

“十二五”国家重点图书

# 液体生物燃料： 从化石到生物质

胡徐腾 等编著

**Liquid biofuels:**  
From fossil to biomass



化学工业出版社

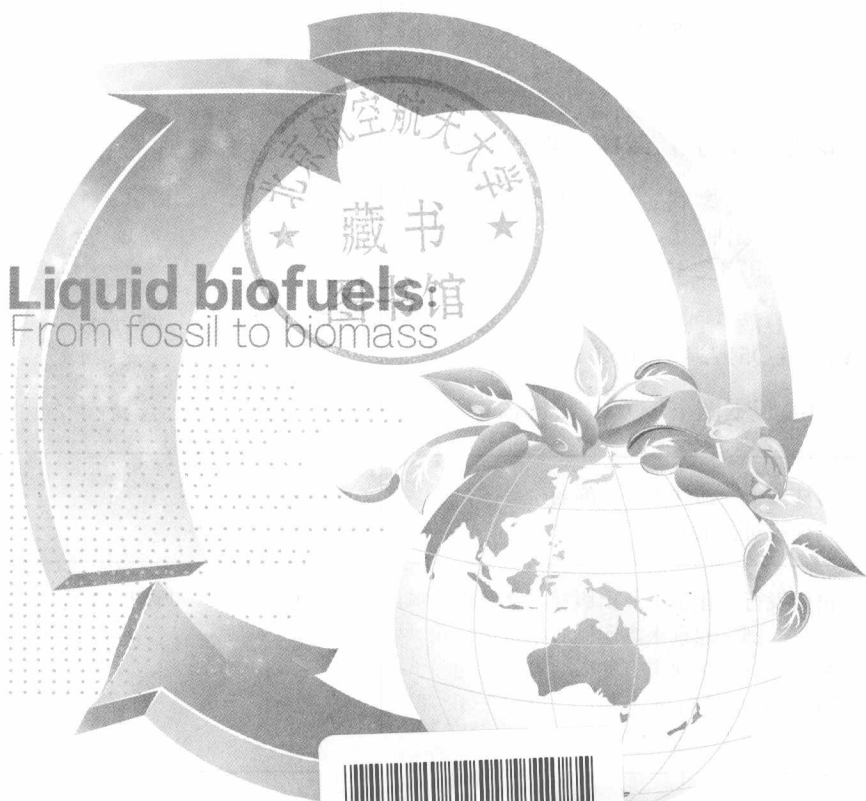
013032644

TQ517.4  
14

“十二五”国家重点图书

# 液体生物燃料： 从化石到生物质

胡徐腾 等编著



北航

C1640173

TQ517.4



化学工业出版社

·北京·

14

013038844

本书介绍了化石能源的利用历程和发展液体生物燃料的背景、意义、市场需求及其发展趋势,阐述了人类从对生物质能的初级利用,演进到对化石能源这一远古时期的生物质能的利用,再走向通过现代生产技术手段,实现可持续的生物质能的利用,为人类可持续发展提供重要能源补充的螺旋式上升历程;全面论述了液体生物燃料的原料资源分布与开发情况,以及燃料乙醇、生物丁醇、生物柴油、航空生物燃料、生物基化学品的市场需求、工艺技术进展、产业化情况和未来发展趋势;同时,对液体生物燃料从全生命周期进行了环境影响评价分析,介绍了液体生物燃料标准、应用情况和产业政策,对未来我国液体生物燃料产业发展模式、发展前景进行了深入分析与展望。

全书从液体燃料发展角度看生物燃料,立意新颖、内容丰富,既有对生物质原料、技术、产品、标准、产业化状况的详细论述,又有对行业总体态势的分析和对未来发展前景的思考,尤其注重对主要液体生物燃料技术和产业化发展现状的分析介绍;书中对我国液体生物燃料产业发展模式的设想和构建现代能源农业循环经济产业链的系统阐述在国内尚不多见,具有较强的实用性和前瞻性。

本书适合国内生物燃料、石油化工行业广大科研人员、生产技术人员、管理人员以及相关高等院校师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

液体生物燃料:从化石到生物质/胡徐腾等编著. —北京:  
化学工业出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-122-16171-0

I. ①液… II. ①胡… III. ①液体燃料-生物燃料-研究  
IV. ①TQ517.4 ②TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 311857 号

---

责任编辑: 郎红旗 梁静丽  
责任校对: 王素芹

文字编辑: 周 侗  
装帧设计: 尹琳琳

---

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订: 三河市万龙印装有限公司  
710mm×1000mm 1/16 印张38 $\frac{3}{4}$  彩插2 字数689千字  
2013年3月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 158.00 元

版权所有 违者必究

Liquid Biofuels:  
From Fossil to Biomass

**液体生物燃料:**  
**从化石到生物质**



## 编著者名单

---

**主 编** 胡徐腾

**副 主 编** 李振宇 付兴国

**其他编著人员** 黄格省 齐泮仑 王建明 李顶杰

何 皓 孙洪磊 任文坡 李雪静

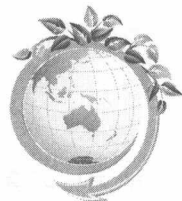
雪 晶 李建忠 赵光辉 董 平

刘蜀敏 马文浩

---

Liquid Biofuels:  
From Fossil to Biomass

**液体生物燃料:  
从化石到生物质**



## 编著分工

---

审阅定稿	胡徐腾	李振宇	付兴国	
第一章	胡徐腾	李振宇	黄格省	任文坡
第二章	李振宇	黄格省	任文坡	
第三章	李顶杰	孙洪磊		
第四章	何皓	王建明		
第五章	董平	李建忠		
第六章	赵光辉	李建忠		
第七章	齐泮仑	付兴国	胡徐腾	
第八章	黄格省	李顶杰	孙洪磊	
第九章	李顶杰	李振宇	任文坡	
第十章	李雪静	齐泮仑	王建明	
第十一章	付兴国	刘蜀敏	马文浩	雪晶
第十二章	胡徐腾	李振宇	黄格省	李顶杰 雪晶

---

# 序

能源与环境问题是 21 世纪人类面临的重大挑战。能源问题的核心是石油问题，以石油为基础的现代交通燃料体系支撑着人类不断发达的物质文明。石油等化石资源越来越少，供应日趋紧张，获取成本越来越高，但消费需求却越来越大，石油价格不断攀升；与此同时，使用化石能源的碳排放量大，也给全球环境保护带来很大压力。因此，寻求可再生、低碳、清洁能源和实现能源的多元化发展成为世界大势，开发适应现代交通燃料体系要求的新型可再生、低碳型交通运输燃料，成为摆在各国面前的重大研究课题。

当今世界，技术进步日新月异，新工艺、新材料、新产品不断涌现，推动经济社会快速发展。特别是石油和化学工业，“技术创新”和“原料多元化”已经成为发展的战略重点，持续取得重大突破，不但研发生产出越来越多的高端下游产品，延伸了产业链，而且极大地促进了生物燃料、现代煤化工等新能源资源的开发与利用，加快了原料多元化进程，有效降低了生产成本和温室气体排放，对能源结构和产业结构都产生了重大影响，为行业实现可持续发展提供了强劲动力。作为一个传统行业的石油和化学工业，也正因为生物燃料等一系列新领域的发展而不断焕发出强大的活力和生命力。

液体生物燃料是最重要、最有发展潜力的生物燃料形式。液体生物燃料因其丰富、可再生的原料来源及产品多样性，与化石能源相比具有实现可持续发展的独特优势，可与现代交通燃料体系相融合，已经成为解决石油资源紧缺与碳排放问题的重要途径之一。美国、巴西、日本以及欧洲各国均将发展液体生物燃料作为其可再生能源的发展策略，在研发资金投入、政策支持等方面给予大力扶持，液体生物燃料技术研发与产业发展取得了较大的进展。

我国是能源消费大国，同时是主要石油净进口国之一，2011 年我国石油对外依存度已达到 55.1%。毋庸置疑，发展液体生物燃料对于满足我国日益增长的交通运输燃料需求具有十分重要的意义。从资源情况看，我国拥有丰富的能源作物、农业和林业生物质、城市生活有机垃圾等资源，可开发边际土地潜力巨大，因此我国发展液体生物燃料的资源潜力十分巨大；从技术发展角度看，我国在生物乙醇、生物柴油、航空生物燃料等领域已经取得了显著进展，具有实现产业化发展的有利条件；从国家政策方面看，我国在发展包括生物燃料在内的可再生能源领域制定了一系列优惠

政策，鼓励具备条件的企业优先发展生物燃料；从产业化方面看，我国是人口大国、农业大国，劳动力资源丰富，发展以生物燃料为主体的“能源农业”对于扩大农村剩余劳动力的就业途径、不断增加农民收入同样具有重要意义。可以说，发展液体生物燃料是我国社会、经济发展的必然选择，是解决“三农”问题的重要途径，也是解决环境问题的重要手段，有助于巩固国家能源安全，是一件利国利民、功在千秋的大事，这已逐渐得到业内人士的普遍认同。

中国石油天然气集团公司（简称“中国石油”）是以化石能源生产开发与加工为主营业务的大型能源公司，在保障我国能源安全和社会经济可持续发展过程中发挥了主力军作用。近年来，中国石油高度关注新能源发展，在生物燃料技术开发方面做了大量开拓性的工作。尤其是以中国石油为主开发的小桐子航空生物燃料，在首都国际机场由国航波音747客机试飞取得圆满成功，填补了我国航空生物燃料的空白，对以生物燃料为代表的新能源发展作出了重要贡献。液体生物燃料的产业化需要先行者，中国石油就是其中的佼佼者，他们做了一项很有益的工作，敢为人先，可喜可贺。

胡徐腾同志是中国石油航空生物燃料项目的组织者，他牵头撰写的这本《液体生物燃料：从化石到生物质》专著，全面阐述了液体生物燃料的开发现状、技术进展、产业化情况和未来发展趋势等各方面的重大问题，并对液体生物燃料产业发展模式和我国能源农业产业链的构建进行了深入的分析展望。全书力图从产业化的角度探索出我国液体生物燃料产业的发展模式和突破口，这种尝试在目前还不多见，实属可贵，值得从业人士学习、阅读，并希望引发大家对生物燃料产业未来发展的深入思考。

液体生物燃料是方兴未艾的朝阳产业，需要政府部门统一协调组织，需要工业、农业、金融等各方力量相互协作、逐步推进。在技术开发和产业化过程中，企业应该发挥自身优势，成为技术创新和推动产业化发展的主体。发展液体生物燃料更需要全社会的关注与支持，希望以本书的出版为契机，全社会都来关注生物燃料的开发，共同促进液体生物燃料产业的发展与壮大。

中国石油和化学工业联合会 会长  
中国化工学会 理事长



二〇一二年十月

# 前言

Foreword

2010年5月26日,中国石油天然气集团公司(以下简称中国石油)与中国国际航空公司、美国波音飞机公司及美国霍尼韦尔UOP公司联合签署了《关于中国可持续航空生物燃料验证试飞的合作备忘录》,计划于2011年在中国进行首次航空生物燃料的飞行演示,验证和展示以非粮原料小桐子生产航空生物燃料的可行性,推动中国可持续航空生物燃料产业化进程,扩大行业影响力。本书的作者团队就负责航空生物燃料关键技术攻关、航空生物燃料生产提供以及协调掺调专用的3号航空煤油的生产供应。经过多方的共同努力,2011年10月28日,加载由中国石油研发生产的航空生物燃料的国航波音747飞机在首都机场腾空而起,满载着对中国液体生物燃料发展的期望进行了58分钟的验证飞行,我们所开发的航空生物燃料技术指标完全满足飞行高度、加速性能和发动机重新启动等各项要求,标志着世界首次从生物原料种植、加工、调和到试飞全部在一个国家完成的航空生物燃料验证飞行取得圆满成功。这是中国航空生物燃料乃至液体生物燃料发展的重要里程碑,作为亲身参与者和见证者,我们感到由衷的自豪。

在筹备试飞的一年半时间里,我们这个团队还先后承担了中国可持续航空生物燃料发展战略研究、木质纤维素生产燃料乙醇、工程微藻制取生物柴油、浮萍与微藻能源化的资源潜力开发、6万吨/年先进航空生物燃料成套技术开发等国家能源局、国家科技部和中国石油的一系列重大课题、国际合作项目。在这些重大项目实施过程中,我们有机会与国内外同行、政府部门、农业林业相关单位进行深层次合作和交流,深感液体生物燃料是一个朝阳行业、大有希望的产业,发展液体生物燃料是一件利国利民的重大举措,其意义在于可使农业更好地融入现代经济,从深层次上推动“三农”问题的解决,这对我们这个农村人口占一半以上的国家而言具有特别重大的意义。同时,我们也看到产业的发展还面临诸多困难和问题,如边际土地的开发、原料的收集、液体生物燃料的推广使用等,需要全社会的共同参与,特别



是政府要在这个产业的发展中起到主导和引导作用，促进现代农业、现代工业、现代物流、现代金融的有效融合，共同把液体生物燃料的全产业链打通，实现产业的良性循环，推动我国经济更好地向低碳经济发展。因此，我们越来越强烈地感觉到，需要出一本书，既要较为全面地普及液体生物燃料的生产技术，又要介绍相关的政策法规和发展环境；既要介绍取得的重大进展，还要直面进一步发展存在的问题和挑战；既要阐述液体生物燃料生产的模式，更要从全产业链角度思考如何加快发展。2011年12月，我们考虑把这本新书定名为《液体生物燃料：从化石到生物质》，并形成了一个初步提纲，从人类利用能源的历史讲起，到液体生物燃料在近年来的发展历程，从现有液体生物燃料的原料，到燃料乙醇、生物丁醇、生物柴油、航空生物燃料、生物基化学品等前沿技术的进展，并对生物燃料的全生命周期碳排放、与现有交通燃料的相容性进行探讨，分析国内外发展液体生物燃料的政策走向，最后探讨未来产业化发展的思路。我们希望通过这本书，阐述人类从利用化石能源——远古时期的生物质，走向通过现代先进技术手段，实现可持续的生物质利用，为人类可持续发展提供重要能源补充的螺旋式上升的发展历程，促进社会更加重视液体生物燃料产业的发展，唤起更多的同行者。

产生这个想法之后，我们多次向石油化工行业的泰斗、液体生物燃料的倡导者闵恩泽院士和农业专家、液体生物燃料的先行者石元春院士汇报和请教，得到两位院士的鼓励 and 热情支持。闵先生和石先生都是两院资深院士，他们从能源和农业的战略高度，为本书的写作提出很多重要的意见，使我们获益良多。他们还热情推荐本书入选国家新闻出版总署组织的“十二五”国家重点图书，更使我们欣喜无比，也让我们感受到了沉甸甸的责任。清华大学新能源研究所副所长李十中教授多次与我们深入探讨，毫无保留地把自己在第1.5代燃料乙醇等方面的最新研究成果与我们共享。美国杜邦公司的王建平先生对本书的写作提出了很好的建议。众人拾柴火焰高，在此我们衷心感谢各位前辈、先行者和同行对本书、对液体生物燃料产业的支持和帮助！

在本书的写作过程中，感觉到最难写的是第十二章。液体生物燃料产业应如何发展，如何打通从农业生产、原料收集到工业生产、进入现代交通燃料配送体系的全产业链循环，如何实现现代农业、现代工业、现代物流、现代金融的有机融合，等等，这些问题已经超越了液体生物燃料技术和行业的本身，涉及全社会的共同参与和政府、企业、农民等的良性互动，很显然，这已经不是一个公司、一套技术、一个行业所能解决的问

题。而这些问题，又是形成液体生物燃料全产业链循环、实现可持续发展必须面对和解决的问题。我们不希望把这本书仅仅定位在液体生物燃料知识的传播，而是希望整理出一个初步的产业发展思路，提出一个解决办法建议，第十二章就是对如何破题的思考。成书时第十二章经过了数十次的反复讨论、修改，与最初的想法已经完全不一样。每一次讨论都是一个认识深化的过程，我们在第十二章提出了液体生物燃料发展的四个模式，展现了四个“绿色大庆油田”的美好前景，同时对发展液体生物燃料全产业链进行了分析和探讨，提出了我们对制约发展的重大问题和解决问题的着力点的思考，对试点模式的建议，以及对未来发展的展望。

在本书即将完成之际，中国石油和化学工业联合会会长、中国化工学会理事长李勇武同志欣然命笔为本书作序，深刻分析了我国液体生物燃料发展的基础，高屋建瓴地指明了未来发展方向，并对这本书的编写出版工作给予了高度评价，对我们是莫大的鼓励和鞭策。李会长亲自作序，使我们深切感受到老一辈能源行业领导对新能源发展的期盼，更加坚定了我们推进液体生物燃料产业化的信心。

由于水平和对其他行业了解的限制，我们这本书还难免有疏漏的地方，对液体生物燃料产业未来发展的思考可能不一定正确或全面，但我们还是愿意写出来，供大家评判和交流。无论是什么样的意见，都将引发对这个产业发展的深层次思考。

2012年11月26日，194个国家参加的《联合国气候变化框架公约》第十八次缔约方大会(COP 18)在卡塔尔首都多哈开幕。在“中国角”系列边会活动上，中国石油天然气集团公司作了《中国石油航空生物燃料试飞及未来发展》主题报告，引起了各国代表和新闻媒体的高度关注和强烈反响。在感到欣慰的同时，更让我们深深感到推进液体生物燃料产业化、促进节能减排的迫切要求，已经不仅仅是一个国家、一个行业、一家企业的事情，而是事关全人类共同发展的大事。

坐论尚需起行。我们希望，政府主管部门、企业、科研院所、农业林业相关单位和全社会都来关注并支持液体生物燃料产业的发展，有更多的同行加入到产业化先行者的队伍，共同打造现代能源农业的循环产业链，推动我国液体生物燃料产业更大更好地发展！

胡徐腾

二〇一二年十一月



▲ 甘蔗



▲ 甜高粱



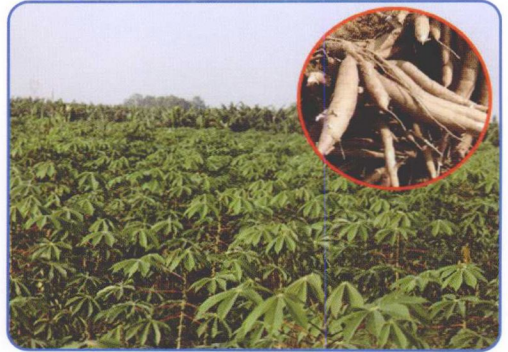
▲ 甜菜



▲ 玉米



▲ 小麦



▲ 木薯



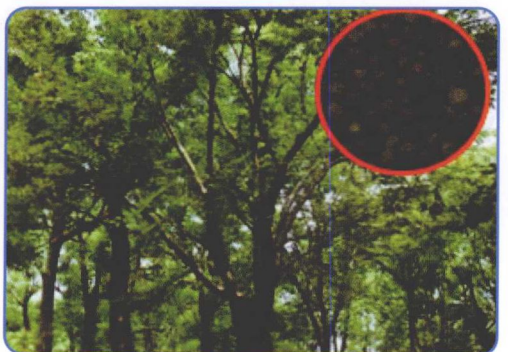
▲ 浮萍



▲ 小桐子



▲ 棕榈



▲ 黄连木



▲ 文冠果



▲ 光皮树



▲ 乌桕



▲ 千年桐



▲ 油茶



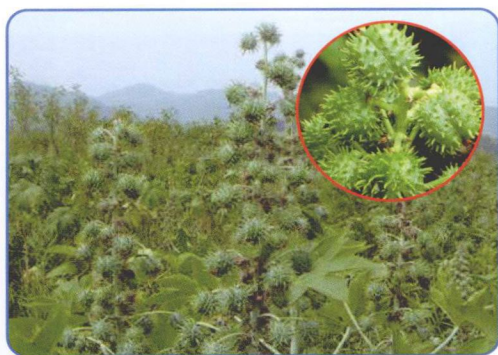
▲ 大豆



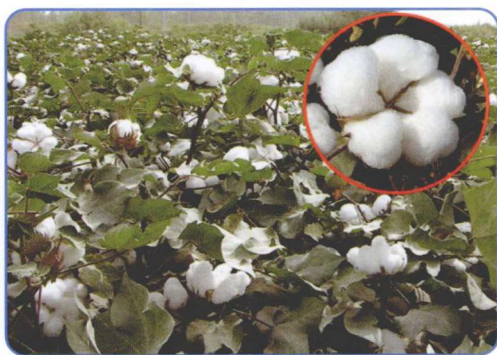
▲ 油菜



▲ 亚麻荠



▲ 蓖麻



▲ 棉籽



▲ 油莎豆



▲ 续随子

## 第一章 液体燃料：从生物质到化石，再到生物质 1

第一节 化石能源：从生物质到化石 .....	4
一、化石能源的起源 .....	4
二、人类能源的利用历程 .....	7
三、未来人类能源的多元化趋势 .....	9
第二节 现代交通运输体系：液体燃料成为能源主体 .....	11
一、石油：工业的血液 .....	12
二、液体燃料：当代社会最重要的能源利用形式 .....	14
三、液体燃料支撑现代交通运输体系 .....	15
第三节 液体燃料：从化石到生物质 .....	18
一、生物质的生命历程 .....	19
二、生物燃料：异军突起的新能源 .....	19
三、液体生物燃料：与石油消费共成长 .....	22
四、从化石走向生物质 .....	22
参考文献 .....	26

## 第二章 液体生物燃料的发展历程 29

第一节 液体生物燃料的发展 .....	30
一、燃料乙醇 .....	30
二、生物丁醇 .....	34
三、生物柴油 .....	35
四、航空生物燃料 .....	37
第二节 推动液体生物燃料产业发展的动力 .....	40
一、能源消费需求快速增长的驱动 .....	40
二、能源消费成本不断上升的驱动 .....	43
三、可持续发展和环境保护要求的驱动 .....	50
四、能源与农业共同发展的驱动 .....	52

参考文献	54
------	----

### 第三章 生物质原料

57

第一节 生物质原料概述	58
一、生物质的基本概念	58
二、生物质资源分类	59
三、生物质原料的化学组成和理化性质	60
第二节 糖和淀粉类原料	64
一、糖类原料	64
二、淀粉类原料	68
三、糖、淀粉类原料对比	72
第三节 纤维素类原料	73
一、农作物秸秆	73
二、林业生物质原料	74
第四节 油脂类原料	75
一、概述	75
二、油料能源植物开发利用现状	75
三、我国油脂类原料的分类及地域分布	76
第五节 藻类原料	88
一、微藻的分类	88
二、微藻的优势	89
三、微藻原料开发利用现状	91
四、微藻作为生物燃料原料目前存在的问题	93
第六节 生物质原料资源的现状与前景	95
一、世界生物燃料原料供应现状	95
二、世界生物燃料原料供应模式概况	99
三、我国生物质原料资源现状及未来发展前景	102
参考文献	109

### 第四章 燃料乙醇

113

第一节 燃料乙醇的原料来源	114
---------------	-----



第二节 燃料乙醇生产技术的发展 .....	116
一、乙烯直接水合法 .....	117
二、乙烯间接水合法 .....	118
三、其他化学合成方法 .....	119
四、发酵法的再度兴起 .....	119
第三节 第1代生物燃料乙醇生产技术 .....	120
一、基本工艺流程 .....	120
二、国外应用开发现状 .....	130
三、国内应用开发现状 .....	132
四、国内外技术对比 .....	135
第四节 第1.5代生物燃料乙醇生产技术 .....	137
一、基于木薯的生物燃料乙醇生产技术 .....	137
二、基于甜高粱的生物燃料乙醇生产技术 .....	141
第五节 第2代生物燃料乙醇生产技术 .....	146
一、纤维素水解发酵制燃料乙醇 .....	147
二、生物质合成气发酵制燃料乙醇 .....	180
第六节 燃料乙醇发展展望 .....	187
一、第2代生物燃料乙醇的技术突破 .....	187
二、第3代生物燃料乙醇技术 .....	189
三、我国生物燃料乙醇发展建议 .....	190
参考文献 .....	194

## 第五章 生物丁醇

203

第一节 生物丁醇生产技术的发展 .....	204
一、生物丁醇产业化现状 .....	204
二、生物丁醇生产技术概况 .....	206
第二节 生物丁醇主要生产技术 .....	209
一、生物丁醇发酵机制 .....	209
二、生物丁醇发酵菌种 .....	211
三、生物丁醇发酵底物 .....	213
四、生物丁醇发酵工艺 .....	214
五、生物丁醇发酵分离耦合技术 .....	218