

# “绿色腾飞系列报告” (II)

## 中国可持续航空燃料中长期发展的关键问题与建议

2025年3月



北京市朝阳区能源与交通创新中心

## 致谢

感谢在报告评审过程中提供了宝贵专业意见的行业专家和同事，他们是（排名不分先后）：

李顶杰	中国石油和化学工业联合会
汪必耀	中国民用航空总局第二研究所
常世彦	清华大学
吕继兴	中国民航大学
陈继业	中国南方航空集团公司
邢子恒	国泰航空
刘疏桐	道兰环能（MotionECO）
崔琳	Airbus 空中客车

## 报告作者

秦兰芝	能源与交通创新中心
安 锋	能源与交通创新中心

## 免责声明

本报告所有研究结果仅供研究参考，不代表资助方及支持方观点。

报告编写过程中虽然已尽力确保资料和信息准确，本机构不会对任何错误、遗漏或依赖资料而引致的结果承担责任或法律责任。



北京市朝阳区光华路9号 时尚大厦 903A

邮编：100020

电话：(+86) 10.5233.8325

邮件：info@icet.org.cn

网址：www.icet.org.cn

# 缩略词

缩写	中文释义
ALK	碱性电解槽
AEM	固体聚合物阴离子交换膜电解槽
ATAG	航空运输行动小组
AtJ	醇制喷气燃料工艺
ASTM	美国材料与试验协会
BtL	生物质转液体
CB	认证机构
CCU	碳捕集与利用
CCUS	碳捕集、利用与封存
CORSIA	国际航空业碳抵消与削减机制
CQC	中国质量认证中心
DAC	直接空气捕集
EEU	合格排放单元
EU ETS	欧盟碳排放权交易体系
GHG	温室气体
G+FT	气化费托合成工艺
HEFA	酯及脂肪酸加氢工艺
IATA	国际航空运输协会
ICAO	国际民航组织
IMO	国际海事组织
IRENA	国际可再生能源署
ISCC	国际可持续发展和碳认证
LCA	生命周期评价
LCFS	低碳燃料标准
LNG	液化天然气
MtJ	甲醇合成航空燃料
MSW	城市固体废物
PEM	质子交换膜电解槽
PSC	点源碳捕集
PtL	电转液
REC	可再生能源证书
RFS	可再生燃料标准
RINs	可再生识别号
RPK	收入客公里
RSB	可持续生物材料圆桌会议
RWGS	逆水煤气变换
SAF	可持续航空燃料

SCS	可持续认证计划
SOEC	高温固体氧化物电解槽
TRL	技术就绪水平
UCO	餐厨废油（地沟油）
WtL	废弃物转液体

## 摘要

航空业是全球公认的难减排（hard-to-abate）领域之一，随着道路交通全面电动化转型进程的推进，航空业将成为未来交通部门的主要排放源之一。国际航空运输协会（IATA）在 2021 年批准了全球航空运输业于 2050 年实现净零碳排放的决议，极大地推进了航空业的减排步伐。通过对现有技术的研究，IATA、ICAO（国际民航组织）均提出，使用可持续航空燃料（SAF）是帮助国际航空业实现净零碳排放的主要手段。在其推动下，SAF 产业呈现快速发展态势。

根据 ICAO 定义，SAF 是指符合可持续性标准的可再生或废物衍生航空燃料。具体而言，SAF 是用于替代传统航空燃料的一种可再生燃料，它的成分与传统航空燃料基本相同，生产原料为多种可持续、可重复获得的生物原料或合成原料。现阶段，SAF 发展受限的主要原因在于价格昂贵，为传统航空燃料的 2~10 倍之多（因技术路线而异）。为推动 SAF 发展和应用，包括欧盟、英国在内的多个国家与地区先后出台了 SAF 强制使用比例目标，美国等国家则制定了税收抵免等激励政策。

中国是世界第二大航空运输国，2024 年航空燃料消费量达到 3928 万吨，航空碳排放量超过 1.23 亿吨。尽管中国尚未确立 SAF 发展和使用的长期规划，但作为航空大国，未来中国必将是国际 SAF 市场的重要参与者，这也是中国实现“2035 年建成航空运输强国”目标的必然要求。2024 年 9 月，中国在国内开启 SAF 应用试点工作，这是一次及时且积极的尝试，也发出了中国发展 SAF 产业的明确信号。

然而，SAF 生产路线多样，技术难题叠加，生产成本高昂，认证过程繁琐，建立完整的 SAF 产业链并非易事。本报告从中国本土实际出发，深入分析了中国 SAF 中长期发展面临的关键挑战，并提出解决思路和建议。报告主要结论如下：

(1) 中国 SAF 发展兼具环境保护、能源转型和优化产业布局三重价值属性，需联合利益相关方完善 SAF 生态体系建设，包括产业体系与政策管理体系。同时，进一步明确不同政府部门及利益相关方在 SAF 发展中的职责与作用，促进多政府机构及利益相关方的通力协作。下面总结了影响中国 SAF 生态体系建设的关键因素：

- ✓ 气候变化压力和双碳目标是推动 SAF 发展的宏观推手。生态环境部应对气候变化司、交通部国际合作司等单位有较强的驱动力督促相关部门明确 SAF 发展目标和应用规划。
- ✓ 能源转型和新质生产力是 SAF 产业发展的核心驱动力，国家发改委能源局作为负责中国能源发展与转型的主要政府职能部门，未来也可能承担



SAF 发展规划制定、产业管理、产业政策发布等事项的管理工作。

- ✓ 民航管理部门是 SAF 应用的重要执行者，中国民航局肩负着 SAF 应用规划制定、SAF 产品认证与审定、SAF 实际使用监管等系列职责。
- ✓ 燃料生产商，飞机制造商与航空公司是 SAF 产业链的主体，分别担负着燃料生产、飞机制造及燃料使用主体环节，共同维持 SAF 市场的供需关系平衡。
- ✓ 科研机构、标准化研究院、质量认证中心等第三方机构也是 SAF 发展的重要支撑，尤其在 SAF 技术路线开发与认证、可持续性认证体系与全生命周期大模型建立等方面发挥重要作用。
- ✓ 绿色金融体系的建立是确保 SAF 可持续发展的关键一环。其中包括国家财政支持体系的研究与建立，碳交易机制，低碳燃料标准及碳关税的研究与建立。

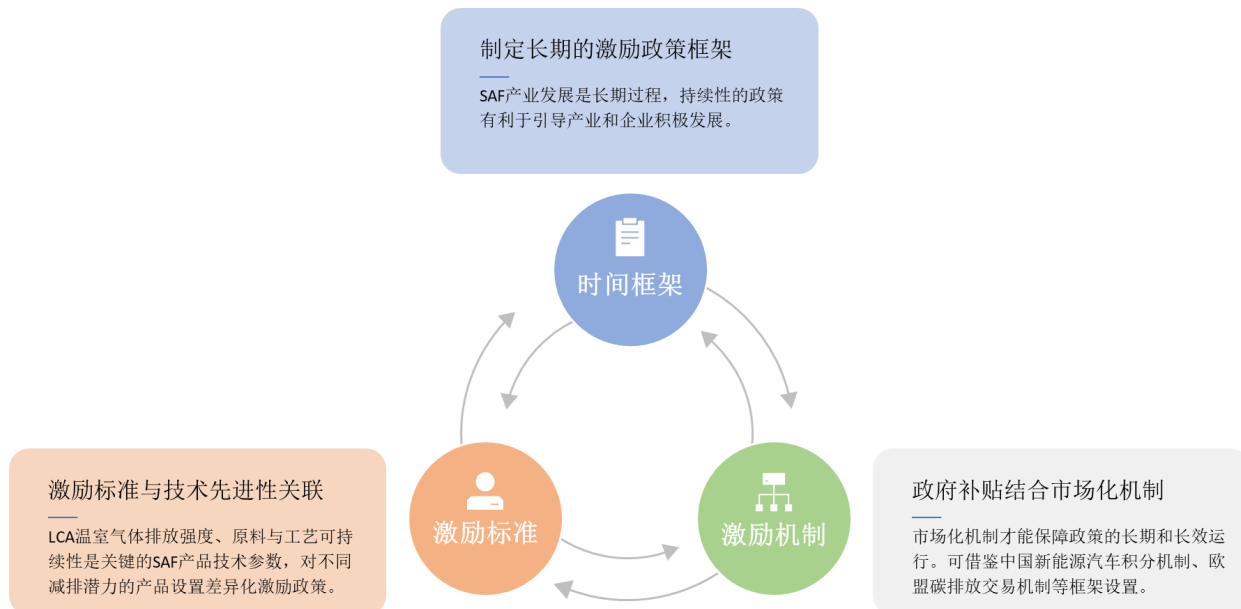


摘要图 1 中国 SAF 发展的主要驱动力

(2) 建立符合中国国情的 SAF 政策体系，保障 SAF 产业的长期可持续发展。

- ✓ 法律法规层面，借助可再生能源法修订契机，明确“可持续航空燃料”相关概念，并在推广与应用部分增加相应条款。
- ✓ 行政监督与管理层面，建议政府部门抓住“十五五”规划制定的机会，围绕产业引导，项目建设、管理与核准，市场准入、组织领导等多个环节出台政策文件。
- ✓ 经济激励与财税补贴方面，需要建立长期激励政策框架，确保补贴、财税优惠等激励标准与 SAF 的技术先进性相关要素进行关联，对不同减排潜力级别的 SAF 产品设置差异化补贴与财税优惠政策。LCA 温室气体排放强度、原料与工艺可持续性评价是评价 SAF 产品技术先进性的核心要素。

- ✓ 在适当时机引入市场化机制来替代政府财政补贴，保障 SAF 产业长期、稳定、高质量发展。市场化机制可参考新能源汽车积分机制、欧盟碳排放权交易机制等框架进行制定，Book & Claim 机制也有望为 SAF 市场的重要支撑。



摘要图 2 SAF 激励政策要素与设置建议

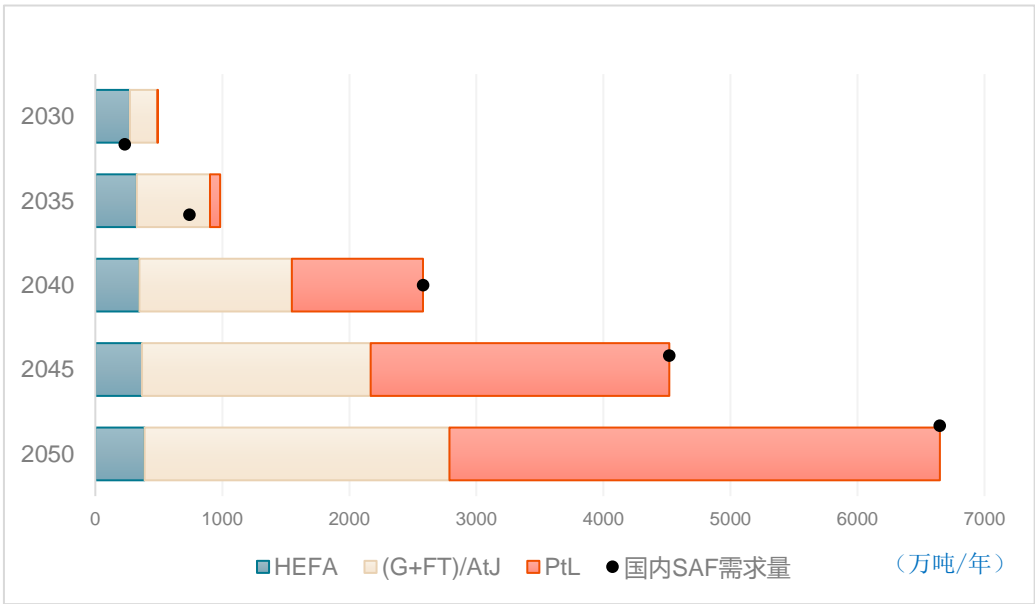
### (3) 制定符合中国国情的 SAF 应用目标及时间表，引导 SAF 产业长期有序发展。

- ✓ SAF 应用目标的制定尽量遵循“先松后紧”原则，给航空公司预留充足的缓冲时间。
- ✓ 确立不同时期的发展里程碑，确保产业发展的可控性。
- ✓ SAF 应用目标中强调合成 SAF（e-SAF，主要通过 PtL 技术路线合成）的重要性，引导企业攻坚技术并提前进行布局。



摘要图 3 建立中国可持续航空燃料长期发展目标

- (4) 构建中国特色的 SAF 中长期发展技术路线图，技术路线的选择需要考虑时间周期和中国各地的资源禀赋，建立“以量带产、技术与规模并重”的发展战略。
- ✓ 从原料与技术发展来看，中国已经具备长期发展和应用 SAF 的条件，不同时期的 SAF 需求可由不同技术路线生产得到的产品满足。近期依托 HEFA 技术路线扶持一批龙头企业，中期重点推动以生物质为原料的气化费托合成、醇制航煤等技术路线的本土化发展，中长期需要攻坚 PtL 技术路线。
  - ✓ 2035 年及之前，HEFA 和(G+FT)/AtJ 技术路线生产的 SAF 可满足中国国内的 SAF 市场需求。如能按照预期发展，在此之前中国生产的 SAF 在满足国内需求后，还将产生一定余量。2035 年以后，PtL 技术路线有望得到快速发展，并逐步成为国内 SAF 市场的主流技术。
  - ✓ 资源分配上，HEFA 工厂可选在四川、广东等餐厨废油产量较为集中的地区；气化费托合成、醇制航煤的 SAF 工厂选址建议靠近黑龙江、山东、河南等生物质资源丰富的地区；PtL（即 e-SAF）路线的 SAF 工厂更适合选在风、光资源丰富的西北、东北等地区，或者在这些地区合成中间体（如绿色甲醇 Green Methanol）后，将其输送至沿海发达地区的 SAF 合成工厂完成燃料生产。



摘要图 4 不同时期各技术路线 SAF 对总体需求量的贡献



(5) 明确 PtL 技术路线是中国 SAF 产业长期发展的核心选择。

- ✓ 中国在绿电、绿氢方面的资源与产能优势是未来发展 PtL 路线的重要保障。
- ✓ 未来一段时期内，化石燃料仍将在中国的能源体系中占有一定比重，源自碳密集型行业的 CO<sub>2</sub>（如工厂排放的 CO<sub>2</sub>）也为 PtL 技术路线中的 CO<sub>2</sub> 捕集提供了重要选项。
- ✓ 如何合理利用中国大量的工业排放 CO<sub>2</sub> 作为碳源进行 SAF 生产是一个急需研究和论证的课题。国际上通用的高碳排放因子可能导致燃料的低碳属性引起争议，需与相关国内外机构充分沟通，确定该过程生产燃料的减排标准，并积极获取国际认可。
- ✓ 提高绿电利用率、降低绿氢与碳捕集成本是 PtL 技术路线亟需解决的核心问题。

(6) PtL 技术路线下，中国在甲醇制 SAF 路径（MtJ）上更具备优势，借助这一机遇可迅速扩大 e-SAF 的规模化生产与应用。

- ✓ 中国是全球绿色甲醇产业重镇，2024 年底已公开的项目产能超过 2700 万吨/年，并以最清洁、低碳的电制甲醇技术路线为主。
- ✓ 绿色甲醇也是航运业减排的核心燃料需求之一，叠加这一应用，可较快形成绿色甲醇产业发展的规模化效应，进而推动绿色甲醇成本不断下探，降低 SAF 整体应用成本。
- ✓ 近期需要加快推动绿色甲醇制备 SAF 的技术路线（MtJ），助力推动该路线通过 ASTM 批准。

(7) 建立和完善中国 SAF 可持续认证体系，积极参与国际交流，尽快与国际认证接轨。

- ✓ 近期，需依托现有国际认证体系，尽快开展 SAF 生态体系及产业链的建设；中长期来看，非常有必要构建一套更符合中国国情的 SAF 认证体系，并得到国际认可。
- ✓ 发挥民航局等相关政府部门在可持续认证相关标准制定方面的监督和管理作用。此外，标准制定机构、中国质量认证中心（CQC）等机构也应积极参与，在 SAF 产业发展与实际操作中发挥优势作用与影响力。
- ✓ 在能力建设方面，中国在生命周期温室气体排放核算模型及方法，特别是针对于 SAF 的全生命周期模型建设与技术路线分析方面的人才队伍培

养有待进一步加强。

- ✓ 积极培育和发展本土的第三方认证机构，作为中国本土 SAF 可持续性认证体系的后备力量与支撑单元。在这方面，已经获得资质的第三方认证机构应当充分利用已有经验，发挥引领作用。

# 目录

<b>第一章 简要背景 .....</b>	<b>1</b>
1.1 民航净零碳排放目标 .....	1
1.2 可持续航空燃料简介 .....	2
1.3 中国 SAF 发展在世界中的位置 .....	5
<b>第二章 建立符合中国国情的可持续航空燃料中长期发展战略 .....</b>	<b>7</b>
2.1 识别中国 SAF 发展驱动力，明确利益相关方，协同驱动 SAF 发展与应用 .....	7
2.2 构建中国特色的可持续航空燃料政策体系 .....	11
2.3 制定中长期 SAF 发展目标 .....	17
<b>第三章 构建中国特色的可持续航空燃料中长期发展技术路线图 .....</b>	<b>21</b>
3.1 SAF 生产技术路线 .....	21
3.2 构建中国特色的 SAF 中长期发展技术路线图 .....	23
3.3 近期依托 HEFA 技术路线，加速建立和完善 SAF 产业链 .....	24
3.4 中期推动以生物质为原料的气化费托合成及醇制航煤等技术路线发展 .....	26
3.5 中长期攻坚 PtL 技术路线，加速 SAF 产业可持续高质量发展 .....	28
3.6 不同时期 SAF 需求量及来源分析 .....	43
<b>第四章 加快制定中国本土的可持续航空燃料绿色认证体系 .....</b>	<b>47</b>
4.1 SAF 可持续性认证概述 .....	47
4.2 中国制定 SAF 可持续性认证体系面临的关键问题 .....	49
<b>第五章 SAF 全球发展回顾与展望 .....</b>	<b>56</b>
5.1 航空业发展现状与展望 .....	56
5.2 航空业减排现状与展望 .....	62
5.3 可持续航空燃料适航审定 .....	67
5.4 可持续航空燃料市场发展 .....	69
<b>结束语 .....</b>	<b>79</b>

# 图目录

图 1 国际航空碳排放趋势 .....	1
图 2 不同措施对实现航空净零碳排放目标的贡献.....	2
图 3 可持续航空燃料的具体含义 .....	3
图 4 中国 SAF 发展的主要驱动力 .....	7
图 5 中国应对气候变化主要部门 .....	8
图 6 典型的中国政策体系组成 .....	12
图 7 SAF 激励政策要素与设置建议 .....	16
图 8 建立中国可持续航空燃料发展目标 .....	19
图 9 中国航空业燃料生命周期碳排放趋势（基于研究假设） .....	20
图 10 不同生产工艺的 SAF 价格 .....	23
图 11 基于中国国情的 SAF 中长期发展战略建议.....	24
图 12 中国餐厨废油分布情况 .....	26
图 13 中国可利用生物质资源分布情况 .....	28
图 14 电子燃料合成过程示意图 .....	29
图 15 2023-2024 年上半年中国新增绿氢项目分布 .....	31
图 16 技术就绪水平等级及含义 .....	32
图 17 PtL 技术路线各工艺过程的技术成熟度水平 .....	33
图 18 不同制氢技术的成本对比 .....	37
图 19 中国主要排放源已投运 CCUS 示范项目的 CO <sub>2</sub> 捕集成本 .....	38
图 20 中国绿色甲醇项目技术路线分布 .....	40
图 21 中国绿色甲醇项目分布 .....	41
图 22 不同燃料类型的新船订单占比（2023.06-2024.06） .....	42
图 23 中国 SAF 预期需求量及使用比例 .....	44
图 24 不同时期各技术路线 SAF 对总体需求量的贡献.....	46
图 25 SAF 可持续性认证的主体归属 .....	48
图 26 SAF 供应链示意图 .....	48
图 27 ISCC 可持续性认证流程示意图 .....	49
图 28 民航二所可持续航空燃料发展研究中心组织架构图.....	50
图 29 不同技术路线的 SAF 生命周期碳排放 .....	53
图 30 国际航空业运输旅客和货物情况 .....	56
图 31 2024-2027 年全球航空客运增速预测 .....	58
图 32 中国民航旅客和货邮周转量趋势 .....	59
图 33 中国运输机队规模和颁证机场数量变化.....	59
图 34 中国制造的 C919 飞机执飞首个商业航班（2023 年） .....	60
图 35 未来 20 年（2043 年）中国民航市场预测 .....	61

图 36 CORSIA 参与国际和地区一览 ..... 63

图 37 CORSIA 规定的碳抵消量计算方法 ..... 64

图 38 中国运输机队燃油效率 ..... 65

图 39 传统航空燃油适航审定流程 ..... 67

图 40 掺混 SAF 的航空燃料适航审定流程 ..... 68

图 41 SAF 历年来的承购协议数与采购量趋势..... 73

图 42 SAF 未来需求量预测 ..... 74

表目录

表 1 全球主要国家和地区 SAF 发展规划/目标..... 11

表 2 国际主要地区针对 SAF 的激励措施 ..... 14

表 3 已获批准的 11 种 SAF 生产工艺（截至 2025 年 1 月） ..... 21

表 4 处于评估过程中的 SAF 生产技术路线（截至 2025 年 1 月） ..... 22

表 5 不同电解水制氢技术路线对比 ..... 34

表 6 两种 CO<sub>2</sub> 捕集形式对比..... 35

表 7 中国百亿投资级绿色甲醇项目（部分） ..... 39

表 8 不同时期餐厨废油回收量及用于 SAF 生产的情况预测..... 44

表 9 中国可再生生物质原料用于 SAF 生产的情况预测..... 45

表 10 中国航空替代燃料可持续性要求及其与 ICAO 的对比..... 52

表 11 分地区航空客运市场情况（2023 年 12 月） ..... 57

表 12 2023-2043 年全球各地区航空客运增速与净增旅客数量 ..... 57

表 13 民航相关的国际组织减排目标与实施机制..... 62

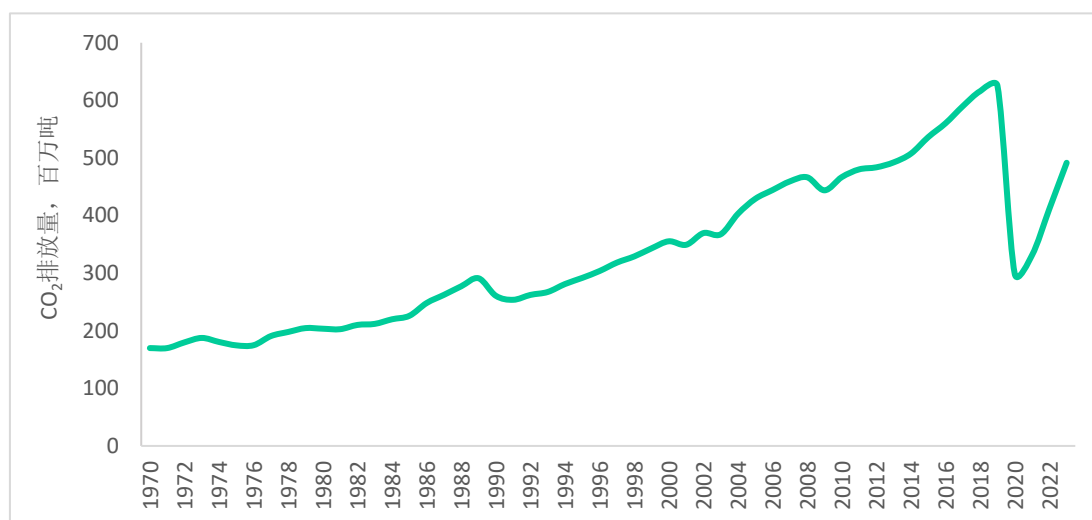
表 14 “十四五”中国民航绿色发展主要指标 ..... 65



# 第一章 简要背景

## 1.1 民航净零碳排放目标

民航占全球二氧化碳排放量的 2.5%，但迄今为止，它对全球变暖的贡献约为 4%<sup>1</sup>。如图 1 所示，全球民航碳排放量在 1990-2019 年间增长了两倍多，2019 年达到 6.25 亿吨。受 COVID-19 疫情影响，民航碳排放量在 2020 年断崖式下降，此后逐步回升，2023 年全球民航碳排放量约为 4.92 亿吨<sup>2</sup>。



来源：作者绘制，数据来自 Statista。

图 1 国际航空碳排放趋势

民航是目前全球化程度最高的交通方式，由于涉及到大量的跨国客货运输，因而其碳排放的影响也是世界范围的。航空被认为是最难减排的交通部门之一，主要原因在于长途飞行目前仍极度依赖传统化石燃料，而使用低碳燃料替代化石燃料面临价格过高、产量不足、安全与适应性等一系列挑战。

尽管如此，航空业减排乃至实现净零碳排放仍是民航行业的共同愿望。国际民航组织（ICAO）于第 41 届大会上确立了到 2050 年实现国际航空业净零碳排放的长期全球理想目标<sup>3</sup>。在此之前，ICAO 就已经通过了具有历史意义的国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）<sup>4</sup>，以督促航空业不断降低碳排放。国际航空运输协会（IATA）也提出

<sup>1</sup> Hannah Ritchie (2024) - "What share of global CO<sub>2</sub> emissions come from aviation?" Published online at OurWorldinData.org. <https://ourworldindata.org/global-aviation-emissions>

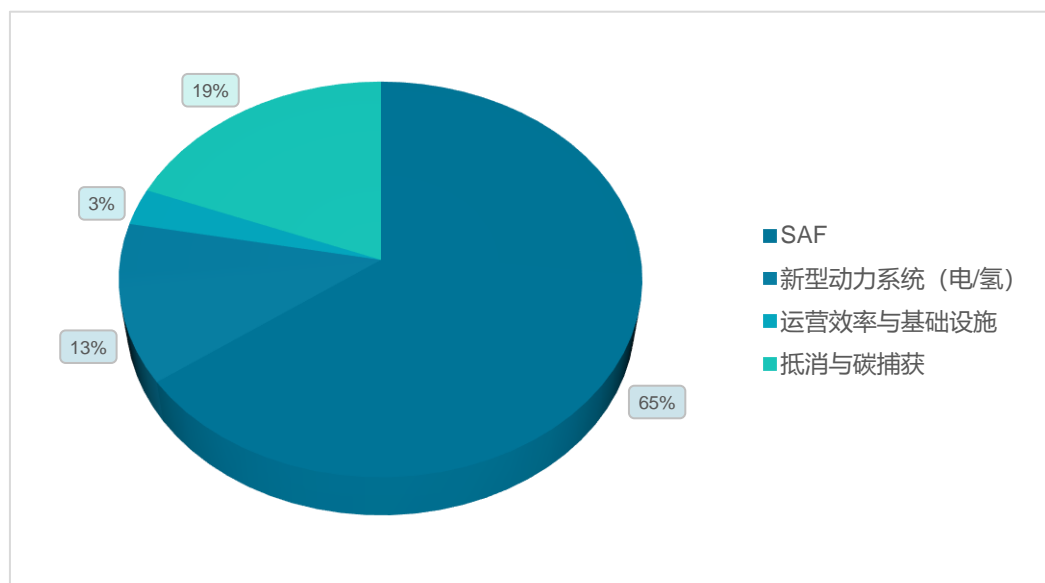
<sup>2</sup> Statista, <https://www.statista.com/statistics/1417212/international-aviation-emissions-worldwide/>

<sup>3</sup> ICAO, Resolution A41-21: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Climate Change.

<sup>4</sup> Introduction to CORSIA, <https://www.icao.int/environmental->

了到 2050 年实现全球航空业净零碳排放的长期目标。

据 IATA 数据，实现 2050 航空净零碳排放目标需要多种措施共同努力，其中，SAF 将贡献 65%的减排量<sup>5</sup>。需要指出的是，新型动力系统（电动/氢燃料）、运营效率与基础设施这两种措施对航空减排的贡献潜力存在上限。换言之，如果 SAF 的使用不能达到预期水平，那么更多的航空碳排放将只能通过碳交易等市场机制进行抵消，这将加重全球其他领域的碳减排负担。因此，要尽可能发挥 SAF 在航空减排中的作用。



来源：作者绘制，数据来自于 IATA。

图 2 不同措施对实现航空净零碳排放目标的贡献

## 1.2 可持续航空燃料简介

SAF 被定义为符合 *Annex 16 - Environmental Protection, Volume IV, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)* 中规定的可持续性标准的可再生或废物衍生航空燃料，用于替代传统航空燃料，它的成分与传统航空燃料基本相同，生产原料为多种可持续、可重复获得的生物原料或合成原料。SAF 燃烧时产生的 CO<sub>2</sub> 可借助原料生产得以中和，同时产生的烟尘、氮氧化物和硫化物也低于传统航空燃料<sup>6</sup>，是助力航空业实现净零碳排放的重要选择。SAF 的具体涵义如图 3 所示。

protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\_Art56.pdf

<sup>5</sup> IATA, Our commitment to Fly Net Zero by 2050, <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/flynetzero/>

<sup>6</sup> 王翔宇，可持续航空燃料发展展望. 航空动力，2022.

可持续	航空	(航空) 燃料
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 能够以符合经济、社会和环境目标的方式持续并反复地获得的原材料</li> <li>• 不与其他需求（如食品、土地和水资源）发生冲突</li> <li>• 减少航空行业对气候变化的影响</li> <li>• CORSIA规定了14个可持续性评价指标*</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 是传统航空燃料的替代选择</li> <li>• 通过一种替代方法来加工成航空燃料</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 符合商用飞机使用技术要求</li> <li>• 可在现有技术和燃油系统中使用</li> <li>• 确保航空运行的安全性</li> <li>• 插入式/掺混（drop-in）燃料</li> </ul>

来源：作者绘制，资料参考航空运输行动组织（ATAG） *Beginner's guide to sustainable aviation fuel*, edition 4；\*可持续性评价指标包括温室气体、碳储量、碳减排永久性、水、土壤、空气、生态保护、废弃物与化学品管理、地震与振动影响、当地经济发展、人权、土地使用权、水权和粮食安全，参见 ICAO document, *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*.

图 3 可持续航空燃料的具体含义

要成为全球认可、可用于减排履约的燃料，SAF 的生产和认证过程必须经过 ICAO 等国际官方机构的认可。其中，SAF 转换过程（即生产技术路线）由美国材料与试验协会（ASTM）等机构负责评估和审批。截至 2025 年 1 月，已经批准的 SAF 生产工艺共有 11 种，另外由 11 种工艺正处于评估过程中<sup>7</sup>。在已批准的 SAF 生产技术路线中，只有 HEFA 是目前唯一大规模用于商业生产 SAF 的技术路线<sup>8</sup>。此外，醇制喷气燃料工艺（AtJ）、气化费托合成（G+FT）、电转液（PtL，所生产的 SAF 又被称为 e-Fuel 或 e-SAF）也被认为是非常具有规模化应用前景的生产工艺。

在与传统航空燃料掺混使用并用于减排履约之前，SAF 还需要通过可持续性认证和适航审定两个环节。其中，可持续认证是对 SAF 整个生命周期减排潜力的评估，由经过“CORSIA 批准的可持续发展认证计划”认可的“可持续性认证计划（SCS）”指定的认证计划进行评估。截至 2025 年 1 月，SCS 共指定了三个认证计划，分别为德国联邦粮食、农业和消费者保护部创立的国际可持续发展与碳认证体系（ISCC）、瑞士洛桑联邦理工大学能源中心发起的可持续生物材料圆桌会议（RSB），以及来自日本的 ClassNK SCS。适航审定则是对 SAF 理化特性及与现有航空发动机适配情况的评估，适航审定机构（Clearing House）的数量相对较多，如中国的民航局测试中心，美国的戴

<sup>7</sup> ICAO, <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>

<sup>8</sup> BP, [https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/how\\_all\\_sustainable\\_aviation\\_fuel\\_SAF\\_feedstocks\\_and\\_production\\_technologies\\_can\\_play\\_a\\_role\\_in\\_decarbonising\\_aviation.html](https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/how_all_sustainable_aviation_fuel_SAF_feedstocks_and_production_technologies_can_play_a_role_in_decarbonising_aviation.html)

顿大学、普渡大学、西南研究院和空军研究实验室，英国的谢菲尔德大学，以及德国的都柏林圣三一大学等。

## 专题：具有较大发展前景的四种 SAF 生产工艺

### 1. 酯类和脂肪酸类加氢处理（HEFA）

HEFA 是目前全球最常见的 SAF 生产路线，早在 2011 年就已经被 ASTM 批准。该路线主要使用废弃物和残余油料作为原料，如餐厨废油（地沟油）或专门种植的油料作物。在处理过程中，加入氢气以提高得率。目前，该技术十分成熟，但需求的增加导致原料成本上升，未来几年内成本显著下降的可能性不大。如果以专门种植的油料作物作为原料，可能面临可持续性的挑战，进一步限制该路线在未来的扩展潜力。Neste 在新加坡的工厂是目前使用 HEFA 路线生产 SAF 的全球最大基地，产能为 100 万吨/年。

### 2. 气化费托合成（G+FT）

G+FT 是 ASTM 在 2009 年批准的首个 SAF 生产路线。该路线是将生物质通过气化产生氢和一氧化碳的合成气，然后将合成气投入费托反应罐内得到 SAF。根据可用原料的类别，G-FT 还可分为生物质转液体（BtL）和废弃物转液体（WtL）两种。对该路线而言，技术环节已经打通，并可能通过规模化实现成本改善。目前的问题在于原料的选择和收集，且原料通常需要小规模生产或获得，促使成本快速增加。如果使用生物质原料，将生物质预处理设置在靠近原料来源的地方，可以支持更大规模的集中式 SAF 生产。2024 年 4 月，DG fuels 选择 Johnson Matthey 与英国石油公司共同开发的 FT CANS 技术，用于其在路易斯安娜州圣詹姆斯教区的首个 SAF 工厂，预计每年可生产 60 万吨 SAF，是目前已知的最大产能的非 HEFA 路线 SAF 工厂。

### 3. 醇喷合成（AtJ）

AtJ 路线可以处理任何能够转化成醇类（如乙醇、异丁醇等）的原料，并将其转化为具有高得率的 SAF。在 2030 年之前，考虑到生物乙醇已经具有可观的生产规模，可通过技术定向来快速扩大 SAF 的生产规模。同 BtL 的问题一样，将生物质加工为醇类的处理装置设施在原料产地周边，可节省成本，并支持更大规模的集中式 SAF 生产。至于该路线的成本降低幅度，目前尚不明确（World Economic Forum, 2024）。美国 Gevo 公司基于 AtJ 路线开发出全生命周期碳中和的 Net-Zero 1 工艺，预计从 2025 年起每年可生产 5500 万加仑 SAF（Gevo 公司网站）。

### 4. 电转液（PtL）

PtL 是利用氢气和二氧化碳生产 SAF 的工艺，这些气体来自工程化过程而非生物过程，因此它是唯一一种不受原料可用性限制的长期路线。PtL 路线使用的氢气可通过电解（如绿氢）生产，也可来自化石原料，不过化石原料排放的 CO<sub>2</sub> 应被捕集并永久储存。二氧化碳可来自适当的点源（如生物质能源）或直接空气捕集（DAC）。驱动成本上升的因素主要是大量能源的可负担性和可获取性（绿氢情况下为可再生）。能源的可负担性很大程度上取决于当地的条件和政策，这使得设施的战略定位至关重要。由于电解和 DAC 都是新兴技术，未来几十年内重大资本开支将有很大的下降空间。但就目前而言，PtL 仍然是成本最高的 SAF 生产路线。

### 1.3 中国 SAF 发展在世界中的位置

中国高度重视民航的绿色发展。“十三五”以来，民航部门先后印发了《关于加快推进行业节能减排工作的指导意见》《民航节能减排“十三五”规划》《关于深入推进民航绿色发展的实施意见》《“十四五”民航绿色发展专项规划》等文件，旨在推动民航节能减排工作取得积极进展。

中国 SAF 相关的研究起步并不晚。2009 年中国石化就启动了生物航煤的研发工作，2020 年中石化镇海炼化建成了 10 万吨/年的生物航煤生产装置，2022 年首批规模化试生产，并获得亚洲首张 RSB 可持续航空燃料认证证书<sup>9</sup>。

然而就现状而言，中国 SAF 产业体系尚不健全，尤其在政策法规方面，与欧盟、美国相比，还有一定差距。

首先，中国还没有确立 SAF 长期发展战略和规划。为推动 SAF 的应用，欧盟正式通过了 ReFuelEU 航空计划，该措施是“Fit for 55”一揽子计划的一部分，旨在实现到 2030 年减排 55%的目标。它要求航空燃料供应商逐步增加 SAF 混入欧盟机场供应的常规航空燃料的份额，这一比例在 2025 年为 2%，2030 年掺混比例提升至 6%，2050 年掺混比例达到 70%<sup>10</sup>。美国则在“SAF 大挑战”谅解备忘录中提出，“到 2050 年生产 300 亿加仑 SAF（1.05 亿吨），以满足国内航空业 100%的 SAF 需求”。英国、加拿大、新加坡、马来西亚等多个国家也提出了 SAF 应用目标。反观中国，仅在《“十四五”民航绿色发展专项规划》中提出“到 2025 年，SAF 累计消费量达 5 万吨”的引导性目标，缺乏长期发展战略与规划。

第二，在 SAF 相关政策体系的建设，尤其是激励性政策方面，中国也相对滞后。制约 SAF 发展的一大因素在于其价格过高，为激励生产和应用，美国明确了对 SAF 生产商提供税收减免政策，欧盟则在其碳排放权交易体系框架下，为航空公司免费提供 2000 万个碳配额，以缩小 SAF 与传统航空燃料之间的价格差距。目前，中国尚没有任何针对 SAF 生产或应用的激励性政策出台。

第三，中国航空公司对 SAF 未来应用的规划和响应落后于欧美等地区。目前已经有超过 50 家航空公司承诺到 2030 年将 SAF 使用比例提升至燃料总量的 5-30%，其中大多数公司保证这一比例不低于 10%<sup>11</sup>。在中国，目前除国泰航空外，尚没有其他公司明确提出具体的 SAF 应用目标。不过，从 2024 年起，中国国航、南航、东航等航空公司陆续开展加注 SAF 航班的应用试点，有望推动航空公司 SAF 应用规划的制定与出

<sup>9</sup> 国家能源局, [https://www.nea.gov.cn/2022-07/01/c\\_1310636709.htm](https://www.nea.gov.cn/2022-07/01/c_1310636709.htm)

<sup>10</sup> ReFuelEU Aviation, [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refuelev-aviation\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refuelev-aviation_en)

<sup>11</sup> ICAO 第三次航空与代用燃料会议, <https://www.icao.int/Meetings/CAAF3/Documents/CAAF.3.WP.034.2.ch.pdf>



台进程。

SAF 在未来航空业减排中必将发挥举足轻重的作用，这一点毋庸置疑。在中国，SAF 具有良好的产业基础和广大的消费市场，推动 SAF 的生产和应用也是中国未来面临的重大机遇。

然而，SAF 生产路线多样，技术难题叠加，生产成本高昂，认证过程繁琐，建立完整的 SAF 产业链并非易事，需要考虑多方面的因素。在编写本报告之前，我们深度研究了中国在 SAF 发展方面所面临的问题。为凝练观点，本报告重点分析了三个核心问题，即建立符合中国国情的 SAF 中长期发展战略、构建中国特色的 SAF 中长期发展技术路线图、制定更适合中国国情的 SAF 绿色认证体系，以下章节将对这三个问题分别进行详细论证。



## 第二章 建立符合中国国情的可持续航空燃料中长期发展战略

中国目前虽然尚未确立 SAF 发展和使用的长期规划，但作为航空大国，中国必将是国际 SAF 市场的重要参与者，这也是中国实现“2035 年建成航空运输强国”这一目标的必然要求。2024 年 9 月，中国开启 SAF 应用试点工作，在北京大兴、成都双流、郑州新郑、宁波栎社四个机场试点加注 SAF，也标志着中国 SAF 应用正式拉开序幕<sup>12</sup>。

### 2.1 识别中国 SAF 发展驱动力，明确利益相关方，协同驱动 SAF 发展与应用

SAF 产业的发展和应用离不开与其相关的各个利益相关方的协作，尤其是在发展初期，仅靠一方的推力远远不够。图 4 总结了中国发展 SAF 的各方驱动力。

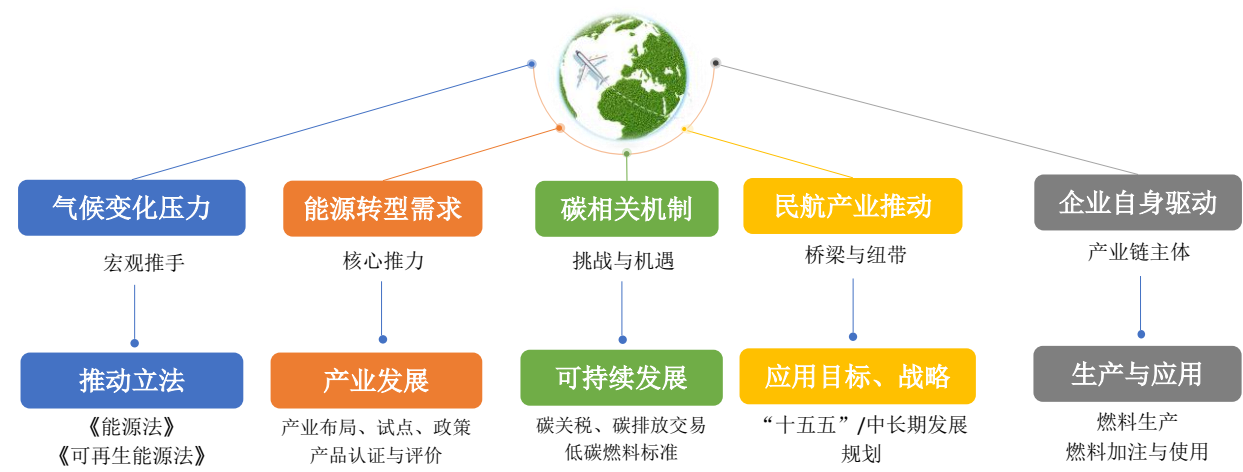


图 4 中国 SAF 发展的主要驱动力

#### 2.1.1 气候变化：SAF 发展的宏观推力

发展 SAF 的核心目的在于降低民航碳排放，实现“双碳”目标和民航净零碳排放的长期理想目标。SAF 作为航空业长期脱碳的重要手段，其应用全球瞩目。航空业是高度全球化的运输方式，航空减排工作的影响不仅局限于国家内部，而是扩大到了国家之间。因此，SAF 应用的战略规划等级要高于生物柴油等其他低碳燃料。

CORSIA 机制将于 2027 年进入强制性减排阶段，届时，作为联合国常任理事国之一，也是全球第二大航空运输国，中国政府的态度十分重要，中国不仅要认可 SAF 在航空减排中扮演的重要角色，还需要制定本国在 SAF 应用方面的长期规划。这一领域

<sup>12</sup> 中国民用航空局，[https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202409/t20240919\\_225429.html](https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202409/t20240919_225429.html)

也将可能成为未来国际气候谈判的重要议题，气候变化部门有较强的推动力督促相关部门明确 SAF 发展目标和应用规划。

自 2018 年以来，中国应对气候变化的相关工作主要由生态环境部负责，具体工作部门为生态环境部应对气候变化司<sup>13</sup>。同时，生态环境部还设立国家应对气候变化战略研究和国际合作中心（简称“国家气候战略中心”）这一正司级事业单位，开展应对气候变化政策、法规、战略、规划等方面的研究<sup>14</sup>，为应对气候变化司的具体工作提供技术支持。在国际气候谈判中担任重要角色的中国气候变化事务特使的具体履职事务也由生态环境部负责，生态环境部设有气候变化事务办公室，由生态环境部分管副部长兼任办公室主任，为特使履职提供支撑保障。此外，工信部国际合作司在国际气候谈判与相关事宜处理中也扮演重要角色。

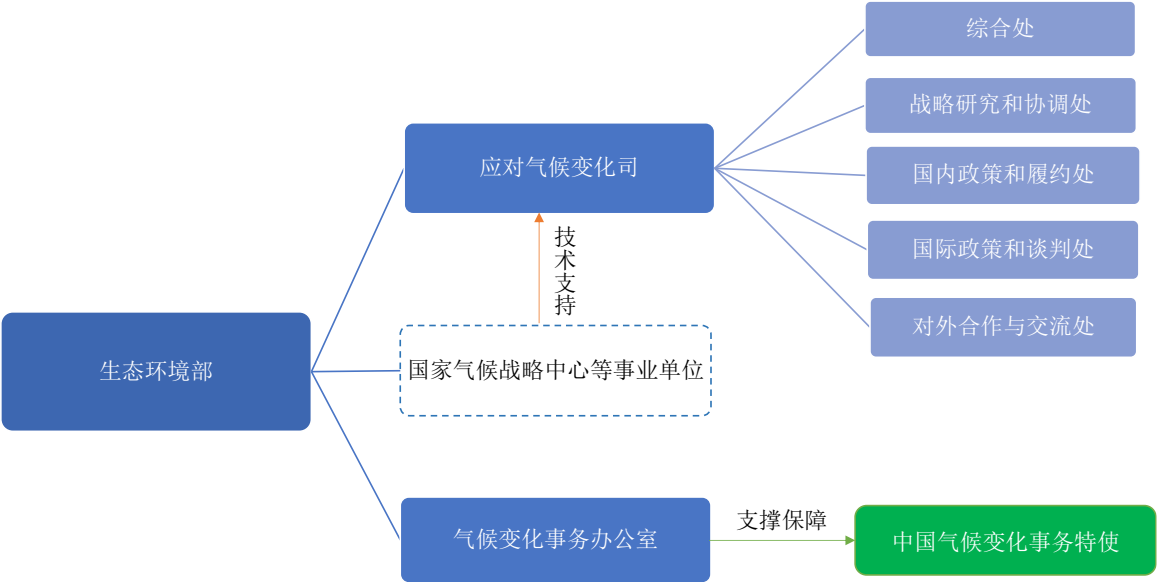


图 5 中国应对气候变化主要部门

### 2.1.2 能源转型：SAF 产业的核心驱动

在高度工业化发展的当下，碳排放主要来自于与能源相关的碳排放。要实现全球净零碳排放，能源领域的转型是关键。对于航空运输而言，约 99%的碳排放来自于航空燃油的燃烧排放。SAF 作为一种能够在生命周期内显著减少碳排放的可持续性低碳燃料，其发展和应用实际上也是航空领域的一次能源转型。2024 年，中国航空燃油消费量约 3928 万吨，占成品油消费总量的比例约 9.7%<sup>15</sup>。因此，推动 SAF 发展和应用也

<sup>13</sup> 中国应对气候变化的政策与行动，[https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content\\_5646697.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content_5646697.htm)

<sup>14</sup> 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心，<http://www.ncsc.org.cn/gyzx/zxjj/>

<sup>15</sup> 中国石化新闻网，[http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-01/22/content\\_7116968.html](http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-01/22/content_7116968.html)

成为能源领域转型的必然要求。

在美国 SAF 的推动中，能源署发挥了极大作用，其牵头发布了“SAF 大挑战”谅解备忘录<sup>16</sup>，《可再生燃料标准（RFS）》中规定允许 SAF 产生合规单元（RINs）并由此进行交易获得收益。

过去几十年中，中国在交通相关的能源转型方面，重点推动了包括燃料乙醇、生物柴油在内的生物液体燃料的发展，并取得了显著成效，在产业发展上也积累了较为丰富的经验，可以为 SAF 的发展提供借鉴。

发改委国家能源局是负责中国能源发展与转型的主要政府职能部门，未来也可能承担 SAF 发展规划制定、产业管理、产业政策发布等事项的管理工作。

### 2.1.3 民航部门：SAF 生产到应用的桥梁

中国民用航空局简称中国民航局，现为交通运输部管理的国家局。对 SAF 而言，民航局是连接政府主管部门与实际应用主体之间的桥梁。

具体来看，民航局将承担制定中国民用航空领域 SAF 应用目标与规划的任务；SAF 在进入实际加注和使用之前，需进行可持续性认证和适航审定，后者由中国民用航空航油航化适航审定中心负责，对于前者，民航局及其直属机构也将发挥牵头作用；此外，民航局对机场、航空公司的相关情况更加了解，可及时获取 SAF 实际应用的反馈，为应用规划、产业政策、激励措施的调整和修订提供重要参考信息。

### 2.1.4 生产制造商与航司：SAF 产业链的主体

SAF 生产商是 SAF 产业链的主体之一。目前，中国已经有包括中石化镇海炼化、易高环保、君恒生物、海新能科等在内的 5-6 家企业拥有生产 SAF 的能力（具体见 5.4 节）。中国目前拥有 SAF 年生产能力约 30 万吨，在建和拟建的项目总产能超过 400 万吨/年，有力保障了 SAF 的供应能力。

航空公司是 SAF 最终使用的主体。对很多航空公司而言，使用 SAF 是其彰显企业社会责任的一种体现。截至目前，全球至少 45 家航空公司有 SAF 使用经历，2016 年以来超过 37 万次航班在其飞行中使用了 SAF<sup>17</sup>。香港国泰航空于 2022 年推出亚洲首个“企业可持续航空燃油计划”，率先在香港机场使用 SAF，并提出到 2030 年将 SAF 使用量提升至航班总燃油消耗量的 10%。国泰航空也是中国目前唯一一家提出 SAF 使用目标的航空公司。

---

<sup>16</sup> US Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge>

<sup>17</sup> BSR, <https://www.bsr.org/en/emerging-issues/sustainable-aviation-fuels-take-flight>

飞机制造商在 SAF 应用中也扮演重要角色，将为飞行器能够使用 100% 的 SAF 燃料保驾护航。由于 SAF 的化学特性与传统航油存在部分差异，可能导致飞机发动机性能下降，尽管波音、空客等主要飞机制造商已经成功进行了 100% 的 SAF 试飞，但要确保所有机型的飞机都能安全地使用纯 SAF 燃料，还需要更多的测试和认证。

### 2.1.5 绿色认证机构：SAF 发展的重要支撑

SAF 产业的发展也需要第三方机构，特别是绿色认证相关领域机构的配合。其中，最重要的是支撑 SAF 可持续性认证的相关机构。

中国标准化研究院、中国质量认证中心（CQC）在产业标准、产品认证领域具备技术优势和经验，其中，CQC 已经成为国内首家具有 ISCC CORSIA 和 ISCC CORSIA PLUS 认证资质的合作认证机构，未来在 SAF 可持续性认证的本土化建设方面可发挥积极指导作用。

核算全生命周期温室气体排放是 SAF 可持续性认证中最重要的一环，该指标也是 SAF 可持续性认证中唯一一个定量指标。中国需要开发一套基于本国实际情况的 SAF 产品温室气体评价方法和大模型，以支撑 SAF 可持续性认证体系的建设。2022 年，中国生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心联合北京师范大学生态环境治理研究中心、中山大学环境科学与工程学院，由中国城市温室气体工作组统筹，首次发布了《中国产品全生命周期温室气体排放系数集（2022）》<sup>18</sup>，为中国本土产品全生命周期温室气体排放的核算积累了宝贵经验。2025 年 1 月，生态环境部与国家统计局联合牵头建设的“国家温室气体排放因子数据库”第一版正式上线运行。该数据库作为中国碳排放统计核算体系的重要组成部分，将社会各界提供温室气体排放因子基础数据支持，是中国在温室气体核算领域实现的重大突破<sup>19</sup>。北京大学、清华大学、中国科学院广州能源研究所等高校和科研机构在产品全生命周期温室气体排放领域也有丰富的研究经验，未来可为 SAF 的可持续性认证提供重要支撑。

另外，如何建立和完善保障 SAF 发展的长效机制问题也需要进行深入研究，这主要涉及与碳排放有关的市场机制，如已经实施的欧盟碳关税和碳排放交易机制，加州的低碳燃料标准等。欧盟碳边境调节机制（碳关税）的实施，对中国出口商品的绿色低碳水平提出了更高要求，在一定程度上可以刺激国内产品的低碳化发展，对 SAF 发展也带来了一定的机遇。欧盟还提出在碳排放交易框架下，给予一定量的 SAF 免费配额，以此刺激航空公司使用 SAF，该机制也可以为中国所借鉴和利用，并需要碳排放交易所等机构制定符合中国国情的相关措施。加州的低碳燃料标准中，允许 SAF 作为

<sup>18</sup> 生态环境部环境规划院，[http://www.caep.org.cn/sy/tdftzhjy/zxdt/202201/t20220105\\_966202.shtml](http://www.caep.org.cn/sy/tdftzhjy/zxdt/202201/t20220105_966202.shtml)

<sup>19</sup> 国家温室气体排放因子数据库，<https://data.ncsc.org.cn/factoryes/index>



“opt-in”燃料获得积分，生厂商可通过积分交易获得收益，中国相关机构也可借鉴这一机制，制定低碳燃料发展的本地化方案。

## 2.2 构建中国特色的可持续航空燃料政策体系

由于 SAF 的价格较传统航空燃油更高，现阶段 SAF 应用的主要驱动力仍是国际和各国本土的减排政策，这些政策中多数都明确提出了应用 SAF 的具体计划和目标，也有的以降低航空燃油的碳强度为衡量指标（见表 1）。

为鼓励 SAF 的长期发展和应用，欧盟、美国、马来西亚等国家和地区都提出了面向 2050 年的 SAF 发展规划或应用目标。中国对 SAF 应用目标的首次量化体现在 2022 年发布的《“十四五”民航绿色发展专项规划》中，提出了“力争‘十四五’期间可持续航空燃料消费量达到 5 万吨”的预期目标。

表 1 全球主要国家和地区 SAF 发展规划/目标

国别/地区	目标	效力
欧洲	2025 年：2% 2030 年：6%（2030-2031 平均，1.2% e-SAF; 2032-2034 平均，2% e-SAF） 2035 年：20% SAF（5% e-SAF） 2040 年：34%（10% e-SAF） 2045 年：42%（15% e-SAF） 2050 年：70%（35% e-SAF）	指令
	德国 仅对 PtL 2026 年：0.5% 2028 年：1% 2030 年：2%	法案
	法国 2025 年：2% 2030 年：5% 2050 年：50%	路线图
	挪威	2030 年：30% 指令
	瑞典	2025 年：5% 2030 年：30% 指令
	荷兰	2030 年：14% 2050 年：100%（或按欧盟整体目标） 国家协议
	丹麦	2030 年：国内航线 100% 倡议
	英国	2025 年：1% 2030 年：10% 2040 年：22% 指令
美洲	美国 2030 年：900 万吨 2050 年：1.05 亿吨	MOU（谅解备忘录）
	加拿大	2028 年：1% 法规

	(不列颠哥伦比亚省)	2029 年: 2% 2030 年: 3%	
亚洲	日本	2030 年: 10%	政策建议
	印度	2027 年: 1% 2028 年: 2%	指导目标
	新加坡	2026 年: 1% 2030 年: 3-5%	指导目标
	马来西亚	2050 年: 47%	指导目标
	印度尼西亚	2027 年: 1% 2030 年: 2.5% 2040 年: 12.5% 2050 年: 30% 2060 年: 50%	指令
	韩国	2027 年: 1%	提议
	中国	2025 年: 2 万吨	指导目标

来源: 作者整理。

对于新兴产业, 仅有强制性的约束政策是远远不够的, 产业需要更多的宏观指导和更加贴合实际的政策手段来引导其逐步发展壮大。从中国以往的经验来看, 一套完整的政策体系可以分为四个级别, 分别为国家级发展战略规划和计划 (I 类), 法律、法规和条例 (II 类), 行政监督与管理 (III 类), 经济激励和财税优惠 (IV 类), 见图 6。这四类政策是一个有机整体, 前两类政策为后两类政策手段提供了法律基础和环境, 后两类政策同时又为前两类政策的具体化和落实提供了可能<sup>20</sup>。



来源: 作者整理, 参考《中国生物液体燃料现行政策的实施与回顾》报告相关论述观点。

图 6 典型的中国政策体系组成

相较于近几年国际社会对 SAF 产业所展现的极高热情, 中国在该产业的引导方面显得较为谨慎。除了上述提及的“5 万吨消费量”目标外, 国家尚未对 SAF 的发展和

<sup>20</sup> 国家发展和改革委员会能源研究所, 中国生物液体燃料现行政策的实施与回顾, 2008.

应用提出任何量化目标，或者制定相关政策。

2025 年是中国“十四五”计划的收官之年。在“十四五”时期，中国见证了国际上多个国家和地区对 SAF 产业发展所制定的相关政策与措施，国内也陆续开展了 SAF 应用试点工作，为下一阶段的 SAF 产业发展储备了较为丰富的经验。面向“十五五”，中国有必要构建一套支持 SAF 产业发展的政策体系，为中国的 SAF 产业发展保驾护航。

### ◆ 国家级发展战略规划

《“十四五”可再生能源发展规划》中已经提及了支持生物航空煤油领域先进技术装备的研发和推广使用，在“十五五”可再生能源发展规划的编制中，建议明确使用“可再生航空燃料”的概念，并进一步细化相关要求。

在民航领域“十五五”专项发展规划的制定中，亟需明确提出近期乃至中长期的 SAF 发展和应用目标，为企业提供长期的导向信号。中国民航业仍处在快速上升期，叠加国内经济下行压力，强制要求民航公司购买和使用单价更高的 SAF，只会让中国航空业的发展雪上加霜。由此来看，SAF 的国家级发展战略规划建议按照“先松后紧”的原则进行制定。

### ◆ 法律、法规和条例

2024 年 11 月 8 日，第十四届全国人民代表大会常务委员会第十二次会议表决通过了《中华人民共和国能源法》，自 2025 年 1 月 1 日起施行。能源法是能源领域的基础性和统领性法律，长期以来一直处于缺位状态，此次能源法的出台和施行，是中国能源法治建设的里程碑<sup>21</sup>。在能源法的指导下，中国也将加快推进《中华人民共和国可再生能源法》的再次修订。

能源法出台之前，可再生能源法一直以来都是中国可再生能源领域的最高位阶法律。可再生能源法于 2006 年开始实施，2009 年进行了一次修订，该修订距今已经有 15 年之久。面向“十五五”，对标中国式现代化对新时代能源高质量发展的新要求，可再生能源法的再次修订必不可少。

可再生能源法所称的能源主要为风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等一次非化石能源。SAF 作为一种新兴的二次能源，与水能、太阳能、生物质能等一次能源密切相关。在可再生能源法的下一轮修订中，可明确“可持续航空燃料”相关概念，并在推广与应用环节增加相应条款。

### ◆ 行政监督与管理

行政命令和管理规定是一种行之有效的政策手段，在中国过往的产业发展中起到

---

<sup>21</sup> 国家能源局, [https://www.nea.gov.cn/2024-12/02/c\\_1310787406.htm](https://www.nea.gov.cn/2024-12/02/c_1310787406.htm)

了重要推动作用。

在能源法、可再生能源法等法律文件的指导下，“十五五”期间，国家发改委、财政部、工信部等主管部门有望制定和出台系列文件，围绕产业引导，项目建设、管理与核准，市场准入、组织领导等多个环节，推动 SAF 产业在中国的发展。

◆ 经济激励与财税优惠

经济激励与财税优惠等激励性机制对产业发展具有显著的推动效果，在中国多个产业的发展过程中起到了决定性作用。近期限制 SAF 大规模使用的关键因素在于其成本高昂。这就如同 2010 年代的新能源汽车一样，初期由于价格高昂和技术的不成熟而受到限制，但中国在这方面为世界提供了很好的范例，即通过政府大力扶持和补贴，极大加速了新能源汽车产业的发展，使中国成为全球新能源汽车产业的先锋和重镇。

毋庸置疑，随着各国政府对 SAF 产业的不断重视，SAF 很快将迎来规模化发展的大潮。据预测，到 2030 年左右，SAF 市场将达到百亿乃至千亿美元价值<sup>22</sup>。扶持 SAF 产业发展，一方面能够为国内航空业提供长期减排的资源支撑，另一方面也可以抢占 SAF 市场，拉动国家经济的发展。

国际上来看，目前仅有美国明确了对 SAF 生产商提供税收减免政策，其中，基于《通胀削减法案》，给予 SAF 生产商 1.25~1.75 美元/加仑的税收抵免（40B Tax Credit）<sup>23</sup>，但这项政策仅持续至 2024 年底。2025-2027 年，SAF 生产商可在 45Z 框架下获得清洁燃料生产税收抵免，上限为 1.75 美元/加仑<sup>24</sup>。

欧盟目前没有出台类似的税收抵免或补贴机制，而是仅提出在欧盟碳排放权交易框架下，免费发放 2000 万个碳配额，以缩小 SAF 与传统航煤之间的价格差距<sup>25</sup>。

表 2 国际主要地区针对 SAF 的激励措施

国家/地区	激励措施/对象	具体内容	时间跨度
美国（联邦）	税收抵免/SAF 生产商	较传统航煤减排 50%以上的 SAF 生产商可获得 1.25~1.75 美元/加仑的税收抵免	2023-2024 年
		SAF 生产商可获得上限为 1.75 美元/加仑的清洁燃料生产税收抵免	2025-2027 年
美国加州	LCFS 信用/SAF 生产商	SAF 可作为 opt-in 燃料，在 LCFS 机制下获得 LCFS 积分，积分可通过交易获得收益	2019 年起
欧盟	免费碳配额/航司	在 2030 年之前免费发放 2000 万个 SAF 碳配额，以缩小 SAF 与传统航煤之间的价格差	2023-2030 年
日本	税收抵免/SAF 生产商	向 SAF 生产商提供 30 日元/升的税收抵免	提议阶段

<sup>22</sup> Aviation Week, <https://aviationweek.com/special-topics/sustainable-aviation-fuel/saf-market-worth-13112-billion-2033>

<sup>23</sup> US Department of Energy, <https://afdc.energy.gov/laws/13321>

<sup>24</sup> US Department of Energy, <https://afdc.energy.gov/laws/13321>

<sup>25</sup> EASA, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/sustainable-aviation-fuels-saf>

来源：作者整理自网络信息，LCFS 指美国加州的低碳燃料标准。

中国目前没有针对 SAF 的具体财政激励措施。但考虑到中国政府的一贯做法，SAF 行业对国家级别财政补贴及财税优惠措施的出台仍然十分期待。我们分析了中国政府在燃料乙醇、生物柴油、新能源汽车等产业领域的补贴等激励机制的发展历程与趋势，总结出一些经验和教训，这些经验和教训在未来制定 SAF 相关激励政策的过程中，有必要进行吸收和借鉴。

**首先，需要制定长期的激励政策框架，确保产业朝预期方向发展。**中国现有政策延续性较差，时间周期较短，长期引导不足，容易降低行业发展的积极性。政策与市场发展相辅相成，随着市场的发展，政策进行适时修订是必然的，即便如此，长期的政策框架能够在产业发展初期，给予市场和企业正向的引导信号，确保产业朝向预期方向发展。据预测，SAF 产品至少需要到 2035 年以后才能与传统航空燃料实现价格平价<sup>26</sup>，如果考虑 PtL 等更加具有技术挑战性的生产路线，平价时间点还会进一步推迟。因此，在制定 SAF 产业相关的激励政策时，至少需要考虑面向未来十年的时间框架。

**其次，补贴、财税优惠等激励标准与技术先进性相关要素进行关联。**这也是从以往很多补贴政策的实施过程中得到的重要教训。中国的企业对补贴、财税优惠等政策的敏感度高，如果前期不对产品的先进性相关参数做出限定，极易导致一些企业为领取补贴而过快上马技术含量较低的速成项目，出现“打一枪就跑”的局面，扰乱产业的长期稳定发展。针对 SAF，补贴、财税优惠政策应更加偏向于 LCA 温室气体排放强度更低、原料与工艺可持续性更强（如 PtL 技术路线生产的 SAF）的产品及其生产企业，同时对不同减排潜力级别的 SAF 产品设置差异化补贴与财税优惠政策，激励产业朝向更好的方向进步。

美国对于 SAF 的补贴政策，特别是在《基础设施投资与就业法案》（Infrastructure Investment and Jobs Act）及《清洁能源生产法案》（Inflation Reduction Act）中，就是将 SAF 全生命周期温室气体减排量作为评估补贴的核心指标的。这些政策旨在促进 SAF 的生产和使用，通过提供激励措施来降低航空行业的碳排放。

其中，由美国阿贡国家实验室开发的 GREET 模型被指定作为官方工具来核算 SAF 的全生命周期温室气体排放。SAF 的全生命周期温室气体减排量是通过与传统喷气燃料的排放（89 g CO<sub>2</sub>e/MJ）进行对比得到的，对于任何一种 SAF 产品，如果其生命周期温室气体排放相对于传统喷气燃料的排放低于 50%，就有资格获得 1.25 美元/加仑的补贴，超出 50%的减排量部分按照每个百分点 1 美分的补贴进行叠加，因此补贴的最高限为 1.75 美元/加仑。

<sup>26</sup> Simple Flying, <https://simpleflying.com/saf-cost-competitive-jet-fuel/>



再次，国家、地方财政补贴需结合市场化机制，方能保障激励政策的长期、长效运行。建议在适当时机引入碳积分或基于 SAF 积分的交易机制。以新能源汽车产业为例，在发展前期，国家和地方财政投入了大量资金进行补贴，取得了显著成效，但随着市场规模的逐步扩大，财政资金吃紧，持续的补贴难以为继。在这种情况下，工信部出台了“双积分政策”，目的是用市场化机制替代补贴。针对 SAF，未来也建议与碳市场挂钩，如参考欧盟提出的在碳交易框架下，向使用 SAF 的航空公司免费发放碳配额的提议。目前，CORSIA 正考虑引入 Book & Claim 机制，以便航空公司在全球范围内更加灵活地履行可持续承诺。此外，也可参照美国《可再生燃料标准（RFS）》《低碳燃料标准（LCFS）》等法规中的积分交易做法，构建 SAF 积分交易机制，推动产业长期稳定发展。

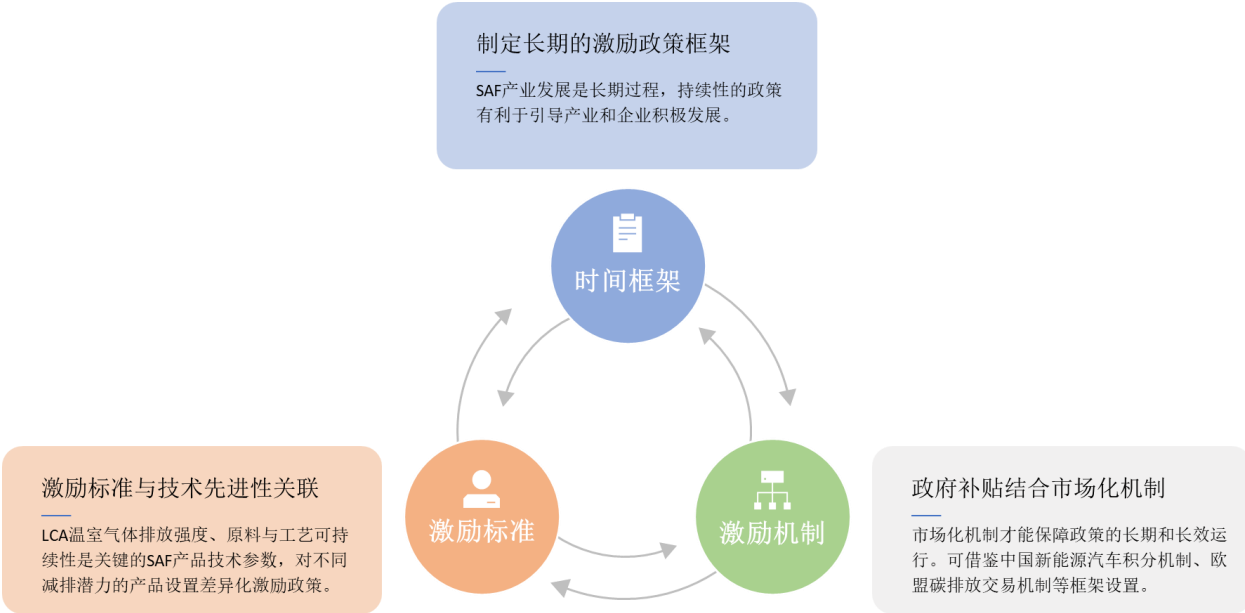


图 7 SAF 激励政策要素与设置建议

## 专题：SAF 发展可参考的市场机制

### 1. 积分交易机制

美国的《可再生燃料标准（RFS）》以及美国加州的《低碳燃料标准（LCFS）》等标准，都将 SAF 纳入可再生燃料以及低碳燃料库，生产商可根据燃料产量与品质获取相应的 RINs 或积分，并通过积分交易获得收益。相较于直接财政补贴机制，这种市场化机制弹性更高、容量更大，对产业的调节更加灵活。

### 2. Book & Claim 机制

Book & Claim 机制最早起源于可再生能源市场，特别是可再生能源证书（Renewable Energy Certificates, RECs）。20 世纪 90 年代，欧美国家为了推动清洁能源发展，引入了绿色店里证书交易体系，允许企业通过购买 RECs 证明其使用了可再生能源。这一机制随后扩展至碳市场、可持续原材料等多个领域。

Book & Claim 机制对 SAF 发展具有重要借鉴意义，如（1）可降低市场进入壁垒：通过 Book & Claim 机制，航空公司可以购买 SAF 证书来支持 SAF 产业发展，而无需在全球所有机场部署 SAF 供应链；（2）提高市场灵活性：SAF 生产和使用不必发生在同一地点，提高了 SAF 供应链的灵活性，也使生产商更容易找到买家；（3）促进资金流向 SAF 生产：通过证书交易，可以为 SAF 生产商提供额外的收入，以加速行业发展。

## 2.3 制定中长期 SAF 发展目标

制定中长期的 SAF 强制使用比例目标是目前国际上常用的推动 SAF 应用的政策手段。考虑到 SAF 近期较高的价格以及中国航空业的发展现状，中国需要制定强制性 SAF 中长期应用目标，技术路线图及时间表，作为推动 SAF 产业发展的长期指导。

从 2024 年下半年开始，包括国家能源局、民航局在内的中国民航领域相关政府部门频繁地就 SAF 应用与产业发展开展研讨工作。对 SAF 产业而言，这是一个积极的信号。以往中国在制定产业政策的过程中，十分看重企业的参与度，以尽可能降低对现有企业的影响，因而导致一些产业发展目标制定得相对保守，政策文稿的讨论周期也相对较长。考虑到这些因素，我们期待中国在相关领域的“十五五”规划中重视 SAF 应用目标的制定，并出台一些刺激产业发展的利好政策。

在目前已经出台的 SAF 应用目标中，欧盟的计划体系相对完整，也基本与国际航协的远景目标保持了一致。如前文所讨论的，中国政策目标的制定一般基于“先松后紧”原则，目的在于为产业发展预留更多的缓冲时间。参照欧盟的 SAF 应用目标，我们对中国 SAF 的应用目标和发展前景做出如下预期（如图 8 所示）：

- 2025 年如能达成消费量 2 万吨以上的目标，对中国 SAF 应用而言已经是“十四五”期间的重大突破，虽然该比例仅为中国航空燃料消费总量的 0.05%左右。这期间需要组织加强政府部门、SAF 生产企业与航空公司三方之间的交流，明确 SAF 未来发展目标、实现可能性及面临的挑战与应对方案等问题。
- 2030 年，预期 SAF 应用比例达到 4%左右，该比例低于欧盟、英国等国家提出的发展目标。然而，中国航空产业基数大，4%的应用比例对应约 230 万吨的 SAF 供应量，约等于目前中国所有 SAF 与生物柴油的年产量之和，供应压力已经较大，同时民航因消费 SAF 增加的成本压力也较大。这一时期是 SAF 发展的关键期，需要尽快制定长期发展战略和激励政策，在政府多项利好政策的加持下，加快培育一批 SAF 领军企业，增强中国在 SAF 产业中的话语权。
- 2035 年，经过十年左右的发展，预期中国 SAF 产业将取得重大进展。这一阶段，随着技术的不断进步，HEFA、气化费托合成等工艺路线下制备的 SAF 有望实现与传统航煤的价格平价，进而提升航空公司应用 SAF 的积极性，整体应用比例约为 10%。同时 e-SAF 开始进入市场，MtJ 成为国际认可的技术路线，绿氢、绿醇产业布局更加完备。
- 2040 年，SAF 产业有望实现较高度度的市场化发展，扶持政策可逐步退出。在价格快速下探后，SAF 应用比例有望实现较快提升，预期可达到 30%左右。
- 2045 年，经过 20 年左右的发展，SAF 在全球航空业中的应用都更加成熟，应用比例有望达到 50%。这一时期，预计 e-SAF 将在成本方面实现重大突破，并成为 SAF 市场的主流产品。这一时期，中国成为国际绿氢及 e-SAF 的主要提供商。
- 2050 年，SAF 已经成为航空燃料的主要类型，应用比例将达到 70%或更高。在这一时期，电动飞机、氢动力飞机的应用有望进一步拓展，叠加碳捕获等技术，航空产业的碳排放水平将持续下降，整体接近净零排放。

## 中国可持续航空燃料 预期发展目标

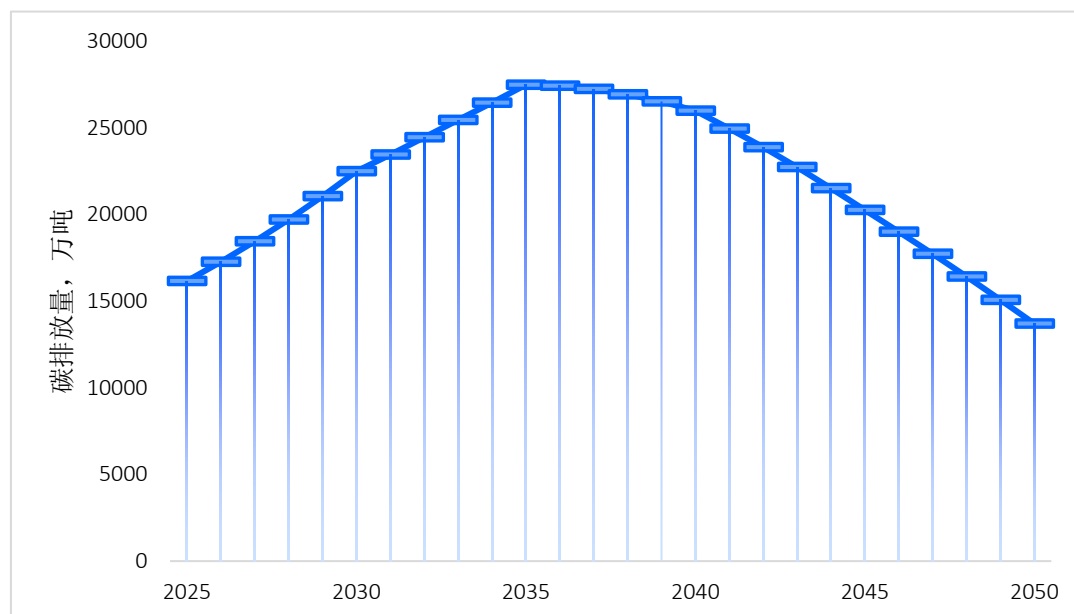


2025	●	消费量达到 <b>2万吨以上</b> 组织加强政府部门、生产企业、航空公司三方研讨，明确发展目标与挑战
2030	●	<b>4%，230万吨</b> 制定长期发展战略和激励政策；培育一批领军企业
2035	●	<b>10%，740万吨</b> SAF价格进一步下降，部分工艺下SAF价格与传统航煤平价
2040	●	<b>30%，2580万吨</b> 高度市场化发展，成为全球SAF产业重镇
2045	●	<b>50%，4520万吨</b> e-SAF成为市场主流
2050	●	<b>70%，6650万吨</b> 叠加其他手段，基本实现航空业净零碳排放

注：图中百分比数字为 SAF 在航空燃料中的使用比例，其后的数字表示 SAF 的具体使用量；e-SAF 是指采用 PtL 技术路线、以绿氢为主要原料生产的 SAF。假设中国航空燃料消费量按照 10%（2025）、7%（2026~2030）、5%（2031~2035）、3%（2036~2040）、和 1%（2041 及以后）的速度增加。

图 8 建立中国可持续航空燃料发展目标

按照图 8 的假设计算中国航空业燃料生命周期碳排放量，得到如图 9 的结果。可以看出，在 2035 年左右，中国航空业燃料生命周期碳排放将实现达峰，较中国 2030 年前实现整体碳达峰的时间推迟 5 年，但考虑到航空业的快速增长以及减排难度之大，这一结果已经较为乐观。需要指出的是，对于面向 2050 年的中国航空燃料长期消耗量，尚无权威性预测，但 SAF 应用比例仍是影响航空碳排放的最主要因素之一。



来源：作者绘制。其中，关于航空燃料总体消耗量和 SAF 应用比例的预测与图 8 一致。SAF 相较于传统航煤的生命周期碳排放减排比例分别设定为 10%（2025 年），20%（2030 年），50%（2035 年），75%（2040 年），85%（2045 年）和 90%（2050 年），中间年份通过线性插值确定。

图 9 中国航空业燃料生命周期碳排放趋势（基于研究假设）

对中国乃至全球而言，SAF 目前都处在发展的初期阶段，未来的发展之路存在较多不确定因素。但航空业迈向净零碳排放的终极目标不会改变，SAF 作为已知的最具潜力助力航空业减排的手段，其发展和应用理应得到重视。我们呼吁和期待包括中国在内的更多国家与地区，结合国际形势和本土实际，尽早出台 SAF 中长期发展战略规划，帮助航空业如期实现净零排放目标。

# 第三章 构建中国特色的可持续航空燃料中长期发展技术路线图

## 3.1 SAF 生产技术路线

燃料生产对目前 SAF 产业的发展极为关键，在生产工艺、生产规模、生产成本等多个环节均存在一定的挑战。

### ◆ 生产工艺

SAF 的生产工艺由 ICAO 认可的国际机构进行评估和批准，现阶段主要为美国材料与试验协会（ASTM）。截至 2025 年 1 月，已经批准的 SAF 生产工艺共有 11 种，另外有 11 种工艺正处于评估过程中<sup>27</sup>，见表 3 和表 4。

表 3 已获批准的 11 种 SAF 生产工艺（截至 2025 年 1 月）

ASTM 标准	技术路线	缩写	原料来源	最高掺混比例
ASTM D7566 Annex A1	费托加氢合成石蜡煤油	FT	煤、天然气、生物质	50%
ASTM D7566 Annex A2	由加氢酯和脂肪酸合成石蜡煤油	HEFA	植物油、动物油脂、餐厨废油（地沟油）	50%
ASTM D7566 Annex A3	发酵糖加氢合成异石蜡	SIP	用于制糖的生物质	10%
ASTM D7566 Annex A4	非石油来源的轻芳烃烷基化合成含芳烃的煤油	FT-SKA	煤、天然气、生物质	50%
ASTM D7566 Annex A5	乙醇制航空燃料合成石蜡煤油	ATJ-SPK	生物质基乙醇、异丁醇和异丁烯	50%
ASTM D7566 Annex A6	催化水热裂解喷气燃料	CHJ	植物油、动物油脂、餐厨废油（地沟油）	50%
ASTM D7566 Annex A7	由烃类加氢酯和脂肪酸合成石蜡煤油	HC-HEFA-SPK	藻类	10%
ASTM D7566 Annex A8	含芳烃的合成石蜡煤油	ATJ-SKA	生物质中的 C2-C5 醇	/
ASTM D1655 Annex A1	传统炼油厂中酯和脂肪酸的共加氢加工		植物油、动物油脂、与石油共处理过的植物油产生的餐厨废油	5%
ASTM D1655 Annex A1	费托烃在常规炼油厂的共加氢处理		与石油共处理的费托烃	5%
ASTM D1655 Annex A1	与 HEFA 共处理	Hydroprocessed esters/fatty acids from biomass'		10%

<sup>27</sup> ICAO, <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>



来源：ICAO.

表 4 处于评估过程中的 SAF 生产技术路线（截至 2025 年 1 月）

评估中的技术路线	缩写	主要开发者
合成芳香煤油	SAK	Virent
一体化加氢热解和加氢转化	IH2	Shell
单反应器 HEFA（掺入式液体燃料）	DILSAAF	印度 CSIR-IIP
不可回收塑料的热解	ReOIL	OMV
废旧轮胎热解油的协同加工	TPO	Philips 66
甲醇制航空煤油	MTJ	ExxonMobil
脂肪酸/酯协同加工从 5%增加到 30%	--	
高环烷烃的 HEFA 转化	--	Revo
生物质热解	--	Alder
生物质/废弃物热解	--	Green Lizard
乙醇制环烷烃	--	Vertimass

来源：ICAO.

在以上 11 种生产工艺中，只有 HEFA 是目前唯一大规模用于商业生产 SAF 的技术路线<sup>28</sup>。我们尤其关注由 ExxonMobil 申请的 MtJ 技术路线，如该路线获得批准，对中国将是极为利好的消息。

#### ◆ 生产成本

生产成本过高是制约 SAF 发展的一个关键因素。据 IATA 估算，2023 年全球 SAF 平均供应价格约为传统航空煤油的 2.8 倍，达到 2500 美元/吨<sup>29</sup>。SAF 生产成本过高主要是由于生产规模相对较小造成的，这也反映在不同生产规模的 SAF 成本差异较大（图 10）。例如，基于废弃物生产的 SAF 成本约是传统航空煤油的 2 倍，而 e-SAF 的成本是传统航空煤油的 6-10 倍<sup>30</sup>。

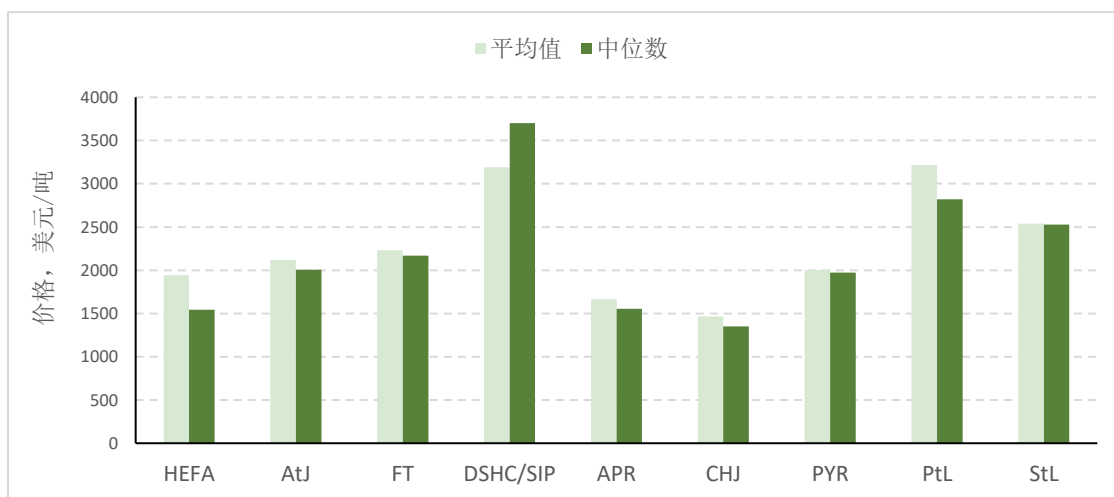
其他导致 SAF 生产成本过高的因素还包括：使用与粮食生产相竞争的原料，双重需求导致价格过高；需要大量的技术投资与开发；缺乏专门用于 SAF 生产、储存和分发的广泛基础设施导致其成本较高；政策和监管方面的挑战使 SAF 的经济前景进一步复杂化<sup>31</sup>。

<sup>28</sup> BP, [https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/how\\_all\\_sustainable\\_aviation\\_fuel\\_SAF\\_feedstocks\\_and\\_production\\_technologies\\_can\\_play\\_a\\_role\\_in\\_decarbonising\\_aviation.html](https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/views/how_all_sustainable_aviation_fuel_SAF_feedstocks_and_production_technologies_can_play_a_role_in_decarbonising_aviation.html)

<sup>29</sup> IATA, Fuel Fact Sheet, <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---fuel/>

<sup>30</sup> IBEX Publishing, <https://ibexpub.media/is-sustainable-aviation-fuel-really-more-expensive/>

<sup>31</sup> IBEX Publishing, <https://ibexpub.media/is-sustainable-aviation-fuel-really-more-expensive/>



来源：作者绘制，数据参考 Matthias Braun et al., *Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing*, *Journal of Air Transport Management*, 2024 (117); DSHC/SIP 指氢化发酵糖合成异石蜡，APR 指液相重整，PYR 指高温热解，StL 指太阳能转液体。

图 10 不同生产工艺的 SAF 价格

## 3.2 构建中国特色的 SAF 中长期发展技术路线图

中国地理面积广阔，地域多样，不同地区拥有各自不同的资源禀赋和产业发展特征。SAF 是一种高度依赖原材料种类的燃料，SAF 的不同技术路线之间存在着天然的竞争关系。在此情况下，获得持续且相对低价的原料，对 SAF 生产和应用至关重要。

中国目前仍处在 SAF 发展初期，需要基于自身情况建立一套利于中长期发展的技术战略，才能保证其在近期可以较快地扩大 SAF 市场规模，并在中长期取得技术竞争优势。

从中国的资源禀赋考虑，SAF 中长期技术发展战略建议包括以下要素：

- 近期，以 HEFA 技术路线为依托，扶持和建设若干个具有影响力和竞争力的工厂；
- 中期，支持以生物质为原料的气化费托合成、醇制航煤等技术路线的发展，形成 SAF 技术发展的多边支撑，推动 SAF 规模化发展；
- 中长期来看，需攻坚 PtL 技术路线，尤其是绿色甲醇合成路径，并尽快取得技术及成本优势。

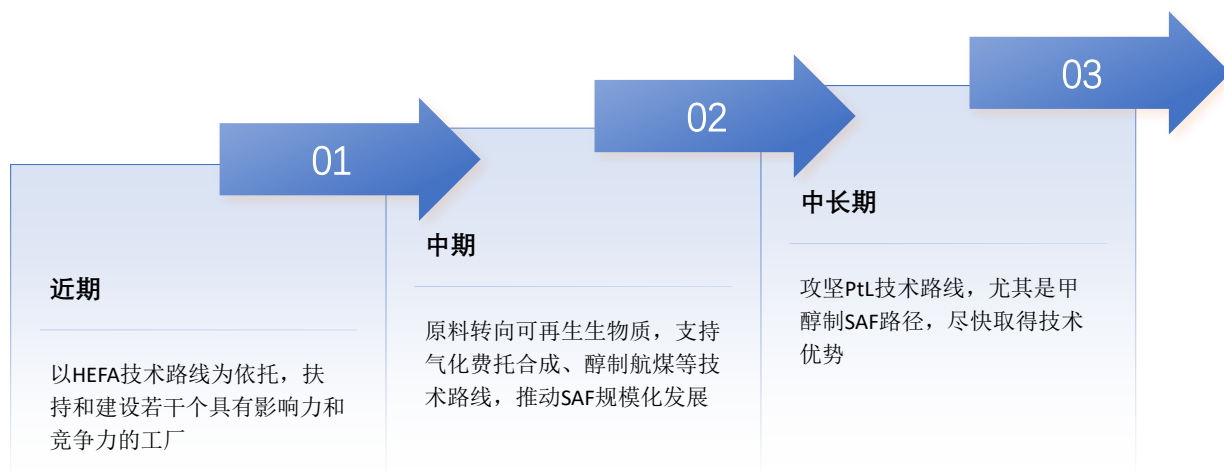


图 11 基于中国国情的 SAF 中长期发展战略建议

以上几种技术路线所需要的原料不同，这些原料的富集区域也不同。这就要求在布局 SAF 生产时，基于各地的资源禀赋进行差异化构建。

### 3.3 近期依托 HEFA 技术路线，加速建立和完善 SAF 产业链

HEFA 技术路线的原料来源主要包括餐厨废油（UCO），动物油脂和植物油。中国人口基数大，对动物油脂和植物油的需求量很大，直接用这些原料生产 SAF 的原料获取难度较高，种植油料作物于中国而言则存在“与粮争地”的巨大风险。

餐厨废油是目前生产 SAF 最为主要的原料，全球超过 80%的 SAF 产量都是基于餐厨废油生产<sup>32</sup>，国内的中石化镇海炼化工厂也在其列。据不完全统计，中国每年可产生约 500 万吨的餐厨废油，在过去若干年内，中国的餐厨废油被大量出口到欧洲、美国、新加坡等地区。仅 2024 年前 9 个月，中国出口的餐厨废油累计达到 212.5 万吨<sup>33</sup>。随着国内对 SAF 产业的逐渐重视，政府也采取了一系列措施，如 2024 年 12 月 1 日正式取消废弃油脂等产品的出口退税<sup>34</sup>，这一措施有助于将原料价格拉至合理区间，也将促使行业从出口原料转变为出口产品，进一步提升行业竞争力和影响力。

2023 年中国共消费食用油 3806 万吨<sup>35</sup>，假设食用油以 15%的回收率回收得到餐厨废油，那么中国可产生约 570 万吨的餐厨废油。根据各地区的食用油消费量水平，研究绘制了中国餐厨废油的分布图（图 12）。可以看到，四川和广东是餐厨废油大省，湖南、湖北、河南、山东和江苏也拥有较为丰富的餐厨废油资源。

基于上述情况，在建造以餐厨废油为原料的 SAF 生产工厂时，地理位置上可以靠

<sup>32</sup> Transport & Environment, <https://www.transportenvironment.org/articles/european-and-us-used-cooking-oil-demand-increasingly-unsustainable-analysis>

<sup>33</sup> 人民网, [http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202411/25/content\\_30032182.html](http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202411/25/content_30032182.html)

<sup>34</sup> 中华人民共和国财政部, [https://szs.mof.gov.cn/zhengcefabu/202411/t20241115\\_3947628.htm](https://szs.mof.gov.cn/zhengcefabu/202411/t20241115_3947628.htm)

<sup>35</sup> 2024 全国粮食和物资储备科技活动周科普宣传册，食用油篇。

近四川、广东这样的餐厨废油原料集中区域。部分企业也已经关注到了这一点：2022年，霍尼韦尔联合东华能源，计划在广东省茂名市建设年产量达到 100 万吨的 SAF 生产基地，生产原料分别为餐厨废油和动物脂肪<sup>36</sup>。其他餐厨废油产量较高的地区，也要借机完善餐厨废油的“收-储-运”产业链，不断提升集约化操作水平，促使 SAF 价格有更多下探空间。

餐厨废油生产 SAF 技术路线的一大劣势在于，原料存在上限。按照目前的工艺水平，HEFA 技术路径下从餐厨废油生产 SAF 的综合产出率约处于 60%-70%区间，部分先进技术的 SAF 转化率可超过 70%<sup>37</sup>。以 65%的转化率计算，如果中国每年产生的餐厨废油能够全部回收并用于 SAF 生产，约能产出 370 万吨的 SAF，占中国航空燃油消费总量（2024 年水平）的比例约 9.4%。

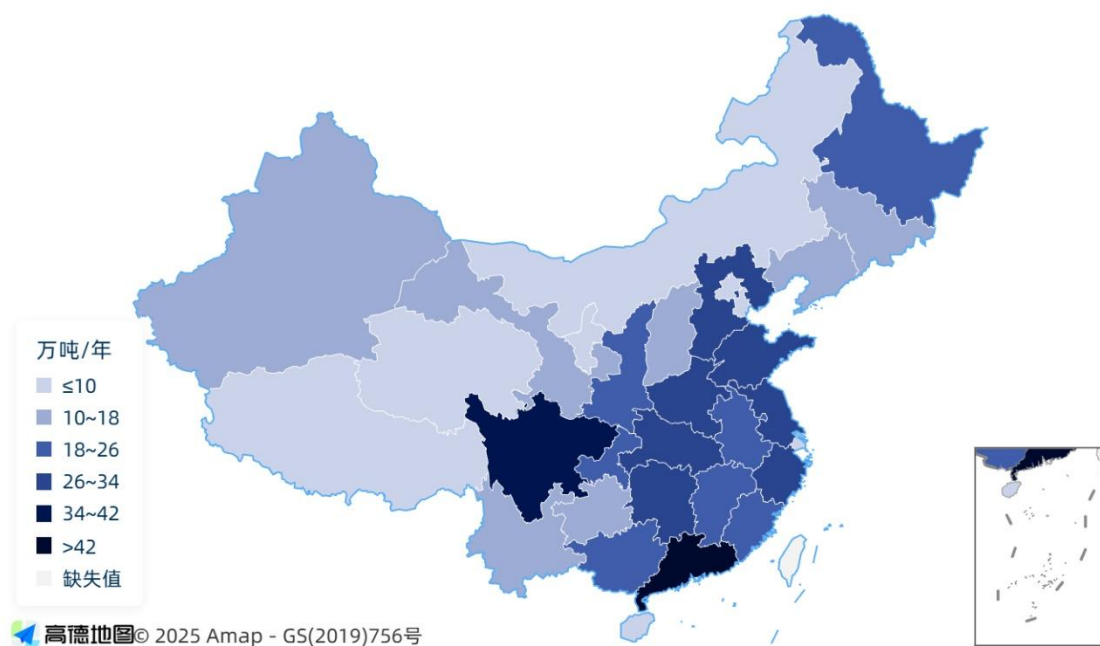
尽管如此，近期发展 HEFA 技术路线仍有重要意义。

- 第一，在全球范围内，中国具备餐厨废油的原料优势，虽然中国在 SAF 相关推动政策上落后于欧美地区，但中国的举国体制优势有望帮助本土企业在生产环节迎头赶上。
- 第二，HEFA 技术路线与生物柴油技术路线高度重合。中国现有生物柴油年产量超过 200 万吨，其中 90%都用于出口。借助生物柴油的产业优势，中国有望在 HEFA 技术路线上有所作为。
- 第三，HEFA 技术路线是目前最为成熟和普遍的 SAF 生产路线，依托这一路线，中国可扶持和建设若干个具有影响力的龙头企业，一方面可在国际 SAF 产业版图上占据一席之地，另一方面可在初期助力中国建立和完善 SAF 产业链，为其他技术路线的落地投产做好准备。
- 第四，中国可以此为契机建立完整的 SAF 全产业链建立，完善绿色认证体系，开发全生命周期 SAF 评估大模型，构建较为全面的财政支撑体系。

---

<sup>36</sup> Honeywell, [https://www.honeywell.com.cn/news-events/newsroom/news/2022/02/news20220228\\_1](https://www.honeywell.com.cn/news-events/newsroom/news/2022/02/news20220228_1)

<sup>37</sup> 搜狐, [https://www.sohu.com/a/826024840\\_120952561](https://www.sohu.com/a/826024840_120952561)



来源：国家统计局，作者绘制。作图数据中假设食用油按照 15%的回收率产生餐厨废油，未考虑地区回收率差异情况。

图 12 中国餐厨废油分布情况

### 3.4 中期推动以生物质为原料的气化费托合成及醇制航煤等技术路线发展

气化费托合成（G+FT）是目前在商业化应用程度上仅次于 HEFA 的 SAF 技术路线，其主要原料为可利用生物质或工厂（如钢厂）废气。美国 DG fuels 在其位于路易斯安娜州圣詹姆斯教区的 SAF 工厂中，采用 G+FT 技术路线，预计每年可生产 60 万吨 SAF，是目前已知的最大产能的非 HEFA 技术路线 SAF 工厂<sup>38</sup>。在 G+FT 技术路线中，首先对含碳的固体原料进行气化，得到合成气（CO 和 H<sub>2</sub>），再通过催化反应合成多碳化合物。对于不同的生物质原料，预处理流程和气化工艺有一定差异。在过去十几年中，中国有不少研究机构在这方面积累了研究经验，如中国科学院广州能源所、清华大学、天津大学等。

醇制航煤（AtJ）技术主要涉及两个主要步骤：醇的生产和醇的转化。在这一路线下，目前美国的 Gevo 公司有小规模示范项目投产，另一家美国公司 LanzaJet 于 2024 年初在美国佐治亚州建成全球首个基于乙醇原料的 AtJ 合成 SAF 的商业工厂。LanzaJet 可以将来自钢铁、焦化等化工厂的富含 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub> 的工业废气通过生物发酵技术转化为乙醇，进而用于生产 SAF，对于农林废弃物、城市固废等生物质原料也可以进行类似的处理和应用。中国在 AtJ 路线方面目前尚没有技术优势，但中国具有丰富的工

<sup>38</sup> DG Fuels, <https://dgfuels.com/2024/04/10/dg-fuels-johnson-matthey-bp-partner-for-largest-fischer-tropsch-saf-plant/>

业尾气资源和生物质资源，未来通过与先进技术公司的合作，也可以在这一领域有所作为。例如，LanzaTech（LanzaJet 的母公司）早在 2011 年就与中国首钢集团合作成立了北京首钢朗泽科技股份有限公司，将工业尾气直接转化为生物乙醇、饲料蛋白等高价产品<sup>39</sup>。

LanzaJet 在 2024 年建成了全球首个 AtJ 生产 SAF 的商业工厂 Freedom Pines，工厂位于美国佐治亚州索普顿，计划于 2025 年投产，第一年 SAF 年产量预计可达 900 万加仑，同时副产 100 万加仑生物柴油。

Freedom Pines 将依托 LanzaJet 的核心技术 CirculAir™，该技术首先利用 LanzaTech 的气体发酵技术将几乎任何废物资源——包括农业和林业废物、可再生能源作物、城市固体废物，以及从工业废气或直接空气捕获的碳转化而来的 PtL 途径——转化为 CarbonSmart™ 乙醇。第二步，LanzaJet 将乙醇通过脱水、低聚和加氢步骤合成 SAF。

这一技术拓展了 SAF 生产的原材料范围。对中国而言，既可以利用大量的工业废气，也可以持续利用农林废弃物等生物质资源，具有较好的发展前景。但也要考虑技术、专利等相关问题。如何与 LanzaJet 合作，同时推动中国本土 AtJ 技术的进步，也是中国未来发展这一路线的关键所在。

从原料的可持续性方面来看，利用生物质原料是未来 G+FT 与 AtJ 技术路线的主要方向。可利用生物质资源主要包括农作物秸秆、林业废弃物、畜禽粪便、有机废弃物等。

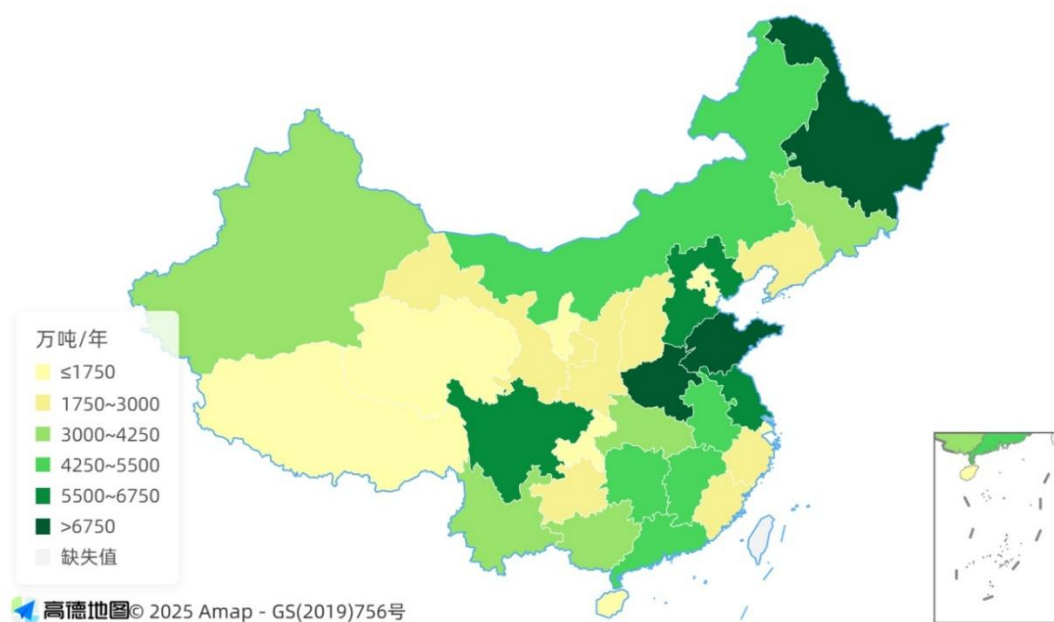
中国的可利用生物质资源较为丰富，农作物秸秆年利用量约为 8 亿吨，林业废弃物 1 亿吨，畜禽粪便约 2 亿吨，有机废弃物约 1 亿吨<sup>40</sup>。整体上看，黑龙江、山东和河南三省的可利用生物质资源总量最为丰富（见图 13）。其中，农作物秸秆主要分布在农业大省，如东北三省、山东、河南、安徽、江苏、四川；林业废弃物主要分布在林业发达地区，如广西、云南、四川、福建、江西；畜禽粪便主要分布在畜牧业发达地区，如山东、河南、河北、内蒙古、四川等；生活和工业有机废弃物主要分布在大城市及工业化程度较高的地区，如广东、江苏、上海、北京等。

在黑龙江、山东、河南等生物质资源丰富的地区，可有序引导、引进和支持产学研研发，根据不同的生物质资源种类，开发出具有针对性的、更加高效的生物质气化处理及发酵工艺，后期可在当地布局生产，支撑费托合成、醇制航煤等技术制备 SAF 路线的落地和规模化发展。

<sup>39</sup> 财联社，<https://www.cls.cn/detail/1911295>

<sup>40</sup> 数据为作者根据相关公开数据估算得到。





来源：数据来自于公开数据整理，作者绘制。

图 13 中国可利用生物质资源分布情况

现有技术条件下，从生物质原料到 SAF 的产品综合转化率约为 10%<sup>37</sup>。考虑到生物质资源的其他用途，如农作物秸秆作为牲畜草料，畜禽粪便的肥化利用等，假设有 50% 的生物质资源可用于生产 SAF，据此推算，中国生物质原料生产 SAF 的产量上限约为 6000 万吨。

利用生物质作为原料进行 SAF 生产，需要解决原料的“回收-存储-运输-利用”整个产业链的问题。一方面，生物质原料收储运体系的不完备，将导致原料的可收集总量减少，不利于产业规模的扩大；另一方面，原料不足将随之引起成本上涨，使该技术路线下生产的 SAF 缺乏市场竞争力，进而制约其规模化发展。

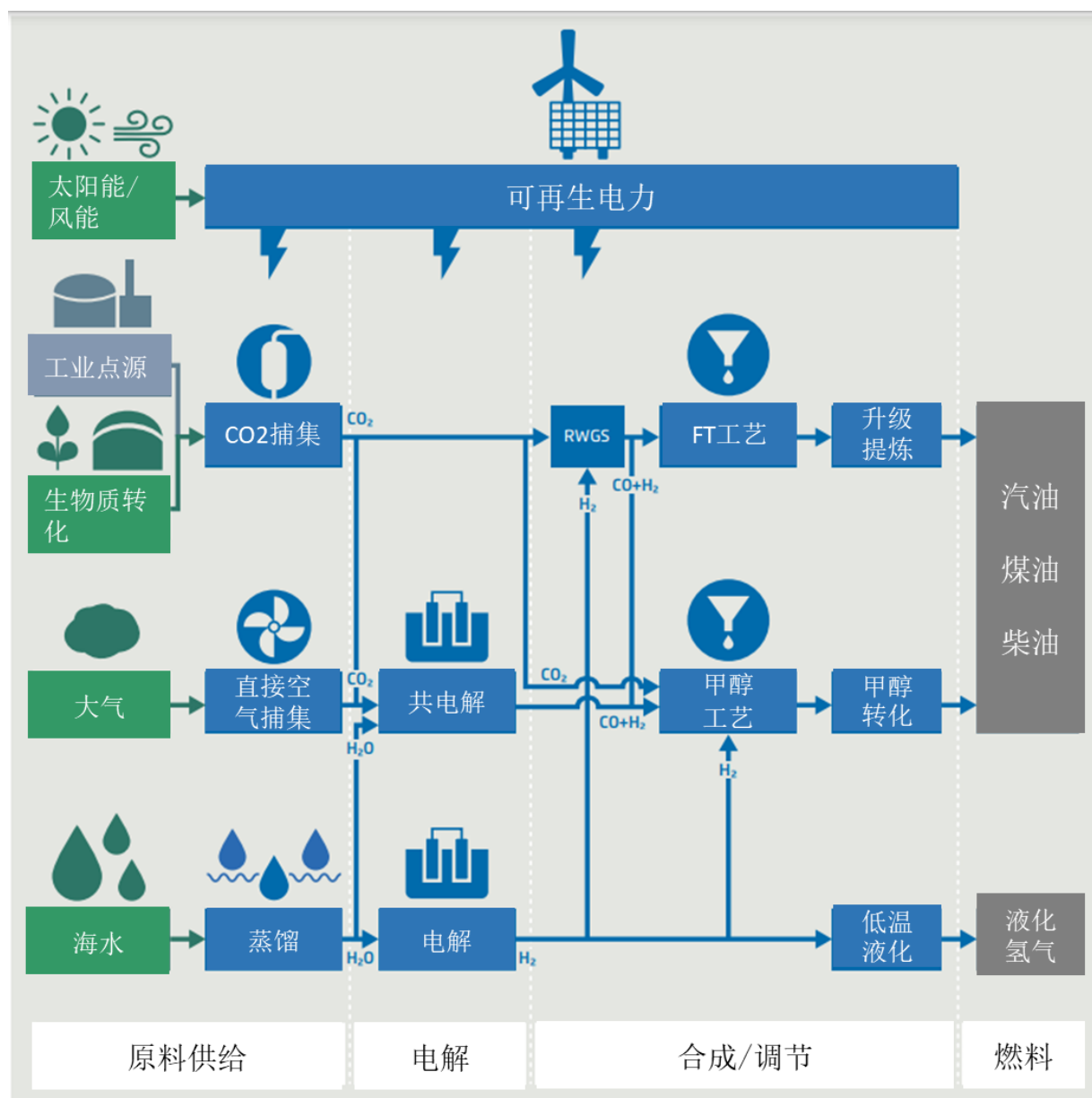
### 3.5 中长期攻坚 PtL 技术路线，加速 SAF 产业可持续高质量发展

PtL 技术路线（也称“绿氢”技术路线）是一类技术路线的统称，是指使用绿色电力电解水生成绿氢，将氢气与 CO<sub>2</sub> 生成合成气，合成气通过费托合成或甲醇（一些情况下也可转化成乙醇）合成路径，最终产生 SAF（生产的 SAF 也叫“电子航煤”，即 e-SAF）。理论上该技术路线的原料不存在总量限制，且具有更低的生命周期碳排放水平。从长远来看，PtL 技术路线最符合可持续降碳的理念。

虽然目前 PtL 的工业化发展还不成熟，但航空行业对该技术的未来应用充满热切期待。欧盟、英国均要求未来使用的 SAF 中必须含有一定比例的通过 PtL 路径生产的 e-SAF。在政策驱动下，预计经过十年左右的窗口期，PtL 技术路线将迎来大范围的应

用。

得益于绿电、绿氢领域的快速发展，中国在 PtL 技术路线上具备一定的产业储备优势。下面将从原料来源及供应、技术就绪水平、经济可行性等方面进行分析，同时识别该技术路线所面临的关键挑战。



来源：Agora, Defossilising aviation with e-SAF.

图 14 电子燃料合成过程示意图

### 3.5.1 原料来源及供应

#### (1) 绿色电力

来自可再生能源的绿色电力是 PtL 技术路线合成 SAF 的重要输入要素。

中国是全球可再生电力行业的佼佼者。2023 年中国可再生电力累计装机规模突破 15 亿千瓦，占全国发电总装机比重的 51.9%，在全球可再生能源发电装机中占比近 40%，太阳能和风能装机已经跃升成为中国的第二、三大电源。与此同时，中国人均可再生能源装机规模突破 1 kW<sup>41</sup>。

相比于水电和生物质能发电，太阳能和风能发电的排放更低，资源也更加不受限制，是未来可再生电力的主要来源。截至 2024 年 9 月底，中国风电、太阳能发电装机合计达到 12.5 亿千瓦，提前 6 年多完成中国此前承诺的“到 2030 年风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上”的目标<sup>42</sup>。与之对应的是，风、光发电具有很强的随机性、波动性和间歇性，易对传统电网造成强力冲击。同时，“三北（西北、东北、华北）”为代表的可再生能源富集区，资源优越但消纳能力有限，资源错配致使风电、光电利用率低，而强制要求可再生能源发电利用率又需要新增大量储能等调节资源，不利于可再生能源电力的可持续发展。

为扩大可再生电力（也称“绿电”）消费，2017 年中国试行绿证核发和资源认购制度。绿证是指可再生能源绿色电力证书，是可再生能源绿色电力的“电子身份证”，是可再生能源电量环境属性的唯一证明，也是认定可再生能源电力生产、消费的唯一凭证。1 个绿证单位等于 1000 千瓦时的可再生能源电量。目前，中国绿证已经纳入国际绿电消费倡议（100% Renewable Electricity, RE100）的认可范围<sup>43</sup>，在国际社会和跨国企业间的影响力不断扩大。

按照生产 1 kg SAF（PtL 路线）需要 42 kWh 电量的标准<sup>44</sup>，假设未来中国航空燃料中 70%使用 SAF，而 PtL 制备的 SAF 占比 50%，那么 PtL 制备 SAF 至少需要消耗 1.4 万亿 kWh（按图 8 所做的假设计算）的可再生电力。2023 年中国风电和光电合计发电量已经达到 1.47 万亿 kWh，未来还将有很大发展空间，基本上可以满足未来 SAF 生产所需。

## （2）绿氢

作为 PtL 技术路线的核心输入要素之一，绿氢对合成 SAF 至关重要。

从中国的资源分布来看，现阶段绿氢项目主要集中在新疆、内蒙古等风/光资源更为丰富的地区，而 SAF 需求则主要分布在胡焕庸线以东地区。数据显示，2023-2024 年上半年，中国新增近 300 个绿氢项目，这些项目大多分布在内蒙古、新疆、河北为

---

<sup>41</sup> 水电水利规划设计总院，《中国可再生能源发展报告 2023 年度》。

<sup>42</sup> 中华人民共和国中央人民政府，[https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content\\_6988406.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content_6988406.htm)

<sup>43</sup> 国家能源局，[https://www.nea.gov.cn/2023-08/03/c\\_1310735436.htm](https://www.nea.gov.cn/2023-08/03/c_1310735436.htm)

<sup>44</sup> Braun M., Grimme W., Oesingmann K., Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. Journal of Air Transport Management, 2024.

代表的西北和华北地区，东北三省也有一定的布局（见图 15）。

虽然目前尚没有基于 PtL 技术路线的 SAF 生产工厂，但未来以此技术为主的 SAF 工厂的选址可能面临远离绿氢产地的问题，这种情况下绿氢的运输和存储将是 PtL 技术路线需要解决的挑战之一。



来源：作者绘制，数据来源于网络收集。

图 15 2023-2024 年上半年中国新增绿氢项目分布

据 RMI 估算，生产 1 kg 合成 SAF 约需要消耗 0.66 kg 绿氢<sup>45</sup>。那么，仍按照之前的假设，假设未来中国航空燃料中 70%使用 SAF，而 PtL 制备的 SAF 占比 50%，那么 PtL 制备 SAF 每年至少需要消耗 2194 万吨绿氢（按图 8 所做的假设计算）。截至 2024 年 11 月，中国已经规划的绿氢产能突破 800 万吨/年<sup>46</sup>，尽管距离 2194 万吨有一定差距，但未来绿氢产能建设还有很大的增长潜力。需要注意的是，SAF 生产也面临着与绿氨、绿醇等其他可再生燃料竞争绿氢原料的挑战。

### （3）二氧化碳

CO<sub>2</sub> 是 PtL 技术路线的另一个关键输入要素。如果采用直接从大气环境中捕集的 CO<sub>2</sub>（又称 Direct Air Capture, DAC），那么涉及 CO<sub>2</sub> 原料的过程几乎不产生额外的碳排放，原料也几乎是无限的。

<sup>45</sup> RMI, <https://rmi.org/the-five-dimensions-of-hydrogen/>

<sup>46</sup> 中国能源新闻网, [https://www.cpn.com.cn/news/hy/202411/t20241122\\_1753811.html](https://www.cpn.com.cn/news/hy/202411/t20241122_1753811.html)

除此之外，还有其他的获取 CO<sub>2</sub> 的方式，主要包括：

- 工业排放：使用工业生产过程中的 CO<sub>2</sub> 排放，例如从化工厂、钢铁厂的烟囱中捕集的 CO<sub>2</sub>。这种方式称为“碳捕集和利用（CCU）”，有助于减少空气中的温室气体排放。
- 生物质来源：使用生物质（如木材、农业废弃物等）产生的 CO<sub>2</sub>，生物质在燃烧过程中释放的 CO<sub>2</sub> 可以通过捕集和转化，最终合成 SAF。生物质来源的 CO<sub>2</sub> 被视为“碳中性”的，因为其释放的 CO<sub>2</sub> 是植物在生长过程中吸收来的。

考虑中国的能源结构，中国在未来一段时间内对煤炭等化石燃料的依赖依然持续，仍将有大量的来自于化石燃料燃烧所产生的 CO<sub>2</sub>。中国国内工业碳排放量占全国碳排放总量的贡献约为 35%<sup>47</sup>，高于全球平均水平（24%，2019 年水平）<sup>48</sup>。捕集并使用这部分 CO<sub>2</sub> 作为 PtL 技术路线的原料输入，不仅提高了原料获取的集中度，也避免了大量 CO<sub>2</sub> 的直接排放。但这一过程的 CO<sub>2</sub> 不可再生，以此为原料生产的 SAF 可能会产生较大争议，未来需要针对这一问题进行与国际社会的沟通，并推动相关标准的建立。

### 3.5.2 技术就绪水平

以下将使用技术就绪水平（Technological Readiness Level, TRL）来展示不同技术的发展阶段。该评价方法是根据科研项目的研发规律，把发现基本原理到实现产业化应用的过程划分为 9 个标准化等级，已对科研项目关键技术的成熟程度进行定量评价。

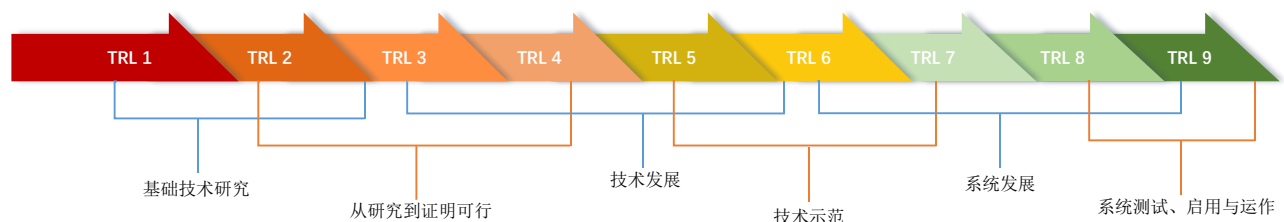


图 16 技术就绪水平等级及含义

整体上看，PtL 制备 SAF 的技术就绪水平评级已经达到 5-8 级，属于较为成熟的水  
平<sup>49</sup>。

<sup>47</sup> IEA, <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china/executive-summary?language=zh>

<sup>48</sup> US EPA, <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-overview>

<sup>49</sup> German Environment Agency, Power-to-Liquids: A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation, 2022.



来源：作者绘制，资料参考 ICAO ACT-SAF #5 Series。RWGS 指逆水煤气转化反应。

图 17 PtL 技术路线各工艺过程的技术成熟度水平

### (1) 电解水制氢

电解水制氢是理想的绿氢制取技术。中国电解水制氢产业于 20 世纪 50 年代从前苏联援助项目中引进，经过七十余年的发展，尤其是在“双碳”目标驱动下，传统企业扩产，新兴企业不断入局，外资加速布局中国市场，目前产业已进入高速发展期。

制氢电解槽是电解水制氢产业的核心设备。根据电解水制氢技术分类，制氢电解槽可以分为碱性电解槽（ALK）、质子交换膜电解槽（PEM）、固体聚合物阴离子交换膜电解槽（AEM）和高温固体氧化物电解槽（SOEC）四类。目前，碱性电解槽已经进行大规模商业应用，质子交换膜电解槽进入商业化初期，其他两种电解槽仍处于研发示范阶段。在技术最成熟、成本最低的碱性电解槽制氢领域，中国占了全球 40% 的份额，且具有很强的价格优势<sup>50</sup>。

欧洲碱性电解槽和 PEM 电解槽的市场占比已经基本持平，中国 PEM 电解槽市场占有率远低于这一水平。2023 年已落地投运的电解槽项目合计装机量为 654 MW，其中 PEM 电解槽占比仅为 5%<sup>51</sup>，尽管这一比例较 2022 年的 3% 已经有了显著提升。相比于欧洲，中国 PEM 电解槽产品在制氢功率电流密度、循环寿命、贵金属催化剂载量等核心指标上还有 5~10 年左右的技术差距<sup>52</sup>。

<sup>50</sup> 国际氢能网，<https://h2.in-en.com/html/h2-2432109.shtml>

<sup>51</sup> 国际氢能网，<https://h2.in-en.com/html/h2-2433405.shtml>

<sup>52</sup> 氢能促进会，<https://cn-heipa.com/newsinfo/7308095.html>



表 5 不同电解水制氢技术路线对比

指标	碱性水解 (ALK)	质子交换膜纯水 电解 (PEM)	阴离子交换膜水 电解 (AEM)	固体氧化物水电 解 (SOEC)
电极/催化剂	镍、钴、锰	铂、铱、钛、金	镍、钴、铁	钙钛矿等陶瓷金 属
电解效率	60~75%	70~90%	-	85~100%
电耗, kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	4.5~5.5	4.0~5.0	-	-
最大单槽制氢规 模, Nm <sup>3</sup> /h	3000	260	5	50
工作温度	70~90℃	50~80℃	40~65℃	700~1000℃
产氢纯度	≥99.8%	≥99.99%	≥99.99%	≥99.99%
操作特征	需控制压差	快速启停	快速启停	启停不便
环保性	强碱腐蚀性强, 石棉膜有危害	无腐蚀性介质, 无污染	-	-
产业化程度	充分产业化	特殊应用/商业化 初期应用	实验室阶段	实验室阶段
技术就绪程度 (TRL)	TRL 9	TRL 9	TRL 7-8	TRL 7-8
面临挑战	能耗较高、电流 密度较低、响应 速度慢	对贵金属催化剂 材料依赖度高、 关键零部件依赖 进口	单槽制氢规模 小、交换膜技术 有待突破	材料成本高、资 产投入大、启停 慢、循环寿命低
国内主机厂家	派瑞氢能、考克 利尔竞立、石化 机械、阳光氢 能、隆基氢能、 三一氢能、华电 重工	派瑞氢能、石化 机械、阳光氢 能、赛克赛斯、 长春绿动、中电 丰业、卡沃罗	亿纬氢能、上海 翌晶氢能、未来 氢能、中电绿 波、稳石氢能	派瑞氢能、上海 氢程、北京质子 动力、北京思伟 特、武汉华科福 赛

资料来源：信达证券、智研咨询、德国环境署，作者整理。

## (2) CO<sub>2</sub> 捕集

CO<sub>2</sub> 捕集主要有两种形式：点源碳捕集（Point Source Capture, PSC）和直接空气捕集。点源碳捕集是指从现有的高碳排放部门，如钢厂、水泥厂等，进行 CO<sub>2</sub> 捕集，该方式下 CO<sub>2</sub> 捕集点位的浓度较高，技术也较为成熟。直接空气捕集是指从大气环境中直接捕集 CO<sub>2</sub>，由于大气中 CO<sub>2</sub> 浓度相对较低，该方式需要消耗更多的能量，技术成熟度低于点源碳捕集。环境效益而言，两种方式捕集的 CO<sub>2</sub> 所生产的 SAF，其生命周期碳足迹都能比传统航空燃料降低 90%以上。

表 6 两种 CO<sub>2</sub>捕集形式对比

	点源碳捕集（PSC）	直接空气捕集（DAC）
CO <sub>2</sub> 来源	<ul style="list-style-type: none"><li>• 依赖化石燃料的工厂</li><li>• 难减排的工业领域</li><li>• 生物质原料处理过程</li></ul>	大气环境
CO <sub>2</sub> 浓度	4~95%	0.04%
捕集过程能耗	较低	高
技术就绪程度	TRL 9	TRL 7
可持续程度	视具体情况而定	理论上没有限制

资料来源：ICAO，作者整理。

近年来，CO<sub>2</sub> 捕集利用和封存（CCUS）项目迅速发展，为 PtL 制备 SAF 所需要的 CO<sub>2</sub> 奠定了产业基础。CCUS 技术已经成为中国碳中和技术体系的重要组成部分，CCUS 项目的兴起主要也是为化石能源净零排放提供技术选择，支撑钢铁、水泥等难减排行业的深度脱碳。截至 2023 年底，中国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目约 107 个，具备 CO<sub>2</sub> 捕集能力约 730 万吨/年<sup>53</sup>。技术水平上，中国 CO<sub>2</sub> 捕集技术发展存在代际差异：第一代捕集技术中，燃烧前物理吸收技术发展比较成熟，处于商业应用阶段，与国际先进水平同步；燃烧后化学吸收技术落后于国际水平，目前还处在工业示范阶段；第二代和第三代捕集技术发展相对滞后<sup>54</sup>。

DAC 技术方面，目前全球已经有多个 DAC 工厂正在运行，其中位于冰岛的 Orca 项目是全球最大的商用 DAC 设施之一，每年能够捕集 4000 吨 CO<sub>2</sub>。但中国 DAC 技术起步较晚，目前尚无 DAC 工业示范装置<sup>55</sup>。

（3）合成工艺

图 14 显示，从合成气（CO+H<sub>2</sub>）或者 CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> 最终合成 SAF，还需要经过费托合成或甲醇合成过程。

费托合成技术已经完全商业化，并基于煤炭气化技术在几十年来得到广泛应用。FT 工艺使用合成气合成长链烃分子。在 PtL 过程中，碳的来源是二氧化碳（CO<sub>2</sub>），必须通过逆水煤气变换反应（Reverse Water Gas Shift Reaction, RWGS）将 CO<sub>2</sub> 转化为一氧化碳（CO）来生成合成气。在这一过程中，RWGS 的技术成熟度较低，为 TRL 6-8 级，因此也影响了该技术路线的整体技术成熟程度。此外，还有一种选择，是直接将 CO<sub>2</sub> 与氢气转化为烃类化合物。然而，这一方法具有挑战性，需要使用催化剂，如铁催化

<sup>53</sup> 前瞻研究院，《2024 年中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）行业全景图谱》。  
<sup>54</sup> 张贤，杨晓亮，鲁玺 等，《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2023）》。  
<sup>55</sup> LIAO Changjian, ZHANG Kewei, WANG Jing, et al. Progress on direct air capture of carbon dioxide[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(4): 2031-2048.

剂，以便将 CO<sub>2</sub> 转化为 CO 并同时进行 FT 合成<sup>56</sup>。

通过 CO<sub>2</sub> 合成甲醇通常有两种方式。一种是两步法制甲醇，通过 RWGS 反应将 CO<sub>2</sub> 和氢气生成合成气，然后通过传统方法制备甲醇，该方法的工艺技术相当成熟，但在该过程中会生成其他副产品，分离副产品和纯化甲醇是该工艺下能源消耗和成本增加的主要原因。另一种是一步法制甲醇，直接以 CO<sub>2</sub> 和氢气为原料，通过压缩、合成、气体分离和精馏等单元制成甲醇。一步法制甲醇是目前研究的主流路径，但该技术下反应转化率受限（约 15-25%），且也可能产生 CO、碳氢化合物、多碳含氧化合物等副产物，降低甲醇的选择性和产率，亟需开发高活性、高选择性和高稳定性的催化剂<sup>57</sup>。从甲醇制 SAF 则需要经过 MTO（甲醇制烯烃）、寡聚和氢化三步反应。虽然 MTO 和甲醇制汽油（MTG）等工艺已在大规模工业应用中建立，但将甲醇转化为航空燃料的工艺链尚未在工业规模上得到证实<sup>58</sup>。MtJ 路径的技术成熟度评级约为 TRL 5~6<sup>59</sup>。

相较于 FT 工艺，选择甲醇作为 PtL 的工艺路径更加具有优势。例如，合成气和氢气的中间存储较为复杂，为液体甲醇更容易存储和运输。在利用绿电等间歇性可再生能源时，甲醇存储也可充当“缓冲区”，在可变的电力供应与下游合成的持续运行之间起到过渡作用。

### 3.5.3 经济可行性

PtL 技术路线制备 SAF 是目前已知的成本最高的 SAF 生产工艺之一，生产的 SAF 成本是传统航空燃料的 4~5 倍，主要成本在于绿电制氢和 CO<sub>2</sub> 捕集成本<sup>49</sup>。有研究显示，未来 PtL 制备 SAF 的成本有很大的下降空间，2030 年最低成本有望达到 1500 欧元/吨，2050 年可进一步下降至 890 欧元/吨<sup>60</sup>。

#### （1）绿氢成本

目前，中国煤制氢的成本约 9-10 元/kg，天然气制氢成本约为 15 元/kg，而绿氢在电价为 0.3 元/kWh 的情况下，平均成本为 25 元/kg<sup>61</sup>。绿氢的成本构成中，电耗成本最高，约占总成本的 60~80%<sup>62</sup>。以碱性电解槽为例，每制取 1 立方米的氢气，系统耗

<sup>56</sup> Panzone, C., Philippe, R., Chappaz, A., Fongarland, P., & Bengaouer, A. (2020). Power-to-Liquid catalytic CO<sub>2</sub> valorization into fuels and chemicals: Focus on the Fischer-Tropsch route. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 38, 314–347.

<sup>57</sup> IEA Bioenergy, <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf>

<sup>58</sup> Pussana Hirunsit, Alessandro Senocrate, Carlos E. Gómez-Camacho, and Florian Kiefer, From CO<sub>2</sub> to Sustainable Aviation Fuel: Navigating the Technology Landscape. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* **2024**, 12 (32), 12143–12160.

<sup>59</sup> Mission Green Fuels, <https://missiongreenfuels.dk/methanol-to-jet/>

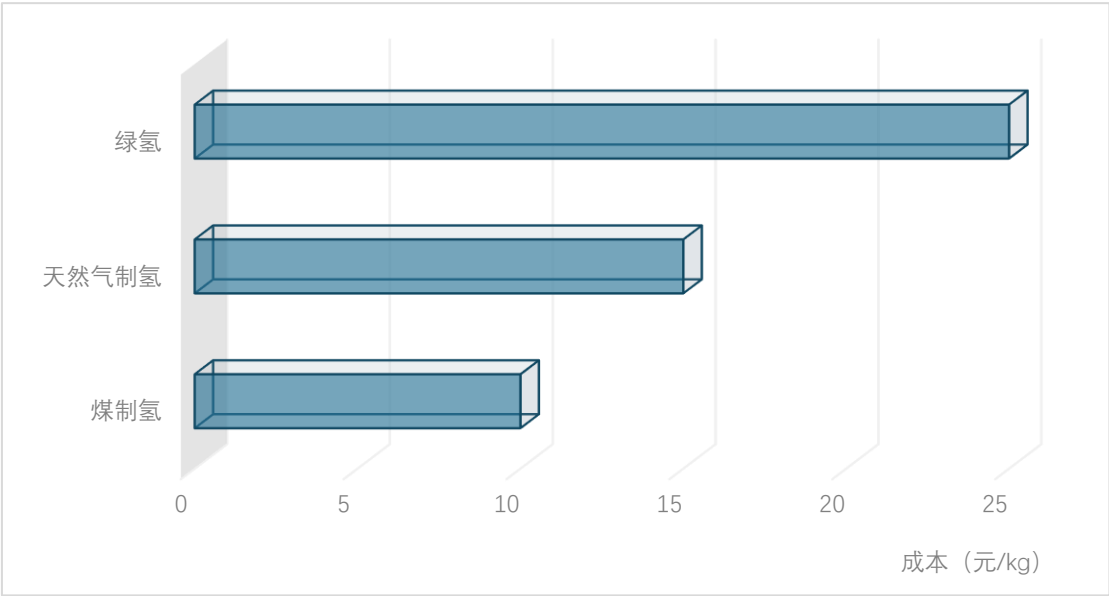
<sup>60</sup> Seymour K., Held M., Stolz B., Georges G., Boulouchos K., Future costs of power-to-liquid sustainable aviation fuels produced from hybrid solar PV-wind plants in Europe, *Sustainable Energy Fuels*, 2024.

<sup>61</sup> 东吴证券，电力设备行业深度报告。

[https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202303071584103849\\_1.pdf?1678262256000.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202303071584103849_1.pdf?1678262256000.pdf)

<sup>62</sup> 人民网，[http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-02/05/content\\_26043636.htm](http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-02/05/content_26043636.htm)

电量为 5.5~6.0 kWh<sup>63</sup>，如果耗电量不能大幅下降，那么较高的电价就成为限制绿氢成本下降的主要因素之一。



来源：作者绘制。

图 18 不同制氢技术的成本对比

风、光电发电本身的成本并不高，但是在利用过程中，由于风、光发电的波动性、随机性和不稳定性，要维持绿电制氢系统的持续稳定运行，要么通过增加更多风、光装机和储能，实现离网型制氢，要么依靠网电的支撑，进行并网型制氢。在现有技术条件下，并网型制氢的电价要高于 0.18 元/kWh，在该电价下，绿氢的成本依然要高于化石能源制氢。

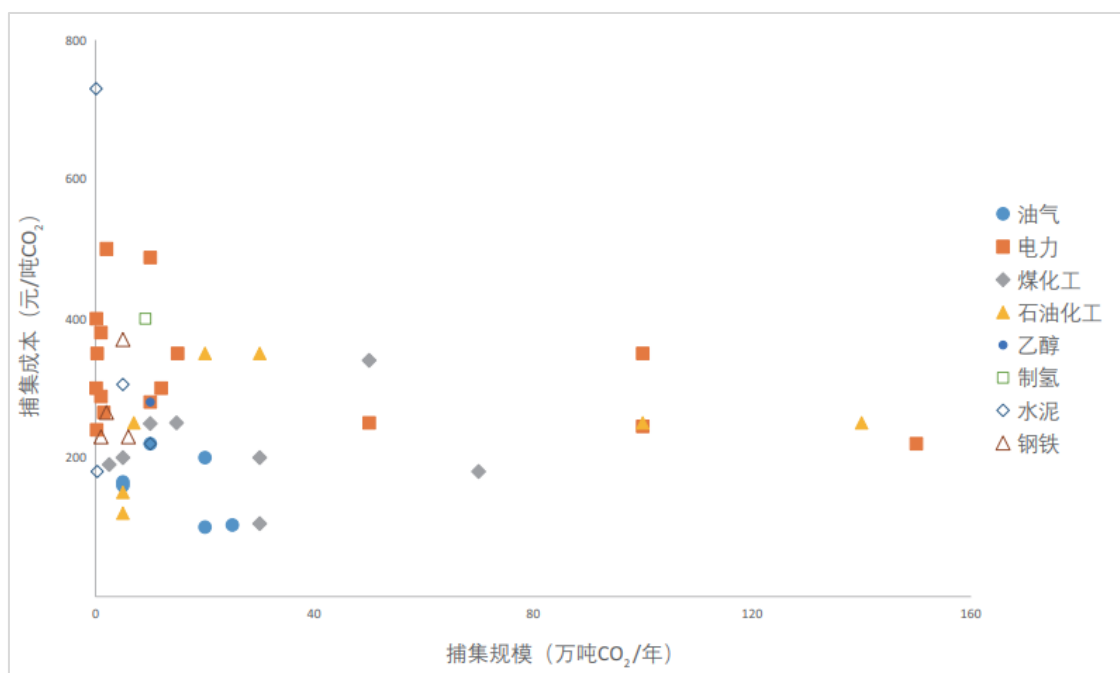
要解决这一问题，除了要进一步降低风、光发电的成本外，还要加快提升电力系统的调峰能力和消纳能力，利用柔性直流输电技术，推动风、光发电并网。

(2) CO<sub>2</sub> 捕集

整体上看，中国 CCUS 示范项目中的 CO<sub>2</sub> 捕集成本处于全球中等偏低水平，具有一定的成本优势。具体而言，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 CO<sub>2</sub>；电力、水泥的捕集成本相对较高，分别为 200~600 元/吨 CO<sub>2</sub> 和 305~730 元/吨 CO<sub>2</sub>，但仍比国外平均成本低 38~42%和 43~55%<sup>54</sup>。

CO<sub>2</sub> 捕集成本的优化更多依赖于技术的提升和捕集能耗的降低。《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030 年）》文件中提出，“力争到 2025 年实现单位 CO<sub>2</sub> 捕集能耗比 2020 年下降 20%，到 2030 年下降 30%”，从而实现捕集成本的大幅下降。

<sup>63</sup> 国信证券，氢能行业专题研究之三：制氢电解槽。[https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202307071592103693\\_1.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202307071592103693_1.pdf)  
Page | 37



资料来源：张贤，杨晓亮，鲁玺 等，《中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023)》。

图 19 中国主要排放源已投运 CCUS 示范项目的 CO<sub>2</sub> 捕集成本

不同捕集方式所使用的工艺和设备不同，也就造成了 CO<sub>2</sub> 捕集和分离的能耗差异。总体而言，研发高吸收性、低污染和低能耗再生溶剂，使用高吸附容量和高选择性的吸附材料，研发高渗透性和选择性的新型膜分离技术，都有助于降低 CO<sub>2</sub> 捕集能耗<sup>64</sup>。另外，英国萨里大学的一项研究指出，使用人工智能模型对系统进行训练，可更加智能地调节资源分配，从而减少能源消耗，增加 CO<sub>2</sub> 捕集量<sup>65</sup>。

对于 DAC 技术而言，由于空气中 CO<sub>2</sub> 的体积分数仅为 0.04%，且分压低，导致 DAC 的成本非常高。现有研究数据显示，目前 DAC 技术的 CO<sub>2</sub> 捕集成本约为 250~600 美元/吨，利用 DAC 技术从空气中实现碳去除的成本更是高达 200~700 美元/吨<sup>66</sup>。其中，捕集成本指的是在 DAC 项目整个周期内捕获每单位 CO<sub>2</sub> 所需的经济成本；而碳去除成本指的是在扣除项目运行过程中额外产生的 CO<sub>2</sub> 排放后，从空气中净捕获每单位 CO<sub>2</sub> 的成本。尽管有研究预测至 2050 年，DAC 捕集成本可降至 100 美元/吨以内，但实现该成本水平的难度很大，需要制定强有力的政策予以支持<sup>66</sup>。

### (3) CO<sub>2</sub> 运输

多数情况下，捕集后的 CO<sub>2</sub> 需要通过交通工具运输至绿醇或 SAF 生产基地。在现

<sup>64</sup> 中国环境科学研究院, [https://www.craes.cn/xxgk/zhxw/202107/t20210715\\_847263.shtml](https://www.craes.cn/xxgk/zhxw/202107/t20210715_847263.shtml)

<sup>65</sup> Reccessary, <https://www.reccessary.com/zh-cn/news/world-technology/ai-helps-to-slash-energy-usage-of-carbon-capture>

<sup>66</sup> 周爱国，余晓洁，贺红旭，等.直接空气捕碳（DAC）的成本评估预测及其影响因素[J].洁净煤技术，2024, 30（10）：186–198.

有 CCUS 项目中，CO<sub>2</sub> 经捕集并分离后，被压缩至“密相”或类似液体的状态，通过管道运输至合适的地点进行封存，也有一些项目使用船舶或火车运输，少量的 CO<sub>2</sub> 运输也有使用槽车运输的案例<sup>67</sup>。

根据预测，2025 年管道运输 CO<sub>2</sub> 的成本约为 0.8 元/（吨·km），2035 年可降低至 0.6 元/（吨·km），2050 年降至 0.45 元/（吨·km）。而罐车的运输成本约为管道运输的 2 倍左右<sup>68</sup>。

3.5.4 更利于中国的选择：绿色甲醇技术路径

尽管从甲醇制 SAF（MtJ）的工艺路径尚未被 ASTM 批准通过，但该路径下 SAF 的产率和选择性更高，同时可最大化利用碳源<sup>69</sup>，具有广阔的应用前景。国际上，包括 ExxonMobil，Johnson Matthey，霍尼韦尔等在内的能源公司都在力推该工艺。

目前国际上对该技术路径还不够重视，主要是因为欧美等国家缺乏相应的大规模应用场景。于中国而言，发展绿色甲醇制 SAF 技术路径则具有如下优势。

（1）中国已经具备绿色甲醇产业优势

中国是全球最大的甲醇生产国和消费国，甲醇产能占全球总量的 56%左右，2023 年中国甲醇表观消费量约 9758 万吨，覆盖化工、工业燃料、交通等多个领域<sup>70</sup>。庞大的甲醇产业基础也为绿色甲醇的发展提供了更多机遇。

截至 2024 年底，中国绿色甲醇项目累计接近百余项（含建成、在建、筹备及签约项目），已披露的产能超过 2700 万吨/年<sup>71</sup>，<sup>72</sup>，合计产能是 2023 年底的 3.4 倍左右，其中多个项目的投资超过百亿元<sup>73</sup>。

表 7 中国百亿投资级绿色甲醇项目（部分）

	总投资	主要建设内容	状态
上海电气洮南市风电耦合生物质绿色甲醇一体化示范项目	224 亿	全部建成后每年可生产百万吨绿色甲醇	建成开工
西南化工研究院金风绿能绿氢制 50 万吨绿色甲醇项目	136.65 亿	绿色甲醇和 SAF 规划总产能超过两千万吨	施工建设
辽源天楹制醇科技有限公司辽源绿色甲醇合成项目	110 亿	以绿氢、绿碳制备绿色甲醇，一期甲醇建设规模 17 万吨/年	环评公示
中能（双鸭山）综合能源有限公司双鸭山生物制绿色甲醇及	208 亿	年产 100 万吨级绿色甲醇及绿色航油，配套建设甲醇工厂、航油工厂、	完成备案

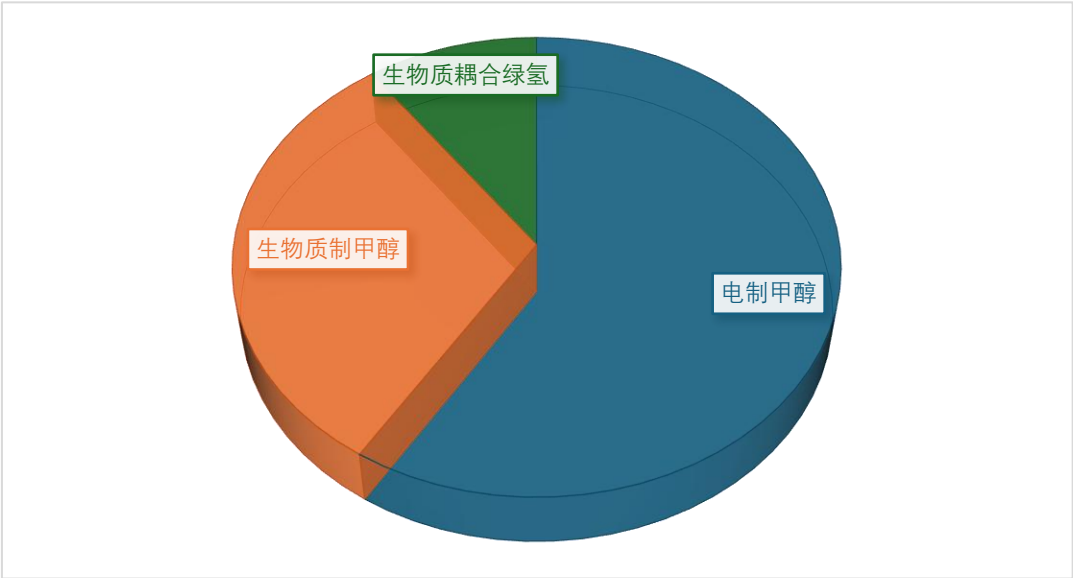
<sup>67</sup> International CCS knowledge Center, [https://ccsknowledge.com/pub/Factsheets/Factsheet\\_EOR\\_Chinese.pdf](https://ccsknowledge.com/pub/Factsheets/Factsheet_EOR_Chinese.pdf)  
<sup>68</sup> 中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）。  
<sup>69</sup> Johnson Matthey, <https://matthey.com/methanol-to-jet>  
<sup>70</sup> 人民网, [http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content\\_26075497.htm](http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content_26075497.htm)  
<sup>71</sup> 能源研究, <https://ecep.ofweek.com/2024-10/ART-93010-8420-30647316.html>  
<sup>72</sup> 新能网, <https://ner.jgvogel.cn/c1471001.shtml>  
<sup>73</sup> 中国储能网, <https://www.escn.com.cn/20241223/fd361f5f6a4d42669dfe28aea533b5f6/c.html>



绿色航煤一体化项目		生物质预处理工厂、风电场、光伏电站、制氢储氢设施等	
全球首个亿吨级液态阳光绿色甲醇制造项目	185.3 亿	远期规划总体形成年产 1 亿吨绿色低碳甲醇产能	备案立项
运达能源吉林大安绿色甲醇项目	115 亿	建设约 80 万吨生物质秸秆气化合成绿色甲醇生产线和约 20 万吨水电解制氢催化合成绿色甲醇生产线	签订协议
北京第一元素有限公司 200 万千瓦风电制氢氨甲醇项目	190 亿	建设风电场，16 万吨合成氨与 60 万吨甲醇年产能	签约

来源：作者整理，资料来自于网络收集。

在现有公开的绿色甲醇项目中，电制甲醇占比接近 60%（图 20），由此可见，电制甲醇已经成为绿色甲醇未来发展的主要趋势。生物质气化路线制备甲醇项目占比约为 30%，极少数项目为生物质制甲烷技术路线，另有 10%的项目以生物质耦合绿氢的技术路线生产甲醇。



来源：作者绘制，数据来自国信证券。

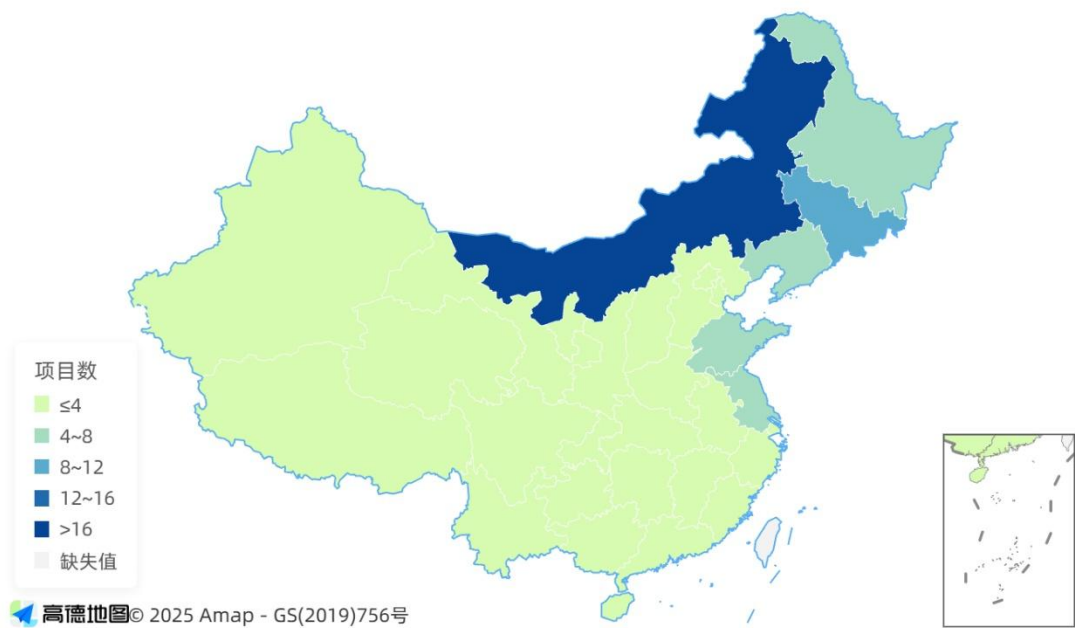
图 20 中国绿色甲醇项目技术路线分布

绿电、绿氢消纳是中国电制甲醇项目建设的重要驱动力。从地理位置分布上看，绿色甲醇项目主要集中在内蒙古和东北地区，这些地区丰富的风、光资源和生物质资源为绿色甲醇项目提供了原料和成本优势。

2024 年 8 月，霍尼韦尔宣布与内蒙古久泰集团合作，采用霍尼韦尔 UOP eFining™ 技术打造年产 10 万吨的甲醇制 SAF 项目。UOP eFining™ 是一种甲醇制航空燃料的工艺技术，可将电制甲醇大规模转化成合成 e-SAF，并减少 88%的温室气体排放<sup>74</sup>。这一合作也开启了中国绿色甲醇制 SAF 产业路径的新篇章。

<sup>74</sup> Honeywell, [https://www.honeywell.com.cn/news-events/newsroom/news/2024/08/news20240805\\_1](https://www.honeywell.com.cn/news-events/newsroom/news/2024/08/news20240805_1)

根据绿色甲醇产业的规划布局，甲醇资源端主要分布在风/光资源较好的西北、东北等地区（图 21），应用端主要分布在经济发达的华南、华东、西南等地区。绿色甲醇产业资源与市场的地理位置错位，对未来绿色甲醇的储运链提出了更高要求，通过管道进行规模化输送的必要性也愈发凸显。中国国家管网集团等企业正在积极开展管道输送甲醇等技术的相关研究，为绿色甲醇的规模化储运奠定了良好开局<sup>75</sup>。



来源：作者绘制，数据来自于网络资料、国信证券。

图 21 中国绿色甲醇项目分布

（2）可耦合绿色航运需求形成规模效应

耦合绿色远航运输（航运）对绿色甲醇的燃料需求形成规模化效应，利用市场化机制降低绿色甲醇价格，进而扩大 **MT** 技术路线的成本优势，是发展绿色甲醇制备 **SAF** 这一技术路线的又一优势。

与民航类似，国际航运业脱碳也将主要依靠绿色燃料<sup>76</sup>。目前，航运绿色燃料的发展也处于起步阶段，包含绿氢、绿氨、绿色甲醇等多条路径。绿色甲醇作为航运绿色燃料具备以下优势<sup>77</sup>：

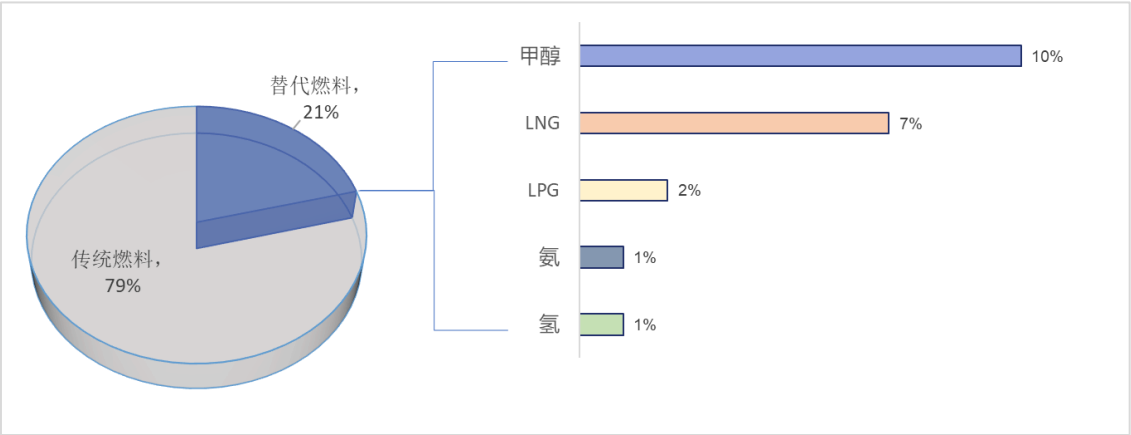
- 高减排潜力 – 与传统船用燃料相比，甲醇燃烧可显著减少 **95%**以上的硫氧化物和颗粒物排放，以及高达 **80%**的氮氧化物排放。这使得甲醇成为一种更清洁的替代品，与减少航运活动造成的空气污染的全球努力保持一致。

<sup>75</sup> 人民网, [http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content\\_26075497.htm](http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content_26075497.htm)

<sup>76</sup> World Economic Forum, <https://www.weforum.org/stories/2024/11/shipping-zero-emission-fuels/>

<sup>77</sup> OPIS, <https://www.opisnet.com/blog/fueling-the-future-methanols-role-in-decarbonizing-maritime-transport/>

- 碳中和潜力 - 当由生物质或可再生电力等可再生资源生产时，甲醇可以实现碳中和的生命周期。这与国际海事组织（IMO）的脱碳目标一致，为航运公司提供了满足日益严格的环境法规的战略途径。
- 设备兼容性 - 与其他替代燃料（如液化天然气（LNG））不同，甲醇在环境条件下的液态使其能够以最小的改造成本无缝集成到现有的加油和存储基础设施中。这种兼容性减少了采用的障碍，并促进了向更清洁燃料选择的平稳过渡。



来源：作者绘制，数据来自于 DNV，Marine Link.

图 22 不同燃料类型的新船订单占比（2023.06-2024.06）

2023 年，全球 5000 总吨以上的船队的燃料消耗量达到 2.11 亿吨，其中绝大多数仍为传统燃料，生物燃油进展总消耗量的 0.2%<sup>78</sup>。面向未来，随着航运业绿色转型需求的加剧，航运也对绿色甲醇的需求也将进一步增加，绿色甲醇也将迎来重要发展机遇。

3.5.5 优势与关键挑战

从以上分析来看，PtL 技术路线的相关环节已经打通，中国在这方面具备一定优势。体现在：

- 中国可再生电力（绿电）容量高、市场大，现阶段累计装机规模达到 15 亿千瓦，年发电量超过 1 万亿 kWh，有潜力满足大规模 SAF 生产所需的绿色电力。
- 中国绿氢项目已经进入快速发展期，目前规划产能突破 800 万吨/年，未来仍有大幅增长的潜力。
- 中国长期以来倚重化石燃料，对来自工业中化石燃料燃烧产生 CO<sub>2</sub> 进行捕集

<sup>78</sup> IMO, <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-82nd-session.aspx>

具有浓度高、能耗低的优势，可作为 PtL 技术路线前期所需 CO<sub>2</sub> 的主要来源。

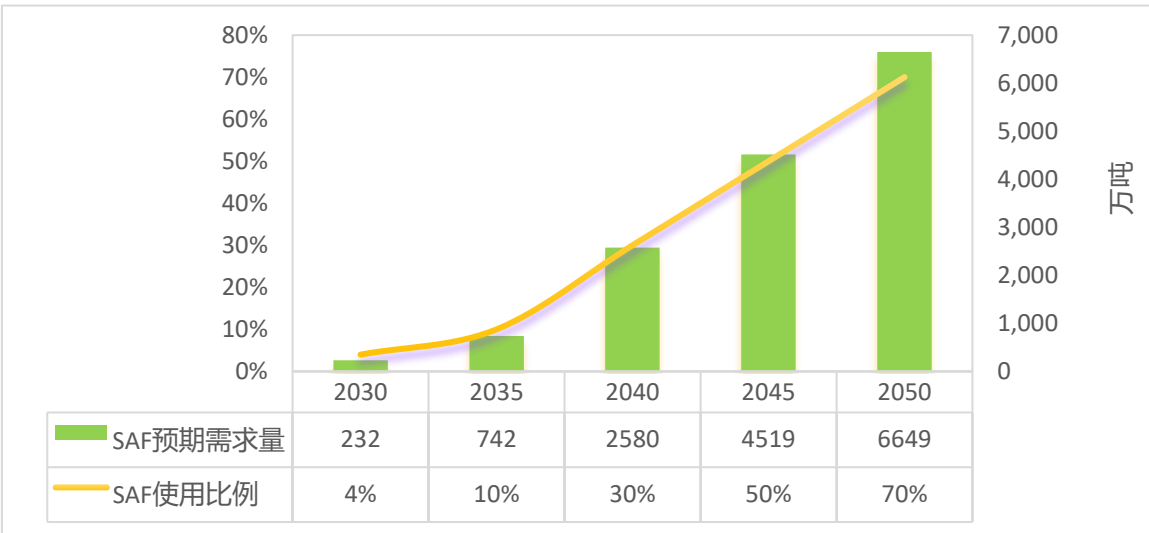
- 中国具备绿色甲醇产业优势，一旦 MtJ 技术路径得到 ASTM 批准，以绿色甲醇作为中间体的技术路径将得到快速发展，届时中国 e-SAF 产业将迎来重大发展机遇。

与此同时，相关技术水平仍有待提升。PtL 技术路线生产 SAF 的成本仍然居高不下，这也是全球所面临的共同挑战。对中国而言，还需要以下行动：

- PEM 电解槽产品在制氢功率电流密度、循环寿命、贵金属催化剂载量等核心指标上有待提升，从而加快 PEM 电解槽的市场化推广与应用。
- 加快发展第二代、第三代 CO<sub>2</sub> 捕集技术，并尽快建立 DAC 技术捕集 CO<sub>2</sub> 的工业示范装置，缩小与国际先进水平的差距。
- 进一步降低风、光发电的成本，同时加快提升电力系统的调峰能力和消纳能力，利用柔性直流输电技术，推动风、光发电并网，进而降低绿氢制备成本。
- 目前全球尚无统一的绿色甲醇认证标准，如利用中国大量的工业排放 CO<sub>2</sub> 作为碳源进行绿色甲醇、SAF 生产，过高的碳排放强度值极可能导致燃料的低碳属性引起争议，需与相关产业机构充分沟通，确定该过程生产燃料的减排标准，并取得国际认可。
- 需要研发和使用更优性能和更高容量的 CO<sub>2</sub> 吸收剂与吸附材料，降低 CO<sub>2</sub> 捕集能耗，从而降低 CO<sub>2</sub> 捕集成本。
- 积极推动 MtJ 技术路径得到国际认可，尤其是获得 ASTM 批准，为该路径的进一步发展提供引导与保障。

### 3.6 不同时期 SAF 需求量及来源分析

仍以第二章设定的航空燃油消费量增长趋势作为基准，研究计算得到了不同时期中国航空业对 SAF 的需求量，如图 23 所示。



来源：作者绘制，假设中国航空燃料消费量按照 10%（2025）、7%（2026~2030）、5%（2031~2035）、3%（2036~2040）、和 1%（2041 及以后）的速度增加。

图 23 中国 SAF 预期需求量及使用比例

根据研究提出的中国 SAF 中长期发展技术路线战略，前期的 SAF 需求将主要由 HEFA 技术路线生产的 SAF 满足。研究对中国的餐厨废油及其使用情况做出如表 8 的假设。2023 年，中国餐厨废油总量约 570 万吨，其中绝大多数用于出口。研究假设随着餐厨废油回收产业链的不断健全，回收率将有一定提升，2030 年、2035 年餐厨废油回收总量较 2023 年和 2030 年分别增加 5%，达到 599 万吨和 628 万吨，此后基本维持这一水平。同时，假设回收得到的餐厨废油用于 SAF 生产的比例不断提升，并按照 65% 的综合产出率，得到不同时期 HEFA 技术路线下 SAF 的生产量情况。

根据图 23，2030 年中国 SAF 预期需求量为 232 万吨，HEFA 技术路线生产的 SAF 可达 272 万吨，已经能够满足国内需求。其他的 SAF 产能，包括生物质气化费托合成、醇制航煤生产的 SAF，可以支撑部分国际航空公司的 SAF 需求。需要注意的是，由于餐厨废油为非可再生原料，包括英国在内的一些国家提出，未来随着其他技术的发展，要逐渐降低 HEFA 技术路线生产 SAF 的使用比例，这也进一步对其他技术路线的发展提出了更高期待。

表 8 不同时期餐厨废油回收量及用于 SAF 生产的情况预测

	餐厨废油回收量 (万吨/年)	用于生产 SAF 的餐厨废油 比例	HEFA 技术路线 SAF 产量 (万吨/年)
2023	570	/	/
2030	599	70%	272
2035	628	80%	327
2040	628	85%	347
2045	628	90%	368
2050	628	95%	388

来源：作者根据研究假设计算。

生物质气化费托合成、醇制航煤技术路线方面，理想情况下，中国现有的生物质原料能够基本满足国内的 SAF 需求。但在实际操作中存在两个问题：第一，天然、可再生的生物质资源在长期的发展过程中，形成了多样化的处理方式和利用途径，将生物质作为 SAF 生产原料也将导致与其他产业之间，如生物质肥料、板材生产、造纸等，形成原料竞争；第二，生物质资源分布较为分散，原料回收面临季节气候影响大、存储时间短、分布松散等难点，目前国内虽有一些成熟的方案，但仍亟需建立一套完善的生物质原料收储运体系，提高原料的供应能力。

假设生物质原料中，可用于 SAF 行业的原料占比逐年提升，2040 年后稳定在 50% 左右，也就是说，有一半的生物质原料被用于其他产业。随着生物质原料收储运体系的建立和完善，研究假设可用于 SAF 行业的生物质原料的回收利用率也逐步提升，具体如表 9 所示。据此推算，(G+FT)/AtJ 技术路线下，2030 年 SAF 的产量可达到 216 万吨/年，至 2050 年，该技术路线下 SAF 产量可达到 2400 万吨/年。

表 9 中国可再生生物质原料用于 SAF 生产的情况预测

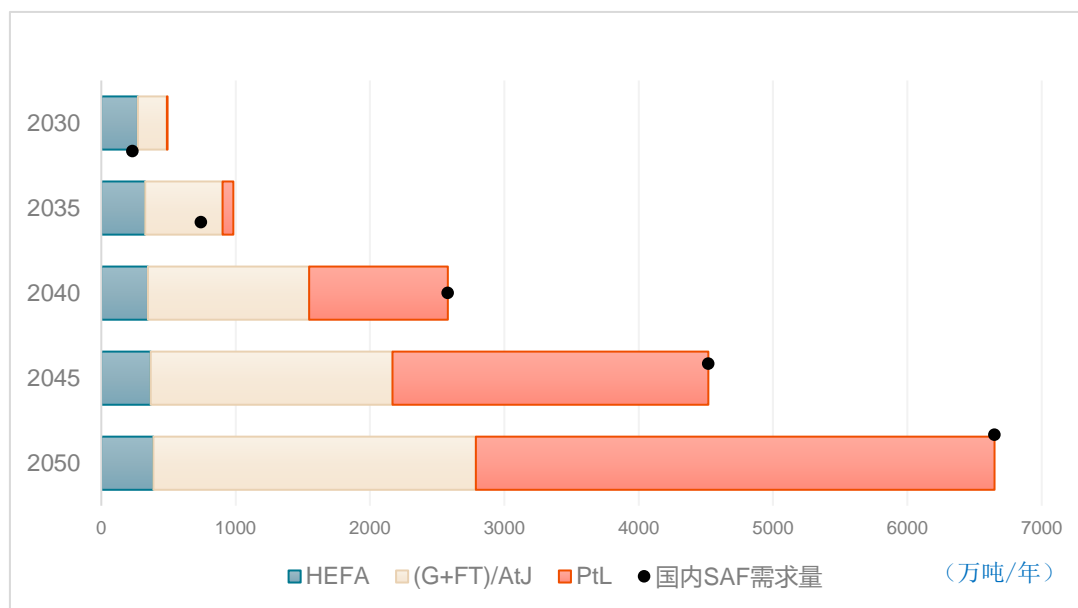
	生物质原料总量 (亿吨/年)	可用于 SAF 行业的 生物质原料占比	生物质原料回收利 用率	(G+FT)/AtJ 技术路线 SAF 产量（万吨/年）
2030	12	30%	6%	216
2035	12	40%	12%	576
2040	12	50%	20%	1200
2045	12	50%	30%	1800
2050	12	50%	40%	2400

来源：作者绘制，其中“可用于 SAF 行业的生物质原料占比”与“可用于 SAF 行业的生物质原料回收利用率”为研究假设数值。SAF 产量计算中，将生物质生产 SAF 的综合产出率设定为 10%。

整体来看（图 24），在较为乐观的情况下，2035 年之前，HEFA 和(G+FT)/AtJ 技术路线可满足中国国内的 SAF 需求量。在 2030 年左右，如果(G+FT)/AtJ 技术路线能够按照预期发展，国内生产的 SAF 总量在满足国内需求后，还将有 150 万吨左右的余量。PtL 技术则需要一段时间进行储备和发展，2040 年以后，PtL 技术路线有望得到快速发展，并逐步成为国内 SAF 生产的主流技术。

当然，技术的发展存在一定的不确定性，这与市场环境、政策引导与支持、生产成本等诸多因素密切相关。要使 SAF 生产以及各种技术的发展能够符合预期，仍需要各利益相关方的共同努力。





来源：作者绘制，数据由根据研究所做假设进行核算。其中，2030 和 2035 年 PtL 技术路线生产 SAF 的产量由作者假设，目前国内尚未有这方面的预测作为参考；2040 年及以后 PtL 技术路线生产 SAF 的产量则为国内 SAF 需求量减去 HEFA 和(G+FT)/AtJ 技术路线下 SAF 的产量而得，这一时期可能出现的问题在于 PtL 技术路线的发展有可能滞后于该预测水平。

图 24 不同时期各技术路线 SAF 对总体需求量的贡献

## 第四章 加快制定中国本土的可持续航空燃料绿色认证体系

作为航空燃料的 SAF，需满足两重认证，才能作为被国际航空业认可的、可用于减排履约的航空加注燃料，这两重认证分别是适航审定和可持续性认证。

对中国而言，适航审定由中国民航局下属的中国民用航空航油航化适航审定中心进行（见 5.3 节）。对于 SAF 的可持续认证（或称，绿色认证），ICAO 目前共指定了 ISCC、RSB 和 ClassNK SCS 三个认证计划体系。

展望未来，中国作为 SAF 产业的核心生产者和消费者之一，需尽快制定出被 ICAO 认可的、更加符合中国国情的 SAF 可持续认证体系，避免国际通行的 SAF 认证标准将中国 SAF 技术路线排除在外<sup>79</sup>。

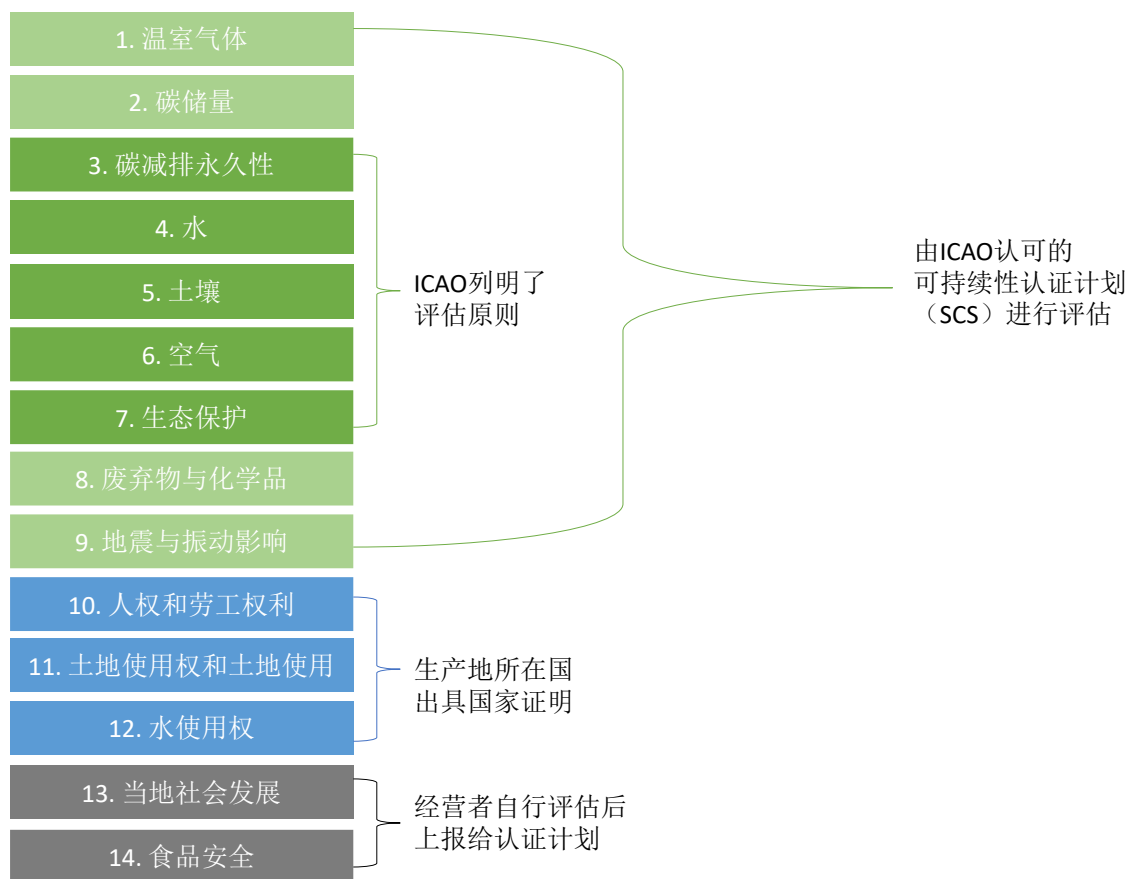
### 4.1 SAF 可持续性认证概述

SAF 必须经过可持续认证，表明其符合 ICAO 设定的 14 个可持续性指标（适用于 2024 年 1 月 1 日后生产的燃料）<sup>80</sup>，才能作为合格的可持续燃料用于 CORSIA 履约。

对 ICAO 设定的 14 个可持续性标准，9 项由 ICAO 指定的可持续性认证计划（RSB 或 ISCC）进行评估。在这 9 项中，ICAO 列明了其中 5 项标准的评估原则，并授权理事会解决认证计划和成员国之间可能存在的分歧，但认证计划对于具体的判断标准具有话语主动权<sup>79</sup>。余下的 5 项标准中，其中 3 项可由生产地所在国出具国家证明，无需由 SCS 进一步评估，另外 2 项由经营者自行评估<sup>80</sup>，具体见图 25。

<sup>79</sup> 管建强，陈诗麒，可持续航空燃料的规制现状、挑战与展望. 北京航空航天大学学报，2023.

<sup>80</sup> ICAO, CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels (3<sup>rd</sup> edition), 2022.



来源：作者绘制，标准 3-7 的评估原则参见 ICAO, *Guidance to Sustainability Certification Schemes (SCS) for application of CORSIA Sustainability Criteria, Themes 3 to 7, for CORSIA Sustainable Aviation Fuel produced on or after 1 January 2024.*

图 25 SAF 可持续性认证的主体归属

需要指出的是，以上提到的“经营者”是指 SAF 供应链上每个环节的参与者，具体如图 26 所示。为确保可追溯性和监管链完整性，SAF 供应链中任何对 SAF 进行变更（无论是化学变更还是温室气体排放因子变化），或对 SAF 原料或 SAF 本身取得法律所有权的主体，都必须获得认证<sup>81</sup>。



来源：作者绘制，参考 ISCC 相关资料。

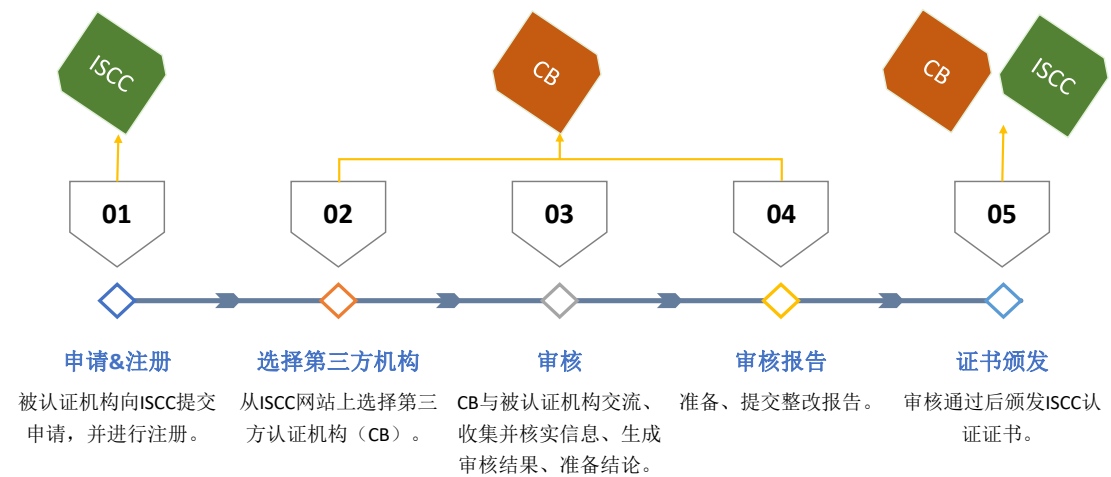
图 26 SAF 供应链示意图

<sup>81</sup> IATA, Understanding SAF Sustainability Certification, 2024.  
[https://www.iata.org/contentassets/0bf212bfc0548f2b6ad4c1e229f7e94/guidance-document-on-saf-sustainability-certification-v0.41\\_rm-indepth.pdf](https://www.iata.org/contentassets/0bf212bfc0548f2b6ad4c1e229f7e94/guidance-document-on-saf-sustainability-certification-v0.41_rm-indepth.pdf)

经认证的经济经营者必须为任何一批出口的可持续材料提供可持续性文件证明，无论该材料是原材料、中间产品还是 SAF。相关文件通常被称为可持续性证明（PoS），PoS 有助于在 SAF 供应链中建立健全的监管链。航空公司要求其 SAF 供应商提供所购买 SAF 批次的可持续性证明，以帮助它们根据不同的监管框架申报 SAF 的环境属性，如在 CORSIA 框架下减免排放义务。

ISCC 和 ClassNK SCS 的认证证书有效期通常为 12 个月。超出期限后，经营者必须进行重新认证，以确保继续符合认证计划的要求。RSB 认证证书的有效期取决于运营商的风险等级（2 年、3 年或 5 年），在有效期内，每年将进行一次监督审计，以维持证书的有效性<sup>81</sup>。

需要指出的是，RSB、ISCC 等认证体系本身并不进行实际的认证活动，而是通过规定一系列资格条件与系统框架，让符合认证资格的第三方机构（Certification Bodies, CBs）开展具体审核工作。在 ISCC 认证体系下进行可持续燃料认证的具体流程如图 27 所示，其他认证体系的具体流程与此大致类似。



来源：据 ISCC 相关资料，由作者绘制。

图 27 ISCC 可持续性认证流程示意图

## 4.2 中国制定 SAF 可持续性认证体系面临的关键问题

### 4.2.1 政府主导或背书

自 2009 年开始，中国民用航空局第二研究所（简称“民航二所”）就已经开始布局 SAF 的相关研究工作。2024 年 7 月 1 日，民航二所正式挂牌成立可持续航空燃料中心（简称“SAF 中心”），从功能定位来看，该中心未来将全面协助民航局开展 SAF 相关政策研究，推动建立包含产品、质量控制和可持续性评价的 SAF 标准体系，并牵头

建立中国自主的航空燃料可持续认证体系（CSCS）<sup>82</sup>。

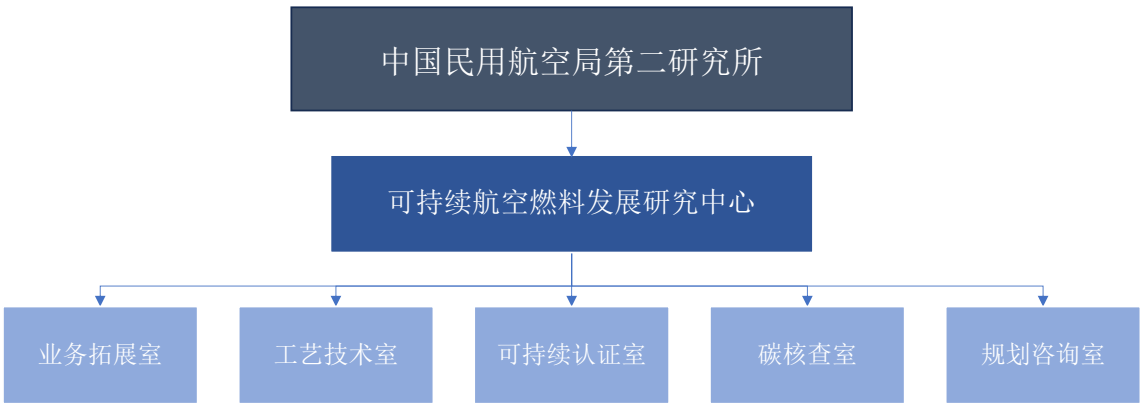


图 28 民航二所可持续航空燃料发展研究中心组织架构图

政府主导进行 SAF 可持续性认证体系的构建，对中国国内的 SAF 企业而言具有重大意义。一方面，表明了国家层面对 SAF 产业的重视，极大地鼓舞了本土企业，也提升了境外资本的投资信心。另一方面，政府直属部门的介入，能够更有效地联合行业和研究力量，充分发挥资源优势，更好地保证可持续性认证体系制定的时效性和权威性。

其他国家机构，如国家标准化管理委员会和标准化研究院、中国质量认证中心（CQC）也应积极参与其中，在 SAF 产业发展与在实际应用中发挥各自优势和作用。其中，CQC 已经取得 ISCC CORSIA 认证资质，具有一定的可持续性认证实战经验，可为中国本土化可持续性认证体系的建设提供经验和思路。

4.2.2 发展第三方认证机构

在 RSB CORSIA 认证体系框架下，仅有两家第三方认证机构，分别来自美国和西班牙<sup>83</sup>。在 ISCC CORSIA 框架下，中国仅有 CQC 一家机构进入第三方认证机构名单<sup>84</sup>。随着全球 SAF 产业的发展，行业对认证机构和专业审计人员的需求也将快速提升。为此，中国应注重第三方认证机构的能力建设，为 SAF 认证的本土化建设输送更多的专业技术人才，并借此机会推动第三方认证机构的发展。以 ISCC 认证机制为例，在 ISCC EU 和 ISCC PLUS 框架下，中国除 CQC 外，还有其他四家认证机构具备资质<sup>84</sup>，这些机构未来很有希望获得 ISCC CORSIA 认证资格。

能力建设方面，以 ISCC 为例，遵照其规定，CB 管理的所有审计员必须通过 ISCC

<sup>82</sup> 中国民航网, [http://www.caacnews.com.cn/1/4/202407/t20240702\\_1379549.html](http://www.caacnews.com.cn/1/4/202407/t20240702_1379549.html)

<sup>83</sup> RSB, <https://rsb.org/certification/certification-bodies/>

<sup>84</sup> ISCC, <https://www.iscc-system.org/certification/certification-bodies/>

基础培训和 ISCC CORSIA 培训，并需要通过相应的在线测试后，方能获得审计资格<sup>85</sup>。

ISCC 规定了 CB 所属的审计员应具有以下技能：

- ✓ 了解 ISCC CORSIA 要求及与 CORSIA 适用燃料相关的 ICAO CORSIA 实施要素。
- ✓ 了解并具备可持续性要求、质量平衡系统、可追溯性、温室气体生命周期评估（GHG LCA）计算以及数据收集和处理的经验。
- ✓ 了解并具备相关领域（例如农业、工程）的知识和经验。
- ✓ 至少 2 年相关工作经验；总体而言，至少 3 年工作经验。
- ✓ 至少 40 小时的审计培训（例如，依据 ISO 19011 标准）。
- ✓ 至少完成四次完整的审计，总计至少 20 天的审计经验，作为审计员培训生，在具有审计团队领导者资格的审计员指导下进行。审计需在过去三年内完成。
- ✓ 至少 20 天的审计经验，作为培训生在具有审计团队领导者资格的审计员指导下进行。审计需在过去三年内完成。
- ✓ 至少完成三次完整的审计，总计至少 15 天的审计经验，作为审计团队领导者，在具有审计团队领导者资格的审计员指导下进行。审计需在过去两年内完成。
- ✓ 具备处理、评估、收集和验证数据及数据来源的能力。
- ✓ 具备可追溯性验证、相关数据库、供货链管理选项、供应链物流，特别是质量平衡计算和验证的知识。
- ✓ 具备团体认证和抽样原则的能力（如审计过程中涉及）。
- ✓ 在进行第一次 ISCC CORSIA 审计之前，需参加 ISCC 基础培训和 ISCC CORSIA 培训。参加 ISCC 基础培训和 ISCC CORSIA 培训后，必须至少每五年重复参加一次。

对于进行 LCA 排放相关审计工作的审计员，除满足以上要求外，还需要额外具备根据 ISO 14064-3 标准进行温室气体计算和验证的能力，以及具备链条管理的能力。

### 4.2.3 标准体系构建

#### （1）可持续性标准

2023 年 7 月中国民航局发布了《航空替代燃料可持续性要求》（征求意见稿），这是中国民航业推动航空替代燃料发展的重要一步。该标准由民航局适航司提出，由民航二所牵头起草。可持续性标准是开展 SAF 可持续性认证工作的基础，在此之前，美

---

<sup>85</sup> ISCC CORSIA 103: Requirements for Certification Bodies and Auditors.



国、欧盟都有自己的相关可持续性标准。

在此背景下，编制组充分研究了国际上已有的生物质燃料可持续性标准的相关信息，并与中石化、中石油、中石化镇海炼化等企业的人员深入交流，最终编制出中国本土的《航空替代燃料可持续性要求》，见表 10。该标准共含 11 项可持续性指标，其中 10 项与 ICAO 标准相同，分别为温室气体、水、空气、土壤、碳储量、废弃物、生态保护/生物多样性、土地使用、用水。标准根据中国本土情况增加了 1 个“企业经营”指标要素。ICAO 标准中的碳减排永久性、地震与振动影响、人权和劳工权利、粮食/食品安全并未包括在内。

表 10 中国航空替代燃料可持续性要求及其与 ICAO 的对比

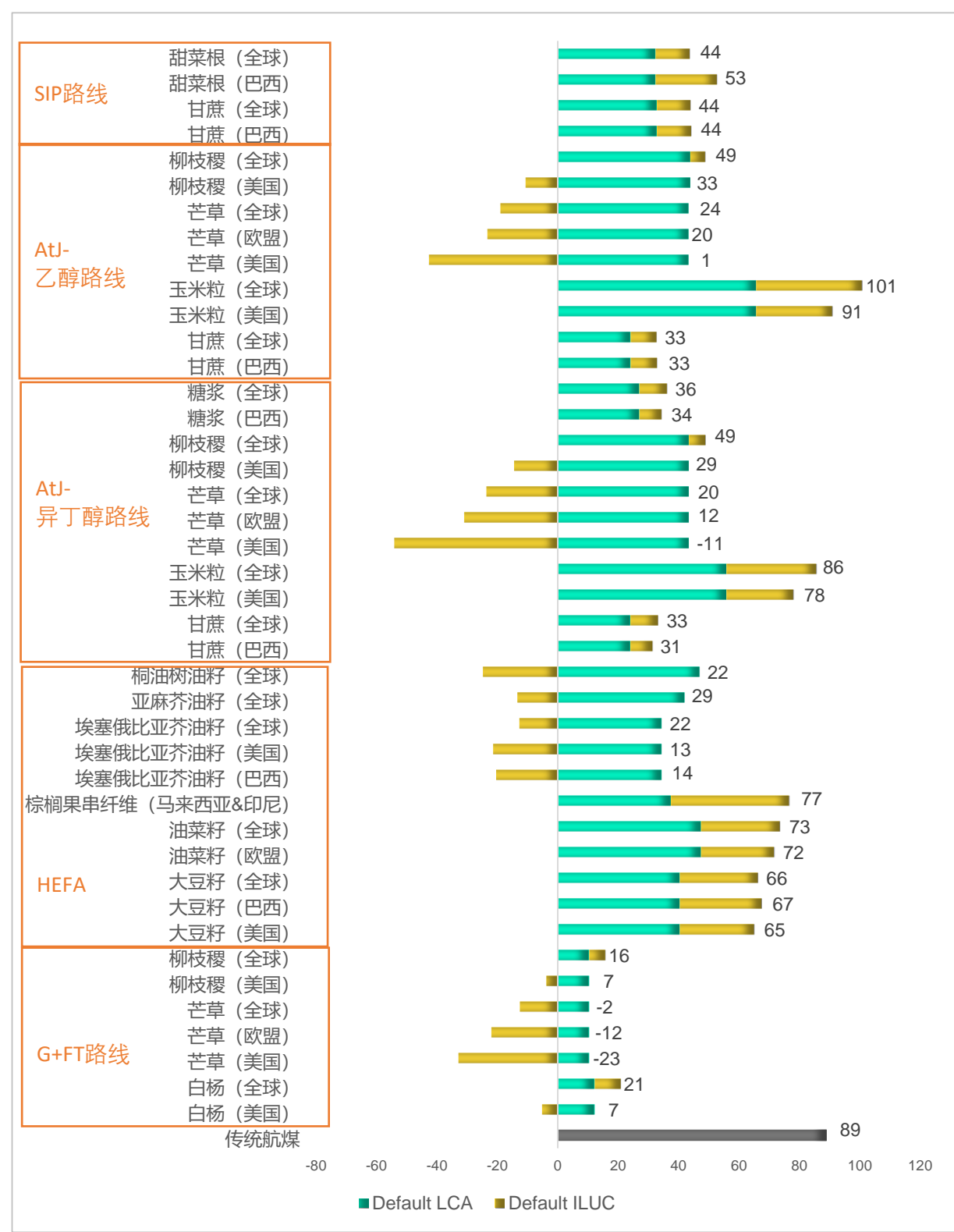
类型	指标要素	中国要求	ICAO 要求
环境要素	温室气体	√	√
	碳储量	√	√
	碳减排永久性		√
	水	√	√
	土壤	√	√
	空气	√	√
	生态保护/生物多样性	√	√
	废弃物与化学品管理	√	√
	地震与振动影响		√
	人权和劳工权利		√
社会要素	土地使用权和土地使用	√	√
	用水（水权）	√	√
	粮食/食品安全		√
	当地经济发展	√	√
经济要素	企业经营	√	

（2）生命周期温室气体核算

生命周期温室气体排放核算是 SAF 绿色认证的一大关键。“温室气体”指标是可持续性指标要求的核心，也是唯一可以量化的指标，涉及 LCA（生命周期）计算方法、减排阈值、生产工艺、原料种类等方面。其中，核心要求为 LCA 排放值的计算方法和相对于传统燃料的减排阈值。

符合 CORSIA 可持续性标准的 SAF 需要比传统航空燃料的生命周期温室气体排放减少至少 10%。对于不同 SAF 生产工艺得到的 SAF 燃料，在生命周期内相对于传统航空燃料的温室气体减排潜力各有不同，图 29 给出了部分技术路线下，由不同原料处理得到的 SAF 的生命周期碳排放数值，这些数值由 ICAO 提供的一些默认值计算得到。就图中技术路线而言，费托合成（G+FT）的 SAF 相对于传统航煤的减排潜力较高，可达到 77%~125%。HEFA 技术路线下得到的 SAF 相较传统航煤减排 14%~85%，AtJ-乙醇技术路

线下，基于玉米粒生产得到的 SAF 的生命周期碳排放甚至高于传统航煤，这主要是由于使用玉米粒产生的诱发性土地使用变化数值较高。



来源：作者绘制，数据来自于 ICAO，图中数值为各种工艺下得到 SAF 的全生命周期排放碳排放，单位为 g CO<sub>2</sub>e/MJ。SIP 技术路线是指通过发酵糖加氢合成异石蜡的工艺。

图 29 不同技术路线的 SAF 生命周期碳排放

美国政府指定 GREET 模型为 SAF 可持续性认证时温室气体排放核算的官方工具，ICAO 在其发布的 SAF 生命周期温室气体核算方法文件中，也建议生产者可以先使用 ICAO-GREET 模型进行计算<sup>86</sup>。目前国内有部分具有自主知识产权的 LCA 排放核算模型可供使用，如 eFootprint。但与欧盟、美国相比，中国在 LCA 排放核算方面起步较晚，相关模型的完善程度也相对滞后，有很大的提升空间。

在 LCA 排放值的核算过程中，SAF 生产链条的完整数据库十分关键。在中国 LCA 排放模型的建设过程中，为规范化操作，同时提高核算效率，有必要编制一套数据库模板，并为企业提供培训和指导。

中国民航局在编制《航空替代燃料可持续性要求》标准时，采用 eFootprint 模型对部分炼厂 3 号航煤的 LCA 排放值进行了核算，并与 ICAO 基准值进行了对比。结合分析结果，民航局表示为促进行业发展，同时满足国际标准，将中国标准下 SAF 的减排阈值设定为 10%，与 ICAO 标准一致。

#### 4.2.4 国际认可

##### （1）近期，利用现有国际认证体系开展 SAF 生态体系及产业链建设工作

中国拥有巨大的 SAF 潜在市场和产业发展机遇。在产业尚未成型之前，需依托现有国际认证体系，尽快开展 SAF 生态体系及产业链的建设。在产业发展过程中，重点关注 SAF 认证所需的相关产业数据，形成一套科学、完备的产业数据链条，一方面可以为 SAF 认证提供充足的数据和资料准备，另一方面也将为未来制定中国本土的 SAF 认证体系提供思路和数据基础。

与此同时，需要继续加强与现有国际认证体系的交流，尤其注重专业技术人才的培养，借此孵化若干个中国本土的第三方认证机构，即 CB。在 SAF 可持续性认证中，CB 是直接与被认证企业接触和交流最多的机构，中国本土的 CB 及其审计人员在具备国际视野的同时，又对国内情况有足够的了解，将能更有效地与中国企业共同开展 SAF 认证工作。

##### （2）中长期，构建更符合中国国情的 SAF 认证体系，并得到国际认可。

从长远来看，仍有必要构建一套更符合中国国情的 SAF 认证体系，并得到国际认可。

在这一过程中，首先要解决 LCA 排放方法学的问题，中国的 LCA 自主模型需要不断改进、驯化，并需要得到 ICAO 等国际社会的认可。其次，要整合一套立足中国、适用于全球的认证流程和机制，其中包括方法学、文件系统以及相关培训体系。在该认

---

<sup>86</sup> ICAO, CORSIA methodology for calculating actual life cycle emissions values, 2024.

证机制下，还需要有可服务于全球的第三方认证机构的加入。如构建中国独立的 SAF 可持续性认证体系，不仅能提升中国本土企业发展 SAF 的信心，也将推动全球 SAF 产业迈入新阶段。

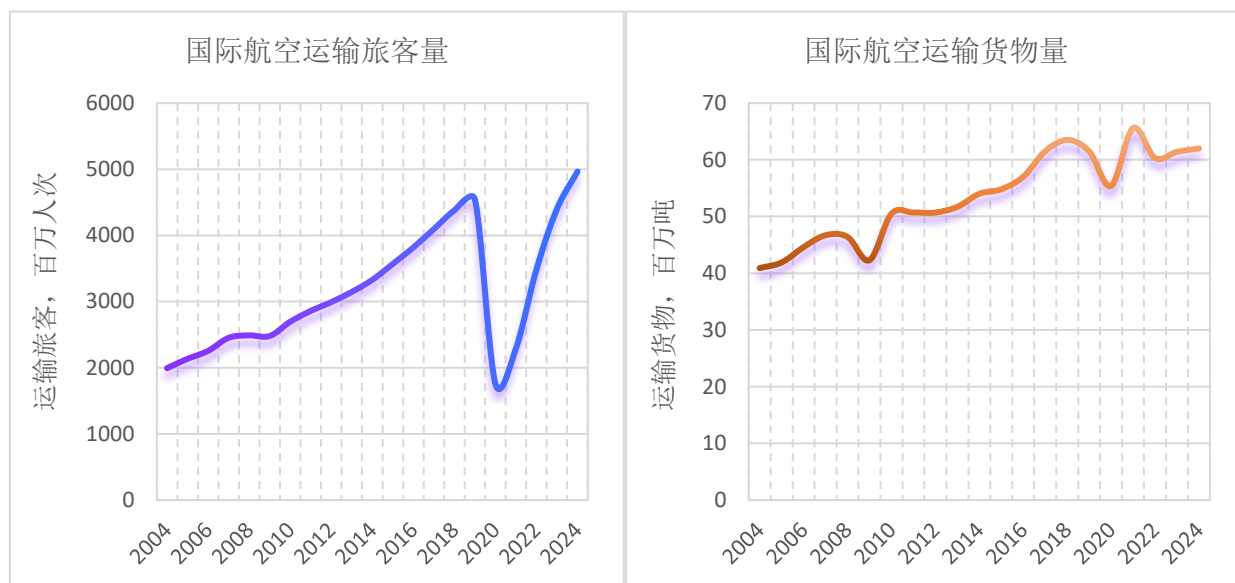
## 第五章 SAF 全球发展回顾与展望

### 5.1 航空业发展现状与展望

#### (1) 国际情况

航空运输是全球交通业的重要组成部分，也是目前唯一一种能够提供全球运输网络的交通方式<sup>87</sup>。

在 2019 年之前，全球航空运输业保持着快速增长势头，年旅客数量高达 45 亿人次<sup>88</sup>，年运输货物超过 6000 万吨<sup>89</sup>。从承担的角色来看，航空运输是国际间商务、旅游等相关出行的首要和主要选择，因而受国际大环境的巨大变动影响很大。从图 29 可以看到，2008 年全球金融危机导致国际航空的旅客和货物运输量出现小幅波动，从 2019 年底开始的 COVID-19 危机则对全球航空业造成了前所未有的影响，其中，旅客运输从 2021 年起开始逐渐恢复至疫情前水平，但货物运输量仍处在波动之中。



注：2024 年数据为预测值，数据来自 Statista 和 ATAG。

图 30 国际航空业运输旅客和货物情况

具体来看，2024 年航空客运总量（按照收入客公里或 RPKs 计算）同比 2023 年增长 10.4%，全球航空客运总量比疫情前（2019 年）高 3.8%。其中，国际客运量同比

<sup>87</sup> ATAG, The economic & social benefits of air transport,

[https://www.icao.int/meetings/wrdss2011/documents/jointworkshop2005/atag\\_socialbenefitsairtransport.pdf](https://www.icao.int/meetings/wrdss2011/documents/jointworkshop2005/atag_socialbenefitsairtransport.pdf)

<sup>88</sup> Statista, <https://www.statista.com/statistics/564717/airline-industry-passenger-traffic-globally/>

<sup>89</sup> Statista, <https://www.statista.com/statistics/564668/worldwide-air-cargo-traffic/>

2023 年增长 13.6%，国内客运量同比增长 5.7%<sup>90</sup>。

地区层面，亚太地区客运量的增长在所有地区中最为强劲，其他地区的增长速率相对平缓。欧洲市场对全球客运量的贡献最高，航班载客率也超过所有其他地区。

表 11 分地区航空客运市场情况（2024 年）

	全球市场 份额占比	收入客公里*	可用座公里*	载客率变化率*	载客率*
整体市场	100.0%	10.4%	8.7%	1.3%	83.5%
非洲	2.2%	13.2%	9.9%	2.2%	74.9%
亚太	33.5%	16.9%	12.3%	3.2%	83.4%
欧洲	26.7%	8.7%	8.1%	0.5%	84.8%
拉美	5.3%	7.8%	7.1%	0.6%	83.7%
中东	9.4%	9.5%	8.4%	0.8%	80.8%
北美	22.9%	4.6%	4.6%	0.0%	84.3%

注：\*为相对于 2023 年的同比变化率数据，数据来自国际航空协会（IATA）。

展望未来，气候变化、经济环境、能源、地缘政治以及大国博弈等诸多因素都将对国际航空业产生不可预知的影响<sup>91</sup>。国际航协预测，COVID-19 造成的航空业危机将在 2024 年基本度过，在未来几年内，航空旅客运输将保持较高速度的增长，见表 12 和图 31。其中，亚太地区仍将以最高的增速带动全球航空业的全面复苏<sup>91</sup>。中长期来看，未来 20 年国际航空客运预计将以 3.8%的年均速度增长，至 2043 年将会比 2023 年净增超过 41 亿次旅客出行。其中，欧洲和北美地区的年均增速将分别达到 2.3%和 2.7%，低于全球平均水平。亚太地区仍被认为是最有潜力的增长点，对净增旅客出行次数的贡献将超过 50%<sup>91</sup>。

表 12 2023-2043 年全球各地区航空客运增速与净增旅客数量

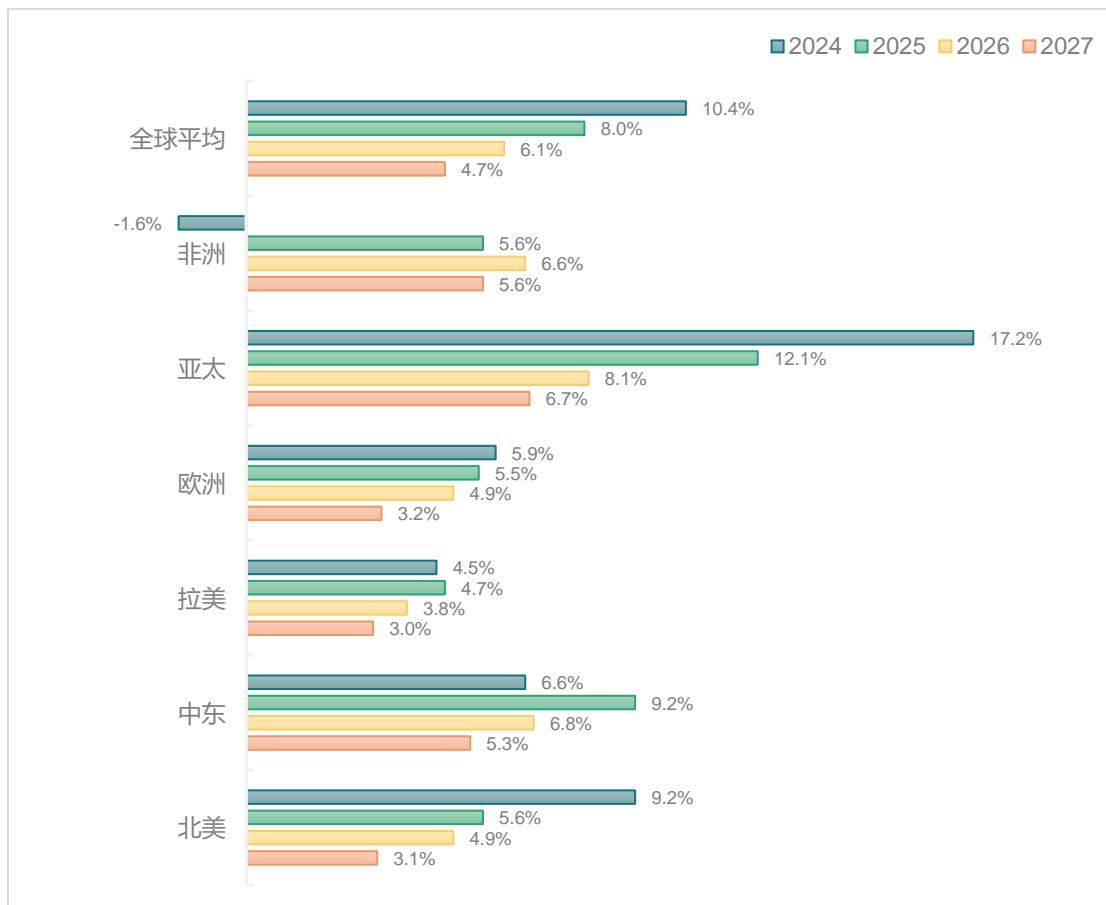
地区	复合年均增长率（2023-2043）	至 2043 年的净增旅客（百万）
世界整体	3.8%	4154
非洲	3.7%	179
亚太	5.3%	2750
欧洲	2.3%	656
拉美	2.9%	311
中东	3.9%	282
北美	2.7%	659

数据来源：IATA, *Air Passenger Forecasts, February 2024 update*.

<sup>90</sup> IATA, <https://www.iata.org/contentassets/5bdc82d90ede479d92efa39877d83057/2025-01-30-01-cn.pdf>

<sup>91</sup> IATA, *Global Outlook for Air Transport, 2024*.





数据来源：IATA, *Air Passenger Forecasts, February 2024 update*.

图 31 2024-2027 年全球航空客运增速预测

相较于客运，航空货运的未来变化仍不明朗<sup>91</sup>。一方面，地缘政治局势紧张、持续通胀、供应链受损以及国际贸易限制增加等因素严重影响了世界贸易；另一方面，海运和空运运价都处在非常不稳定的阶段，海洋集装箱运输中断的状况仍有发生，这也提高了航空货运运价与海运运价的竞争优势。在这两方面因素的作用下，目前很难对航空货运的增速做出准确的预测。

## （2）中国情况

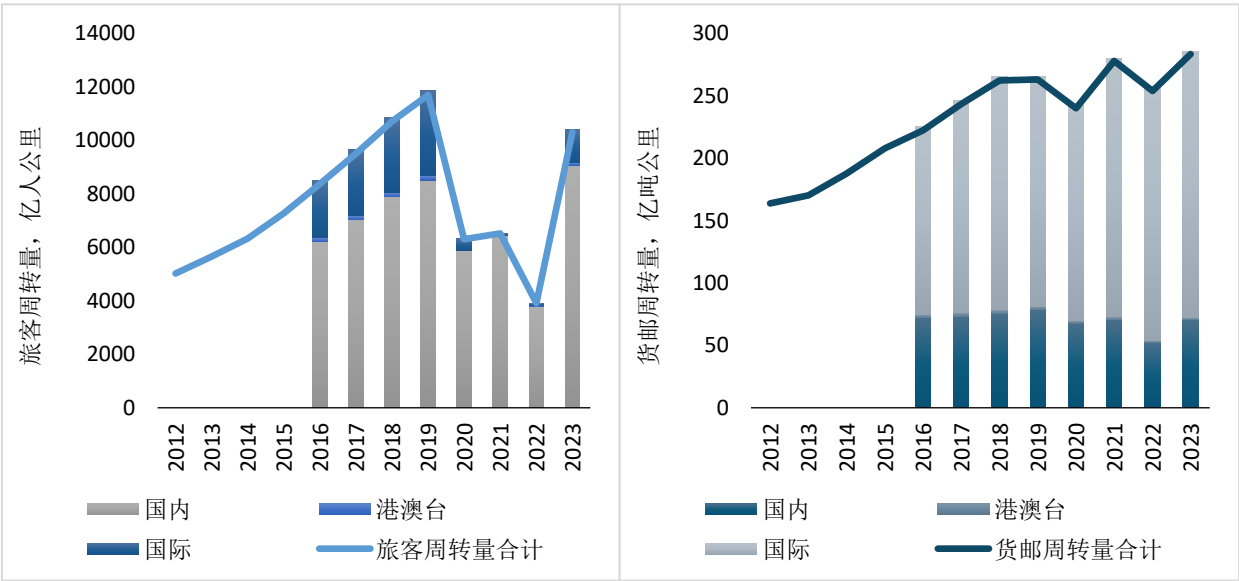
新中国民航始于新中国成立之初，并在改革开放之后得以快速发展<sup>92</sup>。如今，民航已经成为中国国内交通体系的核心组成部分和对外交流、发展的重要窗口。

首先，中国民航运输规模不断扩大。2005 年以来，中国航空运输总周转量一直位居世界第二位<sup>93</sup>。如图 32 所示，在 2012-2019 年的八年间，中国民航旅客周转量翻了一倍，货邮周转量增长了 60%。COVID-19 危机虽然对近几年的民航运输造成了极大影响，但自 2022 年底疫情管控解除以来，民航客运强势恢复，2023 全年民航旅客周

<sup>92</sup> 人民网，【壮丽 70 年 奋斗新时代】鲲鹏展翅九万里——新中国成立 70 周年民航发展成就综述。

<sup>93</sup> 央视网，<https://news.cctv.com/2021/01/13/ARTIq1BT75vG7KdRi8BM126Q210113.shtml>

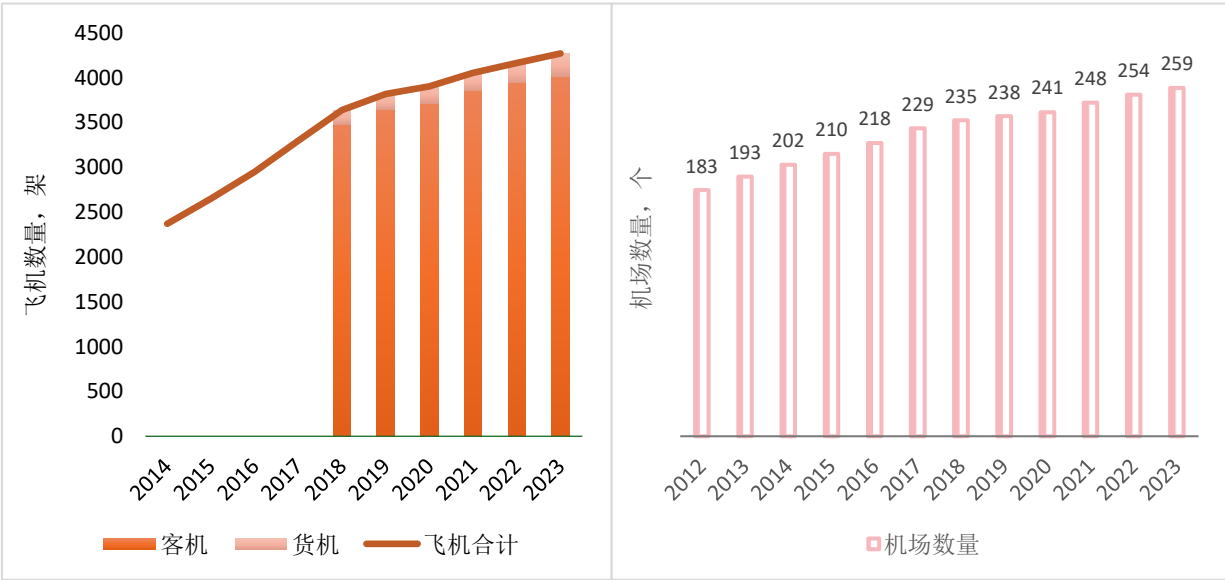
量已经达到 2019 年水平的 88%。分区域来看，近几年民航客运主要由国内航线需求拉动，未来随着国际航线的逐步恢复，民航客运将进一步复苏<sup>94</sup>。



数据来源：中国民用航空局，《中国民航行业发展统计公报》。

图 32 中国民航旅客和货邮周转量趋势

民航设施规模也不断壮大，以服务快速增长的民航运输需求。截至 2023 年底，中国民航全行业运输飞机期末在册架数为 4270 架，较 2014 年增长了 80%。境内运输机场（不含香港、澳门和台湾地区）数量达到 259 个，较 2012 年增加 76 个。



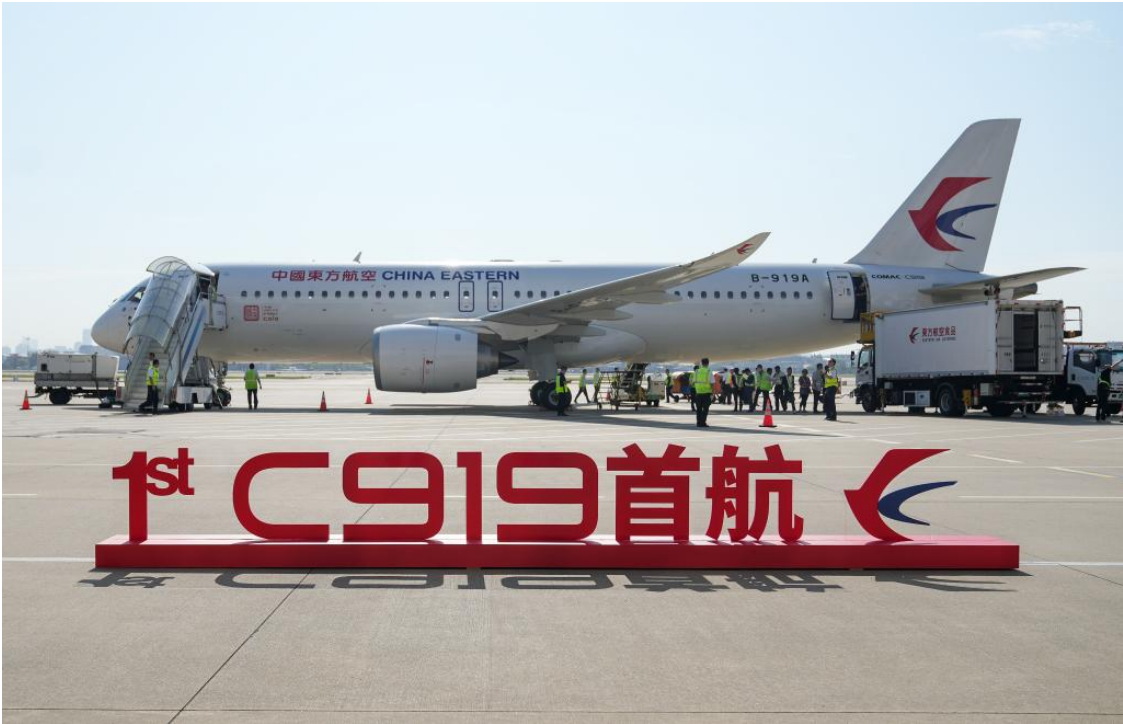
数据来源：中国民用航空局，《中国民航行业发展统计公报》。

图 33 中国运输机队规模和颁证机场数量变化

在民航运输体量不断扩大的同时，中国也积极推动民航高质量发展，提出“到

<sup>94</sup> 中国政府网，[https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202405/content\\_6951873.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202405/content_6951873.htm)

2035 年建成航空运输强国”的目标<sup>95</sup>。2017 年 5 月 5 日，中国具有完全知识产权、首款按照最新国际适航标准研制的干线民用飞机 C919 首飞成功<sup>96</sup>，六年之后，C919 完成首个商业航班飞行<sup>97</sup>，标志着中国国产大飞机正式进入民航市场，也开启了中国民航运输事业新的篇章。



图片来源：新华社，[http://www.news.cn/fortune/2023-05/28/c\\_1129651740.htm](http://www.news.cn/fortune/2023-05/28/c_1129651740.htm)。

图 34 中国制造的 C919 飞机执飞首个商业航班（2023 年）

过去 20 年，中国民航运输有了长足的发展，机队总量占全球的 15%左右<sup>98</sup>，仅次于美国。未来 10~20 年，中国民航仍有巨大的发展潜力和空间。一方面，中国人均航空出行仅为 0.47 次（2019 年水平）<sup>99</sup>，根据《新时代民航强国建设行动纲要》，到 2035 年中国人均航空出行次数预计超过 1 次，这是航空发展的内在需求。另一方面，中国未来 GDP 和人均可支配收入仍将稳步增长，这是带动航空需求增长的根本动力。

根据波音公司的预测<sup>100</sup>，到 2043 年，中国国内民航将超越美国成为全球最大的航空客流市场，这部分增长的主要动力主要来自国内下沉市场<sup>99</sup>。为满足不断增长的航空出行需求，预测到 2035 年，中国民航飞机数量将达到 9740 架，同时货机数量也将

<sup>95</sup> 中国政府网，[https://www.gov.cn/zhengce/202403/content\\_6935404.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202403/content_6935404.htm)

<sup>96</sup> 中国政府网，[https://www.gov.cn/xinwen/2017-05/07/content\\_5191515.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2017-05/07/content_5191515.htm)

<sup>97</sup> 新华网，[http://www.news.cn/fortune/2023-05/28/c\\_1129651740.htm](http://www.news.cn/fortune/2023-05/28/c_1129651740.htm)

<sup>98</sup> 新浪网，<https://finance.sina.com.cn/roll/2024-09-01/doc-incmrnxq1921307.shtml>

<sup>99</sup> 民航新型智库，[http://att.caacnews.com.cn/zkzj/T/tangchao/202406/t20240619\\_60924.html](http://att.caacnews.com.cn/zkzj/T/tangchao/202406/t20240619_60924.html)

<sup>100</sup> Boeing, 2024 Commercial Market Outlook, <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook#overview>

增加近两倍，以满足中国电子商务行业的发展需求（图 35）。



来源：作者绘制，相关预测数据源自波音公司 2024 Commercial Market Outlook.

图 35 未来 20 年（2043 年）中国民航市场预测

## 5.2 航空业减排现状与展望

### （1）国际情况

民航是目前全球化程度最高的交通方式，由于涉及到大量的跨国客货运输，因而其碳排放的影响也是世界范围的。航空被认为是最难减排的部门之一，这主要是因为长途飞行目前仍极度依赖传统化石燃料，而使用低碳燃料替代化石燃料面临价格过高、产量不足、安全与适应性等一系列挑战。

在全球范围内，民航相关的权威组织和机构均提出了航空业中长期净零排放目标和（或）具体实施机制，如表 13 所示。

表 13 民航相关的国际组织减排目标与实施机制

组织机构	性质	民航减排目标	实施机制
国际民航组织（ICAO）	官方，联合国专门机构	2050 年净零碳排放	国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）
国际航空运输协会（IATA）	非政府组织	2050 年净零碳排放	制定减排、技术路线图
航空运输行动小组（ATAG）	非营利协会	2050 年净零碳排放	<ul style="list-style-type: none"><li>• Waypoint 2050 研究报告</li><li>• 协调政府会议</li><li>• 制定一套广泛参考的关于航空对全球经济和社会贡献的数据</li></ul>

国际民航组织（ICAO）在 2010 年举行的第 37 届大会上，为国际航空部门商定了两项理想目标，一是每年燃油效率改进 2%，直至 2050 年；二是自 2020 年起碳中性增长（CNG 2020）<sup>101</sup>。ICAO 于第 41 届大会上确立了到 2050 年实现国际航空业净零碳排放的长期全球理想目标<sup>102</sup>。在此之前，ICAO 就已经通过了具有历史意义的国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）<sup>103</sup>，以督促航空业不断降低碳排放，CORSIA 也因此成为第一个全球性的行业减排市场机制。

CORSIA 是一种基于市场的机制，通过使用合格排放单元（Eligible Emission Unit, EEU）来抵消无法通过航空技术改进、日常运营技术以及可持续航空燃料等减少的国际航班碳排放总量。CORSIA 划分了三个实施阶段：

- 试点阶段（2021-2023）：自愿参与

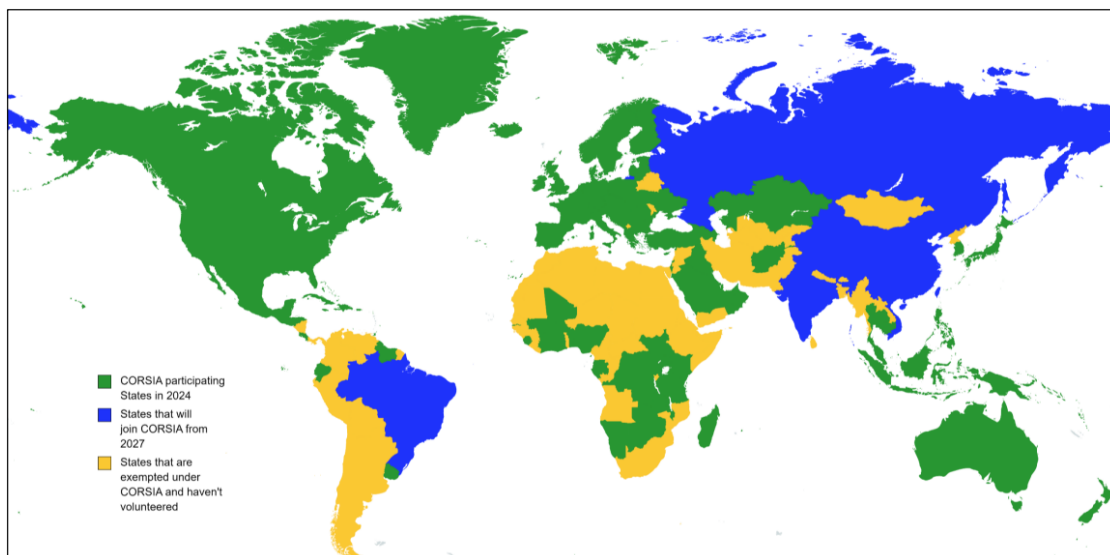
<sup>101</sup> ICAO, Overview of climate goals and ICAO's work on a long-term aspirational goal for international aviation, [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art92.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art92.pdf)

<sup>102</sup> ICAO, Resolution A41-21: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Climate Change.

<sup>103</sup> Introduction to CORSIA, [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022\\_Art56.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art56.pdf)

- 第一阶段（2024-2026）：自愿参与
- 第二阶段（2027-2035）：在 2018 年国际航空活动中个体份额超过总活动的 0.5%，或者累积份额达到总活动 90%的所有国家都强制参加。最不发达国家、小岛屿发展中国家和内陆发展中国家可以不参加，除非他们自愿参加。

截至 2024 年 1 月 1 日，已经有 126 个国家参加 CORSIA<sup>104</sup>。



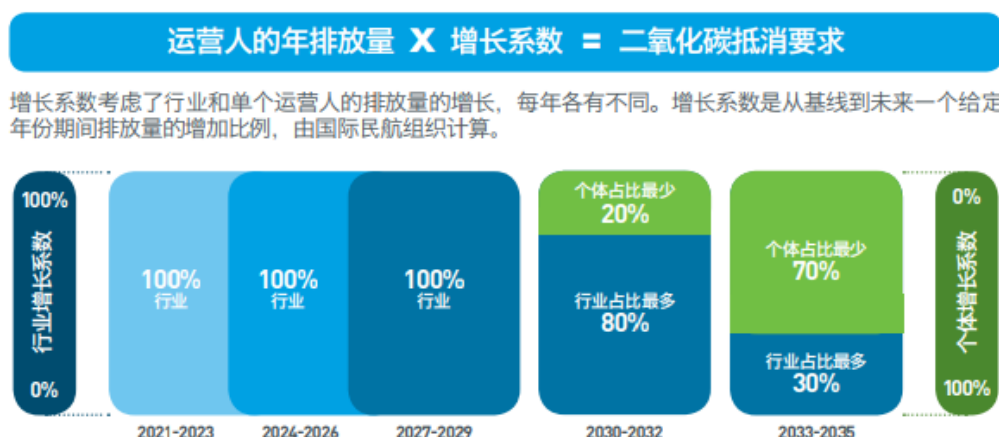
来源：IATA，CORSIA Fact sheet.

图 36 CORSIA 参与国际和地区一览

CORSIA 抵消量的计算基于“历史法”原则，受疫情影响，2024 年起，基准排放量调整为 2019 年二氧化碳排放量的 85%。此外，抵消量不是根据航空公司的排放量来衡量的，而是根据整个行业排放量超过 2019 年水平的增长按比例计算的，并且分为行业 and 个体两个部分，其中，行业部分根据全球国际航空碳排放量的增加量进行分摊，个体部分为航空公司自身国际航空的碳排放增加量。根据 ICAO 的 A41-22 号决议，抵消量由最初的按行业抵消量分配逐渐过渡到按航空运营商个体抵消量分配。

<sup>104</sup> IATA, CORSIA Fact sheet, <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---corsia/>  
Page | 63





来源：ICAO, CORSIA brochure 8 panels.

图 37 CORSIA 规定的碳抵消量计算方法

符合 ICAO 定义的特定标准的碳信用抵消额称为 CORSIA EEU，计算结果相当于通过符合 ICAO 严格资格标准的减排项目产生的一吨二氧化碳排放量。根据公告，在 CORSIA 试点阶段采用的合格碳信用的减排项目必须来自以下 11 个减排机制<sup>105</sup>：

- 美国碳登记处（ACR）
- REDD + 交易框架（ART）
- 可持续森林景观生物碳基金（ISFL）
- 中国温室气体自愿减排项目（CCER）
- 清洁发展机制（CDM）
- 森林碳伙伴基金（FCPF）
- 美国气候行动储备方案（CAR）
- 全球碳理事会项目（GCC）
- 黄金标准（GS）
- 核证减排项目（VCS）
- 社会碳项目（SOCIALCARBON）

在第一阶段（2024-2026）履约期内，ICAO 认可的自愿减排机制包括 ACR, ART, CAR, GCC, GS 和 VCS。

截至 2024 年 9 月，圭亚那是唯一一个履行义务提供所需碳信用额的国家<sup>106</sup>。

## （2）中国情况

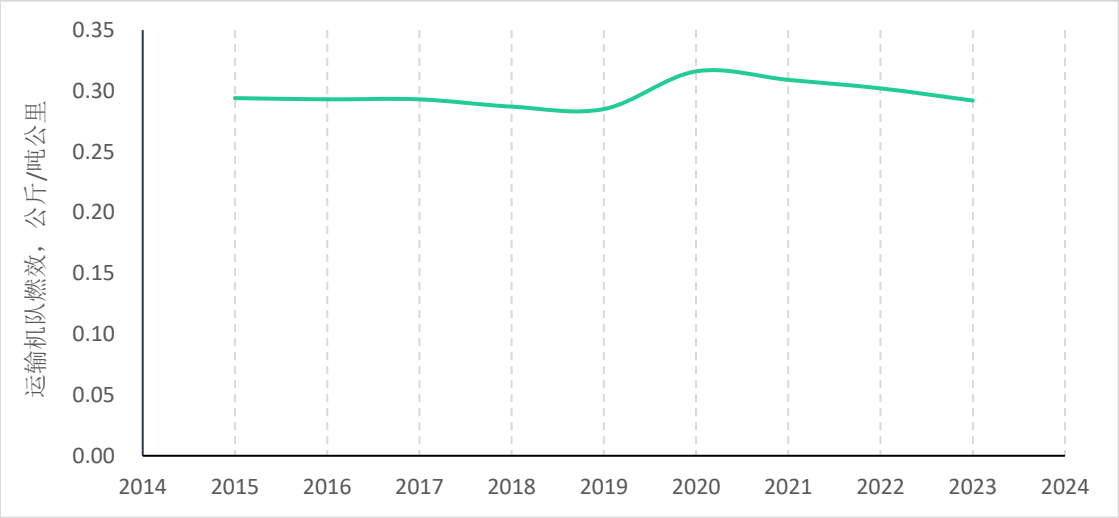
中国高度重视民航的绿色发展。“十三五”以来，民航部门先后印发了《关于加

<sup>105</sup> ICAO Document, CORSIA Eligible Emissions Units, [https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Emissions%20Units/CORSIA\\_EEU\\_Oct2024.pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Emissions%20Units/CORSIA_EEU_Oct2024.pdf)

<sup>106</sup> IATA, <https://www.iata.org/contentassets/a315490f0b11450e89282ae46905b93f/2024-09-24-02-cn.pdf>

快推进行业节能减排工作的指导意见》《民航节能减排“十三五”规划》《关于深入推进民航绿色发展的实施意见》《“十四五”民航绿色发展专项规划》等文件，旨在推动民航节能减排工作取得积极进展。

2022 年中国民用航空局正式向国际民航组织提交了《2022 中国民航绿色发展政策与行动》<sup>107</sup>文件，全面介绍了中国民航在过去二十年的绿色行动与进展。数据显示，2019 年中国民航运输机队燃油效率为每吨公里油耗 0.285 公斤，较 2000 年降低了约 30%。自疫情暴发以来，受多种因素影响，民航吨公里油耗略有增加。



来源：作者绘制，数据来自中国民航局《民航行业发展统计公报》。

图 38 中国运输机队燃油效率

《“十四五”民航绿色发展专项规划》提出了中国民航发展的 2025 近期目标，见表 14。统计数据显示，一些指标要求已经提前或超标完成<sup>108</sup>。例如，2023 年，中国民航吨公里油耗为 0.292 公斤，提前超额完成“十四五”规划目标。截至 2023 年底，机场场内电动车辆设备达到 12790 台，电动车辆占比 26.4%，也超出了“十四五”规划的 25% 的占比目标。

表 14 “十四五”中国民航绿色发展主要指标

类别	指标	2025 年
航空公司	运输航空机队吨公里油耗（千克）	0.293
	运输航空吨公里二氧化碳排放（千克）	0.886
	可持续航空燃料消费量（万吨）	5
机场	单位旅客吞吐量能耗（千克标煤）	0.853
	单位旅客吞吐量二氧化碳排放（千克）	0.43
	场内纯电动车辆占比（%）	25

<sup>107</sup> 2022 年中国民航绿色发展政策与行动，  
<https://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/202209/P020220923511053656415.pdf>

<sup>108</sup> 中国民用航空局，《2023 年民航行业发展统计公报》。

	可再生能源消费占比（%）	5
--	--------------	---

来源：《“十四五” 民航绿色发展专项规划》。

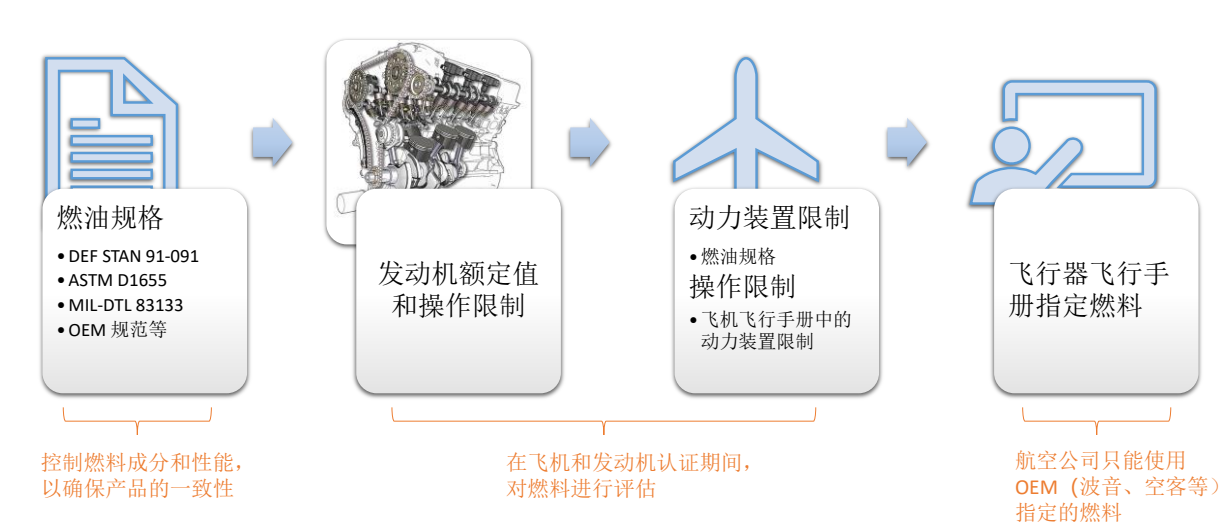
需要指出的是，中国目前仍未参加 CORSIA，也没有确立行业碳中和或净零碳排放的终极目标与行动路线，未来随着民航运输规模的持续扩大，碳排放量不断攀升，行业脱碳面临的形势严峻且紧迫。

### 5.3 可持续航空燃料适航审定

适航性（Airworthiness）是指航空器各部件及子系统的整体性能和操纵特性在预期运行环境和使用限制下安全性和物理完整性的一种品质，该品质主要是通过适航认证（Airworthiness Certificate）与管理来实现的。适航管理局并不认证燃料，而是认证飞机和发动机使用指定燃料运行的情况，所以说 SAF 适航审定实际上是指飞机和发动机使用 SAF 运行情况的审定。

由于航空运输具有国际性，飞机上加注的燃料必须满足严格的标准并在国际上流通。目前，世界民航主要用油类型为 Jet A-1 航空煤油，此外，还有 Jet A（仅美国）、RP-3（仅中国，与 Jet A-1 几乎一致）和 TS-1（仅俄罗斯）<sup>109</sup>。

传统航空燃料的适航审定流程如图 40 所示。对于不同类型的传统航空燃料，首先根据各自对应的标准对其燃料规格进行审定，该步骤主要是是要控制燃料的成分和特性，以确保产品保持一致性。然后，根据加注了某种燃料的燃气涡轮发动机和飞行器的各项操作及性能表现，对相应燃料进行评估。最后，通过波音、空客等 OEM 认证，会将发动机或飞行器适用的燃料类型编写进飞行手册中，而航空公司只能使用经过 OEM 认定并指定的航空燃料。



来源：作者绘制，参考 ICAO 相关资料。

图 39 传统航空燃油适航审定流程

对于采用生物法合成的替代燃料，如 SAF，适航审定过程还要更加复杂。由于目前 SAF 只能作为掺混燃料加入到传统航空燃油中使用，所以，下面以最高掺混比例一

<sup>109</sup> 维基百科，航空煤油。

—50%的 SAF 与传统航空燃油的混合燃料为例，说明如何进行适航审定。

首先，传统航空燃油的理化特性基于 ASTM D1655 标准进行测试，按照图 39 的流程直至该类燃料获得 OEM 认定。当然，对于已获得认定的燃料，该环节可以省略。第二步，基于 ASTM D4054 标准进行替代燃料，也就是 SAF 的评估，该环节主要是测试 SAF 燃料的“向后兼容性”，即与现有发动机的适配性和兼容性，该环节由专门的验证机构（Clearing House）进行操作。该环节的全流程审批分为 Tier 1（燃料规格）、Tier 2（适用属性）、Tier 3（组件/设备测试）和 Tier 4（发动机/辅助动力装置测试）四大部分，燃料的批准需要经过正式投票，并产生燃料规格。对于合成燃料的规格，ASTM D7566 中包含针对每种新批准燃料的专门附录，该附录定义了需要检查的最终属性列表。完成全流程审批后，SAF 燃料可按照最高 50%的比例与传统航空燃油掺混。该环节还有一种优化审批流程，即将燃料的成分和工艺筛选数据提交给 OEM，并经过简化版的测试，最终获得 OEM 认定，经优化审批流程获得认定的 SAF 燃料只能按照最高 10%的比例与传统航空燃油进行掺混。需要指出的是，该环节对燃料的需求量十分巨大，最多有可能消耗约 89 万升的燃料（含全尺寸发动机测试）<sup>110</sup>。

第三步，通过测试的 SAF 燃料与传统航空燃油按照 50%（或其他比例）比例混合后，将基于 ASTM D7566（《含合成碳氢化合物的航空涡轮燃料标准规格》），进行掺混燃料的理化特性测试。最后，符合上述测试标准的掺混燃料则可标识为符合 ASTM D1655 的 Jet A/A-1 燃料，并进入可交换燃料分销系统，作为常规燃料进行使用。



来源：作者绘制。

图 40 掺混 SAF 的航空燃料适航审定流程

<sup>110</sup> ASTM International, Standard practice for evaluation of new aviation turbine fuels and fuel additives.

## 5.4 可持续航空燃料市场发展

### （1）驱动政策

由于 SAF 的价格较传统航空燃油更高，现阶段 SAF 应用的主要驱动力仍是国际和各国本土的减排政策，这些政策中多数都明确提出了应用 SAF 的具体计划和目标，也有有的以降低航空燃油的碳强度为衡量指标。

#### ◆ 欧盟

2023 年 9 月欧盟正式通过了 ReFuelEU 航空计划，该措施是“Fit for 55”一揽子计划的一部分，旨在实现到 2030 年减排 55% 的目标。它要求航空燃料供应商逐步增加 SAF 混入欧盟机场供应的常规航空燃料的份额，这一比例在 2025 年为 2%，2030 年掺混比例提升至 6%，2050 年掺混比例达到 70%<sup>111</sup>。ReFuelEU 航空计划中的 SAF 包括合成航空燃料（e-fuel），先进和其他航空生物燃料，以及再生碳航空燃料。欧盟要求从 2030 年以后必须使用一定比例的 e-SAF，2030 年为 1.2%，2035 年为 5%，2040 年为 10%，到 2050 年 e-SAF 的比例要达到 35%。

为实现这一雄心目标，ReFuelEU 航空计划还伴随有若干配套措施，以支持 SAF 的开发和部署使用，这些措施包括：

- 通过 ICAO 等组织在国际层面开展 SAF 相关活动，如资助 ACT-SAF 项目，在 13 个非洲国家和印度开展 SAF 可行性研究和能力建设活动；
- 通过可再生和低碳燃料价值链工业联盟，加强 SAF 价值链中的合作以及 SAF 项目的开发；
- 通过融资工具，如“地平线欧洲”计划，为降低 SAF 生产各技术成熟阶段的风险提供资金支持；
- 通过欧盟碳排放权交易体系（EU ETS）为航空公司提供 2000 万欧元的 SAF 配额，直接为 SAF 的使用提供财政支持，缩小 SAF 与传统航空燃油之间的价格差距；
- 通过能源税收指令修订提案提供更强的价格信号，给予 SAF 相较于传统航空燃油的优惠待遇；
- 通过建立欧盟 SAF 清算中心，加快和促进 SAF 生产路线的资格认证，并通过《净零工业法案（NZIA）》移除新 SAF 工厂建设的行政障碍；

---

<sup>111</sup> ReFuelEU Aviation, [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refuelev-aviation\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refuelev-aviation_en)



- 通过欧盟分类法和环境标签方案提高透明度。欧盟分类法将促进 SAF 生产和使用的融资渠道，以及专门用于可持续性的私人投资，包括欧盟绿色债券。飞行排放标签将帮助乘客在航班选择时做出知情决策。该标签与欧盟温室气体排放核算倡议“CountEmissions EU”协调制定。

除了欧盟的整体目标外，德国、法国、荷兰、瑞典等国家也制定了更加积极的符合本国实际的 SAF 发展目标，具体见表 1。

## ◆ 英国

2024 年 4 月 30 日，英国政府发布了 UK SAF mandate 的最终细节。该指令要求从 2025 年起，SAF 需要覆盖英国航空燃料总需求的 2%，并按线性方式增加至 2030 年的 10%，在 2040 年增加至 22%，此后，这一比例将维持不变，直至 SAF 供应显现出更大的确定性<sup>112</sup>。

这一指令将通过以下措施鼓励先进燃料的创新：

- 对 HEFA 工艺中使用的原料设定上限，但需要等到其他类型的 SAF 实现商业化之后才开始实施。HEFA 工艺的 SAF 在指令实施的前两年不会受到限制，但到 2030 年将下降至 71%，2040 年降至 35%；
- 从 2028 年起设立单独的合成燃料要求，到 2040 年这类燃料将占航空燃料需求总量的 3.5%。

该指令还包括一个买断机制，以激励供应，并在供应商无法确保 SAF 供应时保护消费者。对于非合成 SAF 和合成 SAF，买断价格分别为 4.7 英镑/升和 5.0 英镑/升。它们还为该计划设定了最高价格，从而以可接受的成本实现减排。

## ◆ 美国

2021 年由美国能源部、交通部、农业部和其他联邦政府部门共同发起了一项谅解备忘录，即“SAF 大挑战”（SAF Grand Challenge），该备忘录将试图降低成本，提高可持续性，扩大 SAF 的生产和使用，同时实现以下目标<sup>113</sup>：

- 使其生命周期温室气体排放较传统航空燃料降低至少 50%；
- 到 2030 年，SAF 产量达到 30 亿加仑（900 万吨）/年；
- 到 2050 年，生产 300 亿加仑 SAF（1.05 亿吨），以满足国内航空业 100% 的 SAF 需求。

---

<sup>112</sup> GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/speeches/sustainable-aviation-fuel-initiatives>

<sup>113</sup> ENERGY.GOV, <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge>

美国达到这一目标的可能性取决于州和联邦激励措施的设计以及自愿需求的强度，措施包括可再生燃料标准（RFS）和清洁燃料生产信贷等，不过清洁燃料生产信贷目前仅适用于 2025-2027 年。联邦政策的不确定性使得州级法规变得尤为重要，加州的低碳燃料标准（LCFS）开创了先例，之后，俄勒冈州和华盛顿州也推出了类似的清洁燃料项目，而华盛顿、伊利诺伊州和内布拉斯加州则推出了专门针对 SAF 的生产激励措施。

预计自愿市场将于未来几年在美国发挥重要作用，因为可叠加的联邦和州级激励措施可以与 SAF 证书收入结合，从而缩小 SAF 与传统航空燃料之间的价格差距。

### ◆ 加拿大

加拿大政府于 2022 年发布了一项航空行动计划，该计划与 ICAO 和 IATA 到 2050 年实现净零排放的愿景保持一致。该计划承认，SAF 将成为航空业主要的脱碳工具。为此，加拿大航空业设定了到 2030 年 SAF 达到 10% 的理想目标，相当于大约 10 亿升燃料<sup>114</sup>。

根据加拿大不列颠哥伦比亚省的低碳燃料法规要求，从 2028 年开始，SAF 至少占航空燃料的 1%，到 2029 年增加到 2%，到 2030 年增加到 3%，这意味着到 2030 年将有 1700 万加仑（5.3 万吨）的 SAF 需求。法规还包括对 SAF 碳强度的减少要求，2026 年为 2%，2027 年为 4%，2028 年为 6%，2029 年为 8%，2030 年为 10%<sup>115</sup>。

### ◆ 巴西

巴西是全球最大的乙醇及生物柴油的生产国和消费国之一<sup>116</sup>，在 SAF 产业中有较大的潜力。2024 年 3 月，巴西众议院最近通过了“未来燃料”法案，这是朝着可持续航空迈出的重要一步，该法案将交由联邦参议院审议。这项立法的一个关键组成部分是建立国家航空生物燃料计划（ProBioQAV），旨在通过使用航空生物燃料减少航空部门的排放。根据拟议的法律，航空公司将被要求从 2027 年开始减少 1% 的温室气体排放，到 2037 年逐步增加到 10%，而 SAF 的引入将有助于这一目标的实现<sup>117</sup>。

### ◆ 日本

2023 年，日本政府发布了一项政策建议，要求到 2030 年，全国 SAF 使用率达到

---

<sup>114</sup> Canada's Aviation Climate Action Plan (2022-2030).

<sup>115</sup> British Columbia Low Carbon Fuels Regulation (2024), <https://www.lifecycleassociates.com/services/british-columbia-low-carbon-fuels-regulation/>

<sup>116</sup> S&P Global, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/es/oil/refined-products/jetfuel/051822-brazil-saf-mandate-to-target-emissions-reductions-starting-in-2027>

<sup>117</sup> Brazilian NR, [https://braziliannr.com/2024/03/18/brazil-senate-to-review-national-aviation-biofuel-program/#google\\_vignette](https://braziliannr.com/2024/03/18/brazil-senate-to-review-national-aviation-biofuel-program/#google_vignette)

10%<sup>118</sup>，但其中关于可持续性标准和支持机制等设计方面的细节尚未公布。

### ◆ 印度

印度国家生物燃料协调委员会（National Biofuel Coordination Committee）设定了 SAF 混合燃料的发展目标：到 2027 年，SAF 混合燃料在国际航班中的比例为 1%，到 2028 年，这一比例将增至 2%<sup>119</sup>。

### ◆ 新加坡

新加坡政府对 SAF 的态度一直较为积极。新加坡民航局制定了 SAF 应用目标，2026 年 SAF 消费占比为 1%，到 2030 年逐步提升至 3-5%，具体情况视 SAF 的全球发展和普及情况而定。从 2026 年起，新加坡还要求所有从该国出发的国际航班使用 SAF<sup>120</sup>。为支持航空公司采购和使用 SAF，2026 年起购买的机票将征收 SAF 税，不过目前尚不清楚是否适用于所有从新加坡出发的航班<sup>121</sup>。

### ◆ 马来西亚

马来西亚在 2023 年发布的《国家能源转型路线图》中表示“采纳 ICAO 在 2050 年实现国际航空净零碳排放的长期理想目标”，并提出将从 1%开始（具体时间尚不清楚）逐步提升 SAF 的混合比例，到 2050 年力争使这一比例增加至 47%<sup>122</sup>。

### ◆ 印度尼西亚

印度尼西亚要求从 2027 年起，从该国出发的航班使用 1%的 SAF（或 6 万千升），该比例在 2030 年将提高至 2.5%，2040 年 12.5%，2050 年 30%，2060 年达到 50%。目前，该国最有潜力的 SAF 原材料为粗棕榈油，但由此生产的 SAF 全生命周期温室气体排放高于 ICAO 标准，未来两年印度尼西亚政府将就此事与 ICAO 展开谈判<sup>123</sup>。

### ◆ 韩国

韩国政府计划从 2027 年起要求所有从该国境内出发的国际航班使用 1%的 SAF<sup>124</sup>。

### ◆ 中国

---

<sup>118</sup> ICF, <https://www.icf.com/insights/aviation/saf-ecosystem-in-japan>

<sup>119</sup> VURDHAAN, <https://www.vurdhaan.com/saf-blending-mandates-for-domestic-flights-expected-after-2027-a-strategic-approach-to-sustainable-aviation/>

<sup>120</sup> Reuters, <https://www.reuters.com/sustainability/singapore-require-departing-flights-use-sustainable-fuel-2026-2024-02-19/>

<sup>121</sup> S&P Global, <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/agriculture/091224-appec-singapores-saf-levy-to-only-apply-to-air-ticket-sales-from-2026>

<sup>122</sup> Malaysia Ministry of Economy, National Energy Transition Roadmap.

<sup>123</sup> Argus, Indonesia to require SAF for flights from 2027, <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2609725-indonesia-to-require-saf-for-flights-from-2027>

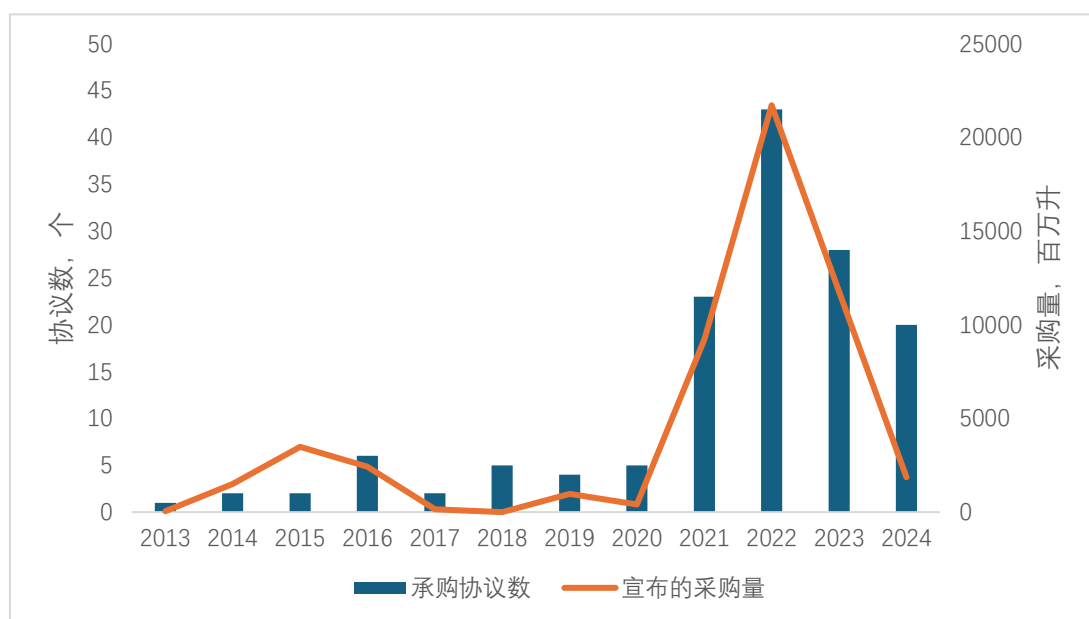
<sup>124</sup> Reuters, <https://www.reuters.com/business/energy/south-korea-plans-mix-sustainable-aviation-fuel-international-flights-2027-2024-08-30/>

中国在 2022 年发布的《“十四五”民航绿色发展专项规划》中提出，力争 2025 年当年 SAF 消费量达到 2 万吨以上，2021-2025 年间累计消费量 5 万吨。作为正在崛起的民航大国，中国在 SAF 发展方面相对保守，尚未提出长期发展规划。

## （2）市场规模

尽管航空业对 SAF 有很高的发展预期，目前 SAF 的市场规模仍然非常小。据 IATA 统计，2023 年全球 SAF 消费量约 6 亿升（折合 50 万吨），同比翻了一番，但 SAF 产量仅占当年全部可再生能源总产量的 3%。2024 年，全球 SAF 产量预计增长两倍，达到 150 万吨，占航空燃料需求总量的 0.53%<sup>125</sup>。

SAF 的使用会受产能、政策等因素的影响，但目前生产出来的每一滴 SAF 都已经购买和利用<sup>125</sup>。2021 年以来，SAF 的承购协议数量显著增加，已经宣布的 SAF 采购量达到了 535 亿升（约折合 4500 万吨），其中像美国西南航空、美国航空、美国联合航空等航司，与它们的 SAF 生产商签署了长达 20 年的 SAF 供应协议<sup>126</sup>，一方面为生产商提供了长期的生产需求，另一方面也能确保航司在未来的 SAF 使用上享有稳定的供应与较为合理的价格。



来源：作者绘制，数据来自 ICAO。

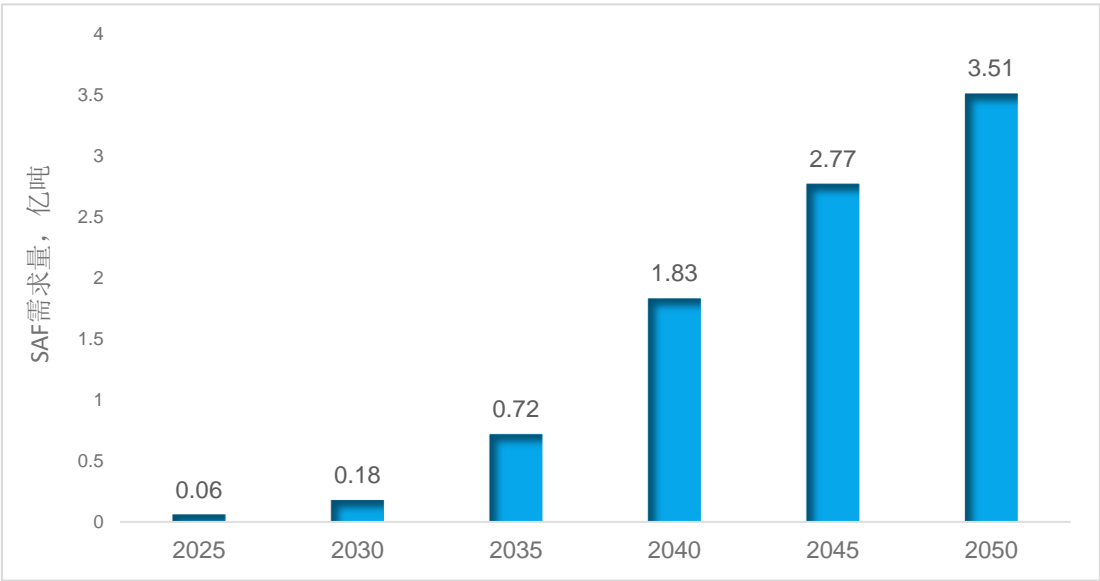
图 41 SAF 历年来的承购协议数与采购量趋势

未来，SAF 的需求量将持续增长。IATA 预测，在适当的政府政策支持下，2025 年 SAF 产量将达到 0.06 亿吨（79 亿升），占总燃料需求的 2%；到 2030 年全球 SAF 的需

<sup>125</sup> IATA, <https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>

<sup>126</sup> ICAO, Tracker of SAF Offtake agreements, <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Offtake-Agreements.aspx>

求量有望达到 0.18 亿吨（230 亿升）；2035 年以后，随着 SAF 价格更加具备竞争力，其市场需求也将进一步扩大，至 2050 年，SAF 全球需求总量可达 3.5 亿吨。



来源：作者绘制，数据来自 IATA.

图 42 SAF 未来需求量预测

（3） 主要生产商

SAF 产业正处在蓬勃发展的初期，早先布局的企业已经成长为产业巨头，同时也有很多企业正在积极入局，未来 SAF 产业的企业格局充满很多不确定性。

欧洲

欧洲一直以来都是 SAF 相关法规 and 政策的先行推行着，因此也催生出一批具有领导力的 SAF 生产企业。据统计，目前欧洲的 SAF 产能约为 24 万吨/年，约占 2030 年欧洲 SAF 需求量的 10%<sup>127</sup>。

◆ Neste（纳斯特）

Neste 是一家总部设在芬兰的粮油和石油营销公司，也是世界上最大的可再生柴油生产商。Neste 目前也是全球最大的 SAF 生产商之一，主要采用的技术路线为 HEFA 技术。截至 2024 年，Neste 在全球的 SAF 产能约为 150 万吨/年，主要工厂分布在芬兰（Porvoo 炼油厂）、荷兰（Rotterdam 工厂）以及新加坡（Jurong 岛工厂）。

◆ SkyNRG

SkyNRG 是一家总部位于荷兰的 SAF 生产和供应企业，成立于 2009 年。SkyNRG 正

<sup>127</sup> EASA, <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry#production-capacity-and-demand-2020-to-2030>

在建设目前欧洲第一个专门生产 SAF 的工厂（DSL-01），基于 HEFA 技术路线，工厂拥有年产 10 万吨 SAF 的生产能力，同时也将副产约 3.5 万吨的可持续性副产品，如 LPG 和石脑油<sup>128</sup>。除此之外，该公司还与阿姆斯特丹港合作，于 2021 年启动了名为 Synkero 的项目，该项目将使用 PtL 技术路线生产合成 SAF，但由于绿氢、CCUS 以及电网相关技术问题，目前该项目暂时被搁置<sup>129</sup>。

#### ◆ Repsol（雷普索尔）

Repsol 是西班牙最大的工业公司，主营勘探与生产、炼制与销售、化工和天然气等领域。公司在西班牙卡塔赫纳的炼油厂周边建设了一座生物燃料工厂，采用 HEFA 技术路线，工厂拥有每年生产 25 万吨生物燃料（含 SAF 和其他燃料）的能力。此外，在毕尔巴鄂港的 Petronor 炼油厂附近，公司计划建造世界上最大的合成生物燃料工厂之一，使用 PtL 技术路线来合成生物燃料，工厂预计在 2024 年投产，年产能可达 2100 吨<sup>130</sup>。

#### ◆ TotalEnergies（道达尔能源）

道达尔能源是一家法国石油公司，也是目前世界上六大石油公司之一，在全球生产和销售包括石油、生物燃料、天然气。绿色燃气、可再生能源和电力在内的能源产品。道达尔能源采用 HEFA 技术路线和共混加工两种主要渠道生产 SAF，目前生产能力约为 10 万吨/年。未来几年，道达尔能源的 SAF 生产能力将大幅提升：位于 Grandpuits 的工厂产能预计在 2025 年将达到 21 万吨/年，2027 年可提升至 28.5 万吨/年；位于诺曼底的工厂在 2025 年将有能力生产 16 万吨的 SAF；公司还计划将位于 La Mède 的炼油厂改造成为生物炼制工厂，并于 2025 年使用 100% 的废弃物生产 SAF<sup>131</sup>。

#### ◆ Air BP（英国石油公司）

BP 是总部位于伦敦的世界领先的石油和天然气公司，也是世界六大石油公司之一。Air BP 是 BP 旗下子公司，主营航空燃油业务，为全球最大的航空供应商之一，每年供应 66 亿加仑的航空燃油<sup>132</sup>。早在 2010 年，Air BP 就与巴西 TAM 航空（现名 LATAM）合作进行了 SAF 航班试飞。Air BP 位于西班牙、德国等地的炼油厂采用共混处理技术，以餐厨废油、废弃物和残留物为主要原料进行 SAF 生产<sup>133</sup>。Air BP 还与 Neste 和 Fulcrum 两家可再生燃料生产商合作，拓宽 SAF 供应链，以使 Air BP 能够在更多的机场提供

<sup>128</sup> SkyNRG, <https://skynrg.com/producing-saf/skynrgs-production-facility-in-the-netherlands/>

<sup>129</sup> SkyNRG, <https://skynrg.com/producing-saf/saf-production-plant-in-the-port-of-amsterdam/>

<sup>130</sup> Repsol, <https://www.repsol.com/en/products-and-services/aviation/biofuels-in-aviation/index.cshmtl>

<sup>131</sup> TotalEnergies, <https://totalenergies.com/news/press-releases/air-france-klm-ramps-its-saf-offtake-agreement-totalenergies-which-will-supply>

<sup>132</sup> BP, [https://www.bp.com.cn/zh\\_cn/china/home/products-and-services/our-brands.html](https://www.bp.com.cn/zh_cn/china/home/products-and-services/our-brands.html)

<sup>133</sup> BP, <https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/press-releases/bp-refinery-in-lingen-starts-production-of-saf.html>



SAF<sup>134</sup>。值得一提的是，Fulcrum 公司于 2024 年 6 月关闭了位于内华达州的 SAF 工厂，并于 9 月初寻求破产保护<sup>135</sup>。

## 美国

2024 年初，美国的 SAF 生产能力约为 2000 桶/天，实际能够生产 SAF 的工厂只有两家，分别是位于加州派拉蒙的 World Energy 的 SAF 工厂，以及位于蒙大拿州的蒙大拿可再生能源公司的工厂。据 EIA（美国能源署）预计，随着飞利浦 66 的罗迪欧（Rodeo）工厂改造工程完工，以及钻石绿色柴油公司的亚瑟港 SAF 项目投产，2024 年底美国的 SAF 生产能力可以达到 30000 桶/天<sup>136</sup>。

### ◆ Montana Renewables（蒙大拿可再生能源公司）

蒙大拿可再生能源公司是一家位于蒙大拿州的可再生燃料公司，2021 年从 Calumet 公司分离，并成为该公司的子公司。蒙大拿可再生能源公司是北美领先的 SAF 生产商，基于 HEFA 技术路线，使用 Topsoe 的 Hydroflex Catalyst 技术来处理生物原料（菜籽油、玉米油、动物脂肪等），年生产能力约为 3000 万加仑<sup>137</sup>。

### ◆ World Energy（世界能源公司）

世界能源公司于 1998 年成立于美国波士顿，是世界上第一家商业生产 SAF 的能源公司（2016 年）。世界能源公司在加州派拉蒙的 SAF 工厂采用 HEFA 技术路线，每年可生产超过 10 万吨的 SAF。目前，世界能源公司正在美国休斯顿建设一个新的 SAF 生产中心，预计 2025 年全部产能可达到 5 亿加仑<sup>138</sup>。

### ◆ LanzaTech（俄克托）新西兰

LanzaTech 全球领先的清洁能源技术公司，创始于新西兰，总部设在美国伊利诺伊州。该公司的核心技术是利用生物技术（菌株）将工业废气转化成燃料乙醇以及其他产品。凭借其成功的生物乙醇合成技术，LanzaTech 及其旗下子公司 LanzaJet，于 2024 年初在美国佐治亚州建成全球首个基于乙醇原料的 AtJ 合成 SAF 的商业工厂。运行第一年，该工厂预计将生产 900 万加仑 SAF 和 100 万加仑的可再生柴油<sup>139</sup>。

### ◆ Phillips 66（菲利普 66）

菲利普 66 成立于 1875 年，是一家总部位于美国休斯顿的跨国能源公司，在全球

<sup>134</sup> BP, <https://www.bp.com/en/global/air-bp/news-and-views/network-news/saf-explained.html>

<sup>135</sup> Argus, <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2608211-fulcrum-bioenergy-files-for-chapter-11-relief>

<sup>136</sup> EIA, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=62504>

<sup>137</sup> Montana Renewables, <https://montanarenewables.com/products/sustainable-aviation-fuel/>

<sup>138</sup> World Energy, [https://www.safinvestor.com/producer\\_innovator/141953/world-energy/](https://www.safinvestor.com/producer_innovator/141953/world-energy/)

<sup>139</sup> US Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/first-ethanol-alcohol-jet-sustainable-aviation-fuel-production-facility>

范围内加工、运输、储存和销售燃料及产品。2024 年年中，该公司完成了对位于加州罗迪欧的旧金山炼油厂的改造工程，基于 HEFA 技术路线，该工厂每年可生产 8 亿加仑的可再生燃料（包括可再生柴油和 SAF 等）<sup>140</sup>。不过实际的 SAF 生产计划推迟至 2025 年第一季度，目前工厂正在使用更高碳强度的原料来生产可再生柴油，为 2025 年度的税收抵免申请做好准备<sup>141</sup>。

#### ◆ Gevo

Gevo 是一家总部位于美国的可再生化学品和生物燃料公司，成立于 2005 年，公司专注于将可再生能源转化成能源密集的液态碳氢化合物，如 SAF。Gevo 在生产异丁醇、乙醇等生物燃料方面有丰富经验，因此在其正在建设中的南卡罗来纳州普雷斯顿湖 SAF 工厂中，将采用 AtJ 技术路线，全部使用美国本土原料，年产量约为 6000 万加仑<sup>142</sup>。

### 中国

截至 2024 年底，中国已经有十余家企业可独立生产 SAF，但通过适航认证并真正实现投产的企业有四家，分别为中石化镇海炼化、易高环保、君恒生物和海新能科。

#### ◆ 中石化（镇海）

中石化是中国国内最早布局 SAF 的巨头企业，早在 2022 年，中石化镇海炼化就已经建成了 10 万吨/年产能的 SAF 装置，并获得中国首个 RSB 可持续认证。该公司采用 HEFA 技术路线，以餐厨废油为原料生产 SAF。

#### ◆ 易高环保

易高环保是香港中华煤气集团的全资子公司，其位于江苏省张家港的工厂基于 HEFA 生产工艺，使用餐厨废油生产 SAF，年产能为 5 万吨，生产的 SAF 主要出口至欧洲，中国国内的适航认证工作正在审定过程中。

#### ◆ 君恒生物

河南君恒生物于 2024 年 1 月通过中国民航局适航认证，成为国内首家获得适航认证的民营企业。君恒生物基于 HEFA 技术路线，以餐厨废油为原材料，2024 年预计年产 13.7 万吨 SAF，2024 年有望实现 40 万吨/年的生产能力建设<sup>143</sup>。

---

<sup>140</sup> Phillips66, <https://www.phillips66.com/refining/san-francisco-refinery/>

<sup>141</sup> Argus, <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2623208-rodeo-renewable-jet-unlikely-in-4q-phillips-66>

<sup>142</sup> S&P Global, <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/latest-news/crude-oil/101724-us-doe-approves-gevo-montana-renewables-saf-project-loans>

<sup>143</sup> 搜狐, [https://www.sohu.com/a/753533775\\_121400340](https://www.sohu.com/a/753533775_121400340)

#### ◆ 海新能科

北京海新能源科技股份有限公司（海新能科）是一家高新技术企业，2024 年 11 月取得民航局 HEFA-SPK 适航审定以及 ISCC CORSIA 认证，依托其子公司山东三聚现有 40 万吨/年的生物能源项目，海新能科自 2025 年起，将拥有约 20 万吨/年的 SAF 及其他可再生燃料生产能力。

#### ◆ 鹏鹞环保

鹏鹞环保与辽宁宏业石化合作，通过对宏业石化 20 万吨/年的加氢装置进行技改，建设 10 万吨/年的生物质液体燃料项目，采用沸腾床加氢技术，以废弃油脂为原料，生产符合欧盟标准的二代生物柴油和 SAF。目前，该公司的 SAF 主要销售渠道为出口欧盟，国内的适航认证尚未办理。

## 结束语

采取积极行动应对气候变化，是中国作为一个排放大国的责任，也是中国向人类赖以生存的唯一地球所做出的庄重承诺。

过去的十几年，在汽车向零排放转型的进程中，中国以自身经历向世界展示了其强大的领导力和执行力，引领和带动了全球汽车产业的全面零排放转型。

在民航领域，中国虽然尚未出台战略目标和规划，但愈加严峻的气候挑战、越来越多的国家与航空公司所做出的温室气体减排规划，必然督促着中国有所行动，并且要加快行动。我们很高兴地看到，在刚刚过去的 2024 年，中国在民航领域的减排行动，尤其是与可持续航空燃料（SAF）相关的活动，已经在有序开展。

应用方面，2024 年 9 月，中国开启 SAF 应用试点工作，在北京大兴、成都双流、郑州新郑、宁波栎社四个机场试点加注 SAF。

产业方面，除中石化镇海炼化外，君恒生物、海新能科等多个企业相继完成 SAF 试产，加速了 SAF 产业规模的扩展。

政策方面，民航二所等单位正在加紧制定中国可持续航空燃料的相关标准，并牵头构建中国本土的完整 SAF 政策体系。

研究方面，多家智库机构相继开展中国可持续航空燃料相关研究，有力带动了利益相关方之间的交流，为中国 SAF 发展创造了新的机遇。

诚然，SAF 的发展和应用仍然面临诸多挑战与不确定性。多种技术路线的本土适用性与原料可得性问题亟待验证，高昂的生产成本如何逐步降低，需要哪些政策措施进行推动，如何构建本土的可持续认证体系？这些问题都是中国发展 SAF 必然要回答和解决的问题。

道阻且长，行则将至。

过去近二十年间，我们见证了中国在生物燃料、汽车燃油经济性、新能源汽车等多个领域，从无到有地构建了完整的产业链和政策体系，并实现了跨越式发展。我们也相信，中国有能力成为全球 SAF 发展和应用的重要参与者，为全球民航净零碳排放转型贡献中国力量。

## 关于北京市朝阳区能源与交通创新中心

北京市朝阳区能源与交通创新中心是在中国北京注册的致力于清洁交通、能源转型和气候变化领域研究与发展的专业智库机构。

机构的核心使命是为政府、企业、公众提供能够缓解能源和气候危机并创造绿色能源生态体系所亟需的创新型解决方案。

我们的工作职责是：

- 引荐国际最佳实践方案
- 提供专业咨询及政策建议
- 推动利益相关方及伙伴关系协作
- 促进公共参与及传播

过去的十几年中，作为清洁能源交通及气候政策的智库机构，本机构建立了良好的声誉。我们秉承着创新的原则，致力于科学研究，并保证成果的独立性和实用性。

## 关于“绿色腾飞”系列报告

为推动可持续航空燃料在中国的发展，助力航空产业持续脱碳，自 2023 年起，本机构发起“绿色腾飞”系列研究并发布报告，旨在梳理中国可持续航空燃料的发展现状及问题，提出本地化的长期发展思路与建议，并基于研究成果举办行业研讨会，共同促进可持续航空燃料的发展与应用。

“绿色腾飞”系列报告（I）已于 2024 年 8 月发布: *Taking Off Green – A Long Term Proposal for Sustainable Aviation Fuel Development in China*，报告探讨了中国可持续航空燃料的发展现状与中长期潜力，并提出了加强国家政策和利益相关方参与的建议，具体可参见机构网站

<http://www.icet.org.cn/admin/upload/iCET%20SAF%20Report%202024.PDF>。