

基于发动机与飞机的藻基航空燃料 全生命周期分析

阿鲁斯, 温孟阳, 郭放, 杨晓奕

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 能源与环境国际中心, 北京 100191)

摘 要: 讨论了基于发动机类别及其飞机的藻基航空替代燃料与常规航空燃料对全生命周期的影响。基于 GREET(the greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation)模型,依据平均载荷、最大航程,将民航客机分为单通道窄体、双通道中型、双通道大型、巨型、支线和公务机等 6 类。起飞、爬升、进近、滑行、巡航过程的燃料消耗及排放采用国际民用航空组织、美国 NASA-AAFEX 实验、欧洲 EASA 适航条例提供的数据。计算了 6 类发动机-飞机的气体排放、能量消耗情况。在双通道大型客机中藻基航空替代燃料制备过程的温室气体排放仅为 $0.2351\text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{km})$, 因为该类客机与小型飞机相比有更好的发动机效率和运输效率。然而由于起飞降落过程排放比例较大,单通道窄体客机在航程上对温室气体排放变化更为敏感。

关 键 词: 藻; 替代燃料; 排放; 能耗; 全生命周期分析; 航程

中图分类号: V312⁺.3

文献标志码: A

Life cycle assessment of algae based aviation fuel on basis of engine type and related aircraft

A Lusi, WEN Mengyang, GUO Fang, YANG Xiaoyi

(Energy and Environment International Center, School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Consolidated discussion of life cycle assessment on algae based aviation fuel in combustion emissions on the basis of engine type and related aircraft was conducted by comparing with conventional jet fuel. Using the GREET (the greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation) model, passenger aircrafts were divided into six classes including single aisle, small twin aisle, large twin aisle, large quad, regional jet, and business jet. Each aircraft class was characterized by its average payload, potential flight range, and fuel consumption and emissions during landing, takeoff, taxiing, climbing referred to in the database of NASA-AAFEX, EASA, and CAAC. Also the emissions and energy input were discussed. The pump-to-wheel stage of algae based jet fuel in large twin aisle aircraft shows the least amount of greenhouse gases emission at $0.2351\text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{km})$ because larger aircraft has lower greenhouse gases emissions values than smaller aircraft due to higher engine efficiency and higher payload, however single aisle aircraft appears to be more sensitive to greenhouse gases emission in flight range than larger aircraft due to higher contribu-

收稿日期: 2016-08-26

基金项目: 国际合作创新中心国家重点研究和发展计划(2016YFE0120100)

作者简介: 阿鲁斯(1991—),男,硕士生,主要从事替代燃料全生命周期。

通讯作者: 杨晓奕(1968—),女,教授,博士,主要研究方向为航空替代燃料。E-mail: yangxiaoyi@buaa.edu.cn

引用格式: 阿鲁斯,温孟阳,郭放,等. 基于发动机与飞机的藻基航空燃料全生命周期分析[J]. 航空动力学报,2018,33(6):1315-1325. A Lusi, WEN Mengyang, GUO Fang, et al. Life cycle assessment of algae based aviation fuel on basis of engine type and related aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(6): 1315-1325.

tion of landing and takeoff.

Key words: algae; alternative fuel; emission; energy input;
life cycle assessment (LCA); flight range

国家统计局数据显示,中国 2014 年原油生产量为 21142.92 万吨,原油进口量为 30837 万吨,原油表观消费量为 51979.92 万吨,自产及进口比例为 2:3。对外依赖度为 59.32%,如表 1 所示^[1]。

表 1 近年中国原油对外表观依赖度变化趋势^[1]
Table 1 Change trend of apparent foreign-dependence
of crude oil in China^[1]

时间/ 年	产量/ 万吨	原油出口 量/万吨	原油进口 量/万吨	表观消费 量/万吨	表观对外 依赖度/%
2005	18083	806.6	12708	29985	42.3
2006	18367	633.7	14518	32251	45.0
2007	18665	382.9	16317	34600	47.1
2008	18972	373.3	17889	36488	49.0
2009	18948	518.4	20378	38809	52.5
2010	20301	304.2	23931	43868	54.5
2011	20364	252.2	25254	45367	55.6
2012	20747	243.0	27102	47606	56.9
2013	20812	162.0	28195	48845	57.7
2014	21142	60.0	30837	51920	59.3

与此同时,航空煤油作为燃料燃烧后排放的温室气体由于在高空对全球变暖及臭氧层变化也存在巨大影响;而中国作为世界最大的温室气体排放国,在哥本哈根国际会议上承诺的碳减排将是所要面临的另一个严峻挑战。生物航空替代燃料承担着碳减排和能源安全的双重使命。

由于能源安全及温室气体排放压力,新型替代燃料的研究及制备将是解决以上问题的必经之路。能源藻作为第三代生物燃料,已经成为研究热点,其资源化利用的主要途径是种植、收获、提油,进一步加氢制备能源藻基航空替代燃料^[2]。

1 现有民航客机及发动机燃料需求

2012 年中国民航客机主要航线的统计结果显示,中国民航共执行飞行 1147201 班次,总航程约为 1510283969 km,平均每次飞行距离为 1316.49464 km,平均上座率为 79.18%。最长航

线为成都—乌鲁木齐—喀什,最短航线为福州—台北,执行班次最多的航线为北京—上海,航程为 1087 km,上座率为 86.1%^[3-4]。对于民航客机航程,计算过程需要考虑起飞降落距离、巡航距离、飞机质量、油箱容积、燃料热值等参数,通常通过 Breguet 距离公式来进行计算,公式为

$$R = \frac{H_g}{g} \eta \frac{L}{D} \ln \left(1 + \frac{m_f}{m_{oe} + m_p + m_r} \right) \tag{1}$$

其中 R 代表飞机的航程, H_g 代表飞机所使用燃料的热值, g 代表重力加速度, η 代表发动机效率, L/D 代表飞机的升阻比, m_f 代表燃料质量, m_p 代表载荷质量, m_{oe} 代表飞机的结构质量, m_r 代表对应应急情况时所储备的额外燃油质量。式(1)表明飞机的航程受限于结构、最大起飞质量和燃料容积。具体分布见图 1^[5]。

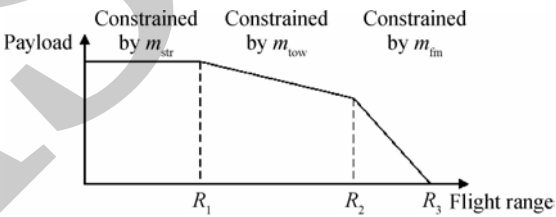


图 1 飞机航程所受限制的 3 个阶段

Fig.1 Three stages of limitation of flight range

在 R_1 范围内,飞机载质量主要受制于飞机受本身结构限制所能搭载的最大载荷质量 m_{str} 。

$$m_p = m_{str} \tag{2}$$

在 $R_1 \sim R_2$ 范围内,飞机载质量主要受制于飞机的最大起飞质量 m_{tow} 。

$$m_p = \frac{m_{tow} - \{ \exp[gDR / (H_g \eta L) - 1] \} (m_{oe} + m_r)}{\exp(gDR / H_g \eta L)} \tag{3}$$

在 $R_2 \sim R_3$ 范围内,飞机载荷主要受限于所搭载的最大燃料质量 m_{fm} 。

$$m_p = \frac{m_{fm}}{\exp[gDR / (H_g \eta L) - 1]} - m_{oe} - m_r \tag{4}$$

以目前国内航线中广泛采用的波音 737-800 客机为例,按照 Breguet 距离公式,计算出国内航线及拟定航线关系^[6],结果见图 2。从图中看出,

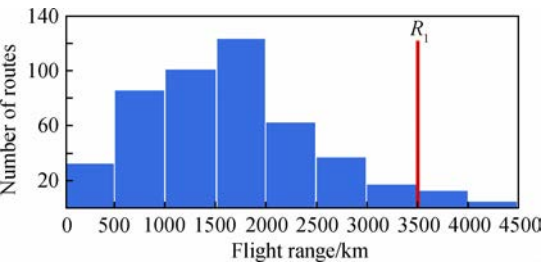


图 2 中国航线长度统计

Fig. 2 Statistics of flight range in China

中国民航执行的飞行班次中 95% 的航线飞行航程在 R_i 内, 当替代燃料的质量、热值、密度与标准航煤相似时, 对最大航程影响较小。

根据现行通用的国际标准, 本研究将中国现役民航客机分为以下 6 类: 载客量 160~180 人的飞机称为单通道窄体客机(SA), 主流机型包括空客 A320 系列、波音 737 系列、中国商用飞机有限责任公司 C919 等; 载客量 200~250 人的飞机称为双通道中型客机(STA), 主流机型包括空客

A330 系列、波音 787-8 等; 载客量 290~310 人的飞机称为双通道大型客机(LTA), 主流机型包括空客 A350 系列、波音 777 系列等; 载客量 550~854 人的飞机称为巨型客机(LQ), 主流机型包括空客 A380 系列、波音 747 系列等; 载客量 80~100 人的飞机称为支线客机(RJ), 主流机型包括 ERJ145 系列、CRJ21-700 等; 载客量 6~10 人的飞机称为公务机(BJ), 主流机型包括湾流 G550、猎鹰 7X 等, 其最大航程、飞行高度、载客量、典型飞机、发动机如图 3 所示^[7]。

由于该数据为美国实际民航运输数据, 无法消除航程优化、飞机实际飞行状态、空管等方面的因素的影响, 本研究选用国内较为常见的 6 类机型为代表, 选用其在 EASA (European Aviation Safety Agency) 公布的适航条例中的最大巡航距离、最大载油量, 以及 ICAO (International Civil Aviation Organization) Emission Database 中的起飞降落阶段耗油量进行分析, 数据如表 2 所示^[8-20]。

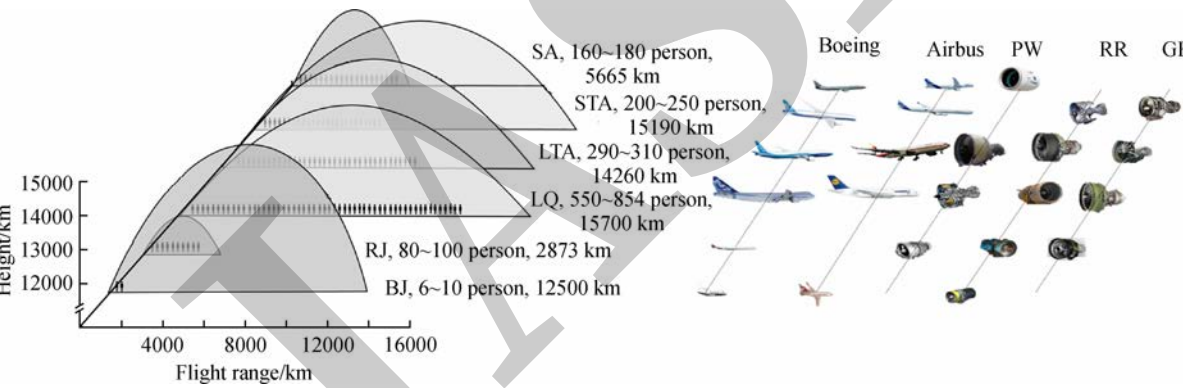


图 3 6 种类型飞机航程及载人示意图^[7]

Fig. 3 Schematic diagram of flight range and payload of six kinds of flight^[7]

表 2 全生命周期分析所选用具体飞机的发动机、航程、耗油率

Table 2 Engine, flight range, specific fuel consumption of specific aircraft used in life cycle assessment

飞机种类	典型 飞机型号	典型 发动机型号	负载起飞 降落耗油量/kg	最大巡航 距离/km	负载全包线 耗油量/kg	巡航平均耗油量/ (kg/km)
SA	737-800	CFM56-7B27	888 ^[8]	5 665 ^[9]	20 871.248 ^[15]	3.527
STA	787-8	GE _{nx} -1B67	1 454 ^[8]	15 190 ^[10]	101 217.212 ^[16]	6.568
LTA	777-200	GE90-85B	4 576 ^[8]	14 260 ^[11]	137 270.32 ^[17]	9.305
LQ	A380	Trent 970-84	3 920 ^[8]	15 700 ^[12]	259 483.892 ^[18]	16.278
RJ	ERJ-145	AE3007A2	276 ^[8]	2 873 ^[13]	5 094.304 ^[19]	1.677
BJ	G550	BR700-710C4-11	588 ^[8]	12 500 ^[14]	15 024.668 ^[20]	1.154

注: 负载起飞降落耗油量使用 ICAO Emission Database, 最大巡航距离使用该型飞机官网数据, 负载全包线耗油量使用 EASA 适航条例。

2 替代燃料全生命周期分析方法

2.1 全生命周期分析范围

本研究选用的计算模型为美国阿贡国家实验室交通研究计算中心设计的 2015 年版本的 GREET(the greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation)^[21]。将全生命周期过程分为原料阶段(原料成长(开采)、原料运输),燃料阶段(原油提取、原油精制),燃料运输与储存,飞机发动机燃烧排放 6 个阶段,其中微藻培育过程提供给微藻的 CO₂ 来源于燃煤电厂烟气,油脂提取后残留藻渣生产沼气,并考虑沼气生产过程中甲烷排放,以及使用厌氧分解后残渣作为农肥过程中的 N₂O 排放,副产品(甘油、汽油、柴油等)采用能源分配处理方法。通过分析整理全生命周期过程能量消耗、物质消耗及温室气体排放清单,计算化石、石油和总能量使用(包括藻渣生产的沼气)以及温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放,和 6 种标准污染物(CO、挥发性有机物、NO_x、硫氧化物、PM10、PM2.5)的排放。基于 GREET 模型,分析发动机与飞机对能源藻航空燃料生命周期的影响。

石油基航空煤油全生命周期包括原油开采、常减压蒸馏、加氢裂化、加氢精制、环节间运输、燃烧等过程。能源藻基航空替代燃料全生命周期过程包括能源藻种植、采收脱水、粗油萃取、加氢精制、运输及其在飞机发动机中的燃烧过程,如图 4 所示。

在 GREET 模型中,将全生命周期分为 WTP (well-to-pump),代表燃料从开采到进入油库库存过程,即为燃料制备过程;及 PTW (pump-to-wheel),代表燃料加入飞机后燃烧提供能量的过程,即为燃料燃烧过程^[21]。WTP 及 PTW 过程的总和为 WTW(well-to-wheel)过程,既为全生命周期。

2.2 能源藻原料与制备阶段

本计算模型中基础数据主要参考中国统计年鉴 2014 中 2012 年数据,具体参数如表 3~表 6 所示^[22-27]。能源藻种植、收获和航空燃料制备的基础数据基于 GREET 中原有数据,关键输入参数见表 7。为简化计算,模型选用典型能源藻数据。油脂质量分数、蛋白质质量分数、碳水化合物质量分数均为干燥无灰基准下。收获后的能源藻采用气浮法和离心脱水法脱水。脱水后水质量分数为 85%的湿藻浆进行水热液化法制备生物粗油,水热液化反应温度

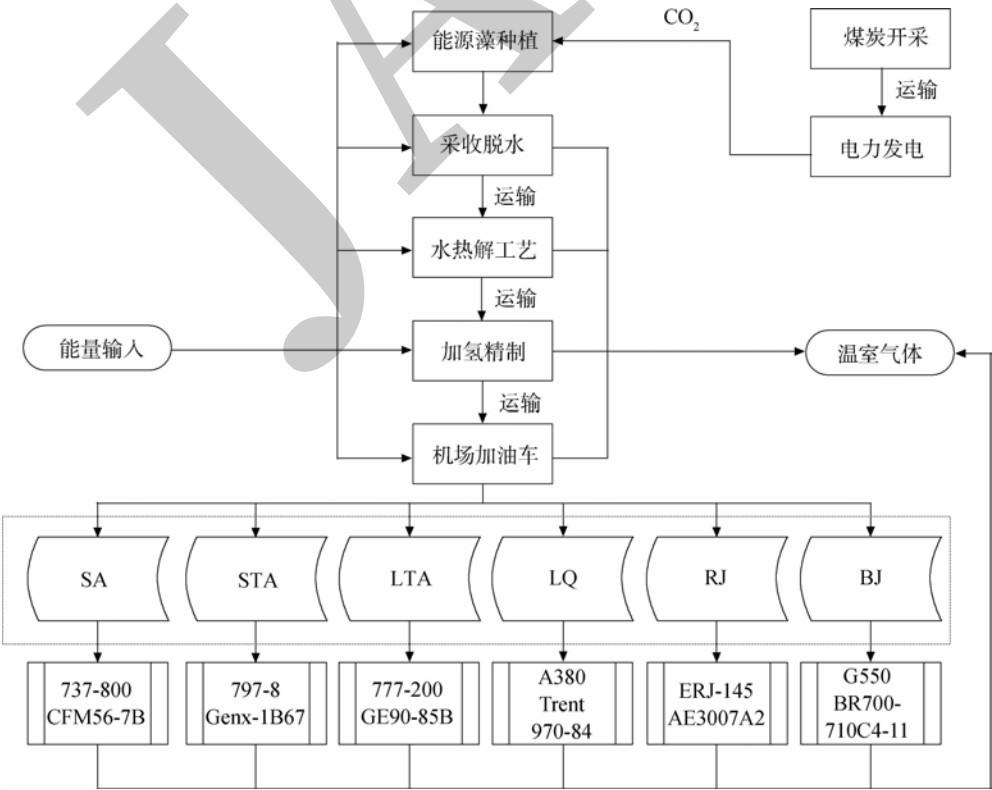


图 4 能源藻基航空替代燃料全生命周期路径

Fig. 4 Life cycle pathway of algae based aviation alternative fuel

表 3 GREET1_2015 中能源基础数据关键输入参数
(第 1 部分)

Table 3 Key input parameters of the basic energy
in GREET1_2015 (part 1)

参数		能量占比/%
原油来源	进口油	58.50
	国产油	41.50
煤炭开采方式	井下开采	86
	地表开采	14
发电燃煤种类	烟煤	90
	褐煤	10

注:原油能源效率为 93%,煤炭能源效率为 97%。

表 4 GREET1_2015 中能源基础数据关键输入参数
(第 2 部分)

Table 4 Key input parameters of the basic energy
in GREET1_2015 (part 2)

能源采集基础设施	是否考虑
石油开采过程基础设施	是
煤炭开采过程基础设施	是
发电过程基础设施	是

表 5 GREET1_2015 中能源基础数据关键输入参数
(第 3 部分)

Table 5 Key input parameters of the basic energy
in GREET1_2015 (part 3)

基础能源		能量占比/%
原油	原油	39.39
	柴油	2.43
	汽油	0.55
	天然气	39.18
	煤炭	5.16
	电力	12.80
煤炭	燃料油	0.01
	柴油	2.57
	汽油	0.19
	天然气	0.19
	煤炭	97.73
	电力	0.51
电力	燃煤	76.34
	燃油	0.11

续表

基础能源		能量占比/%
电力	燃气	50
	水电	17.16
	核电	1.97
	风电	2.07
	其他	0.08

表 6 GREET1_2015 中能源基础数据关键输入参数
(第 4 部分)

Table 6 Key input parameters of the basic energy
in GREET1_2015 (part 4)

能源	运输方式	能量占比/%	距离/km
原油	远洋邮轮	58.50	11000
	驳船	10	400
	管道	78	1030
	铁路	46.80	950
煤炭	驳船	17	650
	铁路	50	1000
	公路	33	310

表 7 GREET1_2015 中制备过程关键输入参数
Table 7 Key input parameters of the preparation process
in GREET1_2015

参数		数值及说明
培养池 ^[28]		开放式跑道池
系统中共产物、副产物分配方法 ^[28]		按能量分配
能源	生长率/(g/(m ² ·day)) ^[28]	25
	油脂质量分数(无灰) ^[28] /%	25
	蛋白质质量分数(无灰) ^[28] /%	47
原料数据	碳水化合物质量分数(无灰) ^[28] /%	28
	灰分质量分数 ^[28] /%	13
	能源藻低位热值/(MJ/kg) ^[29]	19.61
水热液化与加氢制备过程数据	水热液化油得率 ^[28] /%	38
	加氢过程产率 ^[4] /%	71.94
	加氢精制过程控制方法	航空燃料最大化
藻基燃料低位热值(MJ/kg) ^[30]		44.5

为 300℃,停留时间为 60 min^[28]。水热液化反应得到的生物质粗油中氮、氧杂环化合物质量分数过高,并不能直接用于航空引擎中燃烧,需通过加

氢反应脱掉氮、氧杂环化合物中的氮、氧元素,才转化为可使用的航空替代燃料。

2.3 燃料燃烧过程

本研究中替代燃料为即用型航空燃油,即在不改变航空发动机结构、燃烧室及喷嘴结构、燃油控制系统的前提条件下,可直接用于航空发动机燃烧,该类燃料需达到 ASTM D7566 相关条例^[31]。在燃料物理特性上与传统航空燃料有所不同,见表 8 所示。

表 8 传统燃料及替代燃料参数对比

Table 8 Comparison of parameters of conventional aviation fuel and alternative aviation fuel

参数	传统航空燃料 (JetA-1)	能源藻基航空 替代燃料
低位热值/(MJ/kg)	43. 2 ^[31]	44. 5 ^[30]
高位热值/(MJ/kg)	46. 2 ^[31]	47. 6 ^[30]
密度/(kg/L)	0. 802 ^[31]	0. 787 ^[30]
碳质量分数	0. 862 ^[31]	0. 801 ^[30]

本文所研究的燃料燃烧过程对文中第 1 节所述的 6 类民航客机分别进行全生命周期分析,并进行对比分析。为减少实际飞行高度及实际飞行中其他因素的影响,设定民航客机飞行最大载质量飞行、最大航程为前提条件,数据引用 EASA 欧盟适航条例参数,同时为使不同类型飞机排放分析可供对比,引入飞机单位载质量单位飞行航程的气体排放、能量消耗、水消耗。研究使用全包线模型,即滑行、起飞、爬升、巡航、进近,并按照

ICAO 设定的时间、推力进行设定,如表 9^[32]所示。除此之外,发动机的传统燃料排放数据中,HC、CO、NO_x 数据采用 ICAO Emission Database 中发动机起飞降落过程气体排放数据;CH₄、N₂O、SO_x 数据采用美国 NASA 开展的 AAFEX (alternative aviation fuel experiment) 数据;PM₁₀ 数据采用美国联邦航空局 AEDT(Aviation Environmental Design Tool)数据库中的数据,如表 10 所示^[5,8,33]。替代燃料排放数据采用 Hileman 等实验的相关数据,通过将各实验的排放物数据与 ICAO 公布发动机测试排放数据进行对比,得到其比值,并通过功率比-时间比得到时间加权平均,最后选用各实验的平均值。由于现阶段替代燃料并没有在所有发动机机型上进行实验,本文研究中得到了 SA、LQ、BJ 替代燃料排放参数的试验数据,而 STA 和 LTA 的发动机数据选用拥有类似推力、涵道比的 LQ 发动机,同理 RJ 发动机替代燃料排放参数选用类似 BJ 发动机的排放参数,如表 11~表 13 所示,表中的 PM 为颗粒物,UHC 为未燃碳氢化合物。

表 9 ICAO 定义的 4 种飞行状态^[32]

Table 9 Four operating states defined by ICAO^[32]

状态名称	功率比/%	状态持续时间/s	时间比/%
起飞	100	0. 7	2. 1
爬升	85	2. 2	6. 7
进近	30	4. 0	12. 2
滑行	7	26	79. 0

表 10 6 种飞机传统燃料燃烧排放数据

Table 10 Emission data of six kinds of aircraft using conventional aviation fuel

参数	SA	STA	LTA	LQ	RJ	BJ
机型	737-800	787-8	777-200	A380	ERJ-145	G550
发动机型号	CFM56-7B27	GENx-1B67	GE90-85B	TRENT970	AE3007A3	BR700-710C4-11
发动机数量	2	2	2	4	2	2
涵道比	5. 1	9. 39	8. 36	7. 5	5. 1	4. 05
最大推力/kN	121. 4	255. 3	419. 25	334. 7	31. 5	68. 77
HC 排放量/(g/(kg·km))	273 ^[8]	197 ^[8]	1 159 ^[8]	81 ^[8]	346 ^[8]	301 ^[8]
CO 排放量/(g/(kg·km))	5 320 ^[8]	5 928 ^[8]	13 593 ^[8]	6 461 ^[8]	1 850 ^[8]	4 449 ^[8]
NO _x 排放量/(g/(kg·km))	5 231 ^[8]	6 374 ^[8]	26 639 ^[8]	16 555 ^[8]	1 175 ^[8]	2 850 ^[8]
CH ₄ 排放量/(g/(kg·km))	36 ^[33]	59 ^[33]	185 ^[34]	159 ^[34]	11 ^[34]	24 ^[34]
N ₂ O 排放量/(g/(kg·km))	70	115	363	311	22	47
PM ₁₀ 排放量/(g/(kg·km))	21 ^[5]	28 ^[5]	39 ^[5]	79 ^[5]	7 ^[5]	20 ^[5]
SO _x 排放量/(g/(kg·km))	1 243 ^[33]	2 036 ^[33]	6 406 ^[33]	5 488 ^[33]	386 ^[33]	823 ^[33]

注:HC、CO、NO_x 使用 ICAO Emission Database 实验数据,CH₄、SO_x 使用 AAFEX 实验数据,PM₁₀ 使用 AEDT 数据库。

表 11 替代燃料发动机实验排放统计(SA)

Table 11 Emission data of engines using alternative aviation fuels (SA)

数据来源	燃料热值/ (MJ/kg)	燃料密度/ (kg/L)	发动机 型号	NOx 排放量		PM 排放量		CO 排放量		UHC 排放量	
				ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5
文献[34]	44.4	0.738	CFM56-2C1	0.91		0.09	0.27	0.87	0.91	0.75	0.86
文献[35]	44.1		CFM56-7B			0.31	0.38				
文献[5]			TF33-P-103				0.58				
文献[36]	38.3	0.918	CFM56	0.98							
文献[37]	43.5	0.789	CFM56-7B18		0.95		0.69		1.05		1.21
文献[37]	43.5	0.789	CFM56-7B27		0.96		0.87		1.09		1.28
平均值				0.943	0.955	0.200	0.558	0.870	1.017	0.750	1.117

注:以上数据均为于 ICAO 公布的发动机排放比值,通过表 9 中 4 种发动机工作状态的时间加权平均。ε 为掺混比,下文同。

表 12 替代燃料发动机实验排放统计(STA,LTA,LQ)

Table 12 Emission data of engines using alternative aviation fuels (STA, LTA, LQ)

数据来源	燃料热值/ (MJ/kg)	燃料密度/ (kg/L)	发动机 型号	NOx 排放量		PM 排放量		CO 排放量		UHC 排放量	
				ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5
文献[5]	43.2	0.803	PW308	1.01		0.07	0.74	0.74	0.83	0.68	0.76
文献[38]	43.8	0.759		0.93		0.79					
文献[38]	43	0.785		1.06		0.04					
文献[38]	43.7	0.781			0.98		0.40				
文献[37]	43.7	0.781	TPE331-10		1.02		0.98		0.98		
文献[37]	43.2	0.803	TFE731-5		1.00		0.27		0.98		
平均值				0.999	1.003	0.300	0.598	0.740	0.931	0.680	0.760

注:以上数据均为于 ICAO 公布的发动机排放比值,通过表 9 中 4 种发动机工作状态的时间加权平均。

表 13 替代燃料发动机实验排放统计(RJ,BJ)

Table 13 Emission data of engines using alternative aviation fuels (RJ, BJ)

数据来源	燃料热值/ (MJ/kg)	燃料密度/ (kg/L)	发动机 型号	NOx 排放量		PM 排放量		CO 排放量		UHC 排放量	
				ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5	ε=1.0	ε=0.5
文献[37]			JT9D-7R4G2	0.92	0.96	0.04	0.48	1.04	0.97	1.03	1.03

注:以上数据均为于 ICAO 公布的发动机排放比值,通过表 9 中 4 种发动机工作状态的时间加权平均。

3 计算分析结果

3.1 全生命周期排放分析

3.1.1 温室气体排放

不同类型飞机在微藻航煤质量占比从 0% 提升至 100% 过程中,6 类飞机全生命周期温室气体排放量降低比例均为 63.2%,其中 WTP 过程由排放变为吸收温室气体,而 PTW 过程也降低

4.61%。以上情况是由于在能源藻基替代燃料在制备阶段,尤其在能源藻类的生长阶段吸收大量 CO₂,导致 WTP 过程的温室气体排放变化巨大,而在 PTW 过程中飞机飞行所需的能量一定,所以减排效果并不明显,但由于碳氢比低,排放气体中 CO₂ 有明显降低的原因,致使温室气体排放有所降低。

在不同种类飞机的对比中,全生命周期每千克载质量每千米飞行排放分别降低 0.494 9、

0.5369、0.4064、0.4923、0.6187、1.8621g/(kg·km)。在公务机上减排效果最明显,为常规民航运输的 4 倍。但对于大型双通道飞机,在使用替代燃料后其减排效果最佳,每千克载质量每千米温室气体排放仅为 0.235 1g;公务机排放最大,每千克载质量每千米温室气体排放为 1.077 5g,不同掺混比燃料在不同类型飞机温室气体排放对比如图 5 所示。

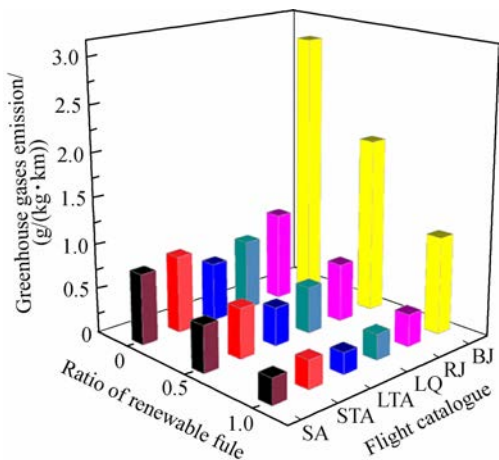


图 5 掺混比对温室气体排放影响
Fig. 5 Influence of mix ratio on greenhouse gases emission

3.1.2 污染物排放

在分析传统航空燃料和能源藻基替代燃料全生命周期污染物排放组分过程中,本研究选取 SA 作为研究代表,选取 100%传统燃料及 100%能源藻基替代燃料进行对比,同样将全生命周期分为 WTP 及 PTW, VOC (volatile organic coupound)、CO、NOx、PM10、PM2.5、SO₂ 等组分的占比如图 6 所示。

在对比过程中,研究发现替代燃料在制备过程中污染物排放均有一定的增长,6 种污染物分别提高了 0.000 07、0.000 2、0.000 02、0.000 01、0.000 015、0.000 2 g/(kg·km)。而在燃料燃烧

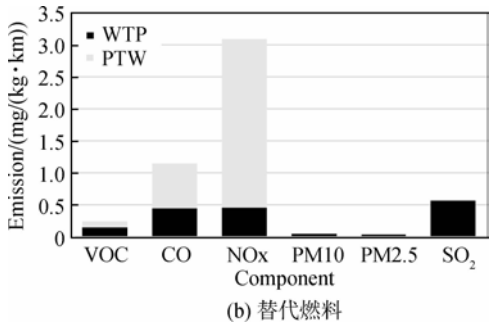
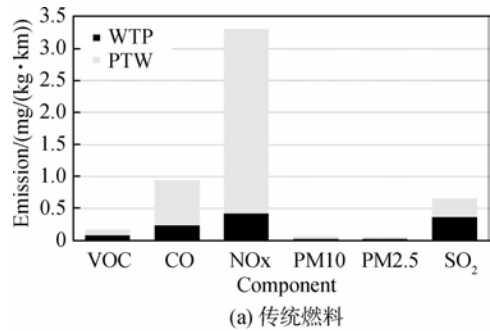


图 6 SA 排放组分对比

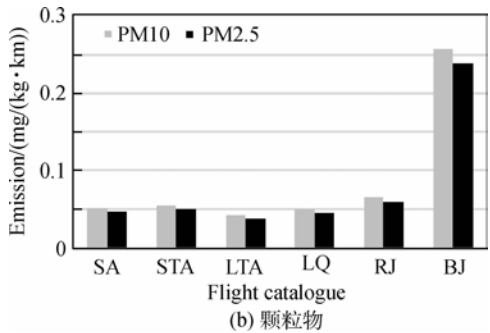
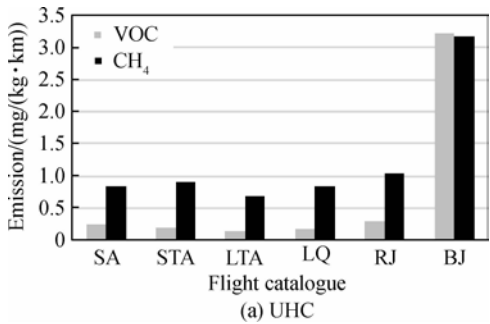
Fig. 6 Comparison of emission component of SA

过程中,替代燃料的污染物排放情况下降较为明显,PM10、PM2.5、SO₂ 的减少较为明显,降低比例高达 92%以上。替代燃料排放污染降低的原因在于:①替代燃料中硫质量分数极低,故无 SO₂ 排放;②替代燃料中氢碳比高,芳香烃质量分数低,降低燃烧过程中积碳,从而颗粒物质量分数降低,并且同时实现了低 VOC、CO、NOx 排放的燃烧。

对于使用 100%能源藻基航空替代燃料的不同类型飞机,对比分析其全生命周期污染物排放,如图 7 所示。

3.1.3 6 类飞机排放敏感性分析

在航程飞行敏感性研究中,设定最大航程的 25%、50%以及最大航程为变量因素,使用全包线模型,起飞降落过程包括滑行、起飞、爬升、进近。SA、STA、LTA、LQ、RJ、BJ 这 6 类飞机最大飞行航程为 5 665、15 190、14 260、15 700、2 873、12 500 km。由于本研究侧重点为不同燃料能量消耗及



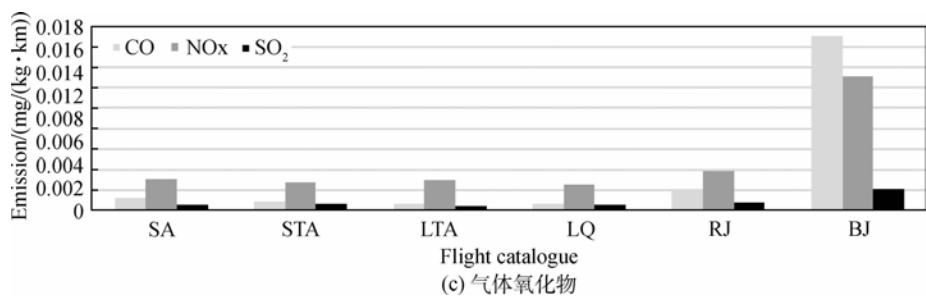


图 7 6 种飞机污染物排放对比

Fig. 7 Comparison of emission component of six kinds of aircraft

温室气体排放分析,故未将备用机场飞行加入计算中,仅为满载状态下单次起飞、巡航、降落过程。如图 8 所示。

研究表明,各类飞机在飞行距离较短时,单位载质量单位飞行距离排放较大,随着航线距离的增长,排放以反比例函数速率减少。其中支线客机在航程缩小或增大时其排放增大的敏感性最大,原因在于其最大航程较短,其起飞降落过程的贡献比例较大,而在较大航程类型飞机中公务机在提高过程中排放减少的敏感性最大。

3.2 能量消耗分析

本研究中能量消耗主要包括燃料制备过程中的间接能源电能、车辆运输能等,但由于电能、运输能均为中间能源,无法进行对比,选取化石燃料作为最终对比参考,拟定飞机在单位载质量飞行单位距离时消耗的化石燃料(包括天然气、煤炭、石油等)及原油为对比项。

3.2.1 不同掺混比敏感性分析

不同种类飞机在传统燃料及能源藻基替代燃料不同掺混比(ε)的情况下的能量消耗及燃料消耗如图 9 所示。从对比中可以看到,在掺混比不同时能量消耗和燃料消耗为反比,使用替代燃料比例增加时,全生命周期能量消耗增加,对比传统航空燃料,使用能源藻基替代燃料时能量消耗增加 50%,而化石燃料及原油燃料消耗分别降低

50%、90%。在 WTP 过程中能量消耗增加 50%,化石燃料消耗增加 50%,原油消耗基本不变。在 PTW 过程中,能量消耗基本不变,但化石燃料及原油消耗分别降低 10%、100%。

在不同种类飞机的对比中,公务机变化程度最大,能量消耗由 40 000 J/(kg·km) 提升至 60 000 J/(kg·km),而化石能源消耗及原油消耗分别从 40 000、35 000 J/(kg·km) 降低至 16 000、2 000 J/(kg·km),变化量最大。而对于全部 6 类飞机来说,LTA 在全生命周期能量消耗最低,能量消耗为 13 000 J/(kg·km)。同样化石燃料消耗及原油能源消耗也为最低,分别为 4 000、500 J/(kg·km)。

3.2.2 6 类飞机能耗敏感性分析

与在不同航程飞行温室气体排放研究一样,能量消耗研究中设定最大航程 25% 为最小参数点,最大飞行距离为其最大航程,6 类飞机的最大航程分别为 5 665、15 190、14 260、15 700、2 873、12 500 km,敏感程度分析标准线为飞行平均航程的 50%。如图 10 所示。

研究表明,6 类飞机在飞行距离较短时,单位载质量单位飞行距离能量消耗较大,随着航线距离的增长,排放以反比例函数减少,尤其起飞降落过程的能量输入较大。能量消耗对航程的敏感性分析与排放情况类似,支线客机在增大航程时敏感性最大。

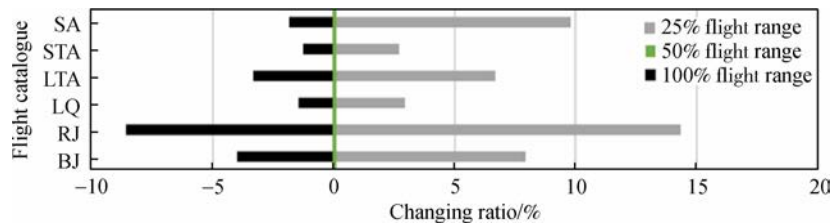


图 8 不同航程温室气体排放敏感程度分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of the greenhouse gases emission in different flight ranges

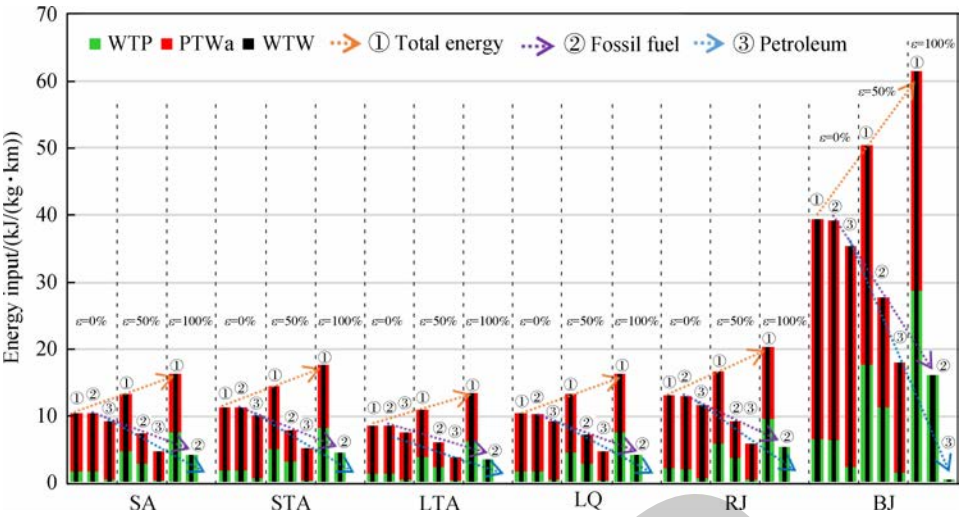


图 9 6 类飞机对不同掺混比全生命周期能耗影响

Fig. 9 Energy input of the life cycle assessment of six kinds of aircraft with different mixture ratios

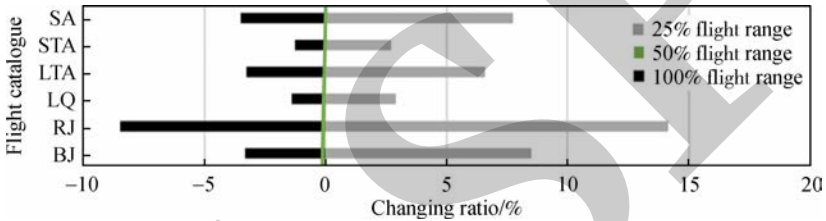


图 10 不同航程能耗敏感程度分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of the energy input in different flight ranges

4 结 论

本文对能源藻基航空替代燃料在中国民航客机中使用给出了初步的可行性分析,可知替代燃料对航线长度及航线载质量情况影响程度在 4% 范围之内,并且中国 95% 的航线均在飞机载质量航程不受起飞质量及燃料容积影响的范围之内。

1) 全生命周期气体排放方面,可知 6 类飞机替代燃料使用掺混比从 0 提高到 100% 时全生命周期温室气体降低比例为 63.2%,其中 WTP 过程由排放温室气体变为吸收温室气体,PTW 过程也降低 4.61%。公务机温室气体减少量最大,为 1.86 g/(kg·km)。在使用替代燃料后 LTA 温室气体排放最低,仅为 0.642 g/(kg·km);在污染物排放方面,在使用替代燃料时因为替代燃料中硫含量极低,SO₂ 排放降低为零、颗粒物排放降低也较为突出。由于公务机飞行距离范围较大、载人载质量较少,在单位载质量单位距离飞行时替代燃料对其排放效果降低更为明显。

2) 全生命周期能量消耗方面,使用 100% 替代燃料时与传统燃料对比总能耗增加 50%;化石

燃料消耗降低 50%;原油燃料消耗降低 90%,增加能量消耗为燃料制备过程中电能输入。这对中国原油摆脱对外依赖情况将有很大的帮助。

综上所述,能源藻基航空替代燃料在未来民航业使用有巨大的优势,尤其在公务机及通用航空领域拥有更多减排潜能。不仅对当前航线、载质量影响较小,并且在气体排放、燃料消耗、淡水资源消耗方面优势明显。

参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴:2015[M]. 北京:中国统计出版社,2016.

[2] 美国能源部生物项目署. 藻类生物质能源:基本原理、关键技术与发展路线图[M]. 胡洪营,李鑫,于茵,等,译. 北京:科学出版社,2011.

[3] 中国民航总局发展计划司. 2012 年民航行业发展统计公报[EB/OL]. [2016-10-18]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201511/t20151102_8822.html000014170/2013-00037.

[4] ELGOWAINY A, HAN J, WANG M, et al. Life-cycle analysis of alternative aviation fuels in GREET[R]. Chicago:Office of Scientific and Technical Information Technical Reports,2012.

[5] HILEMAN J I, DONOHOO P E, STRATTON R W. Energy content and alternative jet fuel viability[J]. Journal of

- Propulsion and Power, 2010, 26(6): 1184-1196.
- [6] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴: 2013[M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2014.
- [7] HAN J, ELGOWAINY A, CAI H, et al. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150(4): 447-456.
- [8] ICAO. Engine exhaust emissions databank[R]. the Convention on International Civil Aviation, 9646-AN/943, 1995.
- [9] BOEING. Next-generation 737 design highlights[EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.boeing.com/commercial/737ng/>.
- [10] BOEING. 787 dreamliner family[EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.boeing.com/commercial/787/>.
- [11] BOEING. 777 design highlights[EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.boeing.com/commercial/777/#/design-highlights/unmatched-capabilities/longer-range/>.
- [12] AIRBUS. A380 range and performance[EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/performance/>.
- [13] EMBRAER. Specifications ERJ 145[EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.embraercommercialaviation.com/Pages/ERJ-145.aspx>.
- [14] GULFSTREA M. The G550 in motion distance times speed equals time saved[EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.gulfstream.com/aircraft/gulfstream-g550>.
- [15] EASA. Type certificate data sheet IM A 120[R]. EASA TCDS-IM A 120, 2015.
- [16] EASA. Type certificate data sheet IM A 115[R]. EASA TCDS-IM A 115, 2015.
- [17] EASA. Type certificate data sheet IM A 003[R]. EASA TCDS-IM A 003, 2015.
- [18] EASA. Type certificate data sheet IM A 110[R]. EASA TCDS-IM A 110, 2007.
- [19] EASA. Type certificate data sheet IM A 032[R]. EASA TCDS-IM A 032, 2015.
- [20] EASA. Type certificate data sheet IM A 070[R]. EASA TCDS-IM A 070, 2016.
- [21] 柴志勇. 基于 GREET 模型的车用生物质燃料能耗及排放研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- CHAI Zhiyong. Research on vehicular biofuels energy consumption and emission based on GREET model[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [22] OU Xunmin, ZHANG Xiliang, CHANG Shiyan. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 406-418.
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [24] 田会, 才庆祥, 甄选. 中国露天采煤事业的发展展望[J]. *煤炭工程*, 2014, 46(10): 11-14.
- TIAN Hui, CAI Qingxiang, ZHEN Xuan. Developing prospects of surface coal mining industry in China[J]. *Coal Engineering*, 2014, 46(10): 11-14. (in Chinese)
- [25] 张庭婷, 谢晓敏, 黄震. 微藻生物柴油全生命周期分析[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(6): 750-755.
- ZHANG Tingting, XIE Xiaomin, HUANG Zhen. Life cycle analysis of microalgae biodiesel in China[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48(6): 750-755. (in Chinese)
- [26] 中国电力企业联合会统计信息部. 2012 年电力统计基本数据一览表. [EB/OL]. [2016-10-18]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/nianrushuju/2013-11-07/111737.html>.
- [27] 赵晶, 郭放, 阿鲁斯, 等. 未来航空燃料原料可持续性研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(1): 2378-2385.
- ZHAO Jing, GUO Fang, A Lusi, et al. GHG emissions of different sources alternative aviation fuels during their life cycles[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(1): 2378-2385. (in Chinese)
- [28] FRANK E D, ELGOWAINY A, HAN J, et al. Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel from algae[J]. *Current Opinion in Nephrology and Hypertension*, 2013, 22(5): 504-510.
- [29] FRANK E, HAN J, PALOU-RIVERA I, et al. Life-cycle analysis of algal lipid fuels with the greet model[R]. Chicago: Center for Transportation Research, 2011.
- [30] ZHAO B, WANG Z, LIU Z, et al. Two-stage upgrading of hydrothermal algae biocrude to kerosene-range biofuel[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(19): 5254-5265.
- [31] ASTM. Aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons: ASTM D7566-15[S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2015: 16-17.
- [32] CARTER N A, STRATTON R W, BREDEHOEFT M K, et al. Energy and environmental viability of select alternative jet fuel pathways[R]. AIAA-2011-5968, 2011.
- [33] ANDERSON B E, BEYERSDORF A J, HUDGINS C H, et al. Alternative aviation fuel experiment (AAFEX)[R]. NASA/TM-2011-217059, 2011.
- [34] BOLANOS ALOMÍA A M, MERCHANCANO ROSERO J D, ARCILA GONZÁLEZ M B, et al. Gaseous and particulate emissions results of the NASA alternative aviation fuel experiment (AAFEX)[R]. ASME Paper GT2010-23524, 2010.
- [35] LOBO P, HAGEN D E, WHITEFIELD P D. Comparison of PM emissions from a commercial jet engine burning conventional, biomass, and fischer-tropsch fuels[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(24): 10744. 1-10744. 9.
- [36] LOKESH K, SETHI V, NIKOLAIDIS T, et al. Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 77: 26-44.
- [37] RAHMES T F, KINDER J D, HENRY T M, et al. Sustainable bio-derived synthetic paraffinic kerosene (bio-SPK) jet fuel flights and engine tests program results[R]. AIAA-2009-7002, 2009.
- [38] CHAN T W, CHISHTY W A, CANTEENWALLA P, et al. Characterization of emissions from the use of alternative aviation fuels[R]. ASME Paper GT2015-42122, 2015.