



生物航空燃油

马隆龙 等 编著



科学出版社

生物航空燃油

马隆龙 等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要阐述了生物航空燃油的性质、特点、制备技术及应用,介绍了航空领域碳减排、油脂生物航空燃油、糖基生物航空燃油、费托合成生物航空燃油、齐聚合成生物航空燃油及其他新发展的生物航空燃油技术。通过理论分析与应用实例相结合,运用较新的研究成果及技术资料,论述了各种生物航空燃油技术的转化原理、生产工艺、催化剂、示范工程及应用前景,可为读者提供有益的参考,促进生物航空燃油技术的发展及推广应用。

本书可作为从事新能源、环保、化工及生物工程领域的研究和专业技术人员的专业参考用书,也可作为高等学校相关专业教师、高年级学生和研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

生物航空燃油/马隆龙等编著. —北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-052912-1

I. ①生… II. ①马… III. ①航空器—生物燃料 IV. ①TK6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第116426号

责任编辑: 王海光 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第一版 开本: 720 × 1000 1/16

2017年8月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 292 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



《生物航空燃油》编委会

马隆龙 王铁军 张琦 王晨光 陈伦刚

刘琪英 徐莹 张兴华 李宇萍 仇松柏

谈金 吕微 张巧 陈佳栋 翁育靖

舒日洋 张浅 司展 吴景程 田志鹏

朱长辉 王海永

前 言

能源与环保是人类共同关注的两大主题。航空业由于在高空排放 CO_2 ，对全球气候变化及空气质量产生了巨大的影响，开发航空燃油生产与供应的新技术成为世界各国及各大航空公司关注的焦点。

生物质是可再生资源，是最具前景的液体燃料生产原料。利用生物质生产高品质生物航空燃料是发展的必然趋势，对确保我国航空燃料安全、减少航空碳排放、控制环境污染及保障国防安全等有着极其重要的意义。

目前世界各国均在竞相开发各种生物航空燃料技术，我国“十二五”期间也开展了生物航空燃料相关基础及关键技术的研究，取得了一系列进展、成果。由于生物航空燃料是近年来发展的新技术，相关的书籍匮乏。基于此，我们整理了近年来该领域的研究进展、成果和技术资料，并结合自身从事生物航空燃料技术研究的成果及经验，编写了本书。本书重点介绍了生物航空燃油的特点、转化原理、关键技术及应用前景，对比分析了各种生物航空燃油技术的前沿进展、存在的问题及解决方案，对未来发展趋势进行了深入分析讨论。本书是该领域难得的理论性与实用性兼具，系统全面分析介绍生物航空燃油技术的著作。

在本书编写过程中，马隆龙、王铁军、张琦、王晨光、陈伦刚、刘琪英、徐莹、张兴华、李宇萍、仇松柏、谈金、吕微编写了相关章节，张巧、陈佳栋、翁育靖、舒日洋、张浅、司展、吴景程、田志鹏、朱长辉和王海永等参与了本书的图表绘制和校对工作。书中参考了大量国内外相关书籍、论文等资料，在此对参考资料的作者表示衷心的感谢！

本书得到了国家 973 计划项目（2012CB215300）、国家 863 计划项目（2012AA101806）和国家自然科学基金重点项目（51536009）的资助。

我们试图努力使本书为相关科研人员、生产技术人员及高等学校的教师和学生提供有益的帮助及参考，但鉴于水平有限，加之该领域科技发展迅速，不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2016年12月

目 录

第 1 章 航空燃油的性质及特点	1
1.1 航空燃油的分类	1
1.1.1 航空汽油	1
1.1.2 喷气燃料	1
1.2 航空燃油的组成及物性	2
1.3 航空燃油的应用及发展	3
参考文献	5
第 2 章 生物航空燃油的前景与意义	6
2.1 航空领域碳减排现状	6
2.2 发展生物航空燃油的意义	9
2.3 生物航空燃油的需求及前景	11
参考文献	19
第 3 章 油脂生物航空燃油	21
3.1 油脂简介	21
3.2 油脂预处理	24
3.3 油脂脱氧制备烃类产品的技术	25
3.3.1 热裂解-催化裂化法	25
3.3.2 加氢脱氧法	28
3.3.3 直链烃异构化技术	38
3.4 油脂生物航空燃油的应用	42
参考文献	45
第 4 章 糖基生物航空燃油	50
4.1 糖基生物航空燃油的发展背景	50
4.2 糖基生物航空燃油的转化原理	51
4.2.1 碳链增长原理	52
4.2.2 催化剂及作用	57
4.2.3 加氢脱氧原理及其催化剂	68
4.3 糖基生物航空燃油的生产工艺	76
4.3.1 生物质平台化合物的生产工艺	77
4.3.2 碳链构建转化及脱氧工艺	90

4.4	糖基生物航空燃油技术的发展与应用	101
4.4.1	发展趋势与问题	101
4.4.2	应用前景	103
	参考文献	105
第5章	费托合成生物航空燃油	117
5.1	费托合成生物航空燃油转化原理	118
5.1.1	木质纤维素气化过程原理	119
5.1.2	生物质粗燃气的组分调变机理	120
5.1.3	合成气经费托过程合成燃油烃类机理	120
5.2	费托合成生物航空燃油生产工艺	122
5.2.1	煤基/天然气费托合成油品燃料技术	122
5.2.2	生物质合成气合成油品燃料现状	123
5.2.3	生物质气化制合成气和气体组分调节的主要途径	124
5.2.4	费托合成产物的控制技术	126
5.3	费托合成生物航空燃油发展与应用	132
5.3.1	国内外生物质费托合成航空燃油示范工程	133
5.3.2	生物质费托合成液体烃类的工艺流程	134
5.3.3	费托合成航空燃油的预计价格及竞争力	134
5.3.4	生物质气化合成航空燃油的研究展望	135
	参考文献	137
第6章	烯烃齐聚制备生物液体燃料	143
6.1	引言	143
6.2	烯烃齐聚反应机理	144
6.2.1	铝硅酸催化剂	144
6.2.2	Ni 基催化剂	144
6.2.3	茂金属催化剂	145
6.2.4	分子筛催化剂	146
6.3	烯烃齐聚反应的相关工艺	146
6.3.1	齐格勒一步法	147
6.3.2	齐格勒二步法	147
6.3.3	SHOP 法	148
6.3.4	锆铝催化工艺	149
6.3.5	烯烃齐聚 SPAC 工艺	150
6.3.6	烯烃齐聚 MOGD 工艺	151
6.3.7	烯烃齐聚 Difasol 工艺	151
6.4	烯烃齐聚制备 α -烯烃催化剂的研究进展	152

6.4.1	前过渡金属催化剂体系	152
6.4.2	后过渡金属催化剂体系	154
6.5	直链烯烃骨架异构化的机理	159
6.5.1	双分子机理	159
6.5.2	单分子机理	160
6.6	α -烯烃氢化异构化反应	161
6.7	低碳烯烃齐聚生成液体燃料的工艺	163
6.7.1	国外相关齐聚工艺路线	163
6.7.2	国内相关齐聚工艺路线	163
	参考文献	164
第 7 章	其他生物航空燃油技术	168
7.1	能源微藻技术	168
7.1.1	能源微藻的育种	168
7.1.2	微藻的培养	172
7.1.3	微藻细胞采收	177
7.1.4	微藻油脂提取	181
7.1.5	微藻油脂改质	184
7.2	微生物油脂技术	184
7.2.1	概况	185
7.2.2	微生物油脂合成技术	188
7.2.3	微生物油脂合成与调控策略	194
7.2.4	微生物油脂提取技术	200
7.2.5	展望	201
7.3	生物异丁醇脱水聚合技术	201
7.3.1	异丁醇的化学制备方法	202
7.3.2	异丁醇的生物制备方法	204
7.4	生物质热解油催化提质技术	207
7.4.1	生物油的制备技术	207
7.4.2	生物油的组成特点	208
7.4.3	生物油提质制备生物航空燃油	209
	参考文献	211

第 1 章 航空燃油的性质及特点

1.1 航空燃油的分类

航空燃油是指专为飞行器而设的燃油品种，品质比车用汽油和柴油高，通常含有各种添加剂来防止结冰和爆炸。世界各航空公司所使用的航空燃油主要有两大类：航空汽油(aviation gasoline, avgas)和喷气燃料(jet fuel)，分别适用不同类型的飞机发动机。航空汽油用于往复式活塞发动机，喷气燃料用于航空燃气涡轮发动机和冲压发动机。

1.1.1 航空汽油

航空汽油是石油直馏产品和二次加工产品与各种添加剂混合而成的燃料油，具有蒸发性能好、易燃、性质稳定、结晶点低和不腐蚀发动机零件等特点。其主要性能指标包括辛烷值和品度值。辛烷值是指与这种汽油抗爆性相当的标准燃料中所含异辛烷的百分数，这种标准燃料由异辛烷和正庚烷混合液组成。它表示航空汽油的抗爆性能，即在发动机中正常燃烧(无爆震)的能力。对辛烷值的要求依发动机的特点而异，主要取决于压缩比。压缩比越大，辛烷值越高。为提高辛烷值，常往汽油中加入含有抗爆剂(如四乙基铅)的乙基液。品度值指的是以富油混合汽工作时的最大功率(超过这一功率便出现爆震)与以工业异辛烷工作时的最大功率之比，用百分数表示。

1.1.2 喷气燃料

喷气燃料是喷气发动机飞机专用燃油，适用于航空燃气涡轮发动机和冲压发动机。根据沸点范围不同分为三类：①宽馏分型(沸点为 60~280℃)；②煤油型(沸点为 150~280℃)，高闪点航空煤油的初沸点可提高到 165~175℃；③重馏分型(沸点为 195~315℃)。通常使用的是煤油型燃油，是经原油直接炼制和二次加工提炼的石油产品之一，英文名称 Jet fuel No.3，别名航空煤油。航空煤油一般产量不高，只占原油的百分之十几，主要由不同馏分的烃类化合物组成，相比汽油具有更高的热值和安全性。用于超音速飞行的航空煤油还应具有低饱和蒸气压和良好的热安定性。为调整产品指标，有时要加入适当种类和数量的添加剂^[1]。

1.2 航空燃油的组成及物性

航空煤油的组成有严格的规定:芳香烃含量在 20%以下(其中双环芳烃含量不超过 3%),烯烃含量在 3%以下,正构烷烃含量用燃油结晶点不高于 -50°C 来限制。航空燃油中还加有多种添加剂,用以改善燃油的某些使用性能。一些先进的大型客机如波音 747 飞行高度在 1 万 m 以上,发动机需适应高空缺氧、低气温、低气压等恶劣环境。航空燃油外观需清澈透明、无悬浮和沉降的机械杂质、无水等。航空燃油还应具有较好的低温性、安定性、蒸发性、润滑性及无腐蚀性,不易起静电和着火危险性小等特点。所有这些性能指示都有严格的规定^[2]。

在标准状态下,单位质量的燃油完全燃烧时放出的热量是燃油的一个重要指标。有两种热值表示方式:燃烧产物中的水呈液态时的热值为高位热值;燃烧产物中的水呈气态时则为低位热值。发动机的燃料一般采用低位热值表示。燃料热值取决于燃油中的碳氢比,碳氢比越小,热值越高。一般航空煤油的低位热值为 41 840~42 890 kJ/kg (10 000~10 250 kcal/kg),宽馏分煤油可达 42 890~43 510 kJ/kg (10 250~10 400 kcal/kg),航空汽油则大于 43 090 kJ/kg (10 300 kcal/kg)。航空燃油持续猛烈燃烧的最高温度可达 1100°C 以上。

3 号喷气燃料(Jet fuel No.3)密度适宜,热值高,燃烧性能好,能迅速、稳定、连续、完全燃烧,且燃烧区域小,积炭量少,不易结焦;低温流动性好,能满足寒冷低温地区和高空飞行对油品流动性的要求;热安定性和抗氧化安定性好,可以满足超音速高空飞行的需要;洁净度高,无机械杂质及水分等有害物质,硫含量尤其是硫醇性硫含量低,对机件腐蚀小。3 号喷气燃料的闪点为 38°C ,自燃温度超过 425°C ,凝固点为 -47°C ,露天燃烧温度达 $260\sim 315^{\circ}\text{C}$,最大燃烧温度可达 980°C 。

航空煤油都含有一些添加剂。添加四乙基铅(tetra-ethyl lead, TEL),以提高燃油的闪点。添加抗氧化剂,通常为碱性酚,如 AO-30、AO-31 或 AO-37,用来防止起胶。添加防静电剂,以消减静电并防止发生火花,新一代的航空煤油防静电剂为无灰型防静电剂,主要有 Stadis 450、Antis JF3 等。添加腐蚀抑制剂,如用于民用与军用燃料的 DCI-4A,以及军用燃料专用的 DCI-6A。添加燃料系统结冰抑制剂(FSII),如二乙烯甘油单甲基醚,一般在使用前才混合,这样具有燃料加热管道的飞机就不需要额外支付此类添加剂的费用。通常航空煤油中还添加有杀灭生物的添加剂。

军方使用的航空煤油具有另外一套称为 JP 系列的编号。部分类型与民用燃油几乎相同,只是部分添加剂的含量稍有不同。例如, JETA-1 与 JP-8 类同,而 JET B 与 JP-4 相似。其他的军用燃料属于高度专门化的制品,为特定的用途而设。JP-5 燃油颇为常见,最初用于航空母舰,以减少船上发生火灾的可能性。其他的燃油针对某一特殊类型的飞机而开发,如 JP-6 为 XB-70 战神轰炸机燃油,JP-7 为 SR-71

黑鸟式侦察机的特定燃油。两者都经过特别调配，具有很高的闪点以应付超音速飞机遇上的高热与应力。美国空军所使用的单一型号飞机专用燃油为 JPTS，于 1956 年开发，专为洛克希德 U-2 间谍飞机而设。

JET A 航空煤油自 20 世纪 50 年代就成为美国的标准航空煤油类型。目前，只有美国供应 JET A 航空煤油。JET A 与 JET A-1 相似，但凝固点为 -40°C ，比 JET A-1 的 -47°C 略高。与 JET A-1 一样，JET A 的闪点为 38°C ，而自燃温度超过 425°C 。JET A 专用的运油车、油库与管道，均会以黑底贴纸写上白色“JET A”字样，以及下面的一条黑线作为识别。由于水比 JET A 燃油重，水会在油箱的下面沉积。因此，储存 JET A 的油箱需要定期排空，以检查燃油是否混了水分。水分会悬浮在 JET A 燃油之中，这可以通过“明净测试”检出。若燃油呈混浊状态，即表示含水量超出了 $30\text{ppm}^{\text{①}}$ （百万分之三十）的可接受水平。美国法规并不要求商用燃料加上防静电剂，故 JET A 燃油一般不含防静电剂^[3,4]。

1.3 航空燃油的应用及发展

航空汽油的应用设备主要为航空活塞式发动机，航空活塞式发动机与一般汽车发动机工作原理相同，但航空活塞式发动机功率大、自重轻，因而对航空汽油的质量要求和汽车对车用汽油的质量要求有类似之处。目前这种航空活塞式发动机只应用于一些辅助机种，如直升机、通讯机、气象机等，故航空汽油消耗量相比航空煤油大大减少。

航空煤油的应用设备主要是涡轮喷气发动机。随着航空工业和民航事业的发展，民航大型客机的动力装置逐步被涡轮喷气发动机代替。这种发动机推动飞机向前飞行，通过把燃料燃烧转变为燃气产生推力，使用的燃料称为喷气燃料。现行最常用的航空煤油是以煤油为基础的 JET A-1，并根据国际标准规格生产。在美国，有另一种型号的 JET A-1 煤油，称为 JET A。1944 年在芝加哥举行的国际会议上通过了航空燃油豁免征税的提议。

20 世纪 50 年代，我国空军飞机和大型民航客机已开始使用航空煤油，但一直靠从苏联进口，1959 年进口量近 50 万 t。为解决航空煤油的国产化问题，1956 年和 1957 年我国石油工业部曾组织玉门炼油厂按苏联的喷气燃料规格，试生产两批航空煤油，但在地面台架试车和空中试飞时发现存在火焰筒烧蚀问题，因而未能正式生产。1958 年，又把该厂试产的航空煤油油样送苏联进行研究，经一年多试验研究仍未解决问题。

① $1\text{ppm}=1\times 10^{-6}$

1960年,中国航空煤油的进口量锐减,已进口的油品质量也无法保障。为保证空军和民航的用油需要,同年8月10日,石油工业部发出《关于采取多种方法试制航空煤油的通知》,要求科研、生产单位就航空煤油的烧蚀问题进行研究攻关。8月18日,航空油料鉴定委员会召开会议,讨论航空煤油的试制问题。会议决定分别由兰州炼油厂、玉门炼油厂、独山子石化公司炼油厂和抚顺石油化工公司石油三厂各试产一批航空煤油进行地面试车。随后,根据国务院领导同志指示,石油化工科学研究院、中国石化抚顺石油化工研究院、中国科学院大连化学物理研究所、中国科学院兰州化学物理研究所、中国科学院金属研究所等一些科研院所和飞机制造厂、中国人民解放军总后勤部、中国人民解放军空军有关单位,以及各炼油厂共20多个单位进行联合攻关。经过大量实验室研究和地面台架试验,终于找到了产生烧蚀的原因,采用石油化工科学研究院推荐的添加剂,使问题得到解决。1961年独山子石化公司炼油厂用新疆原油的煤油馏分加入抗烧蚀添加剂生产出1号航空煤油,顺利地通过了长期台架试车和试飞。1962年,大连石油化工公司石油七厂采用大庆原油,在工业装置上生产出了合格的2号航空煤油。为了证实国产航空煤油的使用安全性能,石油工业部还派机关干部和各炼油厂的总工程师共20多人乘坐使用国产航空煤油的飞机,进行了近万公里的飞行,表明国产航空煤油质量优良,安全可靠。从此,国产航空煤油很快在国内军用和民航飞机上被推广使用。为了扩大产量,满足需要,石油工业部安排各炼油厂生产航空煤油,并采用严格的管理措施,保证了产品质量。1965年,国内消费的近70万t航空煤油全是由国内生产,从而实现了航空煤油的自给,停止从国外进口。

随着全球气候变暖,国际社会强烈关注温室气体排放。全球航空燃料的二氧化碳排放量占全球二氧化碳排放总量已达到2%,随着国际民航业的发展,这一比例还将不断上升。国际社会积极开展航空节能减排和应对气候变化工作。减少温室气体排放的主要途径包括:①提高能源利用效率;②寻找替代能源;③CO₂固存与转化。国际航空运输业制定了航空碳减排目标:至2050年,该行业的碳排放规模在2005年水平的基础上降低50%;在2020年之前,将其航空燃油效率逐年提高1.5%。为推动航空碳减排目标的实现,2008年11月19日,欧盟通过法案决定将国际航空领域纳入欧盟碳排放交易体系(ETS),并于2012年1月1日起实施,根据这一交易体系,所有在欧盟机场起落的飞机都要向欧盟交纳碳排放税,即航空碳税。虽然欧盟声称采取此项措施是为了对抗全球气候变暖,但遭遇了全球20多个国家的共同抵制。为此欧盟率先启动了欧盟境内的“绿色天空计划”。虽然欧盟的航空碳税未能在全球范围内推广,但激起了全球生物航空燃油发展热潮。相较于传统航空煤油,生物航空燃油可实现减排二氧化碳55%~92%,不仅可以再生,具有可持续性,而且无需对发动机进行改装,具有很高的环保优势。2009年1月7日,美国大陆航空公司的一架波音737客机成功完成北美洲首次商业飞机

生物燃料试验飞行。2011年6月29日,荷兰皇家航空公司的一架飞机采用使用过的食用油(“地沟油”)作为其生物燃料的原材料,搭载171名乘客从荷兰阿姆斯特丹史基浦机场出发,飞往巴黎戴高乐机场。荷兰皇家航空公司成为全球首家使用生物燃料进行商业飞行的航空公司。2011年7月15日,德国汉莎航空公司的一架空客A321客机开始使用生物燃油,作为“绿色飞行”首批体验者之一,这架客机往返汉堡与法兰克福,每天4次航班。客机两个发动机中的一个将使用混合燃油,按照常规燃油与生物燃油各50%配制。2011年10月7日,英国汤普森航空公司成功推出了首个由英国机场始发的“地沟油航班”,共搭载了232名乘客,由英国伯明翰飞往西班牙兰萨洛特,执行这次飞行任务的双引擎波音757飞机一个引擎的燃料中加入了50%的“氢酯和脂肪酸”。2013年4月24日,中国东方航空公司成功实施中国首次自主知识产权生物航煤1号燃油验证试飞,实施试飞的东方航空公司现役空客A-320飞机加注了生物航空燃油后执行了1.5h验证飞行,记录下各项重要数据、指标。

目前进行试飞的生物航空燃油均由油脂原料转化而来,为解决原料供应保障问题,世界各国竞相开发新的原料来源及转化技术,如微藻油脂、纤维素生物航空燃油等。可以预见,未来多原料的生物航空燃油技术将不断涌现,生物航空燃油在航空领域将扮演十分重要的角色。

参 考 文 献

- [1] 陈长生. 石油加工生产技术. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] 侯祥麟. 中国煤油技术. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2001.
- [3] 马博文. 清洁燃料生产技术. 北京: 中国石化出版社, 2001.
- [4] 蔡智. 油品调和技術. 北京: 中国石化出版社, 2006.

第2章 生物航空燃油的前景与意义

2.1 航空领域碳减排现状

近年来,世界经济持续高速发展,现代化进程不断加快,各种问题也随之出现,绿色植被遭到严重乱砍滥伐,石油等化石燃料大量消耗,气候变化问题尤为引人关注。气候变化的典型特征表现在全球变暖、冰雪圈大面积消退、海平面上升和森林草场退化,威胁着脆弱的生态系统和全球粮食安全,人类社会的发展甚至是生命和健康都受到了严峻的挑战。研究数据表明,引发全球气候变暖的主要原因是温室气体的排放(主要是二氧化碳的过度排放)。自工业革命以来,大气中的二氧化碳含量迅速增加了35%,这一数值远远超出了地球的自身调节能力范围,预计在很长一段时期内,温室气体数量难以恢复到之前的水平,全球气温将持续上升^[1]。温室气体排放的主要来源是化石燃料的使用,化石燃料是一种由碳元素和氢元素两者相结合而成的化合物或其衍生物,如煤油、天然气、煤炭等。当前,全世界各地区经济的快速发展离不开化石燃料,这些化石燃料在燃烧的过程当中会产生大量的二氧化碳,并排放到空气中,阻碍过剩的地表热量向外层空间发散,导致热量大量聚集到大气层内,引起大气温度上升。据统计,在过去的100年中,世界气温提高了约0.8℃,尤其是近半个世纪以来温度上升速度较以往历史时期翻了一番^[2]。同时,各地区呈现出差异化温度增长。以往气温较低的俄罗斯等高纬度国家增长速度明显较快,中东等内陆国家的温度提升速度也要快于沿海各国。大气温度上升造成的最直接后果是南北半球的冰川和积雪融化,海平面上升。自1961年以来,海平面每年上升超过了1mm,1993年以来,变成每年3.1mm,整个世纪累计上升了接近0.2m。斯特恩认为,未来50年全球平均气温上升超过2℃的概率至少是75%,也许还会高达99%,气温上升超过5℃的概率至少是50%^[3]。这些变化极大地威胁着人类的安全,特别是一些沿海国家,内陆不断受到海洋的侵蚀。若以现在全球变暖的速率继续下去,预计21世纪全球绝大部分的岛屿国家将被淹没,绝大多数沿海国家的领土将化为乌有,大批人口需要迁徙。因此,面对全球日益严重的气候危机,世界各国越来越重视温室气体的减排^[4]。

为了降低二氧化碳等温室气体排放,改善经济和“碳排放”之间的损益关系,世界各国相继出台了各种策略、措施。从1992年通过的《联合国气候变化框架公约》到1997年的《京都议定书》,发展迅速,从公约变成了可操作的法律文件。

《京都议定书》中提出了三种模式:一是联合履约机制;二是排放交易机制;三

是清洁发展机制。其中,排放交易机制简单直接,可操作性强,因此使用最为广泛,但是它的顺利执行也需要相应的法律法规进行约束。欧盟从20世纪起就开始研究应对措施,包括制定《排放交易指令》草案,即拟在欧盟成员之间建立一个广泛市场,专门用来进行二氧化碳排放指标交易,以期保证欧盟碳排放总量在可控范围内。在成员各方推动下,2005年作为全球首个跨国排放交易市场——欧盟碳排放交易体系(ETS)开始运作。按照交易体系规定,除航空行业以外,市场上绝大多数能源都将作为交易品种。各成员的碳排放在承诺期要低于所获得的配额,配额由欧盟议会和理事会根据每个国家的具体情况和历史排放予以分配。各个排放源根据自身减排能力,或采取自我消化的办法完成规定减排量,或者通过市场交易购买碳排放额完成减排指标,利用市场机制调剂各国指标和资源,优化减排结构,通过排放越多、成本越高的原理增加企业减排自我约束力。ETS作为迄今为止全球最大和最完善的温室气体排放交易市场,已经成为欧盟国家治理环境污染和推动节能减排的主要举措。另外,美国芝加哥气候交易所的温室气体排放交易体系也是北美洲地区唯一的较大规模的排放交易体系,该体系可以进行多种气体和污染资源的交易,具有很好的社会认可程度。

在世界气候变化的严峻形势下,虽然民航业的碳排放数量与其他行业相比所占比重较小,但作为最近几年排放增速较快的能源密集型行业,航空业的节能减排一直是人们关注的焦点。过去十几年,航空运输业一直稳步发展,人员和物资空运数量每年分别以平均4.9%和5.1%的速度增长,全球航空业每年消耗15亿~17亿桶^①航空燃油^[5]。国际民航组织预测,航空业规模将保持以每年3.3%~5.8%的速度增长,到2040年,运营的飞机架次将是2010年的3倍,对航空燃油的需求也将成倍增长。经美国运输部研究机构测算,2000年全球飞机的二氧化碳排量为5.72亿t,2025年将增至12.28亿~14.88亿t,从企业责任及环境保护角度来看,全球航空业都将面临较大的低碳减排压力。

2006年欧盟委员会提议将航空运输业纳入ETS中,2008年欧洲议会通过投票决议通过了关于将航空运输业纳入ETS的草案,并于该年年底正式生效,2009年欧盟公布了受该草案约束的2000多家航空公司的名单,被公布的航空公司于2012年起被纳入ETS,即上述航空公司进出欧盟及在欧盟内部飞行均要遵守欧盟的“绿色天空计划”。所谓“绿色天空计划”就是规定进出欧盟区域机场的航空运输公司将被分配一定的碳排放限额,航空公司碳排放总量小于限额的剩余部分可出售,而超出限额部分则需购买。在初级阶段,将85%的排放配额无偿配给航空公司,剩下部分将采用拍卖途径有偿发放,但是享受无偿配给的前提是航空公司需要在规定期限内提交碳排放检测计划。按照国际航协的测算,拍卖15%排放配

① 1桶(UK)=36gal(UK)=1.63659×10²dm³

额, 2012 年售额可以达到 24 亿欧元, 2020 年为 48 亿欧元。将航空运输业纳入 ETS 中, 欧盟不仅能增加额外的经济收入, 还能在一定程度上影响和控制相关国家经济的发展。

欧盟此项举措严重违背了“共同但有区别的责任”原则, 在国际社会上引起广大争议。对当前的国际社会秩序及相关国家经济社会发展产生非常巨大的影响, 尤其对于除欧盟以外的航空公司而言, 无疑增加了一笔巨大的运营成本。在现有的航空业减排目标设定下, 根本没有一家航空企业能获得足够的免费配额。根据国际民航组织相关机构预测, 如果严格按照 ETS 设定的标准进行交易, 那么一年之内, 全球各航空公司将会额外支出 35 亿欧元的成本。另外, 该体系和市场实行全程监控, 航空公司为了减少罚款支出, 可能导致经停欧盟境内的飞机改变飞行航线, 选择在欧盟境外机场降落后再次起飞的方法来减少监测排放量。这种做法可能会减少航空公司在欧盟内的罚款支出, 但因为增加了航行距离, 油耗必然大幅上升, 进一步加大了二氧化碳等气体的排放压力, 对总体环境是有害无益的。这一法案对于除欧盟之外的航空企业十分不利, 区域性的减排体系将很可能改变全球航空业的竞争格局, 形成新的贸易壁垒。此外, 航空公司因此增加的成本必然会通过票价等形式转嫁到普通消费者身上, 消费者的利益因此受损, 甚至会影响到航空产业的旅客需求, 不利于行业发展。欧盟针对全球航空业率先实行限制性措施引起其他国家的坚决反对, 各国相继出台禁令以抵制欧盟的单边做法。而欧盟的态度很强硬, 并单方面表示, 欧盟的法案不会因航空业的压力而改变, 也不会因为可能引起贸易战而在气候立法上作出让步^[6]。

在欧盟公布的航空公司名单中, 有 28 家中国航空运输公司名列其中, 包括中国国航、中华航空和国泰港龙航空等, 截至 2010 年年底, 我国国内各航空公司累计消耗航空油料超过 1500 万 t, 造成二氧化碳排放近 3800 万 t, 年均增长约 15%, 约占全国二氧化碳总排放的 0.6%, 而且我国赴欧盟的航班大约占我国国际航班的 10%。因此, 欧盟这项法案对中国航空业影响很大^[7]。欧盟的航空排放交易体系对于发展中国家来说并不合理, 它根据历史基准年的平均排放量来确定未来的发放配额, 没有考虑国家间经济发展水平差异和政治经济环境不同等问题。发达国家航空业已经趋于稳定, 总运输周转率增加平稳, 能获得更多的免费配额。而我国航空运输业正处于高速发展时期, 特别是国际航线发展极为迅猛, 年均增长率在 10% 以上, 造成可用配额严重不足, 影响自身发展。而且, 根据中国民用航空局(以下简称中国民航局)的测算, 按照当前 30 欧元/t 的市场价初步测算, 仅 2012 年国内各公司就将额外支出将近 8 亿元(人民币), 以后逐年增加, 到 2020 年购买配额的成本将达到 30.8 亿元(人民币), 2020 年后, 免费配额的比例将进一步减少, 对于执行中国到欧洲的航班而言, 运营成本将难以控制。在航空排放交易模式下,

成本的增加必然会以机票价格增加的形式转嫁到消费者身上,我国航空业之前的价格优势将丧失。另外,欧盟航空业在减排技术、运营管理效率、空管水平上都高于我国,通过将航空运输业纳入 ETS 体系,设定量化的减排目标,将进一步强化其技术和经济竞争优势,抑制我国民航运输业的长期发展。这也是欧盟的额外目的之一,借助环保和减排名义,将 ETS 打造成一个实施贸易保护的门槛和壁垒,限制我国尤其是发展中国家的对欧贸易。

2.2 发展生物航空燃油的意义

在多元化的新能源时期,石油、天然气和煤炭等化石燃料在全球能源结构中仍占主导地位,这些能源的发展促进了社会的快速进步。然而,随着这些自然资源的大规模消耗,人类面临着诸多问题。首先,化石燃料的燃烧释放出大量的二氧化碳进入大气层,而不能实时地由植物固定利用,导致其量的累积,从而引发全球变暖。其次,化石燃料的地理分布不均,在某些情况下,成为引发社会政治不稳定和经济问题等的导火线。最后,随着社会能源需求量的强劲回升及化石燃料的不断消耗,其再生速率远低于社会的消耗速率,化石能源终有殆尽的一天。这些政治和环境等问题推动着社会必须寻找新的液体燃料来替代化石燃料,而生物质是目前唯一能提供可持续的有机碳来源,以其为载体转化的生物质能源是最有潜力替代化石燃料的能源^[8]。

生物质资源丰富、来源广泛,在全球范围内,生物质能逐渐成为新兴产业,将会迎来一个飞速发展的黄金时期,但在具体开发利用过程中面临诸多的问题。我国作为一个农业大国,每年可产生约 8.25 亿 t 生物质资源,其带来的综合效益相当可观,相当于 4.6 亿 t 标准煤,如能全部将其利用可实现 8.5 亿 t 二氧化碳的减排目标,但目前其综合利用率不是很理想。2010 年我国农作物秸秆实物量为 3.4 亿 t,折合相当于 1.7 亿 t 标准煤,但其利用率仅为 2.35%,林木剩余物的利用率更低,仅为 0.85%^[9]。为使生物质资源得到更好的利用,实现节能减排,促进“低碳经济”的可持续发展,我国出台了很多政策法规,给予了大量的科技扶持。《中华人民共和国可再生能源法》第十六条中明确指出“国家鼓励能源作物的发展且清洁、高效地利用生物质燃料,并规定符合国家标准的液体生物燃料可纳入燃料销售的体系中”,这就大大地促进了液体生物燃料的开发和利用。国家能源局也指出“生物质是唯一能提供液体生物燃料的可再生资源”。

目前,航空运输业在经济全球化进程中扮演着越来越重要的角色,人员空运与货物空运数量的增长率分别为 4.9%和 5.3%^[10],日益增长的燃料需求和高涨的减排呼声使得航空业急需作出相应的调整。2011 年,中国民航局进一步修订和细