

美国可持续航空燃料大挑战路线图分析

Analysis to the SAF Grand Challenge Roadmap

■ 王翔宇 刘金超 / 中国航发研究院

美国将可持续航空燃料 (SAF) 确立为实现航空业 2050 年净零碳排放目标的最大依托。通过扩大原料供应、创新制备技术、构建完备供应链、支持政策制定、促进市场应用和增进沟通交流, 进一步加快 SAF 的研发、生产和部署。

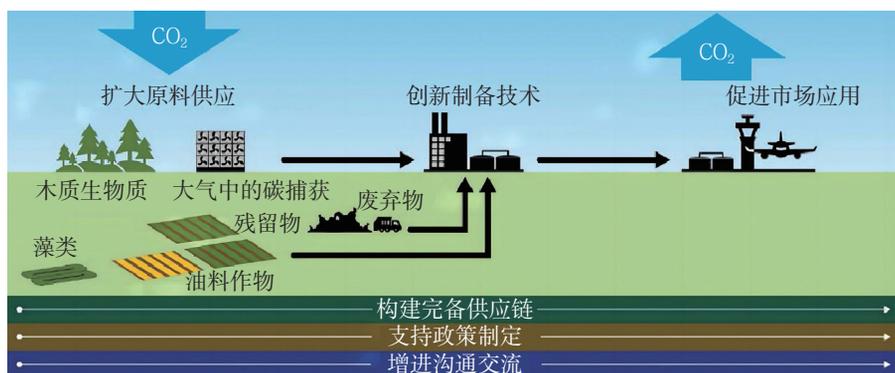
为了减少航空温室气体排放, 航空业正在寻求将开发新的飞机和发动机技术、改进空中交通管理以及推广 SAF 等多种举措结合起来。作为基于可再生生物质或废弃资源制备的替代燃料, SAF 不但具有与常规航空燃料类似的特性、可与现有有机队兼容, 还能够降低至少 50% 的全生命周期内碳足迹, 为中短期航空业低碳发展提供了极为关键的解决方案。

2022 年 9 月, 美国能源部 (DOE)、运输部 (DOT) 和农业部 (USDA) 联合发布可持续航空燃料大挑战路线图, 描绘了美国 SAF 的发展目标与愿景, 围绕扩大 SAF 供应和应用、降低 SAF 成本和增强 SAF 可持续性三项重点任务, 从六大行动项出发, 系统论述了政府和行业如何采取一致行动构建完备的 SAF 产业生态、消除 SAF 产业链整合中的障碍, 助力航空业净零碳排放宏伟蓝图的达成。

SAF 发展战略行动项

扩大原料供应

原料供应系统创新发展的核心在于提高生物质的产量和可持续性, 这是优化 SAF 供应链并降低成本和技术不确定性的基础。有必要对各



可持续航空燃料大挑战路线图总体构架

类生物质原料的供需情况和可持续指标进行全面的梳理和掌握, 评估分析其资源储备和可用性条件。考虑到短期内生产 SAF 可能主要依赖加氢酯和脂肪酸 (HEFA) 工艺, 需要协调动植物脂肪、油和油脂类原料的来源渠道, 加大对油料作物种植的扶持力度。待醇喷合成 (AtJ) 工艺成熟普及后, 生物质供应的重心则可能会转移到淀粉基和糖基等纤维素类原料。不过, 即便如此也很难满足航空业巨大的能源需求, 自始至终都要强化对其他各类废弃物和残留物的收集能力。

此外, 生物质的处理和运输不仅形式多种多样, 也往往需要根据当地生物质基础设施、制备工艺和分销网络进行调整。例如, 油料作

物的粉碎或提取应在接近 SAF 生产前进行, 获取的油脂类生物质可直接用于生产活动, 而木质纤维素原料不但需要在资源当地进行致密化和减湿操作来降低运输成本, 同时还需要经过很多预处理步骤才能真正转化为 SAF 原料。通过了解原料组成、结构和行为如何影响生产系统性能, 可以进一步提高原料处理系统的可靠性, 使原料供应和 SAF 制备之间的接口衔接更加顺畅。

创新制备技术

显而易见, SAF 的生产不可能只依赖某一种制备工艺, 多种技术路径不仅能够扩大原料库从而提升 SAF 供应链的弹性, 不同分子类型的烃类产物也有助于优化 SAF 的理化表现使之更接近常规航空燃料。截至

2021年10月，美国材料与试验协会（ASTM）已经批准了9种SAF制备工艺，其中AtJ工艺可能是2030年前后SAF产量大幅提升的关键，目前的研发重点在于降低生产过程中的碳排放，包括将碳捕获和封存技术与乙醇生产相结合，减少发酵后乙醇分离/浓缩所需的能量，以及提高AtJ催化剂对杂质和水的耐受性。

预计未来SAF供应链不会由单一能源供应商进行垂直整合，在SAF成品交付之前会存在某种意义的“生物质中间体”，可以是纤维素糖类，也可以是发酵或合成的醇类，还可以是来自热解反应的各种生物油脂。这些“生物质中间体”足够稳定，能够从一个市场实体储存和运输到下一个市场实体进行进一步处理，体现了SAF制备过程中的专业再分工。当然，随着技术的不断发展必然会有越来越多的更加先进、碳强度更低的SAF制备工艺出现，进行详细完备的工艺风险和工艺成熟度评估也将越发关键。

构建完备供应链

SAF供应系统既包括生物质原料收集、处理和分配到SAF生产设施的全流程，也涉及成品燃料运输到机场所需的各种配套支持。目前的SAF供应链还很不成熟，市场主体的运营活动分散且呈现明显的区域性，同时根据燃料认证要求SAF必须与常规航空燃料混合应用，二者供应系统之间的协调配合也应引起重视。通过吸纳所有的利益相关方建立行业组织，更好地促进交流、凝聚共识、统一部署，有助于SAF产业各方面力量的整合。

为了使行业组织能够有效进行场景评估和选项分析，科学的供应

链模型和决策支持工具不可或缺，建模量化的对象包括但不限于原料可用性、基础设施选址和建设、制备工艺经济性、适航许可要求、全生命周期碳成本等。除了通过知情决策分析供应和生产方案的商业可行性，还需投入大量资金启动大规模的验证，覆盖从生物质收集到SAF交付，再到燃料加注并完成飞行活动的整个供应链。从历史的经验看，这种试点示范非常有必要，能够切实避免在商业阶段付出更高的时间和经济代价。

支持政策制定

除了供应链模型外，支持政策制定、评估政策效果并最大化SAF的社会、经济和环境价值，同样离不开相关统计信息和方法工具，基于技术经济和产能潜力重点分析现有政策和拟议政策的作用和影响，展示未来政策的主要着眼点和引导方向，以破除SAF在生产和应用中的主要障碍。鉴于全生命周期排放水平是SAF政策的核心出发点，具有高可信度、可操作性且与国际标准一致的碳排放计算方法显得至关重要，这也将是碳定价和碳交易的基准，而SAF对空气质量和气候变化的非二氧化碳影响、原料生产过程中作物多样性伴随的环境共同收益（如土壤改良）等也是顶层政策关注的对象。

从保障供给的角度来说，应形成明确的激励措施清单，建立专门的融资渠道为SAF项目提供服务，根据实际产量对能源供应商进行补贴，确保产能越大售价越低，尽快释放SAF的产能；从提振需求的角度来说，可出台SAF的政府采购机制，探索政府部门和军方购买SAF

以带动市场需求和商业应用的可能性。航空公司组团集体采购，承诺在规定的时间内以一定价格购买一定数量的SAF，邀请能源供应商以最低价格投标实现市场的统一供应，这可能会是未来SAF产业政策所努力营造的一种市场格局。

促进市场应用

加快燃料安全测试和审批、扩大合格燃料的范围对于SAF供应能力的提升是显而易见的。目前ASTM D4054认证标准能够涵盖各种航空燃料规格和属性，飞机和发动机制造商的燃油试验数据已成为审查迭代的一部分，不过针对SAF的多层审查流程仍旧有进一步简化的空间，同时，在规范中允许SAF和常规航空燃料的最大体积混合比例从50%上升到100%，即完全使用SAF完成飞行任务。这不但需要能源供应商、装备制造和监管机构的密切协调，也需要从SAF的理化特性角度进一步研究100%SAF对现有有机队零部件的影响，如那些不含芳香族化合物的SAF能否满足燃油系统的密封指标。

在进行100%SAF测试的同时，探究SAF所带来的额外性能或飞行生产率增益对其市场应用也具有显著的促进作用。例如，未来SAF的质量或体积能量密度可能高于常规航空燃料，有助于实现更长航程的飞行；SAF可能具有更好的热稳定性，可以降低燃料系统换热器的设计要求从而减轻飞行质量。而在100%SAF普及应用之前，能源供应商往往根据ASTM的规定将SAF和常规航空燃料混合后通过公路或铁路运往机场，运输能力有限，而SAF多种多样的规格和组分不具备利用现有管道实现大规模长距离运输的

条件，打通SAF应用的最后一环、将SAF更高效安全地集成到燃料配送体系中尤为关键。

增进沟通交流

透明、准确和客观地展示SAF的环境、气候和经济效益是增进公众支持与了解的重要手段。无论是种植原料的农民还是乘坐使用SAF航班的旅客，如果没有广泛而又积极的群众基础，想要增加产量并说服航空公司扩大应用将面临巨大的挑战。特别是由于SAF供应链的复杂性，很容易出现不正确或误导性的信息，并迅速传播左右公众的看法。通过定期进行新闻动态发布、传达SAF发展的公共利益，避免由于过时信息或片面数据导致批评和误解，进一步建立与公众沟通的渠道以寻求新发展格局下社会观念的改变。

SAF相关沟通磋商还涉及非政府组织、原料供应商和其他利益相关团体，通过交流全球各地的产业信息和实践案例，以减少来自农业和林业的全生命周期碳排放，最大限度降低对环境和社会影响。此外，每两年对可持续航空燃料大挑战路线图进行一次更新，采用协调一致的方法跟踪原料和SAF的生产使用情况，评估执行进展、经验教训和现实效益从而指导后续的工作。需要专门的跨领域协作机制进行信息的收集和整合，形成的公共数据库可为任何感兴趣的群体使用，这将对那些暂时未能纳入SAF产业系统的中小机场的可行性分析提供重要的参考和帮助。

SAF 发展战略展望

根据2021年年底美国联邦航空局（FAA）发布的《航空气候行动计划》，

大规模生产和使用SAF已成为美国政府在2050年前实现净零碳排放目标唯一的可行方案、最具影响力的中近期国家战略方向。可持续航空燃料大挑战路线图重申了“电能和氢能动力技术仅限于短途飞行的小型飞机，预计在2050年之前不会对航空碳减排做出显著贡献”的论述，并为SAF的发展设定了雄心勃勃的

目标，2030年SAF产能将比2021年增长600倍，从0.17亿L急剧攀升到114亿L，年化增长率达到122%，2050年的供应水平则在1300亿L以上，不但能够完全满足美国国内航空燃料的需求还具备一定的出口能力，对应的产业配套需求则包括400多个专业SAF生产工厂和10亿t生物质或从大气中捕获的二氧化碳原料。

可持续航空燃料大挑战路线图行动项和工作重点

行动项	工作重点
扩大原料供应	了解生物质资源的市场和可用性
	2030年前，最大化可持续脂类生物质供应
	扩大生物质资源种植规模，强化废物和残留物的收集能力
	改善生物质原料运输、储存和预处理物流
	提高原料处理系统的可靠性
创新制备技术	提升生物质供应系统的可持续性
	加快A1J工艺的规模化、低成本应用
	加快已认证的SAF的应用部署
	为SAF供应链识别和开发新的“生物质中间体”和商业模式
构建完备供应链	降低扩大生产和运营规模过程中的技术风险
	探索下一代技术，开发新的SAF的制备工艺
	建立SAF利益相关者联盟
	开发供应链分析和建模工具
支持政策制定	支持从原料到燃料的示范应用项目
	加快商业规模的SAF生产基础设施建设
	利用数据和模型量化SAF的碳减排及其他环境影响
促进市场应用	进行SAF技术经济和生产潜力分析
	确定改善现有政策和监管机制的策略
	简化SAF测试和审批流程
	实现100%SAF的应用
增进沟通交流	分析SAF较常规航空燃料的潜在性能优势
	实现SAF和常规航空燃料配送系统的整合
	与利益相关方进行数据和信息共享
	对SAF战略进行效益评估和影响分析
	监控SAF战略重大目标的实施进展
	增强公众对SAF的认知，提供针对公众的信息资源

随着制备技术的进步和转化效率的提升，美国能源部生物燃料技术办公室（BETO）认为这些原料可能足以生产1800亿L以上的SAF。

在能源生产制造环节，SAF可能存在巧妇难为无米之炊的现实情况，无论是油脂类初级生物质还是来自废弃物和生产残留物的生物质大都存在一定的供应周期，如果找不到解决原料需求的合适办法，那么SAF产业的一切发展都无从谈起。从某种意义上说，美国政府力推SAF的最大底气就在于拥有极为发达的农业基础和海量生物质原料的供应潜力，原料供应、能源制备和航空运营将密切结合起来，这不仅也是绿色航空产业链协同发展的要求，也是衡量全生命周期碳减排效果的基础。然而，对于其他国家或地区而言，SAF的发展定位到底在哪仍需审慎设置。

一般认为主要能源作物的增长潜力已经确定，来自农业和林业的残留物也不会大幅增加。欧洲航空业《目标2050》援引的数据显示，到2050年全球可利用生物质的含能量为67~160EJ，保守估计对应的生物燃料总产能在20000亿L左右。虽然看起来并不是一个很小的数字，但要知道这些生物燃料可能要供应热电、塑料、公路、海运和航空等各个国民经济部门。国际清洁交通委员会（ICCT）曾预计，到2050年全球9%的生物燃料可能会流入到航空业，按照上面的估算结果则对应为1800亿L，此时美国规划的产能则相当于全球的70%以上。即便如此，1800亿L也仅为2019年燃料需求的一半，随着航空市场的扩张，2050年航空燃料的消耗量可能会超

过8000亿L，若机队100%采用SAF则缺口在三分之二以上。

考虑到不同国家生物质资源的差异，未来绿色航空发展路线之争绝不是一个简单的航空产业自身的技术问题，背后所涉及的最大优势发挥与系统性利益博弈至关重要。除了降低碳排放以外，美国政府还在努力宣传SAF在农业的额外收益（农民可以在淡季种植生物质原料获取高额回报）、环境改良与保护（多样性的生物质原料可以改善土壤和水质水量，控制水土流失）和提升飞机性能（SAF中较少的芳香族物质含量有利于清洁燃烧）等方面的好处，能够创造更多的就业机会和经济价值。不过，针对航空公司SAF的现实运营经济性问题，或者说随着SAF产能的扩大能否同步快速降低运营成本，路线图并没有给出答案，SAF和常规航空燃料的价格差距走势在业界仍旧有很大的争议。

由于燃料成本占据了整个民航业运营成本的25%~40%，SAF的溢价会直接影响航空公司的竞争力和收入。更为重要的是，目前以欧盟排放交易计划（ETS）和国际航空碳抵消和减少方案（CORSIA）为代表的那些市场导向的政策举措给出的碳价格尚不足以为SAF的推广应用提供更强大的外部激励。在可持续航空燃料大挑战路线图构想的产业生态中，原料生产商（提供生物质原料）、能源供应商（制备）、航空制造商（测试和审定）和航空公司（运营）各司其职、环环相扣，但都离不开美国农业部、能源部和交通部的一揽子政策法规的协调和支持，未来可能还需进一步的立法

行动、具体的资金补贴来降低整个行业转向SAF的成本和风险。这将是一个持续、长久和实质性的支持和行动的方案，也有望成为业界坚定扩大SAF生产与应用信心的基础。

结束语

我国生物质原料分布广泛、整体可利用量大，无论是新建SAF产能还是对现有生物柴油产能进行改建，都不会有根本性的障碍。不过在制备技术方面，已投产项目或示范项目中只有HEFA工艺被运用，更能利用我国纤维素基生物质原料优势的AtJ制备路线的技术储备还需加强；在市场需求方面，由于没有强制性的SAF应用指标，国内航空公司并不急于推动SAF，除了少量试航外没有公开明确的SAF商业飞行计划；在产能投资方面，SAF市场规模尚小，政策信号不明晰时中石化、中石油等大型能源供应商较难做出中长期的SAF生产布局与产能扩张决策。

为了进一步明确SAF对航空业脱碳减排的重要意义、消解市场参与者对于SAF前景的疑虑，应参照可持续航空燃料大挑战路线图，尽快出台符合我国资源禀赋和国情现状的SAF顶层战略，通过一系列政策导向和资金支持促进新型制备工艺的研发，加快适航和可持续性认证流程，扩大SAF的生产与应用规模，推动产业上下游市场参与者的交互合作，使SAF能够和电动航空器、氢能航空器等航空碳减排路径协调发展、互相补充，共同为我国绿色航空的未来贡献力量。

航空动力

（王翔宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）