



中国生物液体燃料技术经济与减排潜力研究

Techno-Economics and GHG Abatement
Potential of Biofuels in China

赵丽丽 常世彦 张希良◎著



清华大学出版社



中国生物液体燃料技术经济与减排潜力研究

Techno-Economics and GHG Abatement
Potential of Biofuels in China

| 赵丽丽 常世彦 张希良 著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书围绕生物液体燃料产业的两个核心问题进行研究,一是经济性,二是温室气体减排潜力,研究区间为2010—2050年。经济性研究旨在辨识影响各种生物液体燃料发展的关键因素,探讨可能的激励政策对生物燃料产业发展的作用。在减排潜力研究领域,使用GREET模型对各条生物液体燃料路线进行全生命周期分析;同时,开发了基于TIMES工具的能源系统动态优化模型,通过系统优化得到我国生物液体燃料中长期生产利用的总量和结构数据;在此基础上,估算我国生物液体燃料减排潜力。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

中国生物液体燃料技术经济与减排潜力研究 / 赵丽丽, 常世彦, 张希良著. —北京: 清华大学出版社, 2017

(清华汇智文库)

ISBN 978-7-302-48743-2

I. ①中… II. ①赵… ②常… ③张… III. ①生物燃料-液体燃料-技术经济-研究-中国 ②生物燃料-液体燃料-节能减排-研究-中国 IV. ①TK63 ②F426.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第272583号

责任编辑: 梁云慈

封面设计: 汉风唐韵

责任校对: 王凤芝

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦A座 邮 编: 100084

社总机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者: 三河市君旺印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm×230mm 印 张: 12.5 插 页: 1 字 数: 207千字

版 次: 2017年11月第1版 印 次: 2017年11月第1次印刷

定 价: 89.00元

产品编号: 077764-01

石油是全球一次能源消费结构中占比最高的能源品种。2015 年全球一次能源消费 131.47 亿吨油当量，石油占比 32%（BP，2017）。^①同时，石油是重要的 CO₂ 排放源。2014 年全球约 34% 的 CO₂ 排放来自石油的燃烧（IEA，2016）。^②以石油消费为主的交通部门的 CO₂ 排放量约占全球总排放的 23%，美国、英国等发达国家交通部门 CO₂ 排放占其全国总排放的比例更高，约为 30%（IEA，2016）。^③因此，寻求石油替代燃料和交通部门 CO₂ 减排措施成为国际社会普遍关注的议题。生物液体燃料是可以规模化替代石油基产品的可再生能源，可发挥能源替代和温室气体（GHG）减排的重要作用。发展生物液体燃料已成为世界众多国家能源安全和低碳发展战略中的重要组成部分。

中国在保障能源安全和应对气候变化上面临巨大压力。2015 年，中国石油表观消费量为 5.43 亿吨，石油对外依存度已达到 60.6%，随着经济社会的持续快速发展，到 2030 年石油对外依存度将有可能达到 75%。同时，中国提出 2030 年单位 GDP 的 CO₂ 强度比 2005 年下降 60%～65% 以及 2030 年左右 CO₂ 排放达到峰值的国家自主贡献目标。这一目标的实现需要积极推动能源生产和消费革命，努力构建高效、安全、清洁、低碳的能源供应体系和消费体系。

2015 年，中国燃料乙醇生产量为 230 万吨，生物柴油生产量为 94 万吨（国

① BP. 2017. 能源世界能源展望, http://www.bp.com/content/dam/bp-country/zh_cn/Download_PDF/EO2017/《BP 世界能源展望》(2017 版) 中文报告 %20.pdf。

② IEA. 2016. CO₂ emissions from fuel combustion. www.iea.org.

③ IEA. 2016. CO₂ emissions from fuel combustion. www.iea.org.



家能源局新能源和可再生能源司, 2016),^① 生物液体燃料产量位居世界第 5。尽管如此, 中国生物液体燃料产业尚处于起步阶段, 生物质资源评价工作尚待完善, 非粮生物液体燃料的技术发展和产业化尚处于发展初期, 国家重点支持的技术发展方向不明确, 促进生物液体燃料发展的市场框架也有待健全, 亟须从成本效益的角度出发, 对我国生物液体燃料的经济性及环境效益进行总体研究, 以为国家制定产业发展激励政策提供支撑。

本书围绕生物液体燃料产业的两个核心问题进行研究, 一是经济性, 二是 GHG 减排潜力。前者关注的是该产业发展可行性方面的核心问题, 而后者关注的是产业发展可持续性领域的核心问题。在经济性研究方面, 本书采用净现值法对生物液体燃料进行技术经济分析, 旨在描绘我国目前及未来生物液体燃料的发展轨迹, 辨识影响生物液体燃料经济性的关键因素, 探讨可能的激励政策对生物燃料产业发展的作用。在减排潜力研究方面, 本书采用美国阿贡国家实验室开发的 GREET 模型, 在对其进行本地化改造的基础上, 开展了生物液体燃料全生命周期 GHG 排放分析; 同时, 开发了基于 TIMES 的能源系统动态优化模型, 研究的区间为 2010—2050 年, 系统模拟了我国生物液体燃料发展的总量、结构和 GHG 减排总量。

研究表明, 生物液体燃料是中国交通部门 GHG 减排的重要措施, 到 2050 年可以贡献 1.37 亿~3.66 亿 t CO_{2,eq} 减排量, 如果从全生命周期考虑, 可以减排 GHG 0.88 亿~2.36 亿 t CO_{2,eq}。目前制约中国生物液体燃料发展的主要障碍为较高的原料成本和 2 代燃料转化阶段的关键技术。税费优惠与直接补贴等政策对生物液体燃料的发展至关重要, 可使生物液体燃料尽早实现与化石燃料相竞争, 提前时间为 5~15 年。

本研究建议政策制定者对生物液体燃料的发展做出统筹规划, 支持可持续生物燃料标准和评价体系的建立, 对符合可持续要求的生物液体燃料加强税收优惠和补贴等激励政策; 通过政策引导和增加研发投入, 降低生物液体燃料原料成本; 支持关键技术研发, 分阶段有侧重地对生物液体燃料关键技术进行示范与推广。

在研究方法方面, 本研究有两个层面的主要贡献和创新点。在微观层面, 针对纤维素乙醇技术路线, 将 Aspen Plus 过程模拟引入技术经济分析和全生命周

^① 国家能源局新能源和可再生能源司, 国家可再生能源中心, 2016. 可再生能源数据手册 2016.

期分析过程，实现了纤维素乙醇技术路线经济分析和全生命周期分析的全过程模拟；并基于同一研究平台，对各种生物液体燃料路线的技术经济性进行了分析与比较，对其出厂价格进行分解，识别出影响各种燃料经济性的关键因素。在宏观层面，建立了基于TIMES的以中国本土数据为基础的能源系统动态优化模型，将该模型与清华大学中国车用能源研究中心开发的中国长期交通需求与温室气体排放模型相结合，对我国现在及未来生物液体燃料总体发展趋势进行了分析和预测，估算出我国生物燃料产业减排潜力，提出政策建议与行动计划，为制定生物液体燃料发展路线图提供了依据。

本书系统阐述了作者在中国生物液体燃料技术经济与减排潜力研究方面的成果。该研究受到国家自然科学基金（71203119，71673165，71690244）、国家重点研发计划（2017YFF0211903）以及中丹可再生能源发展项目的联合资助，特此致谢。

由于时间和水平有限，书中难免存在错误或疏漏，恳请读者批评与指正。

作 者

2017年9月6日于清华园

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 发展生物液体燃料的意义	1
1.1.2 生物燃料发展现状	2
1.1.3 生物燃料的分类	4
1.1.4 问题的提出	5
1.2 相关文献综述	7
1.3 本书研究思路、研究对象及内容安排	9
1.3.1 研究思路	9
1.3.2 研究对象	10
1.3.3 内容安排	12
第2章 技术经济分析	14
2.1 纤维素乙醇技术经济分析	15
2.1.1 技术路线	15
2.1.2 情景设计	16
2.1.3 研究方法	17
2.1.4 假设、数据及中间计算结果	21
2.1.5 结果与讨论	34
2.1.6 敏感性分析	36
2.1.7 结论与政策建议	38



2.2 典型生物燃料路线技术经济分析	39
2.2.1 研究内容	40
2.2.2 研究方法	40
2.2.3 情景设计	41
2.2.4 数据与假设	43
2.2.5 结果与讨论	50
2.2.6 结论与建议	63
第3章 全生命周期分析	67
3.1 引言	68
3.2 技术路线	69
3.3 研究方法	69
3.3.1 系统边界与功能单位	70
3.3.2 分摊方法	72
3.4 基本假设	72
3.5 输入数据	73
3.5.1 GREET 模型基础输入数据	73
3.5.2 原料种植与收集	73
3.5.3 乙醇转化	78
3.5.4 燃料乙醇使用	80
3.5.5 原料前处理与各种物料的运输	80
3.6 结果与讨论	81
3.6.1 基础燃料全生命周期分析结果	81
3.6.2 化学品与农化产品全生命周期分析结果	82
3.6.3 纤维素乙醇全生命周期 WTP 阶段分析结果	83
3.7 结论与建议	95
3.7.1 基本结论	95
3.7.2 建议	96
第4章 减排潜力与不确定性分析	98
4.1 研究方法	99

4.2	情景设计	101
4.2.1	影响生物燃料发展的关键因素	101
4.2.2	情景设计	103
4.3	主要数据	105
4.3.1	参考情景数据	105
4.3.2	政策情景数据	109
4.3.3	宏观数据	109
4.3.4	原油及成品油成本	111
4.3.5	化石燃料 CO ₂ 排放	111
4.3.6	生物燃料 GHG 减排因子	112
4.4	情景分析结果	113
4.4.1	参考情景	113
4.4.2	政策情景	123
4.5	讨论	125
4.5.1	本研究与文献结果比较	125
4.5.2	交通能源需求	126
4.5.3	可持续性	128
4.6	结论	128
第5章	研究结论和政策建议	130
5.1	基本结论与政策建议	130
5.1.1	生物燃料供需总体情况	131
5.1.2	生物燃料供应的影响因素及结构特点	132
5.1.3	各种生物燃料的经济竞争力与价格构成	133
5.1.4	生物燃料环境效益	134
5.1.5	政策建议与行动计划	135
5.2	本研究主要贡献及创新点	136
5.2.1	微观层面	136
5.2.2	宏观层面	136
5.3	本研究的不足之处及下一步研究方向	137



参考文献	138
附录 A 纤维素乙醇各生产设备价格确定方法及价格列表	152
附录 A.1 纤维素乙醇工厂设备购置费用计算方法	152
附录 A.2 纤维素乙醇生产厂设备购置费用	156
附录 A 参考文献	175
附录 B 生物燃料全生命周期 GHG 排放与化石能源消耗调研结果	176
附录 B 参考文献	187

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 发展生物液体燃料的意义

生物液体燃料（以下简称“生物燃料”）是可以规模化替代石油基产品的可再生能源，可发挥能源替代、温室气体（greenhouse gas, GHG）减排和大气污染减缓的重要作用。2015 年，我国石油表观消费量为 5.43 亿吨，石油对外依存度达到 60.6%^[1]。预计 2030 年我国国内石油需求量将增加到 6 亿~7 亿吨，2050 年可能将达到 7 亿~8 亿吨^[2, 3]，而同时，国内原油产量在 2020 年甚至 2050 年前，将维持在 2 亿吨左右的水平^[3-5]，石油供需缺口巨大，使我国石油安全面临严重挑战，但也为替代燃料尤其是生物燃料的发展提供了机遇^[3, 6]。从改善中国能源结构，增加稀缺能源品种供应的角度考虑，发展生物燃料具有重要的现实意义^[7]。同时，根据何建坤等（2014）预测，在相对缓和的持续减排情景下，我国的一次能源需求将全面超过供应能力，到 2030 年石油的对外依存度将



超过 75%，二氧化碳排放将在 2040 年左右达到峰值，人均排放将在目前水平上增长约 80%，除珠三角外我国大部分地区的主要城市难以全面达到细颗粒物浓度的国家二级标准，所以必须推动非化石能源的跨越式发展，实现政策目标的根本性转变^[8]。根据国际能源署（International Energy Agency, IEA）的预测，到 2050 年，生物燃料能够满足全球 27% 的交通燃料需求，在保障其可持续发展的前提下，每年将减少 CO₂ 排放 21 亿吨^[9]，因此从环境改善的角度发展生物燃料也具有重要意义。

1.1.2 生物燃料发展现状

我国是全球主要的生物燃料生产国，其产品以燃料乙醇为主，2005—2014 年，我国生物燃料年利用量总体呈现上升趋势（如图 1.1）；2014 年，燃料乙醇产量为 210 万吨，生物柴油产量约 40 万吨，分别占全球燃料乙醇与生物柴油产量的 3% 与 2%（如图 1.2 和图 1.3）。虽然与美国和巴西等国相比，我国的生物燃料总体发展比较滞后，但是，在非粮生物燃料研发方面，还是取得了明显进展。在抗逆性强、高产的能源作物培育和规模化种植基地建设方面，黑龙江、内蒙古、新疆和辽宁等地建立了甜高粱种植、甜高粱茎秆制取燃料基地，小桐子、无患子等木本油料林种植基地规模已达 20 万公顷。在高效转化关键技术研发方面，建立了万吨级纤维素乙醇、万吨级气化合成燃料和万吨级生物航煤等示范工程。龙力生物以玉米芯和玉米秸秆为原料制备纤维素乙醇，已建成年产 5 万吨的

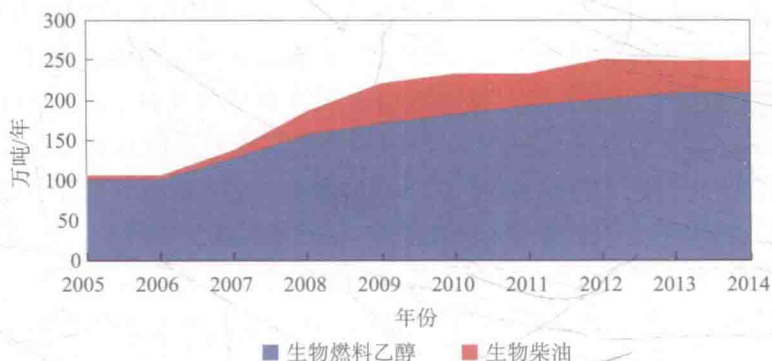


图 1.1 中国生物燃料年利用量（2005—2014 年）

（数据来源：2005—2009 年^[10]；2010—2014 年^[11]）

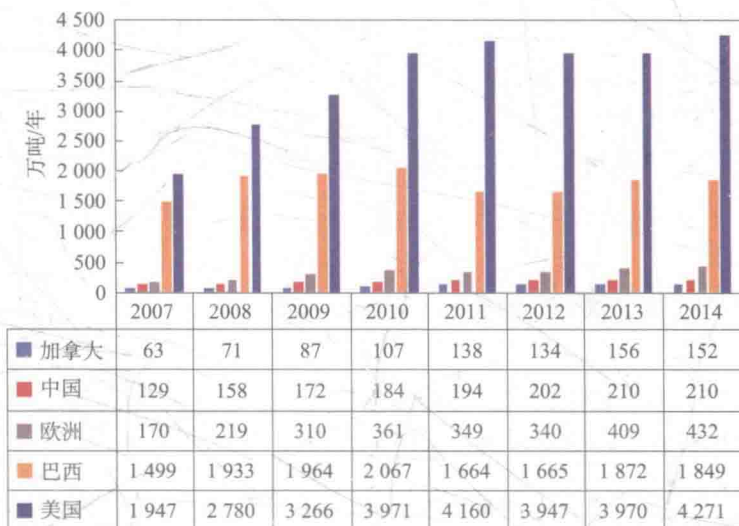


图 1.2 主要燃料乙醇生产国/地区年燃料乙醇产量 (2007—2014 年)

(数据来源: 中国数据^[10, 11], 其他国家数据^[12])

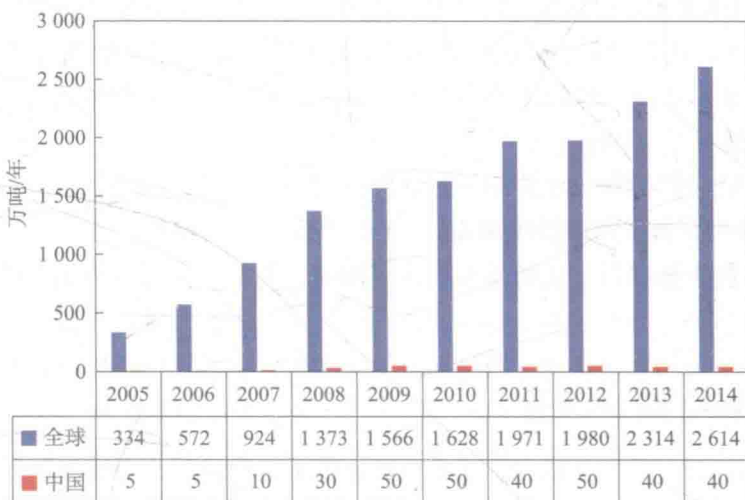


图 1.3 全球及中国生物柴油年产量 (2005—2014 年)

(数据来源: 中国数据^[10, 11], 2005—2012 年全球数据^[13], 2013 年全球数据^[14], 2014 年全球数据^[15])



燃料乙醇项目。阳光凯迪燃油燃气公司建设的万吨级生物质燃油生产线投产。中石化将杭州炼油厂装置改造成一套年产量 2 万吨的生物航空煤油工业装置，并于 2013 年 4 月与东航在一家空客 320 上试飞了生物航空煤油，试飞顺利完成。新奥集团建成了国内规模最大的 11 000 升多层管道式立体培养反应器，用于开发含油微藻。

1.1.3 生物燃料的分类

由于原料类型、转化技术、燃料理化特征、掺混方式和环境排放情况等较为复杂，生物燃料有多种分类方法，本研究涉及以下三种。

1. 根据原料分类

根据生物燃料所使用的原料，将生物燃料划分为以下四类。

(1) 1 代生物燃料，主要指采用玉米等粮食作物、甘蔗等糖料作物和油菜等食用油料作物作为原料生产的燃料乙醇和生物柴油等生物燃料。

(2) 1.5 代生物燃料，主要指采用非粮糖料作物（如甜高粱）、非粮淀粉作物（如木薯）和木本油料植物（如小桐子）等作为原料生产的燃料乙醇、生物柴油等生物燃料。

(3) 2 代生物燃料，主要指采用农林业剩余物（如农作物秸秆）和木质纤维素植物等作为原料生产的纤维素乙醇、F-T 合成生物柴油等。

(4) 3 代生物燃料，主要指采用含油微藻作为原料生产的加氢柴油和航煤等生物燃料。

2. 根据转化技术分类

参照 IEA (2011)^[9]，根据生物燃料转化技术成熟程度，划分为以下两类：

(1) 传统生物燃料，包括 1 代生物燃料和 1.5 代生物燃料中的燃料乙醇和转酯生物柴油。

(2) 先进生物燃料，包括 1.5 代生物燃料中的加氢生物柴油（生物航煤）、2 代生物燃料和 3 代生物燃料。

3. 根据终端利用特点分类

根据生物燃料的终端利用特点,划分为以下三类。

- (1) 替代汽油的生物燃料,包括燃料乙醇、F-T 合成生物汽油和水相催化汽油等。
- (2) 替代柴油的生物燃料,包括转脂柴油、加氢生物柴油、F-T 合成生物柴油等。
- (3) 替代航空煤油的生物燃料,包括加氢生物航煤和 F-T 合成生物航煤等。

1.1.4 问题的提出

我国生物燃料产业尚处于起步阶段,根据我国《可再生能源中长期发展规划》,到 2020 年,燃料乙醇年利用量达到 1 000 万吨,生物柴油年利用量达到 200 万吨,目前,距离这一目标的实现还有较大距离。国家重点支持的技术发展方向不明确,缺乏清晰的产业发展规划与强有力的激励政策。

本研究认为,“技术经济”与“减排潜力”是影响我国生物燃料发展的两个关键因素,前者关注的是该产业发展可行性方面的核心问题,而后者关注的是产业发展可持续性领域的核心问题。

“技术经济”是决定我国生物燃料发展的可行性与发展路径的最根本问题。2010 年我国交通能源消费量占全球消费量的 8%^[16],而目前我国生物燃料年产量只占全球产量的 2.5%^[11, 15],2009 年以来,生物燃料的发展始终处于滞缓状态。其主要原因,一是技术不成熟,经济上缺乏竞争力,二是缺乏政策支持。因而,对生物燃料进行技术经济分析,预测其未来技术进步与价格下降潜力,识别促进各种生物燃料价格下降的关键因素,在此基础上提出促进产业发展的政策建议和行动方案,对于促进整个产业的发展具有重要意义。本研究中的技术经济,包含原料成本、生物燃料转化技术水平以及税费和补贴等因素。技术经济分析的研究目标为:

- (1) 得出生物燃料现在直至 2050 年的出厂价格的总体情况及变动趋势;
- (2) 辨识制约各种生物燃料发展的关键因素,提出促进各种燃料发展需解决的关键问题;
- (3) 设计基于市场手段的激励政策,分析这些政策对促进生物燃料产业发展



的作用,在此基础上提出政策建议和行动计划。

“减排潜力”是影响生物燃料可持续发展的关键因素。我国面临温室气体减排的巨大压力,生物燃料对于减排的贡献成为政府和产业关注的焦点问题之一。生物质在全球碳循环中扮演着非常复杂的角色。近年来,如何科学地定义和衡量生物质能可持续性成为生物质能研究领域的重要议题之一。GHG 减排是可持续生物质能评价的重要指标。全球生物能源合作组织(GBEP)提出了涉及环境、社会和经济 的 24 项可持续指标(The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy, First Edition, 2011),“全生命周期 GHG 排放”被列为第 1 项;可持续生物燃料圆桌会议(RSB)指导委员会发布的生物燃料可持续生产原则第二版(RSB Guidance on Principles & Criteria for Sustainable Biofuel Production, Version 2.0, 2010),包含 12 项可持续原则,其中“GHG 排放”为第 3 项。

生物质能 GHG 减排潜力并不是一个全新的研究题目,保障能源安全与减缓 GHG 排放是全球生物质能源规模化发展的主要推动力量。但是长期的研究积累,尤其是近些年来生物质能产业发展过程中遇到的实际问题,使这个研究题目不断面临新的挑战。传统观点认为,植物在生长过程中会吸收空气中的二氧化碳,具有固碳效应(credit of carbon fixation),可以抵消生物质能在使用阶段的排放,因而生物质能被视为具有碳中和(carbon neutral)性质。但是,越来越多的研究发现,生物质能的碳排放具有较强的异质性,是否可以以及在多大程度上抵消其使用阶段的排放取决于它是怎么被生产出来的^[17-19],也就是取决于它的技术路线。沿着不同的技术路线,生物质能可能具有完全不同特征的 GHG 平衡。

本研究采用直接减排量和全生命周期(life cycle, LC)减排量两种方法来分析生物燃料中长期 GHG 减排潜力。直接减排量的计算,假设生物燃料为碳中和,减排量由替代量与化石燃料排放因子决定。全生命周期减排量的计算,要综合考虑生物燃料在全生命周期中相比于化石燃料的 GHG 减排量。通过减排潜力研究,可以对我国生物燃料发展在 GHG 减排中发挥的作用进行量化,为我国制定相关激励政策提供决策依据。

“技术经济”与“减排潜力”两个问题相互关联,技术经济分析是量化估算我国生物燃料经济减排潜力的基础。

1.2 相关文献综述

在生物燃料技术经济分析领域,目前国内已经有一些研究^[20-31],但这些研究基本都是针对一种或几种具体技术路线进行评价,技术评价涵盖范围有限,并且没有对因技术进步、人工成本与原料价格变化等因素导致的成本变动进行分析和预测,因而难以对中国的生物燃料中长期发展规划与政策制定起到决策支撑作用,迫切需要基于同一研究方法和研究边界对各种生物燃料进行综合而全面的分析及预测。本书将基于同一平台对生物燃料进行全面综合的现状分析及未来预测,以提出促进产业发展的政策建议,并为产业发展路线图的制定提供研究基础。

在减排潜力分析领域,为估算温室气体减排量,需要对生物燃料系统进行分析 and 预测,得到各种液体燃料的总量和结构数据,同时,需要通过全生命周期分析(LCA)或文献调研获得各种生物燃料全生命周期温室气体排放强度数据。

在生物燃料系统性分析和预测方面,国际可再生能源机构(International Renewable Energy Agency)近期发布的一份报告^[32]指出,到2030年,全球生物燃料总量将增长到16 EJ,为目前的3倍,而联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change)的相关评估报告^[33]给出了一个较为宽泛的范围,即到2030年,全球生物燃料年产量将为8EJ~25EJ。许多国家和地区也对本国和本地区生物燃料的发展进行了成本效益分析和预测。Wetterlund等^[34]对生物燃料产量进行了情景模拟;Larsen等^[35]分析和预测了2010—2030年丹麦生物燃料的发展潜力及其对土地利用和农业生产的影响,Martinsen等^[36]对德国用生物质生产交通燃料进行了成本效益分析;Islas等^[37]对墨西哥生物燃料的发展进行了评估;Forsell等^[38]对法国和瑞典的生物质能发展潜力进行了评估。然而,目前还没有针对中国生物燃料发展潜力的深入研究。本书将基于TIMES开发以中国本土数据为基础的能源系统动态优化模型,通过该模型,对我国生物燃料发展进行系统性优化和预测,得出各种生物燃料未来直至2050年的总量数据。

在生物燃料全生命周期分析方面,国内外有大量的研究。

在1代生物燃料领域,申威^[39],张治山^[40],张茜^[41],鲁梨^[42],欧训民^[43],Groode^[44],MacLean & Spatari^[45],Wang et al.^[46, 47]等对中国和美国