

负碳航空燃料的新路径探讨

Discussion on the New Path of Carbon-Negative Aviation Fuel

■ 丁水汀 杨晓军 / 中国民航大学 甘宸宇 邱天 / 北京航空航天大学

全球变暖问题日益严重,亟待各行业协力解决。航空业作为高排放行业,更需要加快减排步伐。航空难以完全“脱碳”已成为业界共识,能源植物基可持续航空燃料(SAF)以碳捕获、碳封存、碳利用等多手段促进减排降碳,使“负碳航空”成为可能。然而,SAF仍然面临成本高、取证难、产能低等诸多挑战。为此,须从燃料标准、认证平台和能源植物产业等多方面着手,系统提升中国航空业脱碳主动权和国际博弈话语权。

为应对气候变化,国际民航组织(ICAO)提出了一揽子的减排措施,包括飞机二氧化碳排放标准、航空系统组件升级(ASBU)、全球航行计划(GANP)和国际航空碳抵消和减排计划(CORSIA)等,促使世界各国采用减排措施。其中CORSIA采用增量减排规则,并引入了个体增长因子进行减排责任的分配,给发展中国家带来了极大的不公平。截至目前,ICAO已经宣布国际航空业2050净零排放的长期目标,在此目标下制定的技术、市场、运行和燃油相关的标准、建议和措施,将给世界各国尤其是发展中国家带来极大减排压力。我国国内航空市场发展强劲,但与此同时,ICAO不公平不合理的碳排放标准已成为中国民航的“卡脖子”问题。保持航空运输业可持续发展,不断探索和完善各种减排技术以达到航空碳中和目标,已成为我国航空业的主要发展方向,其中负碳航空燃料将发挥重要作用。

负碳航空燃料

航空减排方案主要措施聚焦于技术、运行、燃油和市场机制等方面,包

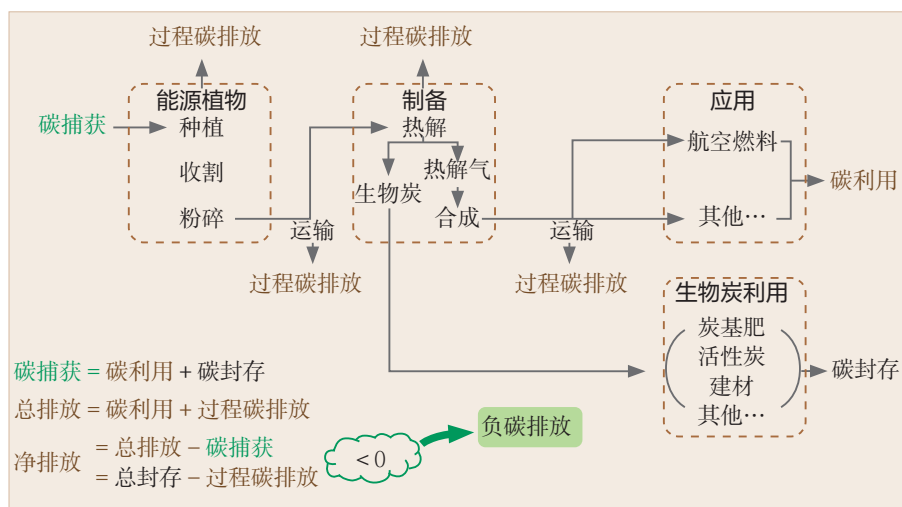


图1 能源植物基 SAF 全生命周期碳排放链

括严控排放标准、研发节油技术、优化航线网络、提高运行效率、设立碳排放交易机制等。然而,在航空运力需求的飞速增长下,基于管理和运行手段的减排方案通常只能达到放缓碳排放增速的效果。在国际航空2050碳中和目标分析中,燃料技术改进的贡献将占到55%,远高于航空器技术和运行手段的21%和11%。若以碳中和为目标,低碳方案的核心需从航空器的能源入手,大力发展低碳/负碳能源以替代传统航空煤油。

以生物质燃料为代表的SAF具有能量密度高、制备方式灵活、与现有航空动力装置兼容度高等优势,已成为绿色航空的首选方案。SAF是由可再生原料制成的航空替代燃料。其中,能源植物基SAF以植物为原料,在种植阶段通过光合作用大量吸收二氧化碳,实现“碳捕获”;通过粉碎、热解等技术制备生成航空燃料以及氢、氨等,实现“碳利用”;而其余以碳为主要构成的残渣则被制成生物炭,用于肥料、建材等,实现“碳封存”;虽然在运输与制备

过程中可能会带来一定的过程碳排放，但在规模化量产后，其碳捕获量可能超越总排放量，通过碳封存实现全生命周期负碳排放（如图1所示）。能源植物基可持续航空燃料为“负碳航空”提供了可能性。

发展SAF已成为业界解决传统燃料危机的首选方案之一。2021年11月12日，为激发业界降碳动力，促进行业绿色转型，国际民航组织理事会批准了CORSIA之下SAF的可持续性标准，同时还批准了符合性评价指导材料。欧美各相关机构与企业于2022年加大了在SAF领域的投入力度，并给出了相应的研究计划。空客、罗罗等公司已宣布其SAF的测试及推广计划。空客公司计划到2030年之前实现100% SAF的认证。罗罗公司的“超扇”（UltraFan）验证机将使用100% SAF进行首次测试，并且承诺在2023年年底之前对其全部现有的发动机进行100% SAF运行验证，所有遗达发动机（占全球远程机队的40%）将与100% SAF兼容。壳牌公司承诺SAF的年产量到2025年达200万t，这是当今全球SAF总产量的10倍以上。到2030年，壳牌全球航空燃料销售额中，至少10%将是SAF。壳牌在荷兰建造的大型生物燃料工厂将于2024年开始生产。

负碳航空燃料面临的三大挑战

时至今日，航空燃料市场依旧以航空煤油为主，包括SAF在内的各种航空替代燃料的使用情况远不及预期。负碳航空燃料作为SAF的一种，其发展在安全性认证、可持续性认证和产业布局方面面临三大挑战。

安全性认证缺乏系统级判定准则

认证方法是SAF安全保障的关键。随着全球SAF需求增长，相应的验证技术也在不断发展。然而目前的安全性认证标准和流程缺乏系统级判定准则。

一是运营经验转化不充分。为占领国际话语权，美国积极抢占SAF认证标准，在2009年9月，美国材料与试验协会（ASTM）批准了ASTM-D7566《含合成碳氢化合物的航空涡轮燃料的标准规范》，允许费托合成碳氢燃料的使用。诸多国家相继在ASTM的基础上推出了航空替代燃料认证标准。现有的D7566标准是基于航空煤油数十年的使用经验，规定了SAF成分、挥发性、流动性、腐蚀性和热稳定性等数十种理化特性的范围，要求燃料生产商用生物质原料造出在理化性质上和航空煤油高度相似的燃料。然而SAF的理化特性显然无法完全与航空煤油完全一致，对于航空发动机系统而言，组分和理化特性“相似而不相同”的燃料无法提供足够的系统安全性判据。

二是用试验表明安全概率问题。对于需要新批准的工艺，ASTM发布了ASTM-D4054用于验证和审批，其中明确了新燃料的认证流程。通过分析发现，D4054的认证流程要求对燃料进行大量试验，用试验代替安全性表明中的概率问题。根据ASTM估计，其中规范属性审查需要37.8L，用途属性适合性审查需要320.8L，部件与台架试验最多需要37854.1L，发动机试验最多需要851718L，且部分测试项目没有给出测试条件及接收准则。燃料在认证阶段通常没有开始批量生产，如此

多的燃料需求极大地提高了认证成本与表明难度。同时，发动机系统安全性水平是失效概率与后果严重程度的综合，通过有限次试验无法得到失效概率结果，难以提供充足的安全性证据。

此外，认证主体由原始设备制造商（OEM）负责，美国联邦航空局（FAA）和欧洲航空安全局（EASA）等监管机构参与监督。OEM在燃料认证过程中承担了大量的符合性审查与试验工作，对于包括中国在内的航空后发国家而言，新型SAF的认证难以开展。以D7566和D4054为代表的现有安全性认证标准与流程，在理化特性层面利用航空煤油经验，缺乏发动机层级的安全性判定准则。不仅没有推动SAF发展，反而很大程度上制约了其发展潜力。

可持续性认证流程不明确

目前国内还没有一套完整的体系对SAF进行可持续认证，主要存在以下几点问题。

一是国际上ICAO针对国际航空业在CORSIA机制下已经制定完成SAF可持续性标准，同时其他一些认证机构也出台了针对SAF的可持续认证标准。但国内航空业还未制定相关标准，需要比国际标准制定适合国内国情的SAF可持续性标准。

二是依据可持续性标准需要对SAF全生命周期温室气体排放进行评估。国际上采用标准全球贸易分析模型（GTAP-BIO）和全球生物圈管理模型（GLOBIOM0）评估其土地利用变化排放，采用温室气体、管制排放和运输中的能源使用模型（GREET）和气候变化综合评估模型（E3）评估其核心生命周期排放，但不同的模型评估结果偏差较大，且

未考虑SAF副产品的固碳效果。需要面向SAF全产业链开发更为精准的全生命周期排放评估模型（包含副产品的固碳模型）。

三是在可持续认证过程中，需要依据可持续性认证指南对SAF进行审查。当前国内还没有相应的审查机构，需尽快确定全产业链认证计划，明确可持续认证工作流程及相关管理要求。

四是由于可持续性认证需要考虑SAF全产业链的质量和能量流。国内目前还未有与SAF全产业链分析相匹配的数据系统，需开发一套数据采集溯源系统对其数据信息进行追踪和更新。

针对上述主要问题，可持续认证过程中需要多部门的协调合作以及严格的审查工作，才能确保SAF的评估更全面、更准确，从而进一步与国际可持续认证计划接轨，实现互认。

相关产业发展不协同

由于行业划分与专业限制，航空能源产业链上各环节产业的发展相对独立，在以石油为主要能源的产业布局下，各自专精的模式是高效可行的。但SAF替代传统航空煤油本质上是一场航空业的能源革命，相关产业强强联手才能得到更减碳、更安全、更易用、更可持续的燃料。

玉米、甘蔗、小桐子、亚麻荠以及餐厨废油等被视作当前SAF的主要原料，但因产量有限且供给不稳定，导致SAF难以规模应用。以生物质燃料为主要代表的SAF的发展，需要产业链各行业共同参与：林草业筛选能源植物，化工业探索炼制工艺，运输业规划储运方案，航空业评估适航安全，金融业分析

市场价值，协同多行业交叉，提前布局全产业链耦合发展。

负碳航空燃料新路径的进展与突破

针对上述问题和挑战，主要应从以下几个方面开展研究，以求取得进展和突破。

制定SAF安全性认证新标准

如何在保障安全性的前提下降低认证成本和难度，突破欧美技术封锁，使安全标准和认证流程更加科学易行是目前SAF发展亟待解决的问题。中国民航大学与北京航空航天大学已联合开展创新SAF安全性认证标准及方法研究项目，进行相关理论方法和技术研究，探索燃料安全性新标准，主要包含以下几个方面。

一是改变SAF安全性表明路径。以发动机系统安全作为顶层目标，建立具备燃料分辨率的变维度一体化安全分析模型，充分利用航空煤油安全运营经验，如图2所示，将认证中的相似性检查从燃料层级提升至发动机层级，提出以安全等效

为唯一认证准则的适航审定新路径。借鉴适航规章FAR-33部70章关于限寿件失效概率的表明方法，通过模型、试验和分析相结合的方式，在发动机层级充分利用航空煤油的安全运营经验，具备了系统级的安全性比较能力，划定了系统安全边界。该路径将在保障安全水平的前提下，提高认证效率、降低制备成本，促进形成“正反馈”生态，多核驱动负碳航空产业发展，助力推动更减碳、更安全、更易用、更可持续的SAF。目前研究工作已取得了一定突破，赢得了国际认可，获批工信部与欧盟共同支持的中欧替代燃料合作项目。

二是创新SAF安全性认证模式。在系统级安全性表明路径的基础上，为继续推动创新认证标准落实应用，提出了SAF作为航空发动机特殊部件的创新理念，借鉴技术标准规定（TSO）认证模式，将燃料认证独立于OEM，摆脱发动机型号的约束，用标准发动机及其模型分析认证。解决燃料认证共性问题，提高认证通用性，减少重复认证，降低时间

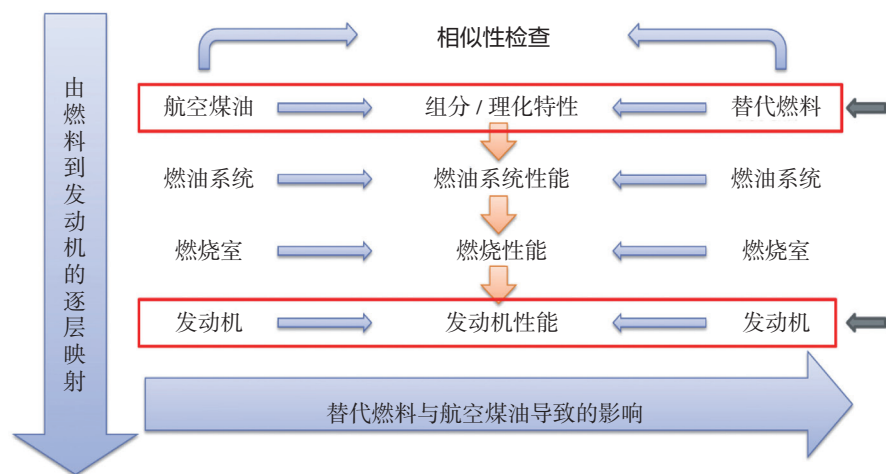


图2 燃料认证相似性检查层级

成本和燃料成本。

三是定义SAF安全性标准认证设施。根据燃料对航空发动机安全性的影响路径，研究标准燃烧室和标准发动机等认证相关设施的定义。建立SAF自主适航认证平台，包括标准燃烧室平台与标准发动机平台，通过标准燃烧室验证燃料理化特性及燃烧机理的共性安全问题，通过标准发动机认证平台验证燃料拟认证“发动机—燃料组合”的共性安全问题，将自主创新SAF认证方法研究从理论方法层面提升至应用层面，推出认证新标准，系统地提升中国民航脱碳主动权和国际博弈话语权。在国际范围内建立基于标准认证设施的安全性认证体系，有利于各国（特别是广大后发国家）结合其特点参与SAF研制，加快碳中和进程。

四是优化SAF炼制工艺和燃料系统设计。在完善安全性标准的同时，为燃料发展提供有效指导，从发动机系统安全角度找到燃料组成和理化特性与安全目标的映射，不断丰富发动机关键安全参数集，充分利用航空煤油的使用经验确定安全参数裕度，通过参数敏感性分析，在保障安全性要求的前提下优化SAF炼制工艺和发动机燃料系统设计，进一步降低SAF的综合成本，促进商业化应用。

建立SAF可持续性自主认证体系

在SAF可持续认证方面，针对认证流程不明确、认证标准和相关要求还未制定以及部分数据信息欠缺等问题，将从以下几方面开展研究工作。

基于参与ICAO CORSIA机制下SAF可持续性认证的丰富经验，同

时借鉴道路运输生物燃料认证流程及规范，结合我国国情，开展SAF认证标准及方法研究，建立自主的可持续认证体系，加快产业推进。

根据当前CORSIA全生命周期排放模型中存在的问题（ILUC和CLCA采用不同的模型和处理方法进行评估的结果偏差较大），开展SAF全产业链的全生命周期排放评估模型的研究，确保SAF的可持续性评估更快捷，更准确。

针对当前SAF生产阶段可持续性评估分析中并未考虑可追溯、可定量评估的副产品固碳效果的问题，研究副产品的固碳模型及其对SAF全生命周期排放模型的贡献，有效支撑航空碳抵消市场机制的发展。

依据SAF全生命周期排放评估各环节数据需求，建立SAF全产业链数据采集溯源系统，保证SAF认证过程中数据的可靠性，提高可持续认证效率。

推动能源植物产业布局

能源植物通过光合作用把二氧化碳和水直接转化成不含氧的碳氢化合物，是一种可再生的、可持续开发的能源。能源植物具有许多优点：良好的生态性，能源植物中的高能物质几乎不含有对环境污染严重的硫化物，对沙漠、盐碱地等还有改善效果；成本低，生产方便，能源植物分布广，若因地制宜种植，能够实现就地炼制，在产业规模化后，其制备成本要低于化石能源的开采；可再生性，能源植物可以迅速生长，通过规模化种植，保证产量。

近年来，新一代能源植物及生物基因重组技术为解决原料供给问题提供了新思路。经调研，我国气候、地形多样化水平高，适宜数十种能

源植物种植，且在植物杂交育种技术领域不断取得积极进展，如能加快形成产业市场，将为增加SAF原料产量提供重要保障。狼尾草、芦竹、芒草等能源植物经杂交育种后产能较高。在改善航空能源结构、保障产能供给的同时，做到“不与人争粮，不与粮争地”。

燃料的原材料开采、炼制、运输、使用等各环节都存在碳排放，因此衡量一种燃料可持续与否需要对其进行全生命周期规划布局，与产业链上下游各方开展广泛合作，使燃油需求侧与供给侧之间形成协同联动。协同制造业、运输业、林草业、化工、金融业等多行业交叉，强强联合形成合力。建立完善的“原料—炼制—运输—加注—使用”的完整产业链，推动能源植物产业布局，为我国民航业和新能源产业的可持续发展提供有力支撑。

结束语

国际航空“碳减排”规则和机制已成为发达国家制约后发国家发展的手段，我国既要实现大国承诺，又要摆脱技术发展的“环保枷锁”。如果无法形成解决碳排放问题的中国方案，不能掌握国际标准的话语权，将出现非常被动的局面，后续对我国的航空制造业和航空运输业都将产生颠覆性影响。以能源植物基SAF为代表的负碳航空能源新路径可以有序有力有效保障我国航空深度脱碳，是提升我国民航脱碳能力、维护行业发展权益、拓展行业发展空间的重要手段。

航空动力

（丁水汀，中国民航大学校长，教授，主要从事可持续民用航空、航空发动机安全性与适航研究）