



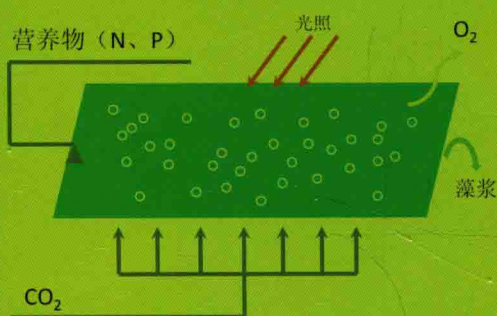
能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

微藻生物柴油全生命周期 “2E&W” 分析

Life Cycle “2E&W” Assessment of
Microalgal Biodiesel

谢晓敏 张庭婷 黄震 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

能源与环境出版工程

微藻生物柴油全生命周期 “2E & W”分析

Life Cycle “2E & W” Assessment of
Microalgal Biodiesel

谢晓敏 张庭婷 黄 震 著

上海交通大学出版社

内容提要

本书从生命周期角度对微藻生物柴油进行了生命周期能源消耗、环境影响以及水足迹(2E&W)评价。论述了微藻生物能源发展历史及微藻生物柴油的技术挑战;全面阐述了车用燃料生命周期评价发展以及生命周期“2E&W”评价方法;结合我国不同地区的资源和气候特点,系统评估了各地培养微藻生产生物柴油的潜力;通过模拟建立微藻生物柴油综合炼厂,深入研究了微藻生物柴油生命周期能源消耗、环境影响和水足迹,对微藻生物柴油生命周期“2E&W”进行了系统、全面的评价。

本书可作为高等学校能源与环境专业教学与科研参考书,也可供从事能源政策和环境评估等工作的相关研究人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微藻生物柴油全生命周期“2E&W”分析/谢晓敏,张庭婷,黄震著. —上海:上海交通大学出版社,2016
能源与环境出版工程
ISBN 978-7-313-14196-5

I. ①微… II. ①谢…②张…③黄… III. ①微藻—生物燃料—柴油—研究 IV. ①TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298762 号

微藻生物柴油全生命周期“2E&W”分析

著 者: 谢晓敏 张庭婷 黄 震

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海天地海设计印刷有限公司

开 本: 789mm×1092mm 1/16

字 数: 364 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14196-5/TK

定 价: 98.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 19

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-64366274

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果；

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍，为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考；

三是优化能源与环境专业教材，为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书，满足人才培养对教材的迫切需求；

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线，重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题，主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向，汇集能源与环境领域的关键性技术和成果，注重理论与实践的结合，注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块，其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果，也包括能源与环境工程一线的理论和实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作；黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值，出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家，组建了学术指导委员会和编委会，并召开了多次编撰研讨会，商谈丛书框架，精选书目，落实作者。

该学术丛书在策划之初，就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注，与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审，Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*)，《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权，John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

俞史烈

2013年8月

前 言

当前,尽管全球经济呈现出疲软的总体态势,但全球能源生产与能源消费仍保持持续增长。截至 2014 年底,全球终端能源消费量超过 129 亿吨石油当量,而中国 2014 年的终端能源消费量占了全球的 23%。全球一次能源供应方面,依然是以煤、石油、天然气为主的三大化石能源主导,占比达到 86.3%,但石油所占份额从 1973 年的 46.0%下降到 2014 年的 32.5%。主要原因是数次石油危机下,各国开始意识到高度依赖石油的风险,从而致力于寻求与发展新能源。正因如此,全球的能源结构也悄然发生着从化石能源向新能源的转变,尽管这个比例目前依然较低。

换言之,因过度依赖化石能源引起的能源安全、环境污染、气候变化及水资源枯竭等问题已成为全世界共同面临的挑战。开发利用新能源逐步成为替代传统化石能源的重要手段,其中,发展非粮生物燃料得到了各国政府和研究学者的认可。微藻因其具有生长速度快、产油效率高、固定 CO_2 、不与农作物争地等优点,被认为是未来最有潜力的生产生物燃料的非粮能源作物之一。2014 年 6 月中国正式发布了《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》,其中明确规定要超前部署微藻制油技术研发和示范,积极发展交通燃油替代。这表明,中国已正式将微藻纳入了生物质能发展规划。

目前,国内外的研究者和政府机构都在致力于发展微藻制油替代传统交通燃料的技术。但囿于成本等问题,当前微藻制油在大规模生产这一方面尚未取得实质性突破。利用微藻进行生物柴油的生产具有重要的现实意义,但必须结合我国的资源特点进行系统的评估,特别是从生命周期的角度来评价利用微藻生产生物柴油的资源、能源消耗和环境影响。本书的目的就在于结合我国各地区的资源和气候特点,评估不同地区培养微藻生产生物柴油的潜力,建立微藻生物柴油的全生命周期能源消耗、温室气体排放和

水足迹评价模型,通过模拟建立的微藻生物柴油综合炼厂,考察微藻生物柴油在替代传统化石燃油方面的优缺点,同时找出微藻生物柴油生产链中的技术薄弱环节,从而为微藻制油的产业化发展提供指导。

本书围绕微藻生物柴油,首先梳理了微藻制油相关技术发展现状,介绍了生命周期能源消耗、环境影响及水足迹评价方法,概述了车用燃料、生物燃料的生命周期评价和水足迹的生命周期评价发展;然后结合国内各个地区的资源和气候特点考察了不同地区生产微藻生物柴油的潜力;最后构建了微藻制油生物综合炼厂模型,对微藻制油这一生产链进行了能源消耗、温室气体排放和水足迹的系统、全面的生命周期评价。

本书是上海交通大学燃烧与环境技术中心近年来在车用燃料生命周期评价研究方面成果的积累。在此特别感谢美国阿岗国家实验室王全录博士在本书开展的研究工作中给予的支持与指导。感谢 2015 上海高效服务国家重大战略出版工程专项资金的资助,感谢上海交通大学出版社热情、细致的编辑工作。

微藻生物能源作为一种新兴的车用替代能源,国内外尚缺乏对其进行全面的生命周期能源消耗、环境影响以及水足迹分析。希望本书的出版能为我国的非粮生物燃料发展提供指导。本书可作为高等学校能源与环境专业教学与科研参考书,也可供从事能源政策和环境评估等工作的相关研究人员和管理人员参考。

由于作者水平有限,书中存在的一些疏漏和不当之处,恳请读者批评指正。

黄 震

主要缩略词及符号对照表

ANL	阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory)
API	空气污染指数(air pollution index)
ASP	水生物种项目(aquatic species program)
ASSF	先进固体发酵技术(advanced solid-state fermentation)
BD	生物柴油(biodiesel)
BE	生物乙醇(bioethanol)
BSFC	有效燃料消耗(brake specific fuel consumption)
COD	化学需氧量(chemical oxygen demand)
CIDI	直喷压缩点燃(compressed ignition with direct injection)
CI - ICE	压燃点燃式内燃机(compressed ignition internal combustion engine)
DAG	甘油二酯(diacylglycerols)
DOE	美国能源部(U. S. Department of Energy)
EIA	美国能源信息署(U. S. Energy Information Administration)
ET	蒸发蒸腾作用(evapo transpiration)
EV	电动车(electricity vehicle)
FAMEs	脂肪酸甲酯(fatty acid methyl esters)
FAO	联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)
FC	燃料电池(fuel cell)
FFA	游离脂肪酸(free fatty acids)
FG	闪蒸汽(flared gas)
FTD	费-托柴油(Fischer-Tropsch diesel)
GDP	国内生产总值(gross domestic product)
GHG	温室气体排放(greenhouse gas emission)
GV	汽油车(gasoline vehicle)
GWP	全球变暖潜值(global warming potential)
HPH	高压均质法(high pressure homogenization)

HRAP	高得率藻培养池(high rate algal pond)
HSB	高速均质法(high speed homogenization)
HTP	人体毒性潜值(health toxic potential)
ICE-HEV	内燃机与电池混合驱动(ICE hybrid electricity vehicle)
IEA	国际能源署(International Energy Agency)
IPCC	政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change)
ISO	国际标准化组织(International Organization for Standardization)
LCA	生命周期评价(life cycle assessment)
LHV	低位热值(low heating value)
LNG	液化天然气(liquefied natural gas)
LPG	液化石油气(liquefied petroleum gas)
MBP	海洋生物质项目(marine biomass program)
MAG	甘油单酯(monoacylglycerols)
Mt	百万吨(million ton)
MTBE	甲基叔丁基醚(methyl tertiary butyl ether)
Mtoe	百万吨油当量(million ton oil equivalent)
MSW	固体废弃物(municipal solid waste)
MW	兆瓦(megawatt)
NASA	美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration)
NEDC	欧洲测试循环(new European driving cycle)
NG	天然气(natural gas)
NRDP	不可再生资源耗竭潜值(non-renewable resource depletion potential)
NREL	美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory)
OECD	经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development)
OPEC	石油输出国组织(Organization of Petroleum Exporting Countries)
ORP	开放式跑道池(open raceway pond)
PAR	光合有效辐射(photosynthetic available solar radiation)
PCSP	光化学烟雾潜值(photo-chemical smog potential)
PEF	高强脉冲电磁场(pulsed electric field)
PM _{2.5}	直径小于等于 2.5 μm 的细颗粒物(particular matter less than 2.5 μm)
PM ₁₀	直径小于等于 10 μm 的可吸入颗粒物(particular matter less than 10 μm)
PNNL	太平洋西北国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory)
REPA	资源与环境状况分析(resources and environmental profile analysis)

RFG	重组汽油(reformulated gasoline)
SCCO ₂	超临界 CO ₂ 萃取(supercritical carbon dioxide extraction)
SETAC	环境毒理与化学协会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry)
SI - ICE	火花点燃式内燃机(spark ignition internal combustion engine)
SPOLD	欧洲生命周期评价发展促进委员会(Society for Promotion of Life-cycle Assessment Development)
TAG	甘油三酯(triacylglycerols)
TTW	下游阶段(tank to wheel)
ULSD	超低硫柴油(ultra low sulfur diesel)
UNESCO	联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
UNFCC	联合国气候变化框架公约(United Nations Framework Convention on Climate Change)
UNICEF	联合国儿童基金会(United Nations International Children's Emergency Fund)
WF	水足迹(water footprint)
WF _b	蓝水足迹(blue water footprint)
WF _g	绿水足迹(green water footprint)
WF _{gr}	灰水足迹(grey water footprint)
WHO	世界卫生组织(World Health Organization)
WTT	上游阶段(well to tank)
WWF	世界自然基金会(World Wide Fund For Nature)

目 录

第 1 章 中国能源形势与生物燃料发展	001
1.1 引言	001
1.1.1 中国经济发展和能源需求间的平衡	003
1.1.2 能源需求与能源安全	005
1.1.3 生物燃料的发展是解决能源安全的手段之一	018
1.2 生物燃料发展现状	019
1.2.1 全球生物燃料发展概况	019
1.2.2 中国生物燃料发展概况	022
1.3 国外生物燃料发展	024
1.3.1 美国	024
1.3.2 巴西	026
1.3.3 欧盟	028
1.3.4 泰国	029
1.3.5 澳大利亚	031
1.3.6 其他	032
1.4 本书重点内容	034
参考文献	034
第 2 章 微藻制油技术发展概览	038
2.1 微藻制油的初步认识	038
2.1.1 商业化微藻种类代表	038
2.1.2 微藻的应用价值	041
2.1.3 微藻制取生物柴油的优势	043
2.2 微藻作物生物质能源的发展历史	045
2.2.1 国外进展	045
2.2.2 国内发展	047
2.3 微藻制取生物柴油的技术挑战	049

2.3.1 微藻藻种筛选	050
2.3.2 微藻培养技术	051
2.3.3 微藻采收脱水技术	058
2.3.4 微藻油脂提取	066
2.3.5 油脂转换过程	077
2.3.6 微藻副产品	083
2.4 小结	084
参考文献	085

第3章 车用燃料生命周期评价发展 100

3.1 生命周期评价概念	100
3.1.1 概念与内涵	100
3.1.2 分析指标	103
3.2 生命周期评价发展历程	106
3.3 车用燃料生命周期评价	108
3.3.1 车用燃料生命周期评价概念	108
3.3.2 早期车用燃料生命周期评价研究工作	109
3.3.3 车用燃料生命周期评价研究进展	113
3.3.4 车用生物替代燃料及其生命周期评价进展	118
3.4 小结	125
参考文献	125

第4章 水足迹评价发展 139

4.1 水与能源	139
4.1.1 全球水资源与能源	139
4.1.2 能源对水的渴望	143
4.1.3 能源生产耗水对生态系统的影响	145
4.2 水足迹概念发展	148
4.2.1 水足迹概念	148
4.2.2 水足迹评价内容	149
4.2.3 全球平均水足迹现状	151
4.3 生物燃料水足迹评价研究现状	153
4.3.1 生物燃料与水的关系	154
4.3.2 生物燃料生长过程水足迹比较	155
4.3.3 生物燃料生命周期水足迹比较	156

4.4 小结	163
参考文献	163
第5章 “2E&W”计算方法简介	168
5.1 总体研究框架与分析指标的确立	168
5.1.1 研究框架	168
5.1.2 考察指标	170
5.1.3 副产品分配方法	171
5.2 “2E”计算模型	173
5.2.1 WTT 计算过程	173
5.2.2 TTW 计算过程	177
5.2.3 WTW 计算过程	177
5.3 “W”计算模型	177
5.3.1 水足迹系统边界的确立	178
5.3.2 各类水足迹定义	178
5.3.3 陆生作物水足迹计算方法	179
5.3.4 微藻水足迹计算方法	180
5.4 小结	181
参考文献	181
第6章 微藻生物柴油生产潜力分布特征	183
6.1 潜力分布模型依据	184
6.1.1 微藻生长模型	184
6.1.2 微藻生物柴油理论产量	185
6.1.3 微藻生物柴油修正产量	185
6.2 微藻生长区域分布特征	187
6.2.1 微藻平均生长率	187
6.2.2 微藻生物柴油理论分布	189
6.2.3 引入光饱和度和水温的微藻生物柴油分布	190
6.2.4 引入水可获取能力的微藻生物柴油分布	192
6.2.5 影响因素讨论	196
6.3 小结	196
参考文献	197

第7章 过程燃料生命周期分析	200
7.1 过程燃料概述	200
7.2 基础数据	201
7.2.1 原料开采环节	201
7.2.2 原料运输环节	205
7.2.3 原料加工环节	209
7.3 能耗与排放结果	212
7.3.1 能耗与排放清单	212
7.3.2 能耗与排放分析	213
7.4 小结	214
参考文献	214
第8章 微藻生物柴油生命周期“2E”结果评价	216
8.1 微藻生物柴油炼厂设计及生命周期评价系统边界	216
8.1.1 微藻生物柴油综合炼厂设计	216
8.1.2 生命周期评价系统边界	217
8.2 主要技术路线参数	218
8.2.1 微藻培养阶段	218
8.2.2 微藻脱水阶段	222
8.2.3 微藻油脂提取阶段	225
8.2.4 生物柴油转化阶段	226
8.2.5 生物柴油运输及分配阶段	227
8.2.6 生物柴油燃烧阶段	227
8.2.7 副产品分配方法	227
8.3 微藻生物柴油“2E”结果分析	228
8.3.1 上游阶段结果	229
8.3.2 全生命周期结果	231
8.3.3 敏感性分析	232
8.3.4 电力结构影响分析	235
8.3.5 区域特征	235
8.4 小结	238
参考文献	239
第9章 微藻生物柴油水足迹分析	242
9.1 生物质基液体燃料路线的选择	243