

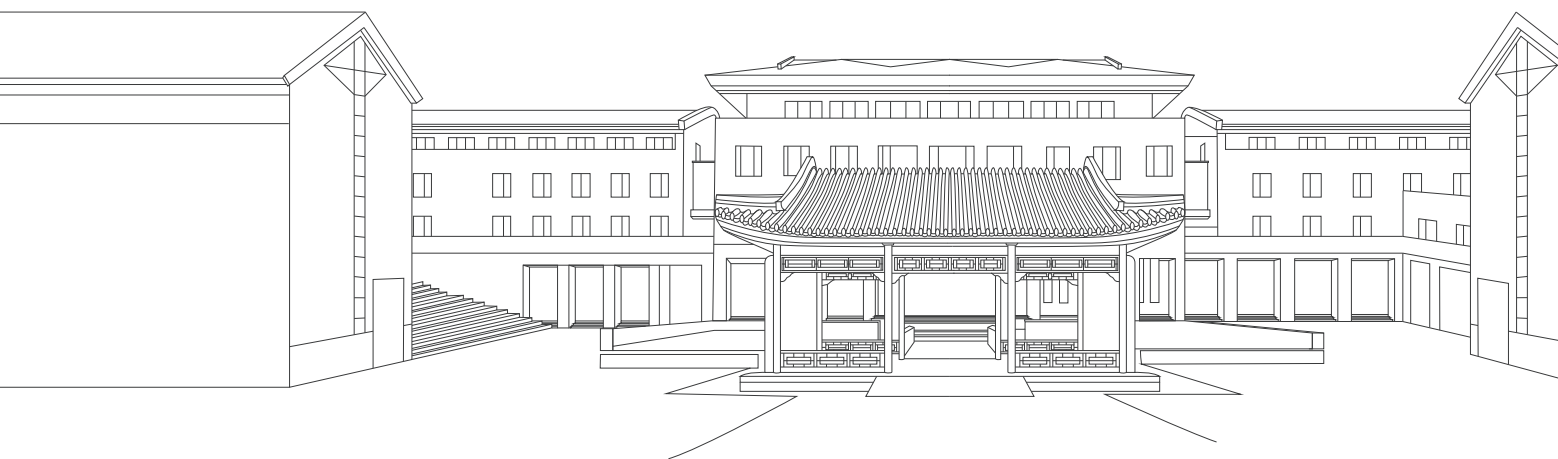


北京大学国家发展研究院
National School of Development

点燃SAF市场： 中国可持续航空燃料 规模化发展政策路径

北京大学国家发展研究院课题组

2025年11月



课题负责人：

黄 卓

课题组成员：

何晓贝

吴明华

李 政

谢绚丽

目 录

摘要 5

一、 SAF产业概述 8

 (一)SAF的定义与发展背景8

 (二)SAF市场概览9

二、 主要经济体的SAF政策实践 12

 (一)欧盟 12

 (二)英国 14

 (三)美国 15

 (四)新加坡 18

 (五)政策工具的梳理和启示 19

三、 中国发展SAF产业的战略意义 22

 (一)中国SAF产业发展现状与政策环境 22

 (二)中国为什么要进一步发展SAF产业 23

四、 中国SAF产业发展面临的挑战 29

 (一)SAF产业市场化瓶颈：定价机制、采购机制和溢价分配机制 29

 (二)SAF规模化生产情景下的成本预测 30

 (三)SAF规模化生产面临的主要挑战 37

目 录

五、政策建议 39

 参考文献..... 42

 致谢..... 44

 附件：基于成本分解的SAF价格趋势分析 45

执行摘要

航空业碳排放量占据全球碳排放总量的 2%-3%。随着其他行业加速向低碳转型，航空业碳排放量所占比例预计将显著上升。可持续航空燃料（SAF）作为传统航空燃料的低碳替代品，在其全生命周期中可减少高达 80% 的碳排放，已成为全球航空业实现碳中和目标的核心路径之一。然而，全球 SAF 产业仍面临技术成熟度不足、原材料供应受限以及成本高昂等挑战。截至 2024 年，全球 SAF 产量约为 100 万吨，仅占航空燃料总产量的 0.3%，且价格是传统航油的 2-3 倍。

世界主要国家和地区经济体均采取多元化政策措施推动 SAF 的发展。欧盟和英国建立了“立法强制 + 市场机制 + 财政激励”的政策框架，要求航空燃料供应商逐步提高 SAF 的掺混比例。美国则以财政补贴为核心，通过《通胀削减法案》（IRA）为 SAF 生产商提供税收抵免，并推动技术研发。新加坡将征收 SAF 专项费用于 SAF 的集中采购，同时强制餐饮业回收废油并开发跨境生物质供应链。综合来看，国际经验表明，主要经济体均通过需求侧和供给侧协同的政策组合，突破本地 SAF 产业发展的瓶颈。

对于中国而言，加快发展 SAF 产业具有多重战略意义。从减排需求来看，如果 SAF 掺混比例达到 5%，年减排量可达 670 万吨二氧化碳，这对实现“双碳”目标至关重要。从经济潜力来看，预计到 2050 年全球 SAF 需求将超过 3.6 亿吨，而中国在资源方面具有显著优势——餐厨废油和农林废弃物的数量相对充足，新能源装机容量也很高，这些均为 HEFA、AtJ、PtL 等技术提供了原料保障，有望将资源优势转化为产业竞争力。此外，SAF 产业与新能源产业的耦合发展潜力巨大，有助于推动循环经济的发展。

然而，中国的 SAF 产业尚在发展初期，发展水平与全球领先地区相比存在较大差距。2024 年开启试点，期间 SAF 的价格曾一度超过 2 万元 / 吨，是传统航油价格的数倍，甚至显著高于欧美的 SAF 价格水平。中国国内 SAF 的产能已达到 100 万吨，但产业的市场化发展面临瓶颈。当前 SAF 产业缺乏市场化的价格形成机制，未能实现供需的有效平衡。这使得供应链各方及需求方均面临盈利难或成本过高的压力。

事实上，鉴于中国在 SAF 产业中具备的天然优势，政策的重心宜放在降低 SAF 与传统航油之间的溢价，为市场化创造条件。当前核心问题在于市场需求不足，限制了生产商的连续生产，导致单位成本过高、技术进步较慢。课题组通过对中国各技术路径下的 SAF 成本分解和成本趋势的模拟，认为若能实现规模化生产，SAF 的成本在中长期会显著下降。初步分析显示，当 SAF（PtL 工艺）累计产量超过 160 万吨时，其成本可能接近传统航油的价格。

鉴于此，课题组建议政策应优先从需求端入手，确保 SAF 的市场需求，以此推动 SAF 产业规模化生产；同时通过市场化的定价机制，推动 SAF 上下游产业链的可持续发展。借鉴国际上支持 SAF 产业发展的政策工具，结合中国发展 SAF 产业面临的挑战，现就中国 SAF 产业发展提出如下具体政策建议：

第一，加强战略规划和顶层设计，明确掺混目标。建议将促进 SAF 产业发展纳入国家“十五五”规划，明确其作为战略性新兴产业的重要地位，并给予重点扶持。具体措施包括制定和发布《中国可持续航油产业发展规划（2026—2035）》，设定清晰的阶段性掺混比例目标，以稳定市场需求，降低 SAF 生产商面临的市场不确定性。若在 2026 年将 SAF 的掺混比例定为 2%，则 SAF 的年需求量将约为 80 万吨；若在 2030 年将掺混比例提高至 5%，SAF 的年需求量有望达到 265 万吨。这将为 SAF 生产商的规模化生产打下坚实的基础。

第二，通过市场化的机制分担 SAF “溢价”。建议由旅客分担 SAF 的成本。例如，假设执行 2% 的掺混要求，基于现阶段的 SAF 价格和航油消费量，航空公司满足掺混要求意味着燃料成本共增加 80 亿元。根据 2024 年中国民航全行业旅客运输量 7.3 亿人次，即便将 80 亿元新增成本全部分摊至旅客，则每人承担约 11 元人民币。具体可以通过设计精细化的市场化机制分摊该成本。例如，可以飞往欧盟、英国的国际航线为试点，设计乘客自愿选择的 SAF 附加费机制，根据航程分级设置弹性档位。为激发乘客选择支付 SAF 附加费的积极性，可配套推出绿色积分体系：对于支付 SAF 附加费的乘客，将按支付金额获得绿色积分，支付越多，积分越多。该积分以鼓励绿色出行为核心，可用于加速会员等级升级、兑换航行里程或换取机场贵宾厅服务等权益，以此形成“绿色出行—获取积分—享受权益”的良性循环。

第三，将 SAF 纳入政府绿色采购强制目录。建议明确规定，全国各级党政机关、事业单位、团体组织等工作人员，通过公务出行采购管理系统（例如政府采购机票管理网站）预订公务出行航班时，均需支付 SAF 专项附加费。该附加费根据公务出行的航距、舱位等标准统一核算，与机票票价、常规附加费一同计入总费用。同时，对该系统进行升级，以实现附加费的自动核算，并在行程单中单独列明为“SAF 绿色采购附加费”，作为专项成本纳入公务差旅费预

算及报销体系。通过公共部门的示范消费，为 SAF 市场提供稳定需求，切实发挥政策引领作用。

第四，构建 SAF 长期采购协议与市场化定价机制。鼓励采购方与生产商直接签订长期承购协议，稳定长期的执行价格。价格可通过招标方式确定。考虑到生产商的成本可能有较大波动（例如 UCO 成本大幅上涨），可以借鉴英国的收入确定机制，未来可探索从全国碳市场配额拍卖收入中划拨专项资金，用于支付 SAF 差价补贴，确保生产商有合理的利润。通过构建长期稳定的采购与市场化的定价机制，解决当前 SAF 产业链上各方成本分担不均的问题。

第五，优化供应链成本与效率。建议加速推广应用质量平衡（mass balance）方法，降低 SAF 供应和设施改造的成本。考虑到税收地域差异可能对 SAF 供应链效率产生的潜在影响，需将税收协同纳入整体优化框架。通过建立适配质量平衡模式的税收规则，如明确环境属性账面分配的税基认定标准、消除跨区域征管差异，保障其通过可追溯的环境属性分割认证机制实现混合加注的成本优势，使 SAF 能够通过少量满足其存储要求的基础设施进行混合和加注，从而提升整体供应链的效率。此外，建议分阶段对机场进行改造，优先在靠近 SAF 产地的机场和枢纽机场建设专用的 SAF 存储设施和加注系统，保障 SAF 的快速部署与广泛应用，加速其在航空燃料供应链中的普及。

第六，建立与国际接轨的 SAF 标准认证体系。建议加快完善国内 SAF 标准认证体系，并积极推动其与国际标准接轨。具体措施包括：一是制定全面且严格的国内 SAF 质量与环境标准，涵盖生产、运输、储存和使用等全流程，确保产品符合国际航空业的减排要求；二是加强与国际标准制定机构的合作，积极参与国际标准的制定与修订，争取更多话语权，为国内 SAF 企业进入国际市场创造有利条件；三是推动更多国内认证机构与国际 SAF 认证相关机构（如 ISCC、RSB 等）开展合作。



SAF 产业概述

(一) SAF的定义与发展背景

航空业作为全球交通运输体系的重要组成部分，其二氧化碳排放量占全球总排放量的 2%-3%。而随着其他行业的去碳化进程加快，航空业排放增幅相对更为显著，2024 年全球航空业二氧化碳排放量增长约 5.5%，远高于全球能源相关二氧化碳排放量 0.8% 的增长率。为了实现《巴黎协定》中控制全球气温升幅的目标，航空业必须采取有效措施减少碳排放。

2009 年，国际航空运输协会（IATA，简称“国际航协”）提出了航空业“碳中和增长”的承诺，目标是到 2050 年实现行业整体碳排放量比 2005 年减少 50%。国际民航组织（ICAO）于 2016 年通过了国际航空碳抵销和减排计划（CORSIA），这是全球首个针对航空业的市场化减排机制。CORSIA 将可持续航空燃料（Sustainable Aviation Fuel，简称 SAF）纳入减排工具范畴，建议使用符合特定可持续性标准的 SAF 核算减排量并用来抵销部分碳排放。IATA 发布的《净零路线图》¹ 预测，为达成航空业在 2050 年实现二氧化碳净零排放目标，SAF 将承担约 65% 的减排责任。

SAF 指的是符合可持续发展标准的航空燃料，是传统航空燃料的突破性替代品，旨在减轻该行业对环境的影响²。SAF 通常来源于可再生资源或废弃物，例如废弃油和油脂、城市固体废物、农业和林业残留物、湿废物，以及在边缘土地上种植的非粮食作物等。此外，SAF 还可以通过直接从空气中捕获二氧化碳进行合成生产。与传统航空燃料相比，SAF 在生命周期内能够显著降低二氧化碳排放量。采用不同的生产技术，SAF 的净二氧化碳排放量可减少 70%-100%。

ICAO 推动了 SAF 可持续性认证体系的建立。SAF 之所以被认定是“可持续的”，除了具有减排效果，还需要符合几方面特征：其原料不会与粮食作物竞争，不会导致资源过度使用（水资源或土地），也不会加剧诸如森林砍伐、土壤退

1. <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-04-03/>

2. <https://www.sigmaearth.com/zh-CN/%E4%BB%80%E4%B9%88%E6%98%AF%E5%8F%AF%E6%8C%81%E7%BB%AD%E8%88%AA%E7%A9%BA%E7%87%83%E6%96%99-saf>

化等环境挑战。而且，SAF 除可减少温室气体排放外，其化学特性与常规航空煤油相似，可以直接与现有航空燃料混合使用，无需对飞机引擎进行改造，这使得 SAF 能够快速应用于现有的航空运输体系中。IATA 于 2025 年 4 月正式推出 SAF 登记系统，通过建立全球统一的核算框架与透明化追踪机制，确保 SAF 的减排量可权威核算并避免重复计算，以加速航空业对可持续航空燃料的采用。

因此，SAF 作为一种有效的减排手段和具有潜在巨大市场的产业，受到了国际社会的广泛关注。

(二) SAF 市场概览

国际航空业协会（IATA）发布的数据³显示，2024 年全球 SAF 产量约为 100 万吨，占全球喷气燃料产量的 0.3%，是 2023 年产量 50 万吨的两倍。SAF 的消费方目前主要来自欧美地区，从 ICAO 发布的 SAF 承购协议（offtake agreement）数据⁴来看，以美国 United Airlines、Southwest Airlines、Delta 为代表的北美航空公司，以及 Lufthansa、Air France-KLM 等欧洲航空公司的 SAF 承购量处于领先地位。在 SAF 供给端，同样呈现出鲜明的区域分布特征。以美国 Gevo、Fulcrum BioEnergy 和 Alder Fuels 为代表的北美生产商占据主导地位，欧洲则以荷兰 Shell、芬兰 Neste 等能源巨头为主要供给力量。

目前 SAF 的价格相对于传统航空燃料来说仍然较高。根据欧盟航空安全局（EASA）发布的 2024 年航空燃料参考价格报告⁵，2024 年欧盟地区传统航空煤油的平均市场价格为每吨 734 欧元，而 SAF 最成熟的技术——HEFA 类 SAF，其平均价格仍高达每吨 2085 欧元，约为传统航空煤油价格的 2.7 倍。根据能源和商品市场信息提供商 Argus Media 发布的数据⁶，美国洛杉矶地区的 SAF 价格也是传统航空煤油的 2 倍以上。这一显著的价格差异突显了可持续航空燃料在推广和应用上面临的经济挑战。

专栏 1：SAF 主要的技术路径及发展前景

近年来，SAF 生产技术取得了显著进展。目前，已有 11 种技术路线被国际标准化组织（如航空涡轮燃料标准规范 ASTM D7566）认证，受到较多

3. <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/>

4. <https://www.icao.int/SAF/saf-offtake-agreements>

5. <https://stillwaterassociates.com/sky-high-cost-of-compliance-eus-saf-mandate-prices-unveiled/?cn-reloaded=1>

6. <https://www.airlines.org/dataset/saf-vs-jet-fuel-comparison/#jet-fuel-prices>

关注的生产路径包括加氢处理酯和脂肪酸（HEFA）、费托合成（FT）、绿色甲醇或其他醇类转航空煤油（AtJ、MtJ）以及合成航空燃料（PtL）技术等，参见表 1。

表1 主要SAF生产路径

技术路线	技术成熟度	主要原料	减排效果
加氢酯和脂肪酸 (HEFA, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids)	高 (商业化)	废弃油脂、动植物油	70-90%
费托合成 (FT, Fischer-Tropsch)	中	城市固体废弃物，林业废弃物，工业废气	80-85%
醇类转航空合成石蜡煤油 (AtJ, Alcohol-to-Jet)	中	农林废弃物等转化为乙醇，合成气	60-80%
甲醇转喷气燃料 (MtJ, Methanol-to-Jet)	低 (起步阶段)	甲醇（由生物质气化或可再生电力+CO ₂ 生产）	80-85%
电力转液体燃料 (PtL, Power-to-Liquid)	低 (前沿技术)	可再生能源、水和二氧化碳通过电解工艺合成燃料	90%-100%

资料来源：Sustainable Aviation Fuel Ready for Lift Off；作者整理

HEFA 技术凭借其商业化程度高、工艺稳定等优势，成为当前市场的主流选择。该技术主要利用废弃食用油、动物脂肪等原料，在芬兰 Neste、荷兰 SkyNRG 等企业的推动下已实现规模化生产。然而，其发展仍面临原料供应受限的挑战，每吨燃料的成本仍高达传统航油的 2-3 倍，特别是废弃食用油收集体系尚不完善，若转向植物油又可能引发可持续性争议。

与此同时，FT 技术也在逐步走向商业化。该技术可通过生物质或天然气生产合成燃料，荷兰 Enerkem 与壳牌的合作项目就是典型代表。不过，FT 技术需要建设复杂精密的气化和合成设施，初始投资成本很高，且采用繁复的原料预处理工艺，限制了其更广泛的应用。

醇类制航空燃料（MtJ、AtJ）技术仍处于示范或早期推广阶段。MtJ 技术中，核心原料是绿色甲醇，主要通过电解水制取绿氢再合成甲醇，或者通过生物质气化或发酵获得，但绿色甲醇成本居高不下，尚未实现商业化；AtJ 技术以乙醇为原料，其中粮食基乙醇面临可持续性问题的，非粮基乙醇如通过秸秆转化技术相对成熟，但原料收集和预处理成本占比较高，而工业废气通过气体发酵或催化转化生产乙醇仍处于示范阶段。总体而言，MtJ 和 AtJ 两类技术都面临着原料成本高和工艺待优化等商业化瓶颈。

最具长期潜力的当属 PtL 技术。它通过绿电制氢并与二氧化碳合成燃料，因此也称为电子燃料（e-fuel）技术，其生命周期碳节约可达到 90% 以上。理论上，鉴于电力和二氧化碳不受原料可用性的限制，电子燃料的供应潜力远远高于其他 SAF 类型。但目前的制造成本使其难以商业化，其中电解制氢和碳捕集的能耗就占到总成本的 70% 以上。囿于绿电成本高、碳捕集能耗大等瓶颈，全球范围内仅有少数示范项目在运行。

总体来看，SAF 产业发展仍处于技术多元化探索阶段，不同路径各具优劣。短期内，HEFA 和 FT 技术将继续支撑市场增长，且随着生产规模的扩大，其单位成本正以每年 5-8% 的速度下降。而 MtJ、AtJ 和 PtL 等新兴技术则需在降低成本、提升效率方面取得突破。

SAF 的价格之所以居高不下，其原因主要在于技术成熟度欠缺、原料供应限制以及供应链的不完善等。首先，尽管 SAF 技术正在不断发展，但与传统航空燃料相比，其生产技术还不够完善，生产效率较低，从而使得单位生产成本较高。如 EASA 发布的 2024 年航空燃料参考价格报告显示，PtL 技术生产 SAF 的成本是传统航空煤油的 10.1 倍⁷。其次，SAF 的生产依赖于特定的原料，而这些原料的供应往往有限。以目前已经商业化的 SAF 生产技术——HEFA 工艺为例，该工艺主要以废弃食用油（UCO）作为原料，通过高压、高温的加氢处理转化为 SAF，其产量占据了全球 SAF 市场的 90% 以上⁸。然而，UCO 原料的总量有限，据 Argus 统计，2024 年全球可用的 UCO 约为 890 万吨，而收集率仅为 57%。不仅供应量有限，一些原料（如 UCO）在其他行业也有广泛的应用，这使得 SAF 行业在原料采购上面临竞争压力，进一步增加了生产成本。再次，SAF 的供应链还不够完善。从原料的采购、运输到生产、储存和配送等环节，都存在一些问题。目前，SAF 的生产设施相对较少，分布不够广泛，导致运输和配送成本较高。同时，SAF 对运输、储存设备的要求更高，还涉及设备改造升级的成本，这些因素都推高了 SAF 的总成本。

7. <https://stillwaterassociates.com/sky-high-cost-of-compliance-eus-saf-mandate-prices-unveiled/?cn-reloaded=1>

8. <https://finance.sina.com.cn/stock/relnews/cn/2025-05-20/doc-inexfkww1209756.shtml?>



主要经济体的 SAF 政策实践

(一) 欧盟

欧盟在全球 SAF 产业的发展中处于领先地位。为推动 SAF 的发展，欧盟构建了一套系统的政策框架，旨在通过立法强制、市场机制与财政激励等多方面的支持，加速 SAF 的市场应用和推广。

欧盟的 SAF 政策主要依托于《可再生能源指令》（RED）和 ReFuelEU 航空条例实施。RED 作为欧盟可再生能源发展的纲领性文件，其目标覆盖全交通领域。RED 指令在欧盟范围内设立了具有约束力的可再生能源目标，从 2009 年的 RED I，到 2018 年的 RED II，再到 2023 年的 RED III，逐步加强了对 SAF 的激励和要求。RED III 指令⁹更是欧盟将 SAF 整合到能源框架中的决定性步骤。该指令为先进生物燃料和非生物来源可再生燃料确立了具体目标，要求交通领域可再生能源供应中，先进生物燃料与非生物来源可再生燃料的合计占比不低于 5.5%。

ReFuelEU 航空条例则是欧盟为实现航空脱碳目标的关键立法。该条例于 2023 年通过，2024 年 1 月 1 日大部分条款生效。条例要求航空燃料供应商¹⁰逐步提高欧盟机场飞机燃油中的 SAF 掺混比例，从 2025 年的 2% 逐步增加到 2050 年的 70%；并为电子航空燃料（e-SAF）设定了专门的子目标，从 2030 年的 0.7% 逐步提高到 2050 年的 35%¹¹。根据该条例，SAF 必须符合 RED 指令中规定的可持续性和减排标准，可接受的 SAF 来源包括先进生物燃料、从可再生氢衍生的合成燃料以及回收碳航空燃料。从欧盟机场起飞的航班，无论目的地是否在欧盟，ReFuelEU 航空条例要求其年度航空燃料的 90% 以上需在欧盟境内加注。与 RED 指令不同，ReFuelEU 航空条例在所有成员国直接适用，无需转化为国家法律，确保了政策的统一性和即时性。ReFuelEU 航空条例建立了严

9. <https://sustainablefutures.linklaters.com/post/102ipy5/european-renewable-energy-directive-red-iii-updated-ambitious-targets-to-boost>

10. 航空燃料供应商是专门负责航空燃料的采购、储存、运输及加注服务的企业，如在中国，中国航空油料集团有限公司即中航油承担该角色。

11. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legisum:4714799#:~:text=Aircraft%20operators%20departing%20from%20EU,For%20further%20information%2C%20see>

格的执行机制，要求欧盟机场运营商为 SAF 使用提供便利，并要求航空燃料供应商、机场和飞机运营商系统地收集和报告数据，以确保符合 EASA 和国家主管部门的监管要求。对未达标供应商和航空公司处以高额罚款，如对航空燃料供应商的罚款金额为 SAF 与传统航煤价差的 2 倍乘以未达标量。这一立法不仅为 SAF 的市场发展提供了明确的路线图，还通过严格的执行机制和罚款措施，确保了政策的落实。

此外，欧盟为航空燃料供应商提供了一种灵活性机制，在 2025 年至 2034 年期间，允许他们通过在所有欧盟机场供应的航空燃料中进行加权平均，来满足 SAF 最低掺混比例的要求。这是因为由于 SAF 产能还只分布在部分区域，产地与机场的距离可能比较远。若要求在各个机场掺混，会造成长途运输成本过高的问题。灵活性机制的核心在于，供应商不需要在每个机场单独达到最低掺混比例，而是可以在整个欧盟范围内进行综合计算，以确保整体符合法规要求。例如，如果某个供应商在一个机场供应的航空燃料中掺混了较高比例的 SAF，而在另一个机场掺混比例较低或没有掺混 SAF，只要整体加权平均值达到法规要求的最低比例，就视为合规。这使得航空燃料供应商可以根据自身的生产能力和市场条件，灵活安排 SAF 的供应，从而优化资源配置，而且为 SAF 行业提供了足够的时间来扩大生产和提升供应能力。灵活性机制将在 2035 年终止，届时航空燃料供应商须在每个欧盟机场单独满足 SAF 掺混比例要求。

欧盟排放交易体系（EU ETS）自 2012 年起将航空业纳入覆盖范围，要求所有在欧盟境内运营的航空公司（包括欧洲经济区内的航班）为其碳排放支付费用。为促进 SAF 的应用，EU ETS 设置了双重激励措施：一方面，SAF 的使用可享受零排放配额认定，直接降低运营商的合规成本；另一方面，体系专门设立了 2000 万吨配额的 SAF 奖励机制，根据运营商实际使用 SAF 的比例动态分配配额，通过市场化手段有效缩小 SAF 与传统航油的价格差。

为降低 SAF 的高成本并推动其市场应用，欧盟通过多种财政激励机制支持 SAF 的技术创新。例如，欧盟通过 Horizon Europe、创新基金和 InvestEU 计划，为 SAF 的研发和部署提供资金支持。其中，创新基金向瑞典 Biorefinery Östrand 项目授予了 1.67 亿欧元的拨款，用于开发世界上第一个专门生产可再生 SAF 的大型生物精炼厂。欧盟还通过 InvestEU 计划下的欧洲投资银行（EIB），向法兰克福的 INERATEC 合成燃料生产设施提供了 4000 万欧元风险贷款支持。同时，欧盟还通过修订能源税收指令，对航空燃料征税，但为 SAF 提供税收优惠，进一步提升了 SAF 的市场竞争力。

此外，为加速 SAF 技术的推广和应用，欧盟建立了 SAF 清算中心，专门负责新技术的认证和批准，推动 SAF 的市场准入。此外，建立统一的环境标签，

增加了航班碳排放的透明度，有助于消费者选择低碳航班，推动航空公司增加 SAF 的使用。

欧盟拥有 SAF 产能约 120 万吨，主要分布在瑞典、法国和荷兰。欧盟要求 SAF 必须符合 RED III 的可持续性标准，包括全生命周期温室气体减排至少 70%，原料来源限制，如禁止使用粮食作物及高土地利用变化风险的原料等。欧盟地区 SAF 的生产主要集中于传统的生物质基燃料，如 HEFA（氢化植物油）生产途径，而更具可持续性和可扩展性的 e-SAF 的生产仍处于试点阶段。

2024 年，欧盟地区生物燃料、先进生物燃料和回收碳生物燃料的 SAF 平均价格为每吨 2085 欧元，e-SAF 的参考价格约为每吨 7695 欧元，而传统航空燃料仅为每吨 734 欧元。根据标普（S&P）发布的数据，随着强制掺混比例的逐步提高，2025 年欧盟航班的 SAF 最低掺混率需达到 2%，这意味着 SAF 消费量将大幅增加至 190 万吨¹²，进一步考虑到 SAF 工厂可能出现的停产等状况，欧洲市场在 2025 年可能会面临接近 90 万吨的 SAF 需求缺口。

然而，尽管欧盟通过 ReFuelEU 航空条例等政策措施为 SAF 的发展提供了明确的框架和激励机制，但欧盟的 SAF 市场当前仍面临成本高昂、供应不足和政策执行乏力等挑战。例如，目前 e-SAF 的生产主要由小型炼油厂和初创公司主导，这些企业缺乏大规模生产的资金和技术能力，而传统能源公司则对 SAF 的投资不足。2024 年，英国石油公司、壳牌和 Uniper 等大型能源公司纷纷推迟或减少 SAF 的生产计划。由于 SAF 的高成本和供应不足，许多航空公司对欧盟的 SAF 强制令表示担忧甚至反对。2025 年 3 月，以汉莎航空、瑞安航空、法荷航集团为代表的 17 家欧洲主要航空公司发表联合声明，呼吁欧盟重新评估并放宽其 SAF 的强制法规要求。此外，ReFuelEU 航空条例对未能达到掺混比例要求的机场航空燃料供应商的处罚机制直接与 SAF 成本挂钩，而 SAF 成本由于潜在的供应短缺而高度波动，这也可能导致 SAF 供应商面临财务压力。

（二）英国

英国在 SAF 的发展上采取了与欧盟类似的强制性政策框架，以推动航空业的脱碳进程。根据英国相关法规¹³，从 2025 年起，英国机场供应的航空燃料中必须掺混至少 2% 的 SAF，到 2030 年这一比例将增加至 10%，到 2040 年进一步提升至 22%。此外，英国同样设定了 e-SAF 的子目标，要求从 2028 年起，航空燃料中必须包含 0.2% 的 e-SAF，到 2030 年提高至 0.5%，到 2040 年达到

12. <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/refined-products/052825-eu-policy-stifles-short-term-saf-supply-growth-omv>

13. <https://www.gov.uk/government/collections/sustainable-aviation-fuel-saf-mandate>

3.5%。在推动 SAF 发展中，英国同样面临成本高昂、供应不足等挑战。英国目前只有一个商业规模的 SAF 生产设施，未来五年的产能扩张计划仍处于测试阶段。为确保法规的实施，英国同样设置了惩罚规定，如果航空燃料供应商无法满足 SAF 或 e-SAF 的掺混要求，将面临罚款。英国的罚款规定引入了买断机制，具体而言，未能满足 SAF 义务的供应商需支付每升 4.70 英镑（约 7000 欧元 / 吨）的罚款，这一金额显然超过按要求直接采购 SAF 的成本，从而倒逼供应商满足掺混要求。

英国为支持 SAF 的生产与应用，同样出台了一系列支持措施。英国排放交易体系（UK ETS）是推动 SAF 使用的重要工具之一。该体系下，航空运营商所采购的 SAF 没有地域限制，只要符合 UK ETS 设定的合规条件，无论其来源地如何，均可享受基于减排量的配额减免优惠，即通过 SAF 产生的减排量抵销部分碳排放配额清缴义务。此外，英国政府还通过多种财政激励措施支持 SAF 的发展。例如，设立了 1.65 亿英镑的“先进燃料基金”¹⁴，资助 SAF 工厂建设和技术研发。政府宣布额外提供 40 万英镑（约合 47.5 万欧元）的资金，以支持 SAF 技术的测试和认证¹⁵。

为应对 SAF 生产面临的高成本和市场不确定性，英国推出收入确定性机制（RCM）。RCM 的核心目标是确保在英国本土建设并运营的 SAF 生产项目在市场波动价格波动的情况下，仍能获得稳定的收入。具体而言，SAF 生产商将与政府指定的交易对手方签订差价合约（CfD）。如果市场价格低于设定的执行价格，政府将补偿差价；如果市场价格高于执行价格，生产商需向政府返还超额收益。RCM 资金来源于对传统航空燃料供应商征收的可变税，税率根据 SAF 与传统燃料的价格差动态调整。该机制优先支持非 HEFA 技术的 SAF 项目，如合成燃料和先进生物燃料，以推动技术创新。RCM 相关立法正在推进，预计 2026 年底完成¹⁶。

（三）美国

美国作为全球第一大航空市场，拥有世界上最广泛的航空网络之一，其人均航班数量远远超过任何其他国家或地区。航空业排放的温室气体约占美国温室气体（GHG）排放总量的 3%，且预计将“同比快速增长”。为了减少航空业的碳排放，美国政府采取了一系列政策支持措施。在 2021 年 11 月召开的联合

14. <https://ethanolproducer.com/articles/uk-sets-10-saf-goal-launches-l165-advanced-fuels-fund-19449>

15. <https://network.efwconference.com/posts/government-announces-new-saf-measures-to-support-green-aviation>

16. <https://www.gov.uk/government/consultations/sustainable-aviation-fuels-revenue-certainty-mechanism-revenue-certainty-options>

国气候大会上，美国联邦航空局（FAA）发布了《航空气候行动计划》（“Aviation Climate Action Plan”），明确了推广 SAF、开发新型飞机和发动机技术以及加强政策法规引导等主要行动方向，旨在助力美国航空业实现 2050 年温室气体净零碳排放的目标。2022 年，美国政府发起了《SAF 挑战路线图（SAF Grand Challenge Roadmap）》¹⁷，目标是到 2030 年实现国内 SAF 年产量 30 亿加仑（近 900 万吨），到 2050 年满足美国航空业 100% 的燃料需求。2024 年 12 月美国交通部向 ICAO 更新其国家行动计划《美国航空气候行动计划 2024》（US-Aviation-Climate-Action-Plan-2024），将 SAF 作为航空业 2050 年净零排放的核心路径。

与欧盟通过强制掺混和碳市场等政策来推动 SAF 不同，美国主要通过补贴的形式激励 SAF 的生产、研发和市场推广。

首先，税收抵免是关键支持手段。《通胀削减法案》（IRA）为 SAF 生产商提供每加仑¹⁸ 高达 1.75 美元的税收抵免，有效期至 2027 年。具体而言，若 SAF 实现温室气体减排 50%，生产商可获得每加仑 1.25 美元的基本抵免；减排量每增加一个百分点，还可额外获得每加仑 0.01 美元补贴，最高可达 0.50 美元。《国内税收法》第 40B 条也为合格的 SAF 混合物提供税收抵免，要求其生命周期温室气体减排至少 50%。特朗普政府虽然废除了 IRA 中的大部分清洁能源计划，但其力推的大而美法案（The One, Big, Beautiful Bill）¹⁹ 中保留并调整了对 SAF 的税收抵免条款，将 SAF 生产税收抵免政策从 2027 年延长至 2031 年，抵免额度从 35 美分 / 加仑起步，最高可达 1.75 美元 / 加仑。若该法案相关条款全面落实，将有力支持 2030 年 SAF 产量达 30 亿加仑（约 876.68 万吨）、2050 年达 350 亿加仑（约 1.02 亿吨）的目标。这一目标的实现将为 SAF 产业带来巨大的市场需求，同时也将促进相关技术的创新和进步。不过，法案也对外国实体参与 SAF 项目设置了限制，要求原料和生产技术本土化，这可能会对国际合作和供应链产生一定影响。

其次，美国联邦政府通过研究与创新资助推动 SAF 技术进步。美国能源部启动多种 SAF 制备工艺研究项目，为生产商提供技术开发支持，并通过贷款项目办公室提供财务担保，降低 SAF 生产项目的融资风险和贷款利率。美国农业部也通过贷款担保和财政援助，助力 SAF 生产设施改造升级，扩大生产规模。

17. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/beto-saf-gc-roadmap-report-sept-2022.pdf>

18. 体积单位，1加仑为3.78541升，根据IATA，是1吨SAF=342.2加仑SAF。

19. 2025年7月4日，美国总统特朗普签署了备受瞩目的“大而美”税收和支出法案。该法案在能源政策领域有着显著举措，尤其是在SAF方面的规定引发行业广泛关注。从产业机遇来看，SAF生产依赖生物质原料，如玉米、废弃油脂等，这不仅为农业州带来了新的经济增长点，还推动了传统炼油企业的技术改造和转型。

最后，部分州政府的政策也为 SAF 发展提供了额外支持。例如，加州的低碳燃料标准（LCFS）通过碳信用交易机制，为 SAF 生产商带来额外经济收益；俄勒冈州通过强制碳强度目标结合市场化积分交易，实质是为低碳燃料（如 SAF）赋予碳减排溢价，降低其市场成本劣势。美国伊利诺伊州也在积极推动 SAF 的应用与发展，自 2023 年 7 月 1 日至 2032 年底实施可持续航空燃料购买抵免（SAFPC）政策。依据该政策，航空公司在伊利诺伊州内每采购或使用 1 加仑（约 3.8 升）SAF，便可获得 1.5 美元的税收抵免²⁰。这些机制不仅直接刺激 SAF 生产，更推动航空燃料结构向低碳转型，成为美国州级 SAF 政策的核心范本之一。

目前，美国在 SAF 的技术创新、原料多元化和产能扩张方面均处于领先地位，已投产的技术路线最为多样，相关认证标准（如 ASTM D7566）对 ICAO 的 SAF 标准制定具有相当大的影响力。

技术方面，美国在多种生产路线上处于领先地位。美国的 SAF 生产主要依赖于生物质原料，包括玉米、甘蔗、植物油、脂肪和润滑脂等。一些项目也开始探索利用农业废弃物、藻类等可持续原料生产 SAF。与欧盟不同，美国的政策允许将粮食（玉米、甘蔗等农作物原料）用于 SAF 生产，因此美国在 AtJ 技术上走在国际前沿。此外，美国还广泛采用 HEFA 以及 FT 合成工艺。HEFA 是目前唯一实现商业化的成熟路线，而 FT 合成和 AtJ 有望逐渐走出示范阶段进入商业化运营。再有，德克萨斯州的 Roadrunner 项目利用绿色氢气和捕获的二氧化碳生产 e-SAF 也具有示范效应。

美国在 SAF 原料可持续性认证方面也进行了严格区分，以避免国际争议。为平衡环保目标与国际贸易关系并减少政策阻力，美国通过《可再生燃料标准》（RFS）和《可持续航空燃料大挑战》等政策框架，建立了以碳减排强度为核心的分级认证体系。该体系优先支持废弃油脂、农林残余物等非粮原料，赋予其最高税收抵免且豁免额外认证要求；有条件准入玉米等粮食原料，要求其必须通过气候智能型农业（CSA）实践（如免耕、覆盖作物）降低碳足迹，否则无法获取补贴；同时系统性排除涉及毁林的高风险原料（如特定棕榈油衍生燃料）。

根据美国能源信息署（EIA）2025 年 5 月发布的消息，美国的 SAF 产量从 2024 年 12 月到 2025 年 2 月大约翻了一番，目前约为 30000 桶 / 天（140 万吨每年），并预计在 2025 年继续增长²¹。Argus 最新发布的美国洛杉矶地区航空

20. <https://tax.illinois.gov/research/news/fy-2023-23--new-sustainable-aviation-fuel-purchase-credit-enacte.html>

21. <https://enerknol.com/u-s-sustainable-aviation-fuel-production-surges-with-new-capacity-additions-eia/>

燃料价格数据²²（2025 年 6 月）显示，当前市场呈现显著价差格局：传统航空燃料（CAF）现货均价为 2.27 美元 / 加仑（约合 776 美元 / 吨），而 SAF 在补贴前的价格为 4.78 美元 / 加仑（约 1636 美元 / 吨）。值得注意的是，在享受 IRA 税收抵免等政策补贴后，SAF 实际落地价格降至 4.5 美元 / 加仑（约 1540 美元 / 吨），较补贴前降低约 5.9%，但仍较传统航油溢价 98%。

部分美国生产的 SAF 可能会出口到其他国家，以满足出口国的 SAF 强制掺混法规要求。例如，日本对 SAF 的需求不断增加，可能会进口部分美国生产的 SAF。此外，少量符合欧盟法规的 SAF 可能会出口到欧洲。然而，SAF 的市场渗透同样面临成本挑战，仍需推动技术创新、克服成本障碍以进一步扩大市场应用。

（四）新加坡

新加坡是跨国航班的核心枢纽。新加坡航空集团作为新加坡航空业的核心支柱，其碳排放表现是衡量该国航空业环境影响的关键指标。在 2024/25 财年，该集团总排放量从 1880 万吨二氧化碳当量增至 2140 万吨，增幅超 13%。为了应对航空业的碳排放问题，新加坡民航局（CAAS）于 2024 年 2 月发布了《新加坡可持续航空枢纽蓝图》（Singapore Sustainable Air Hub Blueprint，简称蓝图），为国内和国际航空领域的碳减排设定了中长期目标。该《蓝图》计划到 2030 年，机场运营的国内排放量在 2019 年的基础上减少 20%；到 2050 年，实现国内与国际航空的净零排放。

SAF 被认为是实现《蓝图》目标的关键途径。为实现 2050 年净零排放目标，预计 SAF 将贡献约航空业 65% 的碳减排量。为此，新加坡设定了分阶段的 SAF 使用目标：从 2026 年起，所有从新加坡起飞的航班必须使用 SAF，初始目标为 SAF 占航空燃油总量的 1%，并计划到 2030 年将比例提升至 3%-5%。除该强制要求外，新加坡还采取了一系列措施来解决 SAF 的高成本问题，共同推动 SAF 使用。

新加坡是全球第一个通过普遍性征收附加费来确保使用 SAF 的国家。新加坡计划自 2026 年起实施强制性 SAF 税费（SAF levy），要求所有离境航班使用 SAF，并通过固定税费模式分摊成本：民航局（CAAS）基于 2026 年 1% 的 SAF 使用目标和预估价格，预先设定税费标准（如短途经济舱（如新加坡—曼谷）需支付 3 新元，长途经济舱（如新加坡—伦敦）需支付 16 新元，商务舱 / 头等舱税费更高），税费收入集中用于采购 SAF。该机制通过统一采购整合需求以降低单位成本，且税费金额固定，不受市场价格波动影响；实际采购量则根据税费总额和实时 SAF 价格动态调整。这种设计将 SAF 溢价分摊至旅客，避免航

22. <https://www.airlines.org/dataset/sustainable-aviation-fuel-price-comparison/#jet-fuel-prices>.

空公司单独承担成本压力，同时提供稳定的成本预期，兼顾减排目标与航空枢纽竞争力。

新加坡积极完善 SAF 供应链体系。政府强制餐饮业参与废弃食用油回收，并设立专项补贴激励回收行为，同时与澳大利亚等国合作开发生物质原料跨境供应链，推动废弃食用油、生物质等可再生原料在 SAF 生产中的应用。此外，新加坡通过“航空可持续发展计划”提供税收减免和资金支持，降低本土 SAF 企业生产成本。全球领先的可持续燃料生产商 Neste 于 2023 年完成其新加坡大士（Tuas）炼油厂的扩建，年产能提升至 100 万吨 SAF²³，使新加坡成为全球最大的 SAF 生产基地之一。此外，新加坡航空集团与 Neste 等企业签署长期采购协议，从本地炼油厂采购符合国际标准的 SAF，进一步强化了供应链韧性并推动本土 SAF 生态系统的建设。

（五）政策工具的梳理和启示

综合上文的讨论以及国际文献（WEF，2021），表 2 梳理了国际上支持 SAF 市场发展的政策。政策分为三个类别：供给侧措施、需求侧措施和支持性措施。供给侧措施通过政策支持和技术研发，增加 SAF 的生产能力和原料供应，降低生产成本，从而保障 SAF 的稳定供应。需求侧措施通过政策激励和市场机制，降低 SAF 的使用成本或提高传统航空燃料的成本，进而刺激航空公司和消费者对 SAF 的需求。支持性措施则通过优化产业链、建立标准认证体系等手段，消除 SAF 规模化发展的障碍。

23. <https://www.neste.com/en-us/news-and-insights/renewable-solutions/singapore-refinery-expansion>

表2 支持SAF市场发展的政策工具

政策类型	政策名称	政策说明	典型代表
供给侧	建立创新基金或融资选项	支持早期阶段SAF生产路径的研发	欧盟、美国、英国
	合同差价机制（CfD）	减少SAF与常规喷气燃料之间的价格差距	英国（拟实施）
	提供资本补助和低息贷款	吸引私人投资，用于SAF生产设施的建设和运营	美国（俄勒冈州）
	促进RD&D	增强SAF生产过程的效率并降低制造成本	美国
	优先供应SAF原料并优化燃料工厂生产	激励将现有可再生燃料生产转向SAF	美国
	税收豁免	鼓励使用本地和区域生产的可持续原料	美国
需求侧	建立SAF混合强制令	逐步提高SAF在喷气燃料市场中的份额	欧盟、英国、新加坡
	提供直接税收激励	减少SAF购买者的成本差异	美国
	征收SAF专项费	用于资助SAF采购，提高消费者透明度	新加坡
	引入国内碳价或碳交易机制	对化石燃料排放定价，鼓励使用低碳替代品	欧盟、英国
支持性	SAF供应灵活性机制	允许供应商跨区域加权平均满足整体掺混要求，降低初期合规难度。	欧盟
	原料保障机制	强制回收关键原料，或开发跨境供应链	新加坡
	建立标准体系	制定并强制执行严格可持续性标准，并推动国际互认	欧盟、美国

来源：WEF（2021）Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuel Policy Toolkit；作者整理。

这些政策的实施不仅为 SAF 的市场应用和推广提供了明确的方向和有力的支持，也为其他国家和地区提供了丰富的经验借鉴。

1. 需求侧拉动：明确强制目标与分担机制推动市场扩容。 设定清晰、渐进的 SAF 强制掺混目标并提供稳定的需求预期，是主要经济体的普遍做法。欧盟、英国、新加坡均通过立法确立了分阶段提升的 SAF 使用义务。这种强制性要求为市场提供了明确的长期路线图，并通过严格的执行机制确保政策落地。此外，新加坡通过征收 SAF 税费（SAF levy）为 SAF 的采购提供资金支持，这种成本

分担机制将 SAF 的成本分摊至整个航空产业链和终端消费者，避免了航空公司因 SAF 价格高昂而承担过重负担

2. 供给侧驱动：财政激励与技术创新是降本增效的核心。财政激励措施在降低 SAF 生产成本和提升其市场竞争力方面发挥了重要作用。欧盟通过 Horizon Europe、创新基金（如资助瑞典 Biorefinery Östrand 项目 1.67 亿欧元）和 InvestEU 计划（如支持德国 INERATEC 项目 7000 万欧元）为 SAF 研发和部署提供资金；美国拜登政府通过的 IRA 为 SAF 生产商提供高达每加仑 1.75 美元的税收抵免，并通过能源部、农业部的贷款担保支持技术开发和设施升级；英国还拟推出 RCM 或将通过 CfD 确保 SAF 生产商在市场价格波动时获得稳定收入。

3. 机制协同：碳定价与灵活机制是缩小价差的重要设计。碳市场与灵活机制在缩小 SAF 与传统航油价差方面扮演着重要角色。欧盟排放交易体系（EU ETS）和英国排放交易体系（UK ETS）将航空业纳入覆盖范围，一方面对传统航油燃烧产生的碳排放定价，增加其使用成本；另一方面，对使用 SAF 给予激励，例如 EU ETS 给予零排放配额认定和 SAF 专项配额奖励。这种“碳成本增加 + 低碳激励”的双重机制，有效提升了 SAF 的相对竞争力。此外，欧盟在 ReFuelEU 中引入的初期加权平均机制，为供应商提供了灵活性，降低了合规成本，在政策设计中兼顾了目标刚性与执行的灵活性。

4. 支持措施：供应链与标准认证是产业生态的基础。稳定的原料供应、完善的储运设施和互认的标准认证体系是 SAF 产业可持续发展的基础保障。在供应链方面，新加坡强制餐饮业参与废弃食用油回收并提供补贴，同时积极开发生物质原料跨境供应链（如与澳大利亚合作）；美国建立了以碳减排强度为核心的分级原料认证体系，优先支持非粮原料，同时系统性排除高风险原料（如特定棕榈油）；欧盟要求 SAF 必须符合 RED 指令的严格可持续性标准（如全生命周期减排 $\geq 70\%$ ，禁用粮食作物及高 ILUC 风险原料）。在标准认证方面，欧盟、美国积极主导国际标准的制定。

5. 多方协作：政府引导与行业消费者参与不可或缺。SAF 产业的推广离不开政府、行业和消费者的共同参与。政府的顶层设计和政策框架是主导力量。同时，行业合作至关重要，如航空公司与生产商签订长期承购协议（如新加坡航空与 Neste），为 SAF 项目提供稳定支持；头部企业（如亚马逊、苹果）对低碳供应链的要求也在推动 SAF 广泛应用中发挥了重要作用。此外，提高消费者认知和引导选择也很关键，例如欧盟建立统一环境标签增加航班碳排放透明度，有助于消费者选择低碳航班，间接推动航空公司增加 SAF 使用。多方协作是构建健康 SAF 产业生态的必然要求。



中国发展 SAF 产业的战略意义

(一) 中国 SAF 产业发展现状与政策环境

中国政府已将可持续燃料确定为重点发展领域。2021 年国务院《2030 年前碳达峰行动方案》首次提出“推进先进生物液体燃料在航空领域应用”，虽未直接使用“SAF”术语，但为产业发展奠定了政策基调。2022 年《“十四五”可再生能源发展规划》进一步明确“非粮生物质液体燃料”技术路径，将生物航空煤油列为重点研发方向，并设定“十四五”内可持续航油累计消费量达 5 万吨的量化目标，但并无强制掺混要求。2023 年 12 月发布的《产业结构调整指导目录》升级政策能级，将 SAF 原料收储运技术、生产工艺开发与应用同步列入鼓励类目录，强化产业链支持。2024 年 10 月，国家发展改革委等六部门联合发布《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》，SAF 被明确列为重点发展领域。

2024 年中国正式开始 SAF 加注的试点。2024 年 9 月，国家发展改革委与民航局启动 SAF 第一阶段应用试点，中国国际航空公司、中国东方航空、中国南方航空在北京大兴、成都双流、郑州新郑、宁波栎社机场起飞的 12 个航班加注 SAF，标志着国内 SAF 产业发展进入商业化初期。第二阶段自 2025 年 3 月 19 日起，上述四座机场起飞的所有国内航班将常态化加注掺混 1% 的 SAF 混合燃料。

专栏 2：中国 SAF 技术发展现状

尽管“十四五”规划设定了 5 万吨的消费量目标，然而截至 2024 年，国内 SAF 消费量不足 5000 吨，仅占航油总消费量的 0.013%，主要应用于国际货运航班以及四座试点机场。受制于需求不足、原料供应瓶颈（餐厨废油资源分散、回收体系不完善）以及技术成熟度欠缺等因素，现阶段 SAF 价格偏高。在技术路径方面，中国 SAF 产业的产能布局涉及 HEFA、气化费托合成（FT）、醇制航煤（AtJ）以及电转液（PtL）等主要技术路线。其中，HEFA 技术路线作为当前最成熟的工艺，已在国内形成规模化产能。中国石

油化工股份有限公司镇海炼化分公司于 2022 年建成 10 万吨 / 年 SAF 生产装置，采用餐厨废油（UCO）为原料，并已通过国际可持续认证（可持续生物材料圆桌认证，RSB）。不过，由于 UCO 资源有上限，HEFA 工艺生产的 SAF 不足以满足未来的需求。

AtJ 技术方面，北京首钢朗泽科技股份有限公司通过引进美国朗泽科技公司（LanzaTech）的微生物催化技术，建成全球首套 4.5 万吨级燃料乙醇商业化装置，并依托 LanzaTech 授权的合成生物菌种及国际专利体系，于 2023 年通过欧盟 CORSIA 认证，成为亚太地区唯一获此资质的工业尾气衍生 SAF 原料供应商²⁴。中国在绿色甲醇领域的产业化进程为 MtJ 技术路线制备 SAF 奠定了基础。截至 2025 年 4 月，国内已投产和在建的绿色甲醇项目总产能已突破 500 万吨，而规划产能更是超过 5000 万吨²⁵。这一庞大的供应体系，可为 MtJ 航煤技术规模化提供原料保障。

中长期技术方向是 e-SAF，即通过可再生能源驱动的合成燃料，其原料为绿氢（通过电解水制取）和二氧化碳（来自工业排放或直接空气捕获）。PtL 涵盖所有“绿电→绿氢→液态燃料”的技术路线，e-SAF 是 PtL 技术在航空燃料领域的具体应用。清华大学研发的 PtL 技术已在国家电投于新疆建设的 1 万吨 / 年 PtL 示范项目中得到应用²⁶。该项目以风电耦合碱性电解水制氢为核心，将氢气与二氧化碳结合，通过改良型费托合成工艺生产合成航煤，所采用关键技术和装备完全自主化²⁷。

（二）中国为什么要进一步发展 SAF 产业

1. 实现国内的减排目标

从国内碳排放现状来看，中国航空业正呈现快速增长态势。据 2025 年全国民航工作会议消息²⁸，2024 年航空运输总周转量较 2019 年增长 14.8%，碳排放量达到 1.29 亿吨。尽管目前航空业碳排放量仅占全国碳排放总量的 1%，占交通运输行业的 10%，但这一比例预计将随着其他重点领域减排成效的显现而上升。预计到 2030 年，中国航空燃油消费将从 2024 年的 4000 万吨上升至 5300

24. http://www.csteelnews.com/qypd/qydt/201912/t20191209_21856.html

25. <https://www.toutiao.com/article/7497871760029778468/>

26. <https://m.ofweek.com/hydrogen/2024-06/ART-180826-8420-30637118.html>

27. <https://finance.sina.com.cn/wm/2024-09-23/doc-incqeerm5072070.shtml>

28. https://www.toutiao.com/article/7457900969234301481/?upstream_biz=doubao&source=m_redirect

万吨，航空业碳排放量将进一步增加至 1.67 亿吨。而航油燃烧产生的二氧化碳占航空业碳排放总量的 75%-80%，是绝对主要的排放源。若 2030 年中国的 SAF 掺混比例达到 5%，根据国际民用航空组织的测算指南，传统航油每吨燃烧排放 3.157 吨 CO₂，按照 SAF 减排 80% 计算，年减排量可达 670 万吨 CO₂，这将为实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标提供重要支持。

2. 适应国际航空业政策环境和市场需求的变化

从国际政策演进态势来看，全球航空减排监管体系正加速完善，一系列政策正在深刻重构全球航空燃料市场格局，使 SAF 的产能与技术成为未来的核心竞争力。因此，加快发展本土 SAF 产业，既是应对国际减排合规压力的迫切需求，也是提升中国航空业全球竞争力的战略选择。

国际民航组织（ICAO）主导的 CORSIA 机制已构建起具有强制约束力的减排框架，从 2027 年开始，CORSIA 计划将进入强制合规阶段，未能满足豁免条件²⁹的参与国的航空公司都需要遵守碳排放限制，以确保航空业的碳排放量不会无限增长。这一目标需要通过使用可持续航空燃料或购买经认证的碳信用来实现。且 CORSIA 通过明确 SAF 减排量计算规则并建立 SAF 碳信用交易机制，鼓励 SAF 的使用。

欧盟和英国相继出台了严格的政策，当前中国航空公司执飞欧盟或英国航线时，从当地机场离港的航班必须使用符合 SAF 掺混比例要求的航油，且从英国机场起飞的航班需额外履行碳市场履约义务，包括提交排放数据、清缴配额或使用 SAF 抵扣部分排放量。因此，即便中国暂不加入 CORSIA，但作为全球第二大航空市场，中国航空公司的国际线路仍面临其他国家和地区的碳市场以及与 SAF 使用相关的奖惩机制约束。

除了国际上航空业政策的影响，市场需求的变化也对未来航空运输的可持续性提出了更高的要求。跨境电商和高端制造业的快速发展正推动需求持续增长。以亚马逊、苹果和阿里巴巴为代表的行业领军企业，正将 SAF 采购作为其供应链减排战略的核心环节。这一趋势主要源于日益严格的 ESG（环境、社会和公司治理）披露要求，促使企业采取更积极的减排行动。如亚马逊承诺 2040 年实现净零排放，并正在通过多种措施推动 SAF 的使用，包括与产业链伙伴合作以增加 SAF 使用比例等。这种由头部企业主导的供应链减排模式，正在成为推动 SAF 市场发展的新动力。

29. 豁免的国家包括两类：1. 特殊条件国家：最不发达国家（LDCs）、小岛屿发展中国家（SIDS）、内陆发展中国家（LLDCs）；2. 低活动量国家：2018 年国际航空运输量 RTKs（Revenue Tonne-Kilometres）占比 <0.5% 的国家。

3. 培育新的出口增长点

目前，全球可持续航空燃料的生产仍处于起步阶段，其数量尚不足传统航油总消耗量的 1%，向上空间潜力巨大。国际航空运输协会（IATA）预测，到 2050 年为实现净零排放，全球每年 SAF 需求量将超过 3.6 亿吨（假设 65% 的减排通过使用 SAF 来实现）。而美国《SAF 挑战路线图》设定 2050 年产能目标约 1.1 亿吨，即便叠加欧盟、中东等主要地区的规划产能，全球仍将存在显著供给缺口。这一巨大的市场空间，为中国 SAF 产业提供了重要机遇。

中国发展 SAF 产业的优势不仅体现在市场需求层面，更展现在产业基础和资源储备等多个维度。就目前已经商业化的 HEFA 工艺而言，废弃油脂（UCO）作为该工艺生产 SAF 的核心原料，中国具备显著的资源禀赋优势，但尚未充分发挥潜力。作为全球最大的食用油消费国，中国每年理论 UCO 产生量超过 1100 万吨，占全球总量的 30%³⁰。2024 年中国 UCO 出口量达 295.1 万吨，其中对美出口 126.7 万吨（占比 43%）。然而美国 2024 年 1 月发布的《清洁燃料生产抵免指南》（第 45Z 条）明确规定，将进口 UCO 排除在 45Z 税收抵免政策适用范围之外，这一政策变化促使中国 UCO 出口面临转型。与之相对应的是，中国已于 2024 年 12 月取消 UCO 出口退税。通过将 UCO 转化为高附加值的 SAF 产品，中国可以实现从初级原料出口到高价值产品输出的产业升级。若通过完善回收体系、加强政策引导等措施，将 UCO 年收集量提升至 600 万吨（收集率约 55%），按照 HEFA 工艺 70% 的产出率计算，可年产 420 万吨 SAF。这一产量规模相当于 2024 年中国航油消费总量（约 4000 万吨）的 10.5%，可创造约 700 亿元人民币的年产值（按 2024 年欧盟 SAF 均价 2085 欧元 / 吨计算），对应的减排量可达 1060 万吨，这充分凸显出 SAF 产业显著的经济和环境双重效益。

在其它技术路线领域，中国同样具备显著的资源优势。例如 AtJ 路线中需要大量的非粮生物质资源，而中国拥有丰富的农林废弃物资源。根据中国农业农村部发布的《全国农作物秸秆综合利用情况报告》，中国秸秆理论资源量为 9.77 亿吨，可收集资源量为 7.37 亿吨³¹。此外，玉米芯、甘蔗渣等非粮生物质资源充足，潜在的能源作物（例如芦竹和蓖麻）既可以转化为生物航油，又可以因为在盐碱地上大规模种植而不影响国家的粮食生产。PtL 路径需要大规模的绿氢，而在可再生能源供给方面，截至 2024 年底，中国风电、太阳能发电装机总量突

30. https://xueqiu.com/4751461282/314526904?md5__1038=n4%2BxnD9iYQqyg7DBDBqDqpDU27jFmi%2BqQ4x.

31. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1779432248795497818&wfr=spider&for=pc>

破 14 亿千瓦，占全国电力装机总量的 42.1%³²。中国的“三北”地区拥有丰富的风光资源，有利于度电成本的持续降低，甚至可以低于火力发电水平，为 PtL 技术提供了充足的绿电保障。PtL 路径的规模化发展离不开稳定的碳源支撑，而中国作为年碳排放量超十亿吨的工业大国，在碳捕集利用与封存（CCUS）领域已具备扎实基础。据《中国碳捕集利用与封存进展系列报告 2025》显示，截至 2024 年 7 月，中国运行的 CCUS 工程已达约 120 个，年捕集能力达 600 万吨，且未来规划中这一能力将持续大幅提升。在直接空气碳捕集（DAC）技术发展方面，已有部分项目取得初步成果，例如中国能建集团联合上海交通大学建成了 600 吨 / 年 CO₂ 直接空气捕集装置，并成功通过百吨级模块满负荷可靠性运行验证³³。

2025 年 4 月，出口政策的突破为市场注入新动能——连云港获批为 SAF 出口试验区，浙江嘉澳成为国内首个进入“出口商白名单”的企业，其 37.24 万吨产能通过核验并获出口许可³⁴。这意味着头部企业可参照传统航油出口模式（海关代码 HS 2710191），以核验产能为上限参与国际减碳市场，这一制度性突破有望加速 SAF 产能释放，缓解国内供需失衡压力，并有效对接国际需求。

4.SAF 产业与新能源产业耦合发展，推动循环经济

中国 SAF 产业可以与新能源产业耦合发展，为解决当前可再生能源产能过剩、消纳难题，以及推动循环经济提供了创新路径。作为全球最大的可再生能源装机国家，中国风电、光伏总装机量已突破 14 亿千瓦，但受限于电网消纳能力，“三北”地区长期面临严重的弃风弃光问题，大量可再生能源电力无法有效利用，造成了资源浪费。SAF 产业中的电力转液体（PtL）技术通过电解水制取绿氢，能够有效消纳这些过剩的可再生能源电力，实现“电 - 氢 - 燃料”的转化闭环。以西北地区为例，丰富的风光资源若能用于 PtL-SAF 生产，不仅能够提升新能源利用率，解决新能源产能过剩问题，还能显著降低绿氢生产成本，为新能源产业开辟新的价值增长点，同时可以缓解弃风弃光及绿电消纳问题，实现可再生能源与 SAF 产业的协同发展。此外，由于绿色甲醇合成与 PtL 合成燃料过程共享绿氢制备与碳捕集环节，SAF 产业还可带动生物能源、绿氢与碳捕集等战略新兴产业链的耦合发展。这种耦合效应不仅提升了整个能源系统的效率和可持续性，还为相关产业创造了新的发展机遇，推动了循环经济的发展，进一步促进了我国能源转型和绿色低碳经济的建设。

32. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>

33. https://www.ceec.net.cn/art/2024/7/17/art_11019_2532233.html

34. https://vip.stock.finance.sina.com.cn/corp/view/vCB_AllBulletinDetail.php?id=11084336

与此同时，SAF 产业的核心原料体系契合循环经济理念。餐厨废油、农林废弃物、工业废气等传统废弃物通过不同 SAF 技术路线实现资源化高值利用，促进循环经济发展并刺激各地区增长。例如，中国每年潜在的 600 万吨餐厨废油若全部转化为 SAF，在解决地沟油回流餐桌等食品安全问题的同时，能够创造约 700 亿元人民币的年产值。农林废弃物的规模化利用不仅能减少露天焚烧污染，更能带动农村就业增长，达成环境效益与经济效益的双赢。这类产业耦合还延伸至碳循环领域，钢铁、化工等行业的工业废气可作为 PtL 技术的碳源，构建“碳捕集 - 燃料合成 - 航空减排”的完整闭环。跨产业的深度融合不仅解决了可再生能源消纳和传统废弃物处理的难题，更培育出连接新能源与传统能源转型的“绿色桥梁”。

5. 增强国际航空治理话语权

全球 SAF 产业尚处于政策与市场规则形成期，中国亟需通过国际标准互认与体系创新突破欧美主导格局。当前，美国主导的 ASTM 国际标准和欧盟的 RED 等标准体系构建了“技术合规 + 环境合规”双重准入门槛，并凭借其先发优势抢占市场份额。2024 年全球 SAF 产量仅约 100 万吨，生产和使用均主要集中在欧美地区。中国《CTSO-2C701A》适航标准虽已实施，但尚未实现与 ASTM 的互认；自主研发的《航空替代燃料可持续性要求》尚在完善之中，这可能导致中国生产的 SAF 难以参与国际供应链。例如英国碳市场规定：SAF 须通过 RED II 认可的认证体系（如 ISCC、RSB）或英国补充标准，方可享受碳配额抵扣或税收减免，这一政策导致其他标准体系下的 SAF 丧失市场竞争力。

而 SAF 市场发展机遇稍纵即逝，战略窗口期已十分紧迫。国际民航组织（ICAO）的 CORSIA 机制将于 2027 年进入强制实施阶段，SAF 将成为航空业碳减排的核心手段。中国若不能及时布局，不仅将丧失这一新兴市场的主导权，还可能在国际航空运输领域陷入被动。

中国作为全球第二大航空市场，若能在 SAF 规模化生产、碳核算规则制定以及标准互认等方面取得突破，将显著提升在全球航空治理中的影响力与话语权。SAF 产业的突围有助于中国从“规则接受者”向“规则共塑者”转型。这种转型的成功，将直接决定未来全球航空碳定价权、绿色贸易标准的分配格局，以及中国在气候治理多边机制中的战略地位。

6. 提升能源安全性

传统航油生产高度依赖石油这一核心原料，而我国石油资源对外依存度长期居高不下。国家统计局数据和海关总署数据显示，我国原油对外依存度维持

在 72% 左右³⁵。作为原油加工的关键衍生品，航空燃油的供应链条深度绑定原油进口体系，一旦遭遇国际地缘冲突、贸易摩擦等突发状况导致原油供应链中断，航空业的能源安全将面临直接冲击。尤其是在军事领域，任何石油贸易中存在的“卡脖子”风险都可能对军事航空的能源保障构成潜在挑战。而 SAF 以废弃油脂、农林废弃物、绿氢等非石油原料为生产基础，能够从源头打破对原油的单一依赖，为航空能源供给注入多元化要素。

总之，发展 SAF 产业对中国而言兼具减排、经济与战略三重价值，是实现“双碳”目标、保持航空业国际竞争力的关键战略决策。短期看，是应对国际碳壁垒的迫切需求；长期看，是培育新质生产力、增强全球绿色竞争力的关键路径。中国需统筹政策支持、技术创新与市场机制，加速 SAF 产业化进程，并在全球气候治理中赢得更大话语权。

35. <https://baike.baidu.com/item/%E5%8E%9F%E6%B2%B9%E5%AF%B9%E5%A4%96%E4%BE%9D%E5%AD%98%E5%BA%A6/266351>

四 中国 SAF 产业发展面临的挑战

(一) SAF 产业市场化瓶颈：定价机制、采购机制和溢价分配机制

由于中国的 SAF 产业仍然在发展初期，尚未形成市场化的定价机制。试点期间表现出供应集中、采购方单一、价格高企的特征。主要表现为以下三个问题。

1. 缺乏市场化的定价机制

试点期间国内 SAF 价格曾一度达到 2 万多元 / 吨，是传统航油价格的数倍，也显著高于同期欧美市场价格。这一现象在一定程度上源于缺乏市场化的定价机制。在生产端，试点中的 SAF 主要由几家国内企业提供，例如中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司（简称“镇海炼化”）和河南省君恒实业集团生物科技有限公司。2024 年试点期间的 SAF 主要产自镇海炼化，该公司采用 HEFA 技术路径，但由于生产不连续，导致固定成本摊销显著提高，进而推高了单位生产成本。同时，因缺乏有效的市场竞争机制，SAF 的生产成本和定价机制缺乏透明性，航空公司普遍认为 SAF 存在过高的溢价。

2. 采购机制不完善

与传统航油的采购机制类似，SAF 的采购机制为中国航空油料集团（简称“中国航油”）向生产企业进行统购，再供应至航空公司。这种集中采购的模式原本有利于降低 SAF 的采购成本，但在实践中缺乏市场化的采购和定价机制，这一优势未能充分发挥。中国航油作为唯一的中间商，需要为 SAF 的供应提供专用储运设施，相关改造、建设成本由中国航油承担并分摊至 SAF 价格中。然而该部分成本的核算标准与分摊方式并不透明。

同时，由于缺乏持续稳定的需求，现阶段 SAF 采购以短期订单为主，缺乏长期承购协议。这种采购模式导致生产端无法获得确定和持续的需求信号，也进而造成生产不连续、产能闲置等问题、容易造成价格过高的结果。

3. 溢价分配机制不健全

据课题组调研，当前国内第一、第二阶段试点中，SAF 相对于传统航油的溢价完全由航空公司承担。传统航油成本通常约占航空公司运营总成本的 30%–

40%³⁶，而 SAF 价格远高于传统航油，显著加剧了航空公司的运营压力。在民航业仍处于疫后恢复阶段、且尚未出台针对性支持政策的背景下，高昂的 SAF 成本导致航空公司普遍缺乏主动采购意愿，严重限制了 SAF 的规模化应用。课题组的调研显示，作为终端需求方，航空公司认为 SAF 溢价应该在产业链各方之间进行成本分担。

总体而言，当前 SAF 价格的形成缺乏市场化机制，未能实现供需的有效平衡。这使得供应链各方及需求方均面临盈利难或成本过高的压力。然而，推动 SAF 产业的发展不能依赖于行政定价和行政化的利益分配机制，而应让市场机制发挥主导作用。事实上，鉴于中国在 SAF 产业中具备的天然优势，政策的重心宜放在降低 SAF 与传统航油之间的溢价，为市场化创造条件。

(二) SAF 规模化生产情景下的成本预测

如前文所述，目前成本过高（“溢价过高”）的问题限制了 SAF 产业的发展。如果产业政策能够使得 SAF 实现与传统航空燃油的平价竞争，且政策能逐步退出，则该政策是值得研究探索的。虽然国际上已有一些报告对不同技术路径下 SAF 的成本走势进行了预测和分析，但由于中国 SAF 产业尚处于起步阶段，针对中国市场的 SAF 成本及价格走势的研究相对较少。在此背景下，本文基于国内现有 SAF 生产商的财务数据和市场专家的判断，对国内不同技术路径下 SAF 的生产成本进行分析，从而判断其中长期的价格变化趋势。

专栏 3：SAF 的平准化生产成本的计算方式

平准化生产成本（Levelized Cost of Fuel, LCOF）表示在其整个生命周期内，生产单位 SAF 所需的平均成本：

$$LCOF_t = CapEx_t \times \theta + Opex_t + Feedstock_t - Subsidy_t \quad \text{公式 (1)}$$

其中，t 表示年份，CapEx 表示总资本支出， θ 表示资本回收率，Opex 表示运营支出，Feedstock 表示原料成本（如油脂、生物质、CO₂、电力、氢气），Subsidy 表示政策补贴。资本回收率为：

$$\theta = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

36. <https://baike.baidu.com/item/%E9%A3%9E%E6%9C%BA%E8%BF%90%E8%90%A5%E6%88%90%E6%9C%AC/902908>

假设贴现率 $r = 8\%$ ，反映中国的投资风险和资金成本。假设各技术路径的固定资产投资都以 15 年摊销，则 $\theta = \frac{0.08(1 + 0.08)^{15}}{(1 + 0.08)^{15} - 1} = 0.1168$ 。

1.SAF 各技术路径的成本估算

HEFA 路径的典型代表是某通用航空燃料（SAF）项目。该项目一期投资 10.5 亿元，将建成年产 20 万吨生物燃料生产线³⁷。本文参考该项目的财务数据，估算中国的 HEFA 技术路径制 SAF 的平准化生产成本（LCOF，计算方法见专栏 2），结果显示在表 3。

表3 HEFA技术路径成本

项目	数值	数据来源
资本性支出（CapEx）	5250元/吨	某通用航空燃料（SAF）项目
运营支出（Opex）	1000元/吨	专家建议
原料成本（油脂）	6175元/吨	隆众资讯数据 ³⁸
氢气成本	80kg/t-SAF×34元/公斤	BloombergNEF；上海环境能源交易所 ³⁹
转化效率	70%	四川天舟国际贸易有限公司 ⁴⁰
平准化生产成本（LCOF）	13154.78元/吨	公式（1）

注释：以华北市场为例，地沟油市场价格在5700元/吨，潲水油市场价格在6650元/吨，均值为6175元/吨。HEFA工艺转化为航空燃料级烃类的质量转化效率一般在70%左右。80kg/t-SAF表示生产每吨可持续航空燃料需要消耗80千克氢气。氢价格为长三角、唐山、珠三角、河南价格的均值34元/公斤。

在 AtJ 项目方面，山东恒信集团规模化生产非粮乙醇，为未来 AtJ 燃料产业化提供了核心原料基础。本文参考恒信集团的财务数据，估算中国的 AtJ 技术路径制 SAF 的单位成本，显示在表 4。

37. 来源：<https://www.neijiang.gov.cn/njs/xmjsqk/202502/5861964d8946420b91441a609009486c.shtml>。
38. 来源：<https://www.oilchem.net/>。
39. 2025年4月28日，长三角氢价格为33.69元/公斤，唐山氢价格为34.83元/公斤，珠三角氢价格为38.13元/公斤，河南氢价格29.33元/公斤，<https://www.cneee.com/c/2025-04-28/496176.shtml>。
40. 来源：成都商报，https://e.cdsb.com/html/2024-11/14/content_785183.htm。

表4 AtJ技术路径成本

项目	数值	数据来源
资本性支出 (CapEx)	6180元/吨	山东恒信集团
运营支出 (Opex)	1300元	专家建议
原料成本 (乙醇)	5482.81元/吨	2025年中国乙醇全国主流市场均价 (隆众资讯) ⁴¹
转化效率	48%	根据Vela-García et al. (2021), AtJ 工艺的生物喷气燃料产量可达48% ⁴²
平准化生产成本 (LCOF)	13444.53元/吨	公式 (1)

中国尚未有公开的 MtJ 项目的信息。本文根据中国某典型绿醇制 SAF 项目的财务数据, 对中国的 MtJ 成本做出估算, 数据显示在表 5。

表5 MtJ技术路径成本

项目	数值	数据来源
资本性支出 (CapEx)	4800元/吨	中国某10万吨/年绿醇制SAF项目
运营支出 (Opex)	1500元/吨	
绿醇成本	5500元/吨	
氢气成本	225元/吨SAF ⁴³	
绿醇转化效率	34% ⁴⁴	Eyberg et al. (2024) ⁴⁵
平准化生产成本 (LCOF)	17775.07元/吨	公式 (1)

PtL 技术路径方面, 本文基于国家能源集团哈密能源集成创新基地项目信息⁴⁶, 综合专家建议, 估算中国 PtL 技术路线的成本, 显示在表 6。

41. 隆众资讯, <https://www.oilchem.net/seo-142-7.html>。

42. Vela-García, N., Bolonio, D., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Streitwieser, D. A., & Canoira, L. (2021). Biojet fuel production from oleaginous crop residues: thermoeconomic, life cycle and flight performance analysis. *Energy Conversion and Management*, 244, 114534.

43. 单耗225NM³ (标准立方米) /吨SAF, 单价1元/NM³, 单位氢气成本=单耗×单价=225 NM³×1元/NM³=225元/吨SAF。

44. 单耗=2.9吨绿醇/吨SAF, 因此转化效率= (1/2.9) ×100%≈34.48%。

45. Eyberg, V., Dieterich, V., Bastek, S., Dossow, M., Spliethoff, H., & Fendt, S. (2024). Techno-economic assessment and comparison of Fischer-Tropsch and Methanol-to-Jet processes to produce sustainable aviation fuel via Power-to-Liquid. *Energy Conversion and Management*, 315, 118728.

46. 来源: <http://www.cciac.org.cn/html/article/2024-10/27476.html>。

表6 PtL技术路径成本

项目	数值	数据来源
资本性支出（CapEx）	11334元/吨	国家能源集团哈密能源集成创新基地项目
运营支出（Opex）	1200元/吨	专家建议
CO ₂ 成本 ⁴⁷	763.25=4.3t-CO ₂ /t-SAF×177.5元/吨	BloombergNEF；碳捕集技术发展前沿与趋势预测
氢气成本 ⁴⁸	400kgH ₂ /t-SAF×34元/公斤	OFweek氢能网；上海环境能源交易所 ⁴⁹
平准化生产成本（LCOF）	16887.40元/吨	公式（1）

中国首个 FT 项目在 2025 年 7 月宣布启动⁵⁰。由于项目尚未有公开的财务信息，本文主要借鉴了 World Economic Forum（2020）研究报告对国际上相关项目的成本分析，显示在表 7。

表7 FT技术路径成本

项目	数值	数据来源
资本性支出（CapEx）	95859.91元/吨	World Economic Forum（2020）
运营支出（Opex）	2197.92元/吨=\$304/吨×7.23	
生物质原料成本	250.26元/吨=\$34.61/吨×7.23	
平准化生产成本（LCOF）	13647.45元/吨	公式（1）

注释：根据World Economic Forum（2020）的研究报告，2025年FT的资本支出摊销为\$1549/吨，按照15年期计算出总资本支出为（CapEx）（\$1549/吨×7.23）/0.11683=95859.91元/吨，运营成本（Opex）为\$304/吨，生物质需求按照2030—2050年的平均增长率反推得到，约为\$34.61/吨⁵¹。1美元≈7.23人民币。

47. 1吨SAF需消耗4.3吨CO₂（BloombergNEF）。我国煤化工和石油化工领域的一体化驱油示范项目捕集成本相对较低，为105~250元/吨CO₂，均值为177.5元/吨。

48. 1吨SAF需消耗100–400公斤氢气（<https://m.ofweek.com/hydrogen/2024-07/ART-180826-8110-30639298.html#:~:text=03%20>）。

49. 2025年4月28日，长三角氢价格为33.69元/公斤，唐山氢价格为34.83元/公斤，珠三角氢价格为38.13元/公斤，河南氢价格29.33元/公斤，<https://www.cneee.com/c/2025-04-28/496176.shtml>。

50. 来源：<https://gict-developer.com/news.aspx>。

51. World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020. <https://www.weforum.org/publications/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation/>。

2. 基于成本要素构成的 SAF 长期成本预测

基于上述各技术路径的成本分解，本文针对成本构成的各因素的价格走势的预测，判断 SAF 各技术路径的长期成本（价格）趋势。本文参考 World Economic Forum(2022) 对国际上各成本要素平均价格的长期走势的预测，对中国的 SAF 成本走势进行分析。

图 1 展示了 2025 年至 2050 年间中国主要 SAF 路径的单位生产成本演化趋势（具体分析见附件）。总体来看，所有路径的成本均呈下降趋势，但其降幅与最终成本水平存在显著差异。其中，HEFA 工艺目前已经比较成熟，由于受原料供应有限的影响，未来成本的下降幅度有限，在 2035 年后基本趋于稳定。PtL 路径的成本随着绿氢的成本大幅下降而下降，有望在长期内成为最具成本竞争力的技术路线。AtJ，MtJ 的成本也有不同程度的下降。整体趋势表明 SAF 的成本有望随技术进步和规模扩大而持续下降。

SAF 的商业应用前景取决于其是否能与传统航空煤油达到平价。近期中国的航空煤油价格约为 5500 元 / 吨⁵²，本文假设航空煤油价格每年上涨 5%。在实现碳中和目标的政策前提下，航空公司需要为其碳排放支付相应的费用。通常 1 吨传统航煤燃烧后将排放 3.2 吨二氧化碳⁵³，而 SAF 在全生命周期中平均可减少 80% 的二氧化碳排放⁵⁴。根据中国实现碳中和目标前提的碳价路径⁵⁵，图 1 展示了传统航煤合并碳排放费用后的成本，与 SAF 的成本进行对比。其中，PtL 路径成本下降最为迅速，预计在 2045 年左右实现与常规航油的平价。

52. 来源：<https://www.safetyga.com/cnaf/cnafindex.html>。

53. 来源：https://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2019-05/20/content_1926237.htm。

54. 来源：<https://www.chinanews.com.cn/cj/2025/05-19/10418477.shtml>。

55. 根据张希良等（2022）的预测，2030年、2035年、2040年、2045年和2050年碳价分别18美元、33美元、54美元、75美元和120美元（假设人民币兑美元汇率维持在7.0）。

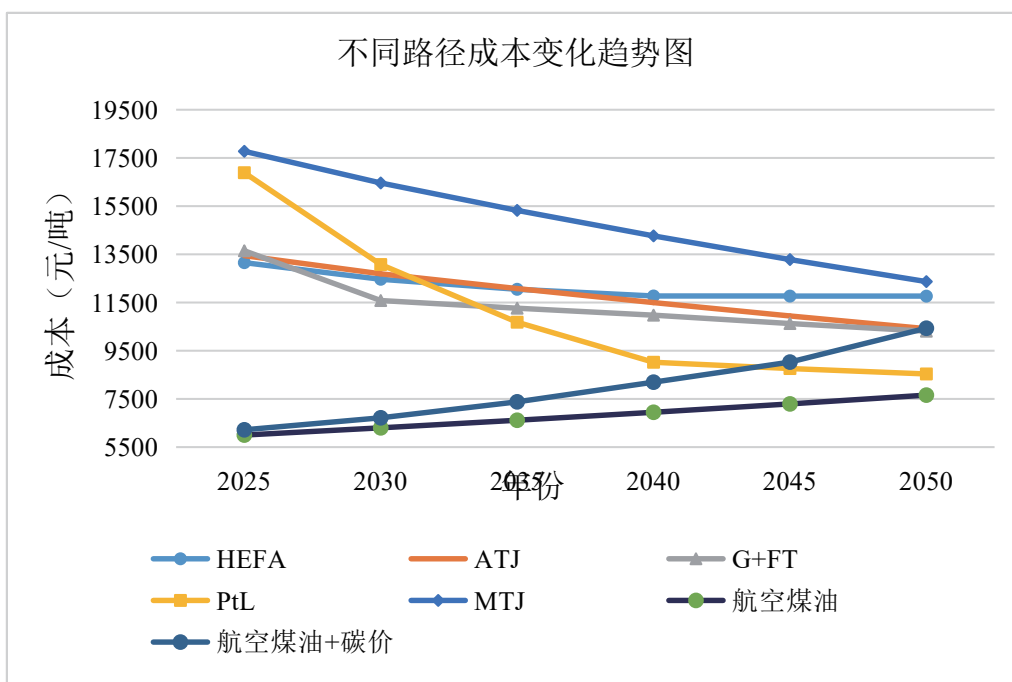


图1 2025—2050年中国主要SAF路径以及航空煤油的单位成本预测趋势图

3. 借鉴光伏产业经验预测 SAF 长期成本

当前中国 SAF 生产的成本高企，核心原因在于产量小、生产不连续。规模效应在制造业中具有重要意义，是降低平均成本的关键因素。规模效应的一个重要来源是通过生产实践积累的经验效应（即“干中学”效应）。因此，学习曲线（Learning Curve）公式常用于可再生能源、制造、航空燃料等领域的成本预测（Steffen et al., 2020）⁵⁶。公式为：

$$\text{Cost}_t = \text{Cost}_{2025} \times \left(\frac{Q_t}{Q_{2025}} \right)^{\log_2(1 - LR)}$$

其中， Cost_t 为 t 年时的单位成本（元 / 吨）； Cost_{2025} 表示 2025 年时的单位成本（基准年）； Q_t 为 t 年时的累计产量；LR 表示不同技术路径对应学习率（learning rate）。

本部分参考中国光伏技术的发展经验，为不同技术路径设定相应的学习率。光伏技术学习率较高的核心驱动因素在于：中国规模化生产带来的设备成本下降、硅料提纯技术突破以及全球市场竞争推动的效率提升。根据隋礼辉（2012）

56. Steffen, B., Beuse, M., Taurat, P., & Schmidt, T. S. (2020). Experience curves for operations and maintenance costs of renewable energy technologies. *Joule*, 4(2), 359-375.

的研究，2005-2010 年中国光伏发电成本学习率变化范围为 15%-25%⁵⁷。同时，Creutzig et al. (2017) 也指出，光伏技术在成本下降与装机容量增长之间形成的动态关系体现为：光伏模块成本随累计装机容量每翻倍一次，价格便下降 22.5%。这一学习率远高于其他能源技术的中位数水平（约 15%）⁵⁸。据此，我们假设未来最有可能复制中国光伏模块成本下降路径的 SAF 生产技术，其学习率将维持在 22.5% 左右。

五种技术路径中，基于 PtL 的路径最有望复制中国光伏式的成本下降曲线，这是由于该路径不依赖于有限的生物质原料供应，主要依赖于制造业的进步和规模效应。基于此，本文假设 PtL 路径学习率与光伏相仿，为 22.5%。

AtJ 和 MtJ 路径都依赖于一个标准化的中间原料——乙醇或甲醇。假设 AtJ 和 MtJ 路径学习率分别取其他能源技术学习率的中位数 15% 水平。其他两条路径 HEFA 和 FT 与光伏模式的相似性最低。HEFA 生产成本瓶颈不在于技术设备，而在于原料的获取，潜力有限。FT 的核心是大型、复杂、高度集成的气化炉和费托反应器，是一个典型的“重化工”项目。因此假设 HEFA 和 FT 路径学习率相对较低，分别为 7% 和 10%。

图 2 显示了不同规模和学习率下的成本趋势结果。与前文类似，在此将几种技术路径的长期成本趋势与传统航油（加 2030 年的预期碳价⁵⁹）的价格相比较。当 SAF 累计产量约为 160 万吨时，PtL 和 AtJ 的成本可能与传统航油接近平价。2024 年国内航空煤油消费量 4000 万吨，若掺混比例为 1%，年消费量则达到 40 万吨，这意味着四年累计消费量就将达到 160 万吨，届时 SAF 的累计生产规模可能达到与传统航油平价的临界点。

57. 隋礼辉.基于学习曲线的中国光伏发电成本发展趋势分析[J].水电能源科学,2012,30(06):209-211+215.

58. Creutzig, F., Agoston, P., Goldschmidt, J. C., Luderer, G., Nemet, G., & Pietzcker, R. C. (2017). The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. *Nature Energy*, 2(9), 17140.

59. 根据张希良等（2022）预测，中国在2030年的碳价在18美元（假设人民币兑美元汇率维持在7）。

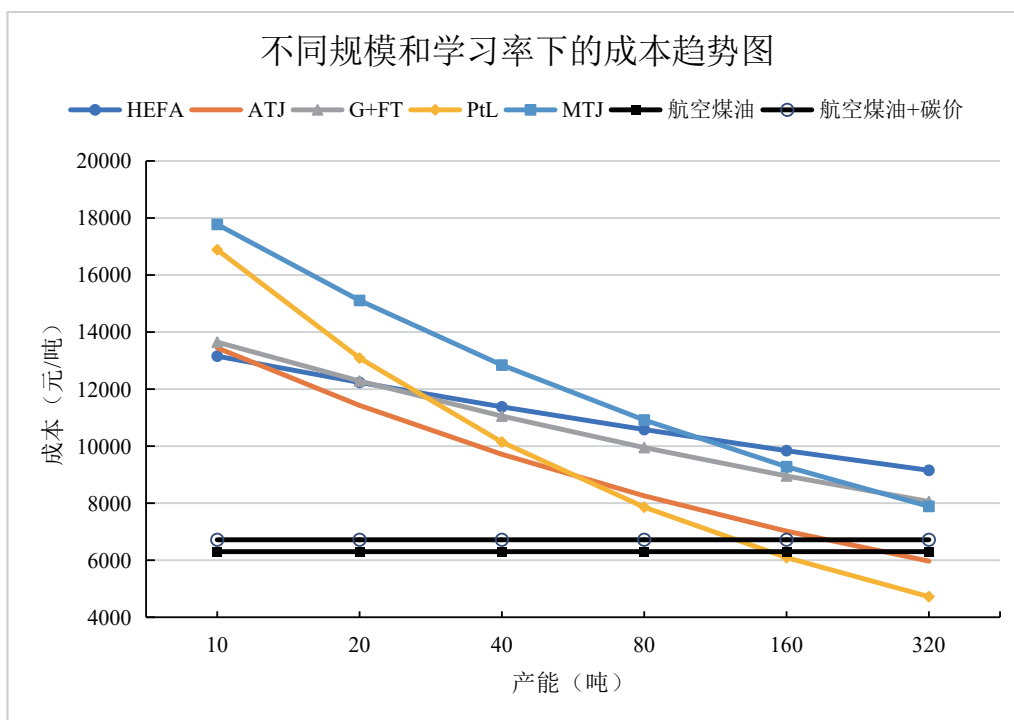


图2 不同规模和学习率下中国主要SAF路径的单位成本预测图

注：张希良等（2022）预测的2030年的中国碳价。

(三) SAF规模化生产面临的主要挑战

首先，政策驱动不足是当前 SAF 产业发展的核心瓶颈。目前，国内尚未明确规定 SAF 强制掺混比例，这一关键政策的缺失直接导致了 SAF 需求不足。在供给端，一些企业由于政策的不确定性而延缓了投资决策，部分已经投产的企业也仅维持在试生产状态。SAF 的前期固定投资很高，需求不足会导致 SAF 生产的单位成本高企，还会由于无法实现规模化生产而拖累技术进步，制约 SAF 产业化进程。例如，2024 年国内试点应用的 SAF 价格高于欧盟和美国的同类 SAF 市场价格，主要原因是企业生产不连续，固定成本的摊销很大，导致单位生产成本过高。又例如，对于长期的技术路径如 PtL 技术路线，需要大规模的绿氢作为原料，而绿氢制备成本很高；绿氢成本高的一个重要原因是目前缺乏实际市场需求，大部分绿氢以自产自销为主，缺乏市场交易和有效的价格。

由于中国的航空公司仍然处于疫情后恢复阶段，总体经营效益不佳，本身没有动力采用价格比普通燃油高 4-5 倍的 SAF，而中国民航局以支持航空业发展为责任，对于提升航司成本的政策也持谨慎态度，因此通过强制政策提升 SAF 市场需求的动力不足。

其次，SAF 全产业链协同存在欠缺。一是 HEFA 工艺所依赖的 UCO 原料供应面临瓶颈。一方面，大量 UCO 用于出口。中国是 UCO 出口第一大国，占全球 UCO 贸易总量的 40%。另一方面，作为全球最大的食用油消费国，中国每年理论 UCO 产生量超过 1100 万吨（占全球总量 30%）⁶⁰，但实际收集量仅约 400 万吨，收集率不足 40%，远低于全球平均水平（57%）和欧洲发达国家的回收水平（85%）。这意味着中国在 UCO 供给方面存在巨大的提升空间。二是 SAF 储运基础设施建设成本高昂，独立储运系统的要求使得单个机场改造加注设备需投入数百万元，这在一定程度上限制了 SAF 的推广应用。

最后，标准认证体系滞后制约了中国的 SAF 出口。SAF 的认证体系主要包括适航认证和可持续认证，两者分别聚焦于燃料性能安全与全生命周期减排责任。中国民航局已基于国际主流标准体系建立了 SAF 适航标准认证体系，但中国尚未建立自主的可持续性标准认证体系。尽管中国已经启动了可持续标准体系框架设计，例如中国民航局于 2023 年发布了《航空替代燃料可持续性要求》（征求意见稿），但该标准仍处于修订阶段，尚未正式出台，也未形成强制力，国内使用的 SAF 暂未要求可持续性认证。近期虽有进展但整体仍显滞后：2025 年 7 月，民航二所 SAF 中心通过自主航空燃料认证体系文件评审，建议启动覆盖 SAF 全链条的可持续航空燃料认证体系试点；8 月，其牵头制定的航空燃料碳足迹核算两项行业标准发布（9 月 1 日生效），为行业提供了规范化依据。但上述成果中，核心的可持续认证标准体系仍未正式发布。当前，企业出口 SAF 需通过国际认证计划（如国际可持续发展与碳认证（ISCC）、可持续生物材料圆桌认证（RSB））来证明 SAF 的减排潜力，但认证流程较为复杂，且存在一定成本。目前，国内仅能通过与这些国际机构合作开展认证。因此，中国亟需建立以国内标准为基础、以国际互认为助力的可持续性标准体系，推动中国 SAF 产业融入全球脱碳链条，提升其在国际市场的竞争力。

总体而言，中国 SAF 产业面临政策驱动不足、全产业链协同欠缺和标准认证滞后等多重挑战。短期内需通过政策驱动激活市场，中长期则需攻克关键技术并建立原料供应体系，同时加速标准国际互认以应对相关贸易壁垒。唯有实现多维度协同推进，方能推动 SAF 产业从试点示范向商业化规模应用的跨越式发展。

60. https://xueqiu.com/4751461282/314526904?md5__1038=n4%2BxnD9iYQxg7DBDBqDqpDU27jFmi%2BqQ4x

五

政策建议

当前，SAF 产业正处于发展的关键时期，面临全球航空业减排大势和日益增长的 SAF 需求。在全球航空领域，各国正竞相争夺技术与市场话语权，SAF 作为低碳航空燃料，成为实现碳中和目标的核心路径之一。尽管中国 SAF 产业在试点阶段生产成本较高，但凭借丰富的原材料储备、强大的新能源供给能力和成熟的制造业基础，成本下降潜力巨大。然而，当前核心问题在于市场需求不足，限制了生产商的连续生产，导致单位成本过高、技术进步较慢，使得供应链各方及需求方均感到难以盈利或成本过高。

稳定的市场需求是推动 SAF 产业规模化的关键。借鉴中国在“新三样”（电动汽车、锂电池、光伏产品）领域的政策经验和教训，政府应优先从需求端入手确保市场需求。事实上，相较于供给侧补贴，需求端支持能够有效避免因过度补贴引发的国际贸易纠纷和潜在的产能过剩问题。更重要的是，通过合理的“溢价分配机制”设计和市场化的定价机制，能够推动 SAF 产业的可持续发展。

借鉴国际上支持 SAF 产业发展的政策工具，结合中国发展 SAF 产业面临的挑战，现就中国 SAF 产业发展提出如下具体政策建议：

第一，加强战略规划和顶层设计，明确掺混目标。建议将促进 SAF 产业发展纳入国家“十五五”规划，明确其作为战略性新兴产业的重要地位，并给予重点扶持。具体措施包括制定和发布《中国可持续航油产业发展规划（2026—2035）》，设定清晰的阶段性掺混比例目标，以稳定市场需求预期，降低 SAF 生产商面临的市场不确定性。基于目前中国航空煤油的年消费量⁶¹，若在 2026 年初期将 SAF 的掺混比例定为 2%，则 SAF 的年需求量将约为 80 万吨；基于 2030 年中国航空煤油消费量的预测⁶²，若届时将掺混比例提高至 5%，SAF 的年需求量有望达到 265 万吨。这将为 SAF 生产商的规模化生产打下坚实的基础。

第二，通过市场化的机制分担 SAF “溢价”。由旅客承担 SAF 的“溢价”，分摊到单张机票上负担并不大。例如，假设执行 2% 的掺混要求，且假设 SAF 价格高于传统航油 10000 元 / 吨，满足掺混要求将使得航空公司新增成本 80 亿

61. 4000万吨/年。

62. 预期为5300万吨/年。

元⁶³。根据 2024 年中国民航全行业旅客运输量 7.3 亿人次⁶⁴ 计算，即便将 80 亿元新增成本全部分摊至旅客，则每人承担约 11 元人民币。具体可以通过设计精细化的市场化机制分摊该成本。例如，可以飞往欧盟、英国的国际航线为试点，设计乘客自愿选择的 SAF 附加费机制，根据航程分级设置弹性档位。为激发乘客选择支付 SAF 附加费的积极性，可配套推出绿色积分体系：对于支付 SAF 附加费的乘客，将按支付金额获得绿色积分，支付越多，积分越多。该积分以鼓励绿色出行为核心，可用于加速会员等级升级、兑换航行里程或换取机场贵宾厅服务等权益，以此形成“绿色出行—获取积分—享受权益”的良性循环。

第三，将 SAF 纳入政府绿色采购强制目录。建议明确规定，全国各级党政机关、事业单位、团体组织等工作人员，通过公务出行采购管理系统（例如政府采购机票管理网站）⁶⁵ 预订公务出行航班时，均需支付 SAF 专项附加费。该附加费根据公务出行的航距、舱位等标准统一核算，与机票票价、常规附加费一同计入总费用。同时，对该系统进行升级，以实现附加费的自动核算，并在行程单中单独列明为“SAF 绿色采购附加费”，作为专项成本纳入公务差旅费预算及报销体系。通过公共部门的示范消费，为 SAF 市场提供稳定需求，切实发挥政策引领作用。

第四，构建 SAF 长期采购协议与市场化定价机制。鼓励采购方与生产商直接签订长期承购协议，稳定长期的执行价格。价格可通过招标方式确定。考虑到生产商的成本可能有较大波动（例如 UCO 成本大幅上涨），可以借鉴英国的收入确定机制，探索从全国碳市场配额拍卖收入中划拨专项资金，用于支付 SAF 差价补贴，确保生产商有合理的利润。通过构建长期稳定的采购与市场化的定价机制，解决当前 SAF 产业链上各方成本分担不均的问题。

第五，优化供应链成本与效率。建议加速推广应用质量平衡（mass balance）方法⁶⁶，降低 SAF 供应和设施改造的成本。考虑到税收地域差异可能对 SAF 供应链效率产生的潜在影响，需将税收协同纳入整体优化框架。通过建立适配质量平衡模式的税收规则，如明确环境属性账面分配的税基认定标准、消除跨区域征管差异，保障其通过可追溯的环境属性分割认证机制实现混合加注的成本优势，使 SAF 能够通过少量满足其存储要求的基础设施进行混合和加注，从而提升整体供应链的效率。此外，建议分阶段对机场进行改造，优先在

63. 预期 SAF 年需求量 80 万吨。

64. 包括国内航线、港澳台地区及国际航线。

65. <https://app.gpticket.org/login.action?jsessionid=933716DDE3195A25DFD7D117F849EA1F>

66. 质量平衡（Mass Balance）是一种基于质量守恒定律的追踪和分配方法，通过建立可追溯的簿记系统，确保 SAF 在混合生产或运输过程中的总量与环境属性（如碳减排量）精确匹配。例如，在 SAF 生产中，尽管 SAF 与传统航油混合在一起，但通过质量平衡认证，可确保输出的 SAF 产品中可持续成分的比例与投入量一致。

靠近 SAF 产地的机场和枢纽机场建设专用的 SAF 存储设施和加注系统，保障 SAF 的快速部署与广泛应用，加速其在航空燃料供应链中的普及。

第六，建立与国际接轨的 SAF 标准认证体系。建议加快完善国内 SAF 标准认证体系，并积极推动其与国际标准接轨。中国得以通过扩大 SAF 出口满足国际市场需求，利用规模化生产进一步降低单位成本，从而提升产业竞争力。具体措施包括：一是制定全面且严格的国内 SAF 质量与环境标准，涵盖生产、运输、储存和使用等全流程，确保产品符合国际航空业的减排要求；二是加强与国际标准制定机构的合作，积极参与国际标准的制定与修订，争取更多话语权，为国内 SAF 企业进入国际市场创造有利条件；三是推动更多国内认证机构与国际 SAF 认证相关机构（如 ISCC、RSB 等）开展合作。

参考文献

- [1] Amazon. (2022). Amazon Sustainability Report. Retrieved from <http://sustainability.aboutamazon.com/2022-report>.
- [2] Argus Media Group. (2024). Spotlight on the European SAF market: countdown to 2025. Retrieved from <https://www.argusmedia.com/saf>
- [3] Civil Aviation Authority of Singapore. (2024). Singapore Sustainable Air Hub Blueprint. Singapore: Civil Aviation Authority of Singapore.
- [4] Climate Catalyst. (2025). Sustainable Aviation Fuel Policy in the United States.
- [5] European Commission. (2025). The ReFuelEU Aviation SAF flexibility mechanism.. Brussels: European Commission.
- [6] International Air Transport Association (IATA). (2023). SAF Policy.
- [7] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2014). Guidance on Environmental Assessment of Proposed Air Traffic Management Operational Changes. Montréal: ICAO.
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2023). International Standards and Recommended Practices, Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Volume IV: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) [EB/OL]. Retrieved from <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/SARPs-Annex-16-Volume-IV.aspx>.
- [9] International Energy Agency. (IEA). (2025). CO2 Emissions – Global Energy Review 2025 – Analysis [Report]. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>.
- [10] KPMG. (2022). Sustainable Aviation Fuel Ready for lift off? KPMG International.

- [11] Singapore Airlines. (2025). Sustainability Report FY2024/25. Singapore Airlines Limited.
- [12] World Economic Forum.(2020).Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation. <https://www.weforum.org/publications/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation/>.
- [13] World Economic Forum. (2022). Clean Skies for Tomorrow: Delivering on the Global Power-to-Liquid Ambition. In collaboration with McKinsey & Company.
- [14] 德国莱茵TUV.《2024氢能及燃料电池全产业链白皮书》[R]. 2024.
- [15] 张希良，黄晓丹，张达，耿涌，田立新，范英，陈文颖. “碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究” [J].《管理世界》.2022（1）： 35-51.
- [16] 智妍咨询.《2026-2032年中国可持续航空燃料（SAF）行业市场行情监测及前景战略研判报告》[R].
- [17] 中国环境科学学会碳捕集利用与封存专委会.《中国碳捕集利用与封存进展系列报告 2025——新进展、新阶段、新趋势》[R]. 2025.
- [18] 中国民用航空局.《2024年民航行业发展统计公报》[R]. 2025.

致谢

本课题的顺利推进与预期成果的达成，得益于各领域相关单位的大力支持。在课题研究的关键阶段，以下各单位鼎力相助，为突破重点难点问题提供了坚实保障，我们对此表示衷心的感谢。

（按拼音排序）

道达尔能源

国家发展和改革委员会能源研究所

国泰航空有限公司

霍尼韦尔（中国）有限公司

顺丰集团

中国航空油料集团有限公司

中国国际可持续交通创新和知识中心

中国民航科学技术研究院

中国南方航空

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所

谨向所有为本课题研究提供指导与帮助的单位致以最诚挚的谢意！

附件：基于成本分解的SAF价格趋势分析

1.HEFA

本节基于 World Economic Forum（2020）的假设⁶⁷，探讨中国 HEFA 在 2030—2050 年的成本。预测 HEFA 燃料的生产成本，需要综合考虑资本支出、运营成本、原料和氢气等关键因素的长期变化趋势。首先，随着技术日趋成熟和工厂建设规模扩大，资本支出（CapEx 摊销）预计会逐步下降，年均降幅约为 0.85%。运营成本（Opex）也有望以年均 0.58% 的幅度降低，这主要得益于自动化运维技术的推广，以及产能提升带来的单位人工和能源成本的摊薄。原料成本方面，主要油脂资源的价格预计将小幅攀升，年均涨幅约 0.1%。这反映了其供应相对稳定。

氢气作为 HEFA 生产中不可或缺的加氢原料，其未来成本走向尤为关键。根据德国莱茵 TUV 的中国《2024 氢能及燃料电池全产业链白皮书》，预计到 2050 年，中国可再生能源电解制氢（即绿氢）的比例将达到 70%。同时，制氢成本也随之下降，中国制氢成本趋势预测：2021~2025 年制氢成本为 20 元 / 公斤，2026~2030 年制氢成本为 15 元 / 公斤，2030~2035 年制氢成本为 12 元 / 公斤，到 2040 年后，绿氢的成本将降到 10 元 / 公斤以下。根据 2025 年对应市场氢气价格为 34 元 / 公斤。本报告预测 2026~2030 年氢气价格为 25.5 元 / 公斤，2030~2035 年氢气价格为 20.4 元 / 公斤，到 2040 年后，氢气价格为 17 元 / 公斤。

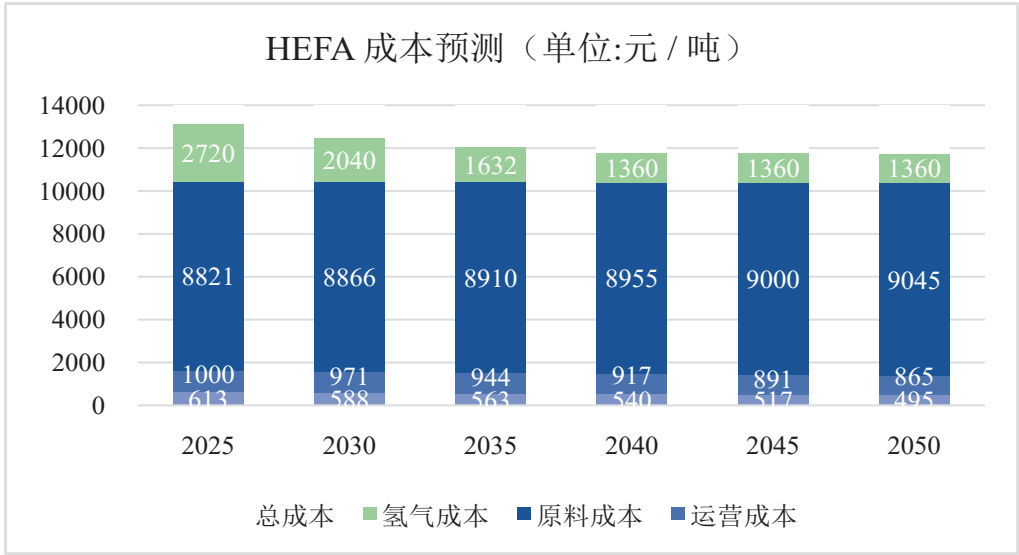


图1 2025—2050年中国HEFA的单位成本预测趋势图

67. World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2020. <https://www.weforum.org/publications/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation/>.

图 1 显示，HEFA 的单位总成本呈现先降后稳的趋势。其中，氢气成本的显著下降是推动总成本降低的关键因素，其从 2025 年的 2720 元 / 吨大幅降至 2035 年的 1632 元 / 吨，随后稳定在 1360 元 / 吨，至 2050 年累计降幅达 50.0%。同时，资本支出和运营成本也呈现持续下降趋势。然而，值得注意的是，原料成本在此期间呈现小幅上涨趋势，部分抵消了其他成本的降幅。综合来看，HEFA 的总成本在 2025 年至 2040 年间从 13155 元 / 吨降至 11771 元 / 吨，此后至 2050 年基本稳定在 11765 元 / 吨左右。相比 2025 年，2050 年总成本下降了 10.6%，表明尽管有成本下降的推动力，但总体降幅因原料成本上涨而受到限制。

2.AtJ

在预测 AtJ (Alcohol-to-Jet) 燃料的生产成本时，技术进步和规模效应将成为主要驱动因素。基于行业发展趋势，我们对关键成本项做出以下假设：资本支出方面，2025 至 2030 年间预计将迎来显著下降，年均降幅达 4.2%。这主要得益于项目建设初期的技术快速迭代和设备持续优化。2030 年后，随着技术趋于成熟，降幅将有所放缓，年均下降约 1%。运营成本在整个预测期内将保持稳定下降趋势，年均降幅 0.8%。这一改善主要来自生产工艺的持续优化和自动化水平的不断提升。原料成本方面，作为主要原料的乙醇采购价格预计将以年均 1% 的速度下降。这主要受益于乙醇产能的持续扩张、生产技术的进步，以及上游供应链效率的全面提升。值得注意的是，AtJ 工艺的转化效率将保持稳定，维持在 2025 年 0.48 的水平不变。

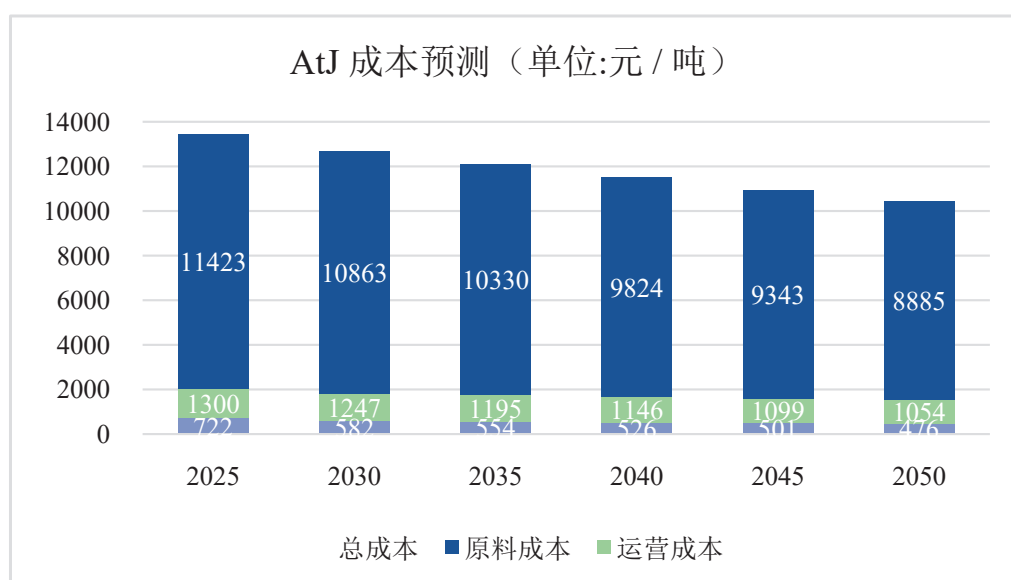


图2 2025—2050年中国AtJ的单位成本预测趋势图

图 2 显示，2025 年至 2050 年间中国 AtJ 的单位总成本呈现显著的下降趋势。在此期间，原料成本的降低是推动总成本下降的主要驱动力，其从 2025 年的 11423 元 / 吨大幅下降至 2050 年的 8885 元 / 吨，累计降幅达 22.2%。与此同时，资本支出也呈现显著下降，2050 年较 2025 年减少 34.1%，从 722 元 / 吨降至 476 元 / 吨，反映出技术进步和规模效应带来的固定资产投入效率提升。运营成本同样表现出逐年稳定下降的趋势，从 1300 元 / 吨降至 1054 元 / 吨，累计降幅约为 18.9%，体现了持续的运营效率优化。值得注意的是，AtJ 的转化效率在此期间保持稳定在 0.48 的水平。综合这些因素，AtJ 的单位总成本从 2025 年的 13445 元 / 吨显著降低至 2050 年的 10415 元 / 吨，总降幅达 22.5%，年均降幅约为 0.90%，表明 AtJ 生产成本在未来 25 年内将持续优化。

3.G+FT

对资本、运营及原料成本的变化趋势进行如下假设。资本支出在 2025 至 2030 年间预计以年复合率 4% 的速度下降，反映初期技术优化和基础设施建设效率提升；2030 年至 2050 年则放缓至 1% 的年复合降幅，体现成熟阶段的成本稳定性。运营成本假设以年均 0.3% 的速度缓慢下降，受益于运行管理优化与设备效率提升。生物质作为主要原料，其成本将持续上涨，分别在 2030 年、2035 年、2040 年、2045 年和 2050 年达到每吨 318 元、484 元、643 元、723 元和 803 元。

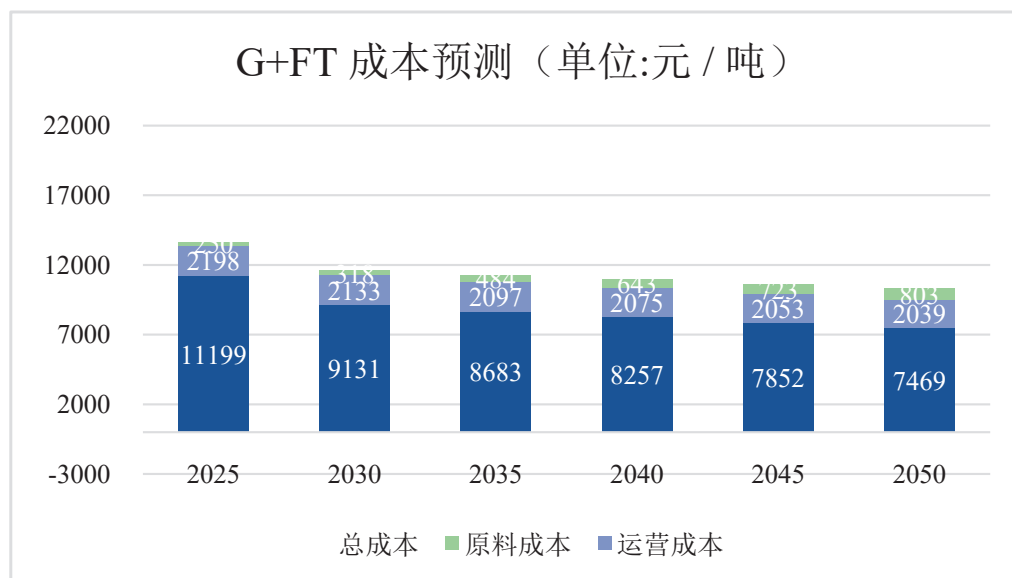


图 3 2025—2050 年中国 G+FT 的单位成本预测趋势图

图 3 显示，资本支出和运营成本降低是推动总成本下降的主要驱动因素。具体来看，2050 年资本支出较 2025 年下降约 33.31%，从 11199 元降至 7469

元，是总成本下降的重要贡献项。运营成本也实现了稳步下降，从 2025 年的 2198 元降至 2050 年的 2039 元，累计降幅达 7.24%。原料成本呈现上升趋势，从 2025 年的 250 元增至 2050 年的 803 元，增幅达 220.7%。受各项成本变化的综合影响，G+FT 的总成本从 2025 年的 13647 元降至 2050 年的 10310 元，累计下降 24.45%，年均降幅约为 0.98%。

4.PtL

本文对 PtL（Power-to-Liquid）燃料的生产成本预测基于以下关键假设：资本支出方面，随着技术不断成熟和规模化生产推进，预计投资效率将逐步提升，资本支出年均降幅为 2.97%。运营成本方面，通过持续优化能效和改进运维管理，预计运营成本将保持 3.44% 的年均下降速度。CO₂ 成本方面，受益于碳捕集技术进步和碳交易市场机制完善，预计 CO₂ 成本每年将降低 0.87%，从而进一步压缩整体生产成本。

氢气成本方面，根据德国莱茵 TUV 关于中国《2024 氢能及燃料电池全产业链白皮书》，预计到 2050 年，中国可再生能源电解制氢（即绿氢）的比例将达到 70%。同时，制氢成本也随之下降，中国制氢成本趋势预测：2021~2025 年制氢成本为 20 元 / 公斤，2026~2030 年制氢成本为 15 元 / 公斤，2030~2035 年制氢成本为 12 元 / 公斤，到 2040 年后，绿氢的成本将降到 10 元 / 公斤以下。根据 2025 年对应市场氢气价格为 34 元 / 公斤。本报告预测 2026~2030 年氢气价格为 25.5 元 / 公斤，2030~2035 年氢气价格为 20.4 元 / 公斤，到 2040 年后，氢气价格为 17 元 / 公斤。

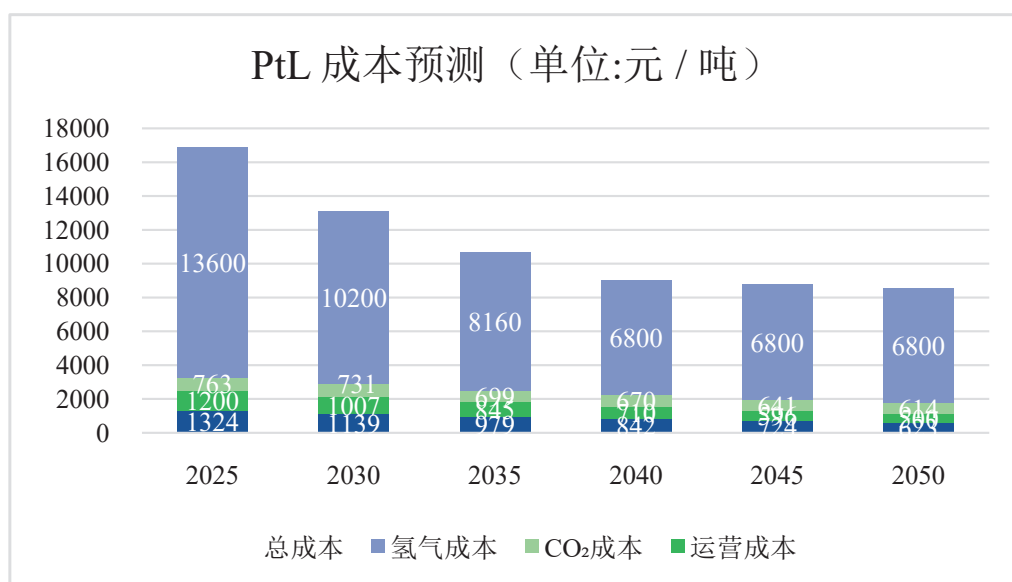


图4 2025—2050年中国PtL的单位成本预测趋势图

根据图 4 显示，2025 年至 2050 年间，氢气成本下降是推动 PtL 总成本降低的主导因素，其从 2025 年的 13600 元降至 2050 年的 6800 元，降幅高达 50%。此外，资本支出和运营成本也均有显著降低：资本支出在 25 年间从 1324 元降至 623 元，累计降幅约 53%；运营成本从 1200 元降至 500 元，累计降幅约 58.3%。CO₂ 成本小幅下降，从 2025 年的 763 元降至 2050 年的 614 元，降幅约 19.6%。综合各项成本变化，PtL 的总成本从 2025 年的 16887 元降至 2050 年的 8536 元，累计降幅高达 49.45%，年均降幅约 1.98%。这意味着随着技术进步和规模效应，PtL 的生产成本有望在未来 25 年内实现大幅优化。

5.MtJ

本文对 MtJ 燃料生产成本的预测基于以下关键假设：在资本支出方面，2025-2030 年间预计年均下降 4.22%，这主要来自技术改进和规模效应；2030 年后降幅将收窄至年均 1%，反映技术成熟后的稳定趋势。运营成本预计每年降低 0.83%，得益于持续的流程优化。甲醇原料成本按年均 1.5% 的速度递减，这与产能扩张和供应链成熟密切相关。甲醇转化效率则维持 2025 年 0.35 的水平不变。

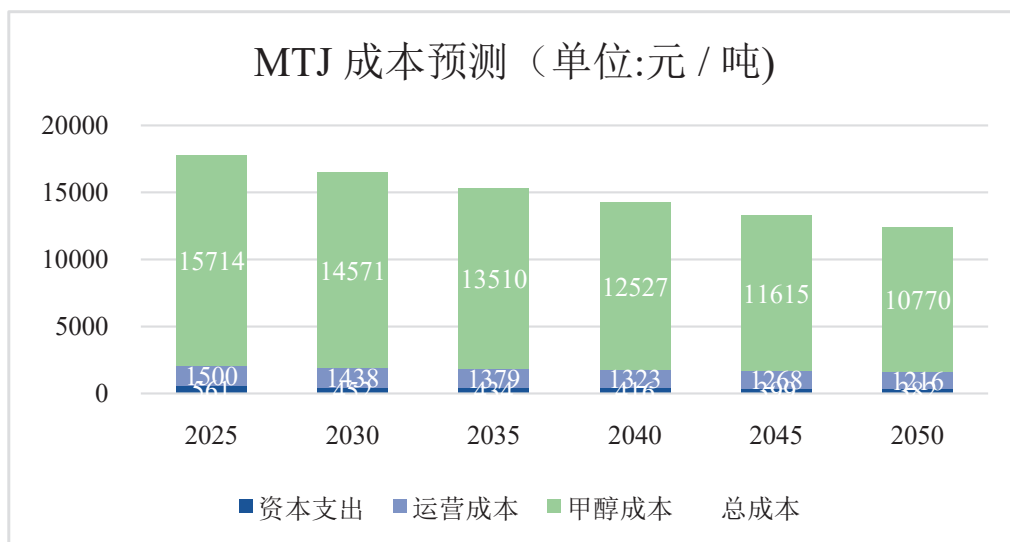


图5 2025—2050年中国MtJ的单位成本预测趋势图

根据图 5 显示，2025 年至 2050 年间，MtJ 的总成本呈现持续下降趋势。其中，甲醇成本的降低是推动总成本下降的主要驱动因素，其从 2025 年的 15714 元降至 2050 年的 10770 元，累计降幅达 31.5%。与此同时，资本支出也呈现显著下降，2050 年较 2025 年减少约 31.8%，从 561 元降至 382 元。运营成本同样表现出稳步下降的趋势，从 1500 元降至 1216 元，累计降幅约为 18.9%。综合各项成本的持续优化，MtJ 的总成本从 2025 年的 17775 元降至 2050 年的 12368 元，累计下降 30.4%，年均降幅约为 1.2%。

官方微信公众号



北大国发院