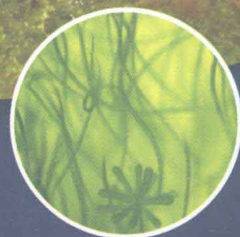


美国能源部生物质项目署 编著

藻类生物质能源

——基本原理、关键技术与发展路线图

胡洪营 李鑫 于茵 巫寅虎 等译



科学出版社

内 容 简 介

本书是在微藻生物质能源受到高度关注的背景下,由美国能源部组织 200 多名专家撰写而成的。本书全面、系统地阐述了藻类生物质能源的最新研究进展以及在技术研发和产业化应用过程中遇到的关键问题、未来的发展方向和路线图,内容涵盖藻类生物质能源生产过程的整个产业链,包括上游工艺中的藻种筛选、藻类生物学和藻类培养,下游工艺中的藻类收获和脱水、藻细胞产物提取、生物燃料转化和副产品生产以及藻类生物质能源的输配和利用;同时对藻类培养所需要的资源及选址、整个生产系统的技术经济分析、政府和企业合作等问题也进行了讨论。

本书思路新颖、条理清晰、信息量大、知识性强,可为初涉藻类生物质能源领域的本科生、研究生提供概括性介绍,也可为该领域的科研人员和工程技术人员提供研究思路与研究方向,还可为政府部门和企业制定能源开发和产业发展政策提供理论依据和参考。

图书在版编目(CIP)数据

藻类生物质能源:基本原理、关键技术与发展路线图/美国能源部生物质项目署编著;胡洪营等译. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-032446-7

I. ①藻… II. ①美…②胡… III. ①微藻-生物能源-能源利用
IV. ①S216.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 198103 号

责任编辑:杨 震 张小娟 / 责任校对:陈玉凤
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:迷底书装

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>

骏 杰 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011 年 10 月第一次印刷 印张: 11 1/4

印数: 1—2 000 字数: 226 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

原 版 前 言

欢迎阅读美国能源部生物质项目署编写的《藻类生物质能源技术路线图》(*National Algal Biofuels Technology Roadmap*)。本书由 200 多名科学家、工程师、企业代表、研究管理者及其他参与者共同编写,总结了藻类生物质能源技术路线图研讨会的讨论成果、公示期评论及大量的科技文献。本书的目的是总结藻类生物质能源技术的发展现状,论证大规模生产藻类生物质能源所面临的技术挑战。

可再生能源是能源安全、经济发展和气候稳定等全球性紧迫问题的焦点。目前迫切需要提出针对这些全球性挑战的解决措施,研发具有发展前景的新兴技术。因此,美国能源部一直致力于推动国内可再生能源与节能技术的科学研究,以期能够产生持续的经济效益。若要实现低成本藻类生物质能源的可持续生产,需要对长期研究进行合理规划。藻类生物质能源技术在生产可再生交通燃料方面潜力巨大,因此要充分研究其商业化的实现途径。

随着温室气体减排及低成本能源的需求日益紧迫,同时认识到单一技术无法解决这些问题,美国能源部重新启动了藻类生物质能源研究项目。通过政府拨款及 2009 年的美国复苏与再投资法案(American Recovery and Reinvestment Act of 2009),美国能源部投资了许多科学研究、技术开发和示范项目,以解决藻类生物质能源商业化过程中面临的技术障碍。与此同时,其他政府机构、学术界和企业也在为实现藻类可再生能源的进一步发展及商业化而共同努力。

利用藻类和蓝细菌生产经济可行及环境友好的生物质能源前景广阔,但在其发展过程中会遇到许多障碍。本书的宗旨是识别藻类生物质能源发展中的技术障碍,为研究者、工程师及决策者提供最新的研究进展总结,并指导今后的研发及示范工作。编者希望本书能够为藻类生物质能源技术的参与者指明该领域的发展方向。我们期待着各个领域合作伙伴的加入,共同研究可再生能源,并积极发展潜力巨大的优势技术。

Valerie Sarisky-Reed

美国能源部生物质项目代理负责人

中文版前言

能源短缺是人类在 21 世纪面临的第一大危机。近年来,世界范围内的人口增长和经济发展加快了化石燃料的消耗。然而,化石燃料属于不可再生能源,其储量已十分有限。据粗略估计,全世界的原油和天然气储量将会在 100 年内用尽。在石油和煤炭等不可再生能源面临枯竭的同时,化石燃料的大量燃烧也带来了温室气体(CO_2)浓度升高、全球温度上升和气候变化等一系列全球环境问题。能源危机关系到国家的经济安全和长远发展。因此,开发可再生和环境友好型新能源,是我们目前所面临的重要任务。

新能源包括太阳能、风能、氢能、核能、地热能、海洋能和生物质能源(生物乙醇、生物沼气、生物氢气和生物柴油等)。其中,生物质能源由于原材料丰富、生产操作安全、能源形式多样及燃烧过程不向大气中净排放 CO_2 等特点,在近 30 年来受到了国内外的广泛关注。

生物质能源的原材料主要有三种来源:食物制作过程中的废弃脂肪、高等植物中的油脂、微藻中的油脂及生物质。与社会需求相比,废弃脂肪的量很小,而高等植物原材料的生产成本较高,并且需要大量的耕种面积。藻类因光合作用效率高、生长速率快、生长周期短、占地面积小、生产成本相对较低、油脂及生物质产率高和环境效益显著(其生长过程可吸收大量氮、磷等营养物质,并可通过光合作用固定 CO_2)等优势,吸引了越来越多的学者关注,并成为了新型生物质能源领域的研究前沿和热点。

目前,欧美、日本及包括我国在内的许多国家,对藻类生物质能源的研究越来越重视。其中,美国在藻类生物质能源领域的研究中起步较早,并走在了该研究领域的前列,其最著名的研究项目是从 1978 年到 1996 年实施的“水生物种研究项目”(Aquatic Species Program, ASP)。ASP 项目系统研究了藻类作为生物质能源原材料的潜力。ASP 项目结束后不久,由于石油价格的迅速上涨,人们给予了藻类生物质能源更多的重视,美国能源部也于 2008 年重新启动了与藻类生物质能源相关的研究项目。

2008 年 12 月 9 日至 10 日,美国能源部能源效率与可再生能源生物质项目组召开了 *National Algal Biofuels Technology Roadmap* 研讨会,汇集了美国国内 200 多名科学家、工程师、政府管理者、企业代表、律师和投资者,充分讨论并明确了现阶段限制藻类生物燃料商业化的关键问题。

在该研讨会的基础上,美国能源部组织专家撰写了 *National Algal Biofuels*

Technology Roadmap 一书,全面总结了藻类生物质能源在发展过程中所遇到的关键问题及未来的发展方向(考虑到本书论述内容不仅涵盖生物燃料,还涉及藻类其他利用形式,故将中文版定名为《藻类生物质能源——基本原理、关键技术与发展路线图》)。本书的内容广泛,涵盖了藻类生物质能源生产过程的整个产业链,包括上游工艺中的藻种筛选、藻类生物学和藻类培养,下游工艺中的藻类收获和脱水、藻细胞产物提取、生物燃料转化和副产品生产及藻类生物质能源的输送分配与利用。此外,本书还讨论了藻类培养所需要的资源及选址、整个生产系统的技术经济分析及公共部门与私营企业之间的合作等一系列广泛的问题。

National Algal Biofuels Technology Roadmap 一书信息量大,知识性强,可为初涉藻类生物质能源领域的人员提供概括性介绍,也可为本领域的科研人员和工程师提供研究思路与研究方向的专业启发,还可为政府部门和企业提供政策制定的理论依据与参考。

全书由胡洪营和李鑫组织翻译、统稿和校稿,各章翻译人员均为清华大学环境学院从事基于微藻的污水再生处理与生物质生产耦合技术研究的一线研究人员。各章的主要翻译人员如下:

前言及摘要,巫寅虎;第一章,杨佳;第二章,李鑫、张玉平、赵雪飞、苏贞峰;第三章,李鑫、张玉平;第四章,李鑫、张玉平;第五章,李鑫、巫寅虎;第六章,于茵;第七章,朱树峰;第八章,庞宇辰;第九章,巫寅虎;第十章,杨佳;第十一章,庞宇辰。

于茵和巫寅虎等为全书的校稿付出了大量的精力,杨佳为本书的翻译提供了大量的前沿信息,在此致以诚挚的谢意。

在藻类生物质能源领域,英语已经成为一种最通行的语言,并已成为业界科研人员普遍接受和习惯。因为目前一些藻类的英文名称还没有对应的中文翻译,所以本书保留了一部分英文原文,特此说明。由于译者的水平有限,书中的翻译内容难免存在疏漏和不足,恳请读者批评指正。

胡洪营

2011年6月于清华园

背景介绍

发展新一代生物燃料是我们结束依赖进口石油及解决气候危机的关键——同时还将创造数百万的就业机会。

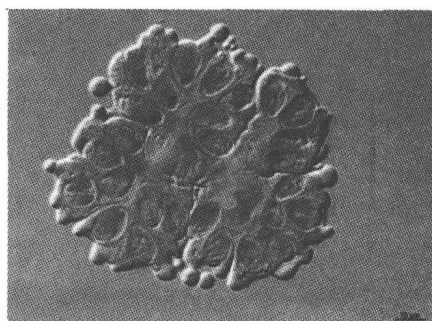
——美国能源部长 Steven Chu 于白宫发表讲话,并宣布为研究新型生物燃料拨款 8 亿美元

近年来,美国对进口石油的需求量日益增加,导致整个国家都面临着石油供应短缺的风险,给经济和社会领域的商业活动和个人生活带来了不稳定因素,甚至会影响国家安全。发展生物质能源是解决该问题的有效途径,受到了越来越多的关注。美国 2007 年颁布的能源独立与安全法案(Energy Independence and Security Act, EISA)建立了强制执行的可再生燃料标准(Renewable Fuel Standard, RFS),要求在 2022 年之前必须生产至少 360 亿加仑的可再生交通燃料。

可再生燃料包括纤维素生物燃料和生物柴油。据估计,纤维素乙醇在 EISA 目标的实现中将发挥主要作用,但许多新一代生物质能源也有很大潜力实现该目标。其中,藻类生物质能源具有满足 RFS 标准的潜力,从而使美国逐渐接近能源独立的目标。

为了促进新型生物质能源的发展,在美国复苏与重生法案(American Recovery and Renewal Act)中,美国总统 Obama 及美国能源部长 Steven Chu 宣布拨款 8 亿美元用于生物质能源的研究。其中包括给美国能源部的能源效率与可再生能源(Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE)生物质项目办公室的拨款,用于藻类生物质能源技术的研究、开发及商业化。除此之外,EERE 办公室及其他政府部门和项目还引入了更多资金用于藻类生物质能源的研究。

“藻”指微藻、蓝细菌(即蓝绿藻)及大型藻(海藻)。在特定情况下,某些微藻可以大量积累油脂(超过其无灰分细胞干重的 50%),从而使其具有转化为高能量密度可再生燃料的潜力。其他藻类原料和中间产物也可用于生产可再生燃料,如蓝细菌及大型藻中的淀粉和糖。除可再生燃料之外,利用藻类前体物还可生产许多不同的生物燃料及



布朗葡萄藻(*Botryococcus*)

产品。

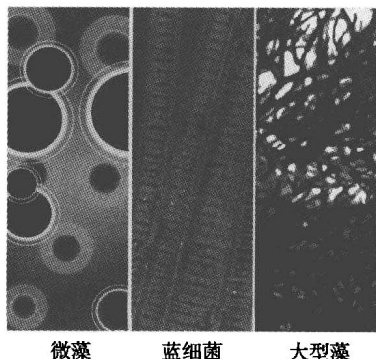
藻类生物质能源具有很多方面的优势,如:①较高的单位面积生产力;②基于非食品的原料;③可利用贫瘠、不适于耕种的土地;④可利用多种水资源(淡水、咸水、盐水、海水、生产废水及污水);⑤可同时生产生物燃料及其他高价值产品;⑥可循环利用 CO_2 及污水中的营养元素。

1978 年至 1996 年,美国能源部开展了水生物种研究项目(Aquatic Species Program, ASP),证实了藻类作为生物质能源原材料的潜力。ASP 项目结束后不久,由于石油价格的迅速上涨,美国对能源独立、环境改善和经济发展提出了新的迫切需求,因此藻类生物质能源再次成为人们关注的热点。

虽然关于以藻类为原料生产可再生生物燃料的基本概念很早就已出现,但人们一直没有成功建立起大规模、可持续且经济可行的生产系统。2008 年 12 月 9 日至 10 日,美国能源部的能源效率与可再生能源生物质项目署召开了藻类生物质能源发展路线图的专题研讨会。为期两天的研讨会聚集了全国各地 200 多名科学家、工程师、研究管理者、企业代表、律师和投资者,充分讨论并明确了现阶段限制藻类生物燃料商业化的关键问题。

本书集成了该专题研讨会的讨论成果、评论和相关的科技文献,旨在全面总结藻类生物燃料及其副产品生产的技术现状,论证大规模生产的可行性及其技术经济挑战,评价大规模推广藻类生物质生产系统对经济及环境的影响,识别藻类生物质供应链中存在的挑战,并论述合作研究的必要性与困难。本书可为参与藻类生物燃料技术开发的研究者、工程师、政策制定者和政府部门提供理论指导与技术支持。

总体而言,藻类生物质能源发展路线图的专题研讨会表明,要实现大规模、可持续且经济可行的藻类生物燃料生产,仍需在基础应用科学和工程领域开展长期的研究工作。同时创新技术的开发与应用,可在藻类生物质能源的快速发展中发挥关键作用。



1. 藻类原料

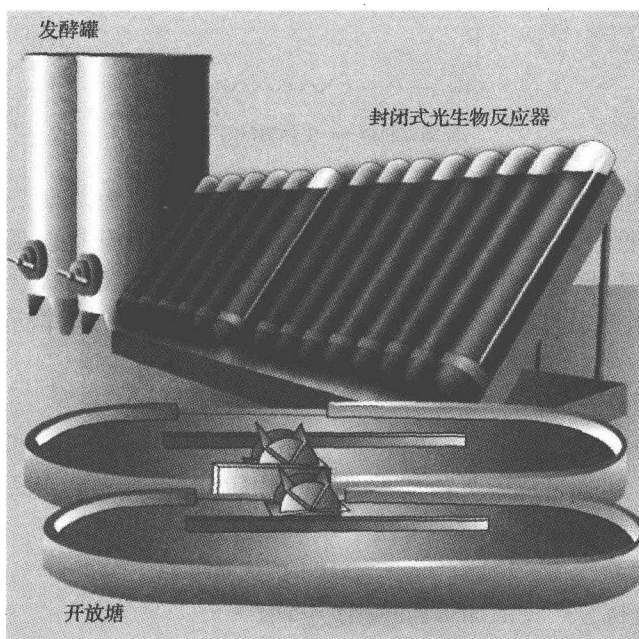
藻类包括微藻、大型藻(海藻)及蓝细菌(即蓝绿藻),可作为生物能源的原料。藻类可在淡水、咸水、海水、高盐度水及土壤等自然水体与陆地环境中生存。在自然界中,藻类一般与其他生物共生。

理解、掌握并充分利用特定藻种的生理特性,是将藻种原料转化为生物燃料及其他副产品的关键。直接从特定环境中筛选藻

种,有利于保证大规模培养中藻种的功能和生命力,这在生物燃料的生产中十分重要。

2. 藻类培养

微藻和蓝细菌可以通过光能自养或异养的方式培养。自养培养主要在开放塘或封闭反应器中进行,藻类利用光能产生物质;异养培养则不需要光源,藻类利用有机碳源(如糖类)产生物质。大型藻(海藻)有其独特的培养需求,通常需要开放式的近海或远海培养设施。



培养系统示例

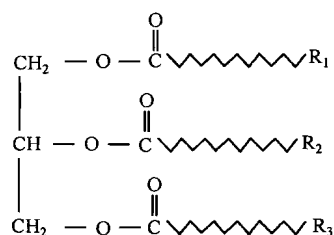
培养系统是保证藻类生物燃料生产系统经济性、规模化和可持续性的关键。一个理想的培养系统,需要充分发挥筛选藻种的优势,并结合适宜的下游处理工艺。

3. 收获/脱水

某些藻类生物燃料的生产工艺需要预处理步骤,如藻细胞收获与脱水。藻类主要在水中生长,在进行原料物质的提取与转化前,需要通过预处理获得浓缩藻液。预处理过程能耗巨大,因此会影响生产系统的经济性。

4. 产品提取

从藻细胞生物质中可以提取 3 种主要成分:油脂(包括三酰甘油酯和脂肪酸)、碳水化合物及蛋白质。油脂和碳水化合物是制备藻类生物质能源(如汽油、生物柴油及航空燃料)的前体物,而蛋白质则可用于生产副产品(如动物、鱼类饲料)。



藻细胞油脂——生物燃料前体物

按照当前的技术水平,建立工业规模的提取系统还较为困难。藻类生物质的收获、干燥及目标产物的分离均为高耗能过程,因此如何优化提取系统以降低其能耗,是藻类生物质能源生产系统中亟须解决的问题。同时,无需提取步骤的新型藻类生物质能源生产工艺正逐渐受到人们的关注,但这些工艺同样面临着许多技术挑战。

5. 转化/加工

藻类生物质可通过以下 3 种基本途径转化为生物燃料和副产品:

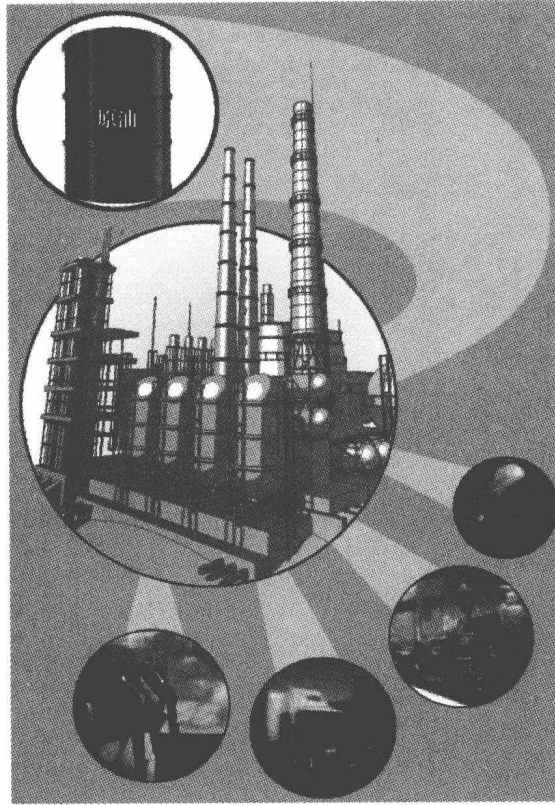
- (1) 藻类生物质的转化;
- (2) 藻类代谢产物的提取;
- (3) 藻类直接分泌物的加工。

转化技术包括化学法、生物化学法、热化学法及以上方法的综合。

转化技术不同,获得的最终产品也不同。生物燃料的主要产品如汽油和生物柴油,虽然含量较大但价值却相对较低,因此以生物燃料为最终产品的转化工艺面临着很大挑战。

6. 产品利用

①生物柴油;②生物燃气;③可再生烃类;④生物乙醇;⑤副产品(如动物饲料、肥料、工业酶、生物塑料及表面活性剂等)。



不同类型终产品

目 录

原版前言

中文版前言

背景介绍

第一章 概述	1
1.1 美国能源危机	2
1.1.1 藻类原料的优势	3
1.2 藻类生物质能源的发展历史	3
1.2.1 1996 年之前的研究工作	4
1.2.2 1996 年之后的研究工作	6
1.3 “从藻到生物质能源”:机遇与挑战	6
1.3.1 技术挑战	7
1.3.2 法规与标准	8
1.3.3 公共部门-私营企业合作	8
参考文献	8
第二章 藻类生物学	10
2.1 藻种分离与筛选	10
2.1.1 自然界的藻种分离及特性表征	10
2.1.2 国家藻种数据资源中心在藻种保藏中的作用	12
2.1.3 研究用模式藻选择	13
2.2 藻类生理学及生物化学	14
2.2.1 光合作用与光能利用	15
2.2.2 碳分配及碳代谢	15
2.2.3 藻细胞碳水化合物	17
2.2.4 油脂合成及调控	17
2.2.5 生物氢气	20
2.3 藻类生物技术	22
2.3.1 遗传工具箱	23
2.3.2 支撑技术:“组学”方法和生物信息学	27
2.3.3 生物技术在藻类生物质能源中的应用	29
2.3.4 基因修饰	32

参考文献	33
第三章 藻类培养	42
3.1 培养途径	42
3.1.1 微藻和蓝细菌	42
3.1.2 大型藻	43
3.2 扩大规模的挑战	45
3.2.1 大规模培养的稳定性	45
3.2.2 系统生产力	46
3.2.3 营养源管理及其可持续性	47
3.2.4 水管理、保持和循环利用	48
参考文献	50
第四章 下游工艺:收获和脱水	53
4.1 微藻的收获和脱水方法	53
4.1.1 收获	53
4.1.2 干燥	55
4.2 大型藻的收获和脱水方法	56
4.2.1 收获	56
4.2.2 预处理工艺	56
4.3 工艺集成与系统优化	57
参考文献	58
第五章 微藻产物的提取	60
5.1 油脂提取技术	60
5.1.1 机械破碎(细胞破裂)	60
5.1.2 混合有机溶剂	61
5.1.3 加速溶剂提取	63
5.1.4 选择性提取	63
5.1.5 亚临界水提取	64
5.1.6 超临界流体提取	64
5.1.7 异养生产	65
5.2 挑战	65
5.2.1 生物质中水的存在	65
5.2.2 目标提取物的分离	66
5.2.3 能耗与水循环	66
参考文献	66

第六章 藻类生物燃料转化技术	69
6.1 利用藻类直接合成生物燃料	70
6.1.1 醇类	70
6.1.2 烷烃	71
6.1.3 H_2	71
6.2 全部藻细胞生物质加工	72
6.2.1 热解	72
6.2.2 气化	73
6.2.3 液化	75
6.2.4 超临界加工	75
6.2.5 厌氧消化	76
6.3 藻类提取物的转化	77
6.3.1 化学酯交换	77
6.3.2 生化(酶)转化	78
6.3.3 催化裂解	79
6.3.4 向可再生柴油、汽油及航空燃油转化	80
6.4 藻渣的处理	81
参考文献	81
第七章 副产品	86
7.1 从微藻和蓝细菌中获得的产品	87
7.1.1 食品与饲料	88
7.1.2 多不饱和脂肪酸	89
7.1.3 抗氧化剂	89
7.1.4 染色剂	89
7.1.5 肥料	89
7.1.6 其他专业产品	90
7.2 从大型藻中获得的产品	90
7.3 回收副产品的潜在选择	90
7.3.1 选择 1	92
7.3.2 选择 2	92
7.3.3 选择 3	93
7.3.4 选择 4	93
7.3.5 选择 5	94
参考文献	94

第八章 输配与利用	96
8.1 输配	96
8.2 利用	98
8.2.1 藻类生物燃料代替石油产品的中间馏分	98
8.2.2 藻类生物燃料代替石油产品的醇类和汽油馏分	99
参考文献	100
第九章 资源及选址	102
9.1 不同培养方式的资源需求	102
9.1.1 光能自养型微藻的培养	102
9.1.2 异养型微藻的培养	103
9.1.3 光能自养型大型藻的培养	104
9.2 资源概述	105
9.2.1 气候	105
9.2.2 水	108
9.2.3 CO ₂	111
9.2.4 土地	112
9.3 与污水处理相耦合	114
9.3.1 污水处理和回用	115
9.3.2 用于污水处理厂的藻类生产技术	116
9.3.3 利用污水生产藻类的主要研究需求	118
9.4 藻类培养与 CO ₂ 排放行业共建	118
9.4.1 藻类培养与 CO ₂ 排放源共建的机遇	118
9.4.2 藻类培养与 CO ₂ 固定工业源共建的障碍	120
9.4.3 研究和发展方向	120
参考文献	122
第十章 系统和技术经济分析	126
10.1 技术经济分析的目标	126
10.2 TEA 的范围和方法	128
10.3 对 TEA 和 LCA 方法发展的建议	131
10.4 系统分析	133
10.4.1 概述	133
10.4.2 工程分析和 GIS 评价	134
10.4.3 地理因素对藻类生物质能源生产成本的影响	136
10.4.4 生命周期评价	138
10.5 藻类的生产成本及其不确定性因素	139

10.6 系统动力学初级模型.....	140
10.7 未来研究方向.....	140
参考文献.....	141
第十一章 公共部门-私营企业合作	144
11.1 藻类生物质能源领域内公私合作的优势.....	144
11.2 公私合作的成功要素.....	145
11.3 公私合作的平台.....	145
11.4 藻类生物质能源行业中的合作挑战.....	146
11.5 技术进步的合作模式.....	147
参考文献.....	150
译后记.....	152
1. 耦合工艺近期目标	153
2. 耦合工艺远期目标	154
3. 耦合工艺全新理念	156
4. 耦合工艺的未来研究方向	156
参考文献.....	157
附录 1 主要缩略词一览表	159
附录 2 本书中非法定计量单位与法定计量单位的对照和换算表	161

第一章 概 述

美国能源部 (U. S. Department of Energy, DOE) 的生物质研究计划一直致力于推动可再生生物质能源的发展, 并积极促进与生物燃料、生物产品及生物质能源相关的产业发展, 以提高美国能源的独立性和安全性, 减少对石油进口的依赖, 改善环境问题, 并提供就业机会。该研究计划获得了联邦政府的多项法律和政策支持, 包括 2007 年颁布的能源独立与安全法案 (Energy Independence and Security Act of 2007, EISA)。为实现上述目标, 美国能源部积极组织国内的科研单位、高等院校和相关行业, 开展了一系列的研发和示范活动。

藻类生物质能源在该研究计划中受到了高度重视, 并有潜力达到可再生燃料的标准 (Renewable Fuels Standard, RFS)。RFS 标准规定: 在 2022 年之前美国必须生产至少 360 亿加仑的可再生燃料, 其中由玉米生产的生物乙醇不得超过 150 亿加仑。藻类生物质能源可满足 RFS 标准的长期需求, 并有可能影响美国交通运输燃料的供给。目前, 关于藻类生物质能源的研究仍处于起步阶段, 因此需要开展大量的研发工作, 以生产大规模、可持续和经济可行的藻类生物质能源。

关于本书

2008 年 12 月 9 日到 10 日, 在美国的马里兰大学帕克分校举行了藻类生物质能源发展路线图的研讨会, 并编写了“藻类生物质能源发展路线图”(简称“路线图”)。通过一系列的主题讨论, 本次研讨会讨论并识别了藻类生物质能源在大规模发展中面临的挑战, 评估了藻类技术的现状, 并为其未来发展制定了研究计划。

共有 200 多名来自工业界、高校、国家实验室、政府机关及非政府组织的代表出席了本次研讨会。针对藻类生物质能源在发展中存在的问题, 参会代表结合自身的经验与专业背景展开了深入讨论, 对藻类生物质能源行业的发展具有积极的促进作用。本书涵盖了该研讨会的主要讨论成果。关于研讨会的具体细节可参考相关网站 <http://www.ornl.gov/algae2008pro/>。

本书综合了技术、经济和政策三方面的观点, 可支持并指导藻类生物质能源的研发投资。为了更好地评估藻类生物质能源所具有的经济和环境效益, 下面首先来介绍藻类生物质能源的发展现状。

1.1 美国能源危机

随着世界范围内石油供应的下降,美国对进口原油的依赖性越来越强。目前,美国大约有 2/3 的石油来自于进口,其中有 60% 用于交通运输。随着发展中国家的崛起及对石油消耗的增加,全球的石油危机将更加严重。另外,化石能源的燃烧过程会产生大量温室气体,从而带来全球变暖等环境问题。

美国 2007 年颁布的能源独立与安全法案 (Energy Independence and Security Act of 2007, EISA) 制定了石油行业的新标准,对可再生能源的使用、能源效率和新型能源的研发产生了深远影响。EISA 法案对可再生能源的生产量与增长量进行了量化 (表 1.1),并制定了可再生燃料的标准 (Renewable Fuels Standard, RFS)。

表 1.1 RFS 标准对可再生能源的生产量要求 (单位: 10 亿加仑)
(木质素燃料和生物柴油均属于高级生物燃料)

年份	木质素燃料	生物柴油	高级生物燃料	可再生能源总量
2009	无数据	0.5	0.6	11.1
2010	0.1	0.65	0.95	12.95
2011	0.25	0.8	1.35	13.95
2012	0.5	1.0	2.0	15.2
2013	1.0	a	2.75	16.55
2014	1.75	a	3.75	18.15
2015	3.0	a	5.5	20.5
2016	4.25	a	7.25	22.25
2017	5.5	a	9.0	24.0
2018	7.0	a	11.0	26.0
2019	8.5	a	13.0	28.0
2020	10.5	a	15.0	30.0
2021	13.5	a	18.0	33.0
2022	16.0	a	21.0	36.0
2023	b	b	b	b

注: a 表示将来由 EPA 确定,但不应少于 10 亿加仑。

b 表示将来由 EPA 确定。

能否满足 EISA 法案的高目标,是高级生物燃料面临的挑战之一。EISA 法案规定,高级生物燃料在其生命周期内的温室气体排放量必须小于石油交通燃料温室气体排放量的 50%。若要达到 RFS 标准的要求,需要大量生产生物质以提供足够的原材料。Billion Ton 的研究指出 (Perlack et al., 2005),木质素原料