



DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2019-0025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



可持续航空生物燃料的推广应用及行业影响与应对措施

何皓¹, 邢子恒², 李顶杰^{1,3}, 张佳¹, 张家仁¹, 王凌¹

(¹中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 102206; ²中国南方航空集团有限公司, 广东 广州 510403; ³中国石油和化学工业联合会产业发展部, 北京 100723)

摘要: 为了保障航空运输业可持续发展, 实现温室气体减排目标, 国际民航组织通过了“国际航空碳抵消和减排计划”, 并计划强制推行一系列实施与认证标准, 这将对我国民航运输、化石航煤生产和航空生物燃料技术开发应用产生重大影响。针对这一新的变化趋势, 本文介绍了国际民航组织碳减排计划概况, 梳理总结了航空替代燃料可持续性标准框架内容, 简述了国内外可持续航空生物燃料规模化应用现状, 分析了对相关主要行业可能产生的影响, 在此基础上提出应对措施及发展建议。研究指出, 可持续航空生物燃料是民航业应对气候变化、实现碳减排的根本途径和最重要措施, 产业链上下游各方应充分认清当前发展形势, 加快制定完善国内相关规范与标准, 协同配合共同应对国际磋商与谈判, 同时加速推进工业生产示范装置建设和运行, 并广泛开展交流与合作, 建立完善“原料-炼制-运输-加注-使用”的完整产业链, 实现行业可持续发展。

关键词: 可持续航空燃料; 可持续性标准; 航空生物燃料; 国际航空碳抵消和减排计划; 温室气体减排; 全生命周期排放值

中图分类号: V31

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613 (2019) 08-3497-11

Industry impact and countermeasures for the promotion and application of sustainable aviation biofuel

HE Hao¹, XING Ziheng², LI Dingjie^{1,3}, ZHANG Jia¹, ZHANG Jiaren¹, WANG Ling¹

(¹Petrochemical Research Institute of Petrochina Co., Ltd., Beijing 102206, China; ²China Southern Air Holding Co., Ltd., Guangzhou 510403, Guangdong, China; ³China Petroleum and Chemical Industry Federation, Beijing 100723, China)

Abstract: In order to ensure the sustainable development of the air transport industry and achieve the greenhouse gas reduction targets, the International Civil Aviation Organization (ICAO) has adopted the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). ICAO has planned to enforce a series of implementation and certification standards under CORSIA framework, which would have a significant impact on China's civil aviation transport, fossil aviation turbine fuel production and application of aviation biofuel (*i.e.* Bio-SPK) technology development. In view of this new trend, this paper gives an overview of CORSIA and summarizes the basic framework of CORSIA sustainability criteria for sustainable aviation fuels. Then this review briefly introduces the recent progress in the large-scale application of sustainable Bio-SPK in China and abroad. It is analyzed further what potential impacts would be on the related major industries in China. The countermeasures and development suggestions

收稿日期: 2019-01-04; 修改稿日期: 2019-03-05。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项 (2016E-1302)。

第一作者及通信作者: 何皓 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为生物燃料及生物基化学品生产技术、碳减排及碳排放权交易机制。

E-mail: hehao010@petrochina.com.cn。

引用本文: 何皓, 邢子恒, 李顶杰, 等. 可持续航空生物燃料的推广应用及行业影响与应对措施[J]. 化工进展, 2019, 38(8): 3497-3507.

Citation: HE Hao, XING Ziheng, LI Dingjie, et al. Industry impact and countermeasures for the promotion and application of sustainable aviation biofuel[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(8): 3497-3507.

about the CORSIA and promotion of sustainable Bio-SPK are put forward based on the above ones. It is pointed out that sustainable Bio-SPK have become the most important measure to address the global climate change, as well as a fundamental way to realize greenhouse gas reduction targets for China's civil aviation industry. This conclusion shows that China should speed up to develop the national standards and specifications equal to CORSIA sustainability criteria and work together to deal with international negotiations. It is also proposed that China should accelerate the construction and operation of demo-plants for Bio-SPK production, and that all parties of the whole chain have to cooperate with each other to build up a full supply chain including "raw materials-refining-transportation-refueling-application".

Keywords: sustainable aviation fuel; sustainability criteria; aviation biofuel (Bio-SPK); CORSIA; greenhouse gas reduction; life cycle emissions value

近年来,国际航空运输业保持了高速发展,传统航空涡轮燃料(化石航空煤油)使用所带来的温室气体排放对全球气候变化的影响越发受到关注。2017年,全球民用航空业商业航班温室气体排放量达到8.59亿吨,占全球排放总量2%^[1],航煤消费量达到900亿美制加仑^[1](约2.7亿吨),由此产生的温室气体排放量占到行业排放总量的96%以上,成为民航业最大的排放源。虽然航空业碳排放量并不高,但航煤燃烧产生的CO₂基本排放在大气平流层,其温室效应危害远远大于其他行业,同时航空运输具有很强的国际属性,因而航空业已成为全球应对气候变化的焦点之一,面临严峻的温室气体减排挑战。

为了保障航空业可持续发展,开发应用可实现温室气体减排的航空替代燃料(aviation alternative fuel, AAF)已成为国际民航业的普遍共识。与地面交通运输不同,航空运输由于其长距离、大功率、无法中途充电的航运特点,现有太阳能、燃料电池技术及基础设施保障都还无法满足飞机功能要求,短期内实现完全电动驱动还有相当难度。利用动植物油脂或农林废弃物等生物质制备的航空生物燃料(aviation biofuel),即生物基合成石蜡煤油(bio-synthetic paraffinic kerosene, Bio-SPK),以其优良的燃料性质、显著的碳减排性^[2]、与现有化石航煤及飞机、航空引擎、燃料供给系统的良好兼容性而成为首选的替代燃料形式,受到业界广泛关注。自2008年以来,包括中国石油集团在内的全球多家能源公司、技术提供商、航空公司合作进行了多次试飞与商业飞行活动,已经验证了航空生物燃料的可行性、安全性^[3],航空生物燃料的开发应用已成为目前最现实可行的燃料替代方案和实现温室气体减排的根本途径,具有良好的应用前景。

当前,针对采用航空替代燃料以实现碳减排这

一议题,国际民航业呈现出新变化、新趋势。2017年9月召开的国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)航空环境保护委员会(Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP)指导小组会议上,明确提出“航空替代燃料必须满足可持续性”这一环境要求,并将这种替代燃料称为“可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)”^[4],随即开始起草一系列实施与认证标准,已于2019年1月1日起部分施行。

ICAO一系列碳减排计划及标准的实施对我国民航运输、化石航煤生产和航空生物燃料技术开发应用将产生重大影响。鉴于此,本文梳理总结了ICAO碳减排计划和航空替代燃料可持续性标准,简述了国内外航空生物燃料规模化应用现状,分析了对相关主要行业可能产生的影响,在此基础上提出应对措施及发展建议。研究结果旨在帮助我国航空生物燃料产业链上下游各方充分认清当前发展形势,因势利导,转变发展方式,培育行业新增长点,增强行业国际竞争力,同时协同配合,共同应对相关国际谈判与磋商,维护我国正当权益,实现行业可持续发展。

1 国际民航组织碳减排计划及实施标准

1.1 国际航空碳抵消和减排计划

2010年ICAO第37届大会上,国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)等4个主要国际民航协会代表国际航空运输业联合宣布,自2020年起全球民航业实现碳排放零增长(carbon neutral growth),并提出2050年碳排放量与2005年水平相比减少50%的减排目标^[5]。2013年ICAO第38届大会上,通过了一系列措施来确保减

排目标的实现, 涉及航空器新技术、民航运营改进、经济措施和航空替代燃料(AAF)的应用^[6]。2016年ICAO第39届大会上, 包括中国在内的191个成员国和国际组织会员共同通过国际航空碳抵消和减排计划(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA), 以政治决议形式明确了全球民航业减排目标及保障措施^[7]。

CORSIA已经于2019年1月1日起实施, 自该日期起监测各国民航2019—2020年碳排放数据, 并以这两年所得数据平均值为基准零值, 监测核查各国民航2021—2035年每年碳排放增量, 要求各履约国航空公司须使用经ICAO认证的可持续航空燃料(SAF)或购买碳信用指标(减排项目或碳配额)来抵消国际航线产生的排放增量, 完成相应减排任务, 确保实现碳中和增长目标。

1.2 航空替代燃料可持续性标准

为保障CORSIA顺利实施, ICAO正在加紧制定一系列实施与认证标准, 其中就包括“航空替代燃料可持续性标准”。如前所述, 2017年9月ICAO召开的CAEP指导小组会议上, 明确提出“可持续航空燃料(SAF)”这一概念要求。同年10月在墨西哥召开的ICAO第二届航空替代燃料大会声明指出^[8]: 2050年前, 各国、航空业界及相关方应尽可能利用SAF替代传统航空涡轮燃料; 替代燃料的可持续性是实现国际航空减排的关键; ICAO将持续跟踪各国SAF应用情况, 并将在2025年第三届航空替代燃料大会上提出2050年可持续航空替代燃料应用的定量目标。由此, 在发达国家主导下, ICAO工作重心由制定航空替代燃料质量及安全标准快速向可持续性认证标准转换。

所谓“可持续性”, 一般指在不削弱子孙后代满足其需要之能力的情况下, 满足当前需要的一种发展概念^[9], 涵盖环境、经济和社会3个方面^[10]。即充分考虑产品全生命周期中所涉及的温室气体排放、碳储存、水资源节约和保护、土地资源(土壤质量和保护、土地生产能力等)、大气环境和生物多样性、废弃物管理、能量效率、能源安全、就业和收入、土地权利和利用、农村与社会发展等问题, 利用一系列标准与原则、规范与管理办法来确保其在环境、经济、社会等3个方面的可持续发展^[11]。

基于“可持续性”的发展理念, 很多国家、地区或组织都对包括生物燃料在内的生物质能可持续

性提出了要求, 根据其功能作用、法律定位可将这些要求大致归类为政策法规、认证标准和自愿标准3种类型^[12]。与航空替代燃料相关的可持续性政策和标准主要有: 美国《可再生燃料标准》(Renewable Fuel Standard II, RFS II)、欧盟《可再生资源指令》(Renewable Energy Directive, RED)、可持续生物质圆桌倡议组织全球认证标准(Roundtable on Sustainable Biomaterials Global Certification, RSB Global)、可持续生物质圆桌倡议组织欧盟RED认证标准(Roundtable on Sustainable Biomaterials RED Certification, RSB EU RED)、国际可持续碳认证体系(International Sustainability and Carbon Certification, ISCC), 以及全球生物能源伙伴关系《生物质能可持续指标》(Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy, GBEP-SIB)和国际标准化组织的《ISO 13065: 生物质能可持续性标准》(ISO Sustainability Criteria for Bioenergy, ISO-scb)等。

ICAO于2012年成立航空替代燃料专家工作组(Alternative Fuels Task Force, AFTF), 具体负责“航空替代燃料可持续性标准”制定及机制建设工作。在制定标准时, AFTF广泛借鉴了上述可持续生物质能政策和标准, 目前已经批准通过部分标准草案, 其余正在加紧讨论中。

作为保障CORSIA顺利实施的重要措施之一, 该标准对航空替代燃料的“可持续性”做出了明确定义, 需满足环境、经济、社会3个方面共涉及温室气体、碳储量、水、土壤、空气、资源保护、废弃物和化学品处理、人权和劳动权、土地使用权与土地利用、水使用权、本地社会发展及食品安全等12条准则的要求, 方可认定为“可持续航空燃料”^[13]。目前, ICAO批准了标准草案中“温室气体”和“碳储量”两条准则。其中准则1“温室气体”即要求^[13]“与化石喷气燃料相比, 可持续替代喷气燃料全生命周期内的净温室气体排放量须至少减少10%”; 准则2“碳储量”原则规定“可持续替代喷气燃料不应使用从碳储量较高的土地获取的生物质来生产”, 突出了航空替代燃料应具备的碳减排作用。

根据CORSIA草案, 某一种航空替代燃料是否具有“可持续性”和碳减排功能, 要根据ICAO制定的“航空替代燃料可持续性标准”来判断和认证, 各航空公司需使用这种“可持续航空燃料”才能履行减排任务, 而不满足可持续性的航空替代燃

料只能被视为常规化石航煤计算碳排放量,难以真正起到碳抵消和减排作用。同时,只有经ICAO认可的第三方机构有资质开展航空替代燃料可持续性认证工作。

1.3 航空生物燃料可实现温室气体大幅度减排

根据CORSIA框架内容和“航空替代燃料可持续性标准”草案^[13],在某一年度里,飞机运营人若使用了可持续航空燃料,则产生的温室气体减排量须按式(1)计算。

$$ER_y = FCF \times \left[\sum_f MS_{fy} \times \left(1 - \frac{LS_f}{LC} \right) \right] \quad (1)$$

式中, ER_y 为给定年度 y 使用可持续航空燃料产生的减排量, t; FCF 为燃料转换系数, 对于 Jet-A 型燃料 (国内对应 3 号航煤) 值为 $3.16 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$, 对于航空汽油值为 $3.10 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$; MS_{fy} 为给定年度 y 申报的可持续航空燃料总质量, t; LS_f 为某种可持续航空燃料 f 的全生命周期 CO_2 当量排放值, g/MJ ; LC 为常规化石航煤的全生命周期排放值, 对于 Jet-A 型燃料 (国内对应 3 号航煤) 其值等于 $89 \text{ g}/\text{MJ}$, 航空汽油为 $95 \text{ g}/\text{MJ}$ 。

式中比率 $\left(1 - \frac{LS_f}{LC} \right)$ 亦称为可持续航空燃料减排系数 (ERF_f)。可以看出, 当某种可持续航空燃料 f 全生命周期温室气体排放量越少时, LS_f 值越小, ERF_f 数值也越近似于 1, ER_y 值也就越大, 即意味着在给定年度 y 使用某种可持续航空燃料 f 产生的减排量越多。

同时, CORSIA “航空替代燃料可持续性标准”草案也给出了可持续航空燃料全生命周期默认排放值, 如表 1 所示。需要说明的是, 在对某一种航空替代燃料的“可持续性”进行认证时, 如果对默认

值有疑议, 申报人可以给出自己的计算值, 但采用的计算方法及全部流程必须遵照 CORSIA 相关标准及程序, 否则将不予认可。

根据上述计算公式及默认排放数值, 目前航空生物燃料主流技术路线的全生命周期温室气体减排幅度在 $67\% \sim 94\%$, 因生物质原料种类和工艺路线不同而有所差异。单从减排指标看, 现有各类航空生物燃料都符合 ICAO “航空替代燃料可持续性标准”。可以预见, 航空生物燃料将在民航减排行动中发挥重要作用, 具有良好的市场应用前景。

2 可持续航空生物燃料的规模化应用

2.1 商业应用呈燎原之势, 行业新增长点正在形成

航空生物燃料作为一种航空替代燃料, 自 2008 年 2 月由英国维珍大西洋航空公司 (Virgin Atlantic Airways) 首次使用完成试飞以来, 已历经多国航空公司和美国、荷兰军方近百次试飞, 现在已初具市场规模, 新的行业增长点正在形成。据 ICAO 公开资料显示^[14], 美国、加拿大、挪威、芬兰等国已经形成航空生物燃料规模化市场, 建立了“原料-炼制-运输-加注”的完整产业链。在我国, 中国石油、中国石化等能源公司与航空公司、飞机制造商、中国航油等合作, 先后完成了 2 次航空生物燃料验证飞行和 2 次载客商业飞行, 积累了较为丰富的航空生物燃料生产、调合及适航审定经验, 在国内外赢得了较大影响力。目前, 全球航空生物燃料载客商业飞行已超过 10 万架次, 美国、瑞典、挪威的 5 个机场已实现航空生物燃料的常规加注, 8 个机场进行了航空生物燃料的批次加注, 如表 2 所示, 商业应用已呈燎原之势。

表 1 可持续航空燃料全生命周期默认排放值^[13]

工艺路线	生产原料	全生命周期 核心排放值	间接土地使用变化 全生命周期排放值	LS_f $/\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$
费托合成石蜡煤油	农业废弃物	7.7	0.0	7.7
	林业废弃物	8.3		8.3
	城市固体垃圾, 非生物质碳 (NBC) 为 0	5.2		5.2
	城市固体垃圾 (所给 NBC 值为非生物质碳含量的百分比)	$\text{NBC} \times 170.5 + 5.2$		$\text{NBC} \times 170.5 + 5.2$
甘油三酯和脂肪酸	动物油脂	22.5	0.0	22.5
加氢合成石蜡煤油	餐厨废弃油	13.9		13.9
	棕榈油脂脂肪酸	20.7		20.7
	玉米油	17.2		17.2
异丁醇/乙醇合成石蜡煤油	农业废弃物	29.3	0.0	29.3
	林业废弃物	23.8		23.8

表2 加注航空生物燃料的机场及航空公司^[14]

常规加注航空生物燃料的机场	加注航空生物燃料的航空公司
美国洛杉矶国际机场 (Los Angeles International Airport)	美联航(United Airlines) 荷兰皇家航空公司(KLM)
挪威奥斯陆机场(Oslo Airport)	德国汉莎航空公司(Lufthansa) 北欧航空公司(SAS) 荷兰皇家航空公司(KLM/KLC)
瑞典斯德哥尔摩阿兰达机场 (Stockholm Arlanda Airport)	北欧航空公司(SAS) 荷兰皇家航空公司(KLM)
瑞典韦克斯莫兰机场 (Växjö Småland Airport)	巴西航空公司(BRA) 荷兰皇家航空公司(KLM)
挪威卑尔根机场(Bergen Airport)	所有离港航班

注:进行航空生物燃料批次加注的8个机场为瑞典斯德哥尔摩布鲁玛机场(Stockholm Bromma Airport)、瑞典厄斯特松德机场(Åre Östersund Airport)、瑞典哥德堡-兰德维特机场(Göteborg Landvetter Airport)、瑞典卡尔斯塔德机场(Karlstad Airport)、瑞典哈尔姆斯塔德机场(Halmstad Airport)、澳大利亚布里斯班机场(Brisbane Airport)、美国芝加哥奥黑尔国际机场(Chicago O'Hare International Airport)、加拿大多伦多皮尔逊国际机场(Toronto Pearson International Airport)。

2.2 国内外市场潜力巨大,应用前景良好

全球民航业近10年来保持快速稳定发展,航煤消费量年均增长3%~4%,2017年超过2.7亿吨^[1]。据IATA预测,2018年全球航煤市场将达到1400亿美元规模,同时航空替代燃料市场规模可望达到5000万美元,截止2017年12月全球订单量累计已达635万吨,如表3所示。

全球航煤需求的稳定增长主要得益于中国等新兴经济体民航运输的快速发展。截至2017年底,我国民航运输飞机在册架数3296架,比去年底增加346架,同年全行业运输周转量、旅客运输量、货邮运输量等主要运输指标再次实现较快增长^[16]。以旅客运输量指标为例,2017年全行业完成旅客运输量约5.52亿人次,比2016年增长13.0%。国内

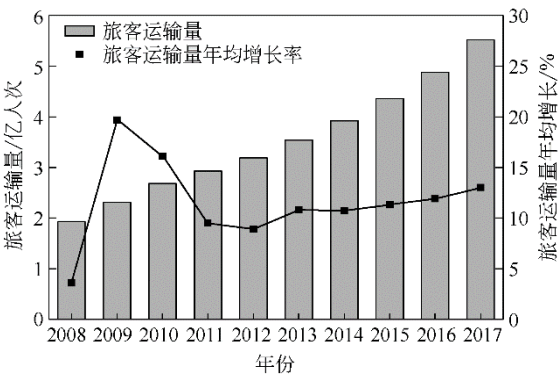


图1 中国民航旅客运输量^[16]

航线完成旅客运输量4.96亿人次,比2016年增长13.7%,其中港澳台航线完成1027万人次,比2016年增长4.3%;国际航线完成旅客运输量5545万人次,比2016年增长7.4%。过去10年(2008—2017年),全行业旅客运输量年均增长11.6%,如图1所示。

随着中国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段,市场需求结构升级加快,在交通运输领域表现为人们选择出行方式更趋多元化,对安全、舒适、便捷的高质量服务需求更加突出。国内中长距离客运和跨地区、跨国家境外出行,即出行距离在1500km及以上时,航空运输运营机制成熟,运营优势较为明显,乘坐飞机无疑是首选出行方式^[17],并且随着我国居民收入水平不断提高,全面开放新格局下海内外经济社会活动和人员交流往来更加密切频繁,可以预见,未来民航业将继续保持中高速发展态势。

与之相应的是,2007—2017年中国航煤消费量年均增长10.3%,2017年表观消费量达3345万吨,同比增长10.5%,已成为全球第二大航煤消费国。据行业预测,未来几年我国航煤消费量年均增速将保持在10%左右,预计到2020年将达到4400

表3 全球航空生物燃料订单情况^[15]

订货方	供应商	技术路线	年供应量/t	供应年限/a	交付年	合同签订年
美联航(United Airlines)	Altair	HEFA	17000	3	2016	2013
	Fulcrum	市政垃圾(FT)	270000	10	2019	2015
国泰航空(Cathay Pacific)	Fulcrum	FT	100000	10	2019	2014
美国西南航空公司/联邦快递公司(FedEx/Southwest)	Red Rock	FT	10000	8	2017	2014
美国捷蓝航空(JetBlue)	SG Preston	HEFA	100000	10	2019	2016
澳洲航空公司(Qantas)	SG Preston	HEFA	80000	10	2020	2017
挪威奥斯陆机场(Oslo Airport)	Neste/Altair	HEFA	250	1	2016	2016
布里斯班机场(Brisbane Airport)	GEVO	ATJ	80	2	2018	2017
多伦多皮尔逊国际机场(Toronto Pearson International Airport)	Altair	HEFA	200	1	2017	2016

万吨,而随着中国民航业增长基数增加,大机场逐步饱和以及高铁替代等影响,预计2025年后年均增长率保持在8.5%左右。

预计2021—2035年15年间累计航煤消费增量可达8.2亿吨,其中国际航线航煤消费量占比届时将由目前的30%提高到40%~45%,如表4所示。根据CORSIA实施方案,由此产生的化石航煤碳排放增量可以通过使用经ICAO认证的SAF来抵消,按航空替代燃料掺混上限50%计算^[8],则2021—2035年航空生物燃料最大累计需求量可达1.6~1.8亿吨。国内外航空生物燃料市场潜力巨大,应用前景良好。

2.3 新技术不断涌现,国外研发进度明显加快

以动植物油脂或餐厨废弃油为原料,经加氢脱氧-加氢裂化/异构工艺(HEFA)合成航空生物燃料,或者以农林废弃物、城市有机生活垃圾等生物质为原料,经费托合成(F-T)制备航空生物燃料是目前研究最深入、开发最完备、应用最广泛的两种生产技术,也最先通过了美国材料与试验协会(American Society for Testing Materials, ASTM)新型航空涡轮发动机燃料与燃料添加剂合格认证与审批,被首批列入ASTM D7566《含合成烃类的航空涡轮燃料规格标准》的技术附录。

作为国际民航业普遍认可的航煤标准制定者,ASTM制定的ASTM D7566标准自2009年颁布以来,历经数次修订,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严格的规范要求,极大地促进了航空生物燃料产业发展,也较快地反映了工艺技术的更新和进步。目前,该标准最新修订版为2018年推出的ASTM D7566—18,列入其附录的技术路线已经扩展到5种,如表5所示。除了广为熟知的HEFA和F-T合成两种技术路线外,历次修订过程中逐步增添了SIP、FT-SPK/A、ATJ-SPK等3种技术路线,反映出随着航空生物燃料市场前景看好,国外研发进度明显加快,新技术新工艺不断涌现。

2.3.1 SIP技术进展及应用

SIP技术是由美国Amyris公司首先研发并推广的,曾获得2014年美国绿色化学挑战奖的小型业务奖^[9]。其基本技术流程为:以甘蔗制糖为原料,通过基因工程酵母菌发酵生产法呢烯($C_{15}H_{24}$),再经加氢工艺和分馏制得法呢烷($C_{15}H_{32}$),法呢烷作为化石航煤的调合组分使用。ASTM D7566标准在2014年6月修订后,正式批准该技术路线及法呢烷可用于商业航空飞行,但可能受限于化石航煤黏度指标要求,掺混比例上限定为10%^[18]。

法呢烯是多种同分异构体的统称,一般至少含有(6E)-7,11-二甲基-3-亚甲基-1,6,10-十二碳三烯(CAS登记号:18794-84-8)或者(E,E)-3,7,11-三甲基-1,3,6,10-十二烷四烯(CAS登记号:502-61-4),化学结构式如图2所示。因为法呢烯是一种支

表4 2021—2035年中国航空生物燃料市场规模预测

2019年航煤 消费量估值 ^① /10 ⁴ t	2020年航煤 消费量估值 ^① /10 ⁴ t	2019—2020年航煤 消费基线值 ^② /10 ⁴ t	2021—2035年预测 累计增量 ^③ /10 ⁴ t	2021—2035年国际 航线耗油量占比/%	航空生物燃料 累计最大需求量 ^④ /10 ⁴ t
4047	4452	4250	81566	40~45	16313~18352

①2025年前按年均增速10%计,2025年后按年均增速8.5%计,估算未来各年航煤消费量;②为2019—2020年两年航煤消费量的平均值;③自2021年起,各年航煤消费预测增量=当年预估消费量-消费基线值,如2021年预测消费增量为619.52万吨,以此类推,并求得得到累计量;④根据ASTM D7566—18,航空替代燃料与化石航煤掺混上限为50%,同时,CORSIA目标对象为国际航线产生的温室气体排放增量,据此计算得到15年最大累计需求量。

表5 ASTM D7566—18所列5种航空替代燃料生产技术^[18]

技术附录编号	技术工艺路线	标准原文表述及缩写	与化石航煤掺混比例上限/%
A1	费托合成石蜡煤油	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene (FT-SPK)	50
A2	甘油三酯和脂肪酸加氢合成石蜡煤油	Hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA)	50
A3	发酵性糖加氢合成异构烷烃	Synthesized iso-paraffins from hydroprocessed fermented sugars (SIP)	10
A4 ^①	添加芳烃的费托合成石蜡煤油	Fischer-Tropsch hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene plus aromatics (FT-SPK/A)	50
A5	异丁醇/乙醇合成石蜡煤油	Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene (ATJ-SPK)	50

①跟A1的区别在于:A1工艺芳烃含量低,A4工艺有意增加了芳烃含量。增加的芳烃是由非化石基轻质芳烃(主要是苯)与F-T合成所产烯烃通过烷基化反应制得。

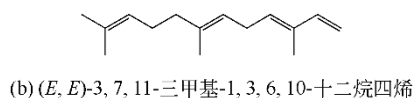
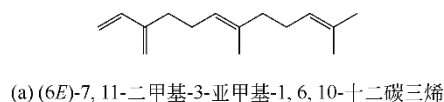


图2 法呢烯两种主要同分异构体

链烯烃的平台化合物,除了可用于生产航空生物燃料外,还可用于制造多种产品,包括化妆品、洗涤剂精细化学品,以及基础油、润滑油、可再生柴油等运输燃料及添加剂。例如,法呢烯经催化加氢制备的可再生柴油,已通过美国环保署(EPA)认证,不含硫或颗粒物,与化石柴油相比,有较高的十六烷值,低温流动性也得到明显改善,使用调合比可高达35%,并且经全生命周期分析,与EPA基化石柴油相比温室气体排放量减少82%^[19]。

法呢烯本身也是高分子材料单体,与橡胶化合物结合可产生具有优良性能的橡胶新品种。2011年,日本可乐丽有限公司与Amyris公司联合开发出液体法呢烯橡胶(LFR)合成技术^[20],将生物基法呢烯精制到适合聚合的纯度水平进而合成生产LFR。该液体橡胶黏度明显低于普通液体异戊二烯橡胶,当用作橡胶化合物添加剂时,赋予橡胶高塑性,即使低温下也能保持良好的柔韧性,提高了轮胎冰湿滑抓地性能,并能阻止硬化现象发生,使得轮胎性能得以长期保持。同时,Amyris公司于2016年8月获得了美国能源部(DOE)一项为期3年、价值数百万美元的合作,将与美国Renmatix公司和道达尔新能源美国公司合作,开发以木质纤维素原料制备法呢烯的技术,目标是使基于纤维素的法呢烯生产成本低于1美元/升,从而与Amyris公司现有的甘蔗糖浆发酵产法呢烯成本相当^[21]。

因此,SIP技术路线无疑具有较好的工艺灵活

性,航空生物燃料生产商可根据市场动态和产品需求灵活切换主产品,保证自身盈利能力。随着木质纤维素预处理及水解技术的突破,当木质纤维素原料可以高效低成本地转化为发酵性糖类时,将会进一步增强这一技术路线的经济性。

2.3.2 ATJ-SPK 技术进展及应用

ATJ-SPK技术首先由美国Gevo公司于2010年研发成功,基本技术流程为:以糖为底物,通过基因工程菌高浓度发酵生产异丁醇,再经脱水得到异丁烯,随后烯烃经齐聚、加氢及分馏工艺制得航空生物燃料等烃类燃料,主要副产物为异辛烷等,如图3所示。ASTM D7566标准在2016年初修订后,正式批准该技术路线及烃类产品可用于商业航空飞行,掺混比例上限最初定为30%^[22],2018年新修订后提高到50%,并且在A5附录中增补了微生物发酵产乙醇合成石蜡煤油的技术路线,即由乙醇脱水制得乙烯,随后乙烯再经类似后续工艺制得目标产品。同时,该标准还明确最终目标是:一旦获得样本量充足的合格测试数据,将准许所有C₂~C₅醇类应用于ATJ-SPK工艺以生产航空生物燃料^[18]。

Gevo公司的异丁醇发酵菌株最初购自嘉吉(Cargill)公司,后对其进行了合成生物学与代谢工程改造,除了以粮食、甘蔗、甜菜等原料制得的发酵性糖为底物外,还可以利用纤维素水解混糖发酵产异丁醇。该技术工艺的另一特色在于最大限度地利用了现有乙醇发酵装置及其工艺条件,并且开发了专有的异丁醇连续分离技术,从而解决了异丁醇浓度过高造成的反馈抑制问题。Gevo公司还与Los Alamos国家实验室(LANL)等建立合作伙伴关系^[23],提升现有异丁醇制烃类的工艺催化效率,降低成本,旨在产出含有更多烃种类(如芳烃)、更高能量密度的航空生物燃料组分,有望比传统化石航煤提供更长的航程,从而可进一步提高在化石航煤中的掺混比例,并同时满足美国军方

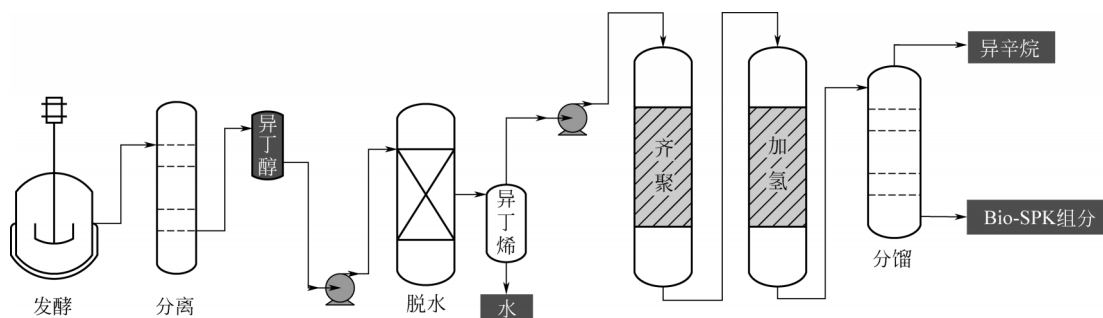


图3 ATJ-SPK技术路线

空、海巡航导弹使用需求。目前, Gevo公司公开报道产量为:乙醇2千万加仑(约6万吨)/年,异丁醇150万加仑(约4600吨)/年,烃类产品5万加仑/年。

异丁醇作为平台化合物,本身就具有广泛的用途,中间产物异丁烯也是塑料和纤维的原材料,可为橡胶、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等高分子材料的可再生生产提供一条途径,如图4所示。2013年8月, Gevo公司位于美国得克萨斯州Silsbee的生物基对二甲苯装置投产,设施位于已有的ATJ-SPK装置附近,利用发酵产异丁醇转化为对二甲苯^[24]。早在2011年, Gevo公司和日本东丽工业公司就在实验室成功地从生物基异丁醇生产出完全可再生和可回收的PET纤维和薄膜^[25]。东丽公司已签署了采购协议,购买来自Gevo公司的生物基对二甲苯,将其转化成聚酯纤维、纺织品和薄膜,用于规模化放大评估和市场开发。产品的多元化可以为ATJ-SPK技术路线提供更好的整体经济性,这一特点与SIP技术路线类似。

3 CORSIA实施的行业影响

3.1 技术性贸易壁垒阻碍行业持续稳定发展

自2017年9月ICAO明确提出“可持续航空燃料”这一概念要求后,在欧美发达国家主导下,ICAO工作重心就从制定航空替代燃料质量及安全标准快速转向可持续性认证标准。目前,ICAO正在CORISA框架下加紧制定包括“航空替代燃料可持续性标准”在内的一系列实施与认证标准。

若这一系列实施与认证标准最终获得完全通过并强制执行,未来我国民航业温室气体减排量将受

制于人,行业运营成本也会被迫大幅提高。根据民航业测算,自2021年起至2035年,按中国航煤消费量年均增长10%、碳交易价格按10~15美元/吨计,15年间中国民航业(大陆地区)将累计购买碳信用约1000亿人民币。同时,可持续性标准的实施势必形成新的技术性贸易壁垒,阻碍民航业的快速健康发展,我国现有航空生物燃料生产技术与产品可能因此应用受限甚至遭淘汰,也将影响新能源产业的持续稳定发展。

3.2 中国民航业将面临双重减排压力

CORSIA是全球民航业落实联合国气候变化大会《巴黎协定》的重要措施,我国民航业无疑将代表中国履行减排承诺。根据预测结果^[27],在基准情景下,2020年中国民航业温室气体排放量将达到1.32亿吨,2035年将达到3.23亿吨;在发展情景下,2020年温室气体排放量将达到1.35亿吨,2035年将达到3.51亿吨;而在低碳情景下,若不考虑航空生物燃料替代的影响,温室气体排放量2020年可能达到1.27~1.30亿吨,2035年将达到2.71~3.04亿吨。即使乐观地认为2035年航空生物燃料替代率达到12%,民航业温室气体排放量2020年也将达到1.28亿吨,2035年将达到2.69亿吨。在现有CORSIA框架下,我国在进行艰苦谈判的同时也势必面临极大的减排任务压力。

同时,全国碳排放权交易市场已经在2017年底启动,首批纳入电力行业,其他行业逐步纳入。民航业作为被涵盖的8个重点行业之一,也是交通部门唯一被纳入的行业,将成为唯一涉及国际国内两个碳交易市场的行业,一旦开始征收碳排放税,中国民航业将面临国际国内双重减排压力。

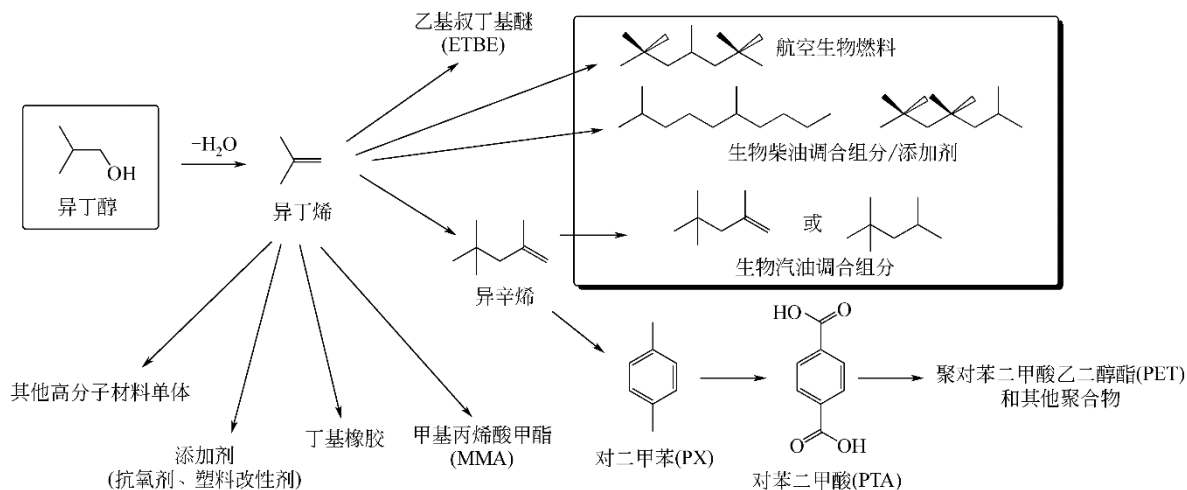


图4 从异丁醇制取航空生物燃料和其他化学品^[26]

3.3 对现有化石航煤生产、储运体系产生影响

航空涡轮燃料(航空煤油)具有强制性、广泛的国际通用性和高度的安全性的特点,有别于其他所有运输燃料。航空生物燃料作为一种替代燃料更是如此,其每一种新技术、新产品都必须经过一套漫长、繁琐、严苛、昂贵的合格认证与审批流程,才能被批准使用。按照国际通行规则,航空生物燃料在质量及安全性上需满足 ASTM D7566 标准,掺混调合后所得生物航煤还需满足 ASTM D1655、DEF Stan 91—91 或 GB 6537 等标准^[28],加上即将正式颁布施行的 ICAO “航空替代燃料可持续性标准”,这些都将对现有化石航煤生产、调合、储运、质控体系产生一系列影响。

在生产环节,航空生物燃料生产商或石化炼厂根据所采用的技术工艺路线,需新建生产装置或改造现有装置,并建设相应配套工程。在调合储运环节,国家主管部门或行业协会需明确航空生物燃料掺混调合比例,生产商或石化炼厂增建调合储运设施。较为复杂的环节在于质控体系的更新,国内需要加紧制定与 ASTM D7566—18 及 ASTM D1655 等效的航空涡轮生物燃料国家标准,以及与 ICAO “航空替代燃料可持续性标准”对等的航空燃料可持续性行业或国家标准,建立并完善民航业、石油石化业或航空生物燃料生产商的温室气体监测/报告/核查管理体系。在此基础上,生产商方可根据相关标准及规范对航空生物燃料产品及调合后的出厂航煤进行质量控制,接受国家主管部门或其授权的第三方机构对全过程温室气体减排量的监测核算,并通过航空生物燃料的可持续性认证。

4 应对措施与建议

4.1 加快制定完善国内规范与标准

当务之急应在政府主导下,由行业协会牵头,联合航空生物燃料产业链上下游利益相关方,如航空公司、炼化生产企业、航煤销售企业、科研院所等共同应对 CORSIA 框架的实施,加快制定完善航空涡轮生物燃料国家质量标准和航空燃料可持续性行业/国家标准,开发既满足国际社会共识又符合中国国情的可持续航空替代燃料适航审定技术,健全航空生物燃料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。由此,才能更好地促进我国航空生物燃料的研发、生产和应用,保障产业持续健康发展,也有利于在面

对欧美发达国家主导的政策与标准制定进程时掌握磋商谈判主动权。

4.2 协同合作进行国际磋商与谈判

民航业的温室气体减排工作,包括应对 CORSIA 框架的实施,已经不仅仅是航空公司或者民航业一个行业的分内之事,而是涉及产业链上下游的系统工程,需要相关方协同配合,共同应对。借鉴欧美国家经验,应由政府主导建立合作机制,联合来自民航、能源、农林业、碳税金融、质量认证等行业的企业、研究机构、行业组织,组建谈判专家工作组参加 CORSIA 框架后续磋商谈判,并开展相关研究工作。由此,可以增强我国在磋商谈判中的话语权,切实维护行业正当发展权益。中国石油作为综合性国际能源公司,正在努力践行绿色发展战略,同时作为大型央企,也肩负着保障国家能源安全、履行碳减排承诺的责任,应该全力支持并积极参与到此项工作中去。

4.3 加速推进工业生产示范装置建设和运行

2011年10月28日,中国石油联合多家单位成功完成我国首次航空生物燃料验证试飞。其后,中国石油、中国石化先后投入力量进行航空生物燃料生产成套技术研发。中国石化于2014年2月获得中国民航局颁发的1号生物航煤技术标准规定批准书,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。2017年,中国石化航空生物燃料加氢装置改造项目获可行性研究批复,计划于2018年底在镇海炼化完成建设,投产后预计餐厨废弃油及棕榈酸化油等原料处理规模达到10万吨/年。中国石油通过航空生物燃料重大科技专项的实施,已全面掌握以餐厨废弃油、小桐子油、棕榈酸化油等原料制备航空生物燃料的具有自主知识产权的生产成套技术,并在积极推进四川石化南充6万吨/年航空生物燃料装置建设,为实现规模化商业应用打下了良好基础。

但是,面对航空生物燃料的市场潜力和需求,现有产能缺口巨大,供需矛盾将在未来几年逐步显现,生产企业必须加快工业生产示范装置建设,并力争在2021年前建成商业化生产装置,实现长周期稳定运行,迅速抢占市场,规避可能出现的化石航煤销售、加注、使用风险。另外,还要进一步加大研发投入,加快航空生物燃料生产新技术开发和储备,开发原料适应性更强、氢耗能耗更低、非贵金属催化剂的加氢技术,或者能够利用木质纤维素原料、联产多种生物燃料或生物基化学品/材料单

体的灵活技术路线,进一步降低生产成本,增强产品经济竞争力,提高自身盈利能力,并争取尽快使新技术进入ASTM新型航空涡轮发动机燃料与燃料添加剂合格认证与审批流程,早日通过质量与安全认证,获得国际通行的合法使用“牌照”。

4.4 广泛开展产业链上下游交流与合作

过去四十年随着涡轮发动机技术的不断提高,飞机燃油效率已经处于较高水平,中国民航运输能源强度近二十年来持续下降,2016年吨公里油耗为0.292kg/(t·km),相比1990年吨公里油耗降幅达38.5%^[28],靠提高燃油效率实现减排目标的操作空间已经很小。同时,我国航空公司的机型较新,机龄较短,行业整体燃油效率已高于欧美发达国家,通过改善机型进行减排的提升潜力也很小。航空公司也在努力提高运行效率,通过优化航路航线、减少非直线飞行距离来减少碳排放,但受限于空域管制,一般难以实现最佳航线、最佳飞行高度和飞行速度。

在未来中国民航业仍将快速增长的预期下,运输规模增长将继续推动碳排放增长,航煤作为航空公司运营的最大成本因素,对行业发展影响巨大,也成为碳减排的主要突破口。国内民航业已形成共识,可持续航空生物燃料是应对气候变化、实现碳减排的根本途径和最重要措施,也是航空公司应对未来国际竞争、打破行业碳壁垒、增强竞争力的有效抓手。即使目前航空生物燃料生产成本数倍于化石航煤售价,国内主要航空公司仍然对航空生物燃料需求迫切,对相关生产技术及产品标准等越发关注。在此背景下,切实需要产业链上下游各方充分沟通与交流,广泛开展合作,使燃油需求侧与供给侧之间形成协同联动,强强联合形成合力,加上政策扶持引导,才能真正建立完善“原料-炼制-运输-加注-使用”的完整产业链,为我国民航业和新能源产业的可持续发展提供有力支撑。

5 结语

为了保障航空运输业可持续发展,实现温室气体减排目标,国际民航业通过了CORSIA计划,明确提出了航空替代燃料可持续性要求,为保障计划顺利实施将强制推行一系列实施与认证标准,已于2019年1月1日起部分施行。这一系列举措所产生的技术性贸易壁垒,将会大幅提高我国民航业运营成本,使中国民航业面临国际国内双重减排压力,同时对现有化石航煤生产、调合、储运、质控体系

产生一系列影响,阻碍民航业和新能源产业的持续稳定发展。

可持续航空生物燃料是应对气候变化、实现碳减排的根本途径和最重要措施,这已是国际民航业的普遍共识。面对新的发展趋势,我国航空生物燃料产业链上下游各方应充分认清当前形势,因势利导,从以下几个方面做出积极应对:一是转变发展方式,培育行业新增长点,在政府主导下,由行业协会牵头,联合各方加快制定完善航空涡轮生物燃料国家质量标准和航空燃料可持续性行业/国家标准;二是由政府主导建立合作机制,相关方协同配合共同应对国际磋商与谈判,维护我国正当发展权益权益;三是生产企业必须加快工业生产示范装置建设,力争在2021年前建成商业化生产装置,实现长周期稳定运行,并需要进一步加快新技术开发和储备;四是上下游各方应广泛开展交流与合作,建立完善“原料-炼制-运输-加注-使用”的完整产业链,才能增强行业国际竞争力,实现可持续发展。

参考文献

- [1] International Air Transport Association. World air transport statistics [R]. Montreal-Geneva: IATA, 2018: 33.
- [2] SHONNARD D R, WILLIAMS L, KALNES T N. Cameline-derived jet fuel and diesel: sustainable advanced biofuels[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2010, 29(3): 382-392.
- [3] 胡徐腾, 齐泮仑, 付兴国, 等. 航空生物燃料技术发展背景与应用现状[J]. 化工进展, 2012, 31(8): 1625-1630.
HU Xuteng, QI Panlun, FU Xingguo, et al. Technology development background and application status on aviation biofuel[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(8): 1625-1630.
- [4] International Civil Aviation Organization. CAEP-SG/20172-WP/6: ICAO CORSIA package[Z]. Montreal: ICAO, 2017.
- [5] International Civil Aviation Organization. A37-19: consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection-Climate change[Z]. Montreal: ICAO, 2010.
- [6] International Civil Aviation Organization. A38-18: consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection-Climate change[Z]. Montreal: ICAO, 2013.
- [7] International Civil Aviation Organization. A39-3: consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection-Global Market-based Measure (MBM) [Z]. Montreal: ICAO, 2016.
- [8] International Civil Aviation Organization. Declaration of the second conference on aviation and alternative Fuels (CAAF/2) [Z]. Mexico: ICAO, 2017.
- [9] World Commission on Environment and Development. Our common future[R]. Oslo: WCED, 1987: 16.
- [10] International Organization for Standardization. Sustainability criteria for bioenergy: ISO 13065: 2015 (E)[S]. Geneva: ISO, 2015.
- [11] 胡晓佳, 鲍梦瑶, 刘文兰, 等. 航空替代燃料可持续标准体系研究及国内发展现状分析[J]. 民航科技, 2018, 186 (2): 124-128.

- HU Xiaojia, BAO Mengyao, LIU Wenlan, et al. Research of sustainable criteria and domestic development status for aviation alternative fuels[J]. Civil Aviation Science & Technology, 2018, 186(2): 124-128.
- [12] 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.
- CHANG Shiyan, KANG Liping. Global bioenergy sustainability initiatives and implications for policy making in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 1-10.
- [13] International Civil Aviation Organization. State letter AN 1/17.14-17/129: proposal for the first edition of annex 16, volume IV, concerning standards and recommended practices relating to the carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA)-attachment C: ICAO CORSIA implementation elements and supporting documents [Z]. Montreal: ICAO, 2017.
- [14] International Civil Aviation Organization. ICAO global framework for aviation alternative fuels: aviation live feed-alternative fuels[EB/OL]. [2018-11-26]. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/default.aspx>.
- [15] International Air Transport Association. Alternative fuels: sustainable aviation fuels in practice[EB/OL]. Montreal-Geneva: IATA, 2017 [2018-07-02]. http://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-alternative-fuels.pdf.
- [16] 中国民用航空局. 2017年民航行业发展统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局, 2018.
- Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin of civil aviation industry development in 2017[R]. Beijing: CAAC, 2018.
- [17] 芮海田, 吴群琪. 高铁运输与民航运输选择下的中长距离出行决策行为[J]. 中国公路学报, 2016, 29(3): 134-136.
- RUI Haitian, WU Qunqi. Medium and long distance travel mode decision between high-speed rail and civil aviation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 134-136.
- [18] American Society for Testing Materials. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons: D7566-18 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [19] Green Car Congress. Solazyme and amyris receive presidential green chemistry challenge awards[EB/OL]. [2014-10-16]. <https://www.greencarcongress.com/2014/10/20141016-pgcc.html>.
- [20] KURARAY CO., LTD. Liquid farnesene rubber used in car tires for first time: a biologically derived liquid rubber that improves ice grip [EB/OL]. [2017-02-20]. <http://www.kuraray.com/release/2017/170220.html>.
- [21] COONS R. Amyris wins DOE contract for cellulose-based farnesene [EB/OL]. Chemical Week[2016-08-08]. <https://chemweek.com/CW/Document/81370/Amyris-wins-DOE-contract-for-cellulose-based-farnesene?connectPath=Search&searchSessionId=568bef33-450a-4864-9daa-6d2e41af6d14>.
- [22] American Society for Testing Materials. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons: D7566-16 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [23] RODEWALD D. Los alamos national laboratory to collaborate with gevo to develop missile fuel[EB/OL]. Globe Newswire[2017-10-09]. <https://www.marketscreener.com/GEVO-INC-32739804/news/Los-Alamos-National-Laboratory-to-Collaborate-with-Gevo-to-Develop-Missile-Fuel-25250679/>.
- [24] HARDCASTLE J L. Gevo, coke, toray partner on renewable pet technology[EB/OL]. Environmental Leader[2013-08-27]. <https://www.environmentalleader.com/2013/08/gevo-coke-toray-partner-on-renewable-pet-technology/>.
- [25] TORAY Industries INC. Toray succeeds in production of fully renewable, biobased polyethylene terephthalate (PET) polymer[EB/OL]. [2011-06-27]. <https://www.toray.com/news/eco/nr110627.html>.
- [26] 胡徐腾, 李振宇, 付兴国, 等. 液体生物燃料: 从化石到生物质[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 329.
- HU Xuteng, LI Zhenyu, FU Xingguo, et al. Liquid biofuels: from fossil to biomass[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 329.
- [27] 于敬磊, 周玲玲, 胡华清. 中国民航碳排放的历史特征及未来趋势预测[J]. 中外能源, 2018, 23(8): 10-15.
- YU Jinglei, ZHOU Lingling, HU Huaqing. Historical characteristics and future trend forecast of civil aviation carbon emissions in China[J]. Sino-Global Energy, 2018, 23(8): 10-15.
- [28] 齐泮仑, 何皓, 胡徐腾, 等. 航空生物燃料特性与规格概述[J]. 化工进展, 2013, 32(1): 91-96.
- QI Panlun, HE Hao, HU Xuteng, et al. An overview of aviation biofuel characteristics and standard[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(1): 91-96.