

北京大学能源研究院

生物质乙醇在绿色低碳场景中的创新应用





北京大学能源研究院 INSTITUTE OF ENERGY

北京大学能源研究院是北京大学下属独立科研实体机构。研究院以国家能源发展战略需求为导向，立足能源领域全局及国际前沿，利用北京大学学科门类齐全的优势，聚焦制约我国能源行业发展的重大战略和科技问题，按照“需求导向、学科引领、软硬结合、交叉创新、突出重点、形成特色”的宗旨，推动能源科技进展，促进能源清洁转型，开展专业及公众教育，致力于打造国际水平的能源智库和能源科技研发推广平台。



CPCIF

中国石油和化学工业联合会（CPCIF）成立于 2001 年，是我国石油和化工行业最具代表性的全国性、综合性行业组织，会员单位覆盖企业、科研院所、专业与地方协会等 2500 余家，行业重点领域均有广泛覆盖。作为国家民政部登记的 5A 社会组织，CPCIF 致力于服务企业、沟通政府、凝聚行业力量，推动技术进步与产业升级。联合会积极反映企业诉求、促进公平竞争、支持政策制定，已成为我国石油和化工行业发展的核心平台和国际交流的重要桥梁。

报告编写人员

丁奕如¹、汪申²、阎靛玉³、张嘉育³、李顶杰³、安锋⁴、庞广廉³、杨雷¹

致谢

本研究报告由北京大学能源研究院与中国石油和化学工业联合会联合组织编写。生物质乙醇即将在新时期肩负新使命，迎来创新发展的重要机遇。我们在此较短时间内完成本报告，旨在为即将开展的国际交流提供政策参考，同时期待以此为契机，凝聚更多产业力量，共同推动行业进步。

在报告撰写过程中，我们得到了以下来自产业界与研究机构的专家们的大力支持，在此谨致诚挚感谢：亚绿航油有限公司、能源与交通创新中心、黑龙江鸿展生物科技股份有限公司和中国石化石科院。

由于时间仓促，报告难免存在不足之处，若您有任何意见或建议，欢迎随时与我们联系：yrd@pku.edu.cn

1 北京大学能源研究院

2 亚绿航油有限公司

3 中国石油和化学工业联合会

4 能源与交通创新中心

生物质乙醇在绿色低碳场景中的 创新应用

北京大学能源研究院

2026 年 3 月

目录

◎ 执行摘要	1
◎ 第一章 引言	2
(一) 碳中和背景下绿色燃料的角色演变	2
(二) 生物质乙醇的产业基础与技术特征	4
(三) 生物质乙醇应用边界的拓展	5
◎ 第二章 绿色航运: 生物乙醇与绿色甲醇掺混	6
(一) 政策及法规进展	6
(二) 全球船队的燃油现状	8
(三) 产业链的创新突破	9
(四) 小结	11
◎ 第三章 绿色航空: 以生物质乙醇为原料规模化生产 SAF	12
(一) 背景与意义	12
(二) 技术路线与应用现状	13
(三) 相关国家的支持政策	18
(四) 小结	18

◎ 第四章 绿色塑料: 向下游高价值化学品的延伸.....	19
(一) 背景与意义.....	19
(二) 政策环境.....	21
(三) 技术路线与工艺比较.....	24
(四) 经济性分析.....	25
(五) 代表性商业案例.....	27
小结.....	27
◎ 综合分析 with 政策建议.....	27
◎ 参考文献.....	28

执行摘要

在时代大变局下，能源转型与碳中和目标正赋予生物质乙醇以全新的战略使命——由传统的交通燃料，进化为“燃料 + 化工 + 新材料”三位一体的复合产品。本报告系统梳理了这一战略升级背后的创新路径与应用展望。

报告聚焦三大前沿低碳应用：在绿色航运领域，乙醇与甲醇掺混技术已获马士基等国际巨头验证，2024 年全球船用乙醇消费量同比增长近五倍，爆发式增长印证其技术可行性；在绿色航空领域，乙醇制可持续航空燃料技术已通过 ASTM 国际标准认证，叠加美国可持续航空燃料税收抵免政策驱动，商业化落地正在加速；在绿色塑料领域，乙醇经乙烯路径生产生物基 PVC、PE 等产品的技术已实现商业化案例，为化工产业提供了可再生化工碳源重要选项，未来有望成为连接生物经济与传统化工产业的桥梁。

报告指出，生物乙醇面临广阔市场空间和创新发展机遇，广泛原料提供坚实基础，技术创新是核心动力，独特社会价值将发挥重要作用，有望成为全球绿色低碳转型共同选择。然而，产业跨越式发展仍需突破成本控制、标准体系与国际协同三大瓶颈。建议通过持续技术创新降低成本、加快构建国内国际互认的标准体系、深化产业链国际合作，推动生物质乙醇真正成为连接生物经济与传统化工的战略纽带，为全球碳中和目标提供兼具战略价值与现实可行性的中国方案。

第一章 引言

2022年，欧盟超40%的天然气依赖俄罗斯。俄乌战争爆发后欧盟仓促加速转型，为摆脱俄气付出了巨大代价。2026年，中国超40%的石油经由霍尔木兹海峡。2月28日，美以轰炸伊朗导致航道封锁，供应断链，全球油价飙升。历史不会重演，但总是押韵。而这一次，中国的两会政府工作报告已经把绿色燃料写入新增长点。全球能源秩序正在悄然转向，绿色燃料正是中国在这场世纪性能源权力转移中占据主动、赢得未来的重要抓手。

(一) 碳中和背景下绿色燃料的角色演变

在碳中和目标背景下，能源系统正在发生根本性的改变。过去三十年，全球风电与光伏在政策与市场推动下实现跨越式增长，成本显著下降并从小众走向主流。2010年至2024年间，太阳能光伏发电的总装机成本下降了87%，平准化电力成本下降了90%。中国可再生能源发展进入规模化与市场化并行推进的新阶段，截至2026年1月，风电累计装机规模约6.4亿千瓦，光伏累计装机达到约12.0亿千瓦，可再生电力接近全国电力总装机的47%¹，IEA预计到2030年前，中国还将新增超过3000GW的可再生能源装机，持续巩固可再生能源主导地位。伴随着电力市场化转型，市场正在发挥越来越主导的作用。宁夏光伏项目机制电价竞价探底至0.18元/千瓦时，新疆光伏项目机制电价低至0.15元/千瓦时，远低于火电全生命周期成本。电力在中国正在成为最廉价、最清洁的能源载体。通过Power-to-X（电转X）路径制取的氢、氨、醇等合成燃料，其成本瓶颈逐渐从能源获取转向转化效率与设备投资，以及相应的商业模式和运行方式。这一变化改善了绿色燃料的经济性，使之由化石燃料的补充替代品同时也成为可再生能源系统的重要的转换和安全载体。

2010 年和 2024 年不同可再生能源技术的总装机成本、容量系数和 LCOE 变化趋势

	总装机成本			容量系数			平准化度电成本		
	(2024 美元 / 千瓦)			(%)			(2024 美元 / 千瓦时)		
	2010	2024	百分比变化	2010	2024	百分比变化	2010	2024	百分比变化
生物能	3 082	3 242	5%	72	73	1%	0.086	0.087	1%
地热能	3 083	4 015	30%	87	88	1%	0.055	0.060	9%
水电	1 494	2 267	52%	44	48	9%	0.044	0.057	30%
太阳能光伏	5 283	691	-87%	15	17	13%	0.417	0.043	-90%
聚光太阳能	10 703	3 677	-66%	30	41	37%	0.402	0.092	-77%
陆上风电	2 324	1 041	-55%	27	34	26%	0.113	0.034	-70%
海上风电	5 518	2 852	-48%	38	42	11%	0.208	0.079	-62%

IRENA (2025), 2024 年可再生能源发电成本, 国际可再生能源机构, 阿布扎比

图 1-1: 2010 年至 2024 年可再生能源发电成本

基于上述分析，绿色燃料在碳中和背景下的角色发生了三重转变。

第一，从减排可选路径转向能源安全必选项。早期绿色燃料主要作为降低化石能源碳排放强度的补充性手段，其发展动力主要来自气候政策。然而，随着全球能源供应不确定性上升以及化石燃料对外依存度问题凸显，绿色燃料逐渐被赋予能源安全战略功能，通过利用本土可再生资源生产液体燃料，全面替代进口石油，实现能源独立。

第二，从终端消费品转向能源体系的支撑性组件。随着可再生电力占比持续提高，能源系统的时空错配问题日益突出。绿色燃料通过将电力转化为可储存、可运输的化学能，实现能源在时间与空间维度上的再配置，从而成为绿色电力的重要协同载体，并延伸至电气化难以覆盖的航空、航运及部分工业部门。

第三，从可再生能源转向可再生能源 + 碳源的双重载体。在化工、航空及部分重工业部门，碳基分子结构具有不可替代性，其生产仍需稳定的碳来源。随着新型能源体系的发展，能碳开始出现结构性分离：能量可由可再生电力提供，而碳则必须来自非化石来源。通过生物质转化或空气捕获的碳，以材料形态进入工业系统，长期固定在产品中。绿色燃料的可再生碳属性将进一步得到加强。

综上所述，绿色燃料的能源安全属性决定了其发展的战略必然性，能源系统属性界定了其在可再生能源体系中的功能边界，而碳资源属性则揭示了其在深度脱碳中的不可替代本质。安全、系统和资源三重属性的叠加，共同定义了绿色燃料在碳中和背景下的不可替代的位置。

(二) 生物质乙醇的产业基础与技术特征

在绿色燃料转型升级的背景下，不同技术路径开展了多方向的发展。其中，生物质乙醇是中国最早实现规模化生产及应用的液体生物燃料之一。经过数十年的发展，生物质乙醇也成为全球应用最成熟的生物燃料之一。全球燃料乙醇市场已发展为规模突破百亿美元的成熟产业，并构建了完备的国际生产与贸易体系。其中，美国和巴西占据着主导地位，两国产量合计约占全球的 80%；印度和中国则紧随其后，分列全球第三和第四大生产国。全球已有超过 65 个国家实施了乙醇混合指令，混合比例从 5% 到 27% 不等，超过 130 个国家在 2023 年引入或加强了生物燃料混合政策。

生物质乙醇制取方法为将生物质中的糖分、淀粉或纤维素发酵转化、再经过脱水提纯使之达到 99% 的高纯度。生物乙醇的环境效益已得到充分验证。与汽油相比，乙醇根据原料和生产工艺不同可减少高达 10%-90% 的温室气体排放。第一代生物质乙醇以玉米、甘蔗等粮食或糖料作物为原料，主要用于与汽油以一定比例混合，作为降低碳强度的车用燃料使用，在美国巴西等国家仍具有现实基础和规模优势。

从产业基础看，中国具备良好的生物质乙醇原料基础和完整的产业链。农业农村部数据显示，到 2022 年全国秸秆年均产量约为 8.64 亿吨，2020 年以来，我国秸秆可收集利用量稳定在 7.23 亿吨左右²，其中可作为能源化利用的秸秆资源理论上超过 2 亿吨。此外，林业废弃物和城市餐厨垃圾等亦可作为原料。生物质乙醇的产业链涵盖原料收储运、预处理、发酵转化、产品分销、终端应用等环节，中国已经掌握核心的发酵和蒸馏技术，装备制造已实现完全国产化，未来有希望在收储环节进一步加强。

从技术特征看，乙醇兼具液态燃料的物理优势与化学转化的平台属性。乙醇是少数可在常温常压下以液态存在、储存安定性和材料相容性良好且腐蚀风险可控的绿色燃料之一，因此在储运环节可直接沿用现有基础设施。与氢能需要重建高压或低温储运体系、氨需要解决毒性与腐蚀性问题相比，乙醇具备安全性优良，即插即用的特性。乙醇分子结构决定了其具有丰富的转化潜力：可通过脱水制乙烯，能够替代石油基乙烯这一全球产量最大的基础化工原料。蒸汽重整制氢、AtJ 等路径可以将乙醇转化为其他高价值燃料。相关研究表明，生物质合成燃料与化学品还具有一定的固碳优势，其碳排放主要由原料运输、电力消耗及上游辅料生产产生，整体能源结构优化、碳捕集利用以及工艺耦合生产有助于降低其生命周期产生的碳排放³。

从系统角度看，绿色乙醇具有电气化所不擅长的领域，能够与之形成互补。电气化是能量传输的重要方向，但在航空、海运、重型运输、高温工业过程以及化工原料等领域，仍面临能量密度、储运成本及基础设施适配等约束。另外，乙醇以及一众绿色液体燃料可实现跨季节长时储能，弥补电池仅能短期调节的局限。

从技术演进看，生产工艺的进步正在提升生物质乙醇的经济性和可用性。乙醇生产已形成生物转化、化学合成、合成气化学等多元技术路线。第二代技术以秸秆、林业废

弃物等木质纤维素为原料，全生命周期碳排放更低，原材料供给更充分，使之具备支撑更广泛行业的可能性。近年来，纤维素乙醇技术取得重大突破，乙醇酶水解和发酵工艺的技术升级使生产成本在过去的五年降低了 18%。第三代技术采用藻类为原料，第四代技术在此之上融合了基因编辑技术。虽然第三、四代技术依旧在初试和实验室阶段，但是已经展现出直接转化成高价值化学品并同时捕获二氧化碳的强大优势。

(三) 生物质乙醇应用边界的拓展

中国自 2000 年起开启推广车用乙醇汽油试点。以此为起点，燃料乙醇产业的发展逻辑始终围绕道路运输燃料掺混这一核心展开。初期，产业主要致力于解决陈化粮积压问题；随着陈化粮消耗殆尽，2006 年之后政策方向转向鼓励非粮乙醇，目前生物质乙醇在国内已经具备成熟的产业体系和供应链基础。

但 20 年来的实践表明，这一路径在落地过程中面临多重困境：**一是使用难推广。**截至目前，我国已在东北三省、河南、安徽、广西等省份全域推广乙醇汽油，但由于在寒冷地区使用乙醇汽油启动难、油耗高、动力差、保质期短等问题，终端用户对于 E10 有强烈抵触情绪，推广效果未达预期；**二是收益不稳定。**粮食乙醇受玉米价格波动影响，企业长期亏损，而纤维素乙醇受制于收储成本高及处理技术瓶颈，其成本比粮食乙醇还要高出约 20%，缺乏市场竞争力，导致二代技术的乙醇项目仍然难以为继。**三是市场空间小。**在道路交通快速电动化的背景下，对汽油的替代加速。虽然乙醇推广初期即定调为生物质乙醇，但煤制乙醇凭借成本优势迅速渗透了部分生物质乙醇市场份额，导致传统燃料乙醇的发展空间明显收缩。

当前可再生乙醇重新值得重视，并不是因为旧路径重新成立，而是因为生物质乙醇的应用边界正在向燃料、材料与化工开启多元的转化。在新的能源体系框架下，其应用范围已逐步突破传统汽油掺混领域，呈现出向更广泛产业部门延伸的趋势。应用场景的多元化进一步推动生物质乙醇从单一燃料向多功能平台型产品升级。除传统车用燃料领域外，高纯度生物质乙醇可作为核心平台化合物，延伸生产乙烯、聚乙烯、乙酸、乙酯等关键化工中间体；同时，在氢能、生物航油等新兴领域，生物质乙醇可通过催化重整、加氢改性等工艺实现耦合利用，成为跨能源形态、跨产业链条的关键衔接产品。随着非粮原料供给体系持续完善、生物质乙醇制备技术不断迭代，以及双碳目标下低碳产品需求增长，生物质乙醇将突破传统生物燃料的定位局限，逐步构建起燃料 + 化工 + 新材料应用新格局，成为支撑多领域绿色低碳转型的重要生物质基产品。

基于上述优势，生物质乙醇的产业发展有望在三个方向实现创新性的应用：**一是作为绿色船用燃料进行直接或掺混加注**，继续在交通燃料领域发挥替代作用；**二是通过 AtJ 技术规模化生产可持续航空燃料 SAF**，具有原料充足的优势；**三是作为可再生碳源进入绿色化工体系**，通过脱水制乙烯等路径生产生物基化学品，从而在材料和化工产业中发挥作用。

第二章 绿色航运：生物乙醇与绿色甲醇掺混

航运业是国际贸易和全球供应链的重要支柱，但也是一大“耗能主体”。船舶货运目前在国际货运贸易总量中的占比约为 80%，并相应带来约 3% 的全球温室气体（GHG）排放。2024 年全球航运碳排放再创新高，总排放约 10.6-10.8 亿吨二氧化碳（CO₂），占全球能源相关排放 2.5%。

（一）政策及法规进展

2023 年，国际海事组织（IMO）通过了一项战略修订，目标是在 2050 年前后将国际航运领域的温室气体（GHG）排放降至净零。该战略设定了两个阶段性目标：即到 2030 年减少 20% 的温室气体排放（力争达到 30%）；到 2040 年减少 70%（力争达到 80%）。两个阶段性目标均以 2008 年排放水平为基准。

2025 年 4 月，IMO 批准了具有强制约束力的温室气体减排核心中期措施“IMO 净零框架”草案，以推动减排目标的实现。IMO 净零框架是全球首个将行业领域强制性排放限制和温室气体定价相结合的框架，核心举措是惩罚不满足排放限制的船舶、奖励满足排放限制的船舶和激励使用零或近零温室气体排放技术、燃料和 / 或能源（ZNSs），标志着 IMO 减排策略从以船舶能效设计指数（EEDI）、现有船能效指数（EEXI）和碳强度指数（CII）等为代表的船舶能效管理，转向**对船舶燃料的全生命周期排放进行管控**。IMO 净零框架由技术要素和经济要素组成，其中技术要素的核心是年度温室气体强度（GFI）目标要求。GFI 目标为双重目标，包含宽松的基础目标（Base target annual GFI）和严格的直接合规目标（Direct compliance target annual GFI）。经济要素是基于双重年度温室气体强度目标要求的船舶灵活履约机制和差异化温室气体排放定价机制。

2025 年 10 月，IMO 海上环境保护委员会（MEPC）特别会议（MEPC/ES.2）对 IMO 净零框架草案进行了审议。会议过程中各方对于是否即时通过 IMO 净零框架以及是否应采取明示生效程序等方面存在较大分歧，最终决定休会一年延期表决。

在欧盟，《欧盟海运燃料条例》（RefuelEU Maritime）是欧盟为推动航运业脱碳

而出台的核心法规，自 2025 年 1 月 1 日起正式生效，该条例适用于 5000 总吨以上所有船旗国船舶，停靠欧盟港口及欧盟内航段能源用量全统计，欧盟与非欧盟港口间航段按 50% 统计。《欧盟海运燃料条例》旨在提高船用燃料脱碳，其主要目标是增加对可再生和低碳燃料的需求和持续使用，减少海事部门的温室气体排放，同时确保海上交通的平稳运行。与基于市场的欧盟碳排放交易体系（EU ETS）不同，《欧盟海运燃料条例》是一个从技术层面直接对航运公司温室气体排放进行限定的法规，其衡量标准是航运公司全年平均燃料温室气体强度。

在中国，已在国家层面出台多项政策为航运绿色低碳转型提供核心指引，部委层面强化配套资金支持以注入关键动力，地方政府层面则积极探索差异化示范措施，为政策落地保驾护航。

2023 年 12 月，工信部、发改委等五部委联合印发《船舶制造业绿色发展行动纲要

（2024—2030 年）》，提出加快构建绿色船舶谱系化供给能力，优化升级大型远洋船舶 LNG 动力船型，加速甲醇、氨动力船型研发，探索燃料电池等新型动力船型，打造系列化绿色船型品牌产品。

2024 年 10 月，国家发改委等制定了《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》，提出加快交通运输和可再生能源融合互动，支持开展生物柴油、生物天然气、绿色氢氨醇等在船舶领域的试点运行。

2024 年 12 月，《中共中央办公厅国务院办公厅关于加快建设统一开放的交通运输市场的意见》发布，明确提出推动交通运输绿色智慧转型升级，要求完善交通运输装备能源清洁替代政策，推动中重型卡车、船舶等运输工具应用新能源与清洁能源。

2025 年 3 月，交通运输部等十部门联合发布《关于推动交通运输与能源融合发展的指导意见》，提出持续提升交通运输绿色燃料供应能力：加快突破绿色燃料生产技术瓶颈，逐步提高制备效率；推动建设一批绿色燃料生产基地，提升液化天然气（LNG）、生物柴油、绿醇、绿氨、氢能、生物航油等供给规模；鼓励依托交通基础设施，结合实际场景开展清洁能源制氢。

2026 年 3 月，国家能源局召开绿色燃料产业发展专题座谈会，深入研判绿色燃料产业发展前景，系统谋划未来产业发展相关举措。会议指出，要充分认识到发展绿色燃料产业的重要意义。发展绿色燃料产业有利于替代石油、保障能源安全，有利于降低碳排放、促进绿色发展，有利于促进新能源非电利用和消纳、增强发展新动能，是能源领域新质生产力发展的重要方向。会议强调，要因地制宜、统筹施策，推动绿色燃料产业健康有序发展。要坚持系统谋划，加强顶层设计和规划布局；坚持试点先行，探索形成产业科学发展模式；坚持创新引领，不断提升产业发展竞争力；坚持优化环境，有力支撑产业规模化发展；坚持需求牵引，统筹国际国内市场。

地方层面同样积极行动，《上海市推动国际航运燃料绿色转型工作方案》等政策文件，为国际航运脱碳转型提供了地方层面的有力支持。

(二) 全球船队的燃油现状

国际海事组织（IMO）秘书处发布了 2023 年全球船队的燃油消耗数据报告。该报告根据 MEPOL 公约附则 VI 第 27 条和《2022 年国际海事组织船舶燃油消耗数据库

（IMO DCS）开发和管理指南》，来源为各国政府机构向 GISIS 提交的 IMO 船舶燃料油消耗数据。

根据 IMO 的数据，2023 年报告的全球船队（5000 总吨以上）的燃料总消耗量为 2.11 亿吨，相比 2022 年的 2.13 亿吨下降 200 万吨。从排放量的角度来看，2023 年排放了 6.55 亿吨二氧化碳当量，与 2022 年的 6.64 亿吨相比下降了约 1.4%。

在 2023 年的数据中，除了重油和轻油，替代燃料共占全球燃料消耗的 6.48%，包括液化天然气（LNG）12,890,011 吨，液化石油气 - 丙烷（LPG- 丙烷）192,405 吨，液化石油气 - 丁烷（LPG- 丁烷）49,887 吨，乙烷（Ethane）为 19,036 吨，甲醇（methanol）为 93,876 吨（2022 年为 35,523 吨），乙醇（Ethanol）为 4,137 吨（2022 年为 10,890 吨），生物燃油（biofuel）为 390,846 吨（2022 年为 226,378 吨）。

2024 年，国际海事组织（IMO）海洋环境保护委员会（MEPC）公布了《2024 年度船舶燃油消耗数据报告》（MEPC 84/6/1），总结了全球船队依据 MARPOL 公约附则 VI 第 27 条要求提交的全年燃油使用及碳强度指标（CII/EECI）情况。报告显示，在红海局势导致大量船舶绕行好望角的背景下，2024 年全球船队的实际燃油消耗继续上升，同时替代燃料使用比例稳步提高。报告指出，受航线延长（特别是绕航好望角）等因素影响，2024 年全球船队燃油使用量达到 2.2337 亿吨，较 2023 年增长 5.7%。

2024 年，IMO DCS 记录的替代燃料整体呈现显著增长趋势，约占全球燃料消耗的 7.47%，2024 年的替代燃料中，包括液化天然气（LNG）14,954,694 吨，液化石油气 - 丙烷（LPG- 丙烷）269,507 吨，液化石油气 - 丁烷（LPG- 丁烷）80,562 吨，乙烷（Ethane）为 0 吨（2022 年为 95,204 吨），甲醇（methanol）为 137,844 吨，乙醇（Ethanol）为 23,474 吨，生物燃油（biofuel）为 1,225,531 吨。

甲醇燃料的使用量持续上升。2024 年相关船舶提交的甲醇使用量达到 137,844 吨，较 2023 年的 93,876 吨增长近五成，显示甲醇动力船的运营规模正在稳步扩大。随着多家造船厂交付更多双燃料或甲醇专用船型，甲醇使用量的增长已从趋势性提升逐渐转向具有规模效应。IMO 也在报告中继续强化甲醇的碳因子（1.375），凸显这一燃料在未来中短期减排路径中的地位。乙醇则从 2023 年的 4,137 吨攀升至 23,474 吨，增长近五倍，2024 年增幅明显。

表 2-1：全球船舶替代燃料消耗量

(单位：吨)

燃料类型	2022 年	2023 年	2024 年
LNG	10950408	12890011	14954694
LPG- 丙烷	88774	192405	269507
LPG- 丁烷	16673	49887	80562
甲醇	35523	93876	137844
乙醇	10890	4137	23474
乙烷	95204	19036	0
生物燃料	226378	390846	1225531

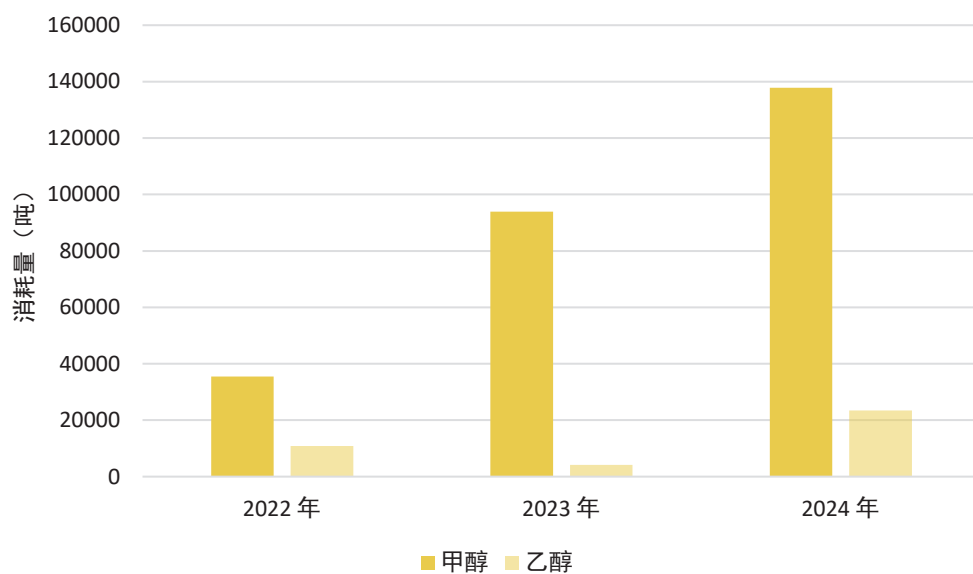


图 2-1：全球船舶替代燃料中甲醇和乙醇的消耗量

(三) 产业链的创新突破

据报道，在航运领域，主机端、船东端和造船端纷纷开启乙醇作为航运燃料的探索。

2025 年 12 月 5 日，马士基在官网宣布，将继续探索多元化低碳燃料组合方

案，在双燃料甲醇发动机中测试乙醇的应用，基于初期试验的成功，将在“LAURA MAERSK”轮上进行 50% 乙醇与 50% 甲醇（E50）混合燃料测试。载箱量为 2100TEU 的“LAURA MAERSK”轮是全球首艘专门设计用于燃烧绿色甲醇的双燃料集装箱船，原本以甲醇为替代燃料。由于乙醇和甲醇同属醇类，具有相似特性，马士基因此在 2025 年 10 月对混有 10% 乙醇和 90% 甲醇的燃料（E10）进行初步试验，以测试混合燃料是否能像纯甲醇一样高效点火燃烧，同时保持相当的润滑性和抗腐蚀性。试验结果证实，乙醇可与甲醇混合不影响发动机性能，这为更高比例的乙醇混合燃料铺平了道路。除即将进行的 E50 混合燃料测试外，马士基还计划开展 100% 的乙醇试验。

马士基首席执行官柯文胜（Vincent Clerc）指出，这种混合燃料方案兼具环境效益与实操可行性，马士基将继续投资多种可持续燃料技术。据悉，马士基计划于 2026 年在远东 - 西北欧航线继续扩大试点规模。

同期，中国船舶集团有限公司旗下大连船舶重工集团有限公司在 2025 年中国国际海事技术学术会议和展览会上发布的全球首艘乙醇燃料苏伊士型穿梭油船船型设计获得船级社颁发的原则性认可（AIP）证书。该船型以乙醇燃料为主要燃料，其优秀的船体型线、水动力节能装置和高效螺旋桨设计，还将进一步提升船型市场竞争力和船东未来运营优势。

2025 年 9 月，航运发动机技术开发商埃维能（Everllence）已宣布该公司一台 90 缸径的 ME-LGIM 发动机已实现乙醇全负荷稳定运行。2026 年 2 月，Everllence 宣布与巴西矿业与物流巨头淡水河谷（Vale）签署合作协议，双方将围绕乙醇作为船用燃料的应用展开联合开发，重点推进一款先进乙醇动力主机方案，以为大型船舶提供可持续且具商业可行性的化石燃料替代选择。**淡水河谷方面称，此次合作与其“多燃料、面向未来（multifuel, future-ready）”船队策略一致**，目标是提升其租入与期租船队的燃料灵活性，并推动温室气体减排解决方案的产业化落地。Everllence 两冲程业务全球销售与推广负责人 Christian Ludwig 表示，淡水河谷长期被视为乙醇“能源转型燃料”的重要倡导者，尤其在巴西与中国等市场具有影响力。

瓦锡兰（Wärtsilä）正在对其 W32 系列中速乙醇机型进行全尺寸测试，计划于 2026 年在巴西进行为期两年的 4000 小时实船试验。

温特图尔（WinGD）也正式进入乙醇领域，将在 2026 年推出乙醇燃料船用二冲程发动机，并于 2027 年起正式交付新造及改装项目。

在产业侧，巴西依托甘蔗产业体系推动乙醇用于平台供应船（OSV），如 Petrobras 领衔的 52 艘绿色船队项目预留乙醇兼容方案。

全球乙醇协会（Global Ethanol Association）联合创始人兼秘书长 Thomas Morten Jacobsen 此前接受《中国船检》采访时曾表示，乙醇作为船用燃料的潜力体现在其对实用性与环保性能的平衡上在大幅降低船舶全生命周期温室气体排放的同时，几乎可完全消除硫排放与颗粒物排放，一些知名发动机厂商已证实所有已下单或已投入运营的甲醇双燃料船只需极低成本与少量技术调整（主要涉及控制优化及认证更新）即可适配乙醇燃料，这种兼容性意味着乙醇可借助甲醇双燃料的发展趋势，依托已为甲醇燃料建立起的基础设施、技术及安全框架，实现平稳且可规模化的应用转型。（注：2025 年 9 月，全球乙醇协会（Global Ethanol Association, GEA）在瑞士正式成立，标志着

航运业能源转型迎来新的重要力量。全球乙醇协会致力于系统推进乙醇在各个行业的应用。其首个旗舰项目“船舶燃料领域倡议”通过汇聚船东、发动机制造商、燃料供应商等多方力量，通过解决需求创造与供应保障两端问题来激活市场，加速推动船用乙醇燃料从测试验证走向商业应用。）

截至 2025 年 12 月 31 日，全球具备绿色甲醇加注能力的港口共 17 个。其中包含 6 个中国港口，即上海港、天津港、大连港、宁波港、海南港、深圳港；此外，青岛港、重庆港已实现甲醇加注（数据来源：上海国际航运研究中心）。也为未来乙醇作为船燃提供了基础。

这些信号叠加，意味着乙醇不再是“概念燃料”，全球乙醇协会（GEA）与 Maritime Ethanol&Methanol Alliance（MEMA）认为，乙醇凭借高可获得性、低碳强度与成本优势，可以在海洋能源体系中发挥创新作用。DNV 海事大中国区业务发展总监刘小峰指出，乙醇与甲醇特性相似，能量密度更高且非有毒物质，现有甲醇双燃料船经小幅改装即可燃烧乙醇，为船队提供燃料的更多选择。

(四) 小结

航运业需要的解决方案，不仅要具备可持续性，还需能在当下落地应用，乙醇恰好满足这一需求。它安全性高、在常温下呈液态，且可适配现有基础设施与经过改造的发动机。

乙醇与甲醇的物理特性及燃烧特性极为相似。乙醇可借助当前甲醇双燃料的发展趋势，依托已为甲醇燃料建立起的基础设施、技术及安全框架，实现平稳且可规模化的应用转型。中国目前甲醇加注走在世界前列，政策红利持续释放。交通运输部等十部门联合印发《关于支持上海国际航运绿色燃料加注中心和交易中心建设的实施方案》，从燃料生产、加注、交易、监管等多方面出台系列支持举措。截至目前，上港能源旗下的“海港致远”加注船已累计完成甲醇燃料加注 29 艘次，总加注量超过 9 万吨。其中，绿色甲醇加注作业近 10 次，加注量超 1.7 万吨，覆盖国际航运头部企业的甲醇双燃料船舶多种船型。

当然，乙醇大规模应用仍面临多重挑战：比如 IMO 框架下的生命周期（LCA）核算与认证规则能否为乙醇建立清晰、可操作的减排“计量口径”；二是供应与基础设施不均衡，当前乙醇优势集中在巴西、美国等少数国家，全球干线航线加注网络尚未形成。长远来看，乙醇的全球可及性与多元化生产基地使其成为一种安全可靠且可扩展的方案选项，让运营商能够为其船队“未雨绸缪”。

第三章 绿色航空：以生物质乙醇为原料规模化生产 SAF

(一) 背景与意义

航空业是全球交通运输行业的重要组成部分，其温室气体排放占全球温室气体排放总量的 2.5%，因其运营特性和碳减排路径选择有限，被公认为“难减排”领域之一。国际航空运输协会 IATA 最新报告⁴显示，可持续航空燃料 SAF 是航空业碳减排最重要、最具实操性的措施，其贡献占比高达 65%。在政策支持与技术进步的双轮驱动下，全球 SAF 产能（表 3-1）从 2019 年到 2025 年经历了显著增长：2019 年产能不足 2 万吨，2020 年为 5 万吨，2021 年达到 8 万吨，2022 年增至 24 万吨，2023 年上升为 50 万吨，2024 年达到 100 万吨，2025 年增至 200 万吨，2030 年预计将达到 1800 万吨，2035 年增长至 7000 万吨。长期来看，2030 年至 2050 年间，SAF 产能增长显著，预计最终将达到 3.5 亿吨。

表 3-1：全球 SAF 产能统计及预测

全球 SAF 产能统计及预测	
年份	SAF 产能 (万吨)
2019	2
2020	5
2021	8
2022	24
2023	50
2024	100

全球 SAF 产能统计及预测	
2025	200
2030	1800
2035	7000
2050	35000

部分来源：IATA⁵

尽管 SAF 产业在过去五年得到了充分发展，但产业规模目前仅能满足全球 1% 的航空燃料需求。为了实现规模化与经济性双重愿景，以生物质乙醇为原料的醇喷合成工艺 AtJ (Alcohol-to-Jet) 为 SAF 产业未来长足发展提供了切实可行的解决方案。

(二) 技术路线与应用现状

截至目前，已通过国际 ASTM 标准认定的 SAF 技术路线可分为以下四类（图 3-1）：一是以餐厨废油等为原料的酯类和脂肪酸类加氢工艺 HEFA；二是以生物质乙醇为原料的醇喷合成工艺 AtJ；三是以农林废弃物等为原料的生物质气化耦合费托合成工艺 G+FT；四是以绿电制氢为主导的电转液工艺 PtL。四条技术路线中，HEFA 商业化程度最高，也是目前 SAF 产能的主要来源，但由于餐厨废油等原料供给有限，导致其 SAF 产能已接近上限，规模化方面短板明显，因此是短期解决方案。为了满足 SAF 产业未来规模化增长需求，AtJ、G+FT、PtL 三条技术路线均将扮演重要角色。但考虑到 G+FT 中农林废弃物收集与生物质气化成本、PtL 中绿电制氢与碳捕集成本目前均较高，AtJ 将是 SAF 产业未来 5-10 年规模化增长的重要引擎，是“低垂的果实”，这得益于生物质乙醇原料充足、技术路线相对成熟、规模化与经济性并存。

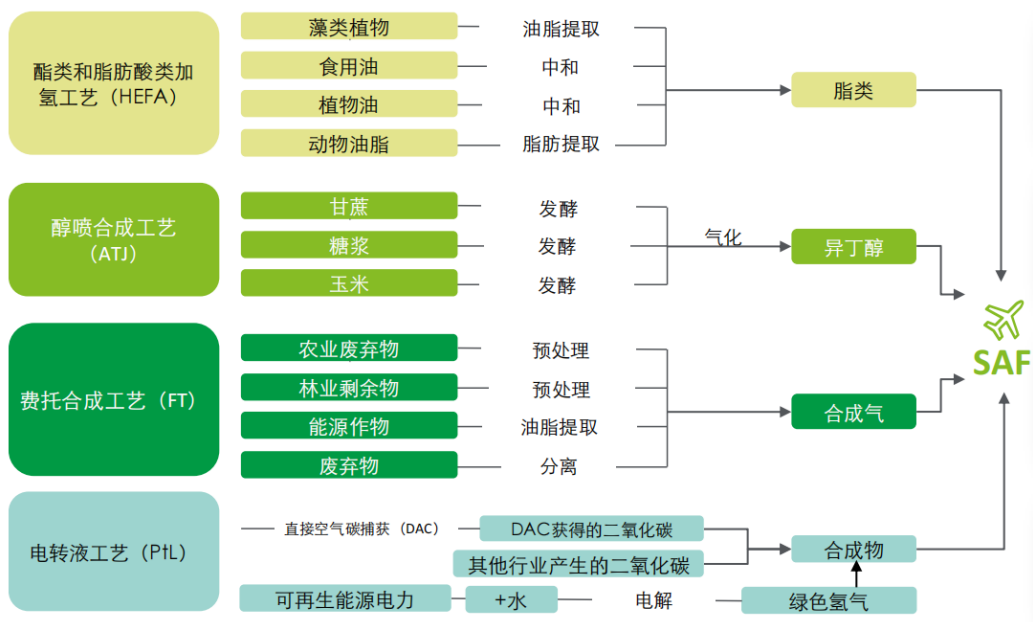


图 3-1: 生产 SAF 的四条主要技术路线

首先，在原料方面，美国可再生燃料协会 RFA 的最新数据⁶显示（图 3-2），由于农业技术提升与广泛应用，美国玉米乙醇年产量已高达 162 亿加仑（4900 万吨，并且持续上升，全球占比 52%），巴西甘蔗乙醇年产量大约为 90 亿加仑（2700 万吨，并且持续上升，全球占比 29%），仅美国与巴西的生物质乙醇产能就占到全球总产能的 81%。值得注意的是，近年来由于全球范围内电动车对燃油车的逐渐取代，导致原本用于 E10 或 E15 的燃料乙醇必须寻找替代市场以实现转型；再加上农业技术进步，这就进一步导致美国与巴西生物质乙醇存在产能过剩现象；如果将美国与巴西的过剩生物质乙醇产能全部用于生产 SAF 的话，将迅速实现 SAF 产业规模增长至每年千万吨级。

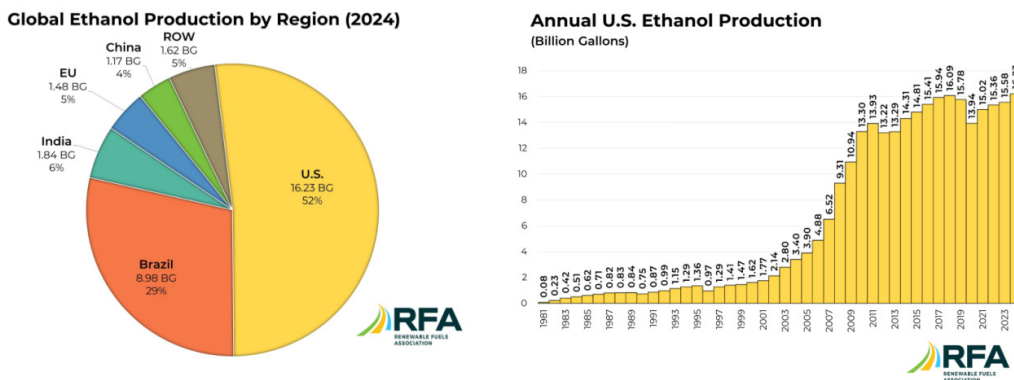


图 3-2: 美国与巴西生物质乙醇产能

来源: RFA

此外，生物质乙醇除了供应充足，其碳强度（CI 值）也得到了大幅度降低，尤其是玉米乙醇。CI 值越低，SAF 全生命周期碳减排效果越明显，航空公司也更愿意为使用 SAF 支付部分绿色溢价。目前，在不采取任何改进措施的情况下，巴西甘蔗乙醇 CI 是 19.95gCO₂e/MJ，美国玉米乙醇 CI 是 60.47gCO₂e/MJ。Growth Energy 最新数据⁷显示（图 3-3），诸多美国玉米乙醇生产商近年来大规模采用了 CCS、可再生电力、生物质热电转换、高效化肥等措施，使得玉米乙醇 CI 值大幅度降低接近净零，部分生产商（例如总部位于 South Dakota 的 POET）的乙醇厂还获得了 ISCC-EU 认证，这就使得生物质乙醇作为 SAF 原料的优势更为凸显。值得一提的是，基于玉米秸秆、玉米芯、甘蔗渣等废弃物的纤维素乙醇（又称二代生物乙醇）CI 值更低（低于 15.0gCO₂e/MJ），目前虽然生产成本较高（大约为玉米乙醇或甘蔗乙醇生产成本的两倍），但有望在未来 5-10 年内实现商业化突破，届时将丰富乙醇来源，大幅提升乙醇产量，进一步通过 AtJ 路线促进 SAF 产业规模化。

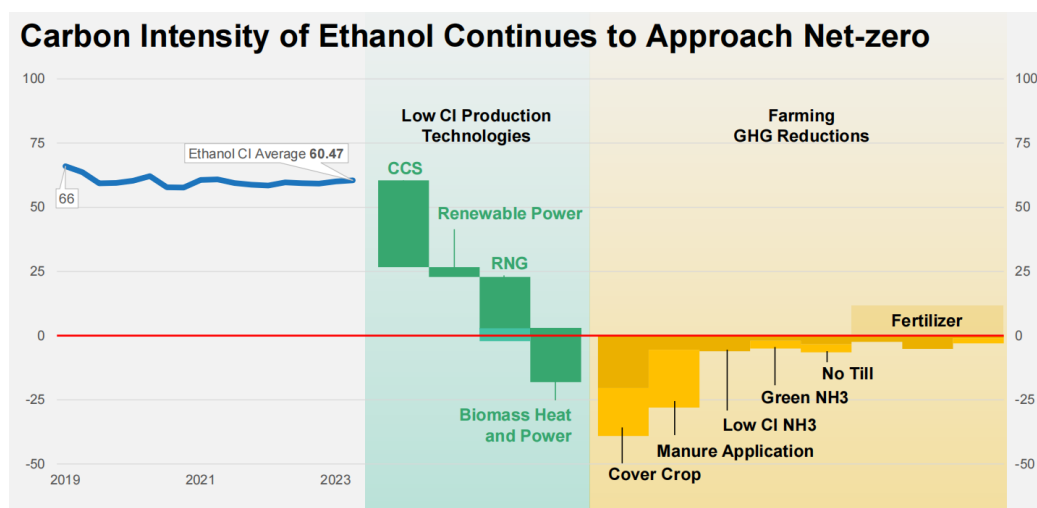


图 3-3：降低玉米乙醇碳强度路径

来源：Growth Energy

其次，AtJ 技术路线日臻成熟，已步入大规模商业化阶段。经过 ASTM 认证的 AtJ 路线一共有两条⁸，一条是不含芳烃的 AtJ-SPK，一条是含芳烃的 AtJ-SKA，但总体都分为四个流程（图 3-4）：乙醇脱水制乙烯、乙烯低聚、加氢、分馏制 SAF 及其它副产物。2025 年 11 月 13 日，AtJ 领域头部企业 LanzaJet 重磅宣布其位于美国 Georgia 州的 Freedom Pines Fuels 工厂全面投产⁹，成为全球首个实现 AtJ 商业化的工厂，一方面验证了 AtJ 技术路线在工程放大和稳定运行层面的可行性，另一方面为全球 AtJ 项目复制和推广提供了样本。技术细节上，乙醇脱水制乙烯的流程，LanzaJet 选择了 Technip 的成熟工艺包 Hummingbird；乙烯低聚流程，LanzaJet 选择与美国能源部 DOE 和 LanzaTech 共同开发。

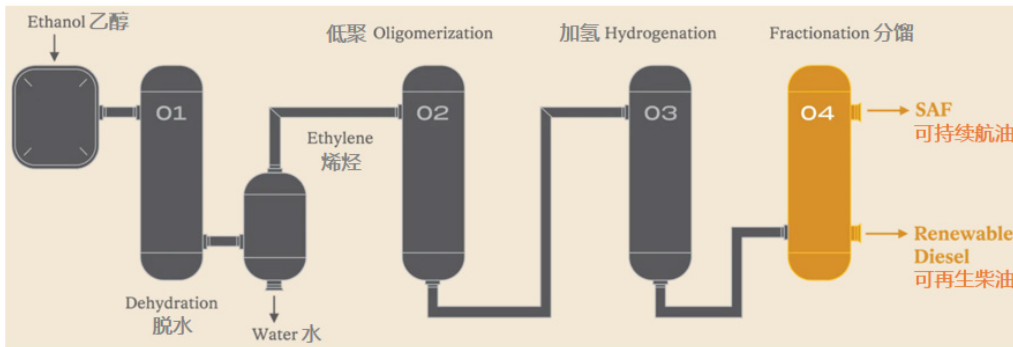


图 3-4：醇喷合成工艺 AtJ (Alcohol-to-Jet)

除 LanzaJet 外，AtJ 项目已在全球范围内多点布局、全面开花。GEVO 位于美国 South Dakota 州以玉米乙醇为原料年产 15 万吨 SAF 的 AtJ-60 项目即将正式投产¹⁰。日本 Cosmo Oil, Idemitsu, Taiyo Oil 均已布局 AtJ 产能（图 3-5），生物质乙醇原料主要从美国和巴西进口。印度头部甘蔗乙醇生产商 TruAlt Bioenergy 向产业链下游延伸，已着手布局年产 8 万吨 SAF 的 AtJ 工厂¹¹。

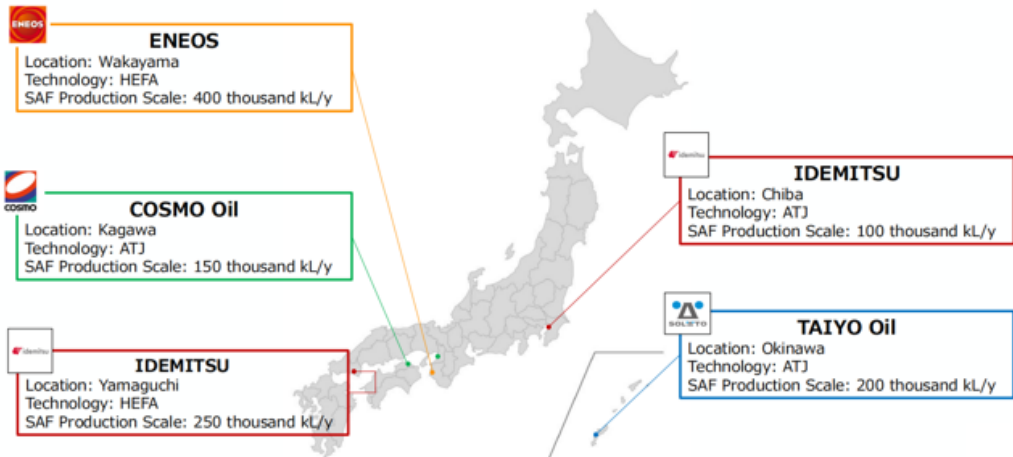


图 3-5：日本 AtJ 项目布局

AtJ 项目经济性方面，单位 SAF 成本中接近 80% 部分来自于生物质乙醇原料成本，这一点非常类似于 HEFA 路线中主要成本来自于餐厨废油成本。以美国玉米乙醇为例，美国谷物与生物产品协会 USGBC¹² 提供了过去一年来玉米乙醇离岸价格走势（图 3-6），平均价格为 1.74 美元/加仑（585 美元/吨），按照平均 1.615 吨生物乙醇生产 1 吨 SAF（转化率为 61.9%）计算¹³，生产 1 吨 SAF 的原料成本大约为离岸价 945 美元，如加上运输成本大约在 1100 美元/吨上下，这意味着 AtJ 路线 SAF 单位总成本区

间大致为 1300-1400 美元 / 吨，这与 HEFA 路线的 SAF 单位成本持平或者更低。如果考虑未来生物质乙醇产能过剩导致价格进一步走低的话，AtJ 项目在经济性方面的优势会进一步凸显，有望超越目前 HEFA 项目经济性。再来看 SAF 市场，Argus¹⁴ 给出了 2025 年基于 HEFA 路线的 SAF 价格走势（图 3-7），低点在 1750 美元 / 吨，高点已超出 2500 美元 / 吨。这意味着 AtJ 项目的毛利率大致在 20%-50%，经济性与规模化并存。



图 3-6：美国玉米乙醇离岸价走势

来源：USGBC

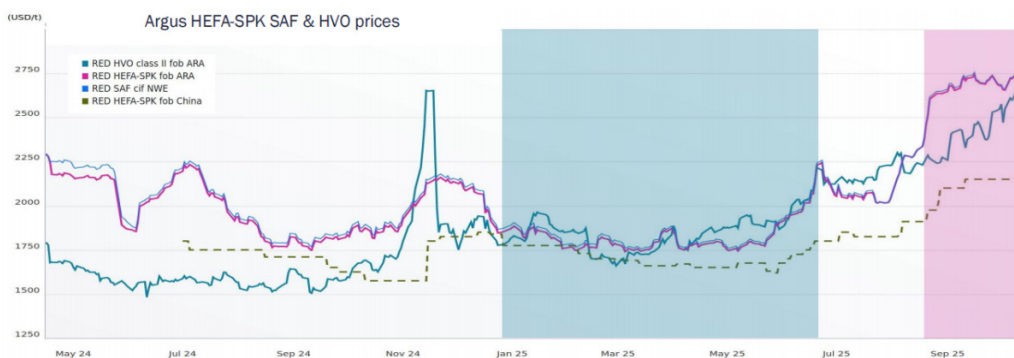


图 3-7：SAF 价格走势

来源：Argus

(三) 相关国家的支持政策

最后，在 SAF 产业政策方面，各主要经济体近年来均出台了相应举措。例如，美国于 2021 年出台《SAF 大挑战路线图》¹⁵，设定了 2030 年年产 900 万吨、2050 年年产 1 亿吨 SAF 的宏伟目标，为美国本土 SAF 产业发展（以 AtJ 路线为主）明确了目标和方向。此外，美国于 2025 年 7 月推出的《大而美法案》¹⁶ 尽管大幅削减了绿氢、风电、光伏等行业的税收抵免，但 Section 70521 却修订并延长了《通胀削减法案》中 45Z 部分（清洁燃料生产税收抵免），旨在推动美国农业（具体而言是玉米乙醇行业）蓬勃发展。欧盟出台的 ReFuelEU Aviation 强制要求逐步提高航空公司的 SAF 使用比例¹⁷，具体目标是 2025 年 SAF 掺混比例达到 2%，2030 年增至 6%，2050 年高达 70%。印度于 2025 年 9 月正式发布 SAF 可行性研究报告¹⁸，2027 年 SAF 掺混目标为 1%，2028 年为 2%，2030 年达到 5%。中国于 2024 年 9 月正式启动 SAF 应用试点¹⁹，国航、东航、南航从北京大兴、成都双流、郑州新郑、宁波栎社起飞的 12 个航班将正式加注 SAF。

(四) 小结

总而言之，以生物质乙醇为原料的醇喷合成工艺 AtJ 制 SAF，在原料可获得性方面、技术成熟度与商业化方面、项目经济性方面、产业政策支持方面优势凸显，将为 SAF 产业未来 5-10 年的规模化发展提供切实可行的解决方案。中国短期应重点关注进口乙醇支撑 AtJ 示范、中期形成炼化协同和认证体系、长期再培育国内低碳乙醇供给。

第四章 绿色塑料：向下游高价值化学品的延伸

(一) 背景与意义

前文已论证生物质乙醇在交通燃料（含航空燃料）等“难减排”领域的重要作用。本章进一步从“材料端减碳”视角出发，探讨如何将乙醇作为可再生碳源导入石化基础化学品平台，并向高附加值化学品与绿色塑料延伸。在燃料需求结构与政策边界不断变化的背景下，其核心在于推动生物质乙醇由“燃料分子”升级为“化工碳源”，构建“同分子、同性能、低碳属性可声明”的材料体系，以更高附加值和更稳定的需求结构支撑产业发展，同时与循环经济和塑料污染治理政策形成协同。

塑料产业正成为**气候问题、资源问题与环境治理问题**的交汇点。OECD 在《到 2040 年消除塑料污染的政策情景分析》²⁰ 中估算，预计到 2040 年，全球塑料全生命周期每年将排放约 28 亿吨二氧化碳当量（GtCO₂e）的温室气体，约占全球温室气体排放总量的 5%；这一水平较 2020 年的 18 亿吨显著增加，且排放增长主要由塑料生产与加工环节驱动，其中约 90% 来自以化石资源为碳源的生产与转化环节。这一结构意味着，如果仅依赖末端回收治理而不触及碳源替代，塑料产业的减排潜力将受到结构性约束。

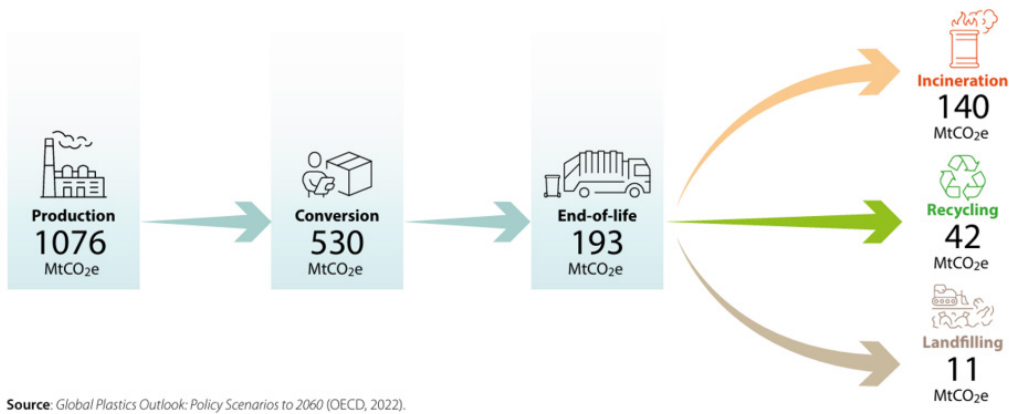


图 4-1：温室气体排放贯穿塑料全生命周期

与此同时，全球塑料需求仍保持增长。European Bioplastics²¹ 发布的《Plastics – the Fast Facts 2024》显示，2023 年全球塑料产量约 **413.8 Mt**，而循环塑料占比仍然有限。作为对比，European Bioplastics 统计的全球生物塑料产能 2024 年约 **2.47 Mt**，预计到 2029 年约为 **5.73 Mt**，总体规模仍处于个位数百万吨级，难以单独承担主流塑料市场的替代需求。

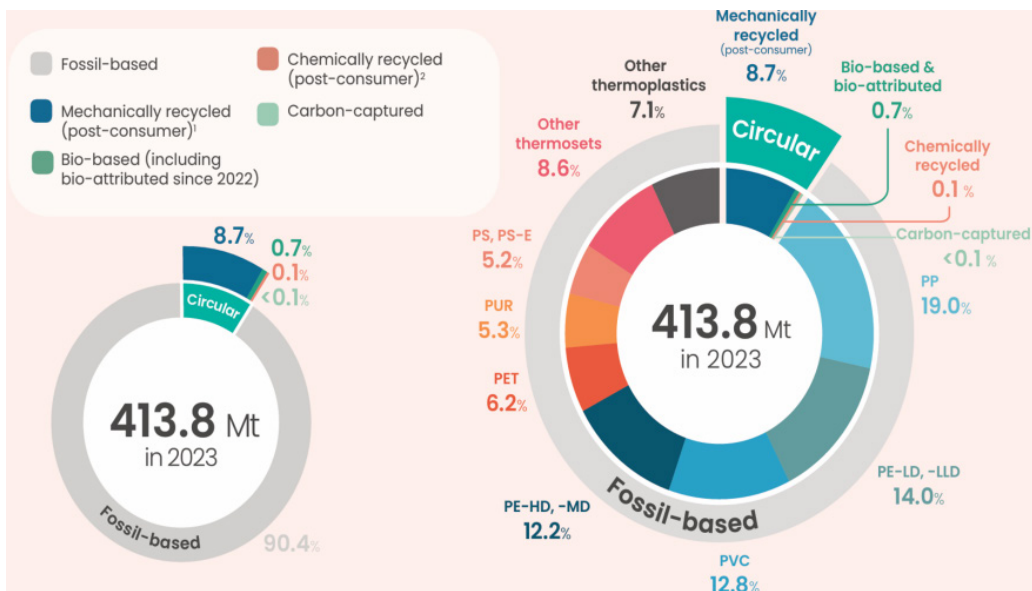


图 4-2：2023 年全球塑料产量

来源：Plastics Europe

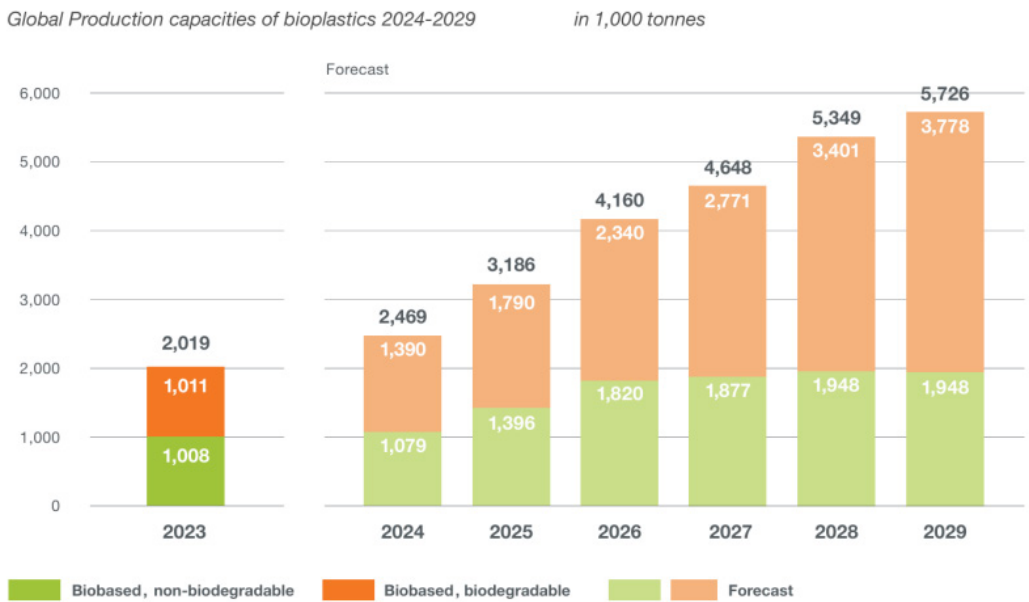


图 4-3：2023-2029 全球生物质塑料产量

来源: European Bioplastics

在供给侧，生物质乙醇具备成为可再生化工碳源的重要基础。美国 2025 年乙醇产量达到 164.9 亿加仑（RFA 引用 EIA 数据），显示乙醇已成为工业化、规模化且具备成熟贸易体系的大宗分子。欧洲乙醇行业协会 ePURE 披露，2024 年欧洲可再生乙醇产量约 5.41 Mt。对于化工产业而言，这类已经形成稳定生产和流通体系的分子，是构建可再生化工产业的重要起点，因为其供应链、物流和贸易体系已经具备规模化基础。

因此，本章的核心逻辑是：以生物质乙醇作为“可再生 C₂ 平台”，通过成熟的乙醇脱水制乙烯技术将可再生碳导入化工基础原料体系，并沿“乙烯—EO/MEG—乙烯基单体—聚合物”产业链向高附加值材料延伸。这一过程使可再生碳能够在品牌价值、政策合规和高端应用需求中实现价值重构，从而为化工产业绿色转型提供具有规模化潜力的路径。

(二) 政策环境

全球绿色塑料政策正在从单一的禁限塑治理，逐步演变为覆盖材料选择、产品设计、循环利用与碳属性认证的系统性政策框架。政策目标不再仅是减少塑料消费，而是推动材料体系向可回收、低碳和可持续原料转型。在这一背景下，生物基材料，尤其是生物

质乙醇路线，逐渐被纳入循环经济与绿色制造政策体系。

国际层面，欧盟通过《一次性塑料指令》（SUP）和《包装与包装废弃物法规》（PPWR）建立了以减少一次性塑料、提高再生含量和可回收设计为核心的监管体系，同时通过生物基、可降解与可堆肥塑料政策框架明确材料应用边界与认证要求。美国则将生物制造和生物经济提升为国家产业战略的重要组成部分，通过政策与市场机制推动生物基材料产业发展。与此同时，联合国正在推进全球塑料污染治理法律文书谈判，强化塑料全生命周期治理的国际政策预期。总体而言，这些政策正在改变品牌和包装企业的材料选择逻辑，使“可验证低碳属性”和“与循环体系兼容”的材料逐渐具备竞争优势。

中国政策环境则呈现出塑料污染治理、双碳战略与生物制造发展逐步融合的趋势。一方面，塑料污染治理政策持续提高一次性塑料产品门槛并推动材料替代；另一方面，《“十四五”生物经济发展规划》及工业领域碳达峰政策明确支持生物基材料和生物制造发展，为可再生碳替代化石碳提供政策空间。

在这一政策框架下，生物质乙醇路线的政策价值逐渐显现。与许多新型生物塑料不同，乙醇可通过成熟的“乙醇—乙烯—下游聚合物”路径进入现有石化产业体系，在保持材料性能不变的情况下引入可再生碳源，从而兼顾产业规模化、材料性能与低碳属性。

表 4-1：国际绿色塑料相关代表性政策

区域	政策 / 法规	核心目标	对生物质乙醇绿色塑料的意义
欧盟	《一次性塑料指令》(EU) 2019/904	限制部分一次性塑料产品，建立生产者责任延伸制度	推动包装与消费品材料升级，为可替代低碳材料创造市场空间
欧盟	《包装与包装废弃物法规》(PPWR)	提高包装可回收性与再生含量要求	品牌端材料选择更加关注“可回收 + 低碳”组合
欧盟	生物基、可降解与可堆肥塑料政策框架	明确生物基材料应用边界与认证要求	强调生物基碳含量可核查与可追溯
美国	《Biomufacturing and Jobs Act of 2025》	扩大农业生物经济，完善生物基产品市场体系	推动生物基材料（含生物基塑料）进入产业链应用与政府采购
美国	USDA BioPreferred Program	通过认证与政府采购扩大生物基产品市场	为生物基塑料提供市场准入与认证体系
美国	2026 年《国防授权法案》(NDAA) 相关生物制造条款	将生物制造与农业生物经济纳入国家战略	强化生物基材料产业发展与公共部门需求
全球	联合国全球塑料污染治理谈判 (INC)	推动塑料全生命周期治理	强化绿色材料长期政策预期

表 4-2：中国绿色塑料相关代表性政策

区域	政策 / 法规	核心目标	对生物质乙醇绿色塑料的意义
中国	《关于进一步加强塑料污染治理的意见》	限制一次性塑料制品并强化回收监管	推动消费端材料替代需求
中国	《“十四五”生物经济发展规划》	发展生物制造和生物基材料产业	为乙醇化工化利用提供产业定位
中国	《工业领域碳达峰实施方案》	推动工业低碳技术与材料替代	为可再生碳替代化石碳提供政策支撑
中国	《轻工业稳增长工作方案（2025-2026）》	推动绿色包装与消费材料升级	为生物基塑料提供应用场景

表 4-3：2026 年“两会”及近期政策信号

区域	政策 / 信息来源	关键信号	对生物质乙醇绿色塑料的意义
中国	政府工作报告与两会政策方向	推动绿色转型与新质生产力发展	生物制造与生物基材料成为重要产业方向
中国	非粮生物基材料产业典型案例发布	推动秸秆等非粮原料技术突破	为非粮乙醇材料路线提供原料基础
中国	生物基材料标准与认证体系推进	建立生物基含量与标识体系	支持低碳属性可核查与市场认可
中国	绿色低碳材料产业增长	生物基材料需求持续扩大	为生物质塑料替代提供市场基础

总体来看，绿色塑料政策正在从“禁塑治理”向“材料体系重构”转变。国际规则通过包装法规、再生含量要求与材料认证体系改变材料选择逻辑，而中国则在塑料污染治理、碳减排政策与生物制造战略之间逐步形成政策协同。在这一政策背景下，生物质乙醇路线因其能够直接进入现有石化产业链并兼容回收体系，具备一定的制度与产业优势。

(三) 技术路线与工艺比较

在绿色塑料技术体系中，生物质乙醇的核心价值在于其能够作为**可再生 C₂ 平台分子**进入现有石化基础化学品体系。通过成熟的乙醇脱水工艺，乙醇可以转化为乙烯等基础化学品，并进一步进入聚烯烃、聚酯和乙烯衍生物产业链。其关键优势在于**drop-in 特性**：在保持分子结构与材料性能不变的前提下，将可再生碳导入既有化工体系，使下游加工与回收体系基本无需调整即可实现材料低碳化。

从产业结构看，该路径并不依赖全新的材料体系，而是通过替换碳源而非替换分子实现绿色化。这意味着生物乙烯及其衍生材料可以直接进入现有聚合装置、加工设备和回收体系，因此在规模化潜力与产业兼容性方面具有明显优势。

与此同时，该路径仍面临若干关键挑战。首先，生物质乙醇的原料成本与供应稳定性将直接影响整体经济性；其次，随着国际碳核算体系逐步强化，生物质原料的可持续认证、土地利用变化以及间接排放等因素，也将成为影响材料价值的重要变量。因此，从技术角度看，乙醇路线的关键不在化学可行性，而在于工程集成、原料供应与碳核算体系的协同优化。

表 4-4：生物质乙醇制绿色塑料的技术路径

上游原料	中间化学品	单体 / 中间体	聚合物	典型应用
生物质乙醇	乙醇脱水制乙烯	乙烯	PE / LLDPE / HDPE	包装、日化容器、薄膜
生物质乙醇	乙烯氧化	EO	MEG	PET 瓶、纺织纤维
生物质乙醇	乙烯氯化	EDC / VCM	PVC	电缆、建材
生物质乙醇	乙烯衍生化学反应	丁二烯 / 醋酸乙烯	合成橡胶 / EVA / VAE	胶黏剂、汽车材料

在整体技术格局中，绿色塑料主要存在三类路径：一是乙醇制乙烯为代表的生物碳替代路线，其材料结构与传统塑料完全一致；二是以 PLA、PHA 为代表的新型生物基聚合物路线；三是通过机械或化学回收实现循环利用的再生塑料路线。

表 4-5：不同绿色塑料技术路线比较

维度	乙醇 → 乙烯 → 聚烯烃 / 衍生物	生物质 → PLA 等新型聚合物	再生塑料（机械 / 化学）
与现有化工体系兼容性	高	中	高
与现有加工及回收体系兼容性	高	中 - 低	高
技术成熟度	高	中	中 - 高
规模化潜力	高	中	中
主要瓶颈	乙醇供给与成本	生物质与发酵成本	回收体系与料源质量
碳减排潜力	高	中 - 高	中 - 高

从生命周期角度看，乙醇基聚烯烃在部分研究中显示出较高的减排潜力。例如，一项针对甘蔗乙醇制聚乙烯的 LCA 研究显示，其“摇篮到工厂大门”排放可低至约 $-0.75 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}^{22}$ ，而传统 HDPE 约 $1.7 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}^{23}$ 。需要注意的是，不同研究在系统边界、分配方法以及生物碳储存处理方式上存在差异，因此减排结果需要在统一方法和第三方验证框架下进行比较。

总体来看，乙醇制乙烯路线能够在保持材料性能与产业体系稳定的前提下，将可再生碳导入大宗化学品与塑料产业链。这种“替换碳源”的技术路径，使其在绿色材料体系中具有一定规模化潜力。

(四) 经济性分析

绿色塑料产业路径中，乙醇路线的经济性主要取决于原料成本、产业链集成程度以及低碳价值实现。与传统石化路线类似，其成本结构主要包括原料成本、资本支出与运营成本。

◎ 原料结构：乙醇价格决定成本基础

美国可再生燃料协会数据显示，近年来美国燃料乙醇价格通常在 **1.4-1.8 美元 / 加仑** 区间，对应约 **500-650 美元 / 吨**。在这一价格区间下，乙醇原料通常占生物乙烯生产成本的 **60-70%**，显著高于能源与运营费用。

表 4-6：不同绿色塑料技术路线比较

成本构成	典型占比	主要影响因素
原料成本（乙醇）	60–70%	乙醇价格、供应稳定性、原料结构
运营成本（OPEX）	15–20%	能源、公用工程、催化剂
资本成本（CAPEX）	15–20%	装置规模、储运系统

◎ 产业链集成：降低成本的重要手段

在产业实践中，乙醇脱水装置通常与乙烯下游装置或化工园区进行一体化布局，以降低储运与物流成本。以巴西 Braskem 项目为例，其在甘蔗乙醇资源丰富地区建设装置，并与现有石化产业链协同运行，从而降低运输和储存成本。

表 4-7：不同工程布局对项目成本结构的影响

工程布局模式	成本结构特点	成本水平	综合经济性
靠近乙醇原料地建设装置	原料运输距离最短，可减少乙醇物流成本与储运设施投资	低成本	优（推荐模式）
化工园区一体化布局	可与乙烯下游装置共享公用工程与基础设施，但乙醇运输成本增加	中等成本	良
独立装置 + 外部运输	需要额外储运系统，物流和资本成本均增加	高成本	较弱

◎ 低碳价值：改变竞争方式

随着品牌企业对低碳材料需求的增加，可再生碳材料的价值不仅体现在生产成本，还体现在其碳减排属性。低碳采购机制和碳核算体系的逐步完善，使生物基材料的竞争逻辑逐渐从单纯成本竞争转向成本与碳价值并重。

◎ 关键经济变量

综合现有产业实践与公开数据，乙醇路线的经济性主要受以下关键变量影响：

表 4-8：影响经济性关键因素

关键因素	影响程度	含义
乙醇原料价格	高	影响乙醇制乙烯路线的整体成本水平，并对项目经济性形成直接约束
原料碳强度与认证	中 - 高	决定生物基材料低碳属性的可核算与合规性，影响其进入国际品牌与绿色供应链体系
产业链一体化程度	中	影响原料运输、公用工程共享与资本投入水平，是工程选址与产业布局的重要因素
品牌与市场溢价	高	在品牌企业 Scope 3 减排与绿色采购趋势下，可再生碳材料逐渐形成溢价空间，对需求规模与长期价格体系具有重要影响

总体而言，乙醇路线的经济性并非单一工艺效率问题，而是原料供应、产业布局与低碳价值体系协同作用的结果。在具备稳定乙醇供应和产业集成条件的区域，该路线有望在包装、消费品和纺织等领域形成具有竞争力的绿色材料路径。

(五) 代表性商业案例

全球产业实践表明，“乙醇→乙烯→下游聚合物或化学品”的路径已在多个地区实现产业化，并在不同产品领域形成差异化模式。

案例一：Braskem（巴西）

甘蔗乙醇→生物乙烯→生物基聚乙烯的规模化路径

Braskem 是全球最早实现生物乙烯工业化生产的企业之一。公司在巴西 Triunfo 建设的生物乙烯装置以甘蔗乙醇为原料，通过脱水反应生产乙烯并进一步用于聚乙烯生产。公开信息显示，该装置通过约 8700 万美元投资将产能从 20 万吨/年提升至 26 万吨/年，并持续使用经可持续认证的甘蔗乙醇作为原料²⁴。行业资料亦显示，该项目自 2010 年起实现工业化运行，并形成“l’ m Green™”生物基聚乙烯产品体系

关键启示：在乙醇制聚烯烃路线中，技术本身并非主要壁垒。产业化的关键在于长期稳定的可持续乙醇供应、与下游品牌企业的采购合作机制，以及市场对生物基材料溢价的持续接受度。

案例二：Croda International（美国）

玉米乙醇→乙烯/EO →高附加值表面活性剂

Croda 在美国 Atlas Point 扩建项目中引入乙醇路线，通过乙醇脱水制乙烯并进一步氧化制环氧乙烷（EO），用于生产可再生来源的非离子表面活性剂。项目投资约 1.7 亿美元，并明确提出从石化原料向乙醇路线转型²⁵。IEA Bioenergy 报告亦将该项目列为生物基化学品产业化的代表案例之一。

关键启示：在产业初期阶段，优先进入高附加值市场（如个人护理、功能助剂和特种表面活性剂）能够提供更高利润空间，从而缓冲乙醇原料价格波动带来的风险。这种“高附加值优先”的策略往往比直接进入大宗树脂市场更具商业韧性。

案例三：India Glycols Limited（印度）

生物乙醇→生物基 MEG 及多元醇产品

India Glycols 是全球较早实现生物乙醇化工化的企业之一。公司利用生物乙醇生产生物基乙二醇（bio-MEG）及相关产品，并形成包括 MEG、DEG、TEG 以及多种醚类化学品在内的产品组合²⁶。公司年报显示，其生物基乙二醇及相关产品均来源于可再生乙醇原料，公司官网亦披露了相关产品的规模化生产能力。

关键启示：在聚酯产业链中，通过乙二醇端实现生物基替代是一条相对成熟的路径。通过 MEG、DEG、TEG 等多产品组合，可以在一定程度上分散单一产品周期波动及原料成本风险。

案例四：INEOS Inovyn（欧洲）

BIOVYN™ 生物归属 PVC：认证驱动的 drop-in 替代

INEOS Inovyn 推出的 BIOVYN™ 产品体系通过质量平衡方法将可再生碳导入 PVC 产业链，并获得 RSB 与 ISCC 等可持续认证。公司可持续发展报告显示²⁷，该产品组合已在多个欧洲生产基地推广应用。

关键启示：在建材、管材等对性能要求高度稳定的领域，drop-in 材料路径具有明显优势。一旦上游单体（如乙烯或 VCM）具备可再生碳归属，下游 PVC 应用可在不改变产品性能的情况下实现低碳转型。

案例五：Asahi Kasei（日本）

RevoLEFIN™：乙醇原料烯烃生产与装置低碳化²⁸

Asahi Kasei 与合作伙伴推进的 RevoLEFIN™ 项目通过引入生物乙醇原料推动烯烃生产的低碳转型。根据企业公告，该项目投资规模约 212 亿日元，并计划建设新的生产设施以支持乙烯脱碳转型。项目预计可实现约 50.6 万吨 CO₂/ 年的 Scope1 和 Scope2 减排，并计划于 2029 财年前完成建设。

关键启示：乙醇化工化不仅可以作为新增绿色材料路径，也可以与现有石化装置改造和区域产业结构调整结合，从而在政策支持和资本投入方面获得更大的协同效应。

案例六：中国石化中原石化

生物基聚烯烃生产与市场机制探索

中国石化旗下中原石化已实现生物基聚烯烃产品试生产并开展市场销售。公开资料显示，该企业是国内较早打通生物基聚烯烃生产流程的企业之一。公司可持续发展报告亦提到，通过与回收油脂深加工业务结合，探索循环材料与聚烯烃产业链协同模式。

关键启示：尽管该案例使用的原料并非乙醇，但其“认证—归属—客户采购”的商业模式具有重要参考意义。对于乙醇路线而言，实现规模化同样需要建立可核查的碳属性声明体系，并通过品牌企业采购形成稳定需求。

(六) 小结

综合技术、政策与产业实践可以看出，生物质乙醇正在逐步从传统燃料原料转变为可再生化工碳源的重要选项。其优势并不在于创造新的材料体系，而在于能够通过成熟的乙烯平台进入现有石化产业链，在保持材料性能与产业基础设施稳定的前提下实现低碳转型。

从全球范围来看，该路径的发展仍取决于若干关键条件，包括稳定的可持续乙醇供应体系、可审计的碳核算方法、以及终端市场对低碳材料的长期需求。当原料供应、产业布局与市场机制形成协同时，乙醇化工化路径已能够在部分领域实现商业化。

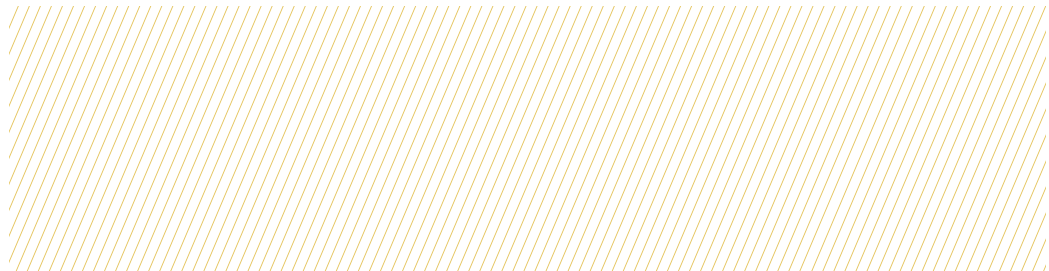
从中国视角看，一方面，中国拥有全球最完整的石化产业链和最大的材料应用市场，

为乙醇通过乙烯平台实现低碳替代提供了得天独厚的基础设施与市场支撑。另一方面，中国在生物乙醇资源与可持续认证体系方面仍存在一定约束。

因此，短期更可行的路径是通过进口乙醇原料、工程示范与认证体系建设切入，在高附加值化学品和绿色材料领域形成示范市场；中长期再结合生物制造与低碳政策，逐步培育国内可持续乙醇供给。

总体而言，中国无需从燃料端起步，而更适合依托完整化工体系与巨大材料市场，从高附加值材料端率先推动可再生碳应用。从更长期视角看，在循环经济与低碳转型持续推进的背景下，化工产业对可再生碳源的需求将逐步增加。作为已经具备规模化生产与成熟贸易体系的大宗分子，生物质乙醇有望在未来材料体系中发挥更加重要的作用，并成为连接生物经济与传统化工产业的重要桥梁。

第五章 综合分析 with 政策建议



在碳中和目标以及能源格局变革的大背景下，绿色经济、生物经济即将成为未来产业的新增长点。生物乙醇正面临广阔的市场空间和全新的创新发展机遇。首先，广泛的原料为生物质乙醇发展提供了坚实基础，而技术创新成为推动乙醇实现跨越式发展的核心动力。除此之外，生物质乙醇的独特社会价值将发挥更重要作用，促进农业增收乡村振兴，化石燃料替代，能源结构转型，推动循环经济发展和助力公正转型。全球超过 6 亿吨的航运、航空燃料市场和超过 5 亿吨的合成材料市场，为乙醇实现跨越式发展提供了巨大机遇。

面对当前机遇，乙醇产业的发展也不乏挑战。需要处理好三对关系：传统与现代技术衔接、产业与相关产业协同、当前与未来需求平衡。既要巩固现有产业基础，又要加快新技术产业化、商业化进程：纤维素乙醇、合成气发酵工艺、乙醇制 SAF 及绿氢耦合等路线均尚在早期。乙醇产业需要与农业、化工、能源、航空等产业协同发展，加快起草关键领域标准，构建产业生态圈。目前乙醇需求不稳源于核心市场并不完全适配，未来平衡需求的关键在于从单一燃料市场，转向原料多元化、技术多元化、应用场景多元化的高附加值的新兴赛道。

如何助力生物乙醇找到更加适配的市场，顺利迈向新兴赛道？我们建议采用以下分阶段政策组合拳：

政策建议

总体思路：应用先行、进口补位、国内升级、逐步替代

建议一：明确战略新定位，实施车用乙醇分层发展策略。

秉持科学务实精神，重新界定乙醇的战略价值。在车用领域适配的场景中，积极发挥乙醇汽油的优势。坚持“非粮优先”原则引导向纤维素乙醇等二代技术平稳过渡。通过凝聚政府、企业与科研机构的共识，推动乙醇从“政策驱动的掺混品”向“市场驱动的绿色原料”转型升级。

建议二：优化产能布局，点燃航运、航空、化工三大新兴市场。

发挥创新在产业发展中的引领作用，集中政策资源培育三大需求引擎：一是绿色航运，积极推动乙醇作为船用清洁燃料的试点应用；二是可持续航空燃料，大力支持乙醇制 SAF 技术路线的商业化进程；三是绿色化工，拓展乙醇向下游高值化学品的多元化延伸。在产能布局上，推动人工智能、智能制造与乙醇产业深度融合，提升生物反应器、分离提纯、碳捕集等关键装备的自主化水平。鼓励在非粮原料富集区布局二代乙醇产能，构建“分布式原料收储—集中式绿色炼制”的新型产业生态，形成资源高效循环的区域发展模式。

建议三：开展示范项目，建立“精准应用 + 收益反哺”的良性机制。

面对短期内国产二代乙醇供给尚未形成规模的现实，考虑到国外乙醇较国内具有经济性，可考虑在新领域定向使用进口乙醇。优先建设 1—2 个以进口乙醇为原料的可持续航空燃料或绿色化工品示范项目，验证技术可行性与商业模式的成熟度。配套建立收益反哺机制，将进口环节产生的市场收益按比例用于支持国内非粮乙醇研发、原料收储运体系完善及老旧产能绿色化改造，确保国际资源服务于国内新质生产力的培育，实现以开放促转型的战略目标。

建议四：强化标准引领，深度参与全球能源治理。

加快完善纤维素乙醇、SAF 等新兴领域的技术标准与碳核算体系，推动与国际主流认证体系的互认互通，让标准成为产业出海的通行证。依托统一的可持续规则，深化与国际能源署、国际民航组织等多边平台的合作，在参与全球能源治理中主动作为，增强我国绿色燃料产业的国际话语权。建议开展研究，从全生命周期碳排放、生产成本、政策合规性、应用场景适配性等维度进行系统比较，以翔实数据论证生物质乙醇在碳强度上的显著优势，为绿色化发展提供坚实的决策支撑，助力构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。

生物乙醇产业正处于从传统燃料向绿色平台化合物转型的关键期。在碳中和目标引领下，通过技术创新、产业升级和国际合作，生物乙醇有望在全球绿色低碳转型中发挥更加重要的作用，成为连接可再生能源与终端应用的桥梁，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系做出更大贡献。

参考文献

1. 《中石油经研院 2026 年能源数据手册目录》
2. 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析 [J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 751-760. DOI:10.13254/j.jare.2024.0184.
3. 范建国, 王超, 颜士峰, 等. 生物质制备燃料化学品的碳排放及能耗优化分析 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S2): 120-130. DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CN25041801.
4. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet--alternative-fuels/>
5. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>
6. <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>
7. <https://growthenergy.org/>
8. <https://store.astm.org/d7566-24d.html>
9. <https://www.lanzajet.com/news-insights/lanzajet-makes-history>
10. <https://gevo.com/location/atj-60-project/>
11. <https://www.trualtbioenergy.com/home>
12. <https://grains.org/>
13. https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/10/20-10-16-RSB-Summary-Report_Final.pdf
14. <https://www.argusmedia.com/en>
15. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge>
16. <https://www.congress.gov/bill/119th-congress/house-bill/1/text>
17. https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleur-aviation_en
18. <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2163273®=3&lang=2>
19. https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202409/t20240919_225429.html
20. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/10/policy-scenarios-for-eliminating-plastic-pollution-by-2040_28eb9536/76400890-en.pdf
21. https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2024/EUBP_Market_Data_Report_2024.pdf

22. Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol
https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/309106/1_s2.O_S0959652614012785_main.pdf?sequence=1
23. Eco-profile-of-Polyololefins <https://www.gpcachem.org/wp-content/uploads/2018/03/Eco-profile-of-Polyololefins.pdf>
24. News - Braskem expands its biopolymer production by 30% following an investment of US\$ 87 million <https://www.braskem.com.br/usa/news-detail/braskem-expands-its-biopolymer-production-by-30-following-an-investment-of-us-87-million>
25. Croda Brings Another First to USA <https://www.croda.com/en-gb/media-hub/news/general/croda-brings-another-first-to-usa>
26. <https://www.indiaglycols.com/wp-content/uploads/2023/08/annual-report-2022-23.pdf>
27. https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-inovyn/news/ineos-inovyn_sustainability-report-2022_low-res.pdf
28. <https://www.asahi-kasei.com/jp/news/2025/ze260127.html>

