



中国**非粮燃料乙醇** 发展潜力研究

付晶莹 江 东 郝蒙蒙 等◎著

*Zhongguo
Feiliang Ranliao Yichun
Fazhan Qianli Yanjiu*



气象出版社
China Meteorological Press

中国非粮燃料乙醇发展潜力研究

付晶莹 江 东 郝蒙蒙 等◎著



内容简介

生物质能源作为来源广泛、清洁环保的可再生能源,将在全球经济社会发展中发挥越来越重要的作用。本书针对替代交通能源的生物液体燃料——燃料乙醇,介绍了国内外燃料乙醇发展的概况、主要生产原料、生产工艺;针对适于生产燃料乙醇的非粮原料作物,提取了适宜其生长的边际土地资源,并对作物的生长潜力进行评估;在生命周期分析法的框架下,引入基于空间的过程模型,在地理单元上,实现了燃料乙醇生产潜力及其转化过程中能量消耗和环境排放的空间模拟与估算。在全国尺度上,模拟分析了基于不同原料作物的我国非粮燃料乙醇发展的能源效益、环境效益及经济效益,通过综合对比分析,提出了一种非粮燃料乙醇规模化发展的优化模式,为合理规划我国非粮能源植物的种植和产业布局提供支撑。

图书在版编目(CIP)数据

中国非粮燃料乙醇发展潜力研究 / 付晶莹, 江东,
郝蒙蒙著. — 北京: 气象出版社, 2017. 6

ISBN 978-7-5029-6447-4

I. ①中… II. ①付… ②江… ③郝… III. ①乙醇-
液体燃料-发展-研究-中国 IV. ①TQ517.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 248194 号

Zhongguo Feiliang Ranliao Yichun Fazhan Qianli Yanjiu

中国非粮燃料乙醇发展潜力研究

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68409198(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@ema.gov.cn

责任编辑: 蔺学东

终 审: 邵俊年

责任校对: 王丽梅

责任技编: 赵相宁

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 9.5

字 数: 240 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版

印 次: 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 60.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

本书编委会

主 编：

付晶莹 江 东 郝蒙蒙

编写人员(以姓氏笔画为序)：

丁方宇 付晶莹 江 东 宋晓阳 林 刚

范沛薇 郝蒙蒙 阎晓曦 黄耀欢

前 言

全球经济和社会的发展都离不开对能源的依赖。全球化石能源的储量正急剧下降,而能源需求仍日益增加。一系列无法避免的能源安全挑战,如能源短缺、资源争夺以及过度使用能源造成的环境污染等问题威胁着人类的生存与发展。基于能源植物的生物液体燃料具有可再生、清洁和安全等优点,是解决能源危机和保护生态环境的有效途径,已引起世界各国尤其是资源贫乏国家的高度重视。我国对矿物能源特别是煤炭能源的长期开发利用将导致大量污染性气体的排放,对气候变化产生一定影响。同时,我国大多数城镇居民仍靠燃煤做饭或取暖,其直接燃烧造成的大气污染情况也非常严重。此外,机动车保有量的持续增加也必然导致温室气体(GHGs)排放量的增加。因此,我国将同时面临能源短缺及环境污染等问题,解决上述问题将有赖于新能源与可再生能源的开发、推广及应用。

面对我国能源短缺及粮食安全的双重压力,推动非粮能源植物在边际土地资源上的规模化种植迫在眉睫。我国虽然已经开展了燃料乙醇产业化生产的试点,但用于生产的原料仍然是以玉米和小麦等粮食作物为主,比例达到80%以上。而其他原料作物的相关研究主要还围绕在作物的生物学特性及作物培育技术,燃料乙醇的生产工艺、燃烧与排放试验以及发展的理论潜力分析等方向。目前,燃料乙醇生产潜力分析评价方面的论著较少,特别是针对非粮燃料乙醇发展所适宜的土地资源潜力、原料作物生长潜力以及生命周期评价等方面的实证研究较少,对基于空间的我国非粮燃料乙醇发展潜力的研究也几乎处于空白。

本书的主要目的是耦合改进的基于过程的生物地球化学模型与生命周期评估方法,提出一种综合评价燃料乙醇发展的土地资源、能源潜力、环境影响及经济效益的方法,在全国尺度上准确评估不同类型原料生产燃料乙醇的潜力,在技术方法上实现基于多尺度的地理栅格单元的实施和验证,具有很强的实用性和前沿性。

本书由以下几部分组成:前言主要对本书形成的背景进行了简要介绍,第1章主要介绍了燃料乙醇发展的概况;第2章对适于燃料乙醇生产的主要非粮作物资源潜力进行了分析与评价;第3章阐述了燃料乙醇发展潜力评价的能量效益评价模型、环境影响评价模型以及经济性评价模型;第4章利用上一章中相关模型对我国非粮燃料乙醇全生命周期发展潜力进行了评价;第5章对我国不同原料燃料乙醇发展潜力进行了综合分析和比较,并提出了优化的燃料乙醇发展模式;第6章概括了本书的主要成果及结论。

基于空间的非粮燃料乙醇发展潜力研究是一个比较新颖且充满挑战的领域,国内相关研究的积累和沉淀还相对薄弱,非粮燃料乙醇发展潜力评价涉及土地资源、作物生产、运输及乙醇转化等多个环节。受问题复杂性和作者水平的限制,书中研究难免有疏漏及不足之处,望在广大读者的帮助下能够改进和完善。

作 者

2016年10月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 基本概念介绍	(1)
1.2 非粮燃料乙醇的发展现状及动态分析	(4)
1.2.1 国内外研究动态	(4)
1.2.2 非粮燃料乙醇发展驱动力分析	(7)
1.2.3 非粮燃料乙醇发展目标和政策	(8)
1.2.4 非粮燃料乙醇生产主要技术标准	(10)
1.2.5 非粮燃料乙醇发展的社会经济及环境影响	(15)
1.2.6 非粮燃料乙醇发展趋势与前景展望	(16)
1.3 燃料乙醇生产原料概述	(16)
1.3.1 糖质原料概况	(16)
1.3.2 淀粉质原料概况	(18)
1.3.3 纤维素、半纤维素原料概况	(19)
1.4 非粮燃料乙醇生产工艺概述	(20)
1.4.1 甜高粱原料的燃料乙醇生产工艺	(21)
1.4.2 甘蔗原料的燃料乙醇生产工艺	(22)
1.4.3 木薯原料的燃料乙醇生产工艺	(23)
1.4.4 柳枝稷原料的燃料乙醇生产工艺	(25)
第 2 章 适于燃料乙醇生产的主要非粮作物资源潜力	(27)
2.1 我国典型非粮燃料乙醇原料作物	(27)
2.1.1 甜高粱	(27)
2.1.2 木薯	(28)
2.1.3 柳枝稷	(28)
2.2 适于原料作物种植的边际土地资源潜力评估	(29)
2.2.1 数据获取与预处理	(30)
2.2.2 我国适于甜高粱种植的土地资源规模与分布	(34)
2.2.3 我国适于木薯种植的土地资源规模与分布	(37)
2.2.4 我国适于柳枝稷种植的土地资源规模与分布	(39)
2.2.5 小结	(40)

2.3 非粮燃料乙醇原料作物的生长潜力评估	(41)
2.3.1 作物生长过程模型	(41)
2.3.2 我国边际土地甜高粱产量估算	(43)
2.3.3 我国边际土地木薯产量估算	(54)
2.3.4 我国边际土地柳枝稷产量估算	(58)
2.3.5 小结	(67)
第3章 非粮燃料乙醇发展潜力评价模型	(69)
3.1 燃料乙醇生命周期能量效益评价模型	(71)
3.1.1 模型分析	(71)
3.1.2 模型建立	(72)
3.2 燃料乙醇生命周期环境影响评价模型	(74)
3.2.1 燃料乙醇生命周期清单数据归类	(75)
3.2.2 环境影响类型特征化	(76)
3.2.3 环境影响类型标准化	(78)
3.2.4 环境影响类型加权合并	(78)
3.2.5 总环境影响指数	(79)
3.3 燃料乙醇生命周期经济性评价模型	(79)
3.3.1 原料生产及运输成本	(79)
3.3.2 燃料乙醇生产、运输及销售成本	(80)
3.3.3 价值产投比	(81)
3.4 小结	(81)
第4章 非粮燃料乙醇发展潜力生命周期评价	(83)
4.1 基于糖类原料——甜高粱生产燃料乙醇的生命周期评价	(83)
4.1.1 甜高粱生产燃料乙醇的能量效益评价	(83)
4.1.2 甜高粱生产燃料乙醇的环境影响评价	(87)
4.1.3 甜高粱生产燃料乙醇的经济性评价	(94)
4.2 基于淀粉质原料——木薯生产燃料乙醇的生命周期评价	(96)
4.2.1 木薯生产燃料乙醇的能量效益评价	(96)
4.2.2 木薯生产燃料乙醇的环境影响评价	(100)
4.2.3 木薯生产燃料乙醇的经济性评价	(106)
4.3 基于纤维质原料——柳枝稷生产燃料乙醇的生命周期评价	(108)
4.3.1 柳枝稷生产燃料乙醇的能量效益评价	(108)
4.3.2 柳枝稷生产燃料乙醇的环境影响评价	(112)
4.3.3 柳枝稷生产燃料乙醇的经济性评价	(119)
4.4 小结	(120)
第5章 我国非粮燃料乙醇发展潜力综合分析	(122)
5.1 我国不同原料燃料乙醇发展潜力比较	(122)

5.2 我国非粮燃料乙醇发展模式探讨 (123)

5.2.1 燃料乙醇优化发展模式下能量效益评估 (123)

5.2.2 燃料乙醇优化发展模式下环境影响评估 (126)

5.2.3 燃料乙醇优化发展模式下经济性评估 (130)

5.3 小结 (131)

第 6 章 研究结论 (132)

参考文献 (134)



第1章 绪 论

1.1 基本概念介绍

(1)《京都议定书》

《京都议定书》(Kyoto Protocol)是《联合国气候变化框架公约》的补充条款,于1997年12月在日本京都由联合国气候变化框架公约参加国第三次会议制定。该公约包括28个条款和2个附件,明确了各国对控排温室气体应当担负的责任,并提出促进实现减排目标的四种方式。《京都议定书》的诞生,是国际社会为保护全球气候采取的一项重大而具体的行动,它标志气候变化谈判取得了建设性的进展^[1,2]。

(2)《巴黎协定》

2015年12月12日,195个《联合国气候变化框架公约》缔约方代表相聚法国巴黎,达成了历史性协议《巴黎协定》,确定了全球平均气温较工业化前水平升高幅度控制在 2°C 以内的目标,并提出为把升温控制在 1.5°C 之内而努力^[3]。《巴黎协定》确立了2020年后全球应对气候变化国际合作的制度框架,成为全球应对气候变化进程的又一新起点^[4]。

(3)可再生能源

可再生能源是指原材料可以再生的能源,在我国是指除常规能源外的小水电、太阳能、风能、地热能、生物质能、海洋能等。

(4)非再生能源

非再生能源是指在自然界中经过亿万年形成的,短期内无法恢复且随着大规模开发利用,储量越来越少的能源。包括煤、原油、天然气、油页岩、核能等。

(5)清洁能源

清洁能源,即绿色能源,是指不排放污染物、能够直接用于生产生活的能源,它包括核能和可再生能源。

(6)生物质

生物质是指直接或间接利用绿色植物光合作用形成的有机物质,包括动物、植物和微生物及其排泄或代谢所产生的有机物,它是以化学方式储存的太阳能,也是以可再生形式储存在生物圈中的碳^[5,6]。

(7)生物质能源

各种生物质(如陆生植物、水生植物、人畜禽的尿粪、工业生产过程所排放的及城镇居民每天生活所排出的有机废弃物等)经物理、化学、生物化学等转换技术,生成的可供人类使用的气体、液体和固体燃料称为生物质能源^[7]。它是地球上最普遍的一种可再生能源。

(8) 生物液体燃料

生物液体燃料是指通过生物质资源生产的燃料,目前主要包括燃料乙醇和生物柴油,是可再生能源开发利用的重要方向^[8]。

(9) 生物燃气

生物燃气俗称沼气,是指生物质在厌氧条件下被甲烷菌等多种微生物分解利用所产生的气体,主要成分为甲烷和二氧化碳^[9]。全球每年通过光合作用生成约 4000 亿吨有机物,其中 5% 在厌氧环境下被微生物分解,利用这一自然规律进行沼气发酵,既可以生产沼气用作燃料,又可以处理有机废物保护环境,同时沼气发酵后的沼液、沼渣又是优质的有机肥料。沼气燃烧后产生的二氧化碳被植物通过光合作用再生成植物有机体,又转变为沼气发酵原料,因此沼气是一种发展很快的清洁可再生燃料^[10]。

(10) 生物固体成型燃料

生物质固体成型燃料技术是指在一定温度和压力作用下,利用木质素充当黏合剂,将松散的秸秆、树枝和木屑等农林生物质压缩成棒状、块状或颗粒状成型燃料。压缩后的成型燃料体积缩小 6~8 倍,能源密度相当于中质烟煤,提高了运输和储存能力;燃烧特性明显得到改善,提高了利用效率^[11]。

(11) 农业生物质能源

农业生物质能源资源包括农作物秸秆、农产品加工业副产品、畜禽粪便和能源作物。农作物秸秆和农产品加工业副产品可用于发电或固体成型,畜禽粪便通常用于发酵制取沼气^[12]。

(12) 林业生物质能源

我国林业生物质能源资源的开发利用方式,主要有木质生物燃料资源、木本油料植物资源以及木本淀粉、纤维植物资源等类型。其中木质生物燃料资源以获取生物燃料为目的,主要来源于薪炭林、灌木林、林业采伐剩余物、木制加工剩余物、不同林地育林剪枝和四旁树剪枝获得的薪材等。我国目前培育技术较为成熟的木本油料植物主要有有麻疯树、黄连木、光皮树、文冠果、油桐和乌桕等。我国的木本高淀粉、纤维素植物资源主要有板栗种、栎类果实橡子、广西木薯和麻类等木质纤维素原料^[13]。

(13) 能源微藻

能源微藻是指油脂含量高于 30% 的藻类,例如:绿藻(*Chlorella* sp., *Nannochloropsis* sp., *Botryococcus* sp., *Nannochloris* sp., *Neochloris* sp., *Dunaliella* sp.), 金藻(*Isochrysis* sp.) 和硅藻(*Chaetoceros* sp., *Cylindrotheca* sp.) 等,大部分绿藻缺氮培养时油脂含量有一定程度的提高,部分可达 50% 以上,硅藻则在培养基中硅含量较低时会促进油脂合成^[14]。

(14) 生物柴油

生物柴油主要是指通过酯交换等方法将原料中的油脂转化为脂肪酸甲酯而获得的燃料,它可与普通柴油混合或单独作为燃料使用^[15]。

(15) 燃料乙醇

燃料乙醇是指通过发酵和糖转化等加工程序,将原料中的淀粉纤维素等物质转化为乙醇而获得的燃料,它可以直接用于石油的添加剂或与汽油混合使用^[15]。

(16) 变性燃料乙醇

加入变性剂后用于调配车用乙醇汽油的燃料乙醇,不能食用。它可以按规定的比例与汽油混合作为车用点燃式内燃机的燃料^[16]。



(17) 车用乙醇汽油

车用乙醇汽油是指在不含氧化合物的专用汽油组分中,按体积比加入 10% 的变性燃料乙醇,由车用乙醇汽油定点调配中心按照国家标准通过特定工艺混配而成的点燃式内燃机车用燃料^[17,18]。

(18) 木质纤维素

木质纤维素(Lignocellulose)是指自然界生长的、未经任何处理的植物的叶、干、茎等材料,它含有纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质、水、灰分等物质,地球上每年大约形成 1000 亿吨木质纤维素,是自然界分布最广、含量最多、价格低廉而又可再生的资源^[19]。

(19) C₄ 植物

高等植物有 3 种光合碳同化途径,分别是 C₃ 途径、C₄ 途径和景天酸代谢(Crassulacean acid metabolism, CAM)途径,相应的植物因 CO₂ 固定的最初产物不同,分别称为 C₃、C₄ 和 CAM 植物。其中 C₄ 植物是从 C₃ 植物进化来的一种高光效种类,与 C₃ 植物相比,它们具有在高光强、高温及低 CO₂ 浓度下保持高光效的能力。高光合速率是 C₄ 植物的特征,也是作物高产的保障^[20]。

(20) 大田作物

大田作物是指在大片田地上种植的作物,如小麦、水稻、高粱、玉米、棉花、牧草等。

(21) 生物质燃料物理转化过程

物理转化途径是通过改变生物质的形态得到各种高密度的固体成型燃料。这一转化途径是借助外力作用下,如通过高温/高压作用将松散的生物质原料压缩成具有一定形状和密度的成型物,以减少运输成本,提高燃烧效率。原料经压缩成型后,密度可达 1.1~1.4 g/cm³(与中质煤相当),燃料特性明显改善,火力持久,黑烟小,炉膛温度高^[21]。

(22) 生物质燃料传统化学转化过程

传统化学转化是目前生物质应用最广泛的一种途径。以生物发酵为代表,包括传统的发酵制取乙醇和沼气、现代的 ABE 发酵技术制取丁醇和发酵制取氢技术以及生产生物柴油的酯化反应法。无论是现代发酵技术还是传统发酵技术,均存在周期长的特点,使得其效率较低,且传统化学转化方法都是制得单一产品,在市场经济中的抗风险能力较弱,不利于实现生物质能的商业价值^[21]。

(23) 生物质燃料热化学转化过程

生物质燃料热化学转化的方式包括:燃烧、液化、热解和气化。热化学转化法具有利用效率高、加工成本低、产品多元化等优点,就当前我国形势来看,气化是一种较受欢迎的利用途径,但快速热解途径仍处于发展阶段^[21]。

(24) 生物质燃烧

直接燃烧是指将可燃烧的生物质直接投入特殊燃烧设备中燃烧,产生的热气流或高压蒸汽用于发电或取暖,与目前的燃煤发电、供暖相似,在燃烧设备上有一定差异。生物质燃烧是一种直观、简单、投资少的方法^[21]。

(25) 生物质液化

液化是指通过化学方法将生物质转变为液体产品的过程,有直接液化和间接液化之分。直接液化是将生物质、催化剂和溶剂置于高压设备中,高温高压下制取液体燃料,并副产气体;间接液化是先将生物质气化成小分子气体后再进行催化合成液体产品的过程^[21]。

(26) 生物质热解

生物质热解是在无氧或少氧条件下持续给生物质加热所发生的一系列物理和化学变化。在该过程中生物质大分子受热断裂成各种小分子,并发生小分子结合成大分子的过程,得到包含气、液、固三相反应产物。气体产物以氢气、一氧化碳和小分子烃类为主,液体产物为生物油,固体产物为木炭。通过控制反应温度和反应时间,可得到不同比例的产物^[21]。

(27) 生物质气化

气化是指生物质原料在隔绝空气加热条件下与汽化剂发生不完全燃烧的能量转化过程,生物质裂解后,与汽化剂反应生成小分子可燃气体。汽化剂种类不同,所得的小分子可燃气体也不尽相同,其热值也有较大差异。经生物质转变为小分子气体,既能通过二次燃烧发电、供热、民用炊事,也可以进一步加工制取液体燃料^[21]。

(28) 能源作物边际土地

农业部科技司在生物质液体燃料专用能源作物边际土地资源调查评估方案中将能源作物边际土地定义为可用于种植能源作物的冬闲田和宜能荒地^[22]。

(29) 宜能荒地

宜能荒地是指以发展生物液体燃料为目的,适宜于开垦种植能源作物的天然草地、疏林地、灌木林地和未利用地。

(30) 生命周期评价(LCA)

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是指对产品的整个生命周期——从原料获取到设计、制造、使用、循环利用和最终处理等,定量计算、评价产品实际、潜在消耗的资源 and 能源以及排除的环境负荷。LCA 由四个相互关联的部分组成,即目标定义和范围界定、清单分析、影响评价、结果解释。LCA 作为一种可持续的环境管理工具,同时也是一种量化的决策工具,其应用领域非常广泛,如产品开发和改善、企业战略规划、公共政策制定、市场营销等^[23]。

1.2 非粮燃料乙醇的发展现状及动态分析

燃料乙醇产生于 20 世纪 20 年代,当时由于石油的大规模、低成本开发,乙醇因其经济性较差而被淘汰。进入 21 世纪,由于石油价格的持续攀升,生物液体燃料产业在全球迅速兴起。生物液体燃料是生物质能源的重要组成部分,主要包括燃料乙醇和生物柴油两种形式,是目前最主要的交通替代能源。燃料乙醇是指通过发酵和糖转化等加工程序,将原料中的淀粉、纤维素等物质转化为乙醇而获得的燃料,它可以直接用于石油的添加剂或与汽油混合使用^[24]。

1.2.1 国内外研究动态

全球经济和社会的发展都离不开对能源的依赖。随着全球经济的扩张及人口日益增长,发展中国家 2040 年的能源需求将比 2010 年增加 65%^[25]。2014 年《BP 能源统计年鉴》指出,我国的能源需求在 2007 年超过欧盟,2010 年超过美国,2012 年则超过整个北美,成为世界最大的煤炭净进口国,是非经合组织的能源需求增长的典型代表^[26]。在化石能源短缺的同时,全球变化等气候环境问题也是全球共同面临的难题。2015 年 12 月,法国巴黎第 21 次气候大

会上通过的《巴黎协定》确定了全球温室气体减排目标,明确表示将温度上升严格控制在 2℃ 以内。如果要达到这一目标,全球在 2030 年排放水平应为 400 亿吨温室气体。我国在 2013 年全球排放量占比约为 29%,按此比例,未来 15 年我国在 60%~65%的基础上需要大幅提高减排任务。对此,习近平总书记代表我国承诺,将设立 200 亿元人民币的“中国气候变化南南合作基金”,在发展中国家开展 10 个低碳示范区、100 个减缓和适应气候变化项目、1000 个应对气候变化培训名额的合作项目,继续推进清洁能源和气候适应型农业等领域的国际合作。

化石能源短缺问题的解决以及减排目标的实现将有赖于新能源与可再生能源的开发、推广及应用。生物能源作为来源广泛、用途多样并且环保的可再生能源将在全球经济社会发展中起着越来越重要的作用^[27]。生物液体燃料是生物质能源的重要组成部分,目前已经产业化的液体燃料包括燃料乙醇和生物柴油两种形式,是目前最主要的交通替代能源,具有可再生、清洁和安全等优点,是解决能源危机和保护生态环境的有效途径,已引起世界各国尤其是资源贫乏国家的高度重视。近 10 年来,全球生物液体燃料产业呈现出快速发展的态势,2007 年,我国《可再生能源中长期发展规划》提出的生物液体燃料发展目标是:到 2015 年,燃料乙醇产量达到 400 万吨,生物柴油产量达到 100 万吨^[28];到 2020 年,燃料乙醇产量达到 1000 万吨,生物柴油产量达到 200 万吨^[29]。然而,目前我国生物液体燃料生产水平距离 2020 年发展目标还有很大差距,尤其是燃料乙醇实际产量与目标产量的差距更为显著(图 1-1),因此,燃料乙醇产业仍是我国今后生物液体燃料发展的重点。

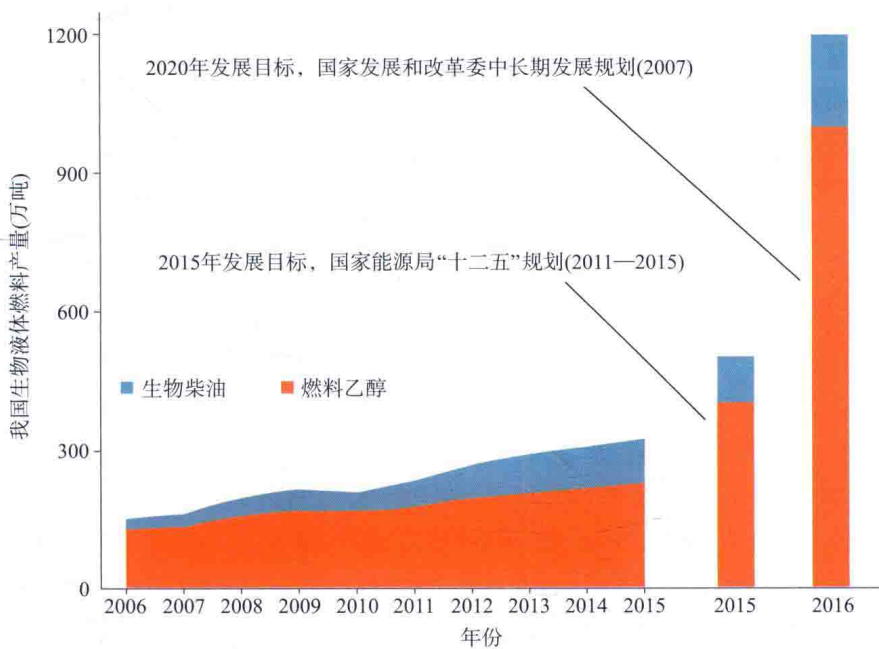


图 1-1 我国生物液体燃料产量及目标需求

燃料乙醇技术较为成熟的国家是多以玉米等粮食作物为生产原料的第 1 代生物液体燃料,2013 年美国燃料乙醇产量大约有 500 亿升,基本上都是以玉米为原料进行生产。而我国是典型的人口大国,人均耕地面积十分有限,因此,需要坚持“不与人争粮,不与粮争地”的原则,利用边际土地种植和发展木薯、黄连木、甜高粱等非粮能源植物(包括第 1.5 代及第 2 代生

物液体燃料)。目前我国燃料乙醇的生产仍有 90% 来自于玉米和小麦等粮食作物,因此以甜高粱茎秆和木薯等非粮作物为原料的燃料乙醇的规模化生产是满足我国可持续发展重要战略需求、缓解能源短缺与气候变化问题的必然途径。

我国生物燃料乙醇产业自 1999 年开始酝酿,2001 年起步,至今经历了粮食燃料乙醇到非粮燃料乙醇的转变。2001 年,我国启动“十五酒精能源计划”且要求在汽车运输行业推广使用燃料乙醇,同年,五部委颁布《陈化粮处理若干规定》确定陈化粮主要用于生产燃料乙醇、饲料等。2002 年,国家发布《车用乙醇汽油使用试点方案》和《车用乙醇汽油使用试点工作细则》,成为燃料乙醇推广应用的主要政策依据。2004 年,国家在“十五”期间批准建设了包括中粮生化旗下公司在内的 4 个燃料乙醇生产试点项目,企业生产燃料乙醇能获得高额补贴。2006 年,我国开始自主开发以甜高粱茎秆等为原料生产燃料乙醇的技术。2007 年,国家发展和改革委员会明确提出,不再利用粮食作为生物质能源的生产原料,要大力发展非粮作物的燃料乙醇生产。2011 年,多项政策方案指出,支持以木质纤维素和多种非粮原料生产燃料乙醇。2012 年初,财政部发布通知下调补贴标准,以粮食为原料的燃料乙醇补助标准为 500 元/吨,以木薯等非粮作物为原料的燃料乙醇补助标准为 750 元/吨。2014 年 4 月,财政部再次发布通知,下调以粮食为原料的生物燃料乙醇定点企业财政补贴。2014 年 11 月《生物燃料乙醇行业环境污染控制评价技术方法》(NB/T-10012-2014)开始实施,提出定量评价燃料乙醇企业污染控制水平的等级方法。2015 年《关于加快转变农业发展方式的意见》指出,要推进农业废弃物资源化利用,落实畜禽规模养殖环境影响评价制度,启动实施农业废弃物资源化利用示范工程。到 2015 年底,我国燃料乙醇产量为 243 万吨^[30]。

巴西是世界上最早开发燃料乙醇的国家,始于 20 世纪 20 年代。1925 年,巴西开展了第一次燃料乙醇汽车的距离测试。1933 年制定推动燃料乙醇发展的第 737 号法令。1973 年发生石油危机,1975 年巴西制定了“国家乙醇计划”,开启了乙醇替代石油之路,大大推动了燃料乙醇产业的发展,并在经济和环境方面带来了巨大的收益。巴西在燃料乙醇的大规模发展中形成了四个清楚的“里程碑”时期^[31]。阶段一是 1975—1979 年,由于 1973 年的石油危机以及全球糖价下跌,巴西政府选择了生产乙醇替代石油的发展之路。阶段二是 1979—1989 年,“国家乙醇计划”的实施达到高峰,财政和金融激励政策起到了重要的作用。阶段三是 1989—2000 年,1989 年,加油站的燃料乙醇出现短缺,专为燃料乙醇设计的汽车销量急剧下降,直到 2000 年,政府对燃料乙醇的整个支撑体系瓦解。阶段四是 2000 年至今,燃料乙醇开始重新使用。目前,巴西是第二大燃料乙醇生产国,以甘蔗为主要原料,约有 50% 的甘蔗用于生产燃料乙醇,燃料乙醇供应了其国内轻型乘用车 38% 的燃料需求,2011 年由于甘蔗的减产导致燃料乙醇产量降低,总产量为 1665.2 万吨,占世界总产量的 25%,较 2010 年下降了 19.5%。2013 年,巴西利用甘蔗生产的燃料乙醇产量提高了 18%。巴西目前正在开发蔗渣制燃料乙醇和新一代的含糖木薯制燃料乙醇技术,是该行业发展最为成熟的国家之一。

美国早在 20 世纪的 80 年代早期就开始了玉米乙醇的生产。1908 年,美国人设计并制造了世界上第一台纯乙醇的汽车,1930 年乙醇/汽油混合燃料在内布拉斯加州首次面市,1978 年,含 10% 乙醇的混合汽油在内布拉斯加州大规模使用。美国针对燃料乙醇的补贴政策也较早,为了应对海湾石油危机,减少对石油进口的依赖,鼓励燃料乙醇的使用,在 1978 年颁布了



《能源税收法案》，免除乙醇汽油 4 美分/加仑* 的消费税。美国国会在 1990 年通过了《空气清洁法修正案》，法案从环境保护的角度出发，强制使用含氧汽油及新配方汽油，至少有 20 个州对乙醇汽油给予了税收减免或财政补贴的优惠政策，法案的实施对燃料乙醇的推广起到了非常重要的政策支持^[32]。目前，美国是世界上最大的燃料乙醇生产国，2011 年占世界燃料乙醇的 62.2%，生产原料主要以玉米为主，美国 2011 年燃料乙醇消耗的玉米达 1.28 亿吨，相当于美国当年玉米总产量的 40% 左右，占全球玉米产量的 25%。2012 年夏天，美国发生了 56 年来最严重的干旱，玉米产量下降了 20%，导致美国燃料乙醇产量下降，第一次进口巴西燃料乙醇，美国目前正在努力发展第 2 代燃料乙醇，前景很好，但发展较为缓慢。

欧盟发展燃料乙醇的时间也相对较晚，于 1994 年通过决议决定开始发展生物能源，并给予生物燃料产品免税的优惠政策，以鼓励燃料乙醇的生产和使用。1993 年，燃料乙醇的产量为 4.8 万吨，到 1997 年仅有 5.6% 的乙醇生产用作燃料，直到 2001 年用作燃料的乙醇比例上升到了 13%。2006 年是欧盟燃料乙醇生产增幅较大的一年，达到 127 万吨，比 2005 年增加了 71%。其中贡献较大的几个国家分别为法国、德国、瑞典和西班牙等。2007 年 3 月，欧盟通过决议，设立了欧盟各成员国“在 2020 年前，实现生物燃料在交通能源消耗中的比例达到 10%”的目标^[33]。

印度是仅次于巴西的第二产糖大国，然而用于生产燃料乙醇的数量远远低于巴西。印度于 2002 年开始生产生物燃料，2003 年开始推广使用 E5 汽油（含 5% 燃料乙醇的汽油），并进一步实现将燃料乙醇比例提高到 10% 的目标^[34]。日本于 1986 年开始发展燃料乙醇，但是由于资源匮乏，不得不大量进口乙醇。为提高燃料乙醇的供应能力，日本正积极发展木屑、稻草等为原料的纤维素乙醇技术。日本环境省要求，到 2030 年日本国内车用汽油全部采用与生物燃料混合的燃料。阿根廷由于推出了汽车燃料中须混合 5% 的燃料乙醇的政策，其产量基本上翻了一倍。我国和加拿大也是重要的燃料乙醇生产方，产量分别为 20 亿升和 18 亿升。燃料乙醇发展的不确定因素主要体现在产品利润、原料价格及政策等方面。另外，还需要考虑到能源作物与粮食作物在土地与水资源方面的竞争以及能源生产的可持续性。即便如此，生物液体燃料仍有极大的需求空间^[35]。

1.2.2 非粮燃料乙醇发展驱动力分析

目前，世界各国能源需求仍旧以化石燃料为主，而随着能源危机和气候变化的加剧，全球正趋向于发展可再生能源，其中，生物质能源是可再生能源的一种。我国推广非粮燃料乙醇主要基于三个方面的因素：对能源安全的战略需求、对气候变化的关注和对粮食安全的考虑。

——确保能源供应是国家战略发展的重要需求，是生物液体燃料发展的第一个因素。减少能源价格波动和供给中断的冲击是多国的能源政策目标。包括燃料乙醇在内的生物质能源是实现能源供给多元化、降低对少数出口国依赖的主要途径，燃料乙醇是目前化石燃料的主要替代品之一，并且，燃料乙醇不会对当前交通运输技术和政策带来更加剧烈的变化。

全球变暖等气候变化是促进生物液体燃料发展的第二个因素。目前，温室气体排放量受到全球性关注，很少有人质疑在采取行动减少温室气体排放上的必要性，而且很多国家已经将

* 1 加仑 $\approx$ 3.785 升。

生物液体燃料等生物质能源作为重要内容纳入减缓气候变化的行动中。与化石燃料相比,生物质能源被认为在发电、供暖和交通运输方面具有巨大的减排潜力。

我国是粮食生产大国和人口大国,粮食既是关系国计民生和国家经济安全的重要战略物资,也是人民群众最基本的生活资料,粮食安全与社会和谐、政治稳定、经济持续发展息息相关。我国燃料乙醇生产早期主要以陈化粮为生产原料,2007年考虑到国家粮食安全,国家发展和改革委员会明确提出不再利用粮食作为生物质能源的生产原料,要大力发展非粮作物的燃料乙醇生产。在粮食安全相关政策的驱动下,以粮食为原料的燃料乙醇生产被迅速叫停,该因素也成为我国非粮燃料乙醇生产推广的重要驱动因素之一。

1.2.3 非粮燃料乙醇发展目标和政策

我国燃料乙醇产业化发展时间较晚,但速度较快。2000年开始推广乙醇汽油准备工作并制定了一系列相关政策法规,2001年,启动“十五酒精能源计划”且要求汽车运输行业中推广使用燃料乙醇,同时,国家有关部门制定并颁布了《变性燃料乙醇》(GB 18350-2001)、《车用乙醇汽油》(GB 18351-2001)等一系列国家标准^[36,37]。同年,我国五部委颁布的《陈化粮处理若干规定》中确定陈化粮的主要用途用于生产燃料乙醇、饲料等。2002年,国家发布《车用乙醇汽油使用试点方案》和《车用乙醇汽油使用试点工作细则》,这是目前我国燃料乙醇推广应用的主要政策依据。首次试点确定了河南省的郑州、洛阳、南阳和黑龙江省的哈尔滨、肇东5个城市进行车用乙醇汽油试用,到2004年,车用乙醇汽油的试点进一步扩大到河南、安徽、黑龙江、吉林、辽宁5省^[38]。

2004年,为解决陈化粮问题,国家在“十五”期间批准建设了包括中粮生化旗下公司在内的4个燃料乙醇生产试点项目,企业生产燃料乙醇能获得高额补贴,批准年生产能力102万吨。2005年6月我国15家工厂发酵酒精平均出厂价为4205元/吨,在酒精总产量中玉米酒精占48%,薯类酒精占33%,糖蜜酒精占19%。

2006年,我国燃料乙醇产量达300万吨左右,成为继巴西、美国之后的第三大燃料乙醇生产国。为了扩大燃料乙醇原料来源,我国已自主开发了以甜高粱茎秆为原料生产燃料乙醇的技术,并已在黑龙江、内蒙古、山东、新疆和天津等地开展了甜高粱的种植及燃料乙醇生产试点^[39,40]。同年,国家发展和改革委员会发布了《关于加强生物燃料乙醇项目建设管理,促进健康发展的通知》,要求对生物燃料乙醇项目实施核准制度,建设项目须经国家投资主管部门及财政部门核准^[41],同时指出,重点支持以薯类、甜高粱及纤维资源等非粮原料的燃料乙醇生产。为了规范市场秩序和投资行为,防止盲目建设和投资浪费,国家发展和改革委员会组织编制了《生物燃料乙醇及车用乙醇汽油“十一五”发展专项规划》和《生物燃料乙醇产业发展政策》,以指导生物燃料乙醇产业有序发展。财政部等五部委在2006年9月发布的《关于发展能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》中指出,发展生物质能源和生物化工产业实施风险基金制度及弹性亏损补贴机制,对该行业产业化技术示范企业予以补助^[42]。为了鼓励燃料乙醇的推广,国家对批准生产燃料乙醇的企业采取的优惠政策如下:免征用于调配车用乙醇汽油的变性燃料乙醇5%的消费税;企业生产调配车用乙醇汽油用变性燃料乙醇的增值税实行先征后返;企业生产调配车用乙醇汽油用变性燃料乙醇所使用的陈化粮享受陈化粮补贴政策;变性燃料乙醇生产和在调配、销售过程中发生的亏损实行定额补贴。



2007年,国家发展和改革委员会明确提出,不再利用粮食作为生物质能源的生产原料,要大力发展非粮作物的燃料乙醇生产。财政部关于《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》也明确表示重点扶持发展用甘薯、木薯、甜高粱等制取的燃料乙醇^[42]。农业部公布的《农业生物质能产业规划(2007—2015)》中提出了非常重要的“不与人争粮,不与粮征地”的原则^[43];立足农林废弃物和非粮原料,开拓耕地种植;缓解我国“三农”、能源和环境问题,促进资源节约和循环利用^[31]。2008年3月,国家发展和改革委员会公布的《可再生能源发展“十一五”规划》提出鼓励以甜高粱秆、薯类作物等非粮生物质为原料的燃料乙醇生产,积极建立燃料乙醇规模化试点项目,并明确提出到2010年,以非粮作物为原料的燃料乙醇的年生产能力要达到200万吨^[44]。

2011年11月我国发布的《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》表示在已开展纤维原料生产乙醇的基础上,推进秸秆纤维乙醇产业化,支持实力雄厚、具备研发生产基础的企业开展试点示范,重点解决预处理、转化酶等技术难题^[45]。同年12月,国家能源局发布《国家能源科技“十二五”规划》指出,计划在2016年前后完成多项与生物质开发相关的重大技术研究、重大技术装备、重大示范工程,2020年后建成生物液体燃料技术研发平台,开发以木质纤维素为原料生产乙醇、丁醇等液体燃料及适应多种非粮原料的先进生物燃料产业化关键技术^[46];国家发展和改革委员会发布《大宗固体废弃物综合利用实施方案》指出,推进秸秆固化成型、秸秆气化等可再生能源发展,加快秸秆纤维乙醇关键技术研发^[47]。

2012年初,财政部发布通知下调补贴标准,以粮食为原料的燃料乙醇补助标准为500元/吨,以木薯等非粮作物为原料的燃料乙醇补助标准为750元/吨。同年颁布的《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》指出加强下一代生物燃料开发,推进纤维素制乙醇、微藻生物柴油产业化,开展重点地区生物质资源详查评价,鼓励利用边际性土地和近海海洋种植能源作物和能源植物^[48]。同年,国家发展和改革委员会正式批复了山东龙力生物科技股份有限公司5万吨/年的纤维素燃料乙醇项目,使之成为国内唯一能够规模化生产二代纤维燃料乙醇并获得国家定点生产资格的企业。2012年8月,国家能源局发布《可再生能源发展“十二五”规划》指出,要合理开发盐碱地、荒草地、山坡等边际性土地,建设非粮生物质资源供应基地,稳步发展生物液体燃料,支持建设具备条件的木薯乙醇、甜高粱茎秆乙醇、纤维素乙醇等项目,推进以农林剩余物为主要原料的纤维素乙醇和生物质热化学转化制备液体燃料示范工程^[49]。2013年1月,国务院发布《能源发展“十二五”规划》,表示有序开发生物质能,以非粮燃料乙醇和生物柴油为重点,加快发展生物液体燃料,因地制宜利用农作物秸秆、林业剩余物发展生物质发电、气化和固体成型燃料^[50]。

2014年4月,财政部发布《关于调整定点企业生物燃料乙醇财政政策的通知》(财建【2014】91号),将以粮食为原料的生物燃料乙醇定点企业财政补贴政策调整为2013年300元/吨、2014年200元/吨、2015年100元/吨,2016年不再给予补助,与此同时,自2015年1月1日起国家将取消变性燃料乙醇定点企业的增值税先征后退政策,以粮食为原料生产的变性燃料乙醇也将恢复征收5%的消费税。2009—2016年我国对以粮食为原料的燃料乙醇补助情况见表1-1。