



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403028

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

Tian Lijun, Liu Xin. Carbon reduction potential and cost of sustainable aviation fuel based on the HEFA-FT route[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1732-1742.

环境科学、安全科学

## 基于 HEFA-FT 路线的可持续航空燃料 碳减排潜力与减排成本

田利军<sup>1</sup>, 刘鑫<sup>2\*</sup>

(1. 中国民航大学环境与可持续发展研究院, 天津 300300; 2. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300)

**摘要** 预测符合中国国情的可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)的减排潜力与成本对推动 SAF 行业的发展,对实现碳中和目标至关重要。基于国际可比和自主可控原则,构建脂类和脂肪酸类加氢处理(hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA)和费托合成(Fischer-Tropsch, FT)两条技术路径的全生命周期碳减排模型,预测2025—2060年中国民航SAF的减排量和减排成本。结果表明:适合在2025—2030年阶段部署的以废弃油脂为原料的HEFA路线相比于传统航空煤油减少的碳排放量、减排贡献、减排成本分别为61.3 kgCO<sub>2e</sub>/GJ、84.4%、0~1 025.9 CNY/tCO<sub>2e</sub>。在2030—2060年主要发展的FT路线中:以城市固体废弃物为原料的路线其减少的碳排放量最大,为68.4 kgCO<sub>2e</sub>/GJ;以农业废弃物和城市固体废弃物为原料的减排成本低于以林业废弃物为原料。鉴于中国国情,农业废弃物为原料的FT路线由于其丰富的原材料及较低的减排成本,更适宜在2030年以后作为主要SAF生产技术路线进行发展。同时预计2060年中国民航SAF减排量大体在17 177~19 819万t。2025—2060年,可能情景下累计碳减排成本分别达到11 063~45 828亿元,边际碳减排成本为220~697 CNY/tCO<sub>2e</sub>。

**关键词** 可持续航空燃料; 减排成本; 减排潜力; 情景分析

中图分类号 X321;

文献标志码 A

### Carbon Reduction Potential and Cost of Sustainable Aviation Fuel Based on the HEFA-FT Route

TIAN Li-jun<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**[Abstract]** Predicting the emission reduction potential and cost of sustainable aviation fuel (SAF) that aligns with China's national conditions is essential for advancing the SAF industry and achieving carbon neutrality goals. Based on the principles of international comparability and independent controllability, a lifecycle carbon emission reduction model was developed for two technological pathways: hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) and Fischer-Tropsch (FT). This model forecasted the emission reduction and cost associated with SAF in China's civil aviation sector from 2025 to 2060. The results indicate that the HEFA pathway, which is suitable for implementation between 2025 and 2030 using waste oils as feedstock, achieves a carbon emissions reduction of 61.3 kgCO<sub>2e</sub>/GJ, contributing to an overall reduction of 84.4%. This associated cost ranges from 0 to 1 025.9 CNY/tCO<sub>2e</sub> when compared to traditional aviation kerosene. In contrast, the FT pathway—primarily developed between 2030 and 2060 utilizing municipal solid waste as raw material yields the highest carbon emissions reduction at 68.4 kgCO<sub>2e</sub>/GJ. Furthermore, routes employing agricultural or municipal solid waste exhibit lower abatement costs than those utilizing forestry waste. Considering China's specific national conditions, it is determined the FT route utilizing agricultural waste as feedstock is more appropriate for development as the main SAF production technology after 2030 due to its abundant raw materials and comparatively lower abatement costs. Projections suggest that by 2060, reductions in China's civil aviation SAF could reach approximately 17 177 million tons to 19 819 million tons. From a possible scenario spanning from 2025 to 2060, it is estimated that cumulative carbon abatement costs will amount to between 11 063 to 45 828 billion CNY, this corresponds with a marginal carbon abatement cost ranging from 220 to 697 CNY/tCO<sub>2e</sub>.

收稿日期: 2024-04-24; 修订日期: 2024-11-23

基金项目: 国家社科基金一般项目(22BJY020)

第一作者: 田利军(1976—),男,汉族,天津人,博士,教授。研究方向:民航环境与可持续发展。E-mail:tljshenji@126.com。

\*通信作者: 刘鑫(1999—),男,汉族,青海海东人,硕士研究生。研究方向:民航环境与可持续发展。E-mail:3216264954@qq.com。

[**Keywords**] sustainable aviation fuel; emission reduction costs; emission reduction potential; scenario analysis

在过去的几十年来,航空业快速发展的同时给环境带来也造成了不利的影 响。目前,全球航空业的二氧化碳排放量占温室气体排放总量的 2.4%,预计到 2050 年,航空业的碳排放量将导致全球的温度上升约 0.1 °C<sup>[1]</sup>,根据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)预测,若保持现有排放水平,至 2050 年时航空碳排放将占到全球总碳排放的 25%<sup>[2]</sup>。考虑到航空业对全球碳排放的影响,2022 年,在第 41 届 ICAO 大会上,来自 193 个联合国成员国的代表就 2050 年实现航空净零排放的“历史性协议”达成一致。欧洲联盟颁布了欧洲绿色新政(European Green Deal)长期发展战略、Fit for 55 一揽子政策组合(简称 FF55),美国发布了《美国航空业气候行动计划》《可持续航空燃料大挑战路线图》《可持续燃料标准》《通胀消减法案》等政策来应对气候变化。与此同时,为助力“双碳”目标的实现,中国民用航空局印发《“十四五”民航绿色发展专项规划》《“十四五”民用航空发展规划》《“十四五”生物经济发展规划》等政策措施来促进航空业的减排。

目前已有的减排措施有:提高运营和基础设施效率,电动飞机、氢能飞机的使用以及使用可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)。其中,能效提升等常规技术领域优化所产生的减排潜力有限,从长期的角度来看,氢能和电气化为当前技术提供低碳排放的替代品,但需要在飞机设计和更换方面发生巨大的变化<sup>[3]</sup>。SAF 具有能量密度高、减排效果好、可实现低碳零碳甚至“负碳”,且技术成熟度高、与现有航空器和基础设施兼容、短期可商业运行<sup>[4]</sup>,根据国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)分析,到 2050 年,65%的减排将通过使用 SAF 来实现<sup>[5]</sup>。因此,大规模部署 SAF 在减少航空部门二氧化碳排量的措施中是至关重要的<sup>[6]</sup>。

SAF 被欧洲环境署定义为“与传统航空燃料相比,减少温室气体排放,同时避免其他不利的可持续性影响的生物基航空燃料”<sup>[7]</sup>,不同的类型的燃料可以通过不同的技术路径转化为可持续航空燃料。截止到 2023 年,已有 9 条路线通过美国材料与试验协会(American Society for Testing Materials, ASTM)的批准。其中 7 条技术路径得到了《含合成碳氢化合物的航空涡轮燃料标准规范》(ASTM D7566)的认证<sup>[8]</sup>,分别为:FT-SPK(费托合成石蜡油)、HEFA-SPK(加氢脂和脂肪酸)、HFS-SIP(氢化

发酵糖合成异石蜡)、AtJ-SPK(醇转喷气合成石蜡煤油)、CHJ(催化水热分解)和、HC-HEFA(从碳氢化合物加氢脂和脂肪酸)和 FT-SPK/A(带芳烃的费托合成煤油),此外还有 Co-processed HEFA(可再生原料与原油中间馏分共加工的加氢处理酯和脂肪酸煤油)、Co-processed FT(可再生原料与原油中间馏分共加工的费托合成煤油)这两种路线得到了《航空涡轮燃料标准规范》(ASTM D1655)的认证<sup>[9]</sup>。

中国作为全球第二大航空市场,其减排实现碳中和目标对于全球航空业的碳减排有着重大的意义。《“十四五”民航绿色发展专项规划》中明确提出:“力争 2025 年当年可持续航空燃料消费量达到 2 万吨以上”<sup>[10]</sup>。基于国际可比和自主可控原则,构建脂类和脂肪酸类加氢处理(hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA)、费托合成(Fischer-Tropsch, FT)两条技术路径的全生命周期碳减排模型,预测 2025—2060 年中国民航 SAF 的减排量和减排成本。为新质生产力的锻造、国家能源转型及民航业深度脱碳提供理论依据和经验证据。

## 1 相关工作

目前,关于 SAF 的研究主要有 4 条路径:污染物排放、碳减排潜力、减排成本及 SAF 与碳市场的协同,其中 SAF 有较好的环境效应和经济效应,但因原料和技术路线存在较大差异。

### 1.1 污染物排放

SAF 相比于传统航空煤油可以有效减少颗粒物等污染物的排放质量和数量。Lobo 等<sup>[11]</sup>的研究发现,用废食用油生产的 HEFA 与传统 Jet A-1 燃料混合后的 16 种不同混合物的研究表明,与 Jet A-1 燃料相比,非挥发性颗粒排在颗粒数量上平均减少约 35%,在颗粒物质质量上平均减少约 60%。Moore 等<sup>[12]</sup>研究表明,与 Jet A 燃料相比,使用传统低硫含量燃料 Jet A 和 HEFA 燃料的 50:50 混合物,可替代 HEFA 燃料的颗粒物排放量几乎减少了 1/2。

### 1.2 碳减排量

不同的生物原料及不同技术路线选择将会实现不同程度的 SAF 减排潜力。Puschnigg 等<sup>[13]</sup>从 *Renewable Energy Directive* (EU/2018/2001) 和国际航空碳抵消与减排机制(carbon offsetting and reduction scheme for international aviation, CORSIA) 的两个框架评估了基于软木残渣为原料的 SAF 的温

室气体减排潜力,与传统化石燃料相比,这两个框架分别可以实现高达 80.1% 和 79% 的温室气体减排。Abrantes 等<sup>[14]</sup>的评估显示每种生产 SAF 的工艺中使用的不同原料对减少二氧化碳排放没有显著影响,每种条件之间的最大差异为 1.47%。Alam 等<sup>[15]</sup>研究发现,基于 Carinata 的 SAF 碳排放总量相比传统航空燃料提供了 65% 的相对碳节约,相对碳减排在 61% ~ 68% 的可能性为 95%。Seber 等<sup>[16]</sup>估计了从麻逢树等原料中提取的 HEFA 燃料的温室气体排放效益为 34% ~ 65%。

### 1.3 减排成本

SAF 显著的减排潜力带动了 SAF 潜在的消费市场,然而 SAF 高昂的成本是造成 SAF 市场化的主要障碍,因此一些研究关注 SAF 的减排成本。如 Winchester 等<sup>[17]</sup>研究发现,使用 HEFA 工艺生产的可再生燃料减少的每吨二氧化碳成本在 50 ~ 400 美元。Capaz 等<sup>[18]</sup>、Klein 等<sup>[19]</sup>分析了适宜在巴西发展的 SAF 技术路线的减排成本和潜力。Tomaschek 等<sup>[20]</sup>评估了南非生物燃料生成的温室气体排放和减排成本,发现其生产成本高于参考化石燃料 30% ~ 80%。Rojas 等<sup>[21]</sup>研究发现,通过电转液路线(power to liquid, PtL)生产的 SAF 的全球增温潜势低于化石燃料,并可以满足现有的航空减排目标。Becken 等<sup>[22]</sup>研究表明,要实现碳中和,中期将严重依赖生物源 SAF,长期将依赖基于可再生电力的可持续航煤(e-kerosene),2050 年可能需要全球 9% 的可再生电力和 30% 的可持续生物质。欧洲的航空公司由于有较高的运营和商业效率,其效率高于非欧洲的航空公司,欧洲航空业未来的 CO<sub>2</sub> 排放将从 SAF 的使用中减少 34%,另外 12% 的减少来自 SAF 对需求的影响<sup>[23]</sup>。

### 1.4 SAF 与碳市场的协同

基于相同的目标,SAF 与碳市场在减排量中的互补关系和 in 应用中的价格互动关系吸引了大批学者的关注。文献[17,24-25]基于不同的模型工具(系统动力学、蒙特卡洛模拟、一般均衡模型、航空投资组合管理工具、FLEET(fleet-level environmental evaluation tool)模型、贝叶斯推理模型)研究了 SAF 政策和目标对运营效率、航空排放及企业绩效的影响。Chen 等<sup>[26]</sup>基于两阶段碳交易模型的航空二氧化碳减排市场框架,分析了未来 10 年不同 SAF 应用情景下的减排效率和不同市场化政策下碳减排激励。Li 等<sup>[23]</sup>研究表明,航空业纳入欧盟排放交易会提高航空公司的效率。上述研究深化了对 SAF 环境效应和减排成本的认识。

目前,关于 SAF 减碳的相关研究的应用场景大

多集中欧美国家,并基于自身的资源禀赋、产业规划和能源战略展开,尚缺乏针对中国国情的 SAF 减排研究。鉴于此,综合考虑国际认可和自主可控原则,对适宜在中国发展的 SAF 技术路线分析其减排潜力与成本,以期为行业可持续发展提供学术参照和“定量解”。

## 2 SAF 技术路线描述

酯和脂肪酸加氢路线(HEFA)、气化-费托合成路线(FT)、醇制航煤路线(AtJ)、电转液路线(PtL)这 4 种路线被广泛认为在航空业具有重要的发展前景,也是全球燃料供应商的重点领域。HEFA 主要使用非食用动植物油脂作为原料,通过两段加氢工艺来生产<sup>[27]</sup>。FT 主要使用农业与林业废物、城市固体废物、种植的纤维素能源作物原材料,通过原料预处理、生物质气化、气体调节、酸性气体去除、FT 合成和合成原油精炼 6 个步骤转化<sup>[28]</sup>。AtJ 技术是以木质纤维素等生物质原料先转化为生物质醇类,醇脱水生成烯烃,生成的烯烃聚合成链烯烃,再通过加氢改质工艺,生产出航煤产品<sup>[29]</sup>。PtL 是首先将工业废气或空气中的 CO<sub>2</sub> 富集为高浓度状态,再与绿氢经费托反应和加氢异构过程转化为可持续航空燃料组分的一种炼制工艺。与传统航空化石燃料相比,HEFA 路线的减排潜力 73% ~ 84%,G + FT 路线可以减少 85% ~ 94% 的二氧化碳排放量,AtJ 路线为 85% ~ 94%,而 PtL 路线理论上可以实现 100% 的减排<sup>[6]</sup>。

从技术层面分析,HEFA 路线的技术成熟度(technology readiness level, TRL)和燃料准备级别(fuel ready level, FRL)最高,均为 9,即表示以废弃食用油脂为原料的 HEFA 路线技术是非常成熟,且达到了商业化运营的阶段。而 FT 路线的 TRL 和 FRL 均在 6 ~ 8,表明其技术成熟度较高,但还不能完全进行商业化,已进入认证阶段。AtJ 路线 TRL 和 FRL 分别在 6 ~ 8、7 ~ 8,其有望逐渐走出示范阶段进入商业化运营。而 PtL 尚处在初期实验阶段。HEFA、FT、AtJ 路线是最有可能实现 SAF 量产的路线。

从原料供给的中国国情出发分析,HEFA 路线主要以废弃油脂为主要原料,其原料可利用量为 340 万 t/年,但目前大部分原料被用来出口,只有较少部分留在国内。FT 路线的原料包括农业废弃物(秸秆等)、林业废弃物(森林采伐剩余物、木材加工剩余物等)、城市固体废物,其目前的可用量分别为 20 700、19 500、2 350 万 t,在 SAF 生产率 10% 的情况下,其 SAF 年产能分别可以达到 2 070、1 950、

235 万 t<sup>[30]</sup>。因此,以农业和林业废弃物为原料的 FT 路线会生产大量的 SAF。

考虑到中国粮食安全、能源安全,粮食作物、食用油脂类经济作物不适宜作为 SAF 原料。酯类原料在现有收集管理模式下,原料价格居高不下,终端产品缺乏市场长期竞争优势,城市固体废弃物存在收集成本高、处理难度大的问题且工艺有待完善提升。根据文献[6,31]的研究结论:HEFA 路线是近期(2024—2035 年)最适合中国的路线,FT 路线最有可能在中长期(2036—2050 年)满足民航需求。可以给出中国可持续航空燃料的发展建议分为三个阶段:2024—2035 年以废弃油脂为原料的 HEFA 路线为主,FT 路线与 PtL 路线小规模示范生产为补充;2035 以后以农业废弃物和林业废弃物为主要原料的 FT 路线替代 HEFA 路线为主;2050 年以后 PtL 路线为主。

### 3 SAF 的减排成本

SAF 技术路线的减排成本参照 Sterner 等<sup>[32]</sup>、Tomaschek 等<sup>[20]</sup>提出的方法进行计算,计算公式为

$$MC_i = \frac{P_i - P_{ref}}{ER_i} = \frac{\Delta P}{ER_i} \quad (1)$$

式(1)中:  $MC_i$  为通过不同途径  $i$  获得的 SAF 相关的减排成本, CNY/kgCO<sub>2e</sub> (其中 CO<sub>2e</sub> 为二氧化碳当量);  $P_i$  为通过途径  $i$  获得的 SAF 的最低销售价格 (minimum selling price, MSP), CNY/GJ; 2022 年中国航空煤油均价 6 586.4 CNY/t, 航空煤油的能量密度为 0.035 GJ/L, 则航空煤油的价格  $P_{ref}$  转为 188.2 CNY/GJ;  $ER_i$  为 CORSIA 指南通过途径  $i$  减少的碳排放量<sup>[33]</sup>, kgCO<sub>2e</sub>/GJ。

#### 3.1 SAF 的生命周期排放量

SAF 路线的总生命周期排放值指符合国际航空碳抵消与减排机制 (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA) 条件的燃料默认生命周期排放值, 而默认生命周期排放量等于实际核心生命周期排放 (life cycle assessment, LCA) 加对应的诱发土地利用变化量 (induced land use change, ILUC)<sup>[34-35]</sup>。HEFA 路线在中国的主要原料是餐厨废油等废弃油脂, FT 路线在中国的主要原料是秸秆等农业废弃物、林业废弃物、城市固体废弃物, 根据 GORSIA 指南<sup>[33]</sup> 原料是废物、残渣或副产品的原料生产的, 则实际的核心 LCA 值应为总生命周期排放值。HEFA 路线、FT 路线的总生命周期排放量即其核心生命周期排放值 LCA (单位: gCO<sub>2e</sub>/MJ 表示飞机发动机生产和燃烧的燃料每兆焦耳的二氧化碳当量克数), 以废弃食用油脂为原

料的 HEFA、以农业废弃物、林业废弃物、城市固体废弃物为原料的 FT 路线减排潜力分别为 84.4%、91.3%、90.7%、94.2%, 如图 1 所示。

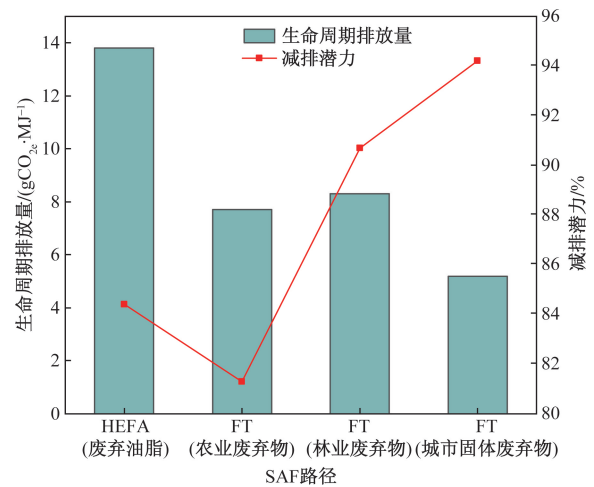


图 1 不同 SAF 路径的生命周期排放值和减排潜力

Fig. 1 Lifecycle emissions and reduction potential of different SAF pathways

为了计算 SAF 途径的减排, 根据式(2)<sup>[18]</sup> 将 EF (单位: gCO<sub>2e</sub>/MJ) 转为 ER (单位: kgCO<sub>2e</sub>/GJ)。

$$ER_i = 3.16 \times 23.0 \times \left(1 - \frac{EF_i}{89.0}\right) \quad (2)$$

式(2)中: 3.16 为根据 CORSIA 的转换系数, kgCO<sub>2e</sub>/GJ<sub>fuel</sub>, 表示每吨航空煤油排放 3.16 t 二氧化碳当量; 23.0 表示每千兆焦耳的能量所对应的质量是 23.0 千克, kg/GJ;  $EF_i$  为通过途径  $i$  产生的与 SAF 相关的生命周期碳排放值, gCO<sub>2e</sub>/MJ; 89.0 为化石煤油的基线生命周期排放值<sup>[36]</sup>, gCO<sub>2e</sub>/MJ。

以废弃食用油脂为原料的 HEFA、以农业废弃物、林业废弃物、城市固体废弃物为原料的 FT 路线相比于化石煤油减少的碳排放量分别为 61.3、66.4、65.9、68.4 kgCO<sub>2e</sub>/GJ, 如图 2 所示。

#### 3.2 SAF 售价与减排成本

预估的不同路线 SAF 最低出售价格来自 Martinez-Valencia 等<sup>[37]</sup>、Hamdan 等<sup>[38]</sup> 的研究报告, 2022 年 1 美元 = 6.726 1 元人民币, 如表 1 所示。以 2022 年中国航空煤油均价 160 CNY/GJ 相比, 大部分可持续航空燃料的最低出售价格高于航空煤油。由于不同路线的不同原料, 同一路线的同一原料在不同时期、不同地点的价格变化浮动大, 以及生产 SAF 的资本投入、固定运营成本的不确定性、产量的不确定性、燃料和能源价格的不确定性、政策的不确定性都会对 SAF 的最低出售价格造成影响<sup>[39-40]</sup>, 进而导致 SAF 的减排成本的价格变化浮动大。同时考虑到地沟油的获得价格高于航空煤油

的市场价格,无论技术如何改进都改变不了原料比产品价格高这一事实,则 HEFA 路线最低出售价格的最小值应大于 160 CNY/GJ 的航空煤油市价。因此,基于文献[37-38]理论值并结合市场实际情况,根据式(1),以废弃食用油脂为原料的 HEFA、以农

业废弃物、林业废弃物、城市固体废弃物为原料的 FT 路线减排成本分别为 0 ~ 1 025.9、2 307.2 ~ 4 536.1、488.6 ~ 2 179.4、327.0 ~ 1 566.1 CNY/tCO<sub>2e</sub>,如图 3 所示。

根据 CORSIA 指南,结合市场调研,得到不同路线的 SAF 中 HEFA 路线的技术成熟度 TRL 和燃料准备级别 FRL 最高,均为 9,即表示以废弃食用油脂为原料的 HEFA 路线技术是非常成熟,且达到商业化运营的阶段。而 FT 路线的 TRL 和 FRL 在 6 ~ 8 表明其技术成熟度较高,但还不能完全进行商业化,已进入认证阶段。根据中国 SAF 原料的供应能力,预计未来以农业废弃物和林业废弃物为原料的 FT 路线年产量将分别达到 2 070、1 950 万 t,而以废弃油脂为原料的 HEFA 路线年产量为 136 万 t。表 2 为中国不同 SAF 技术经济分析。

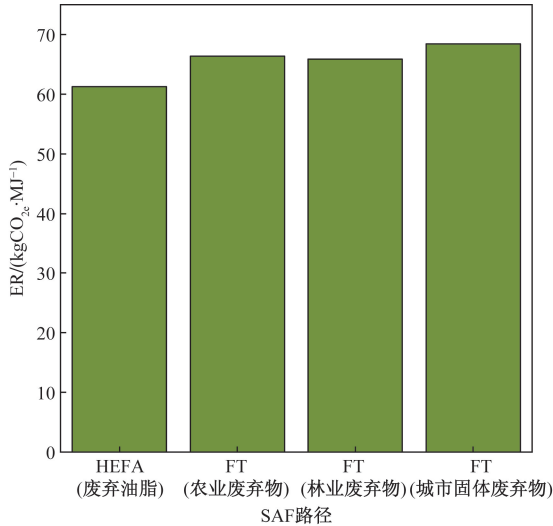


图 2 通过不同途径减少的碳排放量

Fig. 2 Carbon emissions reduced through different pathways

表 1 SAF 的最低出售价格

Table 1 Minimum selling price of SAF

技术路线	原料	MSP/(USD·L <sup>-1</sup> )	MSP/(CNY·GJ <sup>-1</sup> )
HEFA	废弃食用油脂	0.56 ~ 1.16	160.00 ~ 222.89
FT	农业废弃物	1.63 ~ 2.40	313.20 ~ 461.20
FT	林业废弃物	1.00 ~ 1.58	192.20 ~ 303.62
FT	城市固体废弃物	0.95 ~ 1.39	182.42 ~ 267.12

注:航空煤油的能量密度取 0.035 GJ/L,能量密度与航空煤油相当。

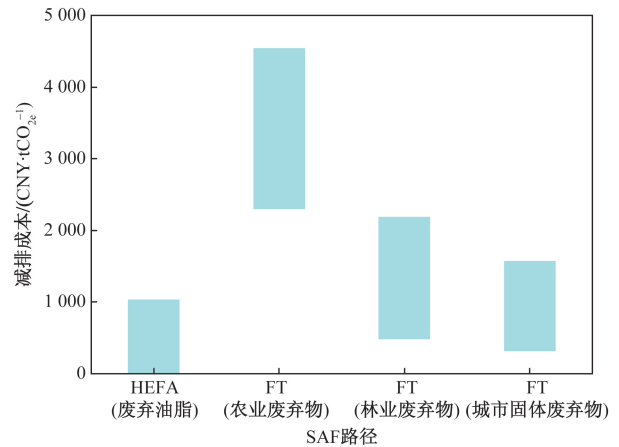


图 3 不同 SAF 路径的减排成本

Fig. 3 Emission reduction costs of SAF from different pathways

表 2 中国不同 SAF 技术经济分析

Table 2 Techno-economic analysis of different SAF technologies in China

技术路线	HEFA	FT	FT	FT
原料	废弃油脂	农业废弃物	林业废弃物	城市固体废弃物
转化率/%	50 ~ 70	14 ~ 18	14 ~ 18	—
原料成本/(CNY·t <sup>-1</sup> )	6 000 ~ 9 000	500 ~ 600	500 ~ 600	—
MSP/(CNY·GJ <sup>-1</sup> )	188.2 ~ 192.2	313.2 ~ 461.2	188.2 ~ 303.62	188.2 ~ 267.12
LCA/(gCO <sub>2e</sub> ·MJ <sup>-1</sup> )	13.9	7.7	8.3	5.2
减排贡献(相比传统航煤)/%	84.4	91.3	90.7	94.2
ER/(kgCO <sub>2e</sub> ·GJ <sup>-1</sup> )	61.3	66.4	65.9	68.4
技术成熟度 TRL <sup>[40]</sup>	9	7 ~ 8	7 ~ 8	7 ~ 8
燃料准备级别 FRL <sup>[29]</sup>	9	6 ~ 8	6 ~ 8	6 ~ 8
产能 <sup>[40]</sup> /(10 <sup>4</sup> t·a <sup>-1</sup> )	136	2 070	1 950	235
主导单位	中国石化镇海炼化分公司、河南省君恒实业集团生物科技有限公司、浙江嘉澳环保科技有限公司	国家电力投资集团有限公司、中国节能环保集团有限公司、中科合成油技术股份有限公司	中国节能环保集团有限公司	中国节能环保集团有限公司
所需政策支持	地沟油出口限制	废弃物收集		

## 4 基于 SAF 的减排

中国民航提出了 2025 年 SAF 消费量要达到 2 万 t 以上,同时 IATA 给出了 2025—2050 年不同阶段 SAF 的减排潜力<sup>[41]</sup>。从以上两点出发,从 2025 年开始预测 SAF 减排量。首先预测在不采取减排措施情况下中国民航 2025—2060 年的碳排放量。中国民航碳排放量的核算边界为中国境内注册的商业航空公司飞行活动所带来的二氧化碳排放(不含范围二和范围三排放)。民航碳排放量的计算采用燃油消耗量与航空煤油碳排放因子的乘积。航空煤油碳排放因子为 3.15,表示消耗每吨航空煤油排放 3.15 tCO<sub>2</sub>。

组合预测模型因其能通过结合多个预测模型进行预测,可以充分利用各个模型的优点,提高预测精度,而被众多研究人员采用<sup>[42]</sup>。杨新渥等<sup>[43]</sup>以珠三角地区为例利用组合预测法对珠三角地区的民航运输量进行了长期的预测。俞佳立等<sup>[44]</sup>将指数平滑法和灰色预测法组合,预测了管道货运量。张九跃等<sup>[45]</sup>通过研究得出组合预测法比单一预测法误差更小、精度更高。因此,以 2010—2019 年中国民航年航煤耗量作为基础数据序列,利用趋势外推法、指数平滑法分别预测,再通过组合预测模型对中国 2025—2060 年的民航燃油消耗量进行预测。

### 4.1 油耗量预测

趋势外推法基于时间序列数据中的趋势进行分析和推断,从而预测未来的数值,假设过去的趋势在未来会继续保持,主要通过拟合历史数据的趋势线来预测未来的数据变化趋势,计算公式为

$$y_t = -499\ 854.35 + 249.36x_t \quad (3)$$

式(3)中: $y_t$ 、 $x_t$  分别为预测时间与预测值。

指数平滑法则是一种基于加权移动平均的方法,对时间序列数据进行平滑处理,以减少随机波动的影响,更好地捕捉趋势,预测公式为

$$Y_{t+T} = 3\ 209 + 162.03T \quad (4)$$

式(4)中: $Y_{t+T}$ 、 $T$  分别为预测值与超前期数。

两种不同预测方法的平均绝对误差分别为 0.05、0.12。组合预测模型为

$$Y_t = Q_1 y_1 + Q_2 Y_{t+T} \quad (5)$$

式(5)中: $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为趋势外推法和指数平滑法的权重, $Q_1 + Q_2 = 1$ ;  $Y_t$  为在  $t$  时间的组合预测值; $y_1$  和  $Y_{t+T}$  分别为趋势外推法和指数平滑法的预测值。

对平均预测误差大的赋予较小权重,平均预测误差小的赋予较大权重,趋势外推法的平均预测误差  $D_1 = 0.05$ ,指数平滑法的平均预测误差  $D_2 = 0.12$ ,

$D_2/D_1 = 0.12/0.05 = 2.4/1$ ,则  $Q_1 = 0.69$ ,  $Q_2 = 0.31$ 。根据趋势外推预测、指数平滑预测的值以及组合预测模型,计算出 2025—2060 年中国民航年航煤耗值如图 4 所示。

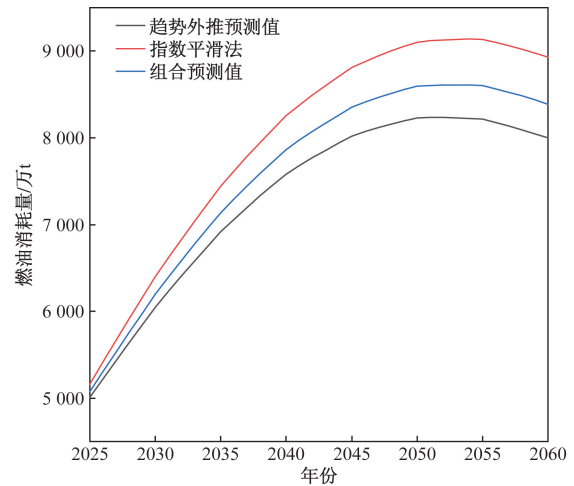


图 4 2025—2060 年中国民航油耗预测量

Fig. 4 Forecasted aviation fuel consumption in China for the period 2025—2060

### 4.2 SAF 减排量情景分析

考虑到 2025—2060 年这一较长的时间段,除 SAF 减排技术的发展外,还会有 COASIA 市场机制、空管技术的发展以及氢能、电能飞机的进入,因此在不同的时间段 SAF 减排的贡献率也会有所不同。IATA 提出了为实现 2050 航空净零排放,从 2025—2050 年不同的关键时间点 SAF 产量应达到总燃料需求的比例<sup>[41]</sup>,德勤预计到 2050 年,SAF 将为航空业净零排放做出 50%~75% 的碳减排贡献<sup>[46]</sup>。Cui 等<sup>[47]</sup>研究表明,使用 SAF 可以减少 50%~90% 的二氧化碳和甲烷的排放。不同的研究机构和国际组织对于未来 SAF 的减排贡献有着不同的研究结论。未来中国不同阶段 SAF 的减排量将受到众多不确定因素的影响,如技术、运营和基础设施能效提高会减少对 SAF 的需求,国际社会对民航减排提出更高的要求导致的减排压力会强制 SAF 使用比例的上升,新技术(电能、氢能飞机)出现革命性变革进而对减排做出更大的贡献。与此同时,燃油消耗与所使用的飞机机型、运行环境、航空公司的商业模式、航线结构等因素有关,随着飞机机型的升级、运行环境的改善、航线结构的优化等措施,从长期来看中国民航航煤基数增长趋势。

基于以上不确定因素,定义了不同阶段 3 种不同的 SAF 占总燃油消耗量情景:冻结情景、可能情景、乐观情景。冻结情景假设不采取任何减排措施的碳排放量,即根据民航碳排放量的核算方法,以

及图 4 预测的中国民航 2025—2060 年油耗量,可以计算出 2025—2060 年中国民航碳排放量。可能情景假定中国未来 SAF 占市场燃料需求的比例达到国际航空运输协会的要求,到 2025 年、2030 年、2035 年、2040 年、2045 年、2050 年 SAF 分别占总燃料需求的 2%、5.2%、17%、39%、54%、65%<sup>[41]</sup>。乐观情景假设执行更严格环境政策、SAF 技术创新取得重大突破的情况下,SAF 应用加速发展,2025 年和 2030 年 SAF 将分别占航煤消耗总量的 10% 和 30%<sup>[47-48]</sup>,2050 年达到 75%<sup>[49]</sup>,2035 年、2040 年、2045 年分别达到 35%、45%、65%,由于目前市场 SAF 大规模应用的具体情景还不明确,所以据以上分析分阶段设置两种不同比例的 SAF 实施情况来模拟不同 SAF 掺混措施对于行业碳排放的影响程度,如表 3 所示。ICAO 提出燃料强度到 2050 年每年将会提升 0~2%<sup>[50]</sup>,而从历史数据来看,中国民航年燃料强度会提升 0.3%。到 2025 年、2030 年、2035 年、2040 年、2045 年、2050 年、2055 年的年燃油强度分别为 0.6%、0.9%、1.2%、1.5%、1.8%、2.1%、2.4%,如表 3 所示。

表 3 2025—2060 年分阶段 SAF 贡献率与燃油强度  
Table 3 Contribution rate and fuel intensity of SAF in stages from 2025 to 2060

阶段/年	SAF 掺混比例/%		燃油强度/%
	可能情景	乐观情景	
2025—2029	2.0	10	0.6
2030—2034	5.2	30	0.9
2035—2039	17.0	35	1.2
2040—2044	39.0	45	1.5
2045—2049	54.0	65	1.8
2050—2054	65.0	75	2.1
2055—2060	65.0	75	2.4

基于以上分析,如图 5 所示,如果不考虑采取 SAF 在内的任何减排措施,那么随着航空需求快速增长,中国民航业碳排放快速上升,在 2050 以后才能达到峰值,2025—2060 年累计排放量达到 864 308 万 t。而在可能情景和乐观情景下,中国民航业碳排放分别在 2034 年、2029 年达到峰值,分别为 20 773、16 944 万 t,累计碳减排量分别为 341 061、446 707 万 t。这意味着随着 SAF 使用量的增加,可能情景和乐观情景下到 2060 年相比于冻结情景的碳减排效率分别为 65% 和 75%,SAF 的减排潜力进一步发挥,推动民航业实现碳达峰碳中和目标,如图 6、图 7 所示。

### 4.3 SAF 减排成本情景分析

基于第 3 节 SAF 技术路线的描述,假设 2025—2035 年中国 SAF 技术路线以 HEFA 为主,2036—

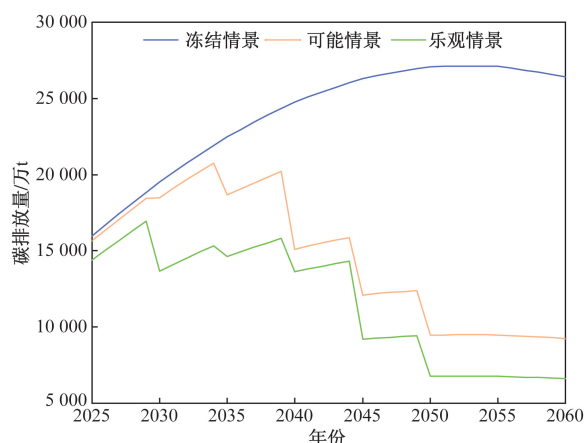


图 5 3 种情景下 2025—2060 中国民航碳排放量  
Fig. 5 Carbon emissions of China's Civil Aviation from 2025 to 2060 under three scenarios

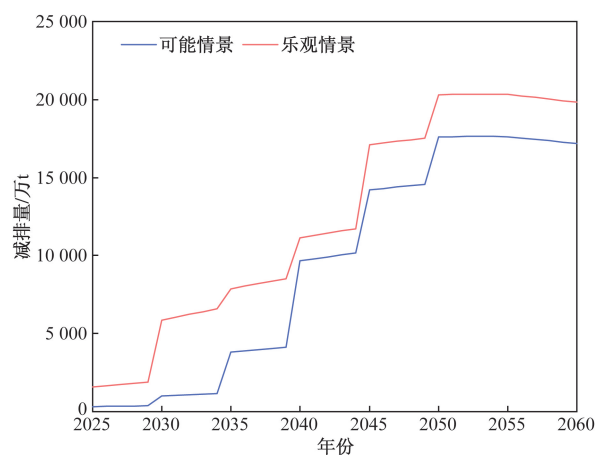


图 6 乐观情景和悲观情景下 SAF 减排量  
Fig. 6 Reduction in emissions from SAF under optimistic and pessimistic scenarios

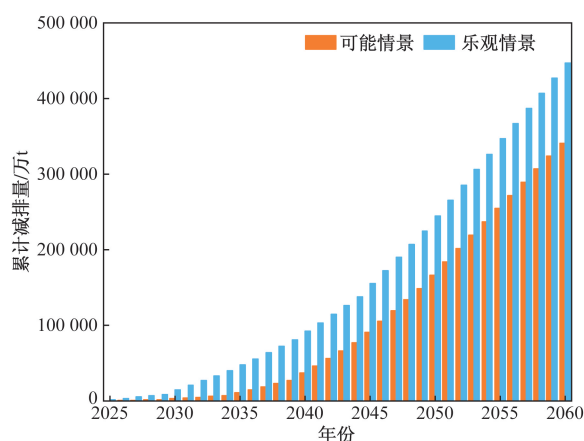


图 7 乐观情景和悲观情景下 SAF 累计减排量  
Fig. 7 Accumulated emissions reduction from SAF under optimistic and pessimistic scenarios

2060 年以 FT 路线为主。SAF 减排成本的计算主要根据 Tomaschek 等<sup>[20]</sup>、Sterner 等<sup>[32]</sup>提出的减排成

本模型, SAF 的最低出售价格通过文献[37]查阅确定范围, 而考虑原油价格的难以预测性, 借鉴 Cui 等<sup>[47]</sup>的处理方法, 以当前的航空煤油价格和 SAF 价格对未来的减排成本进行估算。因此 2025—2035 年 SAF 价格以 4.2 节中计算的 HEFA 价格为主, 2036—2060 年以 4.2 节中计算的 FT 价格为主。利用图 5 预测的 3 种不同情景下的油耗量分阶段分情景进行分析。HEFA 减排成本为 0 ~ 1 025.9 CNY/tCO<sub>2e</sub> (CNY/tCO<sub>2e</sub> 表示减少每吨二氧化碳当量需付出的成本)、FT 减排成本为 327 ~ 4 536.1 CNY/tCO<sub>2e</sub>。从 2025—2060 年, 可能情景下累计碳减排成本分别达到 10 795 ~ 150 864 亿元, 边际碳减排成本为 215 ~ 3 006 CNY/t; 乐观情景下累计碳减排成本达到 13 049 ~ 185 899 亿元, 边际碳减排成本为 199 ~ 2 828 CNY/t。乐观情景下会有更高的碳减排量, 但同时也会导致较大碳减排成本, 因此需要降低 SAF 生成成本, 实现“双碳”目标的同时降低行业的减排负担, 如图 8 所示。与同类研究相比, 许绩辉等<sup>[51]</sup>研究发现, 由于 SAF 的使用减排成本将会增加 7.6 ~ 10.1 万亿元, 这与本文结论基本一致, 其假设到 2060 年 SAF100% 替代航空煤油, 与本次研究根据 IATA 提出的要求设置的 SAF 掺混比例不同, 且所研究计算的乐观情景下的边际减排成本在其范围内。

## 5 讨论

基于中国自身的资源禀赋, 分析得出中国在近期(2024—2035 年)以废弃油脂为原料的 HEFA 路线为主, 中长期(2036—2050 年)以农业废弃物、林业废弃物、城市固体废弃物为原料的 FT 路线为主。其中中长期主要的 SAF 产量将由农业废弃物和林业废弃物生产。

根据 CORSIA 指南计算出 4 种不同途径的减排潜力和减排成本。其中 HEFA 路线减排潜力最低(为 84.4%), 原料供给有限(340 万 t), 但其减排成本为 0 ~ 1 025.9 CNY/t, 是 4 种路径中最低的, 这也是中国目前 SAF 生产的唯一选择; 农业废弃物的减排成本最高, 最高可达到 4 536.1 CNY/t; 城市固体废弃物的减排潜力是最大的, 为 94.2%, 但其原料供给较少(2 350 万 t)。因此综合考虑减排潜力(90.7%)、减排成本(488.6 ~ 2 179.4 CNY/tCO<sub>2e</sub>)以及原料供给能力(可用量达到 19 500 万 t), 以林业废弃物为原料的 FT 路线是中长期中国 SAF 生产的最优选择。

(3) 冻结情景、可能情景、乐观情景下年中国民航碳排放量分别在 2053 年、2034 年、2029 年达到峰

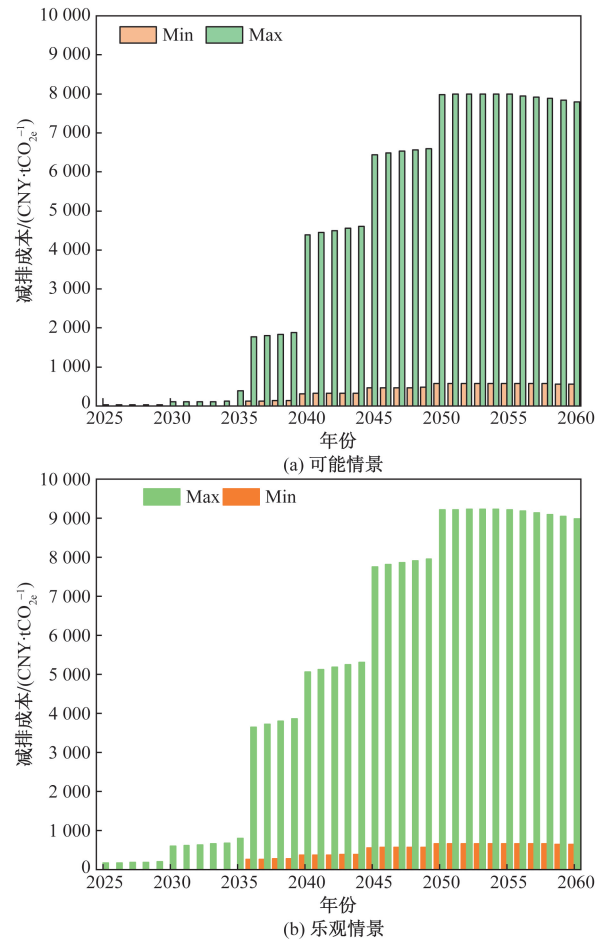


图 8 可能情景和乐观情景下 2025—2060 年碳减排成本  
Fig. 8 Carbon reduction costs from 2025 to 2060 under possible and optimistic scenarios

值, 分别为 27 123、20 773、16 944 万 t; 到 2060 年, 可能情景与乐观情景下的累计减排量分别为 341 061、446 707 万 t。证明随着 SAF 掺混比例的不不断提升, 民航业的减排量将会大大增加, 碳中和碳达峰目标也更容易实现。在乐观情景下累计碳减排成本 13 049 ~ 185 899 亿元高于可能情景下碳减排成本 10 795 ~ 150 864 亿元。因此如果不考虑降低 SAF 成本, 那么尽管可以实现碳减排, 但从经济上对行业会造成很大的压力。

## 6 结论

(1) 加快建立废弃油脂等 SAF 原料规模化高效供应体系。针对目前中国 SAF 原料面临收集半径有效、规模小、经济性差的问题, 结合美国对 SAF 原料发展的举措, 中国需要系统梳理 SAF 原料的市场情况和 SAF 原料的可用性, 发挥中国巨大的废弃油脂、废弃原料种类丰富、工业生产能力强作用, 对可用的原料进行市场分析, 评估和分析影响原料可用性的因素, 建立 SAF 原料专属数据库, 取消废弃

油脂的出口退税,赋予生物航煤的海关编码措施使 SAF 原料留在国内,降低 SAF 生产的成本。

(2)加强重点路线的研发投入和支持力度。目前中国在 HEFA 工艺和 FT 技术路线上具备工业化技术,生物质为原料的糖平台催化生产等技术尽快进入工业化示范、减排潜力较大的 AtJ 路线和 PtL 路线中国企业应加快开发。为了加快 SAF 技术应用、降低成本和推进商业化进程,建议制定 SAF 应用的长期规划,打通 SAF 的创新链、产业链和资金链,整合创新资源,大力推进“产学研”一体化的技术创新与激励机制。

(3)完善产业政策支持体系、推动 SAF 产业健康发展。应需要立足实际,探索制定符合中国国情、行之有效的产业政策支持。加大国家财政转移支付力度,以及区域间、行业间的横向补偿机制,以激励 SAF 整个产业链的研发、生产和使用。建立和落实 SAF 原材料采购简易征收政策、减计收入的优惠政策、设备购置税减免政策、研发费用加计扣除政策、SAF 基础设施项目的投资经营所得的税收优惠政策等财税支持政策。

#### 参 考 文 献

- [1] Allen M R, Lee D S, Proud S R, et al. Quantifying aviation's contribution to global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(10): 104027.
- [2] International Civil Aviation Organization. Environmental trends in aviation to 2050 [EB/OL]. (2022-09-24) [2024-12-03]. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art7.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art7.pdf).
- [3] Bauen A, Bitossi N, German L, et al. Sustainable Aviation Fuels [J]. *Johnson Matthey Technology Review*, 2020, 64(3): 263-78.
- [4] 原赛男, 朱晓峰. SAF——中短期民航减排的最佳手段[J]. *大飞机*, 2023(9): 14-20.  
Yuan Sainan, Zhu Xiaofeng. SAF: the best means for short-to medium-term aviation emissions reduction[J]. *Big Aircraft Translation*, 2023(9): 14-20.
- [5] International Air Transport Association. Net zero 2050: sustainable aviation fuels [EB/OL]. (2022-07-11) [2024-05-19]. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---alternative-fuels/>.
- [6] Chen Y, Xu C, Yang X, et al. Technology route options of china's sustainable aviation fuel: analysis based on the TOPSIS method [J]. *Energies*, 2023, 16(22): 5129266.
- [7] 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 [J]. *Sustainable Biofuels*, 2021: 269-303.
- [8] American Society of Testing Materials. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons; ASTM D7566-21[S]. Philadelphia: American Society of Testing Materials International, 2023.
- [9] American Society of Testing Materials. Standard specification for aviation turbine fuels; ASTM D1655-05[S]. Philadelphia: American Society of Testing Materials International, 2023.
- [10] 中国民用航空局. “十四五”民航绿色发展专项规划 [EB/OL]. (2021-12-21) [2024-05-19]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3.pdf>.  
Civil Aviation Administration of China. Special Plan for Green Development of Civil Aviation in the 14th Five-Year Plan Period. [EB/OL]. (2021-12-21) [2024-05-19]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3.pdf>.
- [11] Lobo P, Hagen D E, Whitefield P D. Comparison of PM emissions from a commercial jet engine burning conventional, biomass, and fischer-tropsch fuels [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24): 10744-10749.
- [12] Moore R H, Thornhill K L, Weinzierl B, et al. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions [J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 411-415.
- [13] Puschnigg S, Fazeni-Fraisl K, Lindorfer J, et al. Biorefinery development for the conversion of softwood residues into sustainable aviation fuel: implications from life cycle assessment and energetic-exergetic analyses [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 386: 135815.
- [14] Abrantes I, Ferreira A F, Silva A, et al. Sustainable aviation fuels and imminent technologies-CO<sub>2</sub> emissions evolution towards 2050 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 313: DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127937.
- [15] 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, 171: 113032.
- [16] Seber G, Escobar N, Valin H, et al. Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuels from vegetable oils [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 170: DOI:10.1016/j.rser.2022.112945.
- [17] 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.
- [18] Capaz R S, Guida E, Seabra J E A, et al. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: costs and potential [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2020, 15(2): 502-524.
- [19] Klein B C, Chagas M F, Junqueira T L, et al. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries [J]. *Applied Energy*, 2018, 209: 290-305.
- [20] Tomaschek J, Özdemir E D, Fahl U, et al. Greenhouse gas emissions and abatement costs of biofuel production in South Africa [J]. *GCB Bioenergy*, 2012, 4(6): 799-810.
- [21] Rojas M F, Michailos S, Cardozo E, et al. Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): a combined techno-economic and life cycle assessment [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 292: DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117427.

- [22] Becken S, Mackey B, Lee D S. Implications of preferential access to land and clean energy for sustainable aviation fuels[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 886: 163883.
- [23] 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.
- [24] Martinez L, Peterson S, Brandt K, et al. Impact of services on the supply chain configuration of sustainable aviation fuel; the case of CO<sub>2</sub> emission reductions in the U. S. [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 152: DOI:10.1016/j.rser.2021.111680.
- [25] Chao H, Agusdinata D B, DeLaurentis D A. The potential impacts of emissions trading scheme and biofuel options to carbon emissions of U. S. airlines[J]. *Energy Policy*, 2019, 134: DOI:10.1016/j.enpol.2019.110993.
- [26] Chen D, Yin J, Xu F, et al. A market-based framework for CO<sub>2</sub> emissions reduction in China's civil aviation industry[J]. *Transport Policy*, 2023, 143: 150-8.
- [27] 乔凯, 傅杰, 周峰, 等. 国内外生物航煤产业回顾与展望[J]. *生物工程学报*, 2016, 32(10): 1309-1321.  
Qiao Kai, Fu Jie, Zhou Feng, et al. Review and prospects of the domestic and international bioaviation coal industry[J]. *Journal of Biotechnology*, 2016, 32(10): 1309-1321.
- [28] 李坤鹏, 代萌, 张瀚, 等. 航空煤油生产工艺技术进展[J]. *当代化工*, 2023, 52(6): 1458-1461.  
Li Kumpeng, Dai Meng, Zhang Han, et al. Advances in production technology for aviation kerosene[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2023, 52(6): 1458-1461.
- [29] 王圣, 杨鹤, 闫瑞, 等. 生物航煤生产技术的发展现状[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(7): 2477-2488.  
Wang Sheng, Yang He, Yan Rui, et al. Current status of bio-aviation fuel production technology [J]. *Journal of Biotechnology*, 2022, 38(7): 2477-2488.
- [30] 北京大学能源研究院. 中国可持续航空燃料发展研究报告呈现状与展望[R]. 北京: 北京大学能源研究院, 2022.  
Institute of Energy Research, Peking University. Research report on the development status and prospects of sustainable aviation fuel in China[R]. Beijing: Institute of Energy Research, Peking University, 2022.
- [31] 李婷, 刘琦宇, 王喆, 等. 航空零碳必由之路——下一代可持续航空煤油技术发展前景[R]. 北京: 落基山研究所, 2023.  
Li Ting, Liu Qiyu, Wang Zhe, et al. The path to zero carbon in aviation: prospects for next-generation sustainable aviation fuel technology[R]. Beijing: Rocky Mountain Institute, 2023.
- [32] Sterner M, Fritsche U. Greenhouse gas balances and mitigation costs of 70 modern Germany-focused and 4 traditional biomass pathways including land-use change effects[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2011, 35(12): 4797-4814.
- [33] International Civil Aviation Organization. CORSIA-methodology for calculating actual life cycle emissions values[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2019.
- [34] Prussi M, Lee U, Wang M, et al. CORSIA: The first internationally adopted approach to calculate life-cycle GHG emissions for aviation fuels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 150: 111398.
- [35] 王银辉, 蒋建男, 谢含军, 等. 桥梁工程全寿命周期碳排放流计算与分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(22): 9605-9614.  
Wang Yinhuai, Jiang Jiannan, Xie Hanjun, et al. Calculation and analysis of carbon emission flow in the full life cycle of bridge engineering[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(22): 9605-9614.
- [36] International Civil Aviation Organization. CORSIA default life cycle emissions values for CORSIA eligible fuels: annex 16[S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2021.
- [37] Martinez-Valencia L, Garcia-Perez M, Wolcott M P. Supply chain configuration of sustainable aviation fuel; review, challenges, and pathways for including environmental and social benefits[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: DOI:10.1016/j.rser.2021.111680.
- [38] 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.
- [39] Bann S J, Malina R, Staples M D, et al. The costs of production of alternative jet fuel: a harmonized stochastic assessment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 227: DOI:10.1016/j.biortech.2016.12.032.
- [40] Detsios N, Theodoraki S, Maragoudaki L, et al. Recent advances on alternative aviation fuels/pathways: a critical review[J]. *Energies*, 2023, 16(4): DOI:10.3390/en16041904.
- [41] IATA. 2050 年实现净零排放[EB. OL]. (2021-10-06) [2024-03-17]. <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/2021-10-04-03-cn.pdf>.  
IATA. Achieving net zero emissions by 2050[EB. OL]. (2021-10-06) [2024-03-17]. <https://www.iata.org/contentassets/dcd25da635cd4c3697b5d0d8ae32e159/2021-10-04-03-cn.pdf>.
- [42] 成连华, 李楠, 李树刚, 等. 基于组合赋权-集对分析法的城市人员密集场所风险评价[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(36): 15745-15751.  
Cheng Lianhua, Li Nan, Li Shugang, et al. Risk assessment of urban crowded places based on combined weighting-set pair analysis method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(36): 15745-15751.
- [43] 杨新涅, 王翩然. 基于组合预测的民航运输量分析——以珠三角地区为例[J]. *数学的实践与认识*, 2019, 49(8): 301-310.  
Yang Xinxin, Wang Pianran. Analysis of civil aviation transport volume based on combined forecasting: a case study of the pearl river delta region[J]. *Practice and Understanding of Mathematics*, 2019, 49(8): 301-310.
- [44] 俞佳立, 钱芝网, 王涛. 基于组合预测模型的中国管道货运量的预测分析[J]. *科技与经济*, 2017, 30(1): 101-105.  
Yu Jiali, Qian Zhiwang, Wang Tao. Predictive analysis of China's pipeline freight volume based on combined forecasting models[J]. *Science Technology and Economy*, 2017, 30(1): 101-105.
- [45] 张九跃, 张顺英. 基于组合预测模型的物流园区货运量预测研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2018(6): 229-232, 381-382.  
Zhang Jiuyue, Zhang Shunying. Research on freight volume forecasting of logistics parks based on combined forecasting models[J]. *Urban Road and Bridge Engineering and Flood Control*, 2018(6): 229-232, 381-382.

- [46] 德勤. 中国的可持续航空燃料——航空业碳中和之路[R]. 上海: 德勤中国, 2023.  
Deloitte. Sustainable aviation fuel in china; the path to carbon neutrality for the aviation industry[R]. Shanghai: Deloitte China, 2023.
- [47] Cui Q, Chen B. Cost-benefit analysis of using sustainable aviation fuels in south America[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 435: DOI:10.1016/j.jclepro.2024.140556.
- [48] Liu X, Hang Y, Wang Q, et al. Flying into the future: a scenario-based analysis of carbon emissions from China's civil aviation [J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 85: DOI: 10.1016/j.jairtraman.2020.101793.
- [49] Zhou W, Wang T, Yu Y, et al. Scenario analysis of CO<sub>2</sub> emissions from China's civil aviation industry through 2030 [J]. Applied Energy, 2016, 175: 100-108.
- [50] International Civil Aviation Organization. 2016 environmental report [R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2016.
- [51] 许绩辉, 王克. 中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3412-3424.  
Xu Jihui, Wang Ke. Prediction of medium and long-term carbon emissions in China's civil aviation industry and analysis of technological emission reduction potential [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2022, 42(7): 3412-3424.