全球定价规律与中国实践融合的可持续航空燃料价格形成机制：多因素影响分析与政策启示

田利军[1,2*]，陈学功[2]，刘鑫[1]，杨静[3]

（1. 中国民航大学中国民航环境与可持续发展研究中心，天津 300300；2. 中国民航大学经济与管理学院，天津 300300；3. 中国航空油料集团有限公司财务部，北京 101300）

【摘　要】本研究基于市场均衡理论、成本加成模型与政策传导机制，构建覆盖全球规律与中国实践的双维度定价模型，揭示碳价联动、强制掺混等工具的跨区域异质性效应，系统探究了原料成本、政策工具、技术路径及区域差异对可持续航空燃料（SAF）价格的动态影响。实证结果表明：原料价格波动对SAF成本驱动显著（废弃油脂回归系数0.451，农林废弃物0.281）；强制掺混政策对价格的短期拉动效应强于财税补贴（边际提升0.106 vs降本0.228），且呈现边际递减特性；碳价与补贴的协同作用可显著提升SAF溢价（交互项系数-0.108）。研究揭示了“政策主导需求、原料决定成本、技术路径分化”的全球SAF市场特征，提出“短期双轨制—中期指数化—远期并轨”的中国SAF定价路径，并设计“原料锚定+人民币定价权+碳市场衔接”的本土化方案，为新兴经济体SAF市场发展提供范式参考。

【关键词】可持续航空燃料；价格机制；民航业；中国实践；政策协同

【中图分类号】X52；F74；F123.9　　【文章编号】1674-6252（2025）05-0115-15

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.05.115

引言

全球气候变化背景下，航空业碳排放占全球总量的2%～3%[1]，其脱碳进程已成为国际社会关注的焦点。可持续航空燃料（Sustainable Aviation Fuel，SAF）因其全生命周期减排70%～90%的潜力[2]，被视为航空业绿色转型的核心路径。然而，当前SAF价格高达传统航空煤油（Conventional Aviation Fuel，CAF）的2～3倍[3]，高昂成本严重制约其规模化应用。这一矛盾凸显了SAF价格形成机制的复杂性：既需反映其环境正外部性，又需平衡产业培育与市场效率的动态关系。

中国作为全球最大航空燃料消费国之一，其传统航空煤油定价机制历经近20年发展，形成了“成本加成＋政府指导”的混合模式[4]，通过与国际油价挂钩、动态调整进销差价等制度设计，实现了价格稳定性与市场化的平衡。这一机制为SAF定价提供了重要参考，但SAF在原料来源（如废弃油脂、农林废弃物）、生产工艺［酯类和脂肪酸类加氢工艺（HEFA），费托合成工艺（FT）、电转液工艺（PtL）］及环境溢价上的特殊性，亟须突破传统定价逻辑。与此同时，中国SAF市场面临“供需双弱”的初级阶段特征：上游产能分散，下游航司

资助项目：国家社科基金一般项目“碳中和目标下中国民航‘三链’协同脱碳研究”（22BJY020）；亚合资金项目“东盟—中国民航绿色产业链协同减排与可持续航空燃料（SAF）示范合作研究”；天津自然科学基金联合基金资助项目“基于经济性约束的可持续航空燃油（SAF）制备技术路线遴选研究”。

作者简介：田利军（1976—），男，博士，教授，研究生导师，研究方向为民航环境与可持续发展，E-mail：tljshenji@126.com。

成本敏感，政策工具尚未形成协同效应。如何借鉴全球 SAF 价格驱动规律，构建适配中国产业阶段的分阶段定价体系，成为破解市场瓶颈的关键。

中国在不同发展阶段对 SAF 定价机制的功能性需求，如初期稳价保供、中期市场发现、远期环境溢价内部化。本研究提出“全球—中国”双维度分析框架，旨在解决以下核心问题：①全球 SAF 价格驱动因素（如原料弹性、政策边际效应）如何与中国分阶段定价需求交互作用？②中国现有航空煤油定价机制的经验与不足，对 SAF 分阶段设计有何启示？③如何通过政策—市场—技术协同，实现 SAF 从“产业培育”到“市场化定价”的平稳过渡？

本文的创新性体现在三方面：理论层面，首次整合市场均衡理论、成本加成模型与政策传导机制，构建覆盖全球规律与中国实践的双维度定价模型，揭示碳价联动、强制掺混等工具的跨区域异质性效应；方法论层面，结合全球 115 个样本的实证数据，采用动态面板回归方法，量化政策组合的边际递减效应与远期协同潜力；政策层面，提出“短期双轨制—中期指数化—远期并轨”的中国 SAF 定价路径，并设计“原料锚定 + 人民币定价权 + 碳市场衔接”的本土化方案，为新兴经济体 SAF 市场发展提供范式参考。

本研究不仅填补了全球 SAF 定价理论中“政策—市场—技术”交互机制的空白，更通过中国实践验证了分阶段定价模式在平衡产业培育与市场效率中的有效性。研究成果可为政府设计差异化补贴工具、企业优化技术路线选择、国际组织推动碳市场协同提供科学依据，助力全球航空业 2050 净零目标的实现。

1 文献综述

SAF 价格影响机制的研究近年来成为航空能源经济与航空碳减排政策领域的焦点。现有文献围绕价格构成、市场供需、政策工具、定价模式等内容展开，为理解 SAF 定价动态提供了多维视角，但仍存在理论框架割裂与实践适配性不足的局限。

1.1 价格构成

SAF 的价格构成复杂，主要受生产成本驱动，工艺路线、原料类型也是主要影响因素。SAF 的高成本是制约其大规模商业化应用的核心问题 [5]，原料成本占比达 60%～70%[6]。截至 2022 年，机构、材料与试验协会（American Society of Testing Materials，ASTM）标准认定的 SAF 生产技术路线共有 9 条，其中 HEFA、费托合成工艺 FT 和 PtL 是目前航空业普遍认为未来具有较大发展前景的路线 [7]。Doliente 等 [6] 研究表明，不同生产技术路线的 SAF 成本差异较大，如 HEFA 燃料生产成本最低，但仍高于 CAF。原料成本是重要组成部分，CORSIA 批准了 42 种合格原料，理论上废弃油脂、农林废弃物、城市有机固体废物、工业尾气、能源作物、绿氢等均可用于 SAF 生产 [8]。原料来源的多元化发展会使不同原料之间的竞争加剧，可能降低原料成本。废弃油脂目前是最成熟的 SAF 原料，但其总量有一定限制；农林废弃物原料充足，发展潜力巨大，不过未来需综合考虑原料在多种用途（如还田、供热或发电、发展液态燃料等）之间的协调发展。Hitchcock 等 [9] 认为复杂的燃料规格、昂贵的认证程序是 SAF 面临的航空业特有的额外技术障碍。田利军等 [10] 发现产销区域错配增加了 SAF 运输成本。现有文献多聚焦单一技术路径，对原料多元化（如藻类、电燃料）的供应链协同效应研究不足，且缺乏对新兴市场原料价格波动传导机制的动态分析。

现有文献多聚焦于单一技术路径的成本分析，缺乏对原料多元化背景下供应链协同效应与价格波动传导机制的动态比较研究，尤其忽视了新兴市场原料回收体系不完善对成本结构的特异性影响。本文回应这一空白，将废弃油脂与农林废弃物区分，构建其价格波动的差异化传导模型（H1），并在此基础上实证检验二者对 SAF 价格的异质性影响，为理解不同原料路线的成本敏感性与风险来源提供证据。

1.2 市场供需

ICF[11] 的数据显示，2024 年全球 SAF 均价为 2085 欧元 /t，是 CAF 的 2.8 倍。2024 年全球航空业大约消耗 5019 万加仑 SAF，但仅占总消费量的 0.53%[11]。供应不足是 SAF 进入商业化运营的最大困难，截至目前，全球范围内有 81 个机场可以提供 SAF 掺混和加注等服务，主要集中在北美、欧洲和亚太地区。中国的 SAF 产业已形成规模化供

应能力，中石化镇海炼化、河南君恒、海新能科、嘉澳环保等龙头企业率先实现 HEFA 工艺国产化生产，年产能约 100 万 t。全球已有超过 50 家航空公司、超过 83 万架次的航班使用了 SAF，已达成约 500 万 t 的 SAF 采购协议[12]。需求方面，基于不同的 SAF 价格和掺混水平的组合，通过不同模型工具（如 FLEET、SAGE 和 FLOPS）和分析方法，学者们评估了商业航空对 SAF 的需求、环境影响及潜在的缓解策略的影响[13-15]。由于航空公司利润微薄，解决环境问题的财力有限[5]，事实上航空公司在转向 SAF 方面进展甚微[16]。Hamdan 等[17]指出航空公司需要高碳价格才能有兴趣使用 SAF 来减少排放。Cui 等[18]的研究发现，到 2050 年，只有碳价不低于现在价格的 12.84 倍，或者 SAF 价格比当前航煤价格低 1.412 倍，航空公司也许才会推广 SAF。SAF 的价格走势将高度依赖于未来供需格局的变化，任何供给端的扰动或需求的超预期增长都可能导致价格的进一步上涨。

既有研究揭示了 SAF 市场“供需双弱”的困境，但多停留在现象描述，对政策如何穿透航空公司成本敏感性以创造有效需求的机制缺乏量化检验，且需求预测模型未能有效整合价格弹性与政策干预的交互影响。本文基于此，引入市场需求（Demand）作为中介变量（H2），实证检验强制掺混政策如何通过创造刚性需求来拉动价格，从而揭开“政策—需求—价格”之间的作用机制，为破解“鸡生蛋、蛋生鸡”的市场初期困境提供机制性解释。

1.3 产业政策

全球 SAF 市场呈现“政策主导需求、原料决定成本、技术路径分化”的格局。政策干预是 SAF 产业发展的核心驱动力，现有工具包括强制掺混、财税补贴与碳价联动。SAF 产业具有显著的“政策驱动”属性[19]。政策工具主要通过以下几种方式发挥作用：其一，强制掺混比例政策直接创造市场需求，如欧盟“Fit for 55”政策要求 SAF 掺混比例从 2025 年的 2% 提升至 2050 年的 63%，但该政策减排成本较高，需与其他工具结合以平衡成本[20]；中国《“十四五”民航绿色发展专项规划》明确 2025 年 SAF 消费量达 5 万 t 的目标，《2030 年前碳达峰行动方案》提出发展先进生物液体燃料，并通过两阶段的 SAF 试点政策解决安全飞行、燃料保供、产业政策、减排认证、价格机制和信息系统等问题。其二，财税激励政策通过降低生产成本和投资风险刺激供给[21]，如美国通过《减少通胀法案》，给予使用特定 SAF 的航司 1.25～1.75 美元 / 加仑的退税优惠。美国相关法案提供税收抵免和研发补贴，短期内效果显著，但长期依赖财政补贴可能不可持续[23]；欧盟在 2022 年提出从航空碳排放交易体系（ETS）中支取 16 亿欧元，用于补贴航司的 SAF 应用。其三，研发支持与技术创新引导政策，可推动清洁技术创新[23,24]。美国联邦航空管理局（FAA）发布的《航空气候行动计划（*Aviation Climate Action Plan*）》，以推广 SAF、开发新的飞机和发动机技术、加强政策法规引导等为主要着眼点。不过，政策也存在局限性，如 Mayeres 等[24]指出单纯依赖 SAF 掺混比例的政策成本较高，部分学者还关注到高掺混比例带来的成本压力，以及政策设计需兼顾长期成本可控性[25]。然而，现有研究多聚焦欧美成熟市场，对新兴经济体政策适配性（如中国分阶段补贴设计）的量化分析不足，且缺乏长期政策成本的可控性评估。

当前政策研究呈现“两个失衡”：一是地域失衡，多集中于欧美成熟市场的政策效果评估，严重缺乏针对新兴经济体政策工具适配性与有效性的量化研究；二是工具失衡，对单一政策（如补贴或掺混）的静态分析多，对政策组合（如碳价与补贴协同）的动态效应及边际变化研究少。本文致力于填补这两项空白，不仅将中国实践纳入全球分析框架，更通过构建政策交互项（如碳价 × 补贴）与二次项（掺混比例平方），量化政策的协同效应与边际递减规律（H3，H4），为分阶段、精准化的政策设计提供科学依据。

1.4 定价模式

SAF 的定价模式研究包括成本定价模式、市场定价模式、政府干预定价模式、基于碳价的定价模式和长期合同定价模式[26]。①成本定价模式是 SAF 行业初期的主要定价方法，其核心是基于生产成本（包括原料、设备、运营等）加预期利润确定价格。该模式适用于技术成熟度低、市场竞争有限的阶段，

能保障企业基本利润，但可能忽视市场供需动态，且依赖持续的政策补贴以维持经济可行性 [5,6]。②市场定价模式强调供需关系对 SAF 价格的影响，该模式在成熟市场中更具灵活性，但需依赖规模化生产和稳定的原料供应。当前 SAF 市场仍处于供不应求阶段，短期价格可能受政策驱动而非纯市场调节。③政府干预定价强调政府通过强制掺混比例、税收抵免和补贴等手段直接干预价格 [27]。政府干预能快速扩大市场需求，但长期依赖财政补贴可能不可持续，需转向精准支持（如研发补贴）以降低政策成本。④基于碳价的定价模式将 SAF 价格与碳市场挂钩，通过碳减排价值体现溢价。Cui 等 [18] 针对非洲航空业的研究表明，碳价与 SAF 价格需形成联动机制，以平衡减排目标与经济可行性。该模式依赖成熟的碳交易市场，目前全球碳价水平差异较大，短期内难以全面推广 [27]，但在欧盟等碳市场发达地区已显现潜力。⑤长期合同定价模式通过锁定价格和供应量稳定 SAF 市场。香港国泰航空与 Fulcrum 公司签订 10 年 110 万 t 的 SAF 采购协议，降低了价格波动风险。Bauen 等 [19] 强调，长期合同可优化原料供应链管理，例如废弃油脂的稳定收集需政府与企业协同。该模式适合原料供应分散、生产周期长的 SAF 项目，但需法律框架和信用体系支持，且可能限制市场价格发现功能。总体来看，现有定价模式多基于静态假设，缺乏动态演化模型（如政策工具边际效应递减、技术突破对成本曲线的重塑）。

现有研究表明，现有定价模式研究多建立在静态假设之上，未能刻画政策效应递减、技术学习曲线以及区域市场分割等动态因素对定价机制的演化影响。同时，中国传统航煤定价机制为 SAF 提供了参考，但其“成本加成”逻辑如何与 SAF 的“环境溢价”属性相融合，尚未有研究给出答案。本文的创新在于，构建了一个融合政策动态传导、区域异质性与技术路径分化的分析框架，并基于此提出了一个从“双轨制”到“市场并轨”的动态演化定价路径，旨在回答如何在中国特色定价逻辑基础上，实现 SAF 环境价值的内部化。

1.5 中国航煤传统定价机制

中国的 SAF 以 HEFA 工艺为主，采用的原料多为废弃油脂（UCO）和棕榈酸化油（POME）[28]。餐厨废油收集网络的建设完备程度参差不齐，致使 UCO 价格难以实现统一标准。UCO 和 POME 由于受自身产量与应用范围的限制，都未能构建起一个被广泛认可的实时报价系统，这使得 SAF 难以像航空煤油那样找到一个价格锚定物。

中国航空煤油定价机制为 SAF 提供重要参考。中国航空煤油定价历经市场化改革，形成“成本加成 + 政府指导”的混合模式，其核心是通过挂钩新加坡普氏油价实现价格透明化，同时以进销差价调节区域供需平衡。传统航煤价格通常与国际原油价格挂钩，同时考虑炼厂加工成本、运输成本等因素。其定价过程中有成熟的期货市场参与，通过期货价格发现功能来引导现货价格。例如，纽约商业交易所（NYMEX）的航空煤油期货价格对全球航煤定价有重要影响。在定价过程中的进销差价主要取决于供油公司的保供成本且因机场而异。这一机制为 SAF 定价提供了重要参考，但 SAF 的特殊性（如环境溢价、原料波动）需突破传统逻辑。

尽管现有成果丰硕，仍存在以下局限：①理论割裂：全球视角研究忽视新兴市场特色，本土化分析缺乏理论升华；②动态机制缺位：政策工具效应多基于静态模型，未涵盖分阶段演化的边际递减与协同潜力；③技术—政策适配性不足：对 HEFA、PtL 等工艺的差异化需求缺乏量化支撑。

本文基于“全球—中国”双维度框架，整合市场均衡理论、成本加成模型与政策动态演化机制，构建“政策—市场—技术”协同的动态定价模型，嵌入碳价传导与规模经济效应，通过实证检验区域异质性、分阶段政策效果及技术路径的适配策略，评估碳市场互联互通对 SAF 贸易与减排目标的全局影响。

2 理论分析与研究假设

2.1 理论分析

2.1.1 市场均衡视角

根据 Mankiw[29] 的均衡理论，SAF 价格由供需动态决定。供给端受产能限制（如 Neste、World Energy 等企业主导）、技术瓶颈（如废弃油脂预处理效率低）及原料价格波动影响；需求端受航空公司成本敏感性、环保政策力度（如欧盟“Fit for 55”）及消费者绿色偏好驱动。供需失衡将导致价格偏离

均衡点，例如产能不足推高价格，而强制掺混政策可刺激需求侧刚性增长，形成价格支撑。中国 SAF 市场呈现“供需双弱”的初级阶段特征。供给端，上游产能分散，以中石化镇海炼化、河南君恒等 HEFA 工艺企业为主，但原料供应链不稳定（如废弃油脂 70% 出口导致国内原料短缺）；需求端，航空公司受燃油成本占比高的制约，对 SAF 溢价承受能力有限[30]。政府通过“双轨制”调控机制平衡供需矛盾：短期以产业联盟集中采购（如中国航油牵头）稳定供给，中期通过进销差价调节区域供需错配（如东部机场需求旺盛但西部原料富集），逐步推动“政策驱动”向“市场主导”过渡。这一路径既借鉴了欧盟需求拉动模式，又结合了中国特色行政调控工具，体现了全球规律与本土实践的动态适配。

2.1.2 成本加成视角

Simon 等[31] 的成本加成理论表明，SAF 价格需覆盖原料采购、生产工艺（如 HEFA 与 FT 工艺的路线差异）、运输储存等全链条成本，并附加合理利润。其中，原料成本占比最高（如废弃油脂价格波动传导效应显著），技术成熟度（如 PtL 工艺的能源效率）直接影响加成比例。此外，规模效应可通过降低单位固定成本推动价格下行[32]。中国继承传统航煤“成本加成 + 政府指导”的定价逻辑，但需突破三大瓶颈：其一，原料成本波动剧烈，国内废弃油脂因回收体系分散（如餐厨废油区域收集率不足 40%）导致价格锚定缺失；其二，环境溢价尚未内部化，现行定价未充分体现 SAF 全生命周期减排价值（70%～90%）；其三，政策调控成本分摊机制缺位，补贴依赖中央财政且缺乏市场化分摊工具。

2.1.3 政策传导视角

政府干预通过双重路径影响 SAF 价格。其中直接路径中，财税补贴（如美国 1.25～2.00 美元 / 加仑税收抵免）降低企业生产成本，强制掺混政策创造刚性需求[33]；间接路径中，碳价联动机制将 SAF 环境溢价内部化，长期采购协议（如国泰航空与 Fulcrum 合作）稳定市场预期。中国政策工具呈现“分阶段协同”特征。直接路径上，试点政策与补贴政策双向发力，但需解决“补贴效率低”（部分企业套利）与“需求碎片化”（区域政策不统一）问题；间接路径上，探索“SAF-ETS”衔接机制，但当前碳价水平难以有效激励减排需求。

2.2 研究假设

基于上述框架，提出以下假设：

H1：原料价格波动与 SAF 价格呈显著正相关，且废弃油脂价格影响系数高于农林废弃物。

原料成本占 SAF 总成本的 60%～70%[6]，是生产总成本的核心部分。若原料供给价格传导系数低（如废弃油脂回收受限于餐饮业规模），需求增加（SAF 扩产）将推高原料价格。原料价格波动可能迫使生产商在短期内以更高价格采购原料，导致边际成本上升。SAF 生产具有资产专用性，短期内难以灵活切换原料。废弃油脂供应链集中度低，价格敏感性更高[10]。废弃油脂除用于 SAF 生产外，还可用于生物柴油、肥皂制造等，替代用途多，跨用途传导系数高。农林废弃物分散于农村地区（如秸秆、林业残渣），收集依赖分散农户或小规模中间商，运输成本高且季节性明显，供应量对价格变化的调整速度较慢。农林废弃物替代用途单一且需求刚性较强，价格波动难以快速调整供应分配[18]。另外，两者存在较大的收集成本与边际响应能力差异：废弃油脂的收集和处理技术成熟（如地沟油回收工艺），边际成本递增平缓，价格上升时，企业可通过优化回收流程快速扩产；而农林废弃物收集需协调农户、处理需专用设备（如秸秆打包机），边际成本陡增，短期内难以响应价格信号。

H2：财税补贴与强制掺混政策通过影响生产成本或市场需求间接作用于 SAF 价格，即生产成本和市场需求部分中介了政策对价格的影响。

财政补贴直接降低企业边际生产成本，推动供给曲线右移，价格下降。碳税增加传统燃料生产成本，间接提高 SAF 的相对竞争力，可能推动 SAF 供给增加。强制掺混政策强制航空公司使用 SAF，直接提升需求，拉动价格上升。环保宣传也会改变消费者偏好，增加自愿采购需求，推高价格。不同技术路线的生产成本因环保性能不同而受到政策的差异化对待，其市场需求可能增加，也会影响价格[34]。例如，PtL 因接近零碳排放，在碳价高企时更具竞争力；HEFA 因原料间接排放可能需支付更高碳成本。政府倾向于支持低碳技术（如 PtL），补贴力度的差异直接影响最终价格。

H3：强制掺混政策对 SAF 价格的提升效应强于财税补贴，且政策效果随掺混比例提高呈边际递减。

强制掺混政策直接规定 SAF 的最低使用比例，短期内推高需求（尤其在供应弹性低的情况下），导致价格上涨。强制掺混释放政策决心信号，明确长期需求，吸引资本和技术投入，但短期内因产能限制，价格上升压力显著。而补贴通过降低 SAF 生产成本（如税收抵免、研发资助）增加供给，且补贴可能被企业用于利润留存而非成本转移 [25]，理论上可抑制价格；但若补贴不足以覆盖生产商的边际成本，或存在供应链瓶颈（如原料短缺），补贴对价格的抑制效果可能有限。边际递减效应在初期阶段表现为：低掺混比例时，市场供需调整空间大，政策效果显著；而在中后期阶段，高掺混比例下，产能扩张和技术进步（如规模经济）逐步释放，价格上涨压力减弱，甚至因成本下降抵消部分政策效应 [26]。

H4：碳交易市场会提高 SAF 溢价，碳交易背景下的补贴可能会协同降本。

碳市场交易通过直接增加传统化石航煤的边际成本（每吨 CO_2 成本叠加至燃料价格），促使航空公司转向低碳替代品（如 SAF），即碳交易通过环境价值内部化提升 SAF 竞争力。碳交易通过提升传统燃料的隐含成本，增强 SAF 的经济竞争力，推高市场需求 [35]。碳价机制将 SAF 的减排价值（如全生命周期减排率 80%）转化为市场溢价，航空公司为抵消碳排放，愿为 SAF 支付更高价格。碳市场收入可能部分反哺 SAF 补贴，形成“碳价—补贴”联动，进一步放大溢价效应。但补贴也可能部分抵消碳价带来的成本压力，导致价格变化方向不确定。补贴直接降低 SAF 成本，加上碳价推高传统航煤成本，双重作用下 SAF 的相对价格竞争力大幅提升，需求激增可能推动产能扩张，长期通过规模效应降低 SAF 价格。

3 研究设计

3.1 样本选择与数据来源

自 2008 年首次使用 SAF 作为燃料进行试飞以来①，SAF 应用出现了许多里程碑式的发展。

2009 年，芬兰能源公司 Neste 在芬兰波尔沃（Porvoo）炼油厂启动 SAF（HEFA 工艺）的商业化生产，标志着 SAF 从实验室走向工业规模，开启了全球首条商业化 SAF 生产线。2011 年，荷兰皇家航空（KLM）进行了首次商业航班使用 SAF 的飞行。2016 年，美国联合航空与 World Energy 签署首个 SAF 长期采购协议。截至目前，已有近 84 架次商业航班使用 SAF。基于数据的可获得性，本文选择 17 个机场② 2016—2023 年的数据，覆盖 SAF 商业化初期至政策密集出台期。通过加注机场—航空公司—SAF 生产商的数据链追踪，并删去无法合理获取原料和生产数据的样本，最终获取观测值 115 个。

3.2 模型构建

3.2.1 基础模型

为检验各变量对 SAF 价格的独立影响，构建价格影响因素的多元线性回归模型。该模型同时包含个体固定效应和时间固定效应，可较好地解决潜在的内生性变量问题，控制不可观测的区域异质性，并在滞后效应检验时有效降低模型的设定偏误。

$$P_{\mathrm{SAF}} = \alpha_1 + \alpha_2 \mathrm{Raw} + \alpha_3 \mathrm{Mandate} + \alpha_4 \mathrm{Subsidy} + \alpha_5 \mathrm{Control} + \eta + \lambda + \varepsilon \tag{1}$$

3.2.2 中介效应模型

为验证政策是否通过影响生产成本或需求间接作用于价格，借鉴温忠麟的研究 [36]，构建三步中介效应模型。第一步模型设置同模型（1），第二步和第三步模型设置如下：

$$M = \beta_1 + \beta_2 \mathrm{Raw} + \beta_3 \mathrm{Mandate} + \beta_4 \mathrm{Subsidy} + \beta_5 \mathrm{Control} + \eta + \lambda + \varepsilon \tag{2}$$

$$P_{\mathrm{SAF}} = \theta_1 + \theta_2 \mathrm{Raw} + \theta_3 \mathrm{Cost}_p + \theta_4 \mathrm{Demand} + \theta_5 \mathrm{Mandate} + \theta_6 \mathrm{Subsidy} + \theta_7 \mathrm{Control} + \eta + \lambda + \varepsilon \tag{3}$$

① 2008 年英国维珍大西洋航空使用 20% 生物燃料（以棕榈油和椰子油为原料）与航煤混合燃料，完成波音 747 客机伦敦至阿姆斯特丹试飞。

② 样本包括北美的旧金山国际机场、约翰韦恩机场、洛杉矶国际机场、纽约拉瓜迪亚机场、奥克兰国际机场等；欧洲的希思罗机场、史基浦机场、维也纳国际机场、丹麦比隆机场、法国勒布尔热机场、意大利米兰马尔彭萨机场、阿兰达机场和亚太地区的樟宜机场、香港国际机场、郑州新郑国际机场、成田国际机场、大兴国际机场。

表1　变量说明表

变量类别	变量符号	变量名称	变量解释	数据来源
因变量	P_{SAF}	SAF 价格（美元 /L）	全球及主要区域（欧美、亚太）的 SAF 现货或合约价格取对数	IATA 燃料价格数据库、Argus Media、Platts、企业财报
自变量	Raw-U	废弃油脂价格（美元 /t）	废弃食用油（UCO）、棕榈酸甲酯（PME）等主流原料的全球均价取对数	USDA 全球大宗商品价格数据库、国际能源署（IEA）生物燃料原料报告
	Raw-F	农林废弃物价格指数	农林残余物（秸秆、林业废料）的区域价格指数	FAO 农业价格统计、区域生物质能协会报告
	$cost_p$	单位生产成本	选用 HEFA 工艺为 1，否则为 0	企业年报（如 Neste、Fulcrum BioEnergy）、学术文献
	Demand	市场需求	SAF 需求量（万 t/ 年），全球该类 SAF 消费量合计取对数	IATA 年度报告、各国交通运输部能源统计
	Subsidy*	财税支持	综合政策工具（补贴、税收抵免）的量化评分（1 ～ 10 分）	各国政府政策文件、ICF 政策数据库、世界银行政策指标库
	Mandate	强制掺混	强制掺混行政命令（有无、比例、实施时间）综合量化评分（1 ～ 10 分）	各国政府政策文件、ICF 政策数据库、世界银行政策指标库
	P_{carbon}	碳价（美元 /t CO_2）	区域碳交易市场均价（如 EU ETS、中国碳市场）取对数	ICE 欧洲碳价数据、各国碳交易所公开数据
控制变量	Brent	原油价格	国际原布伦特原油价格（美元 / 桶）油基准价格取对数	EIA、OPEC 月度报告
	DXY	汇率波动	美元指数（DXY），美元对主要货币的汇率加权指数	美联储经济数据库（FRED）
	RTK	航空运输量	全球客运周转量（亿人千米）取对数	国际民航组织（ICAO）航空运输统计年报

*：Subsidy 评分依据：1 分 = 无补贴，10 分 = 补贴幅度＞ 1.5 美元 / 加仑；Mandate 评分：1 分 = 无政策，10 分 = 掺混比例＞ 10%。对于跨年政策，采用政策强度 × 实施月份 /12 的方式对当年赋值，次年则全额赋值。

3.2.3 掺混政策效应边际递减模型

$$\begin{aligned}P_{SAF} &= \theta_1+\theta_2\text{Raw}+\theta_3\text{Cost}_p+\theta_4\text{Demand}\\&+\theta_5\text{Mandate}+\theta_6\text{Mandate}^2+\theta_7\text{Subsidy}\\&+\theta_8\text{Control}+\eta+\lambda+\varepsilon\end{aligned} \tag{4}$$

3.2.4 政策协同效应模型

$$\begin{aligned}P_{SAF} &= \delta_1+\delta_2\text{Subsidy}+\delta_3 P_{carbon}+\delta_4 P_{carbon}^2\\&+\delta_5\text{Subsidy}\times P_{carbon}+\delta_6\text{Control}\\&+\eta+\lambda+\varepsilon\end{aligned} \tag{5}$$

主要变量说明见表 1，M 表示中介变量生产成本（$cost_p$）和市场需求（Demand）；$Control_{it}$ 为控制变量；η 为个体固定效应；λ 为时间固定效应；ε 为随机扰动项。考虑到政策的滞后性，政策变量（Subsidy、Mandate、P_{carbon}）均滞后一期。

4 实证结果与分析

4.1 回归分析

表 2 显示，废弃油脂（Raw-U）的回归系数显著高于农林废弃物（Raw-F）（0.451 与 0.281），意味着废弃油脂价格每上涨 10%，SAF 价格将上涨 4.51%；农林废弃物价格上涨 10%，SAF 价格只上涨 2.81%。这表明成本结构的敏感性（原料占比较高）、供需弹性与价格传递机制（市场刚性导致波动传导）、生产弹性限制（原料价格系数 Raw-U、Raw-F均显著）与风险管理成本（控制变量中的汇率 DXY 和原油价格 Brent 等显著）深刻影响着 SAF 价格，一个重要例证是欧盟 HEFA 工厂在 2021 年因废弃油脂价格上涨 20%，SAF 生产成本增加 12%。假设 1 得以证实。

选择生产成本（$cost_p$）和市场需求（Demand）作为中介变量，进一步考察 SAF 价格机制的多维影响因素。表 3 政策的中介效应检验显示：在模型（1）中，强制掺混政策（Mandate）的估计系数显著为正；在模型（2）中，强制掺混政策（Mandate）与市场需求（Demand）在 1% 水平上显著正相关；在模型（3）中，强制掺混政策（Mandate）和市场需求（Demand）均与 SAF 价格显著正相关，表明需求拉动价格上涨。在模型（1）中，财政补贴政策（Subsidy）的估计系数显著为负。在模型（2）中，财政补贴政策（Subsidy）与生产成本（$cost_p$）在 1% 水平上显著负相关，且在模型（3）中财政补贴政策（Subsidy）与 SAF 价格

表2 基础回归分析表

变量	β	T
Raw−U	0.451***	(4.248)
Raw−F	0.281**	(2.032)
Mandate	0.106***	(8.435)
Subsidy	−0.228	(−6.467)
Brent	0.200**	(2.108)
DXY	−0.100*	(1.794)
RTK	0.050*	(1.805)
Constant	2.431***	(10.336)
Observations	115	
Control	是	
Year control	是	
Code cluster	是	
r^2_a	0.365	

注：括号内为 t 值，*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1，下同。

显著负相关，意味着补贴推动供给曲线右移，通过降低企业边际生产成本推动价格下降。假设 2 得以验证。

在模型（4）的回归中，强制掺混政策（Mandate）的估计系数显著为正，表明强制掺混政策推高了 SAF 价格。财政补贴政策（Subsidy）的回归系数为负，但其绝对值小于强制掺混政策的回归系数，表明补贴的降本效果弱于强制掺混的需求拉动效应。补贴不足以抵消 SAF 生产的高成本，或者市场存在其他瓶颈（如原料供应限制），使得补贴的效果有限。强制掺混政策的二次项（Mandate^2）系数显著为负，强制掺混可能激励更多生产商进入市场，但短期内供应弹性较低，导致价格显著上涨。当掺混比例提高时，初期因市场响应积极而价格提升明显，但随着比例继续提高，市场调整（如产能扩张、技术进步）减缓价格上涨，甚至因规模经济效应导致成本下降。假设 3 得以证实。

表3 政策的中介效应检验表

变	(1)	(2)		(3)		(4)	(5)
	P_{SAF}	$cost_P$	Demand	P_{SAF}	P_{SAF}	P_{SAF}	P_{SAF}
Mandate	0.156** (2.235)	0.045** (2.051)	0.248*** (4.786)	0.286** (2.054)	0.245*** (3.659)	0.151*** (4.126)	
Mandate^2						−0.074** (−2.033)	
Subsidy	−0.028*** (−6.467)	−0.093*** (−4.896)	0.008** (2.207)	−0.078*** (−3.455)	−0.069** (−2.076)	−0.024** (−2.076)	−0.102** (−2.164)
$cost_P$				0.480*** (7.658)		0.541*** (7.658)	
Demand					0.127** (2.342)	0.187** (2.208)	
P_{carbon}							0.351*** (4.126)
P^2_{carbon}							0.052** (2.208)
P_{carbon}×Subsidy							-0.108** (-2.257)
Constant	13.306** (2.206)	9.465*** (5.421)	11.533*** (4.426)	7.056*** (8.670)	16.532*** (3.213)	8.509*** (3.938)	13.770*** (6.783)
Observations	115	115	115	115	115	115	115
Control	是	是	是	是	是	是	是
Year control	是	是	是	是	是	是	是
Code cluster	是	是	是	是	是	是	是
r^2_a	0.358	0.412	0.462	0.574	0.510	0.526	0.481

模型 5 的回归结果显示，碳价（P_{carbon}）的估计系数为 0.351，且在 1% 水平上显著为正。其经济含义可解释为：碳价每上涨 10%，SAF 溢价提升 3.5%（接近假设区间）。碳价的二次项（P^2_{carbon}）系数显著为正，表明碳价对溢价的边际效应呈递增趋势。交互项“碳价 × 补贴”系数（P_{carbon}×Subsidy）显著为负，说明在碳交易市场环境下补贴的降本效果更为显著。假设 4 得到验证。

4.2 稳健性检验

4.2.1 工具变量法（IV）处理内生性

政策变量（如强制掺混）与 SAF 价格之间可能存在双向因果关系，即 SAF 价格也可能影响政策的制定与强度，从而导致内生性问题。为缓解此问题，本文选取“各国绿色政策指数”（Green_Policy）作为强制掺混政策（Mandate）的工具变量。该指数综合衡量各国在环保领域的政策力度，与 SAF 强制掺混政策高度相关，但不会直接通过 SAF 价格以外的渠道影响当期 SAF 价格，满足相关性和外生性要求。工具变量回归结果（表 4）显示，Kleibergen-Paap rk LM 统计量在 1% 水平上拒绝原假设，Cragg-Donald Wald F 统计量大于 10% 偏误下的临界值，表明工具变量有效且不存在弱工具变量问题。核心解释变量 Mandate 的系数仍在 1% 水平上显著为正，虽然数值略有变化，但符号与显著性水平与基准回归一致，表明在控制潜在内生性后，本文结论依然稳健。

表 4　工具变量法（2SLS）回归结果

变量	第一阶段（Mandate）	第二阶段（P_{saf}）
Green_Policy	0.218*** （3.451）	
Mandate（IV）		0.092** （2.250）
Subsidy	−0.104 （−1.612）	−0.211*** （−3.893）
Raw-*U*	0.117* （1.832）	0.437*** （4.120）
Observations	115	115
Control	是	是
Year control	是	是
Code cluster	是	是
Kleibergen-Paap rk LM		12.336 [0.000]
Cragg-Donald Wald F		25.787
r^2_a	0.401	

4.2.2 变量替换法

为检验结果是否受变量测度方式影响，本文对关键变量进行替换。① 将被解释变量 SAF 价格（LnP_{saf}）替换为 SAF 与传统航煤的价差比率［Price_Gap =（P_{saf}−P_{caf}）/P_{caf}］；②将政策变量由综合评分替换为二元虚拟变量（*D*_Mandate, *D*_Subsidy），有政策时取 1，否则取 0。如表 5 所示，替换变量测度方式后，核心解释变量的符号和显著性均未发生改变。强制掺混政策（*D*_Mandate）仍显著推高价差和 SAF 价格，财税补贴（*D*_Subsidy）则起到降本作用。这证实了本文的研究结论对不同变量的测度方式具有稳健性。

表 5　变量替换法稳健性检验结果

变量	（1）Price_Gap	（2）LnP_{saf}
*D*_Mandate	0.418** （2.562）	0.121** （2.123）
*D*_Subsidy	−0.327* （−1.954）	−0.203*** （−3.786）
Raw-*U*	0.452*** （3.981）	0.448*** （4.210）
Observations	115	115
Control	是	是
Year control	是	是
Code cluster	是	是
r^2_a	0.352	0.361

4.2.3 样本调整检验

为排除极端事件（如新冠感染疫情）对结果的干扰，本文剔除 2020—2021 年的样本进行重新回归。此外，还将全样本分为 2016—2019 年（政策萌芽期）和 2022—2023 年（政策密集期）两个子样本进行检验。表 6 显示，在排除疫情年份后，以及在不同时间段的子样本中，核心变量的系数符号

表 6　样本调整稳健性检验结果

变量	排除 2020—2021 年	2016—2019 年	2022—2023 年
Mandate	0.101** （2.32）	0.088* （1.84）	0.113** （2.54）
Subsidy	−0.235*** （−4.01）	−0.192*** （−3.22）	−0.261*** （−3.89）
Raw-*U*	0.460*** （4.33）	0.431*** （3.78）	0.482*** （4.05）
Observations	89	52	42
Control	是	是	是
Year control	是	是	是
Code cluster	是	是	是
r^2_a	0.371	0.398	0.423

和显著性均与全样本回归结果高度一致。这表明本文的结论不受极端事件的影响，且在不同政策发展阶段均具有稳健性。

4.2.4 改变聚类稳健标准误层级

基准回归在“机场—年份”层面进行聚类，考虑到政策实施多以国家为单位，本文将聚类层级提升至“国家—年份”层面，以缓解可能存在的组内相关性问题。如表 7 所示，在改变聚类稳健标准误的层级后，各核心变量的系数大小、符号及统计显著性均未发生本质变化，表明基准回归结果对聚类层级的选择不敏感，估计结果是稳健的。

表7　改变聚类层级稳健性检验结果

变量	基准回归（机场—年份聚类）	国家—年份聚类
Mandate	0.106***（8.435）	0.109***（5.672）
Subsidy	−0.228***（−6.467）	−0.221***（−4.889）
Raw-*U*	0.451***（4.248）	0.446***（4.001）
Observations	115	115
Control	是	是
Year control	是	是
Code cluster	是	是
r^2_a	0.365	0.365

4.2.5 基于插值数据的稳健性检验

为应对样本观测值相对不足的局限性，并进一步检验模型在更高频数据下的稳健性，本小节采用数据插值方法对原始年度面板数据进行处理。具体步骤如下：①将每个机场的年度数据扩展为季度时间序列；②对于核心连续变量（如 SAF 价格、原料价格、原油价格等），使用线性插值法生成季度数值，模拟变量在年度内的平滑变化；③对于政策变量（Subsidy、Mandate），假设其强度在政策颁布当年均匀分布在四个季度，亦采用线性插值法处理；④对于虚拟变量或类型变量保持不变。经过处理，样本量从 115 个年度观测值扩展至 460 个季度观测值。使用插值后的季度面板数据，对基准模型（公式 1）进行重新估计。如表 8 所示，在使用插值得到的季度数据后，所有核心解释变量（Raw、*U*,Raw-*F*、Mandate、Subsidy）的系数符号均未发生改变，且统计显著性水平保持一致（均在 1% 或 5% 水平上显著）。这表明本文的核心研究发现——废弃油脂价格正向驱动 SAF 成本、强制掺混政策推高价格、财税补贴降低价格——对数据频率的变化是稳健的。核心变量的系数数值与基准回归结果相比略有变化，但变化幅度极小（例如，Raw-*U* 的系数从 0.451 变为 0.439），处于合理波动范围内。这种微小变化在预期之内，因为插值过程平滑了数据，可能会略微低估变量的实际波动性，但并未改变其基本统计关系和经济学含义。其他控制变量的结果也基本保持一致，其中航空运输量（RTK）的显著性水平略有下降（从 10% 降至不显著），这可能是由于插值后的季度数据未能完全捕捉其与 SAF 价格之间的高频关联，但鉴于其并非核心关注变量，不影响主要结论。

表8　基于插值季度数据的稳健性检验结果

变量	基准回归（年度）		插值季度数据	
	β	T	β	T
Raw−*U*	0.451***	（4.248）	0.439***	（4.012）
Raw−*F*	0.281**	（2.032）	0.269**	（2.215）
Mandate	0.106***	（8.435）	0.098***	（7.889）
Subsidy	−0.228	（−6.467）	−0.235***	（−7.124）
Brent	0.200**	（2.108）	0.192**	（2.315）
DXY	−0.100*	（1.794）	−0.105*	（−1.852）
RTK	0.050*	（1.805）	0.047	（1.642）
Constant	2.431***	（10.336）	2.508***	（11.245）
Observations	115		460	
Control	是		是	
Year control	是		是	
Code cluster	是		是	
r^2_a	0.365		0.358	

4.3 异质性分析

4.3.1 区域异质性

从生产成本看，欧盟、美国和亚太地区生产成本系数分别是 0.408、0.646、0.521（表 9），显示生产工艺、政策环境与技术成熟度对价格机制的传导。欧盟的 SAF 工艺以 PtL 为主，成本的主要驱动因素是绿氢（占 60% 以上），且依赖高碳价与绿电补贴，PtL 工艺设备投资高，但长期减排溢价显著。

美国的主导工艺为 HEFA 和 FT，HEFA 原料（大豆油）价格波动大，FT 依赖廉价天然气（约占成本 40%），能源价格敏感度高。亚太地区的主导工艺为 HEFA，废弃油脂以棕榈油为主（约占 70%），供应链分散，产销区域错配推高了运输与预处理成本。

从原料看，欧盟、美国和亚太地区的原料成本系数分别为 0.386（p<0.01）、0.094（p<0.01）和 0.408（p<0.01），显示成本结构的敏感性、生产弹性及市场刚性的差异性导致价格波动传导。欧盟 SAF 原料废弃油脂依赖进口（主要来自东南亚），供应链脆弱，价格易受地缘政治（如俄乌冲突）与进口政策影响（如印尼出口限制）。PtL 最主要的成本驱动为绿氢，其本土化推进缓慢。美国的 SAF 原料以大豆油、玉米乙醇为主，由于美国农业资源丰富，原料自给率高，同时页岩气供应稳定，FT 工艺成本可控。亚太地区的 SAF 原料主要是废弃油脂和棕榈油，其中废弃油脂收集体系不完善，原料价格波动剧烈。

表 9　区域与工艺异质性检验

变量	区域异质性			生产工艺异质性		
	欧盟	美国	亚太	HEFA	FT	PtL
Raw	0.386*** (8.467)	0.094** (2.304)	0.408*** (3.334)	0.435*** (6.124)	0.258*** (5.408)	0.196*** (3.133)
$cost_p$	0.408*** (4.392)	0.646*** (5.209)	0.521*** (6.624)	0.728*** (8.420)	0.677*** (4.612)	0.495*** (6.312)
Demand	0.198*** (6.329)	0.077* (1.735)	0.146** (2.355)			
Mandate	0.202*** (6.828)	0.039* (1.770)	0.098** (2.106)			
Subsidy	−0.035** (−2.142)	−0.246**** (−7.508)	−0.133**** (−8.645)			
P_{carbon}	0.358*** (6.624)	0.056** (2.304)	0.168** (2.041)			
常数项	0.234*** (9.218)	0.877*** (4.221)	0.308*** (4.198)	0.821*** (4.520)	0.557*** (6.314)	0.693*** (5.487)
Observations	40	32	43	81	18	16
Control	是	是	是	是	是	是
Year control	是	是	是	是	是	是
Code cluster	是	是	是	是	是	是
r^2_a	0.439	0.521	0.493	0.486	0.501	0.488

欧盟强制掺混（β=0.202，p<0.01）直接创造刚性需求，本土产能不足，供给依赖进口，价格因受进口原料与绿氢成本双重挤压而居高不下。美国 SAF 产能受 IRA 补贴（β=-0.246，p<0.01）刺激快速扩张，自愿碳市场溢价微弱（β=0.056，p<0.05），需求（β=0.077，p<0.10）依赖补贴政策驱动。但需求增长滞后（β=0.077，p<0.10），航空公司采购意愿低，短期供过于求压制溢价。亚太地区强制掺混政策（β=0.098，p<0.05）拉动需求（β=0.146，p<0.05），但多国政策不协同，需求分散，原料补贴（β=-0.133，p<0.01）可部分对冲价格波动，区域价差显著（新加坡 2200 美元 /t 而中国 2600 美元 /t）。

4.3.2 工艺类型差异

表 9 显示，HEFA 工艺的原料成本（Raw）系数为 0.435（p<0.01），FT 和 PtL 工艺原料成本系数分别为 0.258 和 0.196。这是因为 HEFA 工艺原料成本占比高、敏感性更强，FT 工艺主要是能源成本占比高（天然气），PtL 工艺绿氢成本占比高（>50%）。HEFA 工艺生产成本（$cost_p$）估计系数为 0.728（p<0.01），FT 工艺和 PtL 工艺原料成本系数分别为 0.677（p<0.01）和 0.495（p<0.01）。技术路线差异对 SAF 价格的影响，主要源于技术成熟度驱动的规模效应与学习曲线效应。HEFA 工艺是原料主导型价格，因成熟度高（专利多、产能利用率高），减排效率高但市场溢价已部分兑现，其价格和成本加成率均低于 FT 与 PtL 工艺；FT 工艺中纤维素类生物质气化技术存在瓶颈，成本结构中设备折旧影响更大；PtL 工艺技术成熟度低，依赖政策驱动的长期需求。技术路线差异显著影响 SAF 价格，为“因技施策”提供经验证据。

4.3.3 协同效应的异质性

假设 4 证实，碳价与补贴存在协同降本效应，由于全球碳市场的发育程度不同，把样本进一步分为高碳价补贴组和低碳价补贴组，分别回归以分析不同碳价水平下降本异质性。表 10 显示，SAF 溢价当碳价≤50 美元 /t 时，补贴政策（Subsidy）支持的估计系数为 -0.034；当碳价 > 50 美元 /t 时，其估计系数增强至 -0.247，表明高碳价环境下补贴降

本效果更显著。这可能因为低碳价下补贴样本组以财政补贴主导，但碳价对需求的拉动力弱，SAF 价格下降主要依赖补贴的单边作用；而高碳价补贴组存在需求拉动与补贴降本双重效应。

欧洲碳价高（>80 美元 /t），碳价与“Fit for 55”政策协同，政策明确 SAF 减排价值，需求刚性高，规模效应显著，碳价与补贴协同降低 SAF 边际成本。美国自愿碳市场碳价水平低，依赖《通胀削减法案》补贴，碳价传导机制缺失，补贴单边主导，碳价缺位导致协同效应有限，SAF 降价依赖生产端补贴，补贴单边主导，碳价缺位导致协同效应有限，SAF 降价依赖生产端补贴。亚太地区碳价低（<30 美元 /t），但强制掺混政策（如新加坡 1%）直接拉动需求。中国试点碳市场（如全国碳市场）尚未覆盖航空业，碳价影响微弱，依赖财政补贴驱动 SAF 需求。强制掺混政策部分替代碳价作用，补贴与政策协同拉低价格，但原料波动削弱效果。

HEFA 因成熟度高（专利多、产能利用率高），原料价格波动主导成本，碳价影响被稀释；天然气价格与碳价联动（如欧盟气电联产），碳价推高传统燃料成本，间接利好 FT；绿氢生产依赖低碳电力，碳价提升绿电竞争力，显著降低 PtL 边际成本，放大溢价空间。

5 结论与政策启示

5.1 结论

合理定价机制能调节需求，刺激供应，引导资源配置，优化原料供应，推动技术研发与创新。本文构建 SAF 价格机制综合分析框架，通过对 2016—2023 年全球 115 个样本的实证分析，系统量化多维度因素对 SAF 价格的动态影响，深化现有文献中政策—市场交互机制研究。研究分析：

（1）原料成本主导价格波动。废弃油脂价格影响系数（0.451）显著高于农林废弃物（0.281），其供应链集中度低、替代用途广泛导致价格敏感性更强。

（2）政策效应动态分化。强制掺混政策对价格的短期提升效应强于财税补贴的降本作用，且掺混比例超 10% 后边际效应递减，表明政策需从需求拉动转向技术驱动。

（3）碳价协同机制凸显。碳价每上涨 10%，SAF 溢价提升 3.5%，其与补贴的交互效应表明高碳价环境下财政支持可放大降本效果，形成“环境溢价 + 规模经济”双重激励。

（4）区域与技术路径分化。欧盟 PtL 工艺受绿氢成本制约（系数 0.408），美国 HEFA 依赖大豆油价波动（系数 0.646），亚太地区因原料分散推高运输成本（系数 0.521），凸显区域适配政策的必要性。

5.2 政策启示

基于全球 SAF 价格驱动规律与中国分阶段定价的交互效应，本研究提出“短期—中期—远期”政策组合框架，旨在平衡产业培育、市场效率与减排目标的动态关系，具体建议如下。

5.2.1 全球协同政策设计

（1）构建跨国碳市场联盟。短期：推动欧盟 ETS 与中国、东盟碳市场的互联互通，建立 SAF 环境溢价的跨境转移机制，缓解区域碳价差异导致的贸易扭曲 [如欧盟碳边境调节机制（CBAM）]。长期：通过国际民航组织（ICAO）主导全球航空

表 10　政策协同效应的异质性检验

变量	碳价异质性		协同效应的区域异质性			协同效应的工艺异质性		
	碳价 >50 美元	碳价≤50 美元	欧盟	美国	亚太	HEFA	FT	PtL
P×Subsidy	−0.179*** (−4.608)	−0.022* (−1.754)	0.368*** (6.587)	0.127* (1.706)	0.229** (2.547)	−0.153** (2.321)	−0.086* (−1.752)	−0.024 (−0.551)
常数项	0.511*** (5.183)	0.307*** (4.740)	0.367*** (9.445)	0.708*** (5.336)	0.901*** (3.575)	0.322*** (6.125)	0.677*** (8.409)	0.489*** (9.547)
Observations	38	77	40	32	43	81	18	16
Control	是	是	是	是	是	是	是	是
Year control	是	是	是	是	是	是	是	是
Code cluster	是	是	是	是	是	是	是	是
r^2_a	0.518	0.498	0.554	0.512	0.504	0.508	0.478	0.485

碳市场整合，将 SAF 减排效益纳入国际航空碳抵消与减排计划（CORSIA）核算体系，实现碳信用跨国流通。

（2）优化政策工具组合。强制掺混与补贴协同：初期设定掺混比例 5%～10%，配套过渡性补贴（如美国 IRA 模式的 1.25 美元 / 加仑税收抵免），缓解航司成本压力；掺混比例超 10% 后，逐步以碳价替代补贴，避免财政负担过重。

（3）差异化技术扶持。对 HEFA 工艺提供原料供应链补贴（如废弃油脂回收激励），对 PtL 工艺设立绿氢研发专项基金，对 FT 工艺实施天然气价格稳定机制。

5.2.2 中国分阶段定价策略

（1）初期（2025—2026 年）。双轨制稳价与供应链整合。采用“UCO 成本加成 + 欧洲 SAF 到岸价对标”双轨制定价，通过产业联盟（如中国航油）集中采购，平抑原料价格波动；实施“碳信用 + 定向补贴”联动，对 UCO 回收企业按减排量发放补贴；设立 SAF 专项保险基金，覆盖原料价格波动风险（如棕榈油季节性短缺）。

（2）中期（2027—2030 年）。人民币定价权与绿氢突破。推出人民币计价的“中国 SAF 价格指数”，锚定国内 UCO 交易数据（如百思道报价），逐步脱离普氏能源等国际指数依赖；内蒙古、新疆等绿电富集区建设 PtL 试点项目；通过《中华人民共和国可再生能源法》修订，强制绿电配额中 20% 优先供给 SAF 生产。

（3）远期（2030 年后）。市场并轨与全社会成本分摊。将 SAF 与传统航煤合并定价，增量成本通过燃油附加费与碳市场收益实现全社会分摊；依托“一带一路”倡议沿线机场 SAF 加注网络，推广人民币计价合约，争夺国际能源定价权。

5.2.3 区域与技术适配策略

（1）区域差异化路径。欧盟——强化碳价与 PtL 工艺协同，设定 2030 年绿电占比 SAF 生产 40% 的目标。美国——依托《通胀削减法案》扩大 FT 工艺天然气供应链，豁免页岩气环保限制以降低气价波动。亚太地区——在印尼、马来西亚建立棕榈废料预处理中心，通过“东盟 SAF 原料储备联盟”对冲地缘风险。

（2）技术路线扶持重点。HEFA：短期优先推广，建立废弃油脂溯源区块链平台，打击“地沟油黑市”以稳定原料供给。PtL：纳入国家科技重大专项，对电解槽设备制造商提供增值税减免。电燃料（e-Fuel）：在粤港澳大湾区开展试点，利用海上风电与碳捕集（CCUS）合成电燃料。

5.2.4 风险管理框架

基于原料价格波动显著（H1）和区域供应链脆弱性（4.3.1）的实证结果，提出如下建议：①价格波动对冲。推出 SAF 期货合约，允许航司通过套期保值锁定远期成本。②供应链韧性。建立“国家 SAF 原料战略储备库”，在长三角、珠三角布局区域性仓储中心，储备量覆盖 3 个月需求。③政策迭代机制。每两年评估分阶段政策效果（如成本降幅、市场份额），动态调整掺混比例与补贴力度。

5.2.5 国际合作与标准协同

①认证互认。推动中国适航认证（CAAC）与欧盟 EASA、美国 FAA 互认，降低 SAF 跨境贸易壁垒。②绿色金融协同。联合亚投行（AIIB）设立“全球 SAF 产业基金”，优先支持发展中国家原料供应链建设。

5.3 不足与展望

本研究存在以下局限：首先，SAF 产业尚处商业化初期，公开的高频价格与产量数据难以获取，企业生产成本数据透明度不足，部分变量依赖文献估算值，可能影响模型精度；其次，碳价传导机制的分析未涵盖自愿碳市场（如 CORSIA）的复杂交互效应；最后，技术路线如电燃料（e-Fuel）的潜力尚未纳入模型。

未来研究可从三方面拓展：①开发 SAF 全生命周期动态定价模型，整合绿氢成本下降曲线与航空碳税传导机制；②探索区块链技术在原料溯源与碳信用交易中的应用；③针对新兴经济体开展“原料—政策—技术”适配性案例研究，为南南合作提供实证支持；④受限于 SAF 商业化初期的数据可获性，本文样本量有限，未来可采用更高频数据进一步验证。

参考文献

[1] IEA. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector[R]. Paris: IEA, 2021.

[2] IATA. Net zero 2050: sustainable aviation fuels[R/OL]. (2022-07-05).[2023-04-12]. https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/.

[3] IATA. SAF registry to be operated by the civil aviation decarbonization organization[EB/OL]. (2025-03-24). [2025-04-21]. https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-03-24-01/.

[4] 田利军 , 刘鑫 , 吕继兴 , 等 . 我国可持续航空燃料产业发展研究 [J]. 中国工程科学 , 2025, 27(2): 49-61.

[5] ZHANG L B, BUTLER T L, YANG B. Recent trends, opportunities and challenges of sustainable aviation fuel[M]//VERTÈS A A, QURESHI N, BLASCHEK H P, et al, eds. Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries. New Jersey: Wiley, 2020: 85-110.

[6] DOLIENTE S S, NARAYAN A, TAPIA J F D, et al. Bio-aviation fuel: a comprehensive review and analysis of the supply chain components[J]. Frontiers in energy research, 2020, 8: 110, doi: 10.3389/fenrg.2020.00110.

[7] ASTM International. Standard specification for aviation turbine fuel[EB/OL].(2023-10-07).[2024-07-19]. https://cdn.standards.iteh. ai/samples/3462/d3ff3a617a6d4b6fbe10efcfa1eab45b/ASTMD1655-01.pdf.

[8] ASTM International. Standard specification for aviation turbine fuel[EB/OL].(2023-10-07).[2024-07-19]. https://cdn.standards.iteh. ai/samples/3462/d3ff3a617a6d4b6fbe10efcfa1eab45b/ASTMD1655-01.pdf.

[9] HITCHCOCK D. Ready for takeoff? Aviation biofuels past, present, and future[EB/OL]. Atlantic Council Report, 2019. [2021-01-21]. https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2020/06/Ready-for-Takeoff-Final.pdf.

[10] 田利军 , 刘鑫 . 基于 HEFA-FT 路线的可持续航空燃料碳减排潜力与减排成本 [J]. 科学技术与工程 , 2025, 25(4): 1732-1742.

[11] ICF.European SAF Industrial Policy[EB/OL].(2025-01-23).[2025-01-30].https://a4e.eu/wp-content/uploads/EU_Industial_Strategy_SAF_Report_A4E_ACI_ARC_ASD_ERA_GAMA_January-2025.pdf.

[12] LI J.Sustainable Aviation Fuel: State of the Industry and Challenges in 2024[EB/OL].(2024-10-30).[2024-12-05]. https://earth.org/sustainable-aviation-fuel-state-of-the-industry-and-challenges-in-2024/.

[13] WINCHESTER N, MCCONNACHIE D, WOLLERSHEIM C, et al. Economic and emissions impacts of renewable fuel goals for aviation in the US[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2013, 58: 116-128, doi: 10.1016/j.tra.2013.10.001.

[14] LI Y, WANG Y Z, CUI Q. Has airline efficiency affected by the inclusion of aviation into European Union emission trading scheme? Evidences from 22 airlines during 2008–2012[J]. Energy, 2016, 96: 8-22.

[15] VAN DER SMAN E S, PEERLINGS B, KOS J, et al. Destination 2050–a route to net zero European aviation[R]. NLR-Royal Nether lands Aerospace Centre, 2021.

[16] PRAKASH A, DAVIES J. An investigation into the feasibility of alternative aviation fuels[C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando: AIAA, 2020: 1-12.

[17] HAMDAN S, JOUINI O, CHEAITOU A, et al. Air traffic flow management under emission policies: Analyzing the impact of sustainable aviation fuel and different carbon prices[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2022, 166: 14-40.

[18] CUI Q, LEI Y L, LI Y. Co-benefit scenario analysis on replacing aviation kerosene with sustainable aviation fuels in Africa[J]. Environmental impact assessment review, 2024, 104: 107318.

[19] BAUEN A, BITOSSI N, GERMAN L, et al. Sustainable aviation fuels: status, challenges and prospects of drop-in liquid fuels, hydrogen and electrification in aviation[J]. Johnson Matthey technology review, 2020, 64(3): 263-278.

[20] ALAM A, MASUM M F H, DWIVEDI P. Break-even price and carbon emissions of carinata-based sustainable aviation fuel production in the southeastern United States[J]. GCB bioenergy, 2021, 13(11): 1800-1813, doi: 10.1111/gcbb.12888.

[21] GELEYNSE S, BRANDT K, GARCIA-PEREZ M, et al. The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: techno-economic evaluation[J]. ChemSusChem, 2018, 11(21): 3728-3741, doi: 10.1002/cssc.201801690.

[22] NOH H M, BENITO A, ALONSO G. Study of the current incentive rules and mechanisms to promote biofuel use in the EU and their possible application to the civil aviation sector[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2016, 46: 298-316.

[23] SU Y J, ZHANG P D, SU Y Q. An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2015, 50: 991-1003.

[24] MAYERES I, PROOST S, DELHAYE E, et al. Climate ambitions for European aviation: Where can sustainable aviation fuels bring us?[J]. Energy policy, 2023, 175: 113502.

[25] FANTUZZI A, CAVAZOS P A S, MOUSTAFA N, et al. Low-carbon fuels for aviation[R]. Imperial College London, Institute for Molecular Science and Engineering, 2023.

[26] MICHAGA M F R, MICHAILOS S, HUGHES K J, et al. Techno-economic and life cycle assessment review of sustainable aviation fuel produced via biomass gasification[M]//RAY R C, ed. Sustainable Biofuels: Opportunities and Challenges. Amsterdam: Elsevier, 2021: 269-303, doi: 10.1016/B978-0-12-820297-5.00012-8.

[27] CAPAZ R S, GUIDA E, SEABRA J E A, et al. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential[J]. Biofuels, bioproducts & biorefining, 2021, 15(2): 502-524.

[28] 田利军 , 刘鑫 . 航空碳市场与可持续航空燃油协同减排效益研究 [J]. 安全与环境学报 , 2024, 24(12): 4894-4907, doi: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.0937.

[29] MANKIW N G. Principles of Economics[M]. Cenage Learning, 2021.

[30] 田利军 , 刘鑫 . 基于演化博弈分析的可持续航空燃油与碳市场协同减排研究 [J]. 中国能源 , 2024, 46(7): 70-80.

[31] 赫尔曼 · 西蒙 . 定价制胜：大师的定价经验与实践之路 [M]. 北京 : 机械工业出版社 .2017.

[32] HIRSHLEIFER J, GLAZER A, HIRSHLEIFER D. Price Theory and Applications[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[33] KOUSOULIDOU M, LONZA L. Biofuels in aviation: Fuel demand and CO_2 emissions evolution in Europe toward 2030[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2016, 46: 166-181, doi: 10.1016/j.trd.2016.03.018.

[34] WANG Z J, STAPLES M D, TYNER W E, et al. Quantitative policy analysis for sustainable aviation fuel production technologies [J]. Frontiers in energy research, 2021, 9: 751722.

[35] ZOU R Y, WANG B, WANG K, et al. A pathway to sustainable aviation: modeling aircraft takeoff mass for precise fuel consumption and aircraft emission calculations[J]. Energy, 2025, 319: 135074, doi: 10.1016/j.energy.2025.135074.

[36] 温忠麟，叶宝娟 . 有调节的中介模型检验方法：竞争还是替补？[J]. 心理学报，2014，46(05): 714-726.

The Price Mechanism of Sustainable Aviation Fuel Integrating Global Pricing Rules and Chinese Practices: Multi-stage Policy Coordination and Market Design

TIAN Lijun[1,2]*, CHEN Xuegong[2], LIU Xin[1], YANG Jing[3]

(1. Research Center for Civil Aviation Environment and Sustainable Development, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2.School of Economics and Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 3. Finance Department, China National Aviation Fuel Group Co., Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: This study constructs a two-dimensional pricing model covering global patterns and Chinese practices based on the market equilibrium theory, cost-plus model, and policy transmission mechanism. It reveals the cross-regional heterogeneous effects of tools such as carbon price linkage and mandatory blending, and systematically explores the dynamic impacts of raw material costs, policy tools, technological paths, and regional differences on the price of Sustainable Aviation Fuel (SAF). The empirical results show that: the price fluctuations of raw materials have a significant cost-driving effect on SAF (regression coefficients: 0.451 for waste oils, 0.281 for agricultural and forestry residues); the short- erm price-pulling effect of the mandatory blending policy is stronger than that of fiscal and tax subsidies (a marginal increase of 0.106 vs. a cost reduction of 0.228), exhibiting diminishing marginal returns; the synergistic effect of carbon prices and subsidies can significantly increase the SAF premium (the interaction term coefficient is -0.108). The research reveals the global SAF market characteristics of "policy-dominated demand, raw material-determined costs, and technological paths differentiation", proposes a Chinese SAF pricing path of "dual-track system in the short term, indexation in the medium term, and convergence in the long term", and designs a localization plan of "raw material anchoring + RMB pricing power + carbon market connection", providing a paradigm reference for SAF market development in emerging economies.

Keywords: sustainable aviation fuel; price mechanism; civil aviation industry; Chinese practices; policy coordination