

庄大方 江东 刘磊 / 著

能源植物发展潜力 遥感信息 获取与评价

能源植物发展潜力遥感信息 获取与评价

庄大方 江 东 刘 磊 著

内容简介

基于能源植物的生物能源将在未来的能源供应中占据越来越重要的地位。近年来能源植物越来越为人们所关注。充分合理地利用宜能边际土地资源,适度发展高产能源作物,开发生物质液体燃料,是应对化石能源枯竭和发展替代能源的有效途径。近年来对能源植物资源潜力及空间分布的评价已成为本领域的研究热点。我国由于耕地资源极其有限,因此必须依赖边际土地来发展生物能源。

本书介绍了能源植物发展的背景、需求和国内外研究进展;分析了能源植物发展潜力遥感信息获取的技术方法;重点阐述了在遥感、GIS 技术支持下,充分考虑能源植物规模化开发利用的自然限制要素和社会经济限制要素,构建多要素综合评估模型的技术思路,包括土地资源潜力、净能量潜力和净环境效益。以我国全国和重点区域为例,估算了发展主要能源植物的土地资源规模、分布及发展的潜力,为政府制定产业政策和相关科学研究提供了基础数据支持。

图书在版编目(CIP)数据

能源植物发展潜力遥感信息获取与评价/庄大方,江东,刘磊著.

北京:气象出版社,2013.6

ISBN 978-7-5029-5731-5

I. ①能… II. ①庄… ②江… ③刘… III. ①遥感技术-应用-生物能源-植物-信息获取 ②遥感技术-应用-生物能源-植物-信息技术-评价 IV. ①S56-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 124827 号

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

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:商学东

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

字 数:220 千字

版 次:2013 年 6 月第 1 版

定 价:35.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:8.25

彩 插:22

印 次:2013 年 6 月第 1 次印刷

前 言

生物能源是指通过生物的活动,将生物质、水或其他无机物转化为沼气、氢气等可燃气体或乙醇、油脂类可燃液体为载体的能源。生物能源具有安全环保、来源广泛及用途广等优点,成为最有希望的石油替代能源之一,是仅次于煤炭、石油和天然气而居于世界能源消费总量第四位的能源,在整个能源系统中占有重要地位,在煤炭、石油和天然气等不可再生能源日益枯竭的当今,作为可再生能源的生物质能源将在全球经济社会发展中起着越来越重要的作用。以植物为主的再生生物质能源受到有关国际机构、政府或非政府组织及科学界的高度关注,直接能代替石油的烃类和油脂类植物的开发利用,已成为当今国际上的一大热点。我国也同样面临着不可再生能源短缺的巨大挑战,能源资源短缺问题已成为关系到国家安全和发展的全局性问题。加强可再生生物质能源的研发与生产是我国能源可持续发展的重要战略之一,当前的重要任务之一是根据我国国情,选择适合各地区不同环境条件的能源植物,遵循并坚持“不与粮争地,不与粮争粮”的原则,最大效率地利用宜能边际土地资源,开展能源植物的规模化种植。

充分合理地利用宜能边际土地资源,适度发展高产能源作物,开发生物质液体燃料,是应对化石能源枯竭和发展替代能源的有效途径。近年来对能源植物资源潜力及空间分布的评价已成为本领域的研究热点。中国科学院资源环境科学数据中心在国家相关科研项目支持下,在能源植物数据获取与信息分析等方面开展了大量的研发工作。本书凝练近年来的系列研究成果,在国内外可再生能源遥感应应用理论方法最新成果的基础上,以我国主要能源植物为研究对象,分析能源植物的生态适宜性特征,在遥感、GIS技术支持下,充分考虑能源植物规模化开发利用的自然限制要素和社会经济限制要素,构建了多要素综合评估模型,估算了中国适宜不同能源植物生长的边际土地资源规模、分布及发展生物柴油的潜力,为政府制定产业政策和相关科学研究提供了基础数据支持。

本书的研究内容涵盖了能源植物规模化开发利用遥感应应用各个关键环节,形成了能源植物发展潜力遥感信息获取与评价的完整的技术体系,同时以大量翔实的应用实例,既阐述了理论方法的精度和合理性,同时为广大业务应用部门的技术人员提供了可参照的技术方法,具有很强的针对性和实用性。

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,由庄大方撰写;第一章主要介绍了能源植物发展潜力研究进展,由庄大方撰写;第二章阐述了能源植物发展关键要素的遥感信息获取方法,主要由江东撰写;第三章详细叙述了能源植物发展的土地资源潜力分析与评价,由黄耀欢、路璐、付晶莹、郝蒙蒙撰写;第四章全面介绍了能

源植物规模化发展的净能源和环境效益分析,由刘磊、徐新良、于信芳撰写;第五章介绍了能源植物规模化发展潜力综合分析,并提供了多尺度的应用案例,由王亚欣、刘磊、傅新宇撰写。庄大方研究员还承担了全书总体思路和体例的设计、指导工作。

新一代对地观测技术支持下的能源植物资源潜力及空间分布研究是一个新颖而充满挑战的领域,国内外在该领域的积淀相对薄弱,受问题复杂性、时间和作者水平的限制,书中所描述的难免会有许多片面、疏漏之处,希望能在广大读者的帮助下不断改进。

作 者

2013年3月

目 录

前 言

第 1 章 能源植物发展潜力研究进展	(1)
1.1 能源植物开发利用的需求分析	(1)
1.2 能源植物开发利用的国内外现状	(3)
1.3 能源植物发展潜力的研究动态	(11)
第 2 章 能源植物发展关键要素的遥感信息获取	(16)
2.1 能源植物发展的环境要素分析	(16)
2.2 宜能边际土地资源遥感自动识别	(17)
2.3 植被类型信息的遥感获取	(25)
2.4 地表水热参数遥感反演	(42)
第 3 章 能源植物发展的土地资源潜力分析与评价	(46)
3.1 适宜能源植物发展的土地资源潜力评价方法	(46)
3.2 我国适宜生物能源作物发展的土地资源潜力评价	(47)
3.3 典型能源植物的土地资源潜力分析	(50)
3.4 重点地区宜能土地资源潜力及空间分布	(58)
第 4 章 能源植物规模化发展的净能源和环境效益分析	(64)
4.1 生物液体燃料生命周期净能量平衡模型	(64)
4.2 生物液体燃料生命周期净排放模型	(71)
4.3 空间信息支持下的生物液体燃料生命周期分析——以黄连木为例	(78)
第 5 章 能源植物发展潜力分析及应用案例	(85)
5.1 西南五省(区、市)能源植物发展潜力分析	(85)
5.2 长江中下游地区冬闲田生物能源发展潜力研究	(93)
5.3 我国能源植物发展潜力分析与综合布局	(111)
参考文献	(117)

第1章 能源植物发展潜力研究进展

1.1 能源植物开发利用的需求分析

生物能源是指通过生物的活动,将生物质、水或其他无机物转化为沼气、氢气等可燃气体或乙醇、油脂类可燃液体为载体的能源。目前,生物制氢、乙醇发酵、生物柴油和沼气发酵是生物能源转化的重要途径。生物能源具有安全环保、来源广泛及用途广等优点,成为最有希望的石油替代能源之一。面对日益严峻的能源资源、能源环境和能源安全形势,世界各国在调整本国能源发展战略中,将高效开发利用生物能源摆在了重要地位,制定了相应的研究开发计划,如美国的能源农场、日本的新阳光计划、印度的绿色能源工程和巴西的乙醇能源计划等。目前,生物质能是仅次于煤炭、石油和天然气而居于世界能源消费总量第四位的能源,在整个能源系统中占有重要地位,在煤炭、石油和天然气等不可再生能源日益枯竭的当今,作为可再生能源的生物质能源将在全球经济社会发展中起着越来越重要的作用。以植物为主的再生生物质能源目前受到有关国际机构、政府或非政府组织以及科学界的高度关注,直接能代替石油的烃类和油脂类植物的开发利用已成为当今国际上的一大热点。我国也同样面临着不可再生能源短缺的巨大挑战,能源资源短缺问题已成为关系到国家安全和发展的全局性问题。加强可再生生物质能源的研发与生产是我国能源可持续发展重要战略之一,而开展能源植物的规模化种植,是我国生物质能源发展的前提。根据我国国情,选择适合各地区不同环境条件的能源植物,坚持“不与粮争地,不与人争粮”,必须最大效率地利用宜能边际土地资源,开展能源植物的规模化种植。

利用非耕地、盐碱地等边际土地种植能源植物是我国生物质能源产业发展的一条重要途径。目前,我国水土流失面积占国土面积的37%,森林覆盖率为16.55%,低于世界29.6%的平均水平,且林龄结构不合理,生态系统的服务功能较低。“十五”期间社会经济快速发展,加之农业结构调整,全国耕地面积净减少616.0万 hm^2 ,年均净减少耕地123.2万 hm^2 。同时,我国却有近1亿 hm^2 的荒山荒地及边际土地没有得到有效利用。面对人口众多、人均耕地面积少的现状,坚持“不与民争粮,不与粮争地”是我国生物质能源产业发展的基本原则,开发利用非耕地、盐碱地等边际土地资源,并结合生态恢复开发能源植物,是由我国国情所决定的能源植物产业发展的根本策略。

我国生物质资源非常丰富,但利用率却十分低下,而且主要作为初级能源在农村被利用,生物质能利用效率还有很大的提升空间。因此,通过对我国已有规模化种植的重要能源植物如甜高粱、麻疯树、油桐树等规模化种植的水土光热条件需求、自然生态环境影响、经济和能源效益进行综合评价,对土地开发利用进行合理规划,尽可能利用边际土地资源,在此基础上探索具有全面可持续性的能源植物高效种植基地发展模式,促进我国能源植物产业健康持续发展。

展,具有广阔的应用前景。

持续、稳定的能源资源供应是国家建立新能源规划、相关企业投资建厂的基础,针对国家大规模发展生物质能资源等新能源的迫切需求,亟须对能源资源空间分布及开发潜力进行高精度的评估,建立长时间序列、多空间分辨率且标准化的清洁能源资源分布及开发潜力数据集,为生物能源资源开发利用发展规划提供科学数据支持。虽然目前国内已有一些部门开展了清洁能源潜力的研究,但这些数据大多分布在各个部门,数据在内容、格式和类型上不一致,限制了其在政府规划决策、企业选址等方面的应用。因此,亟需对这些数据进行标准化处理、集成、整合,以实现数据的增值,为各类用户提供信息服务。

能源分布具有时间和空间上的分异性。利用遥感和地理信息系统技术对能源植物资源分布状况和发展潜力进行信息获取和分析,获得中国潜在生物质能资源空间分布及开发潜力数据,从而可以为不同用户需求提供相应的数据,包括为可再生能源产业的进一步发展和可再生能源产业链的进一步完善提供数据支持,还可以为可再生能源资源开发优化、高精度选址提供新方法。

由于国家对可再生能源的重视,一些地方和部门争先恐后地发展和种植能源植物,一方面对推动生物质能的发展具有积极的意义,但同时存在一定的盲目性,缺乏系统的生态环境及经济效益、能源性状的评估,并将影响生物质能源产业的健康发展,部分专家及产业界人士甚至提出了盲目开发生物质能源将导致新的环保灾难的观点。我国的土地荒漠化、水土流失、污染等问题十分严重,开发培育适合的能源作物,有效地利用退化、退耕和不宜农荒地,如在西部干旱地区发展多年生草本能源作物、在丘陵山地栽植多年生木本油料作物,这都能有效地减轻土壤侵蚀、防止水土流失,在发展我国生物质能源产业的同时,对改善我国的生态环境也具有极为重要的意义。

中国是世界生物能源主要生产国之一,2011年生物液体燃料总产量居世界第五位^[1]。中国政府在20世纪90年代便启动了一系列生物液体燃料技术研发项目,到21世纪初期,政府投资50亿元,建立了4家以陈化粮为主要原料的燃料乙醇加工厂。随后又相继颁布了《可再生能源法》,用以指导我国生物液体燃料产业发展。由于我国耕地资源稀缺这一国情,以粮食作物发展生物能源并不现实,因此国家发改委于2009年编制了《可再生能源中长期发展规划》,明确了我国生物能源发展以黄连木、麻疯树、木薯、菊芋等非粮作物为主。根据《可再生能源中长期发展规划》制定的到2020年生物液体燃料的发展目标,国家将发展以非粮生物质为原料的液体燃料,到2020年,形成年替代1000万吨石油的能力。因此,开发新的可再生能源以替代化石能源是我国社会可持续发展的重大需求。

然而,虽然我国政府已经制定了生物液体燃料发展规划并开始着手实施,各省也都纷纷制定各自的生物液体燃料发展目标,各地都开始着手建立原料基地,生物液体燃料生产厂也纷纷上马,但对于生物能源的原料供给潜力却存在很大的不确定性,主要表现在我国到底有多少土地资源可用于发展,这些土地资源的质量、目前的利用状况及分布情况如何等问题尚不明确。其中存在的主要问题为:①生物液体燃料生命周期的能源效率和环境效应如何;②发展生物液体燃料造成的土地利用变化对环境的影响状况如何;③发展生物液体燃料对环境的综合影响如何;④如何最优利用现有土地资源潜力发展生物液体燃料。这些问题都是目前亟须解决的问题。

因此,为了促进我国生物能源产业科学、持续地发展,本研究在分析现阶段存在的问题

的基础上,重点针对目前最为重要的如下两个方面的科学问题进行研究:①宜能边际土地资源界定标准制定、我国宜能边际土地资源潜力及空间分布;②我国主要能源植物的适宜性及发展潜力。

1.2 能源植物开发利用的国内外现状

目前,生物液体燃料产业发展迅速,相关研究急剧增加,重点关注的领域包括生物液体燃料发展的能量替代潜力、规模化发展的环境效应及可持续发展模式等。本章首先分析生物液体燃料迅速发展的原因;然后对生物液体燃料相关研究进行回顾;对国内外生物液体燃料发展现状及相关政策进行分析;最后,对已有研究存在的亟须解决的问题进行分析。

1.2.1 生物液体燃料产业迅速发展的原因

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;生物柴油则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^[2]。

根据生物液体燃料生产所采用的原料与技术不同,又可以分为第1代、第1.5代和第2代生物液体燃料。其中,第1代生物液体燃料主要是指以玉米等粮食作物为原料生产的生物液体燃料,目前技术较成熟^[3]。第1.5代生物液体燃料主要是指以麻疯树、黄连木、光皮树、文冠果、木薯等非粮作物为原料所生产的生物液体燃料,包括林业生物柴油和燃料乙醇,其生产技术相对较成熟,同时其发展对社会经济与环境等方面产生的负面影响更小^[2]。第2代生物液体燃料主要是指以纤维素(林业、农作物残余)和“工程海藻”等为原料所生产的生物液体燃料,其可以减少净碳排放、增加能源利用效率,目前该技术尚处于实验室研究阶段^[3]。

近年来,与气候变化相关的环境问题、化石能源日渐枯竭、石油价格上涨及国家能源安全等问题的日益加剧,使得生物液体燃料的重要性日益凸显。推动生物液体燃料产业在全球范围内迅速发展的原因主要有以下几点。

(1)减少温室气体排放。气候变化是各国共同面临的严峻挑战,不仅对大多数自然生态系统带来了威胁,而且严重影响人类生活^[4,5]。研究表明,大气中85%的硫、75%的二氧化碳来源于化石燃料的燃烧^[6]。而交通运输所排放的温室气体约占温室气体总量的21%^[3]。减少化石能源消耗所产生的温室气体已成为各国实现减排目标的重要手段。

(2)满足能源需求。能源是世界经济的命脉和社会发展的动力,也是现代社会赖以生存和发展的基础,全球不断增加的能源需求已成为21世纪人类社会所面临的重大挑战。自19世纪以来,以石油、煤和天然气为主体的化石燃料为世界提供了约90%的能源,随着世界经济和人类文明不断发展,对能源的需求日益增加,传统的化石能源的储量渐近枯竭。生物液体燃料作为生物质能源重要的组成部分,日益受到有关国际机构、政府或非政府组织及科学界的高度关注,其开发利用已成为当今国际上的一大热点^[5,7-9]。

(3)保障国家能源安全。随着全球经济的快速发展,各国对石油的需求量逐年增加,不可再生能源短缺的压力越来越大。全球石油价格从2004年的每桶40美元迅速增长到2007年

底的每桶近 100 美元,到 2008 年上半年甚至达到每桶近 140 美元,虽然到 2010 年受金融危机等多种因素影响回落到每桶 80 美元左右,但总体仍保持在较高的价格水平。同时,盛产石油的中东是世界上最不稳定的地区之一。因此,发展新型能源不但对我国国民经济的发展有重要的推动作用,而且已成为我国国家安全必须考虑的问题^[8]。

1.2.2 全球生物液体燃料发展现状

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。美国和巴西是世界上最大的燃料乙醇生产国,其中美国以玉米为主要原料,巴西以甘蔗为主要原料;欧盟是生物柴油的最大生产商,以油菜籽为主要生产原料。同时,虽然第 2 代生物液体燃料还未开始商业化生产,但欧盟、美国、加拿大及中国、印度、泰国等国家都投资进行了相关研究并建立生产厂进行试验生产^[10]。

图 1-1 和图 1-2 分别为全球生物液体燃料(包括燃料乙醇和生物柴油)发展动态和 2009 年世界主要国家和地区生物液体燃料产量情况。

由图 1-1 可得出,全球生物液体燃料发展具有以下特点。

(1)进入 21 世纪以来,由于石油价格的持续上涨,生物液体燃料飞速发展,特别是 2004 年之后,燃料乙醇和生物柴油的发展速度都明显提升。2000 年,全球燃料乙醇和生物柴油生产总量分别为 180 亿升和 9 亿升,到 2009 年,全球燃料乙醇和生物柴油产量分别达到 760 亿升和 170 亿升,年均增长分别为 64.4 亿升和 17.9 亿升,年均增长率分别为 17.4% 和 38.6%;2004—2009 年期间,全球燃料乙醇和生物柴油的年均增长量分别为 90 亿升和 29.8 亿升,年均增长率分别为 19.6% 和 51.9%。数据表明,受国际石油危机影响,2004 年之后全球生物液体燃料产业发展明显提速。

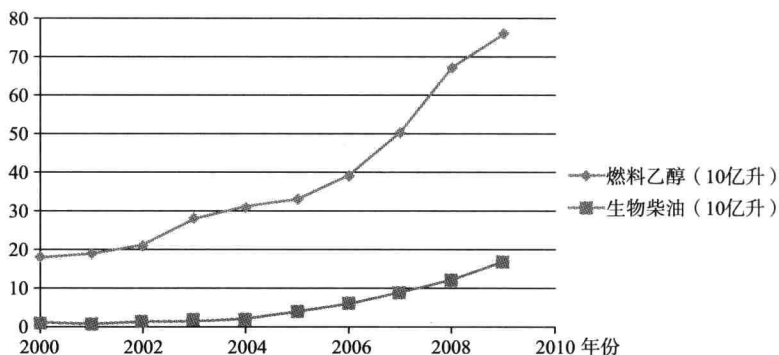


图 1-1 全球生物液体燃料发展动态^[10]

(2)燃料乙醇发展规模大于生物柴油,但生物柴油发展速度更快。2000 年全球燃料乙醇生产总量为 180 亿升,而生物柴油产量仅 9 亿升。到 2009 年,全球燃料乙醇和生物柴油产量分别为 760 亿升和 170 亿升,分别占全球生物液体燃料总产量的 81.7% 和 18.3%^[10]。虽然绝对产量上生物柴油远少于燃料乙醇,但生物柴油相对增长速度要快于燃料乙醇。2000—2009 年全球燃料乙醇年增长率为 17.4%,而生物柴油年增长率为 38.6%,特别是 2004 年之后,燃料乙醇的年增长率为 19.6%,生物柴油的年增长率达到 51.9%。

同时,由于现有的燃料乙醇产业主要以玉米和甘蔗为原料,在很大程度上受国际粮食安全

的影响,由于国际粮食价格和蔗糖价格的大幅上涨,未来的生物液体燃料发展将以非粮食为原料为主。

从全球生物液体燃料生产的地区分布来看,美国和巴西仍是最主要的燃料乙醇生产国,而欧盟则是生物柴油的生产中心(图 1-2)。2009 年全球燃料乙醇总产量为 760 亿升,其中美国和巴西两国的产量分别为 410 亿升和 260 亿升,占全球总产量的 53.9%和 34.2%;2009 年全球生物柴油总产量为 170 亿升,欧盟的产量为 89 亿升,占全球总产量的 52.4%,美国的生物柴油产量为 21 亿升,占全球总产量的 12.4%。

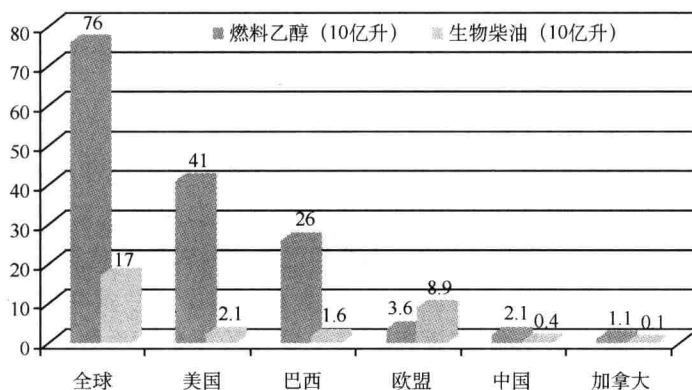


图 1-2 2009 年全球主要国家和地区生物液体燃料产量^[10]

我国的生物液体燃料产业在近年也快速发展,燃料乙醇由 2005 年的 10 亿升增长到 2009 年的 21 亿升,生物柴油则由 2006 年的 0.7 亿升增长到 2009 年的 4 亿升(图 1-3)。同时,我国还制定了相应的生物液体燃料发展规划,在未来几年我国的生物液体燃料产业规模还将迅速扩大。

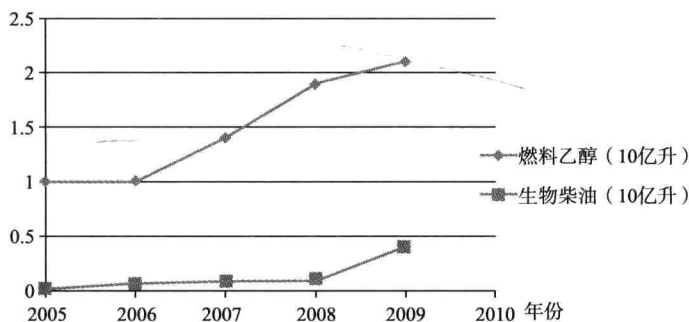


图 1-3 我国生物液体燃料发展动态^[10]

1.2.3 生物液体燃料发展相关研究现状

受石油价格上涨等多种因素影响,近几年生物液体燃料相关研究快速发展,相关文献主要围绕生物液体燃料原料作物生物学特性及作物培育技术、生物液体燃料的提炼技术与理化性状分析、生物液体燃料的燃烧与排放试验、生物液体燃料发展的理论潜力分析等方向开展。而针对生物液体燃料发展所适宜的土地潜力、生命周期净环境效应等方面的实证研究较少,对生物液体燃料发展的净能量生产潜力等的研究也几乎处于空白。本小节将分别针对生物液体燃料的两大组成部分——林业生物柴油和生物燃料乙醇进行介绍,重点对其发展相关的研究进行回顾。

1.2.3.1 林业生物柴油发展相关研究

1) 林业生物柴油原料选择与培育相关研究

(1) 国外相关研究

美国加利福尼亚大学化学博士卡尔文在巴西发现,利用苦配巴树生产的生物柴油可以直接在柴油机上使用,之后他于1986年在加利福尼亚州种植了大面积的石油植物获得成功,由此在全球掀起了一股开发研究石油植物的浪潮^[11]。

经研究发现,有多达数百种树种可用于生产生物柴油,黄连木、麻疯树、棕榈树、绿玉树、续随子、光皮树、文冠果、油桐等树种由于种籽含油率高,具有较好的开发利用前景。其中,被认为最具发展潜力的原料树种为黄连木和麻疯树^[2,8,11]。

麻疯树(*Jatropha curcas*)又名黄肿树、芙蓉树、亮桐等,为大戟科麻疯树属植物,主要分布于热带和亚热带地区,种植面积广,资源非常丰富,具有较强的环境适应性,被称为“生态先锋树种”,具有广泛的开发利用前景^[12]。麻疯树原产于南美洲热带地区,大致适宜分布范围为30°N~35°S,非洲的莫桑比克、赞比亚等国,美洲的巴西、斐济、洪都拉斯、牙买加、巴拿马、波多黎各、萨尔瓦多及美国佛罗里达的奥兰多地区,澳大利亚的昆士兰及北澳地区,以及亚洲的印度、巴基斯坦都有分布,其中以非洲、东南亚热带干旱地区分布最为集中。在我国主要集中分布于广东、广西、云南、四川、贵州、台湾、海南等省区^[12]。麻疯树树高2~5 m,结实期为20~30年,种籽含油率30%~40%,植株含有毒蛋白,近年来发现其种子还有显著的抗癌活性,且在工业用油、生物病虫害防治、新药开发等方面也有着潜在的应用价值^[2,11,12]。对麻疯树的开发最早始于20世纪80年代,由德国技术合作公司(GTZ)、联合国开发计划署(UNDP)、联合国工业发展组织(UNIDO)等组织机构在马里、坦桑尼亚、津巴布韦等非洲国家开展了“麻疯树综合开发计划(*Jatropha System*)”^[2]。据 Openshaw,津巴布韦农业研究机构(Agricultural Research Trust, ART)已经对不同品种、无毒麻疯树的生物学特性及副产品综合利用进行了研究^[13]。很多学者都针对麻疯树的生物学特性、种籽含油率、综合利用价值等方面进行了系统分析,为麻疯树资源利用提供了指导^[13,14]。

黄连木(*Pistacia chinensis*)属漆树科黄连木属,为木本油料及用材树种,种籽含油率在40%以上。黄连木分布广,耐干旱、盐碱、贫瘠,适宜性强^[8]。国外学者对黄连木研究较少。Dunn 等对黄连木的生长特性及培育技术进行了研究^[15]。

(2) 国内相关研究

我国能源油料作物十分丰富。我国现已查明的能源油料植物(种子植物)种类为151科697属1553种,占全国种子植物的5%;其中油脂植物138科1174种。虽然我国含油植物种类丰富、分布范围广、适应性强,但在地区分布上差异亦很大,可用作建立规模化生物质燃料油原料基地的乔灌木种却不足30种,分布集中成片可建作原料基地,并能利用荒山、沙地等宜林地进行造林建立起规模化的良种供应基地的生物质燃料油植物则仅有10种左右。其中,麻疯树、黄连木、文冠果、光皮树、续随子等树种由于开发前景较好,被列为我国林业生物柴油重点原料树种^[2,8]。

我国的林业生物柴油研究、试验始于20世纪80年代。从20世纪80年代初开始,中国科学院昆明植物研究所、四川省林业科学研究院、湖南省林业科学研究院等单位相继开展了林业生物柴油原料树种资源调查、人工种植试验、生物柴油加工及应用等试验,对主要油料树种引

种、栽培、生物柴油制备等关键技术进行了研究,为今后的研究奠定了基础^[2]。进入21世纪,随着林业生物柴油产业的不断升温,林业生物柴油相关研究也逐渐深入。2005年,由中国林业科学研究院王涛院士领导的团队完成了对我国主要林业生物柴油原料树种资源及其分布情况的调查,基本查明了我国主要生物柴油原料树种的分布、生物学特性及利用潜力^[8]。2006年,云南省林业厅完成了云南省麻疯树种质资源和土地资源潜力调查,并对优良品种进行了初步选育^[2]。

另外,国内许多研究机构也开始对我国主要林业生物柴油原料树种进行研究,取得了很多有益的成果。许多学者对黄连木、麻疯树等树种在我国的地理分布及生境特征进行了分析,为能源林种植区划奠定了基础^[16-21]。更多的学者集中对原料树种的栽培、选育进行了研究^[22-25]。2006年,广西宇鑫生物科技有限公司成功培育出“优选3号”麻疯树品种,该品种具有适应性广、生命力强、生长迅速,当年移栽便可以开花结果、一年可开花结果5次以上,高产、高油等特点。四川大学也选育出了两个麻疯树油料品种——高油1号和高毒1号,中国科学院西双版纳热带植物园成功培育出麻疯树变异新品种皱叶黑膏桐^[2]。同时,也有学者从基因转化角度研究了麻疯树品种改良,为今后良种优选、规模化种植提供了基础^[26]。

2) 林业生物柴油加工技术及其应用相关研究

(1) 国外相关研究

早在1896年德国热机工程师Rudolph Diesel便以花生油为燃料经10多年反复试验,试制成功压力点火内燃机——柴油机^[27,28]。然而由于植物油黏度较高,易导致发动机故障,便逐渐被矿物燃料柴油(diesel fuel)所取代。但柴油却也存在很多问题,如柴油机尾气含有过量的有毒气体和颗粒,包括硫、挥发性有机化合物、氮的氧化物和煤烟等^[28]。真正的生物柴油开发与利用研究到20世纪80年代才开始,由于受第一次石油危机影响,世界各国纷纷开展替代能源的研究,生物柴油的提炼技术也越来越受重视^[27]。最初的试验通常是将生物柴油直接使用或与常规柴油混合使用,由于生物柴油黏度高,易导致发动机故障^[28]。

通过研究发现,将生物柴油转化成其脂类,液体黏度大大降低,可以提高燃料的性能。很多学者对生物柴油生产流程,以及以橡胶树、麻疯树、大豆等为原料作物生产的生物柴油中含有的游离脂肪酸含量、处理后含量、能源转化效率等进行了系统分析,其中酯化法生产生物柴油是目前研究最多的方法^[14,29,30]。还有学者对麻疯树属的几种树种或不同国家和地区的麻疯树生产的生物柴油的成分进行了比较^[31,32]。以酯化法生产的生物柴油,可以直接在现有的柴油机上使用,生物柴油的质量能达到欧洲EN14214标准,而且其排放特性要优于普通化石柴油。

国外很多企业也开始实施生物柴油商业化生产,例如,2003年德国Daimler Chrysler公司投资170万欧元,用于印度“麻疯树生物柴油发展计划”的相关研究与开发;2003年,英国D1 oil生物柴油公司与埃及政府合作,在埃及种植近5000 hm²麻疯树,发展生物柴油生产;2007年,英国NRG Chemical Engineering Pte公司与菲律宾国家石油公司签订了13亿美元的合资合同,准备建立一个生物柴油加工厂和两个生物乙醇加工厂,发展生物柴油和生物乙醇生产^[2]。

(2) 国内相关研究

我国学者最早在20世纪80年代便开始尝试用生物柴油替代化石柴油在小型柴油机上进行燃烧试验^[33,34]。

进入 21 世纪,随着生物柴油相关研究的升温,我国学者也开始着手生物柴油加工技术的研究。目前,主要的生物柴油生产方法共有 4 种:直接使用或与常规柴油混合、微乳法、热解法、酯化法,其中酯化法又分为使用催化剂和不使用催化剂两种,详见表 1-1。目前,国内学者研究最多的是酯化法^[35-40]。

表 1-1 生物柴油的生产方法比较^[28]

原料	生产方法	优缺点
植物油	直接使用或与常规柴油混合	优点:液态、轻便,可再生,热值高
		缺点:高黏度、易变质、不完全燃烧
植物油	微乳	有助于充分燃烧,可与其他方法结合使用
植物油和动物脂肪	热解	高温下进行,需要常规的化学催化剂,反应产物难以控制,设备昂贵
植物油或动物脂肪和醇类	碱催化的酯交换反应	高附加值副产物甘油,反应速率比酸催化快;但剩余碱时有皂生成,堵塞管道,需进行后处理,工艺流程相对复杂
	酸催化的酯交换反应	油脂中游离脂肪酸和水的含量高时催化效果比碱好,原料价格相对低廉;但催化速度慢,且需要过量的醇,影响催化剂和产品的分离、纯化
	脂肪酶催化的酯交换反应	游离脂肪酸和水的含量对反应无影响,相对清洁;但酶价格偏高,且易失活,反应时间较长
	超临界反应酯化	改善了酯交换反应中的流体传质和反应动力学性能,避免了游离脂肪酸和水的影响,同时极大地缩短了反应时间;但反应条件相对苛刻,且高温高压本身能耗过大

有学者对微波和超声波诱导萃取技术、超临界萃取技术进行了研究^[41,42],也有学者对溶剂浸取法和微生物发酵法进行了研究^[43,44],这些研究为更好地开发利用国内现有的油料资源及改进萃取麻疯树籽油技术提供了有益的参考。

由于目前制取的生物柴油在 40℃时动力黏度为 4~6,黏度仍然偏高,必然对燃料的流动性有影响,且燃烧中积炭及润滑油污染问题难以解决^[45]。因此,已有学者着手研究柴油降凝剂和乙醇对生物柴油低温流动性的影响,结果表明,BJN-B 降凝剂和乙醇能够有效降低黄连木生物柴油的凝点、倾点和冷滤点^[46]。

同时,我国还通过引进国外技术的方式建立生物柴油生产企业,推动生物柴油产业化发展。据不完全统计,我国生物柴油产量按厂家设计规模已达 300 万吨以上,具体厂家见表 1-2。随着这些企业的建成投产,标志着我国生物柴油产业迈入了商业化发展时期。国家税务总局关于生物柴油征收消费税问题的批复(2006 年 12 月 6 日国税函[2006]1183 号),根据《汽油、柴油消费税征收范围注释》(国税发[1998]192 号)的规定,对这些企业实行免税的鼓励政策。然而,与设计规模相比,我国生物柴油的实际生产能力要逊色很多,估计年产不超过 20 万吨,主要是受原料供给限制较大^[47]。

表 1-2 生物柴油生产厂家及设计规模^[47]

生物柴油生产厂家	设计规模(10 ⁴ t/a)
福建龙岩卓越新能源发展有限公司	5
江苏清江生物能源公司	75
安徽国风生物能源公司	60
甘肃华城公司	50

续表

生物柴油生产厂家	设计规模(10 ⁴ t/a)
天宏(通辽)生物能源科技有限公司	50
江苏南通奥地利碧路生物能源生产贸易有限公司	25
洛阳天昌生物工程有限公司	10
无锡华宏生物燃料有限公司	10
四川中海油基地公司	10
四川古杉油脂化学有限公司	17
河北中天明公司	10
河北东安实业有限公司	10
呼伦贝尔金骄生物质化工有限公司	5
海南正和生物能源有限公司	4
江苏强林生物能源公司	3
贵州中水能源发展有限公司	2

另外,国家为了推动生物柴油生产技术的发展,先后启动了一系列科研项目,如 2004 年科技部高新技术和产业化司启动的“十五”国家科技攻关计划“生物燃料油技术开发”项目、2005 年启动的国家 863 项目“生物能源技术开发与产业化”项目、2008 年启动的“西南地区麻疯树良种选育与规模化培育综合利用关键技术研究示范”项目,这些项目的开展极大地推动了我国生物柴油生产加工技术的发展。

1.2.3.2 燃料乙醇发展相关研究

1)燃料乙醇原料选择与培育相关研究

(1)国外相关研究

巴西是世界上最早开发燃料乙醇的国家,也是目前该产业发展最为成熟的国家。作为一个贫油国家,巴西不但在全国范围内供应车用乙醇汽油,而且又成功地将乙醇燃料应用于航空领域。巴西自然条件优越,甘蔗资源丰富,燃料乙醇生产主要以甘蔗为原料。同时,巴西也在积极探索利用植物纤维素生产燃料乙醇的新技术。

作为全球最大的燃料乙醇生产与使用国,美国的燃料乙醇生产原料主要为转基因玉米(95%),也有少量的小麦和大麦(约 5%),所消耗的玉米占全美国玉米总产量的 7%~8%。随着燃料乙醇生产量的提高及国际粮价上涨的影响,美国也在积极探索利用纤维素生产燃料乙醇。加拿大也是世界上主要的燃料乙醇生产国,其生产原料主要为玉米(85%)和小麦(15%)^[48]。

在欧洲,生产燃料乙醇的原料主要为小麦和甜菜。有关资料表明,欧盟以小麦为原料生产燃料乙醇的成本为 0.75~1.27 美元/L,以甜菜为原料生产燃料乙醇的成本为 0.83~1.22 美元/L。

目前,由于受国际粮价上涨影响,各国纷纷加紧寻找非粮燃料乙醇原料,主要以经济作物类(如木薯、甜高粱、甘蔗等)和木质纤维素(如植物的茎叶、农作物秸秆、林业剩余物等)为主。目前,发展经济类作物存在的主要问题是品种单一、种性退化较严重、单产量低,需要进一步改进种植技术,提高单产量。而利用木质纤维素生产燃料乙醇目前面临着技术不成熟的问题,因此成本较高。

(2)国内相关研究

我国开始开发使用燃料乙醇的探索始于 2000 年。国内燃料乙醇的生产主要以玉米、小麦等粮食淀粉为原料,存在生产成本低、原料供应有限等问题,特别是随着燃料乙醇在国内大力推广使用,使得陈化粮库存骤减,同时市场上玉米、小麦等粮食价格上涨,燃料乙醇的生产成本越来越高,粮食乙醇路线受到质疑。

2006 年国家发改委紧急叫停以粮食为原料的燃料乙醇生产项目,转向以非粮作物为原料的燃料乙醇生产。在我国生物质产业“十一五”发展规划中,国家发改委把甜高粱、木薯、菊芋列为我国燃料乙醇发展的能源植物,对这些能源作物的研究也迅速升温。国内很多学者都对这些能源作物的生物学性状、栽培技术、产量等进行了相关研究^[49-53]。也有学者对利用马铃薯生产燃料乙醇的可行性进行了研究,拓宽了燃料乙醇的原料源^[54]。

另外,国家还启动了一系列项目,支持科研院所开展相关研究。中国科学院大连化学物理研究所成立专门研究组,承担了中国科学院知识创新工程重要方向项目“果糖基能源植物——菊芋为原料的生物炼制关键技术研究”,联合复旦大学、南京农业大学等科研院所,共同研究菊芋的适应性、品种优选、基地建设、生物炼制技术。天津大学石化中心的科研团队多年来开展了燃料乙醇原料多元化、关键工艺、大型装备以及过程集成与强化的研究工作;经过一系列科技攻关工作,突破了制约我国燃料乙醇产业发展的关键技术难题,在技术创新上实现了跨越式发展,形成了具有自主知识产权的木薯燃料乙醇成套技术。

2)燃料乙醇加工技术及应用相关研究

(1)国外相关研究

巴西是世界上最早开始燃料乙醇生产技术研究的国家,世界上第 1 个燃料乙醇项目——ProAlcool 于 1975 年诞生在巴西。1975 年为了实现能源自给,巴西政府在全国推行了“燃料酒精计划”。“燃料酒精计划”的目标是:第一步,将酒精掺入汽油中,变成汽油醇,在全国范围内使用;第二步,将轻型车改为酒精燃料车。利用甘蔗生产燃料乙醇的方法主要有:酶解同步发酵法、糖能联产模式等。目前,巴西普遍应用美国 ARKEL 公司加以改进的蔗汁发酵工艺,11.67 t 甘蔗可生产 1 t 乙醇,即每吨甘蔗可生产 85.7 公升乙醇^[55]。

用玉米为原料,利用淀粉酶得到葡萄糖,再利用酵母菌萃取乙醇,已进入商业应用。从玉米中萃取乙醇分湿法和干法,湿法的副产品有面筋粉、黄浆饲料、玉米油、CO₂、添加剂、维生素等;干法的副产品有酒糟、CO₂、玉米胚芽、纤维。

以含纤维素生物质为原料生产燃料乙醇一般要经历原料预处理、纤维素水解和发酵环节。目前,比较接近实用化的纤维素制燃料乙醇工艺主要有美国 NREL、加拿大 Iogen、日本 NEDO 公司 3 种代表性工艺技术^[56]。

(2)国内相关研究

我国真正开始开发使用燃料乙醇的探索始于 2000 年。经国务院批准,原国家计委于 2001 年 4 月 17 日发布实施车用汽油添加燃料乙醇的决定,同时,国家质量监督检验检疫总局颁布了《变性燃料乙醇(GB18350—2001)》和《乙醇汽油(GB18351—2001)》的国家标准,为我国进一步推广使用变性燃料乙醇提供了规范。2002 年我国开始在河南省 3 地市和黑龙江省 2 地市试点推广乙醇汽油,到 2004 年已经扩大到黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽 5 省的全省范围和湖北省 9 地市、山东省 7 地市、江苏省 5 地市、河北省 6 地市。

目前,中国生物燃料乙醇生产技术取得了长足的进步,华东理工大学从“八五”期间就开始

研究农林弃物生产燃料乙醇技术,先后承担了国家“八五”、“九五”、“十五”科技攻关项目与“863”计划项目,目前已经建成 600 t/a 的酸水解法纤维乙醇生产中试装置,并通过了科技部 的鉴定。2006 年,山东泽生生物科技公司宣布首创秸秆无污染爆破技术,并在固态菌种发酵 方面有了突破,即将建成 3000 t/a 的纤维素乙醇示范工程。中国生物燃料已经具备了工业化 的条件,黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽 5 省及湖北、河北、山东、江苏省的部分地区已基本实现 车用乙醇汽油替代普通无铅汽油。2006 年,中国燃料乙醇的产量达到 144 万 t,成为世界第三 大燃料乙醇生产国,燃料乙醇的前景非常广阔。

广西中粮“年产 20 万吨木薯燃料乙醇生产示范工程”是我国“十一五”批准的第一家以非 粮作物为原料生产燃料乙醇产品的示范工程,也是目前世界上单套规模最大的木薯燃料乙醇 生产装置。该工程装置总投资额为 75256 万元人民币,于 2007 年 12 月一次投料试车成功。 从 2008 年 3 月至 2009 年 8 月,该示范装置累计生产燃料乙醇 24.7 万 t,相当于加工约 100 万 t 原油的汽油产量,新增产值 16.5 亿元,农民增收 3.55 亿元。

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(称为甜高粱乙醇),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,黑龙江省试 验项目已达到年产乙醇 5000t。国内已在黑龙江省、内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、辽宁 省和山东省等地建立了甜高粱种植、甜高粱茎秆制取燃料乙醇加工基地。

1.3 能源植物发展潜力的研究动态

1.3.1 生物液体燃料规模化发展对经济、环境的影响研究

发展生物液体燃料产业对社会经济、环境的影响是目前国际社会普遍关注的焦点,许多学 者都在开展相关的工作^[2]。

生物液体燃料发展对农产品价格、粮食安全、增加农民收入、增加就业、消除贫困等社会经 济层面的影响,是各国目前最为关注的问题,这一问题也将直接影响生物液体燃料产业的发 展。国内外学者针对这一问题从不同视角开展了相关研究。

有学者通过分析巴西“燃料酒精计划”对经济、社会和环境的影响,认为巴西生产的甘蔗酒 精不但解决了能源问题,每年能为巴西节省 42 亿美元,同时还可以增加 100 万个直接就业岗 位,并带动一大批相关产业,有效减少温室气体排放^[57]。还有学者通过对生物液体燃料发展 动力的分析,认为该产业可以减少对石油的依赖、保障能源安全、增加就业机会、提高石油的 动力性能及降低温室气体排放等^[48]。之后很多学者分别从定性和定量的角度对生物液体燃料 产业的发展对农产品价格、农业生产结构、土地利用结构、粮食安全、国际贸易、收入分配等产 生的影响进行了研究^[58]。目前,就发展生物液体燃料产业会推动全球农产品价格上涨这一结 论已得到了各界的普遍认同。部分学者还认为该产业的不合理发展会对粮食安全特别是贫困 粮食进口国家的粮食安全构成威胁,因此发展以粮食为原料的生物液体燃料产业应谨慎。

发展生物液体燃料对环境的影响问题也存在较大争议。发展生物液体燃料的主要动因便 是减少温室气体排放,然而对于其综合环境影响却存在很大的不确定性。一些学者认为,对于 生产生物液体燃料所造成的土地利用模式变化及相应的温室气体排放影响存在争议,已有研 究通常未考虑由于生物能源植物种植导致的土地利用变化所造成的温室气体排放增加,如果