

北京大学能源研究院

# 中国可持续航空燃料 发展研究报告 现状与展望

## THE PRESENT AND FUTURE OF SUSTAINABLE AVIATION FUELS IN CHINA





## 北京大学能源研究院 INSTITUTE OF ENERGY

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

### 气候变化与能源转型项目

北京大学能源研究院于 2021 年 3 月启动了气候变化与能源转型项目，旨在助力中国应对气候变化和推动能源转型，实现 2030 年前碳达峰和 2060 年前碳中和的目标。该项目通过科学研究，设立有雄心的目标，制定清晰的路线图和有效的行动计划，为政府决策提供建议和支持。

该项目积极推动能源安全、高效、绿色和低碳发展，加速化石能源消费的减量化直至退出。该项目具体的研究领域涵盖宏观的能源与环境、经济和社会的协调综合发展；化石能源消费总量控制；能源开发利用技术创新；电力部门向可再生能源为主体的系统转型；推动电气化；高耗能部门的低碳绿色发展；可持续交通模式；区域、省、市碳中和模式的示范推广；散煤和塑料污染治理；碳中和与碳汇；碳市场；社会公正转型等。

# 中国可持续航空燃料 发展研究报告 现状与展望

## The Present and Future of Sustainable Aviation Fuels in China

报告编写人员

丁奕如<sup>1</sup>、杨雷<sup>1</sup>、郑平<sup>1</sup>、王倩钰<sup>1</sup>、吕继兴<sup>2</sup>

2022年10月

---

<sup>1</sup> 北京大学能源研究院

<sup>2</sup> 中国民航大学

## 致谢

本研究报告由北京大学能源研究院组织编写。可持续航空燃料在全球航空业碳减排中将发挥至关重要的作用，但相应的研究工作目前还较缺乏，在中国尤其如此。有鉴于此，我们组织此次研究工作，历时一年，意在摸清行业现状，并对未来做出初步展望，这也是我们希冀推动该领域研究工作的一次努力探索。

在调研和报告起草过程中，我们有幸获得众多来自政府主管部门、产业界和研究机构专家的协助。受益于他们所提供的第一手信息和专业的反馈意见，本报告得以对中国可持续航空燃料市场的发展状况做出梳理。我们感谢他们的大力支持，尤其感谢：

高华、相金晶	(阿格斯)
李耀光	(北京海新能源科技股份有限公司)
董燕、晁伟	(北京首钢朗泽科技股份有限公司)
王世尧、许耀华	(标普全球)
陈闯、陈丽仙、李琳、王墨	(波音中国)
王欢、顾宪	(bp 航空中国区)
邢子恒	(国泰航空有限公司)
朱萃汉、张伶俐	(杭州能源工程技术有限公司)
张玮、于占福	(罗兰贝格)
李海兴、彭敏、韩任华	(壳牌中国)
马腾、徐浦天哲	(全国生物柴油行业协作组)
刘疏桐	(道兰环能 MotionECO)
汪同嘉	(中地油新能源 (山东) 有限公司)
龚丰、赵恒晖	(中国航空油料集团有限公司)
王晨光	(中国科学院广州能源研究所)
杨晓军	(中国民航大学)
于敬磊	(中国民航科学技术研究院)
向海	(中国民航航空总局第二研究所)
杨智渊	(中国民用航空航油航化审定中心)
张晓丽	(中国南方航空集团有限公司)
黄爱斌	(中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司)

同时，感谢张喆、吕明旭和廖衍光在资料整理方面的协助。

作者团队特别感谢波音公司对本研究项目的支持。

如果您对报告有何意见建议，请联系：[genergy@pku.edu.cn](mailto:genergy@pku.edu.cn)

# 目录

---

执行摘要	x
缩写与术语	xii
第1章 航空业发展与碳减排	1
1.1 航空业发展状况	2
1.2 航空业碳减排进程	8
第2章 航空碳减排措施与SAF角色	15
2.1 航空业碳减排的主要措施	16
2.2 应用SAF是最重要的减排举措	17
2.3 需要大幅提高SAF的生产和消费	20
第3章 SAF技术路线	23
3.1 主要技术路线	24
3.2 应用现状	24
3.3 发展前景	26
第4章 中国SAF管理机制与相关政策法规	29
4.1 法规与政策	30
4.2 适航审定	33
第5章 中国SAF市场主要参与方	37
5.1 产业链概况	38
5.2 生产商	38
5.3 供应渠道	44
5.4 航空公司	45
5.5 其他参与方	50
第6章 中国SAF发展展望	55
6.1 技术路线	56

---



6.2 产能 .....	57
6.3 原料可获得性 .....	58
6.4 标准制定 .....	59
<b>第7章 政策推动是SAF发展的关键 .....</b>	<b>61</b>
7.1 政府指令要求是破局关键 .....	62
7.2 支持措施不可或缺 .....	63
7.3 多方协作是落实所需 .....	66
7.4 中国未来政策发展取决于多方面因素 .....	66
<b>第8章 政策建议 .....</b>	<b>69</b>
<b>附录1 SAF标准发展状况 .....</b>	<b>71</b>
1. 工艺与性能标准 .....	71
2. 可持续性标准 .....	73
<b>附录2 SAF商业运营模式案例—国泰航空 .....</b>	<b>80</b>
<b>附录3 欧美机场探索SAF产业链联合行动案例 .....</b>	<b>81</b>
<b>尾注 .....</b>	<b>83</b>



# 图目录

---

图I-1: 全球航空客运量变化 (1945-2022年) ..... 2

图I-2: 中国航空客运量变化 (2017-2021年) ..... 6

图I-3: COVID-19对中国和美国的国内航空客运业的影响 ..... 7

图I-4: 2021年中国各航空(集团)公司运输周转量分布 ..... 7

图I-5: 全球宣布净零排放的国家 ..... 8

图I-6: 1990-2019年人类活动引起的全球温室气体排放量(按地区分布) ..... 9

图I-7: 1900-2021年能源燃烧和工业过程引起的CO<sub>2</sub>排放量 ..... 10

图I-8: 2020-2021年化石燃料产生的CO<sub>2</sub>排放量相对2019年的变化 ..... 10

图I-9: 航空业温室气体排放在全球总排放中占比 ..... 11

图2-1: 不同减排措施对航空业减排的贡献 ..... 17

图2-2: IATA规划的SAF发展目标 ..... 20

图2-3: 2021年SAF市场发展进展 ..... 21

图3-1: 2020-2050年不同SAF技术路线发展预期 ..... 27

图4-1: 中国民用航空法律法规体系 ..... 30

图5-1: 中国SAF市场产业链 ..... 38

图5-2: 中国及亚洲其他地区部分HVO与SAF产能分布 ..... 39

图5-3: 全球提供SAF加注服务的机场数量 ..... 52

图6-1: 不同SAF技术路线在中国发展的机遇与挑战 ..... 56

图6-2: 2025年中国SAF理论上可达产能规模 ..... 57

图6-3: 2025年中国航油消费量预计及SAF理论上可达占比 ..... 58

# 表目录

表1-1: COVID-19对全球航空客运业的影响 .....	3
表1-2: 2021年全球航空客运市场(对比2019年的变化率) .....	3
表1-3: 2021年主要国家国内客运市场(对比2019年的变化率) .....	4
表1-4: 全球航空客运量预期(2022-2025年) .....	5
表1-5: 国际航空产生的累积碳排放在未来全球碳预算中占比 .....	12
表1-6: 中国航空业CO <sub>2</sub> 排放量(2016-2021年) .....	12
表2-1: 航空业实现碳减排的主要措施 .....	16
表2-2: 航空业实现2050年净零排放的关键时间点与行动 .....	18
表2-3: 低碳能源应用于不同航程航班的可能时间表 .....	19
表3-1: 欧洲市场生产SAF的主要生产商与产量 .....	25
表3-2: 美国市场生产SAF的主要生产商与产量 .....	26
表4-1: 中国涉及SAF推广应用的相关政策 .....	31
表4-2: 中国生物柴油相关政策 .....	32
表4-3: 中国生物航油相关标准 .....	35
表4-4: 中国生物柴油相关标准 .....	35
表5-1: 镇海炼化SAF及相关业务领域工作进展 .....	40
表5-2: 易高SAF及相关业务领域工作进展 .....	41
表5-3: 海新能科HVO产销量 .....	43
表5-4: 中国航空公司SAF飞行记录 .....	45
表5-5: 全球航空公司SAF整体飞行规模 .....	46
表5-6: 2008-2019年全球部分航空公司SAF飞行记录 .....	46
表5-7: 中国主要航空公司减碳实践 .....	49
表5-8: 波音针对SAF的部分行动 .....	51
表5-9: 全球提供SAF加注服务的部分机场清单 .....	53
表6-1: 中国SAF生产原料的潜在可利用量 .....	59
表7-1: 欧盟规划的SAF掺混比例要求 .....	62
表7-2: 美国政府部门与航空业的SAF承诺与行动 .....	64
表7-3: 中国碳减排相关政策出台的部分动因分析 .....	66

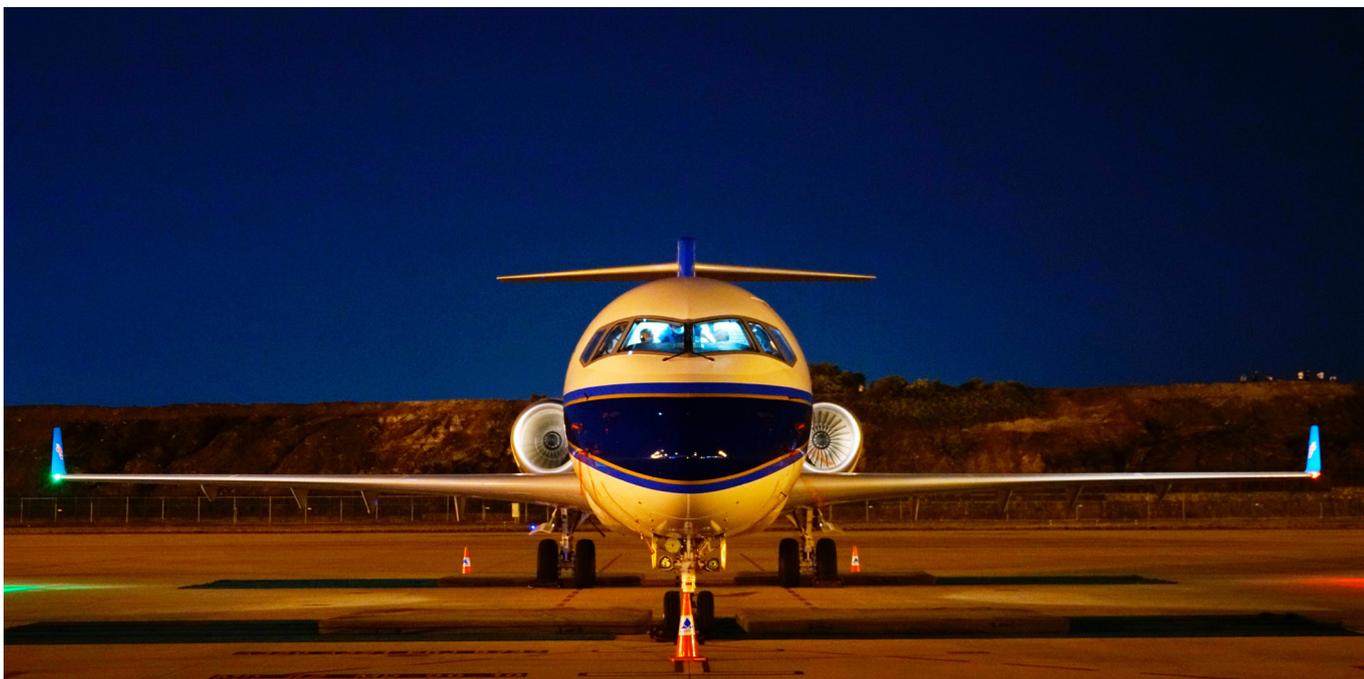


© Photo by Bilal EL-Dion on Pixabay

# 执行摘要

在新冠疫情发生前的 2019 年，全球航空业产生的温室气体排放占全球整体排放的 1.8%（约 10.6 亿吨二氧化碳当量）。虽然全球航空市场受疫情影响在 2020-2021 年出现大幅下滑，但在未来数十年，业务量整体上预计将持续增长，产生的温室气体排放量和占比预计也将不断增大。如若不做出额外减排努力，仅国际航空业务在 2020-2050 年期间累积产生的二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放就将占到全球同期总排放的 7.0%。

航空业是“难减排”行业之一，但全球航空业已经制定了积极的目标，即提出到 2050 年实现净零排放。在研发飞机新技术及提高运营与基础设施效率之外，发展可持续航空燃料（SAF）将是实现净零目标最重要的措施。根据国际航空运输协会（IATA）的分析，到 2050 年，65% 的减排将通过使用 SAF 来实现。



© Photo by Honglin Shaw on Unsplash

中国目前是继美国之后的第二大航空市场，潜在的需求增长还将持续扩大中国未来的市场规模。虽然，航空碳排放目前仅占中国整体碳排放的 1% 左右，但中国工业化进程已发展到中后期，传统重工业的发展规模及引起的碳排放已逐步进入平台期，预计将在未来 10 年左右开始下降。相比之下，整体还处于持续增长期的航空业未来产生的碳排放不容小觑。

中国 SAF 供需市场还处于初期阶段。在消费侧，自 2011 年以来内地航空公司仅实施过四次 SAF 试飞和商飞活动，尚未形成对 SAF 的真正需求。在供给侧，市场仅有两家企业具备 SAF 实际生产能力，整体规划产能在 15 万吨 / 年左右，目前还均处于试生产阶段。这与欧美市场供需双方在过去十多年持续尝试且在近两年有逐渐发力迹象的情况相比，有一定差异。

在全球范围内，SAF 产业整体都带有显著的“政策驱动”属性，政策导向是影响该产业发展的重要外部环境；其中，是否具有强制性或推荐性的 SAF 掺混比例是最重要的影响消费侧的因素。在欧美市场，政府已经设定或规划了国家或地区层面的可持续交通燃料应用目标和具体的掺混指令要求，此类政策信号对 SAF 等生物燃料的发展起到最直接的推动作用。全球 SAF 每年消费量从 2016 年的 6000 多吨增长到 2021 年的 8 万吨，这些消费绝大多数发生于欧美。

在中国，包括航空业在内的诸多行业在碳减排领域的努力是实现中国碳达峰碳中和目标的关键所需。在《“十四五”民航绿色发展专项规划》中，中国提出力争到 2025 年 SAF 累计消费量达到 5 万吨。这是一个积极的政策信号，不过 5 万吨并非具有强约束力的目标，发展路径也有待进一步明确。从整体看，中国 SAF 产业链各环节目前还处于知识储备阶段。

如果中国政府在未来释放更强烈的政策信号，进一步促进航空减排，势必将会激活 SAF 需求市场。当需求增长时，供应端的产能也可随之扩大。理论而言，如果将中国现有及规划的氢化生物柴油（HVO）产能进行改扩建用以制备 SAF，外加目前已有的 SAF 产能，预计 2025 年 SAF 的总潜在产能可达 205 万吨，供应量届时可达中国当年航油总消费量的 4.5%。

生产 SAF 的原料在中国分布较广，可利用量大，这为 SAF 的供给提供了保障。不过，如何加强不同技术路线的开发，加强产业链协作和设计相应的激励机制，以提高 SAF 产品的经济性，仍存在较多不确定性。

整体来说，中国 SAF 行业既面临挑战也存在机遇。如果充分利用内外有利条件，逐步发挥 SAF 的减排潜力，将在降低航空业碳排放、实现中国碳达峰碳中和目标、增强能源安全方面做出重要贡献。

---

## 缩写与术语

<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials 美国材料与试验协会	<b>SAF</b>	Sustainable Aviation Fuels 可持续航空燃料
<b>ATAG</b>	Air Transport Action Group 航空运输行动小组	<b>UNFCCC</b>	United Nations Framework Convention on Climate Change 联合国气候变化框架公约
<b>CORSIA</b>	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation 国际航空碳补偿和减排计划	<b>WEF</b>	World Economic Forum 世界经济论坛
<b>HVO</b>	Hydrogenated Vegetable Oil 氢化植物油 / 氢化生物柴油	<b>Gt</b>	Gigatonne (1 billion tonnes) 十亿吨
<b>IATA</b>	International Air Transport Association 国际航空运输协会	<b>Mt</b>	Megatonne (1 million tonnes) 百万吨
<b>LCA</b>	Lifecycle Assessment 生命周期评价		
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization 国际民航组织		
<b>LCFS</b>	Low Carbon Fuel Standard 美国加州 - 低碳燃料标准		
<b>IEA</b>	International Energy Agency 国际能源署		
<b>ISCC</b>	International Sustainability & Carbon Certification 国际可持续性和碳认证		
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization 国际标准化组织		
<b>RED</b>	Renewable Energy Directive 欧盟 - 可再生能源指令		
<b>RFS</b>	Renewable Fuel Standard 美国 - 可再生燃料标准		
<b>RSB</b>	Roundtable on Sustainable Biofuels 可持续生物燃料圆桌会议		
<b>RTFC</b>	Renewable Transportation Fuel Certification 英国 - 可再生交通燃料认证		
<b>RPK</b>	Revenue Passenger Kilometres 收入客公里		
<b>RTK</b>	Revenue Tonne Kilometres 收入吨公里		



© Photo by Paul H on Unsplash

1

# 航空业发展与碳减排



© Photo by PublicDomainPictures on Pixabay

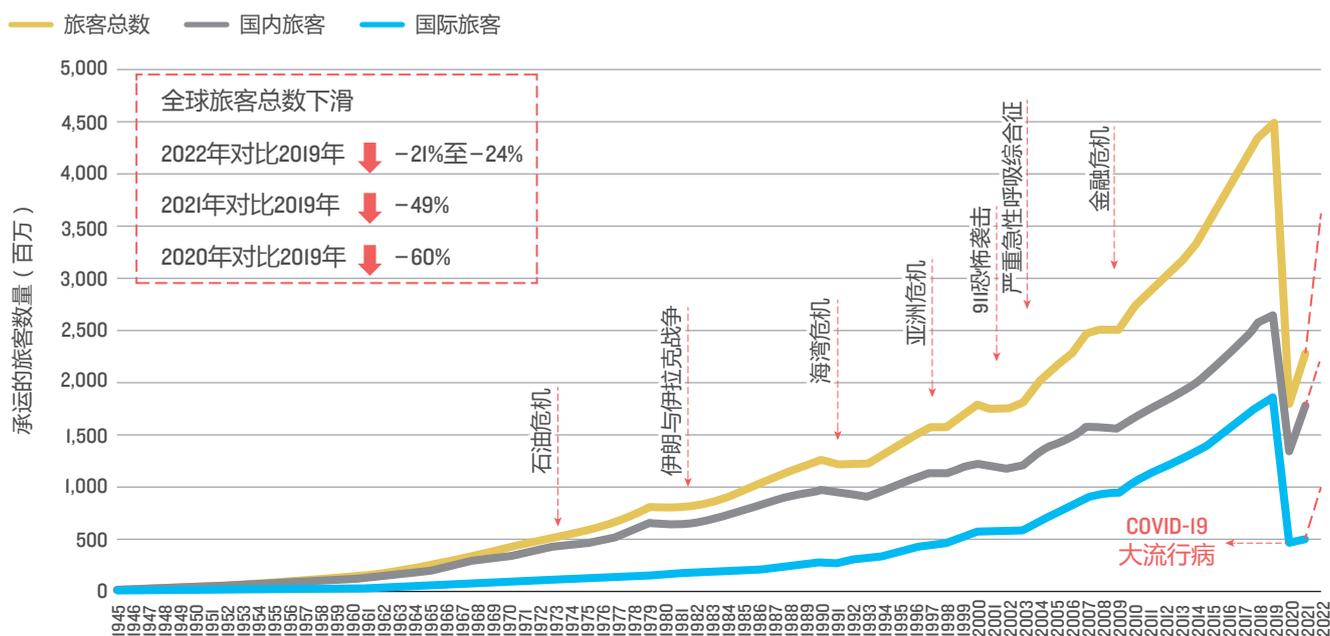
## 1.1 航空业发展状况

### 1.1.1 全球市场较新冠疫情前缓慢恢复

过去两年，是全球航空业发展极其特殊的一个时期。受

新冠疫情（COVID-19）影响，全球航空运输业经历了有史以来最严重的业务衰减。根据国际民航组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）统计<sup>1,2,3</sup>，2021年全球范围旅客数量为 23 亿人次，比疫情前（2019 年）的水平下降 49%，与 2020 年 60% 的降幅相比有所回升（见图 1-1）。

图 1-1: 全球航空客运量变化 (1945-2022 年)



来源: ICAO, 2022.06

相较 2019 年，2021 年和 2020 年的全球航空公司客运收入分别损失了 3240 亿美元和 3720 亿美元（见表 1-1）。

表 1-1: COVID-19 对全球航空客运业的影响

对比 2019 年的变化率	2020 年	2021 年	2022 年 (预计)
可用客座数减少	50%	40%	15% ~ 18%
乘客人数减少 (百万人) (下降比例)	2703 (下降 60%)	221 (下降 49%)	921 ~ 1079 (下降 21% ~ 24%)
客运业务损失 (亿美元)	3720	3240	1330 ~ 1550

来源: ICAO, Effects of Novel Coronavirus on Civil Aviation: Economic Impact Analysis, 2022.06

根据国际航空运输协会（简称国际航协，International Air Transport Association, IATA）统计<sup>4</sup>，2021 年全年全球航空客运需求（按照收入客公里或 RPKs 计算）与 2019 年全年相比下降 58.4%，2020 年比 2019 年下降 65.8%。

在地区层面<sup>5</sup>，北美、拉美和加勒比地区恢复最快，亚太地区由于国内业务放缓且国际业务停滞，整体恢复较为缓慢（见表 1-2）；美国和中国 2021 年的国内客运量均下降了约 24%；与 2019 年相比，俄罗斯是 2021 年国内客运需求唯一增长的市场（见表 1-3）<sup>6</sup>。

表 1-2: 2021 年全球航空客运市场(对比 2019 年的变化率)

	全球市场份额占比 <sup>1</sup>	2021 年对比 2019 年的变化率			
		收入客公里	可用座公里	载客率变化率 <sup>2</sup>	载客率
整体市场	100%	-58.4%	-48.8%	-15.4%	67.2%
非洲	1.9%	-62.8%	-55.1%	-12.3%	59.5%
亚太	27.5%	-66.9%	-56.7%	-19.2%	62.6%
欧洲	24.9%	-61.3%	-51.9%	-16.6%	68.6%

	全球市场份额占比 <sup>1</sup>	2021年对比2019年的变化率			
		收入客公里	可用座公里	载客率变化率 <sup>2</sup>	载客率
拉美	6.5%	-47.4%	-43.9%	-5.2%	77.3%
中东	6.5%	-69.9%	-55.5%	-24.8%	51.5%
北美	32.6%	-39.0%	-29.9%	-11.0%	73.8%

备注: 1) 2021年区域市场的 RPKs 占比; 2) 2021年载客率较2019年相同月份的变化率。

来源: IATA, 2022.01

表 1-3: 2021年主要国家国内客运市场(对比2019年的变化率)

	全球市场份额占比 <sup>1</sup>	2021年对比2019年的变化率			
		收入客公里	可用座公里	载客率变化率 <sup>2</sup>	载客率
国内市场	62.4%	-28.2%	-19.2%	-9.3%	74.3%
澳大利亚	0.7%	-62.4%	-50.4%	-19.6%	61.2%
巴西	1.9%	-27.2%	-25.1%	-2.3%	80.4%
中国	17.8%	-24.4%	-8.9%	-14.4%	70.2%
印度	2.2%	-41.8%	-28.8%	-15.9%	71.4%
日本	1.1%	-57.9%	-38.3%	-23.4%	50.4%
俄罗斯联邦	4.5%	24.2%	19.4%	3.4%	86.5%
美国	25.6%	-23.8%	-16.7%	-7.3%	78.0%

备注: 1) 2021年 RPKs 数据; 2) 2021年载客率较2019年相同月份的变化率。

来源: IATA, 2022.01

航空业务低迷、收入降低，对航空业产生多方面影响<sup>7</sup>。其中，是否会影响航空公司推进碳减排的意愿和进度，目前还存在不确定性，尤其是针对用可持续航空燃料（SAF）替代当前的化石燃料，在短期内势必会增加用油成本，这对于航空公司是一个挑战。

## 1.1.2 全球市场有望在 2024 年复苏到疫情前水平

随着不同国家和地区逐步放松或取消旅行限制，全球客运量有望在 2022 年恢复至疫情前（2019 年）水平的 80% 左右，2023 年恢复至 90% 左右，2024 年完全恢复；其中，国内客运量比国际客运量更快恢复，在 2023 年即可回到疫情前水平（见表 1-4）<sup>8</sup>。

表 1-4: 全球航空客运量预期 (2022-2025 年)

	客运量 (相对于 2019 年的比例)				
	2021	2022	2023	2024	2025
整体市场	47%	83%	94%	103%	111%
国际航空	27%	69%	82%	92%	101%
国内航空	61%	93%	103%	111%	118%
亚太地区	40%	68%	84%	97%	109%
欧洲	40%	86%	96%	105%	111%
北美	56%	94%	102%	107%	112%
非洲	46%	76%	85%	93%	101%
中东	42%	81%	90%	98%	105%
南美	51%	88%	97%	103%	108%
中美	72%	96%	102%	109%	115%
加勒比地区	44%	72%	82%	92%	101%

来源: IATA, Tourism Economics Air Passenger Forecast, 2022.03

不过，当前的低迷有可能会影响客运业长期的业务模式，ICAO 调整了对全球市场的长期预测，其目前预计 2018 年至 2050 年全球收入客公里 (RPKs) 复合年增长率 (CAGR) 为 3.6%，低于 COVID-19 之前预测的 4.2%<sup>9,10</sup>。

### 1.1.3 中国市场随疫情影响波动较大

受新冠疫情影响，2020 年运输量较 2019 年大幅下降，2021 年有小幅回升。2020 年，中国全行业完成旅客运输量 41777.82 万人次，比疫情前 (2019 年) 下降 36.7%；国内航线完成旅客运输量 40821.30 万人次，比上年下降 30.3%；国

际航线完成旅客运输量 956.51 万人次，比上年下降 87.1%<sup>11</sup>。2021 年，完成旅客运输量 44055.74 万人次，比上年增长 5.5%；国内航线完成旅客运输量 43908.02 万人次，比上年增长 7.6%，国际航线完成旅客运输量 147.72 万人次，比上年下降 84.6%<sup>12</sup>。

2020 年全年全行业运输总周转量为 798.51 亿吨公里，同比下降 38.3%；其中，国内航线运输周转量同比下降 29.2%，国际航线下降 54.5%。2021 年，完成运输总周转量 856.75 亿吨公里，比上年增长 7.3%；国内航线比上年增长 9.1%，国际航线比上年增长 2.3%。

图 1-2: 中国航空客运量变化 (2017-2021 年)



来源：中国民用航空局，2021 中国民航行业发展统计公报，2022.05

全国各地疫情的反复，使得包括航空在内的交通运输业发展波动较大。对比中国和美国这两大国内航空市场，在疫情集中爆发的时间段，航空业务都相应地显著下降 (见图 1-3)<sup>13,14</sup>。

图 I-3: COVID-19 对中国和美国的国内航空客运业的影响



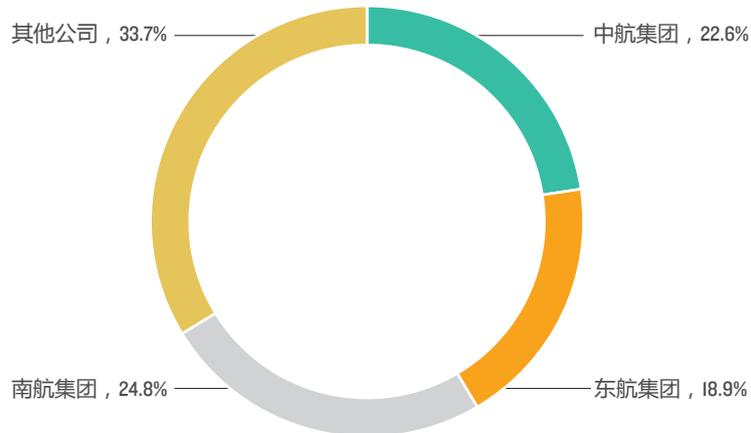
来源: ICAO, ADS-B operation data, 2022.06

截至 2021 年底, 中国共有运输航空公司 65 家, 其中国有控股公司 39 家, 民营和民营控股公司 26 家。在全部运输航空公司中, 全货运航空公司 12 家, 中外合资航空公司 9 家, 上市公司 8 家。民航全行业运输飞机期末在册架数 4054 架,

客运飞机共 3856 架, 占比 95.1%。

在 2021 年全年全行业运输总周转为 798.51 亿吨公里中, 国内三大航周转总量为 544.64 亿吨公里, 占比 68.2%。

图 I-4: 2021 年中国各航空 (集团) 公司运输周转量分布



来源: 中国民用航空局, 2021 中国民航行业发展统计公报, 2022.05

## 1.2 航空业碳减排进程

### 1.2.1 全球应对气候变化进展喜忧参半

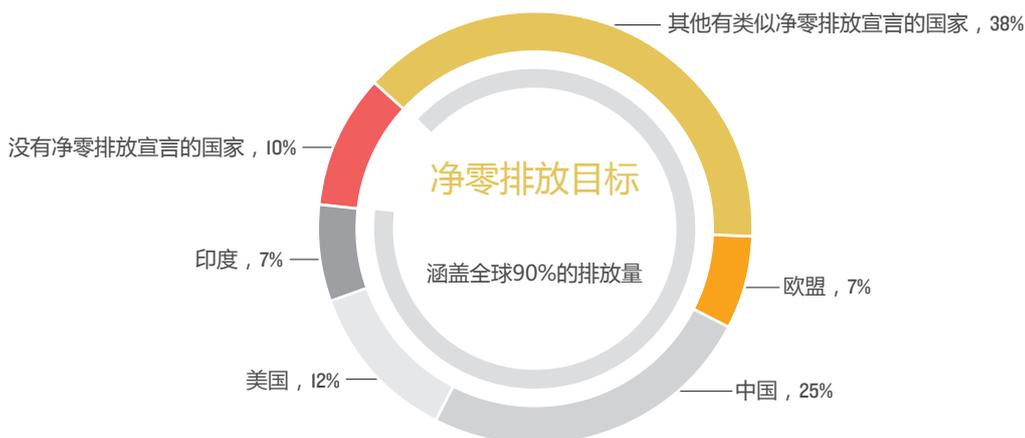
国际社会共同应对气候变化目前已成为全球共识，减少CO<sub>2</sub>等温室气体排放是减缓气候变暖最重要的措施。2015年，继《京都议定书》之后，全球第二份具有法律约束力的气候协议《巴黎协定》正式通过，为2020年之后全球应对气候变化的行动做出安排，即：较工业化前的气温水平，全球平均气温

升高幅度应控制在2摄氏度之内，并努力做到升温在1.5摄氏度之内，并且在本世纪下半叶实现温室气体净零排放。

截至2021年11月2日，全球有140多个国家已宣布或正在考虑在2050年或2060年前实现净零排放（Net zero emissions），这些国家代表了全球90%的温室气体排放<sup>15</sup>。其中，中国作为目前全球最大的碳排放国，提出将采取更加有力的减排政策和措施，目标是CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和<sup>16</sup>。

图1-5: 全球宣布净零排放的国家

已通过净零排放法案或正处于议案商讨阶段的国家



备注：摘自 EDGAR 排放数据库，2019

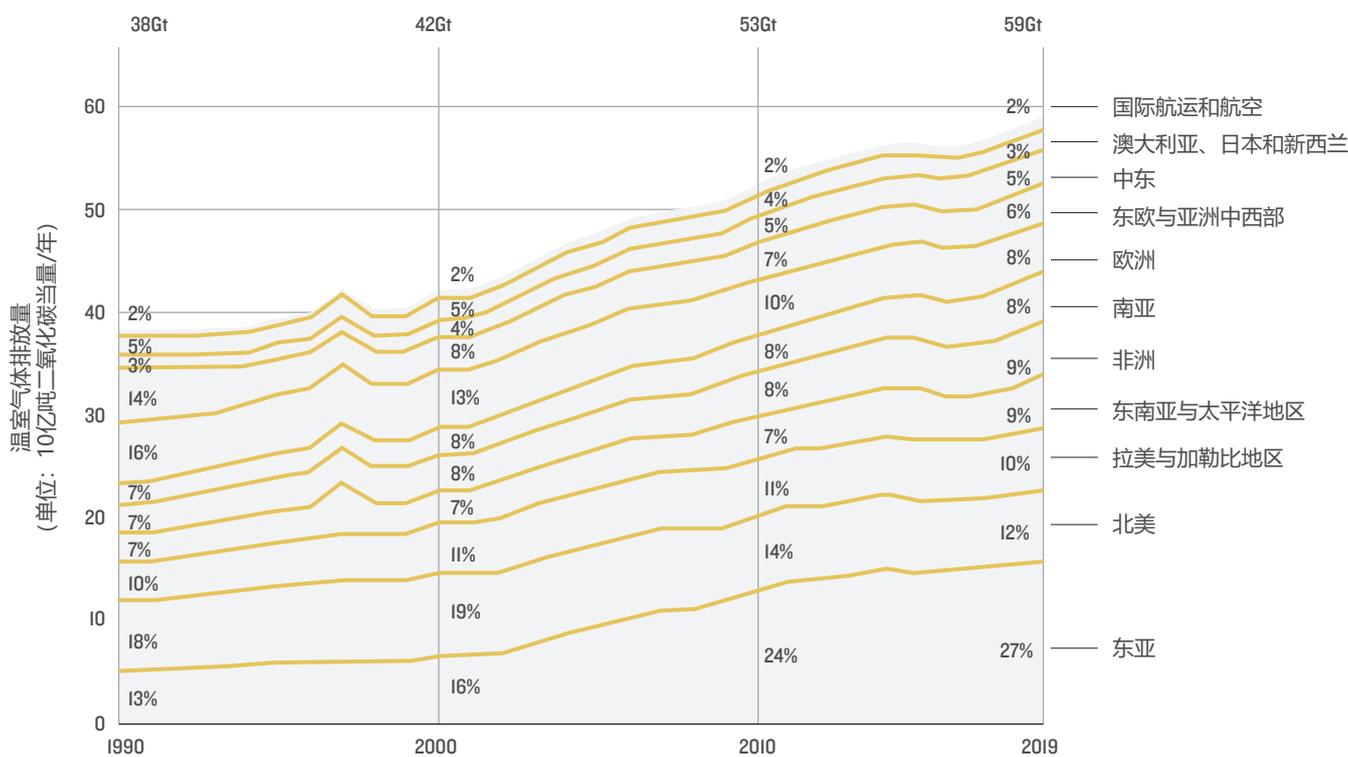
来源：Climate Action Tracker，2021.11

虽然大多数国家设定了长期净零排放目标，但是，考虑到当前全球温室气体排放增长的趋势还并没有逆转，因此中短期减排需求非常紧迫。

根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）在2022年4月发布的报告数据<sup>17</sup>，2010-2019年全球温室气体年平均排放量虽然增长速度有所放缓，但排放量仍处于人类历史上的最高水平。2019年的排放总量创下了590亿吨二氧化碳当量（CO<sub>2</sub>-eq）的历史新高，比2010年的排放量高出约12%，比1990年高出

54%。在地区别上，2019年东亚、北美、拉美与加勒比地区分别占全球温室气体排放的27%、12%和10%（见图1-6）。

图 1-6: 1990-2019 年人类活动引起的全球温室气体排放量 (按地区分布)



来源: IPCC, Mitigation of Climate Change 2022, 2022.04

根据 IPCC 的情景分析<sup>18,19</sup>, 过去三十年, CO<sub>2</sub> 年均排放占温室气体总排放量的 75% 左右; CO<sub>2</sub> 排放量减少将对减缓全球变暖至关重要, 当 CO<sub>2</sub> 排放达到净零时, 全球温度将可以达到稳定。限制 1.5°C 温升将要求 2050 年左右全球能实现 CO<sub>2</sub> 净零排放; 同时, 全球温室气体排放最迟需要在 2025 年前达到峰值, 并在 2030 年前减少 43%。全球各国如果不立即在所有部门进行深度减排, 将难以实现这一目标。

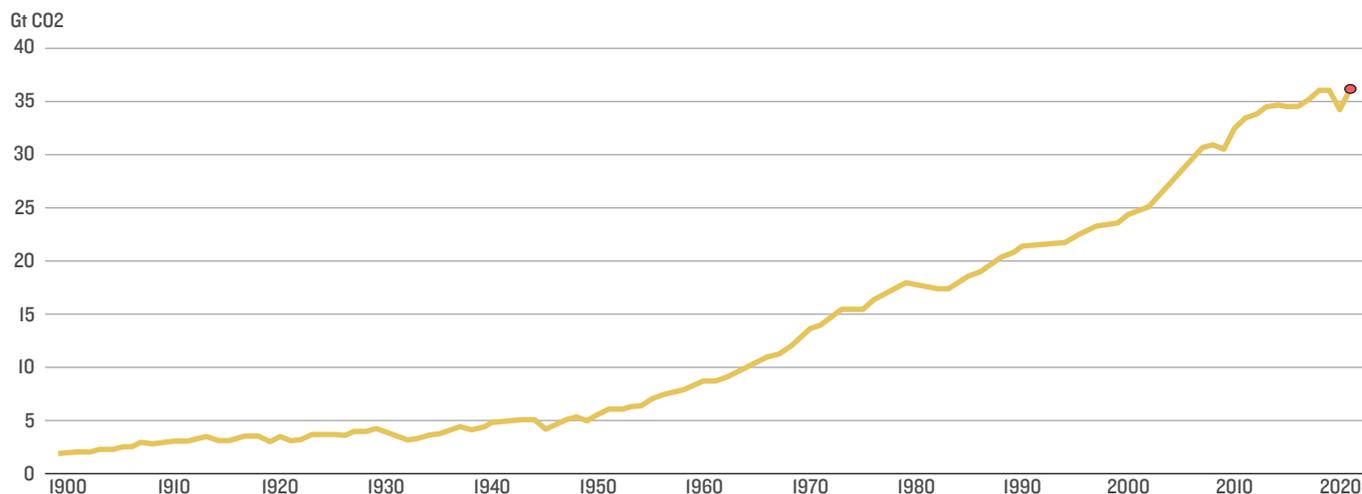
### 1.2.2 碳排放受新冠疫情短暂影响后又快速反弹

能源相关活动产生的 CO<sub>2</sub> 是全球温室气体的主体, 其 CO<sub>2</sub> 排放占温室气体排放总量的 60-65% (见图 1-7)。根据国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 的分析<sup>20</sup>, 受新冠疫情影响, 全球能源需求和工业生产规模在 2020 年下滑, 相应碳排放也较 2019 年的 361 亿吨下降了 5.2%, 为 342 亿吨。

但随后, 一些主要国家陆续出台了强劲的财政和货币刺激政策并快速推广疫苗接种, 世界经历了快速的经济复苏。

2021 年, 全球能源燃烧和工业过程产生的 CO<sub>2</sub> 排放出现强劲反弹, 较 2020 年同比增长 6%, 达 363 亿吨, 甚至比 2019 年疫情前的水平还高出约 1.8 亿吨, 达到有史以来年度最高水平。同时, 2021 年也超过 2010 年成为绝对值同比增幅最大的一年。

图 1-7: 1900-2021 年能源燃烧和工业过程引起的 CO<sub>2</sub> 排放量

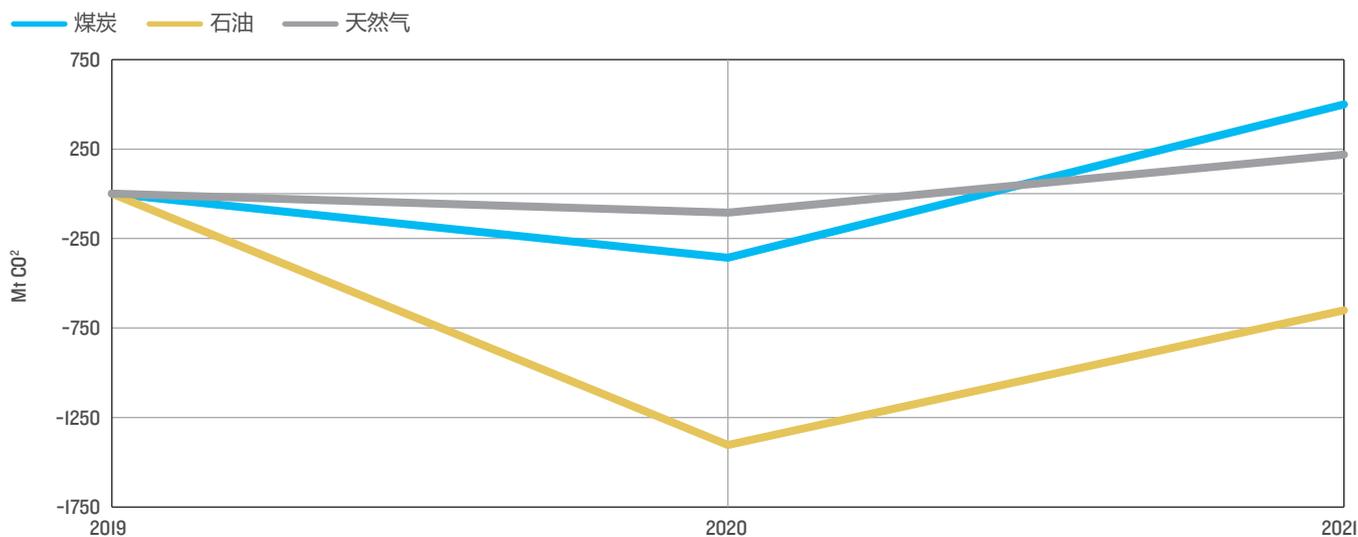


来源: IEA, Global Energy Review-CO<sub>2</sub> Emissions in 2021, 2022.03

2021 年, 全球几乎所有地区的 CO<sub>2</sub> 排放量都出现了增长, 巴西和印度均同比增长超过 10%, 美国和欧盟增长约 7%, 中国增长 5%。由于中国 CO<sub>2</sub> 排放量基数大, 这就直接推动了碳排放的快速反弹。中国是唯一在 2020 年和 2021 年均实现经济增长的主要经济体, 其 2021 年的 CO<sub>2</sub> 排放量比 2019 年增加了 7.5 亿吨, 超过了世界其他地区 5.7 亿吨的总计排放减量。

CO<sub>2</sub> 排放创历史新高, 主要在于煤炭和天然气产生的碳排放增长。2021 年, 煤炭消费产生的碳排放达到 153 亿吨历史新高, 比 2019 年增加 5 亿吨; 天然气消费产生的碳排放也反弹至 75 亿吨, 比 2019 年增加 2.2 亿吨; 唯一下降的是石油消费引起的碳排放, 比 2019 年减少 6.5 亿吨, 这主要是由于一些主要经济体为减少新冠疫情传播采取封锁措施, 从而限制了交通运输活动 (见图 1-8)。

图 1-8: 2020-2021 年化石燃料产生的 CO<sub>2</sub> 排放量相对 2019 年的变化

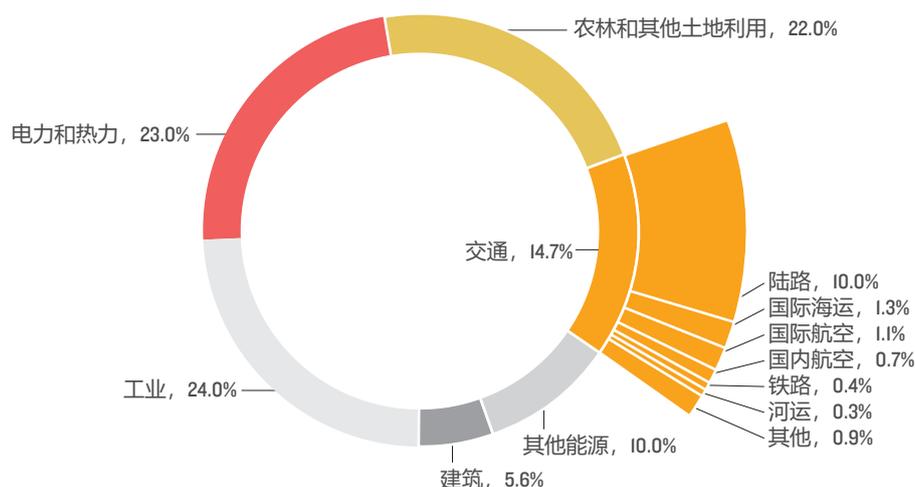


来源: IEA, Global Energy Review-CO<sub>2</sub> Emissions in 2021, 2022.03

### 1.2.3 航空业温室气体减排挑战巨大

2019 年，航空领域产生的温室气体排放占全球整体排放的 1.8%（约 10.6 亿吨二氧化碳当量）；其中，国际航空占 1.1%，国内航空占 0.7%<sup>21</sup>。

图 1-9：航空业温室气体排放在全球总排放中占比



来源：IPCC, Mitigation of Climate Change 2022, 2022.04

随着航空业未来的发展，其产生的温室气体排放绝对量和占比预计将不断增大。国际民航组织航空环境保护委员会 (ICAO's Committee on Aviation Environment Protection, CAEP) 在其 2022 年 3 月发布的国际民用航空二氧化碳减排长期理想目标 (LTAG) 可行性报告中，将其所做的航空业碳排放情景分析与 IPCC 的全球碳排放情景分析做了综合比较分析<sup>22</sup>。根据 IPCC 的分析，从 2020 年到 2050 年，将全球温升限制在 1.5°C 的累积剩余全球人为 CO<sub>2</sub> 排放量估计为 400Gt（概率为 67%），结合 CAEP 的分析，如果航空业不做出额外减排努力（以 2018 年的情况为参照），那么国际航空将产生的累积碳排放约占总数的 7.0%，如果采取不同程度的努力，将可以减少到 3.1%-5.6% 的范围。对于 2°C 的温升限制，剩余的允许碳排放量估计为 1150Gt（概率为 67%），不同情景下，国际航空所占比例分别为 2.4% 和 1.1%-2.0%（见表 1-5）。

表 I-5: 国际航空产生的累积碳排放在未来全球碳预算中占比

不同情景	国际航空累积 CO <sub>2</sub> 排放量 (Gt, 十亿吨)	两种温升情况下国际航空 CO <sub>2</sub> 排放占全球总体碳预算比例		国际航空累积 CO <sub>2</sub> 排放量 (Gt, 十亿吨)	两种温升情况下国际航空 CO <sub>2</sub> 排放占全球总体碳预算比例	
	2020-2050	1.5°C温升	2°C温升	2020-2070	1.5°C温升	2°C温升
ISO (不做额外努力的基准情景)	28	7.00%	2.40%	73	18.30%	6.30%
IS1	23	5.60%	2.00%	45	11.30%	3.90%
IS2	17	4.30%	1.50%	28	7.10%	2.50%
IS3	12	3.10%	1.10%	16	4.10%	1.40%

来源: ICAO, LTAG report Appendix R3, 2022.03

中国是全球最主要的航空市场之一，航空业务整体处于持续增长阶段，其产生的碳排放也不断上升（新冠疫情后碳排放随业务量下降而有所下降，见表 1-6）<sup>23</sup>。

与欧美等成熟市场以及其他新兴市场一样，中国航空业需要在业务增长的同时，应对降低碳排放的挑战。

表 I-6: 中国航空业 CO<sub>2</sub> 排放量 (2016-2021 年)

指标	单位	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
航空运输总周转量	亿吨公里	962.5	1083.1	1206.5	1292.7	798.5	856.8
航油 <sup>24</sup> 油耗	万吨 / 亿吨公里	2.93	2.93	2.87	2.85	3.16	3.09
航油消费量	万吨	2820	3173	3463	3684	2523	2647
CO <sub>2</sub> 排放量	万吨	8883	9996	10907	11605	7948	8339

备注: 根据历年中国民航行业发展统计公报所公开的航空运输总周转量和航油油耗数据计算航油消费量, 进而计算 CO<sub>2</sub> 排放量 (碳排放因子: 3.15kgCO<sub>2</sub>/kg)。

---

## 1.2.4 航空业制定了积极的碳减排计划

考虑到航空领域对全球碳排放的影响，航空业制定了自愿性的碳减排目标。2022年10月，ICAO各成员国在其第41届会员大会上确定了长期气候目标，即在2050年前实现国际航空业务的净零排放（net-zero carbon emissions）<sup>25,26</sup>。

截至2022年7月，在ICAO所有193个成员国中，已有133个国家自愿提交了国家行动计划（State Action Plan），这些国家市场代表全球RTK的98%<sup>27</sup>。多家航空公司也公布了其碳中和计划，飞机厂商和重要零配件供应商也发布了其支持行业减排的计划<sup>28</sup>。

2021年，IATA在其第77届年会上已批准了全球航空运输业于2050年实现净零碳排放的决议，这比之前提出的“2050年较2005年实现50%碳减排”的目标更进一步。为了实现这一目标，预计2050年航空业在满足100亿人次飞行需求的同时，当年需要减少至少18亿吨碳排放；从现在到2050年将累计减少212亿吨碳排放<sup>29</sup>。



© Photo by Harrison Qi on Unsplash

# 2

## 航空碳减排措施与 SAF角色

## 2.1 航空业碳减排的主要措施

航空业可以通过多种措施来减少碳排放，如开发新的飞机技术以提高能效或者能使用电力和氢能驱动的新机型，提高运营和基础设施的效率，以及使用可持续航空燃料（SAF）等。对于航空业自身无法完全消除的碳排放，还可通过碳抵消计划（offsetting）以及碳捕获、利用与封存（CCUS）（见表 2-1）<sup>30,31,32,33</sup>。

表 2-1: 航空业实现碳减排的主要措施

措施	具体行动举例	主要贡献阶段
新技术	<ul style="list-style-type: none"><li>飞机和发动机制造商持续提高机身和推进技术的效率，包括机体结构优化、采用轻质材料和新型燃烧室技术等；</li><li>开发纯电动飞机、混合动力飞机和氢能飞机，争取在 2030 年后可以拥有商用或试验阶段的飞机产品。</li></ul>	2010-2050
更高效的运营和基础设施	<ul style="list-style-type: none"><li>政府和空中导航服务提供商（ANSP）消除空中交通管理和空域基础设施的低效率；</li><li>制定更精确的飞行计划，减少飞行时间以减少飞机加油量；使飞机在最接近最佳高度的高度层飞行，最大限度提高燃油效率；</li><li>机场使用低排放技术车辆以及为航站楼安装太阳能等可再生能源设施等措施，进一步减少碳排放；</li><li>利用机场协作决策（A-CDM）减少机场拥堵产生的燃料使用，以提升能源效率。</li></ul>	2020-2050
使用可持续航空燃料（SAF）	<ul style="list-style-type: none"><li>燃油提供商提供大规模、具有成本竞争力的 SAF；</li><li>相关认证机构研究批准更多国际认可的 SAF 生产技术路线，加速 SAF 的应用和发展；</li><li>机场运营商提供所需的基础设施，以经济高效的方式供应 SAF。</li></ul>	2025-2050
碳抵消计划以及碳捕获、利用与封存	<ul style="list-style-type: none"><li>航司投资碳抵消计划，以抵消自身业务引起的碳排放；</li><li>航司为企业客户推出自愿碳抵消计划，以便企业客户抵消或减少与商务旅行相关的碳排放；</li><li>机场投资碳抵消计划，如机场碳认证计划（ACI），并建造“绿色认证”航站楼。</li></ul>	2025-2040

来源：IATA, ATAG, ICAO



表 2-2: 航空业实现 2050 年净零排放的关键时间点与行动

时间	行动	不同措施的贡献率					二氧化碳减排量 (亿吨)
		碳抵消	SAF	效率提升	CCUS	新技术(电动、氢能)	
2025	ICAO 批准国际航空的长期目标 (2022) ; 能源行业承诺至少生产 6 百万吨 SAF; 全面实施《巴黎协定》条款。	97%	2%	1%	-	-	3.81
2030	飞机 100% 使用 SAF, 各 ANSP 全面实施 ICAO 航空系统模块升级, 到 2030 年将燃油效率提高 0.3%。	93%	5%	2%	-	-	9.79
2035	先进技术使燃料消耗减少 30%, 提供面向地区市场的电动 / 氢能飞机 (50-100 座、30-90 分钟飞行时长)。	77.5%	17.5%	3%	2%	-	17.03
2040	新飞机的可行性, 例如用全尺寸工作原型展示的混合翼飞机等, 提供面向短途市场的电动 / 氢能飞机 (100-150 座、45-120 分钟飞行时长)。	44.5%	40%	3%	5%	7.5% (如氢能)	38.24
2045	部署满足新能源需求的必要基础设施 (低碳电动 / 氢能)。	24%	55%	3%	8%	10% (如氢能)	61.53
2050	商业用途的 SAF 年产量为 4490 亿升。	8%	65%	3%	11%	13% (如氢能)	81.64

来源: IATA, 2021

到 2050 年要实现净零排放，当年的 CO<sub>2</sub> 排放将需要比常规情景下减少 18 亿吨。其中，65% 的减排将通过使用 SAF 来实现；运用新的技术（如氢）将可贡献 13%；效率提升可贡献 3%；其余的可通过 CCUS (11%) 及碳抵消 (8%) 来实现<sup>39,40</sup>。

从减排角度来说，电动飞机或者氢能飞机（飞机由绿色能源产生的电能或氢能来驱动），将具有非常大减排潜力。不过，

该领域的技术突破可能还需要较长时间，如氢能飞机，除非有关键性的技术突破，否则即使到 2050 年也可能仅限于应用于中、短程航线，应用于长途航线的可能性很小。在整个未来 30 年间，SAF 都将是重要的替代现有化石燃料的低碳方案（见表 2-3）。

表 2-3: 低碳能源应用于不同航程航班的可能时间表

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
通勤航班 »9-19 座 » 低于 1 小时飞行 » 低于 1% 的航空业 CO <sub>2</sub> 排放	SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF
地区航班 »50-100 座 »30-90 分钟飞行 » 约 3% 的航空业 CO <sub>2</sub> 排放	SAF	SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF	电动飞机或 氢燃料电池 飞机 和 / 或 SAF
短途航班 »100-150 座 »45-120 分钟飞行 » 约 24% 的航空业 CO <sub>2</sub> 排放	SAF	SAF	SAF	SAF 及部分潜在 氢动力	氢动力 和 / 或 SAF	氢动力 和 / 或 SAF	氢动力 和 / 或 SAF
中途航班 »100-250 座 »60-150 分钟飞行 » 约 43% 的航空业 CO <sub>2</sub> 排放	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF 及部分潜在 氢动力	SAF 及部分潜在 氢动力	SAF 及部分潜在 氢动力
长途航班 »250 座以上 »150 分钟以上飞行 » 约 30% 的航空业 CO <sub>2</sub> 排放	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF	SAF

来源：Air Transport Action Group, Waypoint 2050, 2021<sup>41</sup>

对于航空业来说，由于绝大多数商业运营的飞机是由少数几家企业提供，在新技术开发和应用领域主要是依靠这些少数

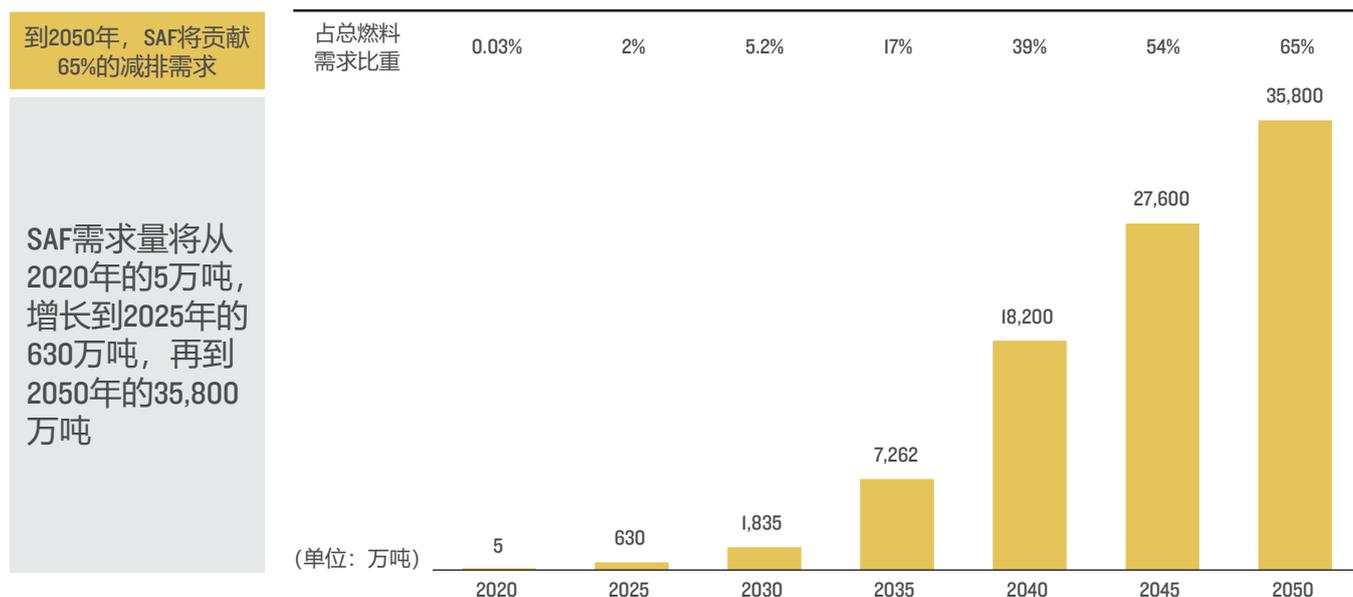
的飞机整机和关键零部件提供商的技术进步，因此从“可控”角度来说，应用 SAF 更成为各航空公司最主要的碳减排措施。

对于中国来说，航空业务量目前位居世界第二，未来业务量还有望快速增长，而中国市场的商用飞机大多数都是由国外企业提供，因此要实现“自主可控”的减排，SAF也将是关键所在。

## 2.3 需要大幅提高 SAF 的生产和消费

要使 SAF 的贡献充分发挥出来，就将意味着其应用量需从 2020 年的 6300 万升（约 5 万吨）和 2021 的 1 亿升（约 8 万吨），大幅提高到 2025 年的近 79 亿升（约 630 万吨），再到 2050 年的 4490 亿升（约 35830 万吨）<sup>42,43</sup>。

图 2-2: IATA 规划的 SAF 发展目标



来源: IATA, 2021

这种规模的增长对供应端来说是一个挑战，不过也并非不可实现。比如，在过去十年内，光伏和风电等可再生能源市场就实现了快速发展；今天，在电动汽车领域，也正在出现类似增长。

过去五年内，航空业在发展 SAF 方面已经取得了一定进展（见图 2-3）<sup>44,45</sup>。目前，已经有挪威奥斯陆机场、瑞典斯德哥尔摩机场、美国洛杉矶机场和西雅图机场等机场开始供应 SAF<sup>46</sup>。

图 2-3: 2021 年 SAF 市场发展进展

<b>360,000 次航班</b>	<b>每年 1 亿升</b>	<b>36 个国家出台了 SAF 相关政策</b>
2016: 500 架次	2016: 800 万升	2016: 仅 2 个国家
<b>7 条技术路线 *</b>	<b>平均二氧化碳排放减少 70%</b>	<b>130 亿美元的远期购买</b>
2016: 4 条路径	2016: 最多减少 60%	2016: 25 亿美元

备注: 1) 图中加粗数据为 IATA 统计的 2021 年 SAF 数据。2) 截至 2021 年 10 月, ASTM 已经核定 9 条技术路线 (7 条 ASTM D7566 及 2 条 ASTM D1655), 详见本报告附录。  
来源: IATA, 2021



© Photo by Hongjin Shaw on Unsplash

## SAF技术路线

截至 2021 年 10 月，被 ASTM 标准认定的 SAF 生产技术路线一共有 9 条，其中包括 ASTM D7566 认定的技术路线 7 条及 ASTM D1655 认定的技术路线 2 条<sup>47</sup>，本报告重点分析其中三类路线所生产的航空燃料，包括酯类和脂肪酸类加氢工艺（Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HEFA）、费托合成工艺（Gas+Fischer-Tropsch, FT 或 G+FT）、醇喷合成工艺（Alcohol to Jet, AtJ），以及一条尚未被其认定的路线，电转液工艺（Power to Liquid, PtL）。

这四类技术路线，是目前航空业普遍认为未来具有较大发展前景的路线，也是全球主要燃料提供商在重点关注的领域。

## 3.1 主要技术路线

### 3.1.1 HEFA

脂类和脂肪酸类加氢处理的技术路线 (HEFA) 是指将动植物油、废油或脂肪通过使用氢气 (氢化) 加工提炼成 SAF, 一般包括加氢脱氧、异构化、裂化和分馏等流程。在该过程的第一步, 通过加氢脱氧, 去除油品中存在的氧气。接下来, 直链石蜡分子被裂解并异构为喷气燃料。该过程与目前通过加氢处理以生产二代生物柴油的流程相似, 只是对长链碳分子的裂解更加严重。

适用于 HEFA 的原料较多, 主要以油脂为主, 包括动物油、植物油、餐饮废弃油等, 也包括藻类物质。其原料丰富且来源众多, 但利用非废弃的动物油或植物油生产航空燃料存在与人类争抢粮食等潜在的粮食安全问题。

目前全球范围内, 该技术路线已处于成熟水平, 绝大部分 SAF 的生产是采用该技术路线, 中国已经投产和预计投产的项目也均采用该路线。

### 3.1.2 G+FT

费托合成 (G+FT) 是指将含碳材料以合成气的形式分解为不同的单元构建, 再组合成 SAF 和其他燃料。合成气一般是通过气化生物质 (农林废弃物或城市有机固体废物等) 所产生。

迄今为止, 有两种 G+FT 工艺已通过 ASTM 认证, 一种是生产纯石蜡喷气燃料 (SPK), 另一种是带芳烃的化合物 (SPK/A)。

费托合成工艺本身比较成熟, 其最初是应用于将煤炭和天然气等化石原料转为液体燃料或其他化工品, 例如 Shell、Sasol 等公司均有此类项目, 中国一些企业的煤制油项目也运用了此类工艺。

考虑到可持续性, 利用 G+FT 工艺路线生产 SAF 产品, 要求原料不能是化石原料, 而应是生物质、城市固体废物或工业废物等。目前, 采用 G+FT 路线和 AtJ 路线的项目, 大多数均处于示范和中试阶段, Fulcrum 公司在美国采用 G+FT 路线的 SAF 项目已开始进入商业化规模运行, 香港国泰航空也参与了其早期投资。

### 3.1.3 AtJ

醇喷合成的路线 (AtJ) 是指将糖和淀粉类原料通过发酵产生醇类物质, 或通过其他途径获得醇类物质, 再通过脱水、低聚、加氢转化以及蒸馏转化为航空燃料。

制备醇类物质的来源有多种获取途径, 如玉米、甘蔗等农作物, 以及农林废弃物、含碳的工业尾气等。多样化的原料来源是该技术路线的一个优势, 不过在不同国家和地区, 原料可获得性存在较大差异。如在美国和巴西, 农作物原料较丰富, 而在中国, 此类原料的可用量则有限。该技术路线的整体成本随着生产醇类物质的技术途径不同而改变。

### 3.1.4 PtL

电转液路线 (PtL) 是一种通过电解水产生氢气, 再与 CO<sub>2</sub> 合成转化为碳氢化合物燃料的过程。目前合成 PtL 燃料有两种合成路径, 分别是费托合成法与甲醇合成法。

该技术路线目前还处于起步阶段, 尚未包含在 ASTM 认证体系中。不过, 该路线具有显著的碳减排潜力, 通过光伏和风能为电解水过程提供电力, 同时对从其他途径捕集来的 CO<sub>2</sub> 加以利用, 因而具有较好减排效益。理论上来说, 相比于传统航空煤油, PtL 航油在全生命周期内最高可实现 99%-100% 的减排。

## 3.2 应用现状

目前, 欧美是 SAF 主要的消费市场, 也是生产商集中的地区。在欧洲各主要生产商已有产能和公开的新产能中, 主要以 HEFA 路线为主; 新产能中, 包含部分 G+FT、AtJ 和 PtL 路线。美国市场的产能更多以 AtJ 路线为主。

在欧洲, 目前至少有 8 个已建工厂设施可以用来生产 SAF, 另有 20 多个新建或扩建项目正在规划中 (其中有 5 个为示范项目)。到 2025 年, 采用 HEFA 路线产能可达 720 万吨, G+FT 约 70 万吨, AtJ 约 40 万吨, PtL 约 20 万吨 (见表 3-1)。理论上, 如果有外部政策条件的强烈促进, 这些产能最高可年产 SAF 300 万吨/年; 如果政策信号不够明确, 那么这些产能可能会更多用于生产公路交通所用的生物燃料<sup>48</sup>。

表 3-1: 欧洲市场生产SAF的主要生产商与产量

	生产商	国家	厂址	技术路线	开始时间	燃料产量	百万吨 / 年
现有设施 / 扩建	Neste	芬兰	Porvoo	HEFA	-		0.4
	Neste	荷兰	Rotterdam	HEFA	-		1.3
	UPM	芬兰	Lappeenranta	HEFA	-		0.1
	Total Energies	法国	La Mede	HEFA	-		0.5
	Cepsa	西班牙	San Roque	HEFA	-		0.1
	Repsol**	西班牙	Cartagena	HEFA	2023		0.2
	ENI**	意大利	Venice	HEFA	2024		0.4
	Preem**	瑞典	Gothenburg	HEFA	2025		1.0
新项目	Enerkem	荷兰	Rotterdam	G+FT	2021		<0.1
	Colabitoil	瑞典	Norssundet	HEFA	2021		0.5
	ENI	意大利	Gela	HEFA	2021		0.5
	ST1	瑞典	Gothenburg	HEFA	2022		0.2
	Kaidi*	芬兰	Kemi	G+FT	2022		<0.1
	SkyNRG	荷兰	DSL01	HEFA	2023		0.1
	Sunfire	挪威	Nordic Blue	PtL	2023		<0.1
	Caphenia*	德国	Dresden	PtL	2023		<0.1
	TotalEnergies	法国	Grandpuits	HEFA	2024		0.2
	SkyNRG / LanzaTech	待定 ***	FLITE	AtJ	2024		0
	Preem	瑞典	Lysekil	HEFA	2024		0.7
	Neste	荷兰	Rotterdam	HEFA	2025		1.0
	Velocys	英国	Altalto	G+FT	2025		0.1
	LanzaTech	英国	Wales	AtJ	2025		0.4
	UPM	芬兰	Kotka	G+FT	2025		0.5
	Fulcrum	英国	Stanlow	G+FT	2025		0.1
Synkero	荷兰	Synkero ①	PtL	2027		0.1	
Engie*	法国	Normandy ②	PtL	待定		待定	

● HEFA ● G+FT ● PtL ● AtJ

来源: Analysis based on World Economic Forum (2020), "Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation" and press releases.

注意: 列表并不详尽。同时, 假设在新冠疫情发生前宣布的项目均推迟。

\* 试点 / 示范设施不计入未来的生产能力估计。

\*\* 扩展或重新配置现有站点。地图不包括共同处理设施 - 例如康菲石油公司在爱尔兰 Cork 的工厂和 Galp Energia 公司在葡萄牙 Sines 的工厂。

\*\*\*FLITE 财团的合资项目, 由 SkyNRG 和 LanzaTech 牵头, 由欧盟 H2020 计划提供资金支持。规划地点的最终位置尚未公布。

①由项目开发公司 Synkero 牵头, 与合作伙伴 SkyNRG、阿姆斯特丹港、皇家史基浦集团和荷兰皇家航空公司 (KLM) 合作。生产将从 2025 年起以较低的水平开始, 因此没有包括在文本后续的图表中

② Engie、赛峰、ADP、空中客车、Sunfire 和法航荷兰的合资项目。本年度的运营和预期产量尚未宣布。

在美国, 联邦政府计划在 2030 年能年产 30 亿加仑 SAF (约 906 万吨)。根据部分主要供应商已公开的产能规划, AtJ 路线占主体地位, 其次是 G+FT 和 HEFA。例如, LanzaJet 计划

到 2030 年, 采用 AtJ 路线实现年产 10 亿加仑 SAF (约 302 万吨) (见表 3-2)<sup>49</sup>。

表 3-2: 美国市场生产 SAF 的主要生产商与产量

生产商	国家	技术路线	年份	SAF 产量	百万吨 / 年
LanzaJet	美国	AtJ	2030		3.0
World Energy	美国	HEFA	2024		0.5
Gevo	美国	AtJ	2025		0.5
Fulcrum	美国	G+FT	2022		0.1
Velocys	美国	G+FT	-		0.9

● HEFA ● G+FT ● AtJ

来源: 美国政府网站

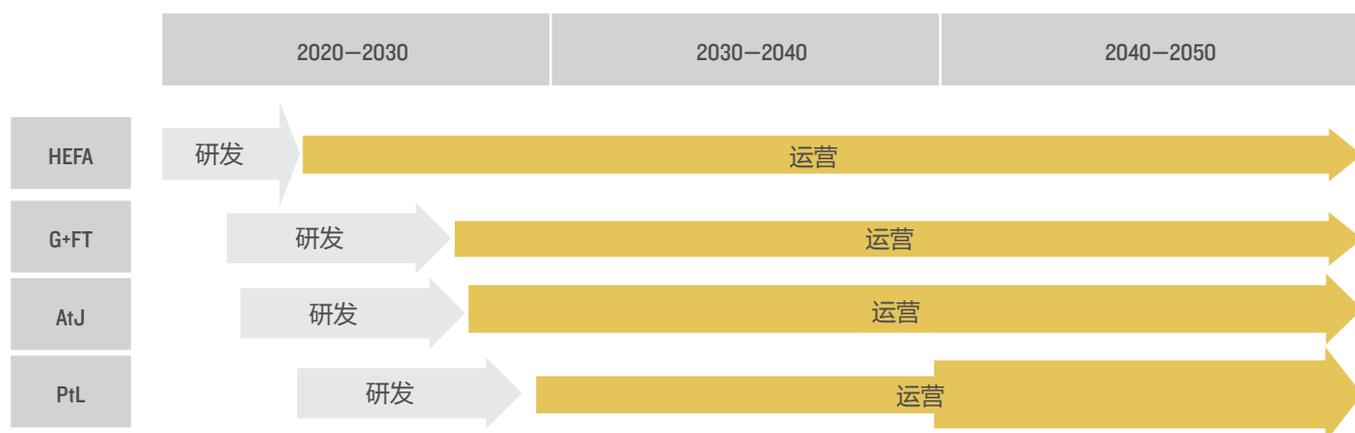
### 3.3 发展前景

四种技术路线中, HEFA 是目前唯一实现商业化的成熟路线, FT 和 AtJ 有望逐渐走出示范阶段进入商业化运营, PtL 还处在初期试验阶段。

HEFA 路线在 2030 年前应该会持续占据市场主体地位, 不过考虑到其原料供应有一定限制, 整体产能不会出现迅猛增长。FT 和 AtJ 路线, 随着技术日益成熟, 成本持续下降, 加之其原料可选项较多 (农林废弃物、城市固体废物、工业废弃等), 在 2030-2050 年期间的市场份额有望不断提升。

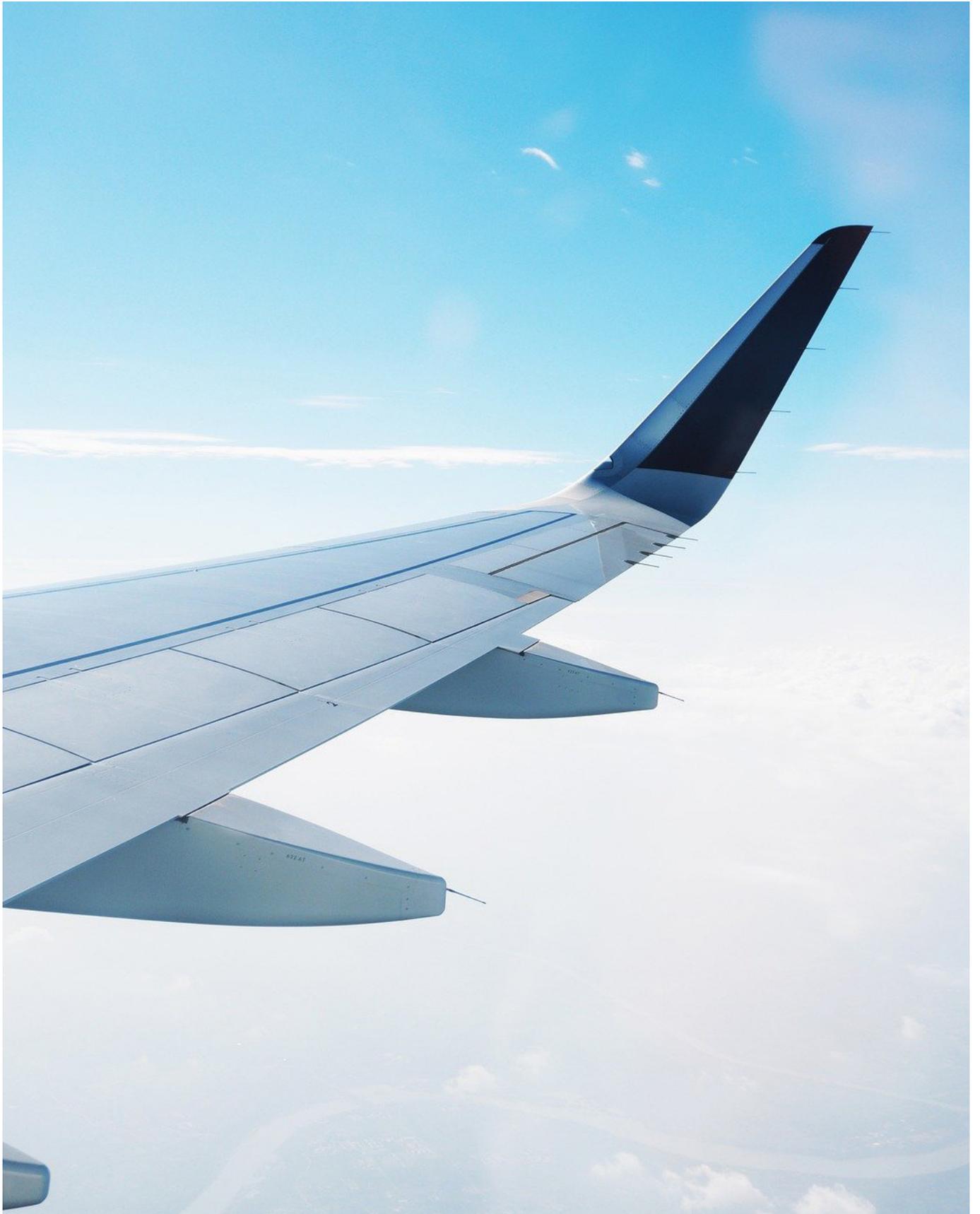
PtL 路线虽然离完全商业化尚远, 不过相对于传统航油, 其减排潜力显著, 且几乎不用担心原料问题, 因此在发展初期如获得政策支持, 并通过市场规模扩大和技术突破, 实现成本的大幅下降, 那么, 其将成为中长期最主要的技术路线 (见图 3-1)。

图 3-1: 2020-2050 年不同 SAF 技术路线发展预期



备注: 1) 运营阶段的线条粗细简示意不同路线的市场主次地位;

2) 评估是基于 ATAG、IATA、WEF 等机构的相关研究做出。



© Photo by Bettstein on Pixabay

# 4

## 中国SAF管理机制与 相关政策法规

## 4.1 法规与政策

中国对航空油料质量的管理采用行政许可的方式。2004年7月,《国务院对确需保留的行政审批项目设定行政许可的决定》设立“民用航空油料供应商适航批准、油料测试单位批准”,由中国民航局负责实施。2005年4月,中国民航局颁布《民用航空油料适航管理规定》(CCAR-55);2006年开始,民航适航审定部门对航油供应企业和检测单位开展适航审定<sup>50</sup>;2010年3月,中国民用航空航油航化适航审定中心成立。

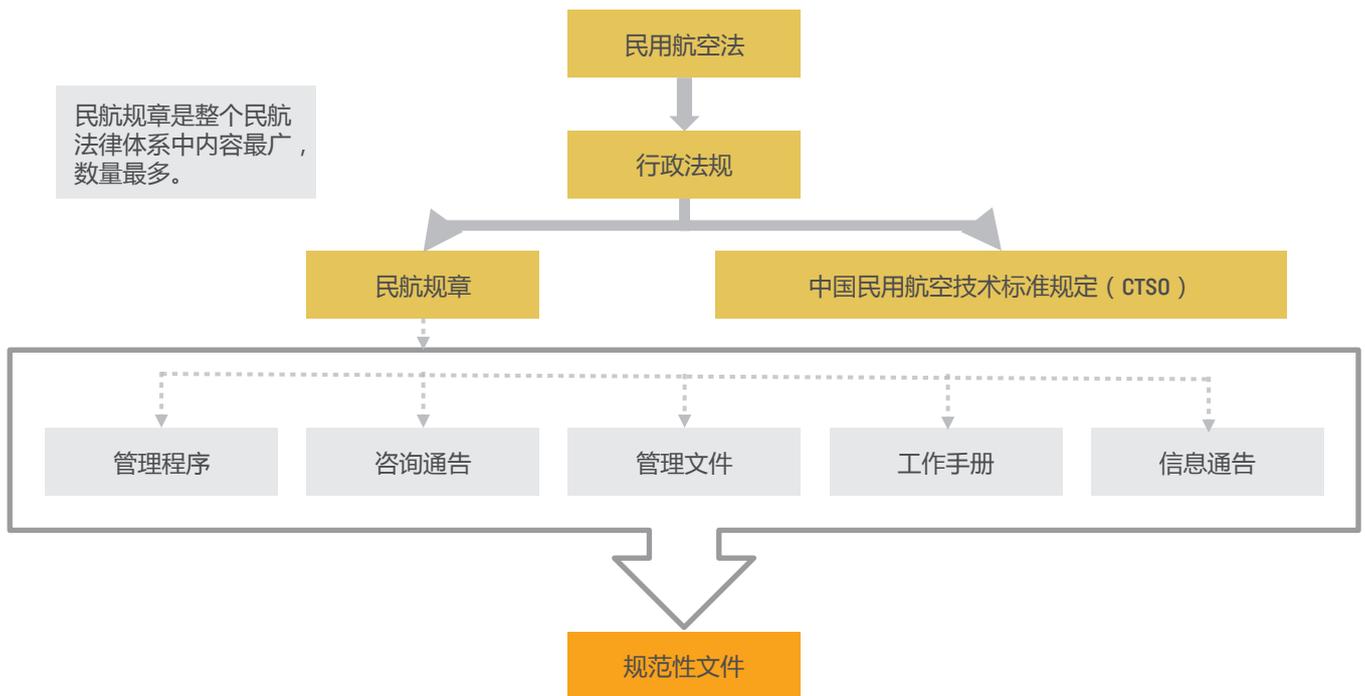
### 4.1.1 法规体系

中国民航法规体系共分为法律、行政法规和民航规章三个层次。第一层次为《中华人民共和国民用航空法》,由全国人大常委会通过由国家主席签署主席令发布,是中国境内组织实

施飞行和规范一切飞行活动的基本法律,也是各航空部门制订有关条令、条例及规章制度的依据。第二层次为行政法规层面,国务院通过由总理以国务院令发布或授权中国民航局发布的民用航空行政法规,如:《中华人民共和国民用航空器适航管理条例》,通过行政许可手段直接批准航空油料。第三层次是民航规章层面,中国民用航空局作为中国民用航空主管部门依据《中华人民共和国民用航空法》和《国际民用航空公约》制定和发布《中国民用航空规章》(CCAR)。目前,中国民航管理的航司和其他航空企业全部按照CCAR的要求来建立和健全各自的管理体系。

2005年4月,中国民航局适航部门制定并发布了《民用航空油料适航管理规定》(CCAR-55),正式规范了航空油料产品的适航管理<sup>51</sup>。包括2007年2月发布的《民用航空燃料供应企业适航审定程序》(AP-55-01)在内的一系列适航审定程序,进一步明确了对于航空油料适航审定的程序。

图4-1: 中国民用航空法律法规体系



## 4.1.2 相关政策

中国民航局从 2010 年开始加大对 SAF 研发应用的重视程度，将 SAF 作为行业脱碳重要战略储备。近十年来逐步建立协调机制、加强标准建设、支持国内航司开展验证飞行和商业飞行，以及积极参与国际合作。近期，国务院和中国民航局颁布的相关政策中也涉及要推进 SAF 的示范和商业应用。

在生物柴油领域，中国政府比较鼓励生物柴油产业发展，先后出台了相关的法律、规划、产业政策、财税政策以及产品标准。尤其是全国人大在 2005 年发布的《可再生能源法》和国家能源局于 2014 年发布的《生物柴油产业发展政策》，对引导和推动中国生物柴油产业的发展发挥了重要作用<sup>52</sup>。此外，国家财政部和国家税务总局也多次发文，明确生物柴油税收优惠政策。

表 4-1: 中国涉及 SAF 推广应用的相关政策

发布时间	发布机关	政策名称	主要内容
2021 年 10 月	国务院	《2030 年前碳达峰行动方案》	大力推进先进生物液体燃料、SAF 等替代传统燃油，提升终端燃油产品能效。
2022 年 1 月	民航局	《“十四五”民航绿色发展专项规划》	提出推动 SAF 商业应用取得突破，力争 2025 年当年 SAF 消费量达到 2 万吨以上，“十四五”期间消费量累计达到 5 万吨；同时也针对节油减排提出预期性目标：“十四五”期间，运输航空机队吨公里油耗降至 0.293 千克，运输航空吨公里 CO <sub>2</sub> 排放降至 0.886 千克 <sup>53 54</sup> 。
2022 年 5 月	国家发改委	《“十四五”生物经济发展规划》	《规划》中指出，在有条件的地区开展生物柴油推广试点，推进生物航空燃料示范应用 <sup>55</sup> 。
2022 年 6 月	国家发改委、能源局等	《“十四五”可再生能源发展规划》	提出大力发展非粮生物质液体燃料。支持生物柴油、生物航空煤油等领域先进技术装备研发和推广使用。

来源：根据政府部门发布政策整理。

表 4-2: 中国生物柴油相关政策

国家级政策			
发布时间	发布机关	政策名称	主要内容
2005 年 2 月	全国人大	《中华人民共和国可再生能源法》	国家鼓励生产和利用生物液体燃料。石油销售企业应当按照国务院能源主管部门或者省级人民政府的规定，将符合国家标准的生物液体燃料纳入其燃料销售体系 <sup>56</sup> 。
2008 年 12 月	财政部、国家税务总局	《关于资源综合利用及其他产品增值税政策的通知》(财税〔2008〕156 号)	对销售自产的综合利用生物柴油实行增值税先征后退政策。
2012 年 12 月	国务院	《生物产业发展规划》	实施生物柴油商业化示范工程，加快生物柴油制备用催化剂开发。
2013 年 2 月	国家发改委	《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》	支持餐厨废弃物制成生物柴油等资源化产品。
2014 年 5 月	国家能源局、国家发改委等	《关于印发能源行业加强大气污染防治工作方案的通知》	继续推动非粮燃料乙醇试点、生物柴油等产业化示范。
2014 年 11 月	国家能源局	《生物柴油产业发展政策》	对生物柴油产业政策目标、发展规划、产业布局、行业准入、生产供应、推广应用、技术创新、政策措施均作出了规范。
2015 年 6 月	财政部、国家税务总局	《关于印发〈资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录〉的通知》(财税〔2015〕78 号)	以废弃动植物油为原料生产生物柴油等实行增值税即征即退 70%。
2016 年 10 月	国家能源局	《生物质能发展“十三五”规划》	建立健全生物柴油产品标准体系，开展市场封闭推广示范，推进生物柴油在交通领域的应用。
2017 年 1 月	国家发改委	《“十三五”生物产业发展规划》	完善原料供应体系，有序开发利用废弃油脂资源和非食用油料资源发展生物柴油。
2022 年 5 月	国家发改委	《“十四五”生物经济发展规划》	《规划》中指出，在有条件的地区开展生物柴油推广试点，推进生物航空燃料示范应用。 <sup>57</sup>

## 国家级政策

发布时间	发布机关	政策名称	主要内容
------	------	------	------

2022年6月	国家发改委、能源局等	《“十四五”可再生能源发展规划》	提出大力发展非粮生物质液体燃料。支持生物柴油、生物航空煤油等领域先进技术装备研发和推广使用。
---------	------------	------------------	--

## 地方级政策

2018年5月	上海市人民政府	《上海市支持餐厨废弃油脂制生物柴油推广应用暂行管理办法》	支持餐厨废弃油脂制生物柴油（B5）在上海市加油站推广应用，并设置应急托底保障机制、鼓励源头补偿。
---------	---------	------------------------------	--

来源：政府部门发布的政策和现行标准、公开信息以及前瞻产业研究院整理的信息。

## 4.2 适航审定

### 4.2.1 管理体系

中国适航管理体系已经基本形成了中国民航局适航审定司和地区管理局适航审定处两级局方管理，由委任代表、技术中心、审定中心、科研机构、培训机构作为支撑的管理体系。<sup>58</sup>

在生物航油的适航审定方面，中国与欧美的管理体系有所不同。欧洲和美国将航空油料作为飞机和发动机型号设计的一部分进行批准，同时参与 ASTM 等标准组织制定产品和质量控制标准，并依托 IATA、美国航司联盟（A4A）以及联合检查集团（JIG）等协会对航油生产和供应环节进行检查，形成了协会定标、企业参与、局方监督的良性约束机制，确保油料质量安全。通过对飞机或发动机的型号进行审定，将批准的生物燃料技术标准列入飞机或发动机的型号数据清单中（TCDS），在使用时则按照飞机和发动机型号数据清单来选用合适的生物燃料<sup>59</sup>。由于中国并没有类似于 ASTM 的行业协会，在对“中石化1号生物航煤”的审定中，中国采取了将生物航油作为航空器上使用最频繁的“零部件”的一种，参考零部件的审定，采用技术标准规定项目批准书（CTSOA）的形式开展审定<sup>60</sup>。同时对生物航油设计、生产、储运和加注全链条的质量控制进行管理。

通过“中石化1号生物航煤”这一里程碑事件，可持续航空燃料（SAF）的适航审定管理体系已经基本确立。2014年2月，中石化镇海炼化获得中国民航局颁发的1号生物航煤技术标准规定项目批准书（CTSOA），即“适航牌照”。标志着国产航空生物燃料正式获得适航批准，可投入商业应用。为受理此次审定审批，2012年2月中国民航局适航司便成立了包括适航、发动机、石油炼制以及航油等专业的专家组成的“1号生物航煤”适航审定委员会（FCB），以及航油航化适航审定中心专家组成的审查组<sup>61</sup>。

### 4.2.2 审定流程

航空生物燃料的适航审定包括设计批准、生产审定和证后监管三部分。其中，设计评审是对燃料性能、工艺等进行评审，确认生物航油的生产工艺、性能指标等符合 CTSO-2C701 的要求；生产审定也参照 CTSO-2C701 进行资料评审和现场符合性评审；证后监管是指项目批准书颁发后，中国民航局将在批准书持有人单位授权委任的航油航化代表负责对该项目批准书持有人进行日常管理，其职责和权限应符合 CCAR-183<sup>62</sup> 和有关程序的规定。

中国做适航审定的依据来自规章程序和技术标准规定。一般来说，生产企业先在 AMOS 系统提交申请，由中国民航局

适航司受理后，授权中国民用航空航油航化适航审定中心（简称航油航化审定中心）成立审查组。关于生物航油的审定，通过审定的生物航油生产企业会被颁发 CTSOA 证件。对生物航油生产企业的审定，一般只针对已经达到产业化规模的工艺，并不包括实验室研发或小试工艺，该工艺并不限于 ASTM 已经批准过的工艺，如：HEFA、FT 和 ATJ 等，审定时长也视该工艺是否为 ASTM D7566 认证过的 7 类工艺而定。

2014 年中国民航局向中国石化镇海炼化颁发 1 号生物航油 CTSOA 证件前，基于 CTSO-2C701 对生物航油进行历时约两年的审查。审查包括设计和生产两个部分，评审和验证的内容包括：生产工艺、质量体系、产品理化性能、特定性能、材料相容性、发动机台架试验以及试飞验证<sup>63</sup>。

### 4.2.3 相关标准

中国目前已经逐步建立了生物航油生产工艺和性能方面的标准和认证体系，生物航油目前是作为航空器上的“零部件”，接受相关的适航审定。在可持续性标准方面，中国目前没有自己的标准体系，航油航化审定中心以及一些学术机构在开展一些可持续性认证标准及方法的研究。

2011 年，由波音与中国国航合作推动的 SAF 用于客机首次验证试飞取得成功。试飞前，产品适航审定由中国民航局航空器适航审定司主持进行，其运输、存储及加注依据中国民航规章 (China Civil Aviation Regulations, 简称 CCAR) 第 55 部《民用航空油料适航管理规定》中相关条例执行，具体标准主要根据中国民用航空行业标准 MH/T 6005《民用航空器加油规范》、MH/T 6020《民用航空油料质量控制和操作程序》等。

2013 年，民航局制定《含合成烃民用航空喷气燃料》(CTSO-2C701) 标准<sup>64</sup>。标准中提出采用技术标准规定批准书 (CTSOA) 的形式对生物航油进行批准，包括 HEFA 和 FT 两种工艺路线。“中国石化 1 号生物航油”即采用该形式取得审定。

2018 年，对《3 号喷气燃料》(GB6537) 标准进行修订，同时增加了附录 B 及附录 C 分别列出采用 FT-SPK 方法及 HEFA-SPK 方法的技术要求及试验方法。

2022 年，航油航化审定中心协助中国民航局适航司对

CTSO-2C701 进行了修订。新修订的 CTSO-2C701a 包含了 ASTM D7566 中的 7 种工艺，同时也可参考 ASTM D4054 开展全流程审定 (Qualification process) 和优化审定 (Fast track)。

目前，生物航油生产商如需申请适航审定，需要通过 AMOS 系统<sup>65</sup> 进行申请。航油航化审定中心参照 CTSO-2C701a 进行审定，获得批准的生物航油工艺可取得 CTSOA 证件。

按照目前要求，生物航油必须与传统航油掺混后进行使用。生物航油在与传统航油进行掺混时，组分的体积分数不高于 50% (适用于 HEFA 和 FT 工艺)。待审定的航油，如果是要在中国境内实际使用，那么需要与符合 GB 6537 的 3 号喷气燃料进行掺混后进行审定；如果是希望在其他国家使用，则需与符合 ASTM D1655 或 DEF STAN91-91 的 Jet A-1 进行掺混后再进行审定。

表 4-3: 中国生物航油相关标准

标准	制定背景与主要内容
《含合成烃的民用航空喷气燃料》(CTSO-2C701a)	为了创建自主认定航空替代燃料的审定办法, 对照国外适航局对替代燃料的管理流程及标准 ASTM D4054 和 ASTM D7566, 按照中国适航局依据符合性验证方法, 民航局制定了《含合成烃民用航空喷气燃料》(CTSO-2C701) 标准。标准中提出了采用技术标准规定批准书 (CTSOA) 的形式对生物航油进行批准。在比较国内外生物航油管理、标准及验证流程技术基础上, 总结了含合成烃民用航空喷气燃料性能验证技术、发动机台架和试飞要求, 以及依据此验证技术进行了“中国石化 1 号生物航油”的审定, 为形成一套有别于其他国家的特定的审定方法提供了技术支持。
《含合成烃航空喷气燃料技术要求》(MH/T 6106-2014)	2014 年, 按照 GB/T1.1-2009 给出的规则起草, 由中国民用航空局适航审定司批准立项、中国民航科学技术研究院归口、中国民用航空局第二研究生起草的《含合成烃航空喷气燃料技术要求》(MH/T 6106-2014) 中, 给出了含合成烃航空涡轮燃料的技术要求, 对其组分、挥发性、流动性、燃烧、腐蚀等基本要求及性能、添加剂等指标制定规范。此外, 对由费托合成加氢石蜡煤油馏分、脂和脂肪酸加氢石蜡煤油馏分方法的范围、材料与制作、技术要求制定规范。
《3 号喷气燃料》(GB6537-2018)	由国家能源局提出并归口, 国家市场监督管理总局及中国国际标准化管理委员会于 2018 年月 8 发布, 2019 年 2 月 1 日起开始实施的《3 号喷气燃料》(GB6537-2018) 标准规定了由天然原油或其馏分油加工而成的 3 号喷气燃料以及其于合成烃煤油馏分调和而成的 3 号喷气燃料的要求和实验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存及安全, 适用于航空涡轮发动机用 3 号喷气燃料。附录 B 及附录 C 分别列出采用 FT-SPK 方法及 HEFA-SPK 方法的技术要求及试验方法。

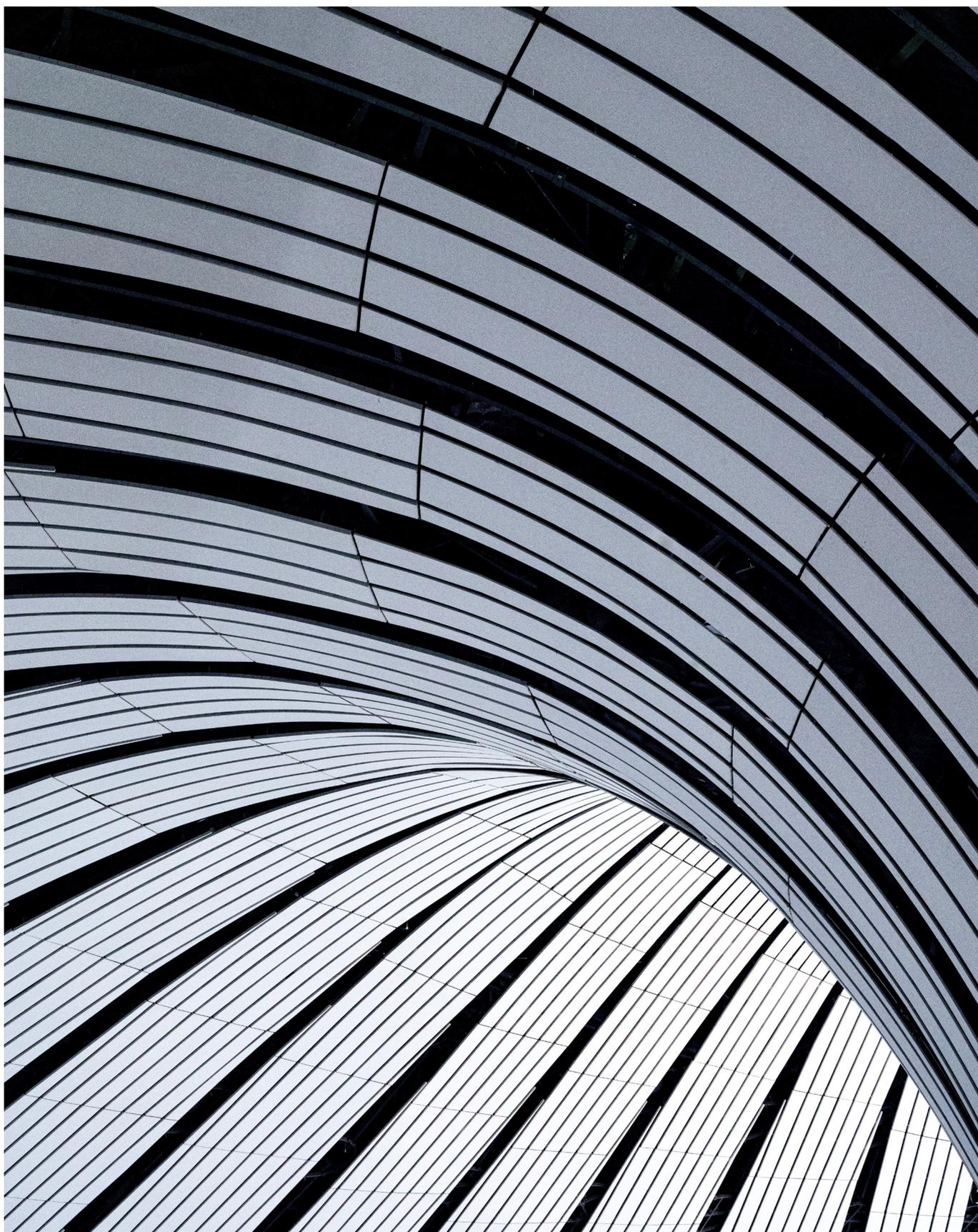
在生物柴油产品标准方面, 目前有《B5 柴油》和《车用柴油》(第六阶段) 国家标准<sup>66</sup>。同时, 相关行业标准, 如《烃基生物柴油》(NB/T 10897-2021) 和《生物柴油 (BD100) 原料》(NB/T 13007-2021), 也已于 2021 年 12 月获得国家能源局批准,

2022 年 6 月 22 日正式实施<sup>67</sup>。

中国市场生产的生物柴油产品, 在出口到境外市场时, 需要取得目的地所要求的可持续性认证, 如 RSB、ISCC 等认证。

表 4-4: 中国生物柴油相关标准

发布时间	发布机关	标准名称	主要内容
2016 年 12 月	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会	《车用柴油》(第六阶段) (GB 19147-2016)	作为国家强制性质量标准, 《车用柴油》标准允许添加不超过 1% 的 BD100 生物柴油。
2017 年 9 月	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会	《B5 柴油》(GB 25199-2017)	将生物柴油相关的 2 个产品国家标准整合为 1 个国家强制标准。 《B5 柴油》标准要求添加 1 ~ 5% 的 BD100 生物柴油。



© Photo by linying Ju on Unsplash

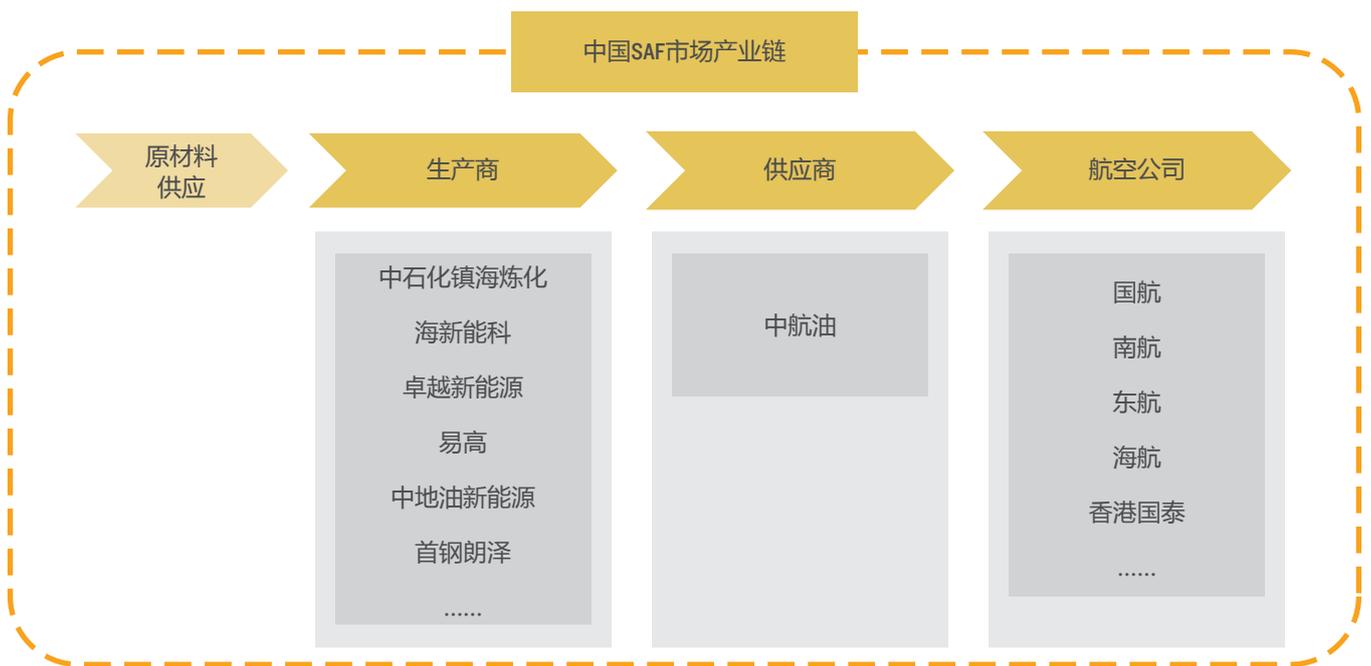
# 5

## 中国SAF市场主要参与方

## 5.1 产业链概况

中国 SAF 市场整体处于初期阶段，围绕其生产、销售、使用，以及监管等环节的运营模式，基本与传统航油一致。相较传统航油，SAF 原料的可选择性更大，因此生产商和原材料供应方也更加多元化（见图 5-1）。

图 5-1: 中国 SAF 市场产业链



## 5.2 生产商

目前中国具备 SAF 实际产能的企业较少，但与欧美市场类似，生产生物柴油（尤其是羟基生物柴油，HVO）的企业一般也都具备转产 SAF 的能力，可以根据市场需求调整产品线<sup>68</sup>。近几年，由于市场需求增长，尤其是来自欧洲市场的需求，中国生物柴油供应市场进入快速发展期，产能和产量不断扩大。预估 2021 年全年生物柴油产量 130 万吨，其中出口超过 120 万吨<sup>69</sup>。

截至 2022 年 6 月，中国 HVO 的在运营产能和规划产能总计约 235 万吨/年。在亚洲其他地区，Pertamina、Neste

等企业也有可观产能，如 Neste 在新加坡的一个 HVO 生产基地，规划产能就达到 260 万吨/年，Pertamina 在印尼投建的 HVO 产能也超过 100 万吨/年<sup>70</sup>。

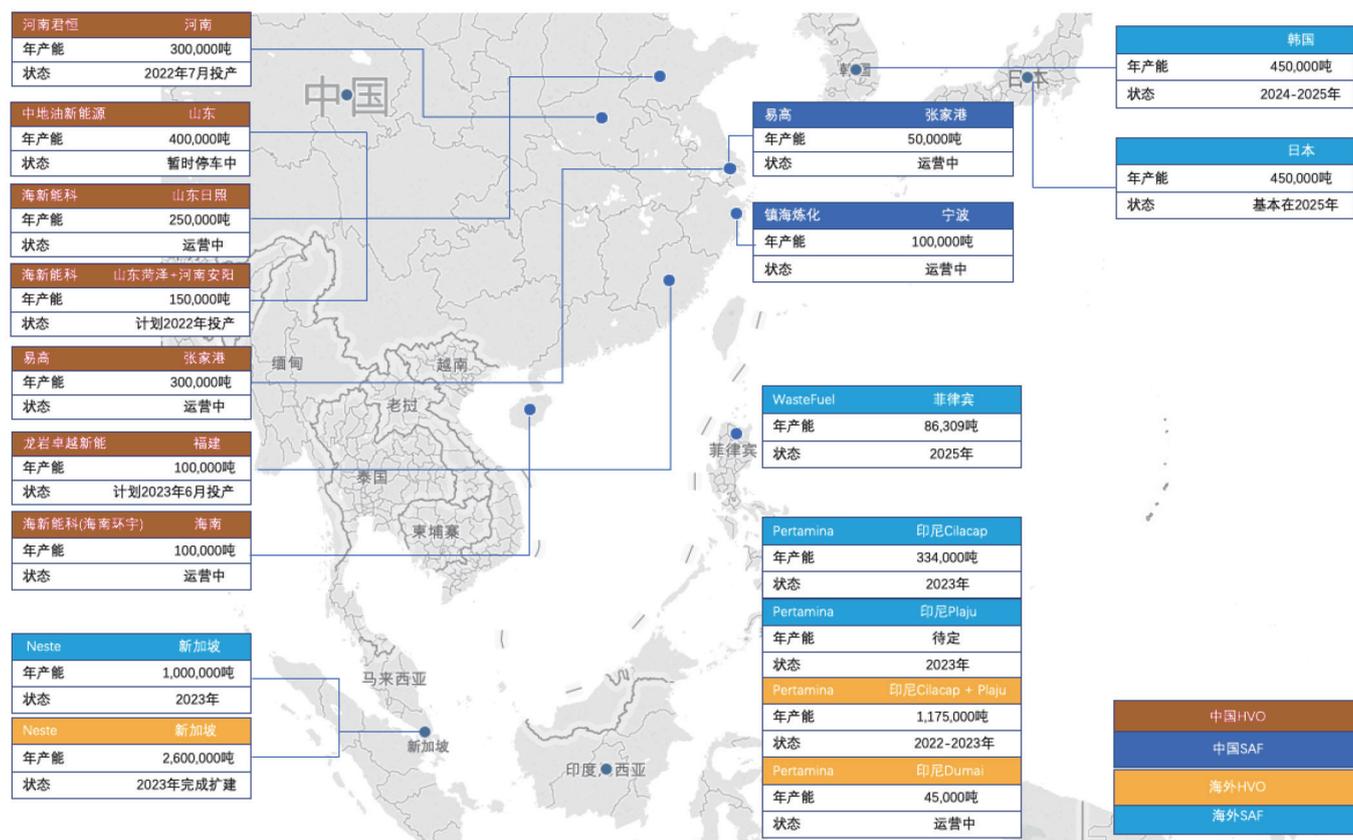
中国 SAF 的在运营产能和规划产能总计约 15 万吨/年，涉及 2 个工厂和生产设施。

目前，中国 SAF 与 HVO 市场比较活跃的企业有中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司、易高环保投资有限公司、北京海新能源科技股份有限公司<sup>71</sup>、中地油新能源（山东）有限公司、龙岩卓越新能源股份有限公司、北京首钢朗泽新能源科技有限公司、石家庄常佑生物能源有限公司等。其中易高、

镇海炼化已在进行小规模 SAF 试产；海新能科、中地油新能源等企业有计划新建 SAF 产能或者改扩建现有生物柴油产能用以生产 SAF；首钢朗泽在推动利用富含 CO 和 CO<sub>2</sub> 的工业尾气通过生物发酵直接转化为生物乙醇技术的商业化生产，并计划进一步用乙醇试产生物柴油或 SAF；卓越新能等企业也在生

产一代生物柴油的基础上，进一步新建 HVO 产能。另外，杭州能源工程技术有限公司等企业参与了中国早期的 SAF 研发项目；中国科学院广州能源研究所等科研单位也在积极研究从农林废弃物中制取 SAF 的工艺路线<sup>72</sup>。

图 5-2: 中国及亚洲其他地区部分 HVO 与 SAF 产能分布



来源: Argus, 专家访谈

## 5.2.1 镇海炼化

中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司（简称镇海炼化）目前是中国最大的炼化一体化企业，拥有 2700 万吨 / 年原油加工能力，220 万吨 / 年乙烯生产能力；另有管理码头吞吐能力逾 8000 万吨 / 年、罐储能力逾 1200 万立方米。

镇海炼化是大型油气企业涉足 SAF 的具体案例。中国石油化工股份有限公司（中国石化）既是中国最大的传统航油生产商，同时也是中国最早开展 SAF 系统性研发和生产的企业。在中国石化内部，镇海炼化不仅每年供应约 200 万吨传统航油（在新冠疫情前），同时也是中国石化探索 SAF 的实施主体。

中国石化 2009 年启动 SAF 研发，其后数年开展了一些

示范性生产，整体规模有限。近几年，随着传统油气企业逐渐加大转型力度，中国石化也加快了向低碳领域的转型探索，比如开发太阳能、加大电动车充电桩布局、开发氢能等；其中，进一步推动 SAF 也是其探索之一。

镇海炼化目前的 SAF 生产装置，每年可处理原料 10 万吨。与 bp、Shell 等大型跨国石油公司相似，中国石化在 SAF 领域整体还处于小规模探索阶段，未来是否会进一步加大投入，还需视市场需求而定。

除涉足 SAF 外，中国石化还在上海等地继续供应生物柴油，其 B5 生物柴油调和能力约 40 万吨 / 年，主要供应上海市 240 余家加油站。在乙醇汽油领域，其 2020 年销售约 1500 万吨<sup>73</sup>。

表 5-1: 镇海炼化 SAF 及相关业务领域工作进展

时间	进展
2009 年	<ul style="list-style-type: none"> <li>中石化启动 SAF 研发工作。</li> </ul>
2011 年	<ul style="list-style-type: none"> <li>2011 年 9 月，镇海炼化在下属生产基地改造建成一套 2 万吨 / 年的 SAF 工业装置<sup>74</sup>。</li> <li>2011 年 12 月，正式开工生产；此后，该装置前后共生产 100 多吨 SAF。</li> </ul>
2013 年 4 月 24 日	<ul style="list-style-type: none"> <li>镇海炼化提供的生物航油在上海虹桥机场由东航完成技术试飞。</li> </ul>
2011 年—2014 年	<ul style="list-style-type: none"> <li>中国石化向中国民用航空局提交生物航油及其调和产品的适航审定申请，并最终获得适航审定，即“中国石化 1 号生物航油”。</li> <li>此申请涉及的生物航油的原料为棕榈油和餐饮废油。</li> </ul>
2015 年 3 月 21 日	<ul style="list-style-type: none"> <li>“中国石化 1 号生物航油”用于海南航空由上海至北京的商业飞行。</li> </ul>
2017 年 11 月 22 日	<ul style="list-style-type: none"> <li>“中国石化 1 号生物航油”用于海南航空由北京至美国芝加哥的跨洋商业载客飞行。</li> </ul>
2017 年—2022 年	<ul style="list-style-type: none"> <li>2017 年，杭州炼油厂拆迁。</li> <li>2017 年，镇海炼化新建 SAF 工业装置，原料采用餐饮废油，可处理原料 10 万吨 / 年。</li> <li>2021 年建设完工，2022 年年中已正式投产。</li> <li>采用 HEFA 技术路线。</li> </ul>
2021 年—2022 年	<ul style="list-style-type: none"> <li>重新向中国民用航空局提交生物航油适航审定申请，并于 2022 年下半年获得审定结果。</li> </ul>

来源：镇海炼化，专家访谈

## 5.2.2 易高

易高环保投资有限公司（简称易高）是香港中华煤气集团的全资附属公司，成立于 2000 年，其业务主要集中于在中国开发新能源项目，包括资源开发、煤基化工、煤层气液化、车用清洁燃料等；此外，易高的业务和设施还包括在香港的液化石油气加气站、垃圾堆填区沼气利用、以及香港国际机场航油储存库等<sup>75</sup>。

易高是中国石化之外另一个大型传统能源企业涉足 SAF 领域的案例。其母公司香港中华煤气集团以经营城市燃气为其主业，业务范围以香港和内地为主。

截至 2021 年底，香港中华煤气集团（包括其附属公司，如港华智慧能源有限公司、易高等）已于 28 个省级地区取得

共 514 个项目，业务范围覆盖天然气上、中、下游、环保能源、智慧能源、水务、城市废物处理等。近些年，香港中华煤气集团加大向低碳产业的转型。其未来整体发展策略是以城市燃气业务为核心，同时加速发展可再生能源业务。一方面以分布式光伏发电和数字化管理为主导发展智慧能源，另一方面是积极研发以农耕废弃物生产生物质燃料、生物质化工产品及物料的技术，并形成商业化规模；此外，拓展污水和餐厨垃圾和城市废物处理业务<sup>76</sup>。

2021 年，香港中华煤气集团在香港共供应航空燃料约 300 万吨，在内地生产 HVO 约 18 万吨。其 2021 年 HVO 销售额达到 26 亿港元，显著高于 2020 年的 9.6 亿港元；这也是其燃气主营业务（包括燃气销售、报装、燃具销售和维修）之外最大的收入来源，超过了其水费有关收入以及石油、煤炭等化石能源的销售收入<sup>77,78</sup>。

表 5-2: 易高 SAF 及相关业务领域工作进展

项目类别	地点	所占股权	估计项目成本 (亿元人民币)	项目介绍及进展
HVO/SAF	江苏省 张家港市	90%	9.35	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用非食用油脂生产 HVO，获得“国际可持续性认证”（ISCC）并符合欧盟定义的“先进生物燃料”，所产 HVO 以欧洲市场为主。</li> <li>2018 年开始项目第一期工程，截至 2019 年年中，共产出约 2 万吨 HVO，出口销售至欧洲市场。</li> <li>2020 年完成项目第二期工程，设计产能 25 万吨/年 HVO；2021 年提升产能至约 30 万吨/年，2021 年实际生产约 18 万吨 HVO。</li> <li>2021 年，把 SAF 技术落实到具体生产<sup>79</sup>。</li> </ul>
厨余处理	江苏省 苏州市	55%	4.43	<ul style="list-style-type: none"> <li>将厨余等有机废物转化为天然气。</li> <li>该项目第二期工程于 2021 年 8 月投入运营，每天可将 800 吨废物转化为天然气。2021 年，处理超过 160,000 吨从该项目附近餐饮企业回收处理的有机废物。</li> <li>其位于安徽省铜陵市的厨余利用项目每天可处理 100 吨厨余。该项目的第二期厂房将于 2023 年投入运营，厨余处理能力将增加一倍。</li> <li>其位于江苏省常州市新北区厨余处理项目将于 2023 年底竣工，预计每日处理能力达 300 吨。</li> </ul>

项目类别	地点	所占股权	估计项目成本 (亿元人民币)	项目介绍及进展
<p>农耕废弃物 转化为环保 化工产品和 纸浆</p>	<p>河北省 唐山市</p>	90%	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>利用水解技术把秸秆和粟米芯等农耕废物进行有效分解，主要产品为纤维素乙醇（属于欧盟定义的“先进生物燃料”），也可生产纤维纸浆及糠醛（作为可再生能源基化学品）。</li> <li>目前在河北省有两个试验项目，一个在唐山，另一个在沧州，各厂房每年可处理 24 万吨原料。2021 年，唐山厂房开始按市场价格销售糠醛，沧州厂房已于 2021 年 9 月竣工。</li> </ul>

来源：根据“香港中华煤气有限公司 2021 年年报”及“香港中华煤气有限公司 2021 年环境社会及管治报告”整理，2022

此外，为了把与生物质利用业务及相关人才、专利技术、厂房、科研设施和资产进行整合，香港中华煤气集团还在 2021 年底成立了一个业务平台 EcoCeres Inc. (怡斯莱)，以此平台引进投资者共同打造绿色生物质产业。该平台已于 2021 年 12 月和 2022 年 2 月从私募基金 Kerogen Capital 成功融资 1.08 亿美元。

综合来看，易高在推动 SAF 业务方面具有一定的基础，主要体现在：

- 易高的母公司 - 香港中华煤气集团已把低碳转型和新能源作为整个集团的战略之一，这为其生物燃料业务发展确定了基调和方向。
- 其已经具有良好的 HVO 研发和生产基础，可以便利地向 SAF 转换产能。
- 其不仅可生产航空燃料，还同时具有航空燃料运营的网络和经验。其与中航油一样，是目前香港机场主要的几个航油运营方之一。2002 年，其与香港机场管理局签订为期 40 年的专营权协议，负责设计、兴建及营运航空燃油设施。此项目设有 8 个总储量达 26.4 万立方米的大型储罐以及两个海上码头泊位，航空燃油通过两条海底管道从屯门至彼岸的机场岛，每年燃料装卸量近 600 万吨，是香港目前主要航空燃油物流基地<sup>80</sup>。

- 香港中华煤气集团现有业务中，不仅有 HVO 和 SAF 业务，同时依托其优势的城市燃气等公共设施运营经验，在中国大陆多个省市开展有厨余处理业务（如江苏苏州市、安徽铜陵市）、垃圾分类和转运及污水处理等业务（如江苏常州市武进区）、农耕废弃物处理业务（如河北唐山市和沧州市）<sup>81</sup>，这些业务一方面是其传统的城市燃气业务的拓展，另一方面能为 SAF 业务发展提供潜在的原料供应，形成有利的业务互补。

### 5.2.3 海新能科

北京海新能源科技股份有限公司（简称海新能科），前称为北京三聚环保新材料股份有限公司，成立于 1997 年，北京市海淀区国资委是其主要股东<sup>82</sup>。

自 2019 年以来，HVO 成为海新能科的一个重要业务，当前产能约 35 万吨/年，产品全部销往欧洲；计划未来超过 100 万吨/年。其目前尚未生产 SAF，未来视市场需求情况，有可能新建 SAF 产能，或在现有 HVO 产能基础上加以改扩建。

海新能科的传统业务是为石油化工、煤化工、化工化肥领域下游客户提供催化剂、净化剂产品及相关技术服务。2016 年后，开始在上述业务的基础上，开始同与主营业务相关的石油化工、煤化工领域的上下游企业开展石油、煤、焦炭等商品贸易。

自 2019 年 8 月开始，海新能科正式运营 HVO 业务，该业务最初是隶属于其贸易业务板块。其与河南鹤壁、海南等地企业合作，以棕榈酸化油等废弃生物油脂为原料生产 HVO，

并与 bp、贡渥集团 (Gunvor Group) 等国际大型石油公司和油品贸易商合作，向国际市场进行销售<sup>83</sup>。三年来，其 HVO 销售收入已经占到其总营业收入的 7.3% (见表)。

表 5-3: 海新能科 HVO 产销量

年度	产量 (吨)	销量 (吨)	销售收入 (万元)	占总营业收入比例
2019	-	16,309.17	15,323	-
2020	43,839.09	43,839.09	43,877	6.15%
2021	43,832.48	41,735.11	41,982	7.30%

来源：海新能科 2020 年、2021 年年报

在此期间，海新能科的 HVO 业务模式主要有两种：

- 通过其子公司海新能科 (香港) 有限公司从境内供应商 (鹤壁华石联合能源科技有限公司和海南环宇新能源有限公司) 直接采购产品，销售给境外客户。
- 通过海新能科 (香港) 有限公司，从境外自己采购原材料棕榈酸化油，委托境内企业 (鹤壁华石和海南环宇) 加工并支付加工费，产品销售给境外客户。

在与其他企业合作的同时，海新能科也依托其 MCT 悬浮床加氢技术，在积极建设自己的生物燃料生产装置。2020 年，海新能科 (山东三聚生物能源有限公司) 开始在山东日照启动 HVO 项目建设，2021 年完成建设。

## 5.2.4 中地油新能源

中地油新能源 (山东) 有限公司 (简称中地油新能源) 成立于 2020 年，位于山东沾化经济开发区 (山东滨州市)。

中地油新能源的业务重点是利用其自主研发的 PRO 沸腾床 (Plant Residue to Oil, PRO) 等技术将山东较落后的炼化

产能中的加氢装置升级为生产液体石蜡、HVO 和 SAF 等生物燃料。其借助山东省炼化行业新旧动能转换的契机，通过输出技术和工艺，与当地企业合作，生产生物燃料。

中地油新能源于 2021 年 8 月试生产 HVO，以棕榈酸化油为主要原料，产能 40 万吨/年；产品符合 ISCC 欧盟标准，全部销往欧洲；未来产能目标为 100 万吨/年—200 万吨/年。

## 5.2.5 卓越新能

龙岩卓越新能源股份有限公司 (简称卓越新能) 成立于 2001 年，其主营业务为利用废油脂 (地沟油、酸化油等) 从事生物柴油、衍生产品工业甘油、生物酯增塑剂、水性醇酸树脂等的研发、生产与销售<sup>84</sup>。

卓越新能是在生产一代生物柴油的基础上增产 HVO 的案例。2021 年，卓越新能生物柴油 (一代生物柴油) 产能 40 万吨/年，产量 35.8 万吨，较上年同期上升 54.65%。其计划用 3~5 年时间提高生物柴油产能到 75 万吨/年。其位于福建龙岩的美山生产基地 10 万吨 HVO 项目尚在建设中<sup>85,86</sup>。

## 5.2.6 首钢朗泽

北京首钢朗泽科技股份有限公司（简称首钢朗泽）成立于 2011 年，是由首钢集团控股的中外合资企业。

首钢朗泽的业务重点是以含碳工业尾气为原料，通过生物发酵生产乙醇及饲料蛋白。其核心发酵工艺采用美国 LanzaTech 公司开发的菌种，直接以 CO、CO<sub>2</sub> 作为碳源进行发酵，通过蒸馏脱水得到生物乙醇，并回收发酵液中的菌体生产高价值的蛋白饲料。

首钢朗泽已于 2018 年建成并投产首个工业尾气生物发酵制乙醇及蛋白商业化工厂。其在曹妃甸和宁夏的已投产项目，产能均为 4.5 万吨/年；在贵州和宁夏新建的另外两个项目产能均为 6 万吨/年；“十四五”期间计划乙醇总产能达到 100 万吨/年。

在工艺上，从乙醇到 SAF 的技术路线已经打通，但尚未有工业化应用的实例。LanzaTech 已经完成该路线的中试，目前正在美国建设年产 3 万吨乙醇制 SAF 的工业示范项目，预计 2023 年下半年投产。近期首钢朗泽计划引进该技术在中国建设工业化项目。从前后整体的工艺来看，技术路线属于 AtJ 或 G+FT，如果能引入中国市场，将有利于促进中国在此类技术路线上的发展。

## 5.3 供应渠道

中国航空油料集团有限公司（中航油）是目前中国内地最主要的集采购、运输、储存、检测、销售和加注为一体的航油供应渠道商<sup>87</sup>，负责超过 95% 以上的国内航油供应。预计其未来 SAF 的采购、销售和加注等环节仍是主要参与方。

中国内地的航油采购来源，国内航班的航油主要来源于中国石油天然气集团有限公司（中石油）、中国石油化工集团有限公司（中石化）、中国海洋石油集团有限公司（中海油）。国际航班（包括国内航空公司飞往境外的航班）的航油来源则主要是进口油（保税油），中国航油（新加坡）有限公司（中航油新加坡公司）负责航油进口业务。

就中国内地而言，航空公司目前还没有规模化应用 SAF，中航油目前也没有提供常规化的 SAF 采购和加注服务。不过，

中航油曾经全面参与了中国的四次试飞和商飞的航油供应（第五次是南航从法国接空客新飞机回国时使用了生物航油）<sup>88</sup>，尤其是 2011 年第一次跟国航的试飞项目，专门在北京首都机场建设了用于 SAF 的收、储、混、发设施。

同时，中航油还参与了 SAF 相关的研发项目。2019 年、2020 年和 2021 年中航油分别与中科院广州能源所和民航二所合作开展了国家级、省部级生物航油的研发项目，但目前距离市场化应用尚有一段距离。

除中航油外，少量境外企业也参与了中国内地航油供应和加注服务，如 bp 集团的子公司 Air bp。Air bp 通过与中航油成立四家合资公司的形式，在广东、广西、湖南、湖北、河南、四川、贵州和重庆等地提供航油相关服务。

在 SAF 加注方面，Air bp 目前给全球 7 个国家共 20 个地区提供 SAF 加注服务。虽然 Air bp 在中国内地也尚未开展 SAF 相关业务和项目，但由于中国航空市场举足轻重，因此从 2021 年起，Air bp 便开展了在中国的 SAF 研究，以更好得在中国推动 SAF 发展。

同时，Air bp 在全球范围内也已投资开展三个 SAF 项目，包括：在北美的 Fulcrum 利用 FT 路径制 SAF 项目，西班牙的卡斯特利翁（Castellon）炼厂项目，以及与 Neste 合作采购后者 SAF 产品的项目。

另一家全球性的航油供应商—壳牌，也在为包括阿姆斯特丹机场、洛杉矶机场等多个国家和地区的机场供应 SAF。其中，在亚洲地区，壳牌将会首先为中国香港和新加坡供应 SAF<sup>89</sup>。

壳牌在全球范围内也开展了一系列 SAF 投资与合作项目。2020 年 10 月，壳牌与红岩生物燃料公司签订协议，为该公司现有航空公司客户供应 SAF；同月，与 Neste 签署合作协议，旨在显著扩大 SAF 供应；2021 年 1 月，ECB 集团与壳牌签订五年合同，从 2024 年起每年将向壳牌提供超 5 亿升可再生柴油和 SAF<sup>90、91</sup>。

此外，壳牌计划到 2025 年在全球范围内生产 200 万吨 SAF。为此，壳牌也在投资改造炼厂以加入 SAF 生产队伍，例如在荷兰鹿特丹建厂生产 SAF 和生物柴油，预计于 2024 年投产，年产能 82 万；也宣布将投资在新加坡建立生物燃料设施以生产 SAF，年产能 55 万吨<sup>92</sup>。

## 5.4 航空公司

### 5.4.1 SAF 应用情况

中国航空公司大部分属于国有企业，一般会根据中央政府的相关政策和规划，才会统一落实 SAF 相关工作。目前，中国航空公司整体尚处于知识储备阶段，尚无公开明确的 SAF 商业飞行计划。

在试飞/商飞方面，国航、东航和海航分别于 2011 年、2013 年、2015 年和 2017 年进行过 SAF 的相关飞行活动（见表 5-4）。不过，在这些试飞后中国的航空公司并未趁热打铁加大力度推行商飞，导致国际上各航空公司在积极参与 SAF 推广的时候，中国航空公司依旧停留在 SAF 应用的起步阶段。

表 5-4: 中国航空公司 SAF 飞行记录

时间	航空公司	SAF 原料	掺混率	生产商	航班描述
2011 年 10 月 28 日	国航	麻风果油	50%	中石油	北京首都机场起飞的试飞
2013 年 4 月 24 日	东航	棕榈油和废弃食用油	-	中石化	上海虹桥机场试飞 1.5 小时
2015 年 3 月 21 日	海航	废弃食用油	50%	中石化	上海飞北京，国内首个利用 SAF 的客运航班
2016 年 5 月 28 日	国泰	甘蔗	10%	道达尔 / 阿米瑞斯	图卢兹飞香港（接收新飞机）
2017 年 11 月 22 日	海航	废弃食用油	15%	中石化	北京飞芝加哥，国内首个利用 SAF 的洲际客运航班
2019 年 2 月 28 日	南航	甘蔗	10%	道达尔	图卢兹飞广州（接收新飞机）

相比之下，国际上各航空公司对于 SAF 的应用较中国航空公司要积极<sup>93,94,95</sup>：

- 2008 年至 2011 年，全球航空公司处于 SAF 技术测试飞行阶段。
- 2011 年至 2015 年，全球共有 22 家航空公司使用 SAF 进行了约 2500 余班的商业客运飞行。
- 2011 年至 2022 年 7 月，商业 SAF 航班已超过 43 万架次，有超过 45 家航空公司拥有使用 SAF 经验。

表 5-5: 全球航空公司 SAF 整体飞行规模

时间	商业 SAF 航班架次	有使用 SAF 经验航空公司
2008 年—2011 年	全球范围内 SAF 大量试飞阶段	
2011 年—2015 年	超过 0.25 万架次	22 家
2011 年—2022 年 7 月	超过 43 万架次	超过 45 家

来源: IATA, Aviation Benefits Beyond Borders

表 5-6: 2008-2019 年全球部分航空公司 SAF 飞行记录

首次 SAF 飞行时间	航空公司	航班描述
2008 年 2 月	维珍航空 (Virgin Atlantic)	B747 技术试飞
2008 年 12 月	新西兰航空 (Air New Zealand)	B747 技术试飞
2009 年 1 月	日本航空 (Japan Airlines)	B747 技术试飞
2011 年 7 月	芬兰航空 (Finnair)	A320
2011 年 7 月	英特捷 (Interjet)	A320 商业航班
2011 年 8 月	墨西哥航空 (Aero Mexico)	B777 商业航班
2011 年 10 月	伊比利亚 (Iberia)	A320 商业航班
2011 年 10 月	汤姆森航空 (Thomson Airways)	B757 商业航班
2011 年 10 月	法国航空 (Air France)	A320
2011 年 10 月	中国国际航空 (Air China)	B747 技术试飞

首次 SAF 飞行时间	航空公司	航班描述
2011 年 10 月	阿拉斯加航空 (Alaska Airlines)	Q400 和 B737 一系列商业航班
2011 年 12 月	泰国航空 (Thai Airways)	B777 商业航班
2012 年 1 月	阿提哈德航空 (Etihad Airways)	B777 交付航班
2012 年 3 月	拉美航空 (Latam Airways)	拉丁美洲的一系列航班
2012 年 4 月	波特航空 (Porter Airlines)	Q400 演示飞行
2012 年 4 月	捷星航空 (Jetstar Airways)	A320 商业航班
2012 年 6 月	加拿大航空 (Air Canada)	多伦多到墨西哥城两次商业航班
2013 年 4 月	中国东方航空 (China Eastern)	A320 技术试飞
2014 年 5 月	荷兰皇家航空 (KLM)	A330-200 商业航班
2014 年 9 月	芬兰航空 (Finnair)	A330 商业航班
2014 年 9 月	汉莎航空 (Lufthansa)	法兰克福飞柏林的定期航班
2014 年 11 月	北欧航空 (Scandinavian Airlines)	B737
2014 年 11 月	挪威航空 (Norwegian Airlines)	B737
2015 年 3 月	海南航空 (Hainan Airlines)	B737 商业航班
2016 年 6 月	阿拉斯加航空 (Alaska Airlines)	西雅图飞旧金山和华盛顿的两次商业航班
2016 年 11 月	阿拉斯加航空 (Alaska Airlines)	B737 商业示范飞行
2017 年 2 月	金色航空 (Braathens Regional Airlines)	ATR72-600 商业航班
2017 年 4 月	加拿大航空 (Air Canada)	蒙特利尔与多伦多间的五次试飞

首次 SAF 飞行时间	航空公司	航班描述
2017 年 5 月	新加坡航空 (Singapore Airlines)	A350 一系列跨太平洋航班
2017 年 11 月	海南航空 (Hainan Airlines)	B787 商业航班
2017 年 12 月	中华航空 (China Airlines)	A350-900 交付航班
2018 年 1 月	澳洲航空 (Qantas)	B787-9 商业航班
2018 年 5 月	加拿大航空 (Air Canada)	A320-200 商业航班
2018 年 8 月	香料航空 (SpiceJet Airlines)	Q400 示范飞行
2018 年 9 月	捷蓝航空 (JetBlue Airways)	A321 交付航班
2019 年 1 月	阿提哈德航空 (Etihad Airways)	B787 商业航班
2019 年 2 月	中国南方航空 (China Southern Airlines)	A320NEO 交付航班
2019 年 7 月	达美航空 (Delta Airlines)	A321 交付航班
2019 年 7 月	埃及航空 (EgyptAir)	B787 交付航班

来源：根据 Aviation Benefits Beyond Borders<sup>96</sup> 和公开信息整理

## 5.4.2 SAF 应用计划

预计在中国政府出台相关政策或具体要求前，中国内地各航空公司整体仍会处于知识储备阶段。

在使用 SAF 方面，香港国泰航空行动相对积极。自 2016 年起，国泰航空从法国图卢兹空中客车公司厂方接收新飞机使用可持续航油，至今已使用超过 200 吨 SAF。其还承诺在未来十年购入 110 万吨 SAF，2025 年将 SAF 使用量提升至总航油消耗量的 2%；2030 年目标上升至 10%；2050 年实现净零碳排放。2022 年 4 月，国泰航空开展了其“企业可持续航空燃油计划”，向相关供应商表达了 SAF 需求，中石油和壳牌

将为该计划提供燃油<sup>97</sup>。此外，2014 年，香港国泰航空曾投资美国 SAF 制造商 Fulcrum 公司，该公司将从 2024 年开始会作为供应商之一为国泰航空供应 SAF，以满足国泰航空提出在 2025 年使用 2%SAF 的目标。

整体来说，中国内地各航空公司，目前尚没有投资 SAF 的项目，也没有具体的应用 SAF 的商业飞行计划。关于未来的计划，航空公司普遍的考虑有三个方面：

- 一是成本问题。在航空公司的运营成本中，航油成本占比约 1/3，而 SAF 的价格目前约是传统燃料的 2-4 倍，SAF 的高价直接影响航空公司盈利。因此期望

政府部门出台扶持性政策或给予补贴，以支持航空公司采购和使用 SAF。

- 二是可落地的法令。《“十四五”民航绿色发展专项规划》中针对航空公司提出到 2025 年 SAF 消费量达到 5 万吨的指标，但作为航空公司完成该指标的路径措施尚不明朗。因此，航空公司期望民航局和其他相关部门能够制定包含如何使用 SAF 的法令，航空公司即可按照法令提出的具体路径直接操作和落实。
- 三是 SAF 的来源。目前全球 SAF 呈现供不应求的状态，中国内地虽有多家生产生物柴油的企业具备转产 SAF 的生产能力，但尚未有实际生产。若未来投入生产，这些 SAF 是否满足适航认证和可持续性认证也是航空公司会考虑的问题之一。

### 5.4.3 其他减碳手段

虽然应用 SAF 步伐较慢，但中国内地的航空公司在其他减碳领域较积极且取得一定成效，其主要依靠提升飞行能效、优化航路、优化地面能源结构等措施减少碳排放。

2021 年，中国航班通过使用临时航路，共节省燃油消耗 11.7 万吨，减少 CO<sub>2</sub> 排放约 36.9 万吨；机场能源清洁化保持较高水平，电力、天然气、外购热力占比达到 85.3%，太阳能、地热能等清洁能源占比约 1.0%。截至 2021 年，机场场内电动车辆设备约 9900 台，充电设施 3600 个，电动车辆占比 21%；全国年旅客吞吐量超过 500 万人次以上机场飞机 APU 替代设备实现“应装尽装、应用尽用”。民航打赢蓝天保卫战项目累计 152 个，总投资约 37.5 亿元，累计节省航油 62 万吨，相当于减少 CO<sub>2</sub> 排放约 195.3 万吨，减少各种空气污染物约 7500 吨<sup>98</sup>。

表 5-7: 中国主要航空公司减碳实践

航空公司	减碳手段
国航	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 飞机引进、运行和地面停靠阶段减碳：如选用高效能机型、采取控制返航备降、计算机油量精准化管理、飞机减重、航路优化，以及推广地面电源替代飞机的辅助动力装置（APU）等措施。</li> <li>• 强化碳资产管理：完善碳资产集中管理体系、建设碳排放监测分析系统、参与多套碳排放体系工作和参与国际碳减排与环境治理研究。</li> <li>• 优化车辆用能结构：共有新能源车 653 台，充电桩 195 台。</li> <li>• 尾气改进：完成 1431 台柴油车车辆尾气处理装置（DPF）加装，确保尾气排放达标。</li> </ul>
南航	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 碳监测：管理飞行活动碳排放相关数据的真实性、准确性和可溯源性。</li> <li>• 碳交易：成立碳资产处置工作领导小组完成碳交易工作。</li> <li>• 新能源车引进：蓝天保卫战中引进新能源车 767 台，充电桩 74 个。</li> <li>• 尾气改进：排查不符合燃油排放标准车辆共 1076 台。</li> <li>• 桥载电源替代使用：大力推进 APU 替代设备，共节约航油 11.6 万吨。</li> </ul>

航空公司	减碳手段
东航	<ul style="list-style-type: none"> <li>完善环境管理体系：制定《环境和能源管理手册》，聚焦能源界与和生态环保工作精细化管理。</li> <li>提升能效管理：承接上海市地方政府能耗“双控”指标，强化空中和地面能效的督促和改进，例如优化年机身性能、减轻飞机重量、升级管理系统和优化飞行距离等措施。</li> <li>推进 APU 替代设施：总体使用率达到 99%。</li> </ul>
海航	<ul style="list-style-type: none"> <li>打造“空中绿途”：自 2008 年以来，共开展空中航路优化、CIRCLE FLY 飞行等 30 多个减排项目。</li> <li>启动“禁塑”航班：2020 年 3 月成立禁塑专项工作组，最终确定 11 项可采用全生物可降解材料的产品，同年 9 月禁塑航班正式启动。</li> <li>打赢蓝天保卫战：开展 GPU 替代 APU 管控，2020 年助力减碳 1.4 万吨。</li> <li>碳抵消：2016 年起与中国绿色碳汇基金会合作开展“绿途碳抵消”公益项目，截止目前累计收到捐赠 35207 吨碳汇。</li> </ul>

来源：各航空公司 2020 年度社会责任报告

## 5.5 其他参与方

### 5.5.1 飞机制造商

#### (1) 波音公司

##### A. SAF 计划

波音致力于加快推动航空业对 SAF 的使用，并承诺至 2030 年，交付获得认证可以使用 100%SAF 的商用飞机<sup>99</sup>。

##### B. SAF 行动

波音积极与航空公司、油料公司、政府和科研机构合作，共同确定和开发 SAF 原料，批准新的 SAF 生产路径，以及扩大全球和地区的 SAF 供应。波音在包含美国、欧洲、中国、日本、中东、东南亚、巴西、墨西哥、南非和澳大利亚在内的六大洲都有生物燃料开发项目<sup>100</sup>。

在中国，波音过去十多年与不同的合作伙伴开展了 SAF 领域的探索与合作。2009 年波音与中国科学院在上海签署了一份谅解备忘录，在生物能源、先进材料和无线技术方面进行合作；根据谅解备忘录，2010 年，波音与中国科学院青岛生

物能源与过程研究所（中科院青能所）合作组建“可持续航空生物燃料联合研究实验室”，以加快微藻生物燃料的研究并促进航空业 SAF 的产业化进程<sup>101</sup>；2011 年与国航合作，完成中国首次 SAF 验证飞行；2014 年与中国科学院广州能源研究所合作，研究将农业废弃物转化为 SAF，建成并运行了年产能 100 吨的试点设备；接着，又分别在 2015 年和 2017 年与海航合作，完成中国首次 SAF 的国内商业飞行及国际商业飞行。

此外，波音与中国的飞机制造商中国商业飞机有限责任公司（中国商飞）也建立了合作关系。2012 年 8 月，波音与中国商飞在北京成立了波音—中国商飞航空节能减排技术中心（已更名为波音—中国商飞可持续航空技术中心），与中国的院校和研究机构合作，在生物燃料、绿色制造和行业标准等六个领域做技术研发，以提高航空效率和减少碳排放。2014 年，波音与中国商飞正式启用了与杭州能源工程技术有限公司共同研发的新示范设施（年产 100 吨），将地沟油等废弃食用油转化为 SAF。

在其他地区，波音也采取了不同形式的 SAF 推广行动<sup>102,103</sup>（见表）。

表 5-8: 波音针对SAF的部分行动

时间	SAF 行动
2008 年	B747 使用生物燃料试飞，助力在 2011 年获得商飞批准。
2012 年	让 SAF 可以用于飞机交付飞行。
2018 年	“环保证据机”（ecoDemonstrator）项目与通用电气（GE）和联邦快递合作，在 B777 货机上开展业界首次使用 100%SAF 的民用飞机试飞。
2019 年	向客户提供使用 SAF 用于民用飞机交付飞行的选项。
2021 年	与 SkyNRG 合作，在美国建立 SAF 生产设施。
2022 年	宣布与 EPIC Fuels 达成 750 万升混合 SAF 的供应协议。（是已宣布的由飞机制造商作出的最大一笔 SAF 采购。）
2022 年	与美国国家航空航天局（NASA）启动为期 5 年的 ecoDemonstrator 计划伙伴关系，以收集和分析 SAF 排放数据。

来源：根据公开信息整理

## (2) 空中客车公司

### A. SAF 计划

空中客车公司（空客）针对 SAF 制定了国际战略，包括支持 SAF 路径的认证和资格审定，确保新燃料符合所有质量和安全标准；支持政策和标准制定等<sup>104</sup>。

目前，空客所有飞机都已获得 SAF 以 50% 的比例与传统航油混合使用的认证，并计划到 2030 年末获得 100%SAF 使用认证。<sup>105</sup>

### B. SAF 行动

2016 年 5 月，空客开始为客户提供使用 SAF 用于飞机交付飞行选项，该计划与 Air TOTAL（全球喷气燃料供应商<sup>106</sup>）联合开发。另外，空客也积极参与了“ITAKA 倡议”（航空用可持续煤油倡议），旨在加快欧洲 SAF 的商业化<sup>107</sup>。自 2016 年成为首家为客户提供使用 SAF 用于飞机交付飞行的选项以来，空客公司已在法国图卢兹（2016 年）、美国莫比尔（2018 年）

和德国汉堡（2020 年）交付以 SAF 提供动力的飞机共 90 多架，并且空客在中国天津和加拿大米拉贝尔的工厂也将在未来提供交付 SAF 驱动的飞机的选项<sup>108</sup>。

## (3) 中国商飞

### A. SAF 计划

虽然中国商业飞机有限责任公司（中国商飞）目前尚未提出明确与 SAF 相关的计划，但十年前便开始关注并投资 SAF 项目。

### B. SAF 行动

中国商飞为中国和全世界航空业碳减排发展提供支持。2012 年 8 月中国商飞与波音公司共同出资的节能减排技术中心正式启动，该中心的首个研究项目即为探索地沟油提炼 SAF 的机会，以提升民航效率并减少碳排放，该项目于 2014 年 10 月在杭州正式投入运营<sup>109,110</sup>。

2016年11月，中国商飞与波音又签署了一份拓展双方研究合作的新协议以进一步加强联合研究，研究工作包括探索支持 SAF 后续研发，和合作制定航空节能减排相关行业或国际标准等领域<sup>111</sup>。

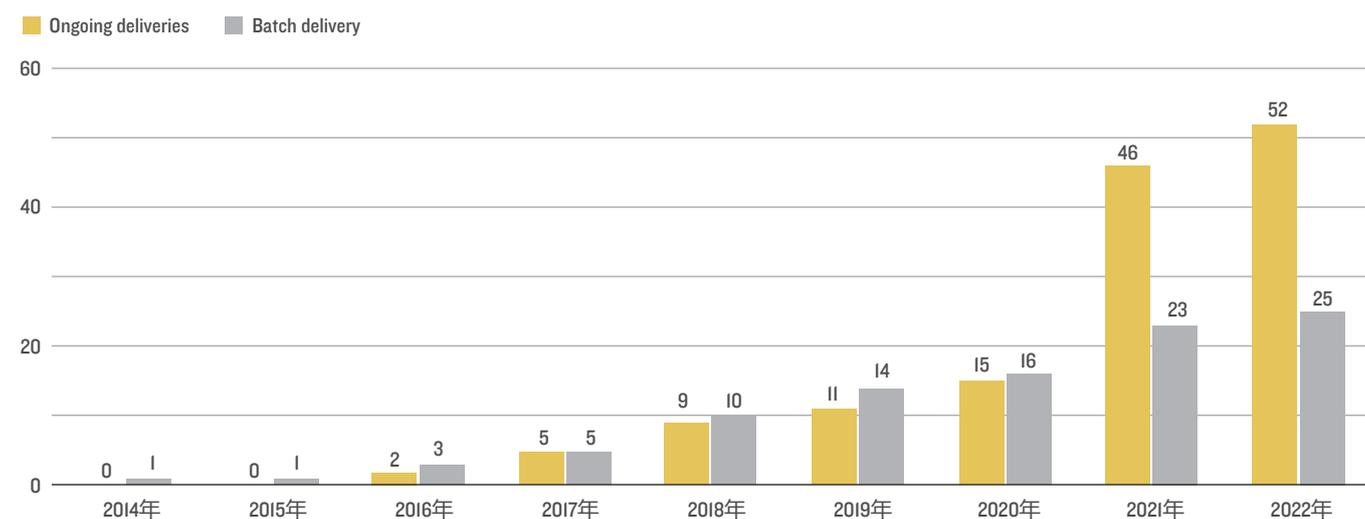
## 5.5.2 机场

自从2014年瑞典的卡尔斯塔德机场开始提供 SAF 加注服务后，国际上使用 SAF 的需求也趋于明显，提供加注 SAF 服

务的机场也逐年递增。尤其从2021年开始，提供服务的机场大规模增加，同比涨幅高达123%。截止到2022年5月25日，全球范围内共有77个机场可以提供 SAF 掺混和加注等服务，主要集中在北美、欧洲和亚太地区。其中，可持续供应 SAF 的机场52个，可分批供应的机场有25个<sup>112</sup>。

直到目前，中国还没有机场向定期航班提供 SAF 加注服务。

图 5-3: 全球提供SAF加注服务的机场数量



来源: ICAO, 2022.05.25

部分提供 SAF 加注服务的机场如下：

表 5-9: 全球提供 SAF 加注服务的部分机场清单

开始加注 SAF 时间	机场	国家	状态
2014 年 1 月 26 日	卡尔斯塔德机场	瑞典	分批供应
2016 年 1 月 22 日	奥斯陆加勒穆恩机场	挪威	持续供应
2016 年 3 月 1 日	洛杉矶国际机场	美国	持续供应
2016 年 5 月 24 日	蒙特利尔特鲁多国际机场	加拿大	分批供应
2016 年 7 月 15 日	约翰内斯堡机场	南非	分批供应
(中间年份省略)			
2022 年 1 月 18 日	杰奎琳科克伦地区机场	美国	持续供应
2002 年 2 月 3 日	伊斯坦布尔机场	土耳其	持续供应
2022 年 2 月 16 日	新加坡樟宜机场	新加坡	分批供应
2022 年 3 月 2 日	阿德南曼德利斯机场	土耳其	持续供应
2022 年 4 月 12 日	维也纳国际机场	奥地利	持续供应
2022 年 5 月 22 日	日内瓦国际机场	瑞士	分批供应
2022 年 5 月 25 日	实里达机场	新加坡	持续供应

来源：ICAO, 2022.05



© Photo by 宅-KEN on Flickr

## 中国SAF发展展望

中国 SAF 行业整体处于发展初期，有良好前景，不过当前面临较多挑战。在国家层面还比较缺乏明确的顶层设计，政策信号尚不明朗，主要的市场参与方更多是处于准备阶段，尚没有明确的发展规划；在产能、技术、原料供给和成本等方面目前都还存在一定障碍和瓶颈。但同时，中国 SAF 行业也面临一定机遇并具有一定优势，如果充分利用内外部有利条件，逐步发挥 SAF 的减排潜力，将在降低航空业碳排放、实现中国碳达峰碳中和目标、增强能源安全方面做出贡献。

本部分从目前中国燃料供给侧分析，对当前及近中期可能的技术发展、产能及原料供给做出整体评估。由于消费侧受政策影响大，在目前相关政策不明朗的情况下，本报告未对 SAF 可能的消费规模做详细评估。

## 6.1 技术路线

在目前业界讨论较多的四类技术路线中<sup>113</sup>，HEFA 是中国 SAF 和 HVO 市场上已投产项目或示范项目中唯一被运用的路线，其工艺技术也相对最成熟。易高和镇海炼化的 SAF 项目均采用该路线，海新能科和中地油新能源目前的 HVO 项目同样采用 HEFA(卓越新能投产的 HVO 项目亦同)，其未来可能的 SAF 规划项目，也极有可能沿用该路线。

G+FT 和 AtJ 两条路线在欧美已有示范项目，但在中国尚

没有探索。一些生产燃料乙醇及相关化学品的示范项目采用了这两条技术路线，如在东北地区，一些企业利用秸秆生产乙醇；以及首钢朗泽在河北、宁夏等地利用工业尾气合成乙醇。不过，目前中国市场还未出现从醇类转化到燃油的工业级项目。

类似于欧美地区，PtL 路线目前在中国还处于“概念”阶段。不过，从绿氢（可再生能源生产的氢）制甲醇项目在中国已有示范。中国科学院技术团队在甘肃兰州建设的千吨级绿氢制甲醇的规模化示范工程已于 2020 年试车成功，目前正在开展十万吨级的工业化项目<sup>114,115,116</sup>。

图 6-1: 不同 SAF 技术路线在中国发展的机遇与挑战

	 HEFA	 AtJ <sup>1</sup> G+FT	 PtL
机遇描述	安全、可靠、先进技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>发展中期具备潜力</li> <li>技术经济不确定性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2025 年后获得理论证实</li> <li>主要在有大量低价绿电供应的地方应用</li> </ul>
技术成熟度	成熟	商业试点	研发中
原材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>废弃油脂、能源油料植物<sup>2</sup></li> <li>可运输并可利用现有供应链</li> <li>可满足航油总需求的 5%-10%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>农林废弃物、城市固体废物<sup>4</sup>、纤维素能源作物<sup>5</sup></li> <li>便宜且原料供应广，但收集零散</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>二氧化碳、绿电</li> <li>原料可从空气中捕获，几乎不受限</li> </ul>
相较化石燃料的温室气体减排比例	73% ~ 84% <sup>3</sup>	85% ~ 94% <sup>6</sup>	99% <sup>7</sup>
中国市场的机遇	<ul style="list-style-type: none"> <li>原材料丰富</li> <li>产业基础较好</li> </ul>	原材料丰富	<ul style="list-style-type: none"> <li>可再生能源产业发展基础</li> <li>已有较好探索</li> </ul>
中国市场的挑战	原料分布分散，收集成本高	缺乏技术储备和研发基础	缺乏技术储备，成本较高

备注：1. 乙醇路线；2. 在低间接土地利用变化退化土地或作为轮作油料覆盖作物的油籽树；3. 不包括所有食用油料作物；4. 主要采用 G+FT 路线；5. 作为轮作覆盖作物；6. 不包括所有可食用糖作物；7. 借助完全脱碳的供应链，减碳比例最高可达 100%。

来源：World Economic Forum, Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation, 2021. 中国专家调研。

中国的 HEFA 路线中，普遍采用的是废弃油脂而非粮食作物，具有较好的可持续性，在减排效果方面具有优势。同时，中国在该领域的产业基础较好，对于未来 SAF 的产能扩张可以形成积极支撑。

中国企业在 G+FT 和 AtJ 两条路线上的技术储备还有待加强，如果今后加强技术研发，或采取中外合作的形式，有可能使 G+FT 和 AtJ 路线的项目落地实施。这两条路线的原料在中国分布较广泛，具有很大潜力。

PtL 路线是全球都寄予厚望的中长期路线，在中国亦是如此。中国光伏发电和风力发电资源丰富且产业发展快，政策支持导向明确，这会带动绿氢产业发展，从而会促进 PtL 路线有望在 2025 年左右在中国出现示范项目。

## 6.2 产能

中国目前现有 SAF 产能（HEFA 技术路线）15 万吨/年，暂没有其他已经有明确规划的新建项目<sup>117</sup>。

由于 SAF 产能规模受市场消费端需求规模的影响较大，

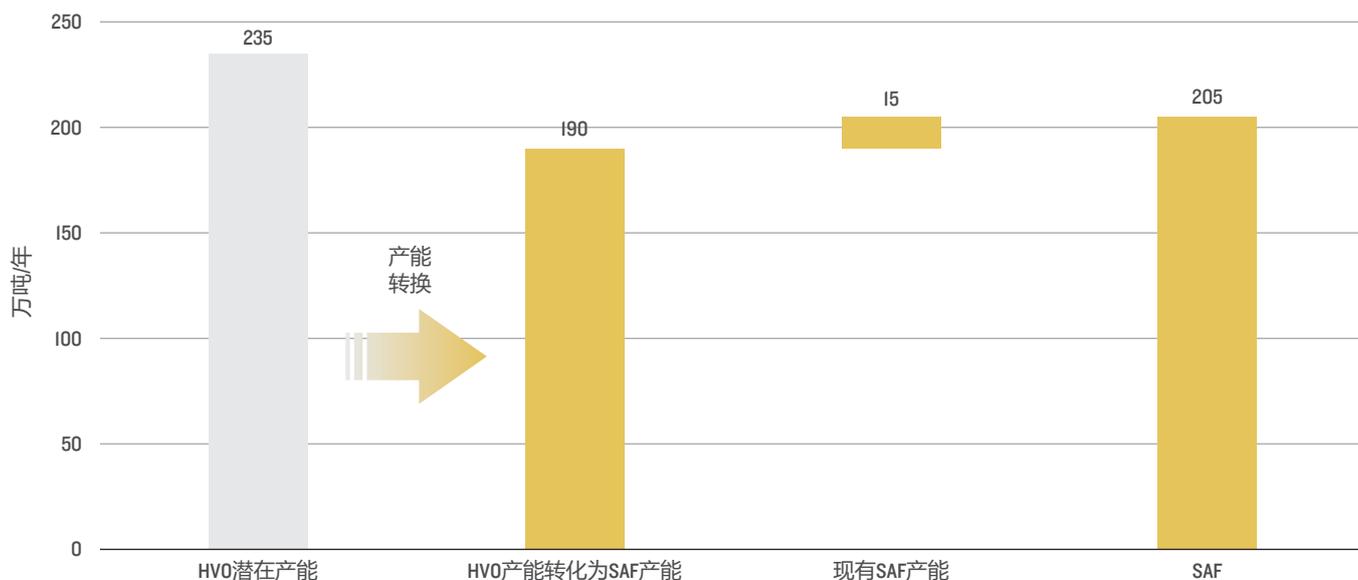
因此当需求增长时，产能也可以随之扩大。对于工艺比较成熟的 HEFA 技术路线来说，无论是新建 SAF 产能，还是从现有 HVO 产能进行改扩建，实施可行性较大，效率较高。

HEFA 路线要求具备加氢装置（如果没有氢气来源，还需具备制氢装置），这也是产能建设过程中耗时较多、投资比例较大的环节。从目前中国市场的实践来看，以 10 万吨/年的 HEFA 路线的 SAF 产能为例，新建一套装置，建设周期约为 2-3 年。如果对现有 HVO 产能加以改扩建，或者对已经具有制氢加氢装置的炼化设施来说，建设可以在数月甚至 1 年左右的周期内完成。

不过，由于一代生物柴油的生产工艺和装置与 HVO、SAF 有显著不同，因此，从一代生物柴油产能转产 SAF 的可行性和经济性较低。

在 2025 年前，假设没有新增 SAF 或 HVO 产能，且需要对现有的在运或 2025 年前可以建成的 SAF/HVO 产能进行改扩建以最大化生产 SAF，那么预计 2025 年 SAF 的总产能约为 205 万吨<sup>118</sup>。

图 6-2：2025 年中国 SAF 理论上可达产能规模

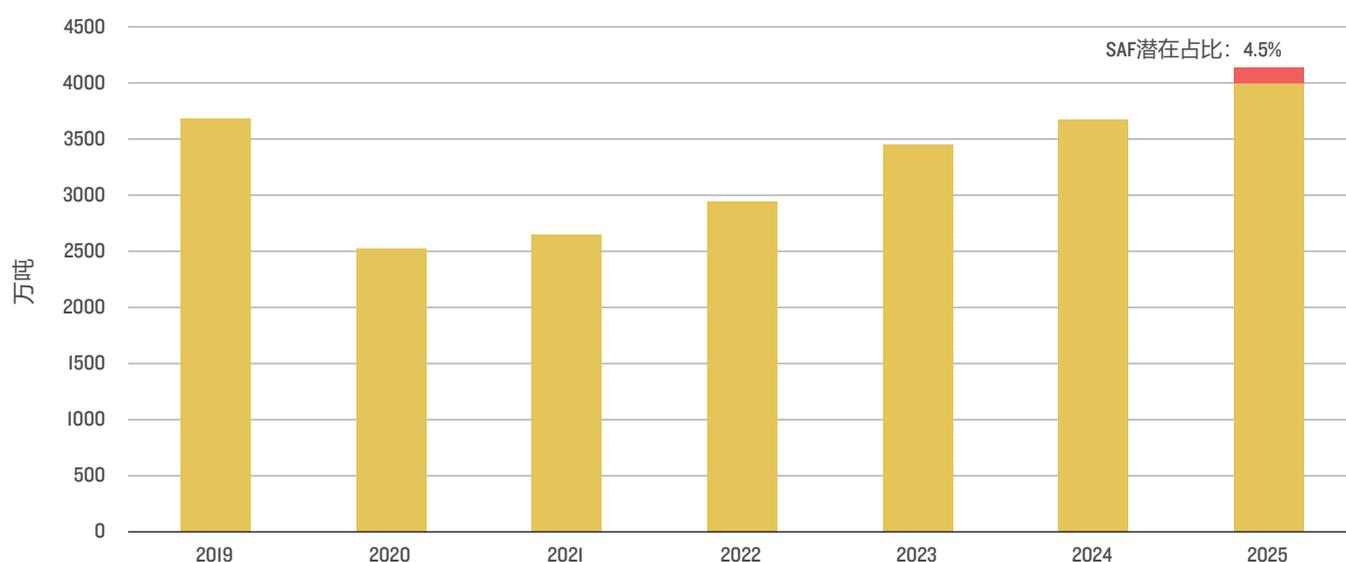


备注：1) 假设在已公布的 SAF 或 HVO 产能之外，2025 年前没有新增产能。

2) 假设在运或 2025 年前可以建成的 SAF/HVO 产能全部进行改扩建以最大化生产 SAF；HVO 产能按 80% 的比例转换为 SAF 产能。

在需求侧，2019年中国航油消费量为3684万吨，2020年由于疫情原因业务量下滑，航油消费量也下降到2523万吨，2021年略回升至2647万吨。假设中国航空业务量在2024年回到疫情前水平，2025年继续小幅上升，届时航油消费量约为4120万吨。如上述205万吨/年的SAF潜在产能可提供185万吨产品供应市场，SAF供应量将可达航油总消费量的4.5%。

图6-3：2025年中国航油消费量预计及SAF理论上可达占比



备注：假设2025年SAF总产能可达205万吨，且可向市场提供约185万吨SAF。

### 6.3 原料可获得性

可用于生产SAF的原料在中国分布较广泛，理论可利用量较大，包括废弃油脂、农业废弃物、林业废弃物、城市有机固体废弃物、工业尾气、能源作物、绿氢等<sup>119</sup>。

废弃油脂（也俗称地沟油）是目前中国生产生物柴油的主要原料，预计也是未来至少十年内生产SAF的主要原料。中国废弃油脂分布较分散，预估可回收以资源化再利用的量为340万吨（2019年）<sup>120</sup>。其中大部分被用于在国内加工成生物柴油或出口到欧洲市场，一小部分被用于生产肥皂、增塑剂或农药乳化液等。未来SAF需求市场扩大后，这些废弃油脂

可同样被用于生产SAF。

农业废弃物，一般包括农作物秸秆，以及农作物加工时产生的稻壳、玉米芯、花生壳和甘蔗渣等农产品初加工剩余物，主要集中于东北、华北和长江中下游等农业主产区。其中，可能资源化利用的秸秆资源量约为14500万吨，农产品初加工剩余物6200万吨，合计20700万吨<sup>121</sup>。

林业废弃物，包括森林采伐剩余物、木材加工剩余物及清林育林剪枝剩余物等，主要集中于东北和西南等地区。其中可能资源化利用的量约为19500万吨<sup>122</sup>。

城市生活垃圾中，有机垃圾约占 20-35%，对这些垃圾进行处理，也可作为 SAF 的原料。全国城市生活垃圾清运量 2.35 亿吨（2020 年）<sup>123</sup>，假设其资源化可用率为 10%，则可用量为 2350 万吨。

中国工业尾气资源丰富，如果加以利用制成乙醇，每年可产乙醇 500 万吨，甚至可达千万吨级；利用乙醇，可以进一步制备 SAF。

虽然中国有可观的边际土地<sup>124</sup>（如盐碱地）可以用来种植能源作物，但考虑到中国整体后备土地资源和水资源有限，利用能源作物来生产 SAF 等燃料存在很大不确定性，本报告暂不考虑其潜在的可利用量。

上述原料的整体可用量见下表。分类来看，虽然废弃油脂目前是最成熟的 SAF 原料，但其总量有一定限制；农林废弃物原料充足，发展潜力巨大，不过未来需综合考虑原料在多种用途（如还田、供热或发电、发展液态燃料等）之间的协调发展。

表 6-1: 中国 SAF 生产原料的潜在可利用量

原料	可利用量 (万吨 / 年)	生产 SAF 的综合产出率	SAF 产量 (万吨 / 年)
废弃油脂	340	40% (HEFA)	136
农业废弃物	20700	10% (AtJ 或 G+FT)	2070
林业废弃物	19500	10% (AtJ 或 G+FT)	1950
城市有机固体废弃物	2350	10% (AtJ 或 G+FT)	235
工业尾气所制乙醇	500	50% (AtJ 或 G+FT)	250
<b>合计</b>	<b>43390</b>	-	<b>4641</b>

备注：1) 采用不同原料和生产工艺，在产出 SAF 的同时，一般均会产出不同比例的生物柴油或汽油及石脑油等。虽然可以调节产出率以产出最大比例的 SAF，但同时也会产出更多价值较低的石脑油等副产品。因此，综合考虑目前的技术水平及经济性，表中的产出率体现的是最优产出 SAF 的一个综合比例。随着技术的进步，上述比例有可能进一步提高；2) 针对农林废弃物或城市固废等不同原料，AtJ 或 G+FT 的产出率会在 10-15% 区间浮动，表中统一为 10%；3) 工业尾气所制乙醇再产 SAF，设定产出率为 50%；4) 理论上来说，PtL 路线的原料（二氧化碳和可再生能源电力）的来源可能是无限的，因此上面没有列出对 PtL 途径的原料评估。

来源：原料可利用量来自田宜水等、住房和城乡建设部等；产出率来自 McKinsey Global Energy Practice; ICCT; International Renewable Energy Agency (IRENA) 及中国行业专家。

## 6.4 标准制定

作为可持续燃料的一种，SAF 既要满足航空燃料在安全和质量方面的“工艺和性能”标准的要求，也要满足在“可持续性”方面的要求。目前，各国主要基于 GB 6537、ASTM D7566 以及 DEF STAN 91-091 等标准，对已批准工艺生产 SAF 的产品

性能是否满足航空器适航要求进行验证。同时，通过 RSB、ISCC 等标准和认证体系对 SAF 产品进行可持续性方面的认定。欧美是生物燃料的主要生产方和消费方，在标准制定方面处于领先地位。



© Photo by DeltaMike on Pixabay

在过去十多年，中国国内使用的 SAF 量少，主要是用于一些航司的试飞，及仅有的两次载客商业飞行。在此阶段，主要参照相关的传统航空燃料标准来进行运输、存储及加注。

目前，中国在生物航油的工艺和性能方面的标准体系已经初步建立，可持续性方面的标准还在研究阶段。

中国境内生产的生物燃料（主要为生物柴油）目前主要是销往欧洲，未来可能生产的 SAF 产品如果也要销往欧洲，那么将适用于欧美的相关标准和认证体系。

航空公司和潜在的 SAF 生产企业对中国官方标准的制定和完善以及中外标准的协调统一抱有较大期望。考虑到目前中国在生物航油领域的标准体系已经建立，并与 ASTM 等国际其他标准保持了较好的统一，整体来说，标准问题不会成为 SAF 发展的阻碍。未来，随着 SAF 生产和应用规模不断扩大，国内外标准体系都将会不断扩充与完善。

# 7

## 政策推动是SAF发展的关键

## 7.1 政府指令要求是破局关键

目前，SAF 产业整体带有显著的“政策驱动”属性，政策导向是影响该产业发展的重要外部环境；其中，是否具有强制性或推荐性的 SAF 掺混比例是最重要的影响因素。

在欧洲和美国市场，政府均设定了国家或地区层面的可持续交通燃料应用目标和具体的掺混指令要求。

欧盟《可再生能源指令 2018/2001/EU》(RED II) 规定，到 2030 年欧盟能源需求中可再生能源占总能源消费比例至少

要达到 32%，其中可再生燃料在公路和铁路交通中的能耗占比要达到 14% (先进生物燃料 3.5%)<sup>125,126</sup>。针对航空领域，欧盟“Fit for 55”一揽子法规提案中包含了 ReFuel EU 航空倡议 (ReFuel EU Aviation initiative)，提议逐步取消航空免费排放配额，与 CORSIA 计划保持一致，并首次将航运排放纳入欧盟排放交易体系 (EU ETS)；同时，航空燃料供应商要为欧盟飞机提供的燃料中掺混越来越多的 SAF<sup>127</sup>。为激励 PtL 工艺路线的发展，欧盟还计划对该路线生产的 SAF 比例提出量化目标。目前，这些法规提案正在逐步审批阶段。

表 7-1: 欧盟规划的 SAF 掺混比例要求

SAF 掺混比例	PtL 所占比例	时间
2%	-	2025 年起
5%	至少 0.7%	2030 年起
20%	至少 5%	2035 年起
32%	至少 8%	2040 年起
38%	至少 11%	最晚 2045 年
63%	至少 28%	最晚 2050 年

来源：根据欧盟网站信息整理

同样，美国的《能源独立和安全法案》(Energy Independence and Security Act, EISA)<sup>128,129</sup> 制定了每年各种生物燃料期望达到的目标，同时授权美国环境署 (EPA) 根据市场供给情况制定和调整每年的实际配额。EPA 要求每个有义务的燃料调和商 (包括炼厂) 每年必须销售规定配额数量的生物燃料，或者在交易市场购买相应配额。

由于有了这些政策要求，欧美市场的 SAF 产业链各环节都在积极推动，发展规模稳步增长。全球 SAF 每年消费量从

2016 年的 800 万升 (约 6400 吨) 增长到 2021 年的 1 亿升 (约 8 万吨)<sup>130</sup>，这些消费绝大多数位于欧美。

在中国，《“十四五”民航绿色发展专项规划》提出力争到 2025 年 SAF 年消费量达到 5 万吨 (约 6300 万升)。这是一个积极的信号，不过 5 万吨还不是一个具有强约束力的目标，发展路径也还有待进一步明确，目前整体看，产业链各环节还处于知识储备阶段。

中国的航空公司及航空燃料的生产商和经销商均是国有企业占主导地位，在这种体制和机制下，中央政府层面如没有顶层设计，则意味着产业发展会存在很大不确定性；产业链各环节的参与方也都将保持知识储备状态，等待政府释放更明确的政策信号，这会使得产业链主体间缺乏协作和整体行动。

首先，在市场需求方面，由于没有强制性的 SAF 应用指标，航空公司并不急于推动 SAF，除了在 2011-2017 年间有少量试航外，没有做进一步规划。即使考虑到 CORSIA 设定的全球航空业的整体减排目标，航空公司更多是在等待国家层面的谈判进展，尚缺乏主动的行动计划。

其次，在投资方面，对于中石化、中石油等大型油料供应商来说，SAF 市场规模尚小，在没有明确政策信号的情况下，企业较难做出中长期的 SAF 生产布局，中石化镇海炼化的 SAF 项目目前也还仅属于示范性质。而对于中小规模的供应商来说，由于 SAF 涉及较大投资，在政策不明朗、国内市场无需求的情况下，企业同样很难做出投资决策。

## 7.2 支持措施不可或缺

由于中国目前还是没有系统性的 SAF 领域的顶层规划，所以也导致目前没有相关的政策激励措施和市场自我推动机制来激励 SAF 产业正向发展。参考与 SAF 相关性很强的生物柴油行业，中国目前对符合国家标准生物柴油执行免征消费税和 70% 增值税即征即退政策，部分省市在试点过程中还出台了相应的财政价格配套政策<sup>131</sup>，这些均对生产企业形成了一定

的鼓励。又例如，同属交通领域的电动车行业，在过去 10 年的发展初期，获得了政府巨大支持。

反观 SAF 行业，目前尚没有针对性的扶持措施；由于市场刚起步，相应的 SAF 标准和认定体系还没能与相关的政策衔接，所以在没有新政策出台之前，SAF 产品未来可能最多只能作为生物柴油大类中的一个子类来获得相应的财税支持。

成本是目前 SAF 相较传统航空燃料的短板，也是目前制约其广泛使用的一个重要因素。对于航空公司来说，由于受到新冠疫情 (COVID-19) 的不利影响，在内部成本管控和外部投资方面趋于保守，使用价格比传统航油高出数倍的 SAF 将是一个额外的经济负担。

如果政府、SAF 需求方、供给方、飞机制造企业和机场等多方共同努力，设计相应的激励机制，促进技术进步和规模化发展，将有望提高 SAF 产品的经济竞争性。

在这方面，美国做了积极尝试。2021 年 9 月，拜登政府发布一份跨美国政府不同部门的“SAF 大挑战 (Sustainable Aviation Fuels Grand Challenge)”行动计划<sup>132,133</sup>，这也是其能源部、交通部、能源部、联邦航空管理局等联邦政府部门联合 SAF 产业链发出的一个承诺。其目标是投入 43 亿美元的激励资金促进美国 SAF 产业的规模化，到 2030 年至少实现 30 亿加仑 (约 906 万吨) 的年供给，到 2050 年实现 100% 的航空用油来自于 SAF (约 350 亿加仑/年)。其相关政府部门和产业链主要参与方均做出了相应承诺或规划 (见表 7-2)。

表 7-2: 美国政府部门与航空业的SAF承诺与行动

主体	政府机构 / 企业	承诺 / 行动
政府 部门	农业部, U.S. Department of Agriculture (USDA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>为美国农民提供气候智能型农业实践和研究方面的支持, 为燃料生产商提供航空生物燃料原料的碳模型组件。</li> <li>对可持续生物质生产系统的知识、生物制造能力和劳动力发展持续投资。</li> <li>对供应链消碳。</li> <li>加强对社区以及个体的教育。</li> <li>向生产商、加工商和社区提供外联和技术转让。</li> </ul>
	能源部, Department of Energy (DOE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>为开发原料和藻类技术的项目和促进 SAF 生产路线成本降低提供约 1 亿美元资金支持。</li> <li>提供 30 亿美元的贷款担保支持商业规模 SAF 项目。</li> <li>与 NASA 合作, 为电动飞机的电池技术研发投资 1.15 亿美元。</li> <li>继续投资并发展低碳液体燃料等可持续技术方面的专业知识。</li> <li>继续实施 SAF 扩大战略。</li> <li>开展新的 SAF 生产技术路线研发工作, 推进 SAF 环境分析。</li> </ul>
	环境部, Environmental Protection Agency (EPA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>与 FAA 共同探索减少铅排放的方法, 减少或消除航油中的铅, 以解决航空对当地环境的影响。</li> <li>与农业部、能源部、交通部及各方合作, 加快对新 SAF 原料的监管批准流程。</li> </ul>
	交通部, Department of Transportation	<ul style="list-style-type: none"> <li>制定航空脱碳全局战略。</li> <li>协调发展现有 SAF 测试分析。</li> <li>与标准制定机构合作以确保 SAF 的安全性和可持续性。</li> <li>推动 SAF 应用终端发展。</li> <li>支持可以连接 SAF 原料生产商、SAF 炼油厂和航空终端用户的基础设施和交通运输系统的发展。</li> </ul>
	联邦航空管理局, Federal Aviation Administration (FAA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>启动“持续降低能源、排放和噪音”(CLEEN)计划第三阶段, 向飞机和发动机公司减少燃料消耗、排放和噪音的技术研发提供资金支持。</li> <li>拨款 2040 万美元用于减少全国各地机场的排放和改善空气质量。</li> <li>申请航空气候研究 (ACR) 项目预算 (5000 万美元), 以减少航空领域的温室气体排放, 支持美国气候变化目标。</li> </ul>
	国家航空航天局, The National Aeronautics and Space Administration (NASA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>启动了“可持续飞行国家伙伴关系”(Sustainable Flight National Partnership), 与 FAA 合作, 加快飞机和发动机技术的成熟, 实现燃料消耗和 CO<sub>2</sub> 排放的逐步减少。</li> </ul>
	国防部, Department of Defense (DOD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>为已在商业市场上获得认证及获得 ASTM 认证的 SAF 技术路线的使用提供资金支持。</li> <li>投资发动机改进 / 更换等计划, 提高传统飞机效率, 开发更节能的新飞机。</li> </ul>

主体	政府机构 / 企业	承诺 / 行动
客运航空公司	United Airlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>宣布到 2035 年将其碳排放强度比 2019 年降低 50%。</li> <li>与 Honeywell 共同宣布向 Alder Fuels 投资数百万美元生产负碳 SAF，并承诺在未来 20 年购买 15 亿加仑这种新型 SAF。</li> </ul>
	Delta Airlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>承诺到 2030 年用 SAF 替代 10% 的航空燃油，并与三家 SAF 生产商 Neste、Gevo 和 Northwest Advanced Bio-Fuels 达成协议。</li> <li>宣布与 Chevron 和 Google 合作开展新的 SAF 排放试点项目。</li> </ul>
	American Airlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>计划到 2025 年从 Prometheus Fuels 采购 1000 万加仑的 SAF，通过捕获的 CO<sub>2</sub> 和可再生电力来生产 SAF。</li> </ul>
	Alaska Airlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>购买 SAF 以抵消主要航线上的商务飞行，并与包括 SkyNRG Americas 和 Neste 在内的 SAF 生产商达成了协议。</li> </ul>
	Southwest Airlines	<ul style="list-style-type: none"> <li>与国家可再生能源实验室合作，开发和商业化 SAF。</li> </ul>
	JetBlue	<ul style="list-style-type: none"> <li>与 Joby Aviation 和 Universal Hydrogen 合作开发电动和氢能飞机。</li> </ul>
货运航空公司	FedEx	<ul style="list-style-type: none"> <li>通过 FedEx Fuel Sense® 项目节约燃料并提高飞机的效率，同时继续投资 SAF 开发。</li> </ul>
	Atlas Air	<ul style="list-style-type: none"> <li>通过 FuelWise 项目提高运营效率，该项目与飞行规划软件协同工作，以优化飞行速度、高度、航线和航线段。</li> </ul>
	Amazon AIR	<ul style="list-style-type: none"> <li>投资电动燃料、氢燃料电池飞机以及电动垂直起降飞机的开发。已经购买了 600 万加仑 SAF。</li> </ul>
	DHL Express	<ul style="list-style-type: none"> <li>承诺到 2030 年 SAF 的使用占比达到 30%，并正在与其他利益相关方合作开展示范项目。</li> </ul>
	UPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>投资研发高效的电动垂直起降飞机，用于运输小型货物。</li> </ul>
航油供应商	LanzaJet	<ul style="list-style-type: none"> <li>计划到 2030 年每年生产 10 亿加仑的 SAF，这些 SAF 由 AtJ 工艺制成。</li> </ul>
	World Energy	<ul style="list-style-type: none"> <li>计划到 2024 年，通过 HEFA 工艺（以脂肪、油和油脂为原料），每年生产 1.5 亿加仑 SAF。</li> </ul>
	Gevo	<ul style="list-style-type: none"> <li>计划到 2025 年，每年生产超过 1.5 亿加仑 SAF，这些 SAF 由 AtJ 工艺制成。</li> </ul>
	Fulcrum	<ul style="list-style-type: none"> <li>计划到 2022 年，通过 G+FT 工艺（以城市垃圾为原料），每年生产超过 3300 万加仑 SAF。</li> </ul>
	Velocys	<ul style="list-style-type: none"> <li>计划每年生产 3 亿加仑的混合 SAF，通过 G+FT 工艺生产。</li> </ul>
	其他	<ul style="list-style-type: none"> <li>其他近期已经或者新宣布的扩大 SAF 产量的公司包括：BP、Virent、Honeywell、Shell、Neste、Marquis、Green Plains Inc.、ADM、Prometheus、Aemetis 等。</li> </ul>

来源：根据美国政府网站信息整理

### 7.3 多方协作是落实所需

SAF 应用涉及到全产业链各个环节，在有明确政策信号的市场，多方协作是落实层面的必要保障；而在政策信号尚不明确的市场（如中国），多方协作更是市场发展初期的关键，可以解决“先有鸡还是先有蛋”的问题。多方协作，一方面可以为参与其中的先行方共同抵御风险，积累宝贵经验；另一方面，也可以为政策制定和完善提供建议和经验支持，成功的经验还将增强政策制定者推动 SAF 的信心。

在欧美市场，通过机场等产业链中的关键方牵头，联合航空公司、SAF 生产提供商以及航空服务购买方来共同启动 SAF 市场的做法，取得了较好的效果，能为中国市场提供经验借鉴。关于欧美地区的部分机场联合上下游推动 SAF 的案例，可参见本报告附录。

### 7.4 中国未来政策发展取决于多方面因素

中国政府规划中确定的到 2025 年消费 5 万吨 SAF 的目标并非强制性，且与中国整体 3000-4000 万吨/年（2018-2019 年规模）的航油消费规模相比，5 万吨的目标也较难坚定航空公司和生产商在 SAF 领域进行更大投入的信心。

与其他国家类似，中国政府是否会出台更严的政策，或制定更高的 SAF 发展目标，除了与国际航空业整体的碳减排推动进度有关外，也取决于 SAF 发展对中国整体在应对气候变化、环境污染和能源安全，以及促进产业发展等方面的潜在贡献。纵观现有及过往的碳减排相关政策体系，可以看出，针对某一特定领域的政策，一般都有来自于上述这些方面的潜在动因。

中国未来是否会出台进一步明确的 SAF 相关政策，某种程度上也取决于 SAF 在各方面所能做出的潜在贡献。

表 7-3: 中国碳减排相关政策出台的部分动因分析

领域	相关政策举例	促进碳减排	促进传统污染物减排	增强能源安全	提高产业竞争力
高耗能行业	<ul style="list-style-type: none"> <li>《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》</li> <li>《“十四五”节能减排综合工作方案》</li> <li>《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022 年版）》</li> </ul>	V	V		
可再生能源	<ul style="list-style-type: none"> <li>《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》</li> <li>《能源发展战略行动计划 2014-2020》</li> <li>《“十四五”可再生能源发展规划》</li> <li>《“十四五”节能减排综合工作方案》</li> </ul>	V	V	V	V

领域	相关政策举例	促进碳减排	促进传统污染物减排	增强能源安全	提高产业竞争力
电动车	<ul style="list-style-type: none"> <li>《汽车产业中长期发展规划》</li> <li>《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020)》</li> <li>《新能源汽车产业发展规划(2021-2035年)》</li> <li>《财政部工业和信息化部科技部、发展改革委关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》(财建【2020】593号)</li> <li>《绿色出行创建行动方案》</li> </ul>	V	V	V	V
散煤治理	<ul style="list-style-type: none"> <li>《大气污染防治行动计划》</li> <li>《北方地区清洁取暖规划(2017-2021)》</li> <li>《打赢蓝天保卫战三年行动计划》</li> <li>《乡村振兴战略规划(2018-2022年)》</li> </ul>	V	V		



© Photo by 穿着拖鞋一路小跑 on Pixabay

# 8

## 政策建议

## 8.1 进一步明确政策方向

SAF 的应用和推广，涉及航空业整体碳减排，也涉及产业链能源转型和技术革新。目前，ICAO、IATA、飞机和发动机生产厂家、航空公司、传统油企和新型油企、欧美等国政府都在积极推动 SAF 应用，力图在全球相关产业、技术、贸易等方面成为新规则的制定者和主导者。

中国民航业在快速增长的预期下，碳排放总量也将相应增长。航油是造成碳排放的主要来源，也是碳减排的主要突破口。提前布局 SAF 产业化发展、释放政策信号，不仅有利于完善上下游产业链，促进疫情后中国航空运输业绿色复苏，也能为中国参与全球航空业碳减排规则的制定与完善赢得更主动的地位。

目前，中国虽然有 2025 年前累计消费 5 万吨 SAF 的近期目标，但还没有具体行动方案，中长期政策方向亦不明朗，相应的政策支持力度不足。

建议政府统筹制定更清晰明确的产业发展规划与扶持政策，借助财政资金并引导社会资本，支持 SAF 相关产业发展。明确 SAF 纳入碳排放权交易，减排量纳入航空公司 CO<sub>2</sub> 排放强度下降指标考核体系。民航、能源、工商、质检等相关监管部门共同做好产业发展监管工作，持续跟踪、定期总结分析 SAF 生产与推广使用情况，针对存在的突出问题和矛盾，提出相应措施和解决办法。

## 8.2 组建跨部委工作组并制定行动计划

加强组织领导，建立 SAF 推广部际协调机制，协调解决 SAF 发展重大问题，研究制定相关配套政策，统筹推进。建议在政府主导下，由行业协会或平台性机构牵头，联合 SAF 产业链上下游利益相关方，如航空公司、炼化企业、航油销售企业、飞机制造企业、机场、科研院所等，共同参与产业发展规划和行动方案制定；健全航空业及 SAF 相关行业的温室气体排放监测、报告、核查管理体系，建立相应的认证认可机制；积极参与 CORSIA 框架下的国际规则制定与实施。

## 8.3 加强原料基础信息评估与经济分析

加强各类技术路线所需原料的基础信息收集和更新，有效掌握不同原料的资源分布与可利用性，促进行业资源的优化配置。针对不同原料的收集难度、加工技术水平和成本变化曲线，进行经济性分析，据此完善相应的政府资金扶持政策。

## 8.4 引导产业链集体行动

促进产业链上下游各方充分沟通与交流，使燃油需求侧与供给侧之间形成联动。支持各类主体开展 SAF 应用的协同创新；鼓励油料炼制企业、航空运输企业、航空制造企业联合投资 SAF 项目，通过市场化方式享受收益，实现 SAF 应用的常态化和规模化。

## 8.5 支持技术创新

支持建设 SAF 技术研发体系，促进油脂基技术、纤维素基技术和绿氢技术等不同 SAF 技术路线的多元化发展，引导企业和科研机构强化技术创新、开展工业化示范，支持生产企业提高具备自主知识产权的 SAF 产品产能及国际竞争力。

虽然在“油脂基航油”领域，中国具有较好的产业基础，但在“纤维素基航油”和“绿氢路线航油”领域还鲜有企业涉足，应加大在这些领域的科研投入、产业联合和国际合作。

## 8.6 积极开展试点应用

基于 SAF 不同原料、技术路线和产业布局等实际情况，结合航空油料加注使用特性，在部分机场开展试点应用。根据试点应用经验，结合各地原料供给条件、SAF 制备基础设施条件和区域航空运输发展情况，从需求侧加大对 SAF 应用的支持力度，扩大可加注 SAF 机场范围。对主动应用 SAF 且占比高的航空运输企业，在机队、投资、价格、信用、招投标等管理政策方面进行统筹考虑。坚持以市场促进良性竞争，降低 SAF 应用成本，形成可复制可推广的经验，推动全产业链条良性循环。

# 附录1

## SAF标准发展状况

为配合 SAF 相关政策法规的具体落实，各国相应强调了对相关标准和认证体系的建立与完善。这些标准绝大部分是市场已有的生物燃料相关标准的延伸和拓展。SAF 产品在某一市

场的销售，首先需要通过这些相关标准的认证，才可获准进入市场。

### 1. 工艺与性能标准

国际上广泛认可的产品标准是采用美国材料与试验协会（American Society for Testing Materials, ASTM）所制定的 ASTM D7566《含合成烃类的航空涡轮燃料标准规范》和 ASTM D1655《航空涡轮燃料标准规范》对含合成烃的航空涡轮

燃料及用于掺混的航空涡轮燃料的理化性能指标进行验证。截至 2021 年 10 月，ASTM 已经批准了 9 种用于生产合成烃组分的生产工艺路线<sup>134,135,136</sup>，如下表所示。

表：ASTM核准的9种SAF生产工艺路线

ASTM 标准	技术路线	可能的原料	批准日期	最高掺混限值	采用该技术路线的部分生产商
ASTM D7566 附录 1	费托合成煤油 (FT-SPK)	农林废弃物、城市固体废物	2009	50%	Fulcrum Bioenergy, Red Rock Biofuels, SG Preston, Kaidi, Sasol, Shell, Syntroleum
ASTM D7566 附录 2	加氢处理酯和脂肪酸煤油 (HEFA-SPK)	餐厨废油、废弃动物油脂、其他油基生物质（如亚麻荠油、卡里纳塔油等）	2011	50%	World Energy, Honeywell UOP, Neste Oil, Dynamic Fuels, EERC, 易高, 镇海炼化
ASTM D7566 附录 3	加氢发酵糖合成异构烷烃 (HFS-SIP)	甘蔗、蔗糖等糖类	2014	10%	Amyris, Total

ASTM 标准	技术路线	可能的原料	批准日期	最高掺混限值	采用该技术路线的部分生产商
ASTM D7566 附录 4	带芳烃的费托合成煤油 (FT-SPK/A)	农林废弃物、城市固体废物、能源作物等	2015	50%	Sasol
ASTM D7566 附录 5	醇制合成煤油 (ATJ-SPK)	淀粉、糖、纤维素等生物质、工业生产排放的废气	2016 2018	50%	Gevo, Cobalt, Honeywell UOP, Lanzatech, Swedish Biofuels, Byogy
ASTM D7566 附录 6	催化水热解法制备合成煤油 (CHJ)	大豆油、麻风果油、茶花油、亚麻荠油和卡里纳塔油等	2020	50%	Applied Research Associates (ARA)
ASTM D7566 附录 7	加氢处理烃、酯和脂肪酸合成煤油 (HC-HEFA SPK)	海藻类	2020	10%	IHI Corporation
ASTM D1655 附录 1	可再生原料与原油中间馏分共加工的加氢处理酯和脂肪酸煤油 (Co-processed HEFA)	餐厨废油、废弃动物油脂、其他油基生物质与原油	-	5%	-
ASTM D1655 附录 1	可再生原料与原油中间馏分共加工的费托合成煤油 (Co-processed FT)	农林废弃物、城市固体废物与原油	-	5%	Fulcrum

来源: ASTM, ICAO

作为国际民航业普遍认可的航油标准制定者，ASTM 集合了业界各方面专家的力量，其制定的 ASTM D7566 标准自 2009 年颁布以来，历经数次修订，目前，最新修订版为 2021 年推出的 ASTM D7566-21。ASTM D7566 对包括航空生物燃料在内的替代燃料质量标准和使用安全性做了规范要求，较快地反映了工艺技术的更新和进步。

目前，各技术路线生产出来的 SAF 与传统航油的掺混比

例都限制在 50%（部分限制在 10% 或 5%），不过，从技术层面来说，未来使用 100% SAF 是完全可行的。

SAF 产品除了需要满足工艺和性能要求外，还需要满足“可持续性”方面的要求，只有这样，它才有替代现有传统航油的必要。

## 2. 可持续性标准

本部分重点分析与 SAF 可持续性认证相关的一些主要认证体系，以及各认证体系所关注的主要内容。同时，也重点介绍三个认证体系，包括可持续生物质圆桌倡议组织 (Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB)、国际可持续性和碳认证 (International Sustainability & Carbon Certification, ISCC) 和 CORSIA 的认证机制。

### 2.1 不同标准认证体系及适用市场范围

#### 概览

SAF 强调其“可持续性”，即需要对环境、社会和经济带来尽可能少的负面影响。为评估 SAF 的“可持续性”，各国

各地区在提出 SAF 发展目标的同时，也对其“可持续性”提出要求，并通过相应的标准认证体系进行评估和核验。欧盟《可再生能源指令》和美国《可再生燃料标准 II》出台时，不仅设置了生物燃料的掺混目标，也对这些生物燃料应具备的可持续性提出了强制性要求。

这些标准体系，有些是由某一国家或者地区有针对性制定的，仅适用于本国或本地区市场；也有一些是由国际组织制定，适用于多个市场<sup>137</sup>。

绝大多数此类标准体系并非完全针对 SAF 产品而开发，而是对已有的相关生物燃料认证体系进行扩展以适用于 SAF 产品。

表：全球生物质能可持续性标准认证体系

政策和标准名称 Initiatives	名称缩写 Abbreviations	发布单位 Organization	发布时间 Year	适用的地域范围 Geographical coverage	适用的原料 Feedstock (s) covered	适用的生物质能 Bioenergy covered	类型 Types
英国可再生运输燃料义务法	RTFO	英国可再生燃料署	2008	英国	所有类型	所有类型生物燃料	政策法规
英国可再生运输燃料义务法	RTFO (修订)	英国交通运输部	2018	英国	所有类型	所有类型生物燃料	政策法规
生物燃料全生命周期评价条例	BLCAO	瑞士联邦环境、交通、能源与通讯部	2009	瑞士联邦 (包括进口)	所有类型	所有类型生物燃料	政策法规
可再生能源指令	RED	欧盟	2009	欧盟 (包括进口)	所有类型	交通用生物燃料和其他生物液体燃料	政策法规

政策和标准名称 Initiatives	名称缩写 Abbreviations	发布单位 Organization	发布时间 Year	适用的地域范围 Geographical coverage	适用的原料 Feedstock (s) covered	适用的生物质能 Bioenergy covered	类型 Types
可再生能源指令	RED II	欧盟	2018	欧盟 (包括进口)	所有类型	交通用生物燃料、其他生物液体燃料, 和非生物来源的可再生燃料, 包括氢燃料	政策法规
社会燃料标识	SFS	巴西土地发展部	2009	巴西	所有类型	生物柴油	政策法规
加州低碳燃料标准	LCFS	加州环保署	2009	美国加州	所有类型	所有类型生物燃料	政策法规
加州低碳燃料标准	LCFS (修订)	加州环保署	2018	美国加州	所有类型	所有类型生物燃料	政策法规
可再生燃料标准 II	RFSII	美国环境保护署	2010	美国 (包括进口)	所有类型	所有类型生物燃料	政策法规
GBEP 生物质能可持续指标	GBEP-SIB	GBEP	2011	全球	所有类型	所有类型	自愿标准
生物质能可持续性标准	ISO-SCB	ISO	2015	全球	所有类型	所有类型	自愿标准
FFSC 森林管理原则和标准	FSC-PCFS	FSC	1993	全球	以森林产品为主	所有类型生物燃料	认证标准
可持续棕榈油生产原则和标准	RSPO-PCSPOP	RSPO	2007	全球	棕榈油	生物柴油	认证标准
北欧生态标签	NEF	北欧国家	2008	北欧国家	所有类型	所有类型生物燃料	认证标准
乙醇可持续验证倡议	SEKAB-VSEI	SEKAB (一家瑞士企业)	2008	巴西圣保罗地区 (生产) / 瑞典 (分销)	甘蔗	燃料乙醇	认证标准

政策和标准名称 Initiatives	名称缩写 Abbreviations	发布单位 Organization	发布时间 Year	适用的地域范围 Geographical coverage	适用的原料 Feedstock (s) covered	适用的生物质能 Bioenergy covered	类型 Types
Bonsucro 欧盟生产标准	Bonsucro	Bonsucro	2010	全球	甘蔗	燃料乙醇	认证标准
国际可持续碳认证	ISCC	ISCC	2010	全球	所有类型	所有类型	认证标准
国际可持续碳认证	ISCC	ISCC	2022 (最后一次修订)	全球	所有类型	所有类型	认证标准
可持续生物质圆桌倡议组织全球 / 欧盟 RED 认证标准	RSB Global / RSB EU RED	RSB	2010	全球 / 欧盟	所有类型	生物液体燃料	认证标准
负责任大豆圆桌协会原则和标准	RTRS-PC	RTRS	2010	全球	大豆	生物柴油	认证标准
生物质能可持续性认证要求	CRBS	中国国家认证认可监督管理委员会	2018	中国	所有类型	所有类型	认证标准

来源：根据常世彦、康利平等人的分析及各认证体系的官网信息整理<sup>18</sup>

## 欧盟

在欧盟市场，欧洲标准化委员会成立了生物燃料可持续标准化技术委员会 (CEN/TC 383)，开发对应标准，以指导和核验企业生产或供应的生物燃料及生物液体燃料符合欧盟《可再生能源指令》对可持续性的要求。同时，欧盟委员会也认可一些第三方的自愿可持续认证体系，如 RSB、ISCC 等。截至 2022 年 5 月，欧盟委员会共批准了 13 个自愿认证体系，只要通过了这些认证体系的认证，生物燃料产品即可在欧盟市场流通（见表）。

表：欧盟认可的可持续标准体系

名称	简介
生物质燃料可持续性自愿认证计划 (Biomass Biofuels voluntary scheme, 2BSvs)	由法国倡议，覆盖大多数类型的生物燃料
更好的生物质能燃料计划 (Better Biomass)	重点关注用于能源、燃料或生物基产品的生物质的可持续性
欧盟 Bonsucro 认证计划 (Bonsucro EU)	重点关注巴西甘蔗生产，对以甘蔗为原料生产的乙醇产品进行认证
国际可持续性和碳认证 (ISCC EU)	全球性倡议，覆盖所有类型生物质和生物燃料，可针对供应链各阶段开展认证
波兰可持续生物燃料认证体系 (KZR INiG system)	波兰生物质和生物燃料认证，在全球范围内运行
可再生能源指令认证体系 (REDCert)	覆盖所有生物燃料
红色拖拉机农场保证可化合作物及甜菜计划 (Red Tractor)	红色拖拉机是英国最大的食品和农场标准计划，覆盖整个食品供应链
可持续生物燃料圆桌会议 (RSB EU RED)	全球性倡议，覆盖所有类型生物质和生物燃料，可针对供应链各阶段开展认证
可信赖大豆圆桌会议 (Round Table on Responsible Soy EU RED, RTRS EU RED)	国际倡议，关注大豆的可持续种植
苏格兰优良作物计划 (Scottish Quality Farm Assured Combinable Crops, SQC)	针对英国北部冬小麦、玉米等农作物的认证体系
农作物贸易保证方案 (Trade Assurance Scheme for Combinable Crops, TASCC)	关注农作物和饲料
通用饲料保证计划 (Universal Feed Assurance Scheme, UFAS)	由英国农业产业联盟发起，确保饲料生产流程完全可追溯
可持续资源自愿计划 (SURE)	证明生物质发电和生产热能的可持续性

来源：欧盟可持续标准体系网站

另外，欧盟委员会还正在审批奥地利农业认证体系（Austrian Agricultural Certification Scheme, AACCS）、美国大豆可持续保障协定-EU（U.S. Soybean Sustainability Assurance Protocol EU, SSAP EU）、可持续生物质项目-仅针对林业生物质的认证（Sustainable Biomass Program, SBP）等标准与认证体系<sup>139</sup>。

除了这些欧盟委员会认可的自愿可持续认证体系外，欧盟一些成员国还建立了自己的国家认证系统或首选的自愿认证系统，如瑞士 etha-STAR 认证、荷兰 NTA8080 认证和绿能认证等。

目前，中国企业生产的生物燃料产品大部分是出口到欧洲市场，因此至少需要取得欧盟认可的这些认证之一。如果产品是出口到某一特定欧盟国家，在获得该国认可但欧盟委员会还没有认可的标准体系后，也可能获准进入该国市场。

### 其他国家

英国为推动其可再生运输燃料义务法（RTFO）的实施，推出了可再生交通燃料认证（Renewable Transportation Fuel Certification, RTFC）。美国在实施《可再生燃料标准》和加州《低

碳燃料标准》等法规过程中，也通过相关联的空气质量法、水质量法等法规对生物燃料的可持续性提出要求。

## 2.2 不同标准与认证体系涵盖的主要内容

整体来说，这些标准体系一方面是核验 SAF 产品是否满足不同地区和国家的相应法规要求，另一方面也对 SAF 在原料取材、生产和利用方式等领域起到规范作用。

不同的政策和标准体系对实现经济、社会和环境可持续发展发展的核心理念是基本一致的，但由于出发点和目标不同，侧重点会有所不同。例如，BLCAO、RSFII 和 LCFS 更着重考虑生物质能的环境影响，并未考虑粮食安全等社会经济方面影响。国际粮农组织则更关心生物质能对粮食安全的影响，在 GBEP 生物质能可持续指标中牵头负责社会维度的指标构建<sup>140</sup>。

针对 SAF 产品，由于其重要作用是推动航空领域的 CO<sub>2</sub> 减排，因此在相关的主要认证体系中，温室气体排放都是认证的一个主要方面。

表：不同生物质能政策及可持续性标准认证体系涵盖的主要内容

名称 Initiatives	环境 Environment						社会与经济 Society & economic			
	生态系统保护 Ecosystem protection	水资源节约和保护 Water conservation & protection	土壤质量和生产力保护 Soil quality and productivity protection	空气质量保护 Air quality protection	温室气体排放 GHG emissions	废弃物管理 Waste management	粮食安全 Food security	农村和社会发展 Rural and social development	其他 Others	
BLCAO	√	√	√	√	√	√				
LCFS				√	√				√	
RED	√	√	√	√	√	√	√		√	
RFSII	√		√	√	√	√				
RTFO	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
SFS			√				√	√		

	名称 Initiatives	环境 Environment						社会与经济 Society & economic		
		生态系统保护 Ecosystem protection	水资源节约 和保护 Water conservation & protection	土壤质量 和生产 力保护 Soil quality and productivity protection	空气质量 保护 Air quality protection	温室气体 排放 GHG emissions	废弃物管 理 Waste management	粮食安 全 Food security	农村和社 会发展 Rural and social development	其他 Others
自愿 标准	GBEP-SIB	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	ISO-SCB	√	√	√	√	√	√	√	√	√
认证 标准	Bonsucro	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	CRBS(DC)	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	FSC-PCFS	√	√	√			√	√	√	√
	ISCC	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	NEF	√			√	√		√	√	√
	RSB Global/ RSB EU RED	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	RSPO- PCSPOP	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	RTRS-PC	√	√	√	√	√	√	√	√	√
SEKAB- VSEI	√	√	√		√			√	√	

备注：“其他”包括就业、性别平等、居民健康等方面。  
来源：根据常世彦、康利平等人的分析及各认证体系的官网信息整理

## 2.3 RSB

### RSB Global Fuel Certification (RSB Global)

RSB Global 认证体系<sup>141</sup>是一个国际标准，在世界范围内有效。RSB 全球燃料认证的使用者包括：在世界任何地区的生物

质生产商、燃料生产商、贸易商、加工商和运输商。RSB 的全球燃料认证体系采用一定原则（见表），规范如何提高长期环境和社会效益的方式从生物质和先进原料生产燃料，界定生产和交易生物燃料和先进燃料的各种程序和方法。

表：RSB认证体系的原则

原则 1	原则 2	原则 3	原则 4	原则 5	原则 6
合法性	规划与监控	温室气体排放	人权和劳工权利	农村和社会发展	地方粮食安全
原则 7	原则 8	原则 9	原则 10	原则 11	原则 12
节约	土壤	水	空气质量	技术、投入、浪费	土地权

来源：RSB

RSB Global 可对由以下原料制成的燃料进行认证：

- 初级生物质（如油料或糖料作物）
- 来自报废产品和生产残留物的生物质（如废弃食用油、农业残留物、动物脂肪）
- 基于化石的报废产品（如废塑料、用过的溶剂）
- 非生物来源的可再生液体和气体燃料
- 生物燃料与化石燃料协同处理

### RSB EU RED Fuel Certification (RSB EU RED)

RSB EU RED<sup>142</sup> 是 RSB 针对为在欧盟区域内或与欧盟进行贸易的燃料生产商、贸易商、加工商和运输商设计的。它被欧盟委员会认可，以证明其符合欧盟可再生能源指令 (RED) 的要求。

RSB EU RED 可对由以下原料制成的燃料进行认证：

- 初级生物质（如油料或糖料作物）
- 来自报废产品和生产残留物的生物质（如废弃食用油、农业残留物、动物脂肪）

### RSB CORSIA Certification (RSB CORSIA)

针对 CORSIA 系统，RSB 设计了 RSB CORSIA 体系<sup>143</sup>，以认证原料提供商、炼油厂和贸易商提供的 SAF 产品符合 CORSIA 的要求，该标准于 2020 年 12 月获得 ICAO 认可。

RSB CORSIA 可对由以下原料制成的燃料进行认证：

- 初级生物质（如油料或糖料作物）
- 来自报废产品和生产残留物的生物质（如废弃食用油、农业残留物、动物脂肪）
- 城市固体废物

## 2.4 ISCC

ISCC 是一个由来自 30 多个国家的 200 多个成员共同管理的多利益相关方倡议型的认证体系<sup>144</sup>。整体来说，ISCC 认证体系的原则和涵盖的产品及原料种类有一定类似性。

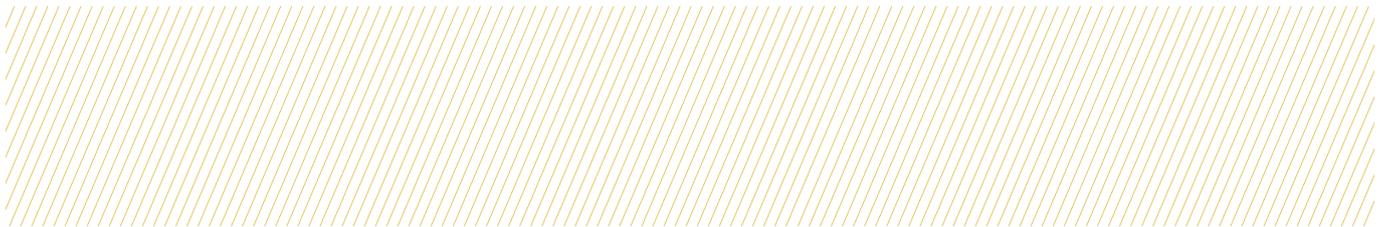
目前，ISCC 提供两种认证方案来满足不同市场的需求：

- ISCC EU，用于认证产品符合欧盟的可再生能源指令 (RED) 和燃料质量指令 (FQD) 的法律要求。
- ISCC PLUS，针对非监管市场的自愿认证，涵盖全球范围内的食品、饲料和工业应用，以及非欧盟市场的生物燃料。

针对 CORSIA 系统，ISCC 专门设计了 ISCC CORSIA Certification 体系，以认证航空燃料产品符合 CORSIA 要求的 SAF 相关要求。截至目前，ISCC 已经签发了 20 份符合该标准的证书<sup>145</sup>。

## 附录2

# SAF商业运营模式案例—国泰航空



国泰航空在 SAF 应用推广中做了积极探索。为实现国泰航空承诺的 2030 年将 SAF 使用量提升至总燃料消耗水平 10% 的目标，国泰航空于 2022 年启动了“企业可持续航空燃料计划”，是亚洲首个此类计划之一<sup>146、147</sup>。

在该计划中的试点阶段，国泰航空作为主要推动方，与 SAF 产业链中的八家利益相关方共同启动该计划，包括友邦保险、香港机场管理局（AAHK）、DHL 全球货运、汇丰银行、近铁世界快运（KWE）、普华永道中国、渣打银行和太古公司，并获得来自这八家启动企业的资金支持。

具体的运营模式包括：

- 商业运营机制：在供应端，国泰航空以高于传统航油的价格向航油供应商（中石油和壳牌）采购一定数量的经过认证的 SAF，这批 SAF 经过掺混后与传统航油一起进入香港国际机场的航油供应系统，供应所有从该机场起飞的航班。使用这些 SAF 而产生的减排贡献，被折算成相应的“减排量”，由国泰航空拥有。在需求端，除国泰航空以外的八家启动企业已经承诺在 SBTi（科学碳目标倡议）<sup>148</sup> 下自愿减少商旅出行的碳排放，因此在与国泰航空签订协议后，根据协议规定的内容向国泰航空提供一定资金，购买使用 SAF 产生的“减排量”，并用于抵消在 SBTi 下承诺的自愿减排责任。国泰航空为其颁发碳减排证书和可持续性证明。

- SAF 供应及加注形式：在试点阶段，SAF 由中石油和壳牌这两家燃料供应商提供。SAF 分别在大连和新加坡与传统航油进行掺混（掺混率约为 35% ~ 40%），然后进口到香港，进入香港机场的航油供应系统。中石油和壳牌分别确认其供应的 SAF 已经获得相关适航认证和可持续性认证。
- SAF 航班：SAF 直接进入机场的整体航油供应系统，并没有专门的 SAF 供应管道，也并非只为国泰航空的航班进行加注，因此并没有特定的“SAF 航班”。普通消费者（乘客）是否乘坐加注了 SAF 的航班不受约束，且乘坐加注了 SAF 的航班的乘客不需要格外支付 SAF 与传统航油的差价。
- 机场的支持行动：香港国际机场提前与壳牌和中石油沟通达成协议后，允许 SAF 进入机场的航油加注系统，并完全利用机场现有的航空燃料基础设施为航班进行加注。
- SAF 使用规模及试点：通过此计划，国泰航空已在 2022 年 4-8 月使用数百吨 SAF。为达到国泰航空制定的 2030 年 SAF 使用量提升至其总航油消耗量 10% 的目标，在未来几年，国泰航空将继续与全球多家航油供应商进行合作。

## 附录3

# 欧美机场探索SAF产业链联合行动案例

本部分通过分析国际上部分机场联合上下游合作伙伴共推 SAF 的行动经验，阐述不同利益相关方联合行动的必要性和重要性。

机场作为航空活动重要的物理节点，为航空活动提供了基础设施和航油加注地点，是 SAF 推动过程至关重要的一环。从 2008 年至今，全球已经有超过 45 家航空公司的 43 万多架次航班使用了 SAF<sup>149,150</sup>，机场为这些航班的 SAF 加注提供了场地和基础设施。

### 1. 美国西雅图塔科马国际机场

美国华盛顿州的西雅图塔科马国际机场 (Sea-Tac) 是世界上在 SAF 的推广上具有代表性的机场之一，该机场由政府机构西雅图港负责管理和运营。

为了减少对化石燃料的依赖并帮助航空公司过渡到使用 SAF 的阶段，以及减少对当地社区的环境影响，Sea-Tac 制定了到 2028 年为每一架在该机场加注航油的航班提供至少掺混 10%SAF 的目标<sup>151</sup>。采取的具体措施如下：

#### 1) 研究机场 SAF 相关基建最佳位置

西雅图港首先在 2016 年与阿拉斯加航空和波音公司合作开展了一项 25 万美元的生物燃料基础设施可行性研究项目；2017 年 1 月发布了研究结果，确定最佳基础设施建设方案<sup>152,153</sup>。

#### 2) 研究并提出支持 SAF 的资金来源

继生物燃料基础设施可行性研究之后，西雅图港又联合多家机构，自 2016 年 10 月起共同研究一种长效融资机制来弥补 SAF 与传统燃料之间的差价<sup>154</sup>。西雅图港希望通过研究让所有航空公司以简单和具有成本效益的方式获得 SAF，并在理想情况下创建一种适用于美国各地机场的模式。

研究成果在 2017 年 7 月发布，包括机场的资金来源和长期资助机制的建议等，以便为 Sea-Tac 的所有航空公司提供具有成本效益和实用性的 SAF<sup>155</sup>。通过向 SAF 发出稳定的需求信号，西雅图港激励 SAF 生产商在该地区发展产能。由于美国的机场不能支付航空燃油费用，因此西雅图港不能直接使用资金购买 SAF，但能够用资金支持 SAF 产业链各方。在 Sea-Tac 实现 1%SAF 使用所需的资金约 600 万美元，可以通过多种共同利益筹资机制（该研究共提出 14 种 SAF 筹资机制）的组合达成<sup>156</sup>，如：

- 企业支持：建立企业赞助模式，使当地公司能够通过乘坐 SAF 航班减少其飞行碳足迹。（每年抽出 100-200 万美元）
- 西雅图港税务局：资金用于支持空气质量效益，类似于西雅图港的清洁卡车计划。（每年抽出 36-72 万美元）
- 使用一般非航空收入：停车费、陆上运营费、汽车租赁等属于非航空收入，这些非航空收入甚至比航空收

入高。（每年抽出 100-400 万美元）

- 航空公司协议：与航空公司共同建立基金，或通过已有航空公司的协议另建新的基金（每年抽出 38-150 万美元）。

### 3) 制定 SAF 发展目标和工作计划

在此之后，西雅图港对 SAF 开始了更有目标性的推动。其于 2017 年 12 月提出 SAF 发展目标：在十年内将至少有 10% 的 SAF 在当地生产，到 2050 年将这一比例提高至 50%。为此，2018 年 5 月，西雅图港与包括阿拉斯加航空、达美航空等在内的 13 家航空公司共同制定了一项工作计划，在 Sea-Tac 为所有航空公司提供 SAF 服务，并于同年 11 月，在西雅图港 2019 年预算中编入了 500 万美元预算以支持制定该 SAF 工作计划。Sea-Tac 为使用其机场的航空公司每年可加注约 7 亿加仑（211.5 万吨）的传统航油，10% 的 SAF 掺混率相当于减少 7000 万加仑（21.15 万吨）的传统航油，约等于帮助航空公司减少 682,500 吨的温室气体排放<sup>157</sup>。

## 2. 挪威奥斯陆机场

2016 年 1 月，奥斯陆机场成为世界上第一个为航空公司提供常规 SAF 加注的机场。在实施阶段，挪威机场运营商 Avinor 与 SkyNRG 和 Air bp 合作共同签订 SAF 承购协议。Avinor 在商业承购协议中发挥了关键作用，其在 10 年期间（2013-2022 年）拨款高达 1041 万美元用于帮助实现挪威生物燃料的倡议和项目。

德国汉莎航空公司、北欧航空公司和荷兰皇家航空公司也签约参与了该协议，采购了 125 万升 SAF 并在奥斯陆机场加注。除这三家航空公司外，所有降落在该机场的航空公司均可以在通过机场的加油车加注生物航油。通过该项目，一是为了证明生物航油可以在商业基础上提供给所有航空公司，二是证明生物航油可以完全与机场的常规航空燃料混合并供应，利用机场现有的物理基础设施，并不需要分隔的基础设施<sup>158</sup>。

## 3. 瑞典斯德哥尔摩阿兰达机场

瑞典斯德哥尔摩阿兰达机场由瑞典最大的机场运营商 Swedavia 负责运营。Swedavia 这些年来通过加入 Fly Green Fund 和公开招标等方式联合多家利益相关方共同采购 SAF。

SkyNRG、北欧可持续航空倡议（NISA）和卡尔斯塔德机场于 2015 年创立 Fly Green Fund。该基金会旨在让公司、公共组织和个人通过该基金会购买 SAF，以减少其航空碳排放。基金会中 75% 的资金用于购买和交付 SAF，其余 25% 的资金用于开发 SAF 在北欧地区的供应链<sup>159</sup>。Swedavia 同年作为启动合作伙伴加入，并成为企业客户，通过该基金会为其所有商务航班购买 SAF，每年支出约 104 万美元<sup>160</sup>。2017 年 1 月，斯德哥尔摩阿兰达机场开始收到交付的 SAF，SAF 由美国生物炼油厂 Altair Fuels 生产，由 SkyNRG 和 Air bp 负责供应<sup>161</sup>。

2020 年通过年度公开招标，Swedavia 与其他合作伙伴共同采购了 210 吨 SAF，相当于 9000 次飞行（700 公里）；2021 年，Swedavia 连续第二年邀请合作伙伴参加 SAF 的联合招标，由于疫情造成客源大量流失的情况，本次仅采购了 45 吨 SAF。这些采购的 SAF 均由 Neste 生产，Air bp 负责供应，基于现有的飞机技术和机场基础设施，在斯德哥尔摩阿兰达机场进行 50% 的 SAF 掺混和加注<sup>162,163</sup>。

## 4. 经验小结

机场在部署 SAF 方面的协调作用不可小觑。美国 Sea-Tac 除了投入预算支持 SAF 发展外，也利用其丰富的航空公司、燃料供应商、政府和社区资源来支持 SAF 发展的进一步扩大。挪威奥斯陆机场联合 SAF 供应商和欧洲多家航空公司，通过机场奖励的方式，为 SAF 供应商支付额外的物流成本，也为在机场中掺混的 SAF 提供资金补助；瑞典斯德哥尔摩阿兰达机场通过联合多方共创基金和公开联合招标的方式，共推 SAF。

由机场带动 SAF 全产业链利益相关方共同发展 SAF 的方式，为中国提供了有益的借鉴和应用经验。然而，中国内地的机场运营模式及与上下游参与方的合作模式，与国外不尽相同。因此，中国内地在推动 SAF 整个产业链共同发展时可结合自身特点，机场不一定作为牵头方，而是由利益相关方中更能带动全产业链发展的一方牵头，联合其他相关方共同推动。

# 尾注

- 1 ICAO. Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis [EB/OL]. (2022-06-10). [https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO\\_Coronavirus\\_Econ\\_Impact.pdf](https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf).
- 2 ICAO. Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation [EB/OL]. (2022-01-17). <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>.
- 3 ICAO. 2021 global air passenger totals show improvement from 2020, but still only half pre-pandemic levels [EB/OL]. (2022-01-17). <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/2021-global-air-passenger-totals-show-improvement.aspx>.
- 4 IATA. Passenger Demand Recovery Continued in 2021 but Omicron Having Impact [EB/OL]. (2022-01-25). <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-01-25-02/>.
- 5 IATA. Air Passenger Market Analysis [EB/OL]. (2021-12). <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-monthly-analysis---december-2021/>.
- 6 IATA. The impact of the war in Ukraine on the aviation industry [EB/OL]. (2022-03-25). <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/economic-impact-conflict-russia-ukraine-aviation/>. 俄罗斯国内客运需求在 2021 年增长，但自 2022 年 2 月爆发俄罗斯 - 乌克兰冲突以来，俄罗斯国内和国际客运均大幅下降。
- 7 ICAO. Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation [EB/OL]. (2022-01-17). <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>;
- 8 IATA. Air Passenger Numbers to Recover in 2024 [EB/OL]. (2022-03-01). <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>.
- 9 ICAO. 2021 global air passenger totals show improvement from 2020, but still only half pre-pandemic levels [EB/OL]. (2022-01-17). <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/2021-global-air-passenger-totals-show-improvement.aspx>.
- 10 ICAO. Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation [EB/OL]. (2022-01-17). <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>.
- 11 中国民用航空局 . 2020 年民航行业发展统计公报 . (2021-06-10). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/index\\_1214.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/index_1214.html). 本节所涉及中国市场的数据，除另外说明外，均来自历年中国民航行业发展统计公报。
- 12 中国民用航空局 . 2021 年民航行业发展统计公报 . (2021-05-18). [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/index\\_1214.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/index_1214.html).
- 13 ICAO. Economic Impacts of COVID-19 on Civil Aviation [EB/OL]. (2022-01-17). <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Economic-Impacts-of-COVID-19.aspx>;
- 14 ICAO. Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis [EB/OL]. (2022-06-10). [https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO\\_Coronavirus\\_Econ\\_Impact.pdf](https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf).
- 15 Climate Action Tracker. CAT net zero target evaluations [EB/OL]. (2021-11-09). <https://climateactiontracker.org/global/cat-net-zero-target-evaluations/>. 在主要排放国中，目前仅印度把实现净零排放的目标年定在 2070 年，其他大多数国家定在 2050 年前后，部分国家定在 2060 年前后；中国定在 2060 年。
- 16 国务院新闻办公室 . 中国应对气候变化的政策与行动白皮书 [R/OL]. (2021-10-27). [http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content\\_5646697.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content_5646697.htm).
- 17 IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (full report, final draft version) [R/OL]. [2022-04-04]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- 18 IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (full report, final draft version) [R/OL]. [2022-04-04]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.
- 19 联合国 . 政府间气候变化专门委员会 : 不立即进行深度减排，将全球变暖限制在 1.5°C 将毫无可能 [EB/OL]. (2022-04-04). <https://news.un.org/zh/story/2022/04/1101222>.
- 20 IEA. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 [R/OL]. (2022-03). <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>. 本小节所涉及能源和工业过程相关的 CO2 排放数据，除另有说明外，均来自 IEA。
- 21 IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (full report, final draft version) [R/OL]. [2022-04-04]. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. 备注：关于航空业 CO2 排放量及其在全球总排放中的占比，不同机构在统计口径和方法上有所不同，所得结果亦有差异。如 IEA 称 2019 年航空业 CO2 排放约 10 亿吨，占全球化石燃料燃烧产生 CO2 排放总量的 2.8% (<https://www.iea.org/reports/tracking-aviation-2020>)。Air Transport Action Group (ATAG) 称全球航空业 CO2 排放占所有人为 CO2 排放的 2.1% (<https://www.atag.org/facts-figures>)。Our World in Data 网站参考其他不同来源，采用的数据称 2016 年航空业温室气体排放占全球所有温室气体排放的 1.9%，2018 年 CO2 排放占全球 CO2 的 2.1% (<https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>)。D.S.Lee 等学者认为如果考虑所有 CO2 和非 CO2 温室气体对于全球升温的影响，航空业所占的贡献会占到 3-4% (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>)。综合考虑各类不同数据来源，本报告采用 IPCC 数据。
- 22 ICAO. 国际民用航空二氧化碳减排长期理想目标 (LTAG) 可行性报告 ICAO-LTAG report Appendix R3: Results in the Climate Science Context [R/OL]. [2022-03-28]. <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Pages/LTAGReport.aspx>.
- 23 关于中国不同行业 (包括航空业) 的碳排放，国内外有研究机构根据不同方法学和数据源进行推算，结果有时会有差异。本报告则采用中国民航局公布的相关数据进行测算。
- 24 业界一般也将“航油”称为“航煤” (航空煤油)，本报告主要称之“煤油”。
- 25 ICAO. Long term global aspirational goal (LTAG) for international aviation [EB/OL]. [2022.10.11]. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>
- 26 ICAO. State adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations. [2022.10.11]. <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-net-zero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>
- 27 ICAO. State Action Plans and Assistance [EB/OL]. [2022-08-02]. [https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange\\_ActionPlan.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange_ActionPlan.aspx).
- 28 ICAO. Aviation Net Zero [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/SAC/Lists/Aviation%20Net%20Zero/ProjectViewNZ.aspx#fnviewHashaf64a02-c0cb-4e19-a273-65956a587e8c>.
- 29 IATA. Net-Zero Carbon Emissions by 2050 [EB/OL]. (2021-10-04) [2022-04-15]. <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>.
- 30 IATA. Our Commitment to Fly Net Zero by 2050 [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>.
- 31 IATA. 2050: Net-zero carbon emissions [EB/OL]. (2021-12-01). <https://airlines.iata.org/analysis/2050-net-zero-carbon-emissions>.
- 32 Aviation Benefits Beyond Borders. Aviation industry reducing its environmental footprint [EB/OL]. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/>.
- 33 ICAO. Climate Change [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/climate-change.aspx>.
- 34 Aviation Benefits Beyond Borders. Waypoint 2050 [EB/OL]. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>.
- 35 Aviation Benefits Beyond Borders. Aviation industry reducing its environmental footprint [EB/OL]. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/>.
- 36 WEF. Deploying Sustainable Aviation Fuels at Scale in India: A Clean Skies for Tomorrow Publication [R/OL]. (2021-06-10). <https://www.weforum.org/reports/deploying-sustainable-aviation-fuels-at-scale-in-india-a-clean-skies-for-tomorrow-publication/>.
- 37 关于相关可持续标准和技术标准，参见本报告附录。
- 38 IATA. Our Commitment to Fly Net Zero by 2050 [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>.
- 39 IATA. Our Commitment to Fly Net Zero by 2050 [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>.
- 40 IATA. Net-Zero Carbon Emissions by 2050 [EB/OL]. (2021-10-04) [2022-04-15]. <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>.
- 41 Aviation Benefits Beyond Borders. Waypoint 2050 [EB/OL]. (2021-09). <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>.
- 42 IATA. Our Commitment to Fly Net Zero by 2050 [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>. 不同的情景分析对 SAF 的需求预测会有不同，如 ATAG 在其报告 Waypoint 2050 中的一个情景中，SAF 在 2050 年的应用量将达到 44500 万吨，占总航空燃料的 90%。 <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>
- 43 IATA. Net-Zero Carbon Emissions by 2050 [EB/OL]. (2021-10-04) [2022-04-15]. <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>.
- 44 IATA. Our Commitment to Fly Net Zero by 2050 [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/flynetzero/>.
- 45 IATA. Fact Sheet-Sustainable Aviation Fuel [EB/OL]. [2022-06-24]. [https://www.iata.org/contentassets/b3783d24c5834634af59148c718472bb/factsheet\\_saf.pdf](https://www.iata.org/contentassets/b3783d24c5834634af59148c718472bb/factsheet_saf.pdf)
- 46 ICAO. ICAO Global Framework for Aviation Alternative Fuels [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/default.aspx>.

- 47 详见本报告附录。
- 48 World Economic Forum. Guidelines for a Sustainable Aviation Fuel Blending Mandate in Europe [R/OL]. (2021-07-13). <https://www.weforum.org/reports/guidelines-for-a-sustainable-aviation-fuel-blending-mandate-in-europe>.
- 49 The White House. FACT SHEET: Biden Administration Advances the Future of Sustainable Fuels in American Aviation [EB/OL]. (2021-09-09). <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation/>.
- 50 马德超,柳华,夏祖西.放管服改革下通航适航审定的实践与思考[J].管理观察,2019(32):92-94.
- 51 戴钧.对通航适航管理的认识[J].民航科技,2011(2):102-104.
- 52 李顶杰,张丁南,李红杰,朱建军.中国生物柴油产业发展现状及建议[J].国际石油经济,2021,29(08):91-98.
- 53 民航局综合司.“十四五”民航绿色发展专项规划[EB/OL].(2021-12-27).<http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3e.pdf>.
- 54 中国民航局.图解|《“十四五”民航绿色发展专项规划》[EB/OL].(2022-01-27).[http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZCJD/202201/t20220127\\_211348.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZCJD/202201/t20220127_211348.html).
- 55 国家发展改革委.“十四五”生物经济发展规划[EB/OL].(2021-12-20).[http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content\\_5689556.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm).
- 56 中华人民共和国可再生能源法[EB/OL].[http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-06/21/content\\_8275.htm](http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-06/21/content_8275.htm)
- 57 国家发展改革委.“十四五”生物经济发展规划[EB/OL].(2021-12-20).[http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content\\_5689556.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm).
- 58 戴钧.对通航适航管理的认识[J].民航科技,2011(2):102-104.
- 59 杨智渊,曾萍,杨晓奕,钱璟,汪必耀.生物航煤的管理、验证标准及验证流程[J].航空动力学报,2018,33(02):440-447.
- 60 中国民用航空局.CCAR-21-2007民用航空产品和零部件合格审定规定[S].北京:中国民用航空局,2007:1-8.
- 61 中国民航局.中国民航局完成中国石化1号生物航煤的适航审定工作并颁发证件.(2014-02-12).[http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/201402/t20140212\\_13732.html](http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/201402/t20140212_13732.html).
- 62 中国民用航空局.民用航空器适航委任代表和委任单位代表的规定:CCAR-183-1997[S].北京:中国民用航空局,1997:1-6.
- 63 中国民航局.中国民航局完成中国石化1号生物航煤的适航审定工作并颁发证件.(2014-02-12).[http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/201402/t20140212\\_13732.html](http://www.caac.gov.cn/XWZX/MHYW/201402/t20140212_13732.html).
- 64 “含合成烃的民用航空喷气燃料”,即通常所说的生物航油。按 CTSO-2C701 标准的定义,“含合成烃的民用航空喷气燃料”是指含传统喷气燃料和合成石蜡煤油(Synthesized Paraffinic Kerosine, SPK)组分的喷气燃料。其中,所使用的 SPK 按照 FT 或 HEFA 工艺生产。
- 65 中国民航局航空器适航审定司.适航审定运行管理系统[EB/OL].<https://amos.caac.gov.cn/#/home>
- 66 国家能源局.关于生物柴油政策的咨询[EB/OL].(2021-08-31).[http://www.nea.gov.cn/2021-08/31/c\\_1310158873.htm](http://www.nea.gov.cn/2021-08/31/c_1310158873.htm).
- 67 国家能源局.《煤矿井下强制增透工程设计规范》等 356 项能源行业标准[EB/OL].(2021-12-22).[http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/22/c\\_1310420968.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2021-12/22/c_1310420968.htm).
- 68 一代生物柴油通过将植物油、地沟油等原料中的脂肪酸甘油三酯与小分子醇(如甲醇)发生酯交换反应,生成脂肪酸甲酯。HVO(烃基生物柴油或氢化植物油,有时也被称为二代生物柴油)是在一代生物柴油的基础上进行加氢脱氧处理和异构化处理所得,主要成分为烷烃。HVO 生产工艺与一代生物柴油有较大差异,但与 SAF 生产工艺相似。在具备加氢和异构装置后,生产 HVO 的装置可较容易制备 SAF。
- 69 中国化工信息中心、全国生物柴油行业协作组.中国生物柴油 2022 年第 1 期[R/OL].(2022-03-21).<https://www.chnbd.org/cms/ui/content/show?ID=694777>
- 70 Argus. Argus sustainable aviation fuels [EB/OL]. <https://www.argusmedia.com/en/hubs/sustainable-aviation-fuels>.
- 71 北京海新能源科技股份有限公司:前称为“北京三聚环保新材料股份有限公司”,于 2022 年 7 月 15 日变更为现名。
- 72 本报告所列企业和机构并未囊括所有涉足 SAF 的单位,比如有媒体报道其他企业也有 SAF 规划,但由于未经核实具体项目情况,故未包含在本报告中。
- 73 中国石化化工股份有限公司.2020 中国石化可持续发展报告[R/OL].(2021-03-29).<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2021-03-29/1209468045.PDF>.
- 74 中国新闻网.中国自主研发生物航煤首次跨洋飞行成功[EB/OL].(2017-11-22).<https://www.chinanews.com.cn/m/business/2017/11-22/8382715.shtml>.
- 75 易高.公司简介[EB/OL]. [2022-04-28]. [http://www.eco.com.cn/about\\_overview.aspx](http://www.eco.com.cn/about_overview.aspx).
- 76 香港中华煤气有限公司.2021 年年报[R/OL]. [2022-04-22]. <https://www.towngas.com/tc/Investor-Relations/Financial-Information?type=Annual-Report&year=all>.
- 77 香港中华煤气有限公司.2021 年环境、社会及管治报告[R/OL]. [http://file.finance.sina.com.cn/hkdata98/hk/hk\\_realtime\\_announcement/news/20220420/10218156-0.PDF](http://file.finance.sina.com.cn/hkdata98/hk/hk_realtime_announcement/news/20220420/10218156-0.PDF)
- 78 香港中华煤气有限公司.2021 年年报[R/OL]. [2022-04-22]. <https://www.towngas.com/tc/Investor-Relations/Financial-Information?type=Annual-Report&year=all>.
- 79 根据香港中华煤气有限公司 2021 年环境社会及管治报告披露的信息,其“期望即将生产可持续航空燃料”,但未明确说明具体投产的时间和规模。另据媒体报道,2022 年 3 月 16 日,中国石油国际事业有限公司运输一批 SAF 到香港 PAFF 码头完成卸货并输往香港国际机场, <http://news.cnpc.com.cn/system/2022/03/24/030063130.shtml>。这批 SAF 有可能是由易高张家港工厂生产,由中石油完成掺混并供应香港,但易高尚未对此信息进行确认。
- 80 易高环保投资有限公司.香港航空燃油储存库[EB/OL].[http://www.eco.com.cn/business\\_detail.aspx?id=7](http://www.eco.com.cn/business_detail.aspx?id=7).
- 81 香港中华煤气有限公司.2021 年年报[R/OL]. <https://www.towngas.com/tc/Investor-Relations/Financial-Information?type=Annual-Report&year=all>.
- 82 海新能科.公司简介[EB/OL]. <http://www.sanju.com/corporate/>.
- 83 利安达会计师事务所(特殊普通合伙).利安达会计师事务所(特殊普通合伙)关于北京三聚环保新材料股份有限公司对深圳证券交易所创业板公司管理部 2020 年年报问询函之回复的核查意见[R/OL].(2021-05).<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2021-05-31/1210130987.PDF>.
- 84 龙岩卓越新能源股份有限公司.企业简介[EB/OL]. [http://www.zyxy.com/text\\_12.html](http://www.zyxy.com/text_12.html).
- 85 龙岩卓越新能源股份有限公司.龙岩卓越新能源股份有限公司 2021 年年度报告[R]. [2022-04-22].
- 86 安信证券.碳减排生物柴油龙头,对标 NESTE 有望快速成长[R/OL].(2022-02-14) [2022-04-22]. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202202141546983938\\_1.PDF](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202202141546983938_1.PDF)
- 87 中国航空油料集团有限公司.集团介绍[EB/OL]. [2022-06-10]. <https://www.cnaf.com/index.html>.
- 88 第六次是国泰航空从法国接新飞机返香港,见表 5-4。
- 89 Shell. Cutting Emissions from Aviation [EB/OL]. [2022-04-28]. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/decarbonising-aviation.html#vanity-aHR0CHM6Ly93d3c2h1bGwY29tLORiY2FyYm9uaXNpbmdBdmllhdGlvbi5odGls>.
- 90 Shell. 航空脱碳:壳牌的航空之路[R/OL].(2021). [2022-04-28]. [https://www.shell.com/zh\\_cn/energy-and-innovation/the-energy-future/decarbonising-aviation.html](https://www.shell.com/zh_cn/energy-and-innovation/the-energy-future/decarbonising-aviation.html).
- 91 Shell. Sustainable Aviation Fuel [EB/OL]. [2022-04-28]. <https://www.shell.com/business-customers/aviation/the-future-of-energy/sustainable-aviation-fuel.html>
- 92 Shell. Sustainable Aviation Fuel [EB/OL]. [2022-04-28]. <https://www.shell.com/business-customers/aviation/the-future-of-energy/sustainable-aviation-fuel.html>
- 93 Aviation Benefits Beyond Borders. Sustainable aviation fuel [EB/OL]. [2022-05-24]. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/sustainable-aviation-fuel/>
- 94 IATA. Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF) [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>.
- 95 IATA. Fact Sheet-Sustainable Aviation Fuel [EB/OL]. [2022-06-24]. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-fact-sheet-2019.pdf>
- 96 Aviation Benefits Beyond Borders. The leading edge [EB/OL]. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/sustainable-aviation-fuel-the-leading-edge/>.
- 97 国泰航空.企业可持续航空燃油计划[EB/OL]. [2022-06-27]. [https://www.cathaypacific.com/cx/zh\\_HK/about-us/sustainability/climate-action/corporate-sustainable-aviation-fuel-programme.html](https://www.cathaypacific.com/cx/zh_HK/about-us/sustainability/climate-action/corporate-sustainable-aviation-fuel-programme.html).
- 98 中国民用航空局.2021 年民航行业发展统计公报.(2022-05-18) [2022-06-10]. [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/index\\_1214.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/index_1214.html).
- 99 The Boeing Company. 波音 2021 年可持续公报[R/OL]. [https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/data/2021\\_Boeing\\_Sustainability\\_Report.pdf](https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/data/2021_Boeing_Sustainability_Report.pdf).
- 100 Sustainable Aviation. Sustainable Aviation Fuels Road-Map [R/OL]. [https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation\\_FuelReport\\_20200231.pdf](https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation_FuelReport_20200231.pdf)
- 101 Boeing China Newsletter. 第 800 架交付给中国的波音飞机 [EB/OL]. (2010-09). [http://www.boeing.cn/presenter/newsletter/2010-9\(1\).pdf](http://www.boeing.cn/presenter/newsletter/2010-9(1).pdf).
- 102 波音中国官方微博.波音采购 750 万升 SAF 用于民用业务运营. <https://mp.weixin.qq.com/s/dj0I1z7gNOJWcETdFcySQ>.

- 103 Boeing. 波音 2022 年可持续公报 [R/OL]. [https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/data/2022\\_Boeing\\_Sustainability\\_Report.pdf](https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/principles/sustainability/assets/data/2022_Boeing_Sustainability_Report.pdf).
- 104 Sustainable Aviation. Sustainable Aviation Fuels Road-Map [R/OL]. [https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation\\_FuelReport\\_20200231.pdf](https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation_FuelReport_20200231.pdf)
- 105 Airbus. Sustainable Aviation Fuel [EB/OL]. <https://www.airbus.com/en/sustainability/environment/climate-change/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel>.
- 106 CAPA. Air Total Supplier Profiles [EB/OL]. <https://centreforaviation.com/data/profiles/suppliers/air-total>.
- 107 Airbus. Environmental responsibility- A lifecycle approach to environmental impact [EB/OL]. <https://www.airbus.com/en/sustainability/environment/environmental-responsibility>.
- 108 Airbus. Sustainable Aviation Fuel [EB/OL]. <https://www.airbus.com/en/sustainability/environment/climate-change/decarbonisation/sustainable-aviation-fuel>.
- 109 国家能源局. 中国商飞携手波音公司成立航空节能减排技术中心 [EB/OL]. (2012-08-17). [http://www.nea.gov.cn/2012-08/17/c\\_131792255.htm](http://www.nea.gov.cn/2012-08/17/c_131792255.htm).
- 110 Boeing. 波音与中国商飞合作将“地沟油”转化成航空生物燃料 [EB/OL]. [http://www.boeing.cn/presscenter/news\\_letter/index.php?pid=602](http://www.boeing.cn/presscenter/news_letter/index.php?pid=602).
- 111 COMAC. 中国商飞与波音签署新合作协议 [EB/OL]. [http://www.comac.cc/dmt/mtzl/xwtg/201611/02/t20161102\\_4455215.shtml](http://www.comac.cc/dmt/mtzl/xwtg/201611/02/t20161102_4455215.shtml).
- 112 ICAO. GFAAF-Airports [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Airports.aspx>.
- 113 关于四类技术路线, 详见本报告第三章。
- 114 中国科学院. 我国开展十万吨级液态阳光工业化 [EB/OL]. (2022-02-28). [https://www.cas.cn/kx/kpwz/202202/t20220228\\_4826431.shtml](https://www.cas.cn/kx/kpwz/202202/t20220228_4826431.shtml).
- 115 中国科学院大连化学物理研究所. 【能源评论】液态阳光: 碳减排的中国智慧——访中国科学院院士李灿 [EB/OL]. (2021-03-03). [http://www.dicp.cas.cn/xwdt/mtcf/202103/t20210303\\_5967940.html](http://www.dicp.cas.cn/xwdt/mtcf/202103/t20210303_5967940.html).
- 116 界面新闻. “液态阳光”技术走出实验室, 为工业减碳提供技术路径 [EB/OL]. <https://m.jiemian.com/article/6935797.html>.
- 117 部分企业在新闻报道中有新建 SAF 产能计划, 但具体规划不详, 不确定性较大, 故未纳入本报告分析中。
- 118 除了 HEFA 路线的可能产能外, AtJ 或 G-FT 路线在 2025 年前也有可能出现首批产能, 但尚存在较大不确定性, 故暂未包含在本报告的分析中。
- 119 绿氢生产 SAF 的技术路线在中国离商业化尚远, 能源作物在中国发展的前景具有较大不确定性, 故其原料分析均未包含在本报告中。
- 120 田宜水, 单明, 孔庚, 麻林巍, 邵恩等. 我国生物质经济发展战略研究 [J/OL]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 133-140. <https://www.engineering.org.cn/ch/10.15302/J-SSCAE-2021.01.004>.
- 121 同上. 业界关于农业和林业废弃物可利用量的估算相差较大, 本报告采用相对保守的估算。
- 122 同上. 另有研究认为可能源化利用的林业生物质资源可达 3 亿吨 (<https://www.engineering.org.cn/ch/article/20101206001>), 本报告采用较保守的预估量 1.95 亿吨。
- 123 住房和城乡建设部. 2020 年城乡建设设计年鉴. <https://www.mohurd.gov.cn/file/2021/20210102/dae27f9eb22debf6d1e7965040b76f.zip>.
- 124 边际土地指不能用于粮食生产但可以种植抗逆性强的能源作物的荒地和低质农田。
- 125 EUR-Lex. DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL [EB/OL]. (2018-12-11). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.OI.0082.OI.ENG&toc=OJ.L.:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.OI.0082.OI.ENG&toc=OJ.L.:2018:328:TOC).
- 126 European Commission. Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II) [EB/OL]. <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii-en>.
- 127 European Commission. Sustainable aviation fuels – ReFuelEU Aviation [EB/OL]. [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Sustainable-aviation-fuels-ReFuelEU-Aviation\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-Sustainable-aviation-fuels-ReFuelEU-Aviation_en).
- 128 EPA. Summary of the Energy Independence and Security Act [EB/OL]. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-independence-and-security-act>.
- 129 U.S. Department of Energy. Summary of the Energy Independence and Security Act [EB/OL]. <https://afdc.energy.gov/laws/eisa>.
- 130 IATA. Net zero 2050 sustainable aviation fuels [EB/OL]. <https://www.iata.org/flightzero/>.
- 131 国家能源局. 关于生物柴油政策的咨询 [EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2021-08/31/c\\_1310158873.htm](http://www.nea.gov.cn/2021-08/31/c_1310158873.htm).
- 132 The White House. FACT SHEET: Biden Administration Advances the Future of Sustainable Fuels in American Aviation [EB/OL]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation/>.
- 133 Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge [EB/OL]. <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge>.
- 134 ASTM. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons [EB/OL]. <https://www.astm.org/d7566-21.html>.
- 135 ASTM. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels [EB/OL]. <https://www.astm.org/d1655-21.html>.
- 136 ICAO. Conversion processes [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>.
- 137 能源与交通创新中心, 康利平等. 国际生物燃料可持续标准与政策背景报告 [R/OL]. (2013-05). 2016091458029109.pdf (icet.org.cn). 该报告对国际生物燃料认证体系做了较系统的整理和分析。本报告基于这些分析, 对相关认证体系在近几年的更新信息做了概要性梳理。
- 138 常世彦, 康利平. 国际生物质能可持续发展政策及对中国的启示 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 1-10.
- 139 European Commission. Voluntary schemes [EB/OL]. [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/voluntary-schemes\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/voluntary-schemes_en).
- 140 常世彦, 康利平. 国际生物质能可持续发展政策及对中国的启示 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 1-10.
- 141 RSB. RSB GLOBAL FUEL CERTIFICATION [EB/OL]. <https://rsb.org/rsb-global-fuel-certification/>.
- 142 RSB. RSB EU Red Fuel Certification [EB/OL]. <https://rsb.org/rsb-eu-red-fuel-certification/>.
- 143 RSB. RSB CORSIA Certification [EB/OL]. <https://rsb.org/rsb-corsia-certification/>.
- 144 ISCC 官网. <https://www.iscc-system.org/>.
- 145 ISCC. Sustainable Aviation Fuels Certification with ISCC [EB/OL]. <https://www.iscc-system.org/about/sustainable-aviation-fuels/>.
- 146 Cathay Pacific. Cathay Pacific launches Asia’s first major Corporate Sustainable Aviation Fuel (SAF) Programme [EB/OL]. <https://sustainability.cathaypacific.com/cathay-pacific-corporate-sustainable-aviation-fuel-saf-programme/>
- 147 Cathay Pacific. Corporate Sustainable Aviation Fuel Programme [EB/OL]. [https://www.cathaypacific.com/cx/en\\_HK/about-us/sustainability/climate-action/corporate-sustainable-aviation-fuel-programme.html](https://www.cathaypacific.com/cx/en_HK/about-us/sustainability/climate-action/corporate-sustainable-aviation-fuel-programme.html)
- 148 Science Based Targets 官网. <https://sciencebasedtargets.org/>
- 149 IATA. Fact sheet of Sustainable Aviation Fuels [EB/OL]. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f00760e998/saf-fact-sheet-2019.pdf>.
- 150 IATA. Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF) [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/>.
- 151 Port of Seattle. Use of Sustainable Aviation Fuels Taking Off [EB/OL]. (2021-04-27). <https://www.portseattle.org/news/use-sustainable-aviation-fuels-taking>.
- 152 Port of Seattle. Sea-Tac Airport Working To Be First Airport To Use Sustainable Aviation Fuel. <https://www.portseattle.org/news/sea-tac-airport-working-be-first-airport-use-sustainable-aviation-fuel>
- 153 Port of Seattle. Port of Seattle, Boeing and Alaska Airlines Release Aviation Biofuel Infrastructure Findings [EB/OL]. <https://www.portseattle.org/news/port-seattle-boeing-and-alaska-airlines-release-aviation-biofuel-infrastructure-findings>.
- 154 Port of Seattle. Seattle-Tacoma International Airport Moves a Step Closer to Funding Aviation Biofuels [EB/OL]. <https://www.portseattle.org/news/seattle-tacoma-international-airport-moves-step-closer-funding-aviation-biofuels>.
- 155 Port of Seattle. Seattle-Tacoma International Airport Moves a Step Closer to Funding Aviation Biofuels [EB/OL]. <https://www.portseattle.org/news/seattle-tacoma-international-airport-moves-step-closer-funding-aviation-biofuels>.
- 156 Rocky Mountain Institute, SkyNRG. Innovative Funding for Sustainable Aviation Fuel at U.S. Airports: Explored at Seattle-Tacoma International [R/OL]. (2017-07). [https://www.portseattle.org/sites/default/files/2018-03/RMI\\_Sustainable\\_Aviation\\_Innovative\\_Funding\\_SAF\\_2017.pdf](https://www.portseattle.org/sites/default/files/2018-03/RMI_Sustainable_Aviation_Innovative_Funding_SAF_2017.pdf).
- 157 Port of Seattle. Port of Seattle Announces Partnership for Sustainable Aviation Fuels at Sea-Tac Airport [EB/OL]. <https://www.portseattle.org/news/port-seattle-announces-partnership-sustainable-aviation-fuels-sea-tac-airport>.
- 158 ICAO. Project: Oslo Initiative – Avinor Bioport [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Project.aspx?ProjectID=41>.
- 159 Fly Green Fund. Reduce the carbon emission from your flights [EB/OL]. <https://flygreenfund.se/om-oss/>.
- 160 Rocky Mountain Institute, SkyNRG. Innovative Funding for Sustainable Aviation Fuel at U.S. Airports: Explored at Seattle-Tacoma International [R/OL]. (2017-07). [https://www.portseattle.org/sites/default/files/2018-03/RMI\\_Sustainable\\_Aviation\\_Innovative\\_Funding\\_SAF\\_2017.pdf](https://www.portseattle.org/sites/default/files/2018-03/RMI_Sustainable_Aviation_Innovative_Funding_SAF_2017.pdf).

- 
- 161 SkyNRG. Fly Green Fund and Swedavia enable sustainable aviation fuel flights from Stockholm Arlanda Airport [EB/OL]. [https://www.biorefly.eu/images/Press\\_Releases/20170103\\_Press\\_Release\\_SkyNRG-Fly-Green-Fundt.pdf](https://www.biorefly.eu/images/Press_Releases/20170103_Press_Release_SkyNRG-Fly-Green-Fundt.pdf).
- 162 Swedavia Airports. Sustainable aviation fuel equivalent to about 9,000 flights will be tanked at Stockholm Arlanda [EB/OL]. <https://www.swedavia.com/arlanda/news/sustainable-aviation-fuel-equivalent-to-about-9000-flights-will-be-tanked-at-stockholm-arlanda/>.
- 163 Swedavia Airports. Swedavia continues to support aviation's climate transition: Annual joint tender for sustainable aviation fuel includes total of six partners, with refuelling carried out at Stockholm Arlanda [EB/OL]. <https://www.swedavia.com/arlanda/press/swedavia-continues-to-support-aviations-climate-transition-annual-joint-tender-for-sustainable-aviation-fuel-includes-total-of-six-partners-with-refuelling-carried-out-at-stockholm-arlanda/#gref>

## 北京大学能源研究院

地址：北京市海淀区颐和园路 5 号 北京大学燕园大厦 438

邮编：100871

邮箱：genergy@pku.edu.cn

电话：010-62751150



本报告采用环保纸印刷