体系，能够在2030年前后形成规模化供给能力，为航运、航空等高排放行业提供可负担、可持续的能源解决方案。

然而，从实验室突破到产业化落地，从示范项目到商业化运营，生物质绿色燃料仍面临严峻挑战：如何驯服非均质、多变的生物质原料，使之适应现代化工“安稳长满优”的严苛要求？如何将当前高达传统燃料2-3倍的成本压缩至可竞争区间？如何构建贯通上游收集、中游转化、下游应用的完整产业生态？这些问题的答案，决定了生物质绿色燃料能否真正承担起能源转型的历史使命。

本白皮书旨在系统阐述化工生物技术赋能绿色燃料的价值主张，分析产业化的核心挑战，展示先进技术如何从源头破解原料困局，并探讨价值链各方如何协同推动产业进程。面向2035年气候适应型社会的愿景，我们相信，以技术创新为驱动、以产业协作为支撑，中国有望成为全球绿色燃料供应链的关键一环，为全球气候治理贡献中国方案。



段茂盛

北京能源学会会长

引言二

全球应对气候变化的进程已进入关键窗口期，围绕绿色能源的技术变革正在加速展开。在绿色能源体系中，生物质绿色燃料承载着不可替代的战略角色。作为少数能适配现有基础设施的低碳替代能源，绿色燃料已成为航空、航运等难减排领域的脱碳支柱。同时，生物质绿色燃料以农林废弃物、城市有机垃圾为原料，以循环经济模式实现了资源利用与碳减排的协同。更具意义的是，生物质资源的本地化采集与加工，能够创造大量绿色就业，将能源转型的红利从城市延伸至县域和农村，从而成为乡村振兴与公平转型的重要抓手。

然而，现实与愿景之间仍横亘着一条亟待跨越的产业化鸿沟：脱碳需求日益迫切，而绿色燃料的规模化供给远未跟上气候行动的时间表。这份白皮书聚焦一个关键命题——化工生物技术如何赋能绿色燃料，使其从政策蓝图中的“新兴赛道”转化为驱动低碳经济、保障能源安全、重塑区域发展的现实力量。

近年来，化工与生物领域的技术突破正在改写绿色燃料的成本曲线与规模化路径。多种工艺路线并行迭代，推动绿色燃料的生产效率持续提升、单位成本稳步下行。尽管不同技术距商业化成熟度尚有差异，但一个清晰的趋势已经显现：绿色燃料的溢价正在收窄，产业化临界点正在逼近。

然而，仅仅依靠技术创新尚不足以搭建起完善的产业生态，绿色燃料从实验室走向商业化，还迫切需要价值链各方携手推进。在研发端，企业、高校与科研机构可以共建联合攻关平台，以产业化需求牵引基础研究，通过技术交流与共享降低全行业试错成本。在商业模式方面，产业链上下游可以合作探索“登记与申报”（Book & Claim）等创新机制，通过证书交易系统连接分散需求与集中产能，为投资方提供可预期的收益前景。在融资端，绿色债券、产业基金、公募REITs等工具正加速向绿色燃料项目开放，而国家低碳转型基金的设立则为产业注入了长效信心。当政策、资本、技术与市场在同一频段共振，产业化才能真正进入快车道。

这份白皮书汇聚了我们团队在生物质绿色燃料领域的最新洞察与商业实践经验，旨在为企业决策者、政策制定者和产业投资者提供一份兼具战略视野与行动路径的参考指南。绿色燃料的规模化之路蓄势待发，我们期待与价值链各方并肩前行，迈向由绿色燃料驱动的可持续未来。

谈亮

德勤中国可持续发展服务主管合伙人

德勤中国能源资源及工业行业主管合伙人

目录

引言一	1
引言二	2
1 绿色燃料的广阔市场需求与紧迫的产业化差距	4
1.1 绿色燃料成为“难减排”行业的关键脱碳路径	5
1.2 需求爆发在即，但绿色燃料产能端仍面临不确定性	6
1.3 各国加速布局绿色燃料产业，中国迎来历史性机遇	7
2 生物质绿色燃料的价值主张与核心挑战	10
2.1 生物质绿色燃料价值主张	11
2.2 生物质绿色燃料核心挑战	14
3 先进技术赋能生物质绿色燃料	16
3.1 原材料体系的革新：微米化生物碳基材料	17
3.2 碳氢元素比的优化：绿氢驱动碳氢定向转化	18
3.3 化工技术的产业化协同：绿甲与SAF的规模化制备	19
4 价值链合力推动产业化进程	20
4.1 研发协同：全流程联合攻关加速技术转化	21
4.2 供应链协同：上游收、储、运、制一体化模式的工程案例	21
4.3 商业模式创新：Book and Claim模式突破供应链掣肘，聚合市场需求	22
4.4 多元化融资体系：借助创新融资工具拓宽资金渠道	23
4.5 碳市场赋能案例：推动绿色燃料项目产生的减排量通过碳市场兑现绿色溢价	24
5 展望	25
5.1 强制性标准为绿色燃料市场注入确定性	26
5.2 绿色燃料产业集群崛起，成为连接区域经济增长的纽带	26
5.3 创新商业模式让减排价值抵达终端消费者	26
5.4 多元耦合与联产模式激活绿色燃料的商业潜力	27
5.5 数智化技术全面赋能绿色燃料产业链，打造可追溯认证链条	27
结语	28
作者	29

1

绿色燃料的 广阔市场需求 与紧迫的 产业化差距

1.1 绿色燃料成为“难减排”行业的关键脱碳路径

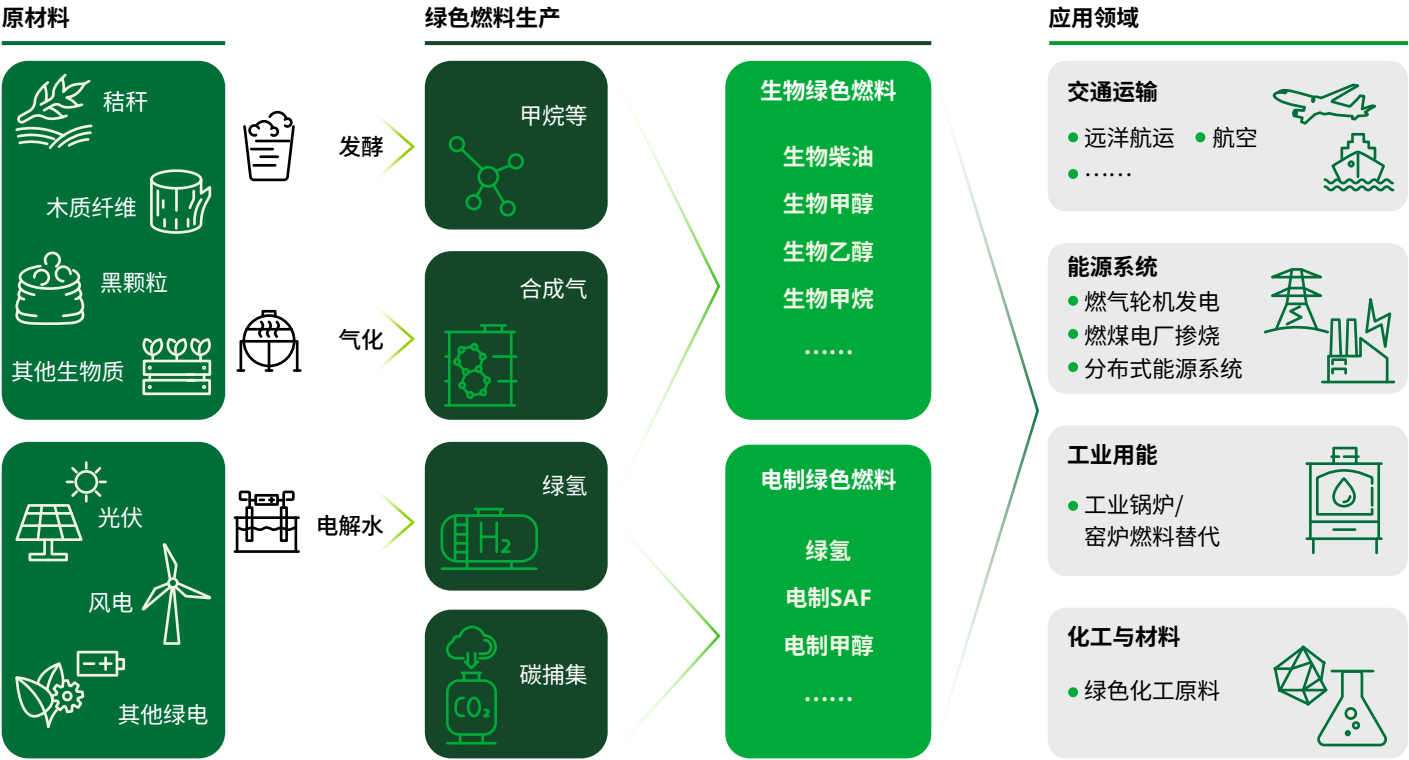
全球航运和航空业每年分别消耗约2.1亿吨和3.3亿吨化石燃料^{1, 2}，合计碳排放量超过19亿吨³，约占全球碳排放4.5%。如果将这一数字与其在全球供应链中的关键地位联系起来，这两个行业对于全球脱碳进程的重要性将进一步放大——2025年仅航运业便承载了全球80%以上的货物贸易量⁴，运输过程中产生的排放将通过价值链传导，对上下游行业产生广泛影响。

正因如此，航运与航空业已逐步成为全球碳监管政策的焦点。2023年，国际海事组织（IMO）通过了新的《船舶温室气体减排战略》，明确了阶段性减排目标：到2030年，国际航运年度温室气体排放较2008年至少降低20%、力争降低30%；到2040年至少降低70%、力争降低80%；最终到2050年前后实现净零排放。2025年4月，IMO进一步批准了包含全球燃料标准与全球排放定价机制的“净零框架”草案，并计划在2026年举行的MEPC 85会议上进行审议。与此同时，国际航空业也形成清晰的时间线：国际民航组织（ICAO）的CORSIA计划自2024年进入第一阶段，2027年将迈入更为关键的强制实施阶段，该计划要求航空公司提升运营效率、采用SAF，以及购买并注销“合格排放单位”（EEUs）来抵消超出基准线的碳排放增量，从而稳定国际民航业温室气体排放量。

然而，与电力、建筑等行业不同，航运与航空领域面临着独特的脱碳瓶颈。远洋航行与高空飞行对能量密度与燃料载体的严苛要求，使得电气化等常规脱碳方案短期内难以推广应用，因此这些领域也被称为“难减排”行业。面对渐行渐近的减排节点，业界开始将目光投向绿色燃料。绿色燃料也被称为可持续燃料，通常由绿电或废弃油脂、农林业副产品等制取，可以直接或经简单改造后用于现有船舶与飞机动力系统，从而逐步降低航行中的高碳化石燃料消耗。在多种绿色燃料制取路线中，将生物质原料通过化工合成技术转化为绿色燃料是当前技术成熟度最高、工程化基础最好的选项，也由此成为满足近期需求、填补巨大产能缺口的最现实选择。

- 1. [Drewry - Maritime Research Opinions - IMO DCS 2024: A reality check for shipping](#)
- 2. [IATA - Quarterly Air Transport Chartbook Q4 2025](#)
- 3. [CO2 emissions - Our World in Data](#); [Aviation - IEA](#); [Maritime transport CO2 emissions | OECD](#)
- 4. [Maritime trade under pressure – growth set to stall in 2025 | UN Trade and Development \(UNCTAD\)](#)

表1：绿色燃料价值链



来源：德勤研究，北京能源学会生物质专业委员会

1.2 需求爆发在即，但绿色燃料产能端仍面临不确定性

据世界经济论坛（WEF, World Economic Forum）及挪威船级社（DNV）预测，按照计划的减排节奏，到2030年，航空业与航运业合计将消耗3,400万吨绿色燃料⁵。而加快将绿色燃料从纸面方案推向现实需求的，是以欧盟航运碳税为代表的市场机制。2024年起，欧盟将航运业纳入碳排放交易体系（ETS），要求进出欧盟港口的船舶为其碳排放付费。据测算，在现行碳价水平（约85欧元/吨）下，使用绿色甲醇替代传统船用燃料，每吨可减少约218欧元的碳税成本⁶。这意

味着应用绿色燃料将不再仅是环保叙事，其经济性在碳价支撑下开始显现。

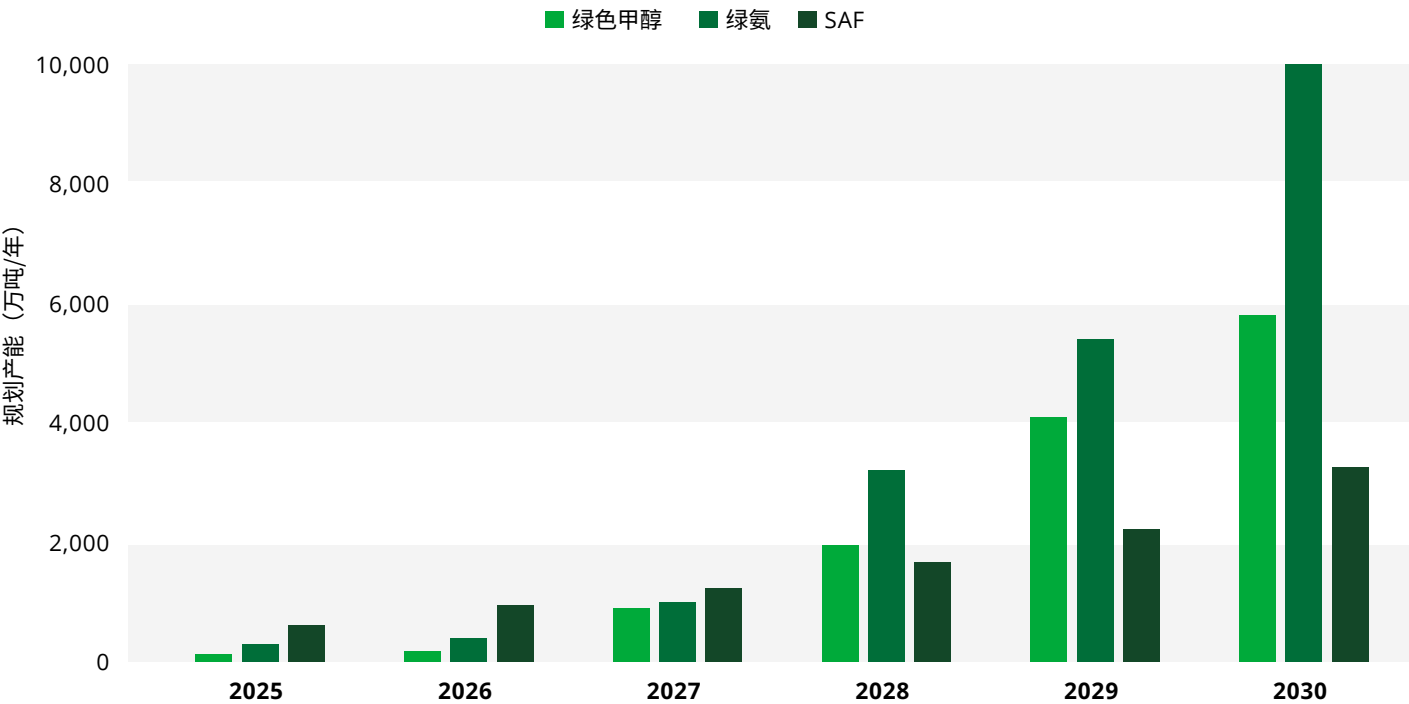
一些企业已经开始将绿色燃料纳入自身减排战略，并积极投资供应链建设。例如丹麦航运巨头马士基不仅率先订购了全球首批甲醇双燃料集装箱船，同时前瞻性布局了绿色甲醇的产能与供应体系。公司通过与CIMC ENRIC、European Energy、WasteFuel等六家企业建立合作关系，锁定了长期供应协议以及废弃资源转化燃料的路径。马士基计划到2025年前锁定约73万吨/年的绿色甲醇产能，以支撑其首批甲醇船队的运营需求以及加速燃料转型。在航空领域，德国汉莎集团推出“Green Fares”等绿色票价产品，通过乘客支付溢价，推动SAF规模化应用。2025年，通过各类渠道销售的可持续航空燃料（SAF）总量同比翻了一倍以上。

5. DNV: Consider all options on GHGs, says Maritime Forecast to 2050; WORLD ECONOMIC FORUM: Financing Sustainable Aviation Fuels: Case Studies and Implications for Investment | World Economic Forum
6. EUA Futures Pricing; ghgsmart.imo.org/wp-content/uploads/2023/05/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf

然而，在迅猛增长的市场需求面前，产能端的进展却仍显不足。以绿色甲醇这一品类为例，绿色甲醇被认为是航运业最具潜力的绿色燃料选项之一。据GENA Solutions统计，截至2026年5月底，全球已有282个规划及在建绿色甲醇（包括低碳甲醇）项目，对应2031年前潜在产能6,160万吨⁷，其中大部分项目位于中国。但这一数字距离支撑起全球航运业的减排需求仍有差距。更为关键的是，规划产能的增长，并不意味着马上能转化为可交付的绿色燃料产品——许多产能项

目停留在意向书或可行性研究阶段，距离实现持续稳定生产仍有漫长距离。可持续航空燃料（SAF）的情况也类似，根据国际航空运输协会（IATA）发布的数据，2026年全球SAF（可持续航空燃料）产量预计将达到约240万吨，仅占航空燃料总用量的0.8%⁸，而根据IATA发布的2050年全球航空业净零碳排放目标，到2050年SAF需要满足65%的航空燃料需求。这一巨大的供给缺口意味着：谁能在未来五年率先突破产业化瓶颈，谁就能在全球绿色燃料市场占据先发优势。

图表2：全球规划绿色燃料产能（基于截至2026年5月项目动态预测）



来源：GENA Solutions，德勤

1.3 各国加速布局绿色燃料产业，中国迎来历史性机遇

近年来，地缘政治博弈持续重塑全球能源版图，国际油气市场震荡频繁。在此背景下，绿色燃料的战略价值日益凸显——它不仅是碳减排的关键技术选项，更被视为替代石油进口依赖、重塑能源自主能力的现实路径。越来越多的经济体开始将发展绿色燃料纳入能源安全与经济可持续性增长的主线中，加速产能布局，抢占先发优势。

7. GENA Solutions, https://www.genasolutions.com/analysis_and_insights/79
8. IATA SAF Production Volumes Still Disappointing, <https://www.iata.org/en/pressroom/2026-releases/06-06-saf-production-volumes-still-disappointing/>

强制性的绿色燃料应用指标是打开市场的关键。欧盟方面，《ReFuelEU航空法规》在立法层面为绿色航空燃料设定了应用目标——自2025年起强制要求机场燃料供应中掺混2%的SAF，2030年目标为6%，至2050年提升至70%，其中电制燃料（eSAF）占比呈逐步上升趋势。亚太区域同样在积极行动，日本已确立2030年SAF掺混比例10%的强制性目标，新加坡计划2026年起实施1%掺混要求并于2030年提升至3%-5%，韩国则确认自2027年起对离境航班执行1%的强制掺混标准。美国则一方面通过可再生燃料标准（RFS）为绿色燃料的最低使用量设定了具体的年度目标，另一方面通过生产税收抵免、研发资助等为绿色燃料相关的技术研发和生产提供支持。

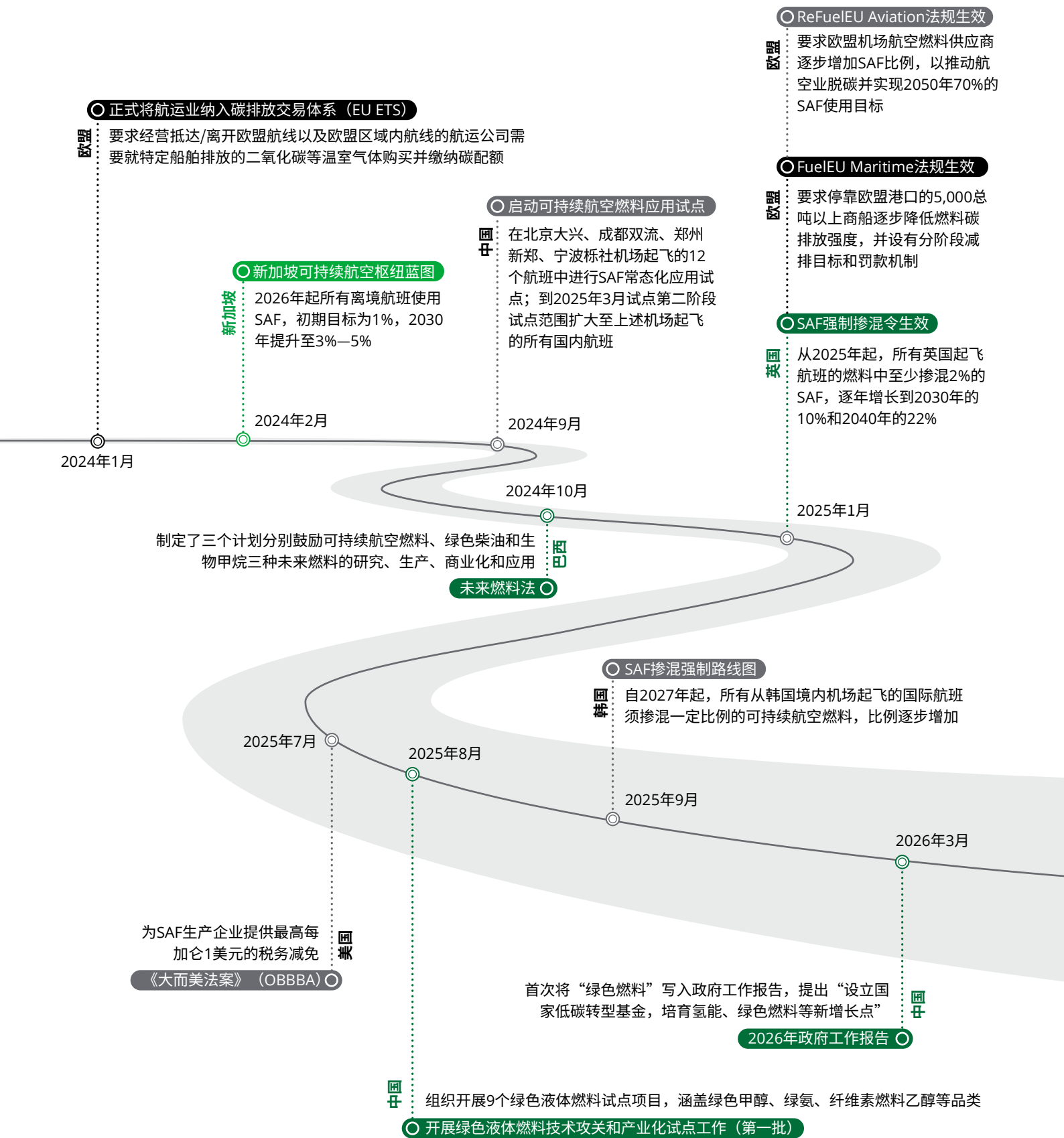
与此同时，中国也在2026年两会期间为绿色燃料产业释放了明确的政策信号。政府工作报告首次写入“绿色燃料”一词，并明确提出设立国家低碳转型基金，将绿色燃料与氢能共同列为培育新增长点的重要方向。在具体政策落地，国家能源局已启动首批9个绿色液体燃料产业化试点项目，涵盖绿色甲醇、绿氨等路线，要求在2026年底前建成投产，加速将绿色燃料产业推向工业化量产与商业化验证阶段。中央

预算内投资同步加码，2025年9月出台的《节能降碳中央预算内投资专项管理办法》明确对符合条件的绿色甲醇和SAF项目给予核定总投资20%的资金支持，充分体现了国家推动绿色燃料产业落地的决心。

尤为关键的是，中国发展绿色燃料产业具备独特的核心优势。首先，中国是全球最具潜力的绿色燃料需求市场之一。作为全球最大的能源消费国，中国在航空、航运、工业原料等难电气化领域对绿色燃料的刚性需求，为规模化应用提供了市场。同时，中国在生物质化工装备制造领域具备全球领先能力，并且具备快速迭代的工程能力与完整的产业链配套体系，部分领域已占据全球主要新增订单份额，使得全球绿色燃料的新增产能建设在很大程度上依赖中国供应链。从规划产能看，中国绿氨、绿色甲醇和SAF的潜在产能（含规划、在建和建成）分别已达2,017.49万吨/年、5,257万吨/年和800万吨/年，产能规模在全球范围内处于前列，部分头部企业已与国际巨头锁定长期采购协议。上述优势有望推动中国成为全球绿色燃料供应链的关键一环，在全球绿色燃料的生产端和需求端同时发挥结构性影响力。



图表3：全球主要经济体绿色燃料相关政策及战略



来源：基于公开信息整理



2

生物质 绿色燃料的 价值主张 与核心挑战

2.1

生物质绿色燃料价值主张

在制备绿色燃料的两大路径中，短期内电制燃料仍然受制于绿电成本、氢气供应和基础设施等条件。相比之下，生物质绿色燃料依托的是农林剩余物和有机废弃物等现成资源，并且能够与现有燃料储运体系和发动机系统高度兼容。因此，在未来十余年的过渡阶段，它是少数能够在现有能源体系中实现规模化应用的绿色燃料。

从价值维度看，生物质绿色燃料的作用体现在三个相互衔接的层面：首先是在能源转型层面，为航空、航运等难以电气化的领域提供现实可用的低碳燃料来源，解决短中期能源替代的问题；在此基础上，通过将秸秆、林业剩余物和有机废弃物等分散资源转化为标准化燃料产品，逐步形成从原料收集、燃料生产到终端应用的完整产业链，体现其产业发展价值；而当这一产业体系稳定运行后，非粮生物质原料中的碳被持续纳入能源利用过程并实现替代化石燃料排放，从而形成农业—能源—废弃物协同减排的环境价值。可以说，生物质绿色燃料，具备在保障能源安全、实现经济可行与创造环境效益之间取得动态平衡的潜力与战略价值。

转型价值：

为难减排交通领域提供现实可行的低碳燃料路径

一方面，全球能源转型正面临减排与安全的双重压力，石油和天然气供应高度集中于少数地区，地缘政治冲突或制裁往往会对全球能源市场造成明显冲击。另一方面，尽管能源转型正在推进，交通领域的低碳替代路径仍收到明显约束。航空和远洋航运受航程要求、能量密度和现有动力系统限制，短期内难以依靠电力或氢能实现规模替代，在未来相当长时间内仍需要液体燃料作为主要能源载体。

从技术路径看，电制燃料具有更高的减排潜力，但其规模化发展依赖低成本绿电、稳定的氢气供应以及碳捕集体系，目前仍处在产业化早期阶段，短期内难以支撑快速增长的绿色燃料需求。

在这一背景下，生物质燃料，包括以农林剩余和有机废弃物为原料的生物质柴油、绿色甲醇或可持续航空燃料，能够直接进入现有储运、加注和发动机体系，无需大规模基础设施改造，具备较强的现实可用性。国际海事组织（IMO）MEPC会议梳理的各种动力燃料降碳节能效果和市场应用成熟度，也显示中短期内，生物质燃料作为过渡技术因满足合规需求具有市场空间。未来十年，生物质燃料有望成为绿色航运和航空燃料市场启动的重要来源，在低碳燃料体系形成的早期阶段发挥关键支撑作用。

对中国而言，这一路径尤为值得关注。我国是全球最大的航运贸易国之一，同时航空运输需求持续增长，未来交通领域低碳燃料需求潜力巨大。在电制燃料等技术尚未规模化之前，生物质燃料能够在现有体系中提供现实可行的过渡方案。

图表4：不同动力船舶动力能源降碳节能效果以及市场应用

燃料/技术	GHG减排潜力	预期应用时间
氢气	-100%	2030-2040
氨气	-100%	2025-2050
乙烷	-20~30%	现阶段可用
甲醇	类似于LNG	现阶段可用
生物燃料	-100%	2035（小型船已应用）
合成燃料	-100%	2030-2035
液体有机物储氢技术（LOHC）	-100%	2030以后
燃料电池	-100%（取决于燃料使用）	2030以后
电动/混合动力电池	-100%	2035（小型船已应用）
核能	-100%	现阶段可用（军船、破冰船）
太阳能	~-12%	现阶段可用

来源：IMO MEPC

产业价值：

将分散生物质资源转化为新的绿色燃料产业链

全球范围内生物质资源规模庞大，但尚未形成有效的利用体系。目前，林业剩余物、农作物秸秆和城市有机废弃物等生物质资源在多数地区仍以低价值化利用或直接利用为主，部分甚至需要额外治理成本，尚未形成稳定的产业化利用体系。例如，大量农林废弃物仍主要以直接燃烧等形式利用，整体附加值较低，没有充分进入高价值的燃料和化工产品体系。

从技术路径来看，生物质燃料为这些资源提供新的高价值利用路径。通过气化、合成等技术将农林废弃物制备为生物质绿色燃料，在储运性能、能量密度及终端适配性方面具有显

著优势，还能够直接进入交通能源体系，不仅实现了从分散的生物质原料到工业燃料的升级利用，还获得了更高附加值和更广泛的应用空间。

从经济性角度看，在碳约束和规模化发展的共同作用下，生物质燃料的经济性有望逐步显现。目前SAF生产成本约1,800–2,600美元/吨⁹，仍高于700–900美元/吨的传统航空煤油，但随着装置规模扩大和原料体系成熟，行业普遍预测到2030年成本将下降至1,200–1,600美元/吨¹⁰，2035年有望进一步收敛至1,000–1,400美元/吨。与此同时，碳定价正在改变燃料的成本结构，多家机构预测2030年前后全球碳价将超过100美元/吨CO₂¹¹，届时化石燃料成本将增加约250–300美元/吨，显著缩小与生物燃料之间的价格差距。

9. “IATA：受高成本和政策问题影响，全球可持续航空燃料（SAF）供应将在2026年放缓”，S&P Global，2025-12-09，<https://www.spglobal.com/energy/zh/news-research/latest-news/agriculture/120925-global-saf-supply-to-slow-in-2026-on-high-costs-policy-issues-iata>

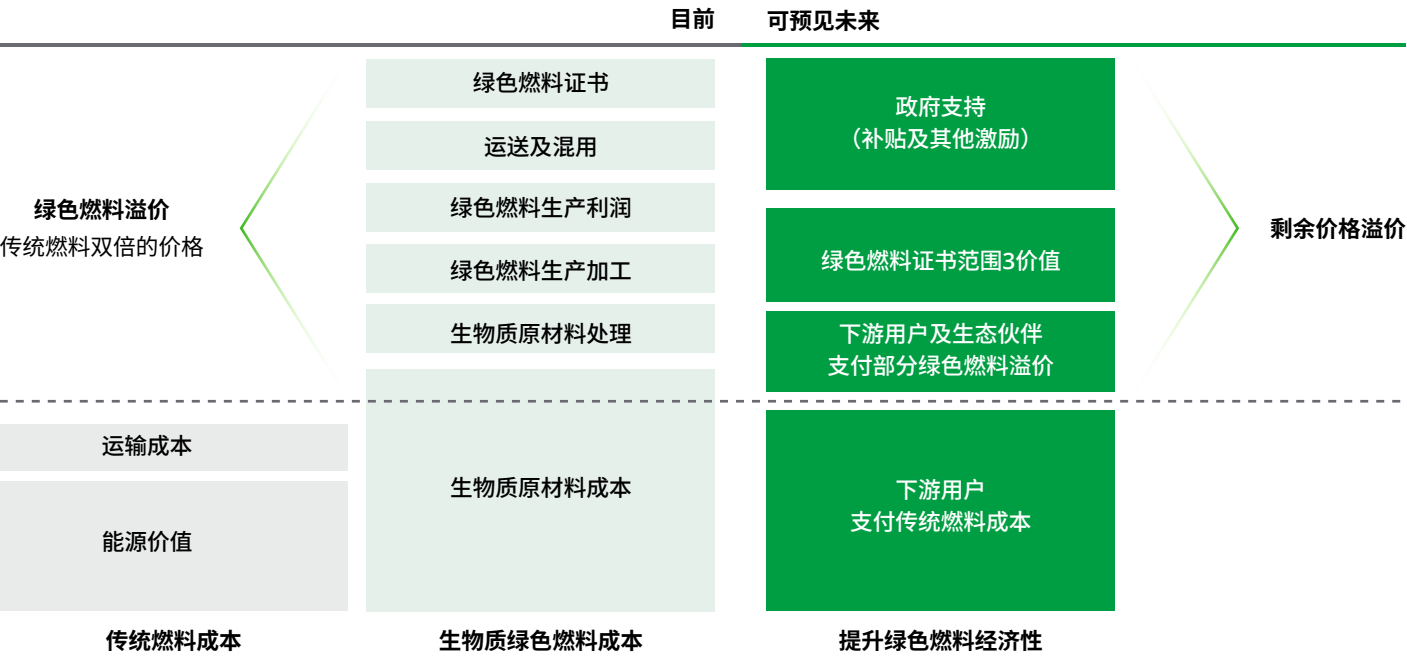
10. Clean Skies for Tomorrow, WEF, 2022-05 https://www3.weforum.org/docs/WEF_Clean_Skies_for_Tomorrow_Power_to_Liquid_Deep_Dive_2022.pdf

11. Forecast European Union Emission Trading System (EU-ETS) average carbon allowance prices, Statista, <https://www.statista.com/statistics/1401657/forecast-average-carbon-price-eu-emissions-trading-system/?srsltid=AfmBOopXmha3Ba4L6VCrgfwv4uPzOYsB9bTCDOr2omtc6GSzsuQkwIom>

叠加航空和航运等难减排行业的强制减排政策，例如欧盟 ReFuelEU Aviation要求2035年SAF掺混比例达到20%，据国际能源署（IEA）估算，全球生物燃料需求预计将从2023年约1,800亿升增长至2028年的2,000亿升¹²，若按照当前能源

转型路径持续推进，到2035年，全球需求规模可能进一步扩大至3,000 - 3,200亿升。综合来看，在成本下降、碳价机制和政策需求的共同作用下，生物质燃料有望从依赖补贴的替代燃料逐步转向具备长期市场竞争力的低碳能源。

图表5：生物质绿色燃料的经济性模型



来源：德勤

随着原料收集体系、燃料生产能力以及储运供应与终端应用网络逐步完善，生物质燃料有望形成连接农业、能源和化工领域的新兴产业链。长期来看，这一产业不仅能够提升农林废弃物资源化利用水平，也有望成为绿色燃料与绿色化工的重要来源。

对中国而言，这一产业机会同样具有现实基础。我国拥有丰富的非食用农林废弃物资源，据测算，每年农林废弃物产量

约43亿吨，可收集利用量约33亿吨^{13, 14, 15}；2024年，我国生物质成型燃料产量达到2,200万吨，生物质颗粒产量约占全球总产量的27%，位居全球首位¹⁶。中国同时具备成熟的甲醇与化工产业基础，2025年我国甲醇产量约1亿吨¹⁷，产量占全球超过60%。依托现有化工产业基础和完善的工业体系，我国具备将分散生物质资源转化为规模化绿色燃料供给的产业条件。

12. Global biofuel demand, main case, accelerated case and in Net Zero Scenario, 2010-2030, IEA, 2024-02-06, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-biofuel-demand-main-case-accelerated-case-and-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>

13. 中国环境, https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202512/t20251218_1138057.shtml

14. 中国能源报, https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-02/26/content_26044951.htm

15. <https://www.xinhuanet.com/government/20250513/39cfeae194b6401a8f7202040b4e7641/c.html>

16. 《中国生物质成型燃料产业发展报告2025》，中国产业发展促进会生物质能产业分会，2025-10-20, <https://www.beipa.org.cn/newsinfo/8793616.html>

17. 商务部，2026-01-15, <https://price.mofcom.gov.cn/article/yjzx/hyzx/hskc/202601/64149.html>

环境价值：

将农林废弃物中的碳重新纳入能源循环减少排放

传统化石燃料将地下长期封存的碳释放到大气中，是全球碳排放增长的主要来源。相比之下，农作物秸秆、林业剩余物和各类有机废弃物中的碳，则来自植物在生长过程中吸收的大气二氧化碳，本身属于自然碳循环的一部分。如果这些生物质资源被直接焚烧或自然腐解，其碳同样会重新进入大气，但往往无法形成有效的能源利用。

通过将生物质资源转化为能源产品，可以将原本可能无序释放的碳纳入能源利用过程，在满足能源需求的同时，减少对化石燃料的依赖。这一过程并不引入“新增碳排放”，而是利用植物生长过程中已经吸收的碳，从而在能源供给体系中形成相对闭合的短周期的碳循环路径。

在符合可持续性标准的前提下（例如使用非粮原料、避免新增土地开垦并建立原料可追溯体系），生物质燃料不仅能够减少交通领域的化石碳排放，还能够推动农业、废弃物管理与能源系统之间形成协同减排机制。随着碳核算与可持续认证体系逐步完善，生物质燃料的碳减排价值也有望进一步转化为可量化的环境与经济收益。

2.2 生物质绿色燃料核心挑战

尽管生物质绿色燃料具备显著的多重价值，然而，从实验室突破迈向产业化落地，仍需跨越技术、成本与产业生态三大维度的严峻挑战。

技术挑战：

提升规模化生产的稳定性

尽管生物质制绿色燃料的技术在飞速迭代，其原理和工艺路径已在实验室研究层面得到验证，但一旦进入中试和工程化落地，生产工艺的稳定性便成为制约其规模化发展的主要因素。原因在于，生物质原料天然具有非均质性强、组成波动大等特征，而现代化工生产体系则依赖于均质、稳定、连续的进料与运行条件，这一矛盾在工程放大过程中被进一步放大，直接影响装置的稳定运行、转化效率及整体经济性。

具体而言，在原材料储存和运输环节，传统木质颗粒的粉化率通常介于5%—15%之间，吸湿后含水率由8%攀升至20%以上，且伴随霉菌滋生、自燃等多重风险。该类劣化原料进入气化炉后，不仅制约气化效率，更对装置的稳定运行构成威胁。此外，生物质中高含量的碱金属和氯元素在高温条件下易生成低熔点共熔物，引发结焦、结渣，轻则造成炉体腐

蚀，重则迫使系统停运。同时，原料中夹带的硫、氯、氮等杂质会对下游费托合成或甲醇合成催化剂造成不可逆的中毒效应，显著缩短催化剂的使用寿命。

气化环节同样面临多重困境。固定床气化焦油和甲烷含量高，气体净化负担重，而流化床又面临床料团聚、飞灰含碳量偏高的问题。气流床作为产出气体品质最高的技术路线，对原料细度和水分要求较为苛刻，且投资较高。此外，三类技术路线均存在着焦油轻质化、催化剂积碳失活等技术难题，至今仍缺乏经济可行的工程解决方案。此外，在合成环节，系统能耗和增压环节同样是制约工艺产出效率和经济性的关键瓶颈。

正因如此，生物质绿色燃料要实现规模化生产，需要的不仅是单点技术的突破，还需要完成贯穿“原料预处理—气化—合成”全流程的系统性工程创新。

成本挑战：

原料体系决定经济性

与传统化石燃料相比，生物质绿色燃料目前仍面临较大的成本压力。在航空领域，已经商业化应用的SAF价格通常接近传统航空煤油的3倍；在航运与化工领域，生物质绿色甲醇的生产成本一般是传统化石路线的2-3倍。这意味着，在缺乏强有力政策补贴或碳定价机制支撑的情况下，生物质绿色燃料在价格上尚难以与传统化石燃料展开正面竞争。

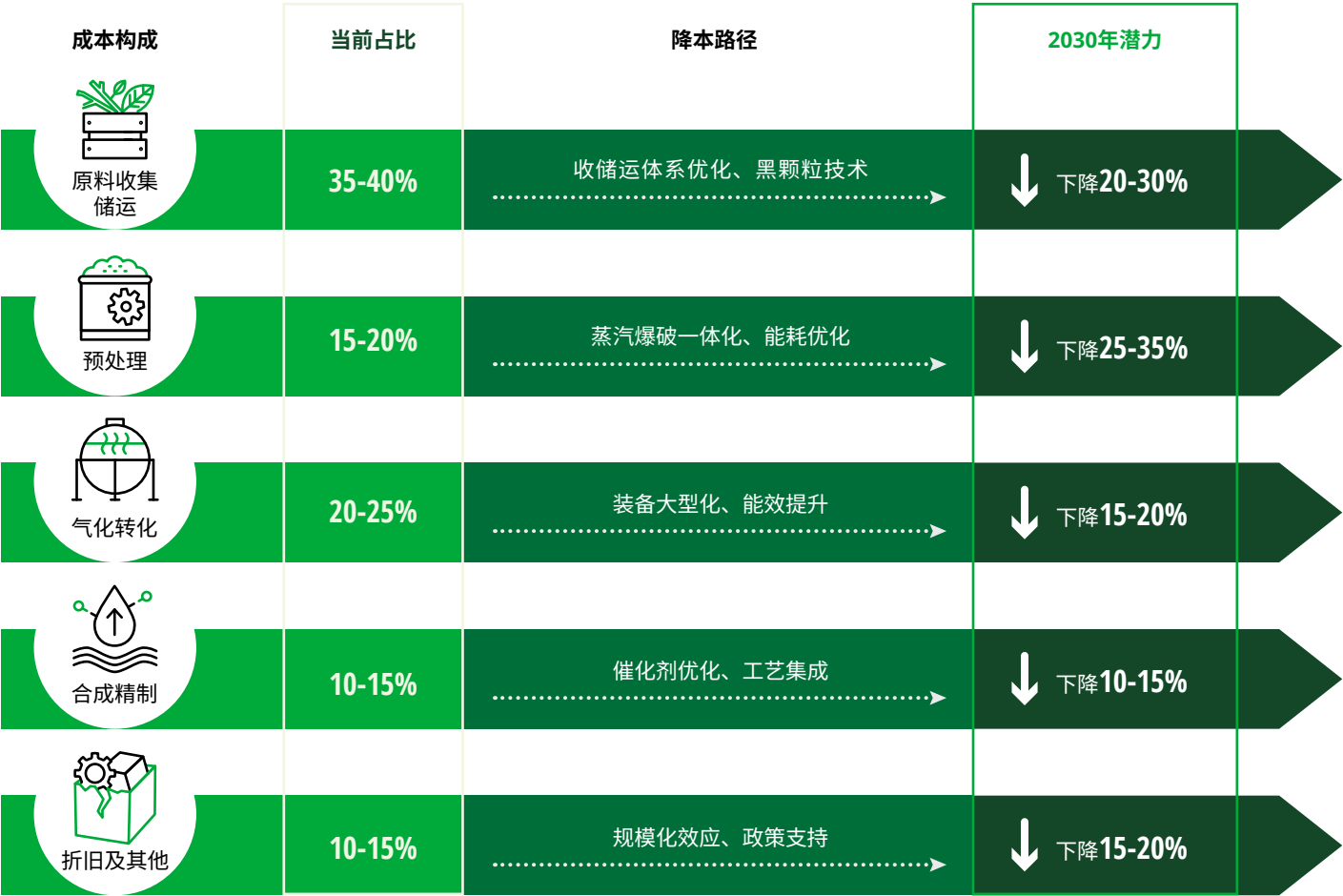
成本差距的重要来源在于原料获取与物流体系。与煤或天然气等集中资源不同，生物质原料具有分布分散、能量密度低和季节性强等特点，需要建立复杂的收集、储存和运输体系。从原料收集、储存、运输到预处理的全过程成本占比往往超过50%。例如，在HEFA路径中，原料成本占比约为76%。原料体系的组织效率因此成为影响生物质燃料经济性的关键因素。

除原料成本外，生物质燃料项目通常还需要较高的初始资本投入，包括原料预处理设施、气化或转化装置以及相关配套基础设施，这进一步提高了项目的投资门槛。

在当前成本结构下，生物质燃料在一定程度上仍依赖政策激励来缩小与化石燃料之间的价格差距。例如，美国通过45Z税收抵免，RINs碳信用（如RINs）以及强制掺混比例推动市场发展。如果缺乏稳定的政策机制，这类燃料在当前难以形成依靠市场驱动的商业模式，也增加投资不确定性。

总体来看，生物质燃料的经济性不仅取决于技术效率，更取决于原料收储运体系的组织能力和规模化供应能力。

图表6：生物质绿色燃料成本结构及降本潜力



来源：北京能源学会生物质专业委员会

产业生态挑战：

标准割裂与产业协同不足

除技术与成本因素外，生物质绿色燃料产业的发展还面临产业生态尚未成熟的挑战。该产业横跨农业、林业、能源及化工等多个行业，涉及原料供应、燃料生产、认证体系和终端应用等多个环节，产业协同难度较高。

首先，上游原料供应体系仍存在明显竞争与风险。随着可持续燃料需求增长，废弃食用油（UCO）等有限原料在全球范围内的争夺日益激烈。同时，在跨国贸易中，原料真实性和可追溯性问题日益突出，例如以植物油冒充UCO的欺诈风险，这不仅影响原料供应稳定性，也增加了市场监管难度。

其次，全球生物质绿色燃料相关标准体系存在差异。例如欧盟RED II、国际航空组织CORSIA以及ICAO等，在方法论和核算上存在差异，而中国尚未建立全国性的生物质燃料绿色认证制度，影响了产品在国际市场中的认可度和贸易便利性。

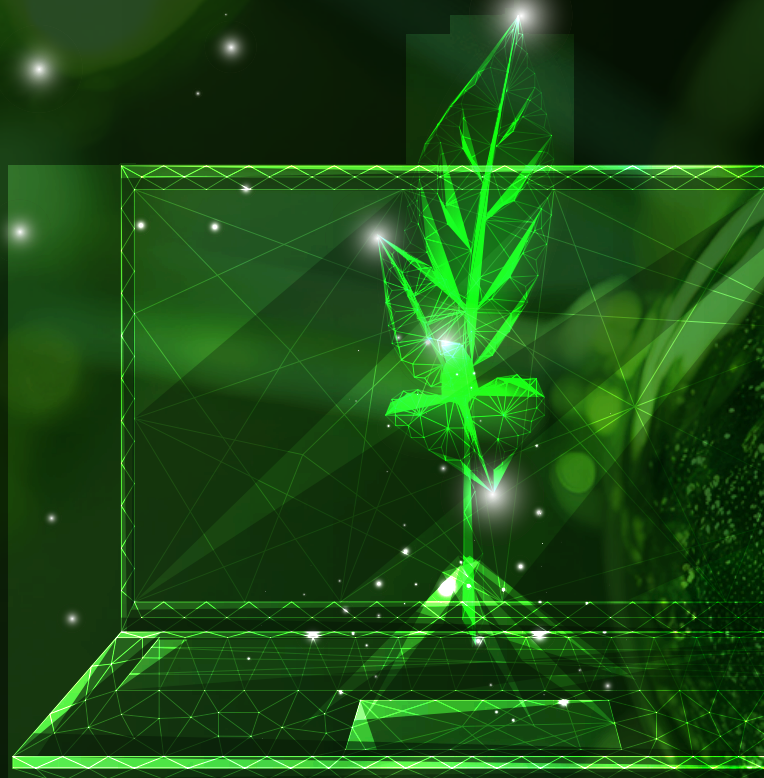
此外，相关基础设施建设仍处于起步阶段。例如生物甲烷注入管网、绿色燃料加注设施以及二氧化碳捕集与运输管道等关键配套设施仍较为不足。

在需求侧，下游客户如航空公司和航运企业对燃料供应稳定性和长期价格仍存在顾虑。由于缺乏成熟的风险共担与利益共享机制（例如长期价格保障或采购协议），市场需求信号仍不够明确。

因此，生物质燃料的发展不仅是技术和成本问题，更是产业组织与市场机制问题。

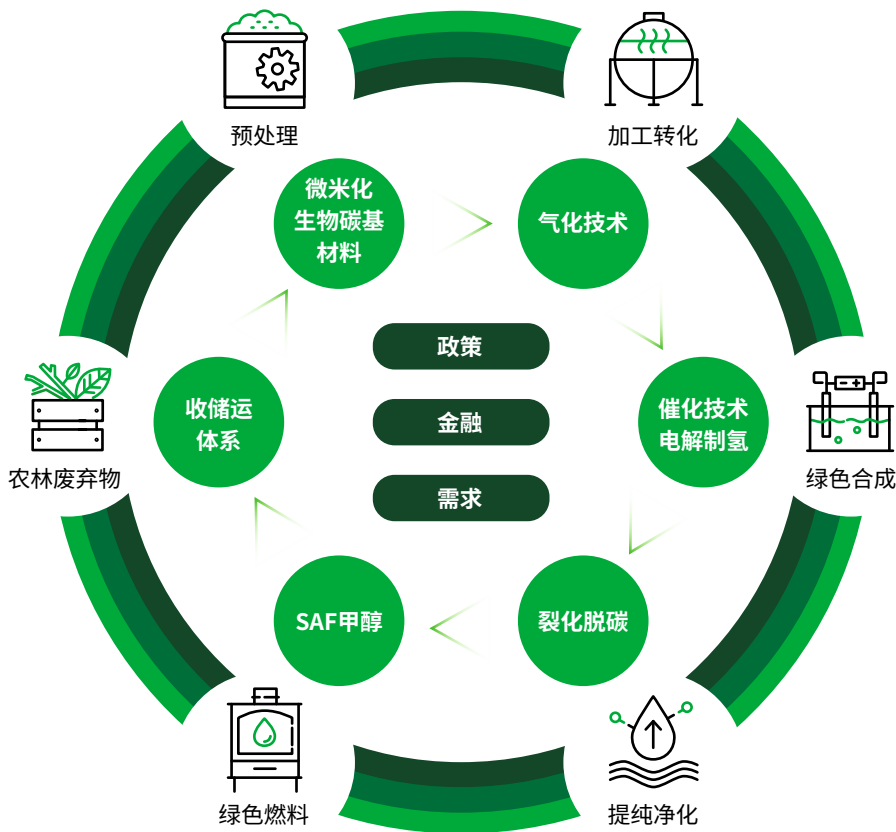
3

先进技术 赋能 生物质 绿色燃料



技术迭代始终是推动生物质绿色燃料走向规模化的核心引擎。面对商业化进程中面临的生产稳定性与经济性挑战，唯有持续的技术突破，才能将实验室中的绿色愿景转化为工厂里的稳定产出。值得注意的是，这一轮技术迭代并非依赖单一工艺的线性改进，而是涵盖从原料预处理、催化合成到系统集成等多技术耦合。具体而言，推动生物质绿色燃料走向商业化，需要在多个环节实现协同突破：在原料端，以微米化生物碳基材料为核心的预处理体系有效应对农林废弃物原料来源及组分不均带来的工况漂移；在转化端，通过引入绿氢优化原材料中碳氢摩尔比，显著提速碳利用效率；在系统端，借助过程系统工程对绿色合成进行全局优化，才能将“多技术耦合”从概念设计转化为可盈利的商业化方案，真正破解成本与稳定性的双重瓶颈。

图表7：生物质绿色燃料技术图谱



来源：北京能源学会生物质专业委员会

3.1

原材料体系的革新：微米化生物碳基材料

在生物质绿色燃料从实验室向规模化商业运营过渡的进程中，技术挑战的根源往往可追溯至原料本身。传统生物质木质颗粒在物化性质上的短板，是导致其转化效率偏低、运行可靠性不足的重要原因，直接制约工艺的经济性与稳定性。以蒸汽爆破技术为核心制备的“微米化生物碳基材料”，通过改变生物质的微观结构和表面特性，为从源头改善这一状况提供了解决方案。

微米化生物碳基材料：一种本质创新的生物质精炼中间体

微米化生物碳基材料呈现出的黑色特征，源于蒸汽爆破过程中发生的类碳化反应与美拉德反应，本质上是生物质内部化学组成与物理结构重构的结果。不同于传统木质颗粒主要依赖物理压缩成型，微米化生物碳基材料的制备更接近一种温和的热化学精炼过程：

核心工艺：

蒸汽爆破技术

生物质原料在180-240℃，1.5-3.5 MPa饱和蒸汽中短时间处理，瞬间泄压，产生三重协同效应：①组分选择性解构-半纤维素水解溶出，木质素热塑软化；②结构物理爆破-细胞壁水分急剧汽化膨胀，破坏刚性纤维结构；③自黏结成型：软化的木质素在降温模压中固化，形成极强结合力。

这一过程将非均质生物质转化为成分与结构均一、性能可设计的标准化工业中间体。

卓越性能，

直击产业化痛点

极致稳定性：破解“安稳长满优”的原料枷锁。密度 $\geq 750\text{kg/m}^3$ ，磨损率 $< 1\%$ （木质颗粒5-15%），能够承长期输送和料仓剪切，消除进料堵塞。疏水层及接触角 $> 120^\circ$ ，水中浸泡3个月未崩解（木质颗粒10分钟内松散），露天仓储成为可能，入炉水分 $< 10\%$ ，半纤维素分解彻底，不霉变、不发酵，无自燃风险，保障长周期安全运行。

优化能量密度与组分，

提升全链条经济性

密度是同木质颗粒的1.5倍以上，运输效率提升50%，仓储空间节省1/3，直接冲击占比超过50%的原料成本变量。汽爆脱除部分氧及可溶灰分（如K、Na），固定碳提高，燃料比更优，气化更稳定，减少焦油生成和结渣倾向。

品质标准化，

构建可持续产业生态

不同批次、来源的农林废弃物经汽爆处理后，密度、强度、成分上高度一致，为下游气化与合成提供稳定可靠的原料输入。标准化的微米化生物碳基材料可作为大宗商品交易，打破了“生产负责原料”的包袱，催生专业原料供应商；稳定的品质是精准碳足迹核算和获得ISCC、RSB等国际认证的基础，增强客户信任和溢价接受度。

化工赋能，

范式转变

微米化生物碳基材料的意义，不仅在于提升生物质燃料性能，更在于构建了一条基于热化学精炼的生物质高值化利用路径。蒸汽爆破可联产木糖、糠醛或沼气，实现全价值链利用，通过调整汽爆强度可定制化适配流化床/气流床、甲醇/SAF的专用颗粒。

3.2

碳氢元素比的优化：绿氢驱动碳氢定向转化

除原料与转化工艺外，元素组成约束是影响效率与成本的另一关键因素。以微米化生物碳基材料为代表的标准化原料，

经热化学转化（如气化）后形成以CO和H₂为主的中间气体产物，但受生物质本征“高氧低氢”特性的影响，其合成气通常呈现氢碳比不足的特征。由此，在后续燃料合成过程中易出现氢源短缺，导致部分碳以CO₂形式损失，限制了碳利用效率与减排潜力。随着可再生能源电解水制氢技术的成熟，绿氢正成为突破这一约束的重要技术抓手。

绿氢：

生物质体系的关键补充要素

绿氢以可再生电力为驱动，将间歇性能源转化为稳定的化学能载体。在生物质燃料体系中，其核心作用并非替代碳源，而是作为“氢源补偿单元”嵌入转化过程，与生物质提供的可再生碳形成协同关系，从而提升整体转化性能。

协同作用：

提升效率与调控能力

绿氢的引入主要体现在三个方面：①补充氢源，优化反应体系的氢碳比，满足液体燃料合成需求；②减少碳损失，降低对传统“以碳换氢”路径的依赖，提高碳转化效率；③增强工艺灵活性，实现碳源与氢源的解耦配置，提升系统稳定性与适应性。

性能优化：

推动减排与品质提升

在绿氢参与下，生物质转化体系的综合性能显著改善。研究表明，引入可再生氢可使碳利用效率提升约10-20%，并进一步降低全生命周期碳排放强度。同时，氢气的参与有助于提高燃料品质，使其更接近现有交通燃料标准，增强市场替代能力。

范式转变：

从单一碳源到碳氢协同

绿氢的引入，使生物质绿色燃料从“单一碳资源转化路径”升级为“碳—氢协同转化体系”。这一转变不仅拓展了技术路径选择空间，也为实现规模化、稳定化生产提供了新的支撑。

工程化升级：

系统效率与灵活性提升

从工程角度看，绿氢的价值在于提升系统整体效率与灵活性，使生物质从受限资源转变为可调配的碳源要素。通过与先进转化技术的协同，绿氢正推动绿色燃料体系向更高效、更可持续的方向演进。

3.3

化工技术的产业化协同：绿甲与SAF的规模化制备

经过预处理的微米化生物碳基材料在调节碳氢比之后，需要经过复杂的化工合成，才能真正被转化为具有应用价值的绿

色燃料产品。转化为最终绿色燃料产品的最后一环。当前，以生物质为基础的绿色燃料合成技术已形成多条并行发展的产业化路径，其中，短中期来看，生物质制绿色甲醇、费托合成制备可持续航空燃料（SAF）最具市场潜力，而电制燃料（PtL）则因其巨大的减排潜力和理论上不受限的原材料可获得性，被视为是长期的发展方向。

图表8：代表性技术路线比较

技术路线	特点	优势	适用原材料	产业化进展	主要国家
绿色甲醇合成	成熟的煤化工技术移植	技术基础好、工程经验丰富	黑颗粒、林业剩余物	万吨级示范	中国、欧盟
生物基可持续航空燃料（bio-based SAF）	可生产高品质航煤组分	产品直接替代化石航煤	黑颗粒、木质纤维	千吨级示范	美国、欧盟
电制燃料(PtL)	绿氢+CO ₂ 合成	长期潜力大、碳源灵活	绿电、CO ₂	百吨级示范	德国、北欧

绿色甲醇合成： 产业化的先行者

生物质绿色甲醇合成技术路径，本质上是对成熟煤化工工艺的绿色化移植与再造。通过微米化生物碳基材料的高效气化与绿氢的协同补氢，该路线产出的绿色甲醇在能量密度、储运安全性及碳排放强度方面均展现出优异性能。产业化层面，截至2025年末，中国绿色甲醇规划产能已超6,000万吨，实际投产约1%，仍处于商业化爆发前的关键爬坡期。这一路径的快速推进，为后续SAF生产提供了坚实的基础原料支撑。

生物基可持续航空燃料： bio-based SAF生产的直接路径

费托合成技术可一步将生物质气化气转化为可直接替代化石航煤的SAF组分，产品品质优异、产业链条简洁，是欧美SAF产业化的主流技术选择之一。在国内，龙基能源集团牵头建设的首都绿色航煤能源保供项目，成为该技术路线的标志性示范工程，推动我国SAF产业化迈出关键一步。项目采用“生物质气化—费托合成—加氢提质”创新技术路线，以北京本地农林废弃物为原料，每年可消纳约100万吨秸秆等废弃物，全生命周期预计年减碳80万吨。产品的全生命周期减排效果突出，技术路线相较于国内主流的废弃油脂HEFA路线具备显著的差异化竞争力，实现了原料自主可控。该项目的落地实施，将有效填补国内规模化农林废弃物制SAF示范工程的空白，带动技术迭代、成本下降与产业生态完善，为国家“双碳”目标实现与新质生产力培育提供重要支撑。

电制燃料（PtL）： 面向更长远未来的技术储备

电制燃料（PtL）以绿氢和CO₂为原料直接合成液态燃料，是长远视角最具潜力的绿色燃料技术路径。其核心优势在于碳源高度灵活——既可捕集生物质CO₂，也可直接空气捕集，几乎不受生物质资源地域限制约束，减排能力尤为突出。作为产业化的先行示范，德国INERATEC公司在法兰克福正式投运欧洲最大PtL工厂ERA ONE，以可再生氢和生物质CO₂为原料，年产2,500吨碳中性合成燃料，产品可加工为e-SAF、e-柴油等即掺即用型燃料。当前PtL的主要瓶颈在于绿氢成本和电解效率，当制氢电价降至0.15—0.2元/度时，离网制氢将具备经济性，届时PtL的成本竞争力有望显著提升。化工技术赋能：从示范工程迈向工业生态

微米化生物碳基材料破解了生物质原料端的非均质性困局，为下游化工转化提供了稳定、标准化的原料输入；绿氢作为氢源补偿单元，突破了生物质“高氧低氢”的碳约束，优化了反应体系的元素配比；绿色甲醇合成、生物基可持续航空燃料等化工技术则将这些原料与能源要素转化为可商业化的绿色燃料产品。三者的协同，构成了一条从“原料革命”到“要素协同”再到“化工技术”的完整产业化链条。当前中国在生物质制绿色甲醇领域已形成显著的产能先发优势和规模化经验，欧美则在SAF认证标准、费托合成和PtL领域拥有深厚的技术积淀。随着SAF强制掺混政策的全球推进（欧盟ReFuelEU Aviation于2025年正式进入履约期，2%掺混比例生效），绿色燃料的产业化进程正从“单点技术突破”走向“体系化协同推进”的新阶段。

4

价值链 合力推动 产业化 进程

尽管技术革新正在加速生物质绿色燃料的成本下降与产能扩张，但在产业化初期，技术本身尚不足以催熟一个新兴市场。从生产端到消费端，产业链各环节仍面临多重不确定性：具备生产能力的企业对原料供应的稳定性及市场实际需求存在顾虑；下游买家则担忧绿色燃料的经济性及绿色属性的可追溯性；潜在投资者同样需要在回报周期与风险之间进行审慎权衡。这种相互观望的格局，构成了绿色燃料产业正面临的“先有鸡还是先有蛋”困境。

为应对这一局面，本章总结了多项已在绿色燃料产业中实际应用的创新价值链合作方案。这些方案旨在为产业链各方建立足够的信心支点，推动构建涵盖研发与成果转化、投融资、商业模式与政策体系的产业生态，从而为生物质绿色燃料的商业化铺平道路。

4.1

研发协同：全流程联合攻关加速技术转化

生物质绿色燃料的生产涉及原料预处理、气化、合成、催化等多个技术环节，技术路线选择多样。即便某一企业或科研机构在单个环节取得突破，也很难独立完成从基础研究到工程化验证的全流程整合与优化。同时，作为一个新兴领域，行业内尚未形成有效的协作机制来分担研发成本和风险，导致许多有潜力的技术路线长期停留在实验室阶段，拖慢了技术更新的节奏。

全流程联合攻关模式为缩短前沿技术从实验室到工厂的转化周期提供了方案。其核心在一个统一的平台上将不同环节的技术研发、中试验证和工程应用串联起来，打通从原料到成品的完整工艺链路，并通过明确的分工和紧密的协作，使各方能够将各自的创新成果有效汇聚并转化为实际价值。这种全流程联合攻关模式既为前沿技术提供了真实的工程验证场景，还有助于推动产业链各方形成统一的技术标准，减少不同环节之间的对接成本。

企业案例：

2023年8月，德国初创企业C1 Green Chemicals AG牵头启动Leuna 100项目，将弗劳恩霍夫风能系统研究所（Fraunhofer IWES）、弗劳恩霍夫环境安全与能源技术研究所（Fraunhofer UMSICHT）、DBI气体技术研究所及柏林工业大学等多家研发机构集聚于同一化工园区，共同攻关绿色甲醇的规模化生产技术。项目中各方分工明确：C1提供其专有的新型催化技术，三所研究所分别负责合成气的制备、逆水煤气变换以及负荷灵活性评估等关键环节，柏林工业大学则主导项目整体工艺模型及运行方案的开发。

项目预计运行三年，获得了德国联邦数字与交通部“可再生燃料资助计划”1,040万欧元专项支持。同时，Leuna100项目通过整合工艺链，为生产符合欧盟标准的绿色甲醇创造了条件。因此，在启动初期便已锁定林德、科莱恩等产业方及马士基等航运承购方，为技术研发提供了清晰的市场出口。依托项目实施积累的技术能力，C1公司于2025年进一步完成2,000万欧元融资。

4.2

供应链协同：上游收、储、运、制一体化模式的工程案例

上游原材料的供应是当前生物质绿色燃料产业链最突出的短板之一。生物质资源分布广泛、季节性强、物理形态差异大，在传统的“分散收集、分散利用”模式下，不仅难以保证稳定的供应量，还存在原料品质波动剧烈的问题。生物质原料热值、水分、灰分等关键指标不稳定，将直接影响后续气化、发酵等转化工艺的运行效率和产品一致性，甚至造成生产装置的停机，显著抬高了运营成本和投资风险。

应对这一问题，专业化的生物质收储企业正在探索“分散收集-集中制粒-统一供应”的新模式。在这一模式下，由农户或合作社分散收集秸秆等生物质原材料，专业公司建设区域性的预处理中心，将不同来源、不同批次的生物质原料进行集中筛分、干燥、制粒等均质化处理，加工为品质稳定、指标可控的标准化微米化生物碳基材料——从而形成标准化的原料供应链体系，打通从田间到工厂的“最后一公里”。

这一模式实现了多重价值：对农户而言，秸秆从“负担”转变为具有稳定销路的“产品”；对绿色燃料工厂而言，进厂原料从品质波动剧烈的木质颗粒升级为性能稳定的微米化生物碳基材料，显著提升了装置运行的可靠性。同时，该模式在乡村区域内构建起“农业废弃物—绿色燃料—低碳交通”的循环产业链，充分释放了生物质资源的价值，为乡村经济的可持续发展探索了新路径。

实践案例：

北京盛昌益态新能源科技有限公司依托北京延庆区及周边农业、林业及城市园林体系的多源生物质资源，构建了面向工程化应用的“收、储、运、制”一体化体系。在收储环节，通过分散收集与集中暂存，实现多源原料的区域整合与质量初步分级；在运输环节，依托标准化打捆与组织化物流，实现原料由分散端向加工中心的规模化、高效转运；在加工制备环节，通过分质利用，将筛下物用于有机肥生产回归农业体系，将木质组分加工为结构稳定、性质均一的微米化生物碳基材料，作为气化等热化学转化工艺的优质原料，同时将秸秆类原料制备为生物质颗粒，并用于下游能源利用场景。

从工程性能来看，该微米化生物碳基材料低位热值稳定在4,500–5,000 kcal/kg，堆积密度约750kg/m³，具备优异的抗水性能，哈式可磨系数约50，整体表现出较好的成型稳定性与工业适配性，可有效提升气化等连续化装置的进料均一性与运行稳定性。

目前，该企业已形成较为稳定的区域化原料组织与加工能力，并规划建设年处理能力约20万吨的微米化生物碳基材料加工中心，以进一步提升规模化处理与标准化产品输出能力，预计于2027年前后具备投产条件。通过各环节协同衔接，有望逐步构建起覆盖“收集—预处理—转化利用”的区域性生物质资源工程化利用体系，推动生物质资源由分散低值利用向规模化、工业化应用转型。

4.3
商业模式创新：Book and Claim模式突破供应链掣肘，聚合市场需求

在绿色燃料迈向商业化的道路上，物理供应链的局限性始终是面临的主要阻碍之一。绿色燃料运输网络与加注设施等的建设需要较长的周期和资金支持，在产业化初期，往往仅在有限的机场或港口能够提供绿色燃料加注服务。这意味着，即使有潜在买家愿意采购，若其所在机场尚未建立加注能力，便无法实际获取绿色燃料。而传统供应链模式要求绿色燃料及其附带的环境权益在同一个环节、同一地点完成物理交割，因此绿色燃料的减排价值也被限制在现有的基础设施网络中，无法在全球市场中灵活交易及转移。

Book and Claim（登记与申报）机制为绿色燃料提供了一种创新的交付模式。在这一机制下，燃料生产商将一定数量的绿色燃料及其减排属性注册入系统进行“登记”（Book），航空公司、航运公司等终端用户可以在无需实际加注绿色燃料的情况下，在系统购买对应减碳权益完成“申报”（Claim），从而降低物流成本并避免额外排放。

Book and Claim模式解决了多个痛点。首先，生产商无需将燃料物理配送至每一个运输枢纽，需求方也可以突破物理空间的限制，灵活的获取绿色燃料的减排权益，从而让有限产能最大限度覆盖需求市场。其次，绿色燃料的环境权益能够被独立定价，并依托生产、登记、转移、申报这一体系确保减排权益透明可追溯。同时，Book and Claim模式还能起到需求聚合的作用，登记与申报平台能够汇集分散的小额采购需求，为生产商提供稳健、可预期的大规模采购合约。例如德勤作为可持续航空买家联盟（SABA）成员，通过该平台联合多家跨国企业大规模采购可持续航空燃料证书（SAFc），用于减少商务差旅中产生的碳排放。

企业案例：

可持续航空买家联盟（SABA）正是将Book and Claim从理论概念推向规模化实践的最具代表性范例。该联盟由落基山研究所（RMI）、环境保护基金（EDF）等机构于2021年共同发起，成员覆盖金融、科技、咨询、制造等多个行业。该联盟通过聚合企业成员的需求，以联合采购方式推动SAF证书的交易，在助力企业突破采购瓶颈，获取可信减排权益的同时，以长期承购协议为投资者增强信心，从而为SAF产能的后续融资注入动力。

2025年5月25日，SABA正式上线了全球首个SAFc Connect数字平台。该平台汇聚阿拉斯加航空、捷蓝航空等多家SAF证书提供商，这些航空公司将作为终端用户实际接收绿色燃料。SAFc Connect平台则利用book and claim模式，将这些绿色燃料的环境权益从燃料价值中分离出来，并转换为SAF证书。SABA的企业成员可通过平台购买SAF证书，用于削减企业在差旅、物流等环节中产生的碳足迹。自2021年成立以来，SABA已与企业买家合作，聚集了超过4亿美元的可持续航空燃料（SAF）证书需求，并通过大规模采购承诺支持绿色燃料新建产能的最终投资决策。

4.4

多元化融资体系：借助创新融资工具拓宽资金渠道

绿色燃料生产项目属于典型的重资产投资，单个项目动辄数十亿甚至上百亿元，若进一步考虑原料供应链、储运加注等基础设施体系的配套建设，所需资金规模更为庞大。尽管近年来，资本正加速流入这一领域，但距离满足整个产业链的资金需求仍有巨大差距。航空公司和航运企业在与生产商探讨长期合同时，往往因看不到确定的大规模产能和可靠的燃料供应网络而难以做出最终投资决定，延缓了整个市场的启动。

建设多元化融资体系是绿色燃料产业走向规模化的必经之路。在传统的银行贷款之外，绿色债券、产业基金、公募

REITs以及政策性金融工具等，正在逐步向绿色燃料领域开放。在海外，芬兰Neste公司等绿色燃料生产商已经开展了绿色债券等融资工具的探索，在政策性融资方面，欧盟委员会主导设立的欧洲氢能银行自2024年起以公开拍卖方式为绿氢项目提供补贴，通过市场化竞价确定补贴额度，用以应对氢能项目发展初期的投资缺口。在2025年完成的拍卖中，累计为15个可再生氢生产项目筹集资金9.92亿欧元。

与此同时，中国的政策窗口也在逐步打开。2026年政府工作报告首次提出“设立国家低碳转型基金，培育氢能、绿色燃料等新增长点”，为产业资金保障释放了积极信号。此前，基础设施公募REITs已经将氢能及绿色燃料项目列入重点支持范围，2025年中国人民银行等部门发布的《绿色金融支持项目目录（2025年版）》也将氢能、绿色燃料等明确纳入绿色贷款和绿色债券的支持范围。这些政策通道的逐步打通，为绿色燃料产业构建多元化融资体系提供了现实可行性。

实践案例：

2025年3月，全球领先的可再生柴油与可持续航空燃料（SAF）生产商芬兰Neste公司成功发行7亿欧元绿色债券，期限5年，票面利率3.75%。募得资金将投向鹿特丹炼厂扩建项目——扩建完成后，鹿特丹炼油厂的年产能将从140万吨提升至270万吨，其中SAF年产能将达到120万吨，成为全球最大的绿色柴油和SAF生产设施。

这一成功的融资案例证明，当强制掺混政策和碳市场机制为欧洲范围内的绿色燃料需求托底时，绿色燃料项目对投资者的吸引力显著增强。绿色债券等融资工具也因此能够为大规模产能建设提供长期、稳定的资金来源。

4.5

碳市场赋能案例：推动绿色燃料项目产生的减排量通过碳市场兑现绿色溢价

在绿色燃料产业发展过程中，碳市场的核心作用在于为减排属性提供统一的定价基础与稳定的需求来源，从而使“绿色溢价”具备可持续的市场支撑。随着碳定价机制逐步完善，绿色燃料在实现能源替代功能的同时，其所对应的减排量能够通过标准化核证进入碳交易体系，并以市场化方式形成价格信号，成为影响项目收益的重要变量。

从制度层面看，碳市场扩围正在持续释放减排需求。全国碳排放权交易市场已明确将石化、化工、造纸及民航等高排放行业纳入扩展范围，这些行业对低碳替代燃料的需求，将直接转化为对减排量的刚性需求。同时，地方层面也在探索碳市场与能源体系的协同机制，例如在航运等重点领域推动绿色燃料交易与碳市场、金融体系联动发展，为减排价值的实现提供更加多元的路径。在此基础上，核证自愿减排量（CCER）机制为项目提供了标准化入口，使分散于具体生产过程中的减排成果能够转化为可交易的碳资产，并参与市场流通。

企业案例：

以中国石油天然气集团有限公司大庆炼化公司生物质天然气制绿色甲醇项目为例，该项目于2024年9月成功产出首批绿色甲醇，以农作物秸秆等有机废弃物生产的天然气为原料，通过大庆炼化现有的天然气制甲醇装置及成熟完备的安全生产技术和运营管理体系，将生态环境保护、循环农业发展和清洁能源供给有机结合。项目随后成功通过国际可持续发展与碳认证（ISCC），于2024年10月摘获我国首张发酵工艺ISCC证书。2025年7月，该绿色甲醇产品通过中国船燃完成销售及加注，实现了‘生产-运输-储存-销售’全流程贯通。通过‘生产—认证—交易’的一体化路径，该项目不仅实现了绿色燃料的商业化示范生产，也验证了碳市场在提升项目经济性、强化收益确定性方面的实际作用。

5 展望

到2035年，中国将基本建成气候适应型社会，而绿色燃料将成为这一战略愿景的重要支点——它不仅为航空、航运等难以电气化的领域提供了切实可行的脱碳路径，也是连接农业、化工、能源与交通的产业纽带，从而将气候行动转化为驱动区域经济增长、实现公平转型的重要机遇。

而2026年至2030年，正是绿色燃料从示范走向规模化应用的关键窗口期。在这场能源技术变革中，生物质绿色燃料凭借原料来源广泛、工艺相对成熟、可直接融入现有基础设施等优势，有望在未来几年中加速迈向商业化，为2035愿景奠定坚实的产业基础。

5.1

强制性标准为绿色燃料市场注入确定性

未来绿色燃料产业政策的主基调，将逐步转向以强监管创造稳定需求。过去几年，各国已陆续出台可持续航空燃料（SAF）的强制掺混目标。展望未来五年，国际民航组织（ICAO）的CORSIA机制将于2027年进入强制履约阶段，有望进一步拉动航空公司对SAF证书的需求。国际海事组织（IMO）的净零框架预计也将在2027-2028年达成最终方案。这两大强制性要求将使绿色燃料从“可选项”变为“必选项”，为生产商和投资者提供稳定的需求预期。

与此同时，标准制定与国际互认成为下一阶段必须攻克的制度瓶颈。当前，不同国家和地区的绿色燃料认证体系在核算边界、原料准入规则、温室气体减排阈值等方面仍存在差异，无形中推高了跨境贸易中的合规成本。一套广泛互认的认证体系，不仅能有效降低跨境贸易的合规成本，还将使绿色燃料的减排价值在全球范围内得到清晰、一致的认可，从而真正推动绿色燃料走向全球性的市场。

5.2

绿色燃料产业集群崛起，成为连接区域经济增长的纽带

绿色燃料的生产具有明显的资源依赖性和规模经济效应。未来几年中，随着产能规模的增长，中国的绿色燃料产业布局有望从当前的零星试点，逐步走向“资源—转化—应用”一体化的集群发展。未来五年中，三类功能互补的基地正在加速成型。

在黑龙江、吉林、河南等农业主产区，分布式的原料预处理基地将秸秆、林业剩余物转化为高密度、低成本的标准化原料。这些标准化原料经由物流网络输送至位于沿海化工园区的转化生产基地，规模化生产出绿色燃料，并依托园区周边的港口物流设施，流向上海港、宁波舟山港、新加坡港等国际枢纽，在交易平台完成交易并最终加注应用。

这三类基地将被绿色燃料产业链串联成一个完整的绿色经济走廊，使内陆农业地区首次深度参与全球绿色燃料贸易，将能源转型的红利从沿海大城市延伸至县域和农村，真正成为公平转型的桥梁。

5.3

创新商业模式让减排价值抵达终端消费者

展望未来，绿色燃料的商业化应用将不再局限于航空与航运公司、机场与港口运营方、燃料生产商之间的垂直合作，而将借助商业模式创新，向更广阔的价值链延伸。绿色物流、绿色差旅等新兴的商业模式正逐步在制造、零售、科技等诸多行业铺开，成为连接绿色燃料产业链与更广泛的终端用户的关键纽带。物流服

务商在提供运输服务的同时，为货主提供绿色燃料环境权益的采购选项，为制造、零售等行业的供应链脱碳提供可行方案，绿色差旅服务则通过绿色燃料的证书化交易，支持企业员工在不改变出行体验的前提下，共同参与航空脱碳。

在这一趋势下，未来越来越多的价值链相关方——企业、差旅客户乃至个人消费者——都能够以可承受的成本获取绿色燃料的环境权益，并将其纳入自身的碳排放管理与ESG信息披露。这意味着，绿色燃料的需求支撑将不再依赖少数产业链环节，而是由整个经济社会共同分担。

5.4

多元耦合与联产模式激活绿色燃料的商业潜力

在生产端，单一原料、单一产品的传统路线将逐步被多源耦合、多联产的柔性系统取代。这意味着，基于生物质气化与绿电制氢、碳捕集与利用（CCUS）等技术的深度协同，一套生产体系可以同时产出绿色甲醇、生物航煤、可再生柴油等多种产物，并能够根据电价、碳价和原料价格信号灵活调整产品结构，进而提升项目的经济性。

与此同时，多能耦合技术将支持绿色燃料的应用场景从航空、航运向更广泛的领域扩展。在园区能源体系中，绿色甲醇可以直接用于燃料电池发电或燃气轮机调峰，成为可再生能源电力的补充；在工业窑炉中，绿氢可以替代煤炭作为还原剂或燃料。未来五年，绿色燃料将不再是“交通专用”，而是成为新型电力系统和工业低碳转型中的灵活能源载体。

5.5

数智化技术全面赋能绿色燃料产业链，打造可追溯认证链条

绿色燃料的溢价能力，从根本上取决于其减排量的可信度和可追溯性。而区块链、物联网和人工智能等技术的快速发展，将改写绿色燃料的生产、交易与认证等各个环节，为绿色燃料产业开启新的机遇。

在原料端，借助遥感卫星、物联网传感器等技术手段，可对秸秆、林业剩余物等生物质资源的分布、收储成本与品质波动进行动态预测与智能调度，从源头为每一批原料建立可追溯的数字档案。在生产端，人工智能技术能够通过模拟工艺参数变化对转化效率与产品质量的影响，实现生产过程的自适应优化与预测性维护。在认证与交易环节，借助区块链技术构建一套不可篡改的碳足迹记录，将为碳市场交易和国际认证提供坚实的数据基础。

展望未来，数智化技术在绿色燃料产业中深度应用，将不仅能促进效率的提升和生产工艺的升级，还将推动绿色燃料的减排贡献被精确衡量、充分兑现，从而加速商业化进程。

结语

站在2026年的起点，面向2035年气候适应型社会基本建成的宏伟目标，绿色燃料产业正从示范走向商业化的关键关口。技术突破、成本下降、政策支持、市场觉醒——多重积极因素正在汇聚，但我们必须清醒：从“规划产能”到“稳定运行的商业化产能”，仍有重重关山待越。

作为北京能源学会会长，同时长期深耕气候变化政策与碳市场研究，我深感本白皮书发布恰逢其时。当前，全球航运与航空业面临前所未有的减排压力，国际海事组织、国际民航组织已划定净零路线图。生物质绿色燃料凭借与现有基础设施的高度兼容性，成为近期填补需求缺口的最现实选择。然而，生物质原料的非均质、高波动性始终是产业化的“阿喀琉斯之踵”。本白皮书从技术、成本、产业生态三个维度深度剖析了这一系统性难题，为行业提供了兼具前瞻性与可操作性的行动指南。

白皮书重点阐述的微米化生物碳基材料技术，堪称从源头破解困局的关键武器。通过蒸汽爆破技术，实现组分选择性解构、结构物理爆破与自黏结成型三重协同效应。半纤维素分解，消除霉变与发酵风险；木质素软化重排，赋予颗粒极强自黏结能力。不同批次、不同来源的农林废弃物经处理后高度一致，成为标准化工业原料，大幅提升运输效率、节省仓储空间，直接冲击占比超50%的原料收储运成本。微米化生物碳基材料从源头上驯服了生物质的“野性”，为下游气化与合成提供了稳定可靠的原料输入，是实现“安稳长满优”的根本前提。

白皮书还系统梳理了固定床、流化床、气流床的工程放大瓶颈，费托合成产物分布宽、催化剂抗波动差、能耗高等难题，以及碳足迹标准缺失、基础设施短板、下游客户观望等产业生态挑战，为攻关提供了清晰路线图。

北京能源学会将以本白皮书为起点，联合产学研力量：一是推动微米化生物碳基材料技术标准制定与推广；二是组织气化炉大型化、催化剂长周期运行等关键技术攻关；三是搭建跨产业链协同平台，探索风险共担、利益共享机制；四是助力标准认证体系建设，推动中国标准与国际ISCC、RSB等对话互认。

微米化生物碳基材料的成熟、甲醇制喷气燃料的突破、上海“双中心”的建设，汇聚成一个共同判断：中国有条件、有能力成为全球绿色燃料供应链的关键一环，为航运、航空低碳转型贡献中国方案。这不仅是一个产业的机遇，更是一份时代的责任。让我们以技术创新为驱动，以产业协作为支撑，共同迎接绿色燃料产业化的春天，为构建气候适应型社会贡献智慧和力量。

作者

北京能源学会

夏学杰

北京节能环保中心
副主任

李忠武

北京能源学会
常务副会长兼秘书长

李芃芃

北京节能环保中心
能效监测部工程师

德勤中国

郭晓波

德勤中国战略客户服务
领导合伙人

陈岚

德勤中国经济与产业
研究院 院长 合伙人

曹彤

德勤中国能源、资源及
工业行业高级经理

徐欣馨

德勤中国能源、资源及
工业行业研究经理

龙基能源

傅友红

龙基能源董事长

傅玉清

龙基能源总裁

赵金立

龙基能源高级顾问，
神华煤制油副总指挥

刘鹏

龙基能源副总经理

李德华

龙基能源高级项目经理

高鑫

龙基能源高级研究员

关于德勤

德勤中国是一家立足本土、连接全球的综合性专业服务机构，由德勤中国的合伙人共同拥有，始终服务于中国改革开放和经济建设的前沿。我们的办公室遍布中国31个城市，现有超过2万名专业人才，向客户提供审计、税务、咨询等全球领先的一站式专业服务。

我们诚信为本，坚守质量，勇于创新，以卓越的专业能力、丰富的行业洞察和智慧的技术解决方案，助力各行各业的客户与合作伙伴把握机遇，应对挑战，实现世界一流的高质量发展目标。

德勤品牌始于1845年，其中文名称“德勤”于1978年启用，寓意“敬德修业，业精于勤”。德勤全球专业网络的成员机构遍布150多个国家或地区，以“因我不同，成就不凡”为宗旨，为资本市场增强公众信任，为客户转型升级赋能，为人才激活迎接未来的能力，为更繁荣的经济、更公平的社会和可持续的世界开拓前行。

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承担责任，而对相互的行为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。

德勤亚太有限公司（一家担保责任有限公司，是境外设立有限责任公司的其中一种形式，成员以其所担保的金额为限对公司承担责任）是德勤有限公司的成员所。德勤亚太有限公司的每一家成员及其关联机构均为具有独立法律地位的法律实体，在亚太地区超过100个城市提供专业服务，包括奥克兰、曼谷、北京、班加罗尔、河内、香港、雅加达、吉隆坡、马尼拉、墨尔本、孟买、新德里、大阪、首尔、上海、新加坡、悉尼、台北和东京。

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。

© 2026。欲了解更多信息，请联系德勤中国。
Designed by CoRe Creative Services. RITM2552845



这是环保纸印刷品