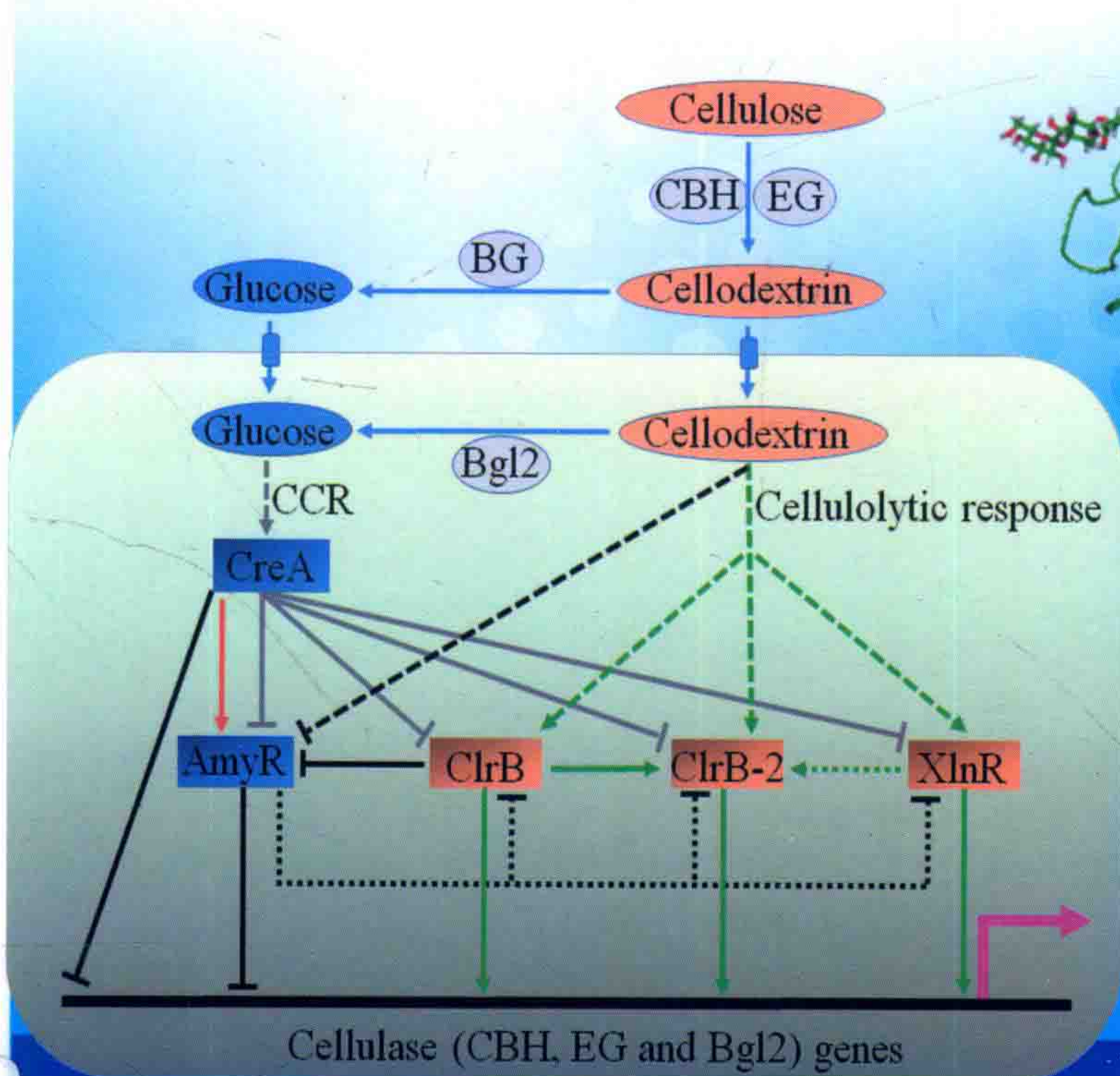
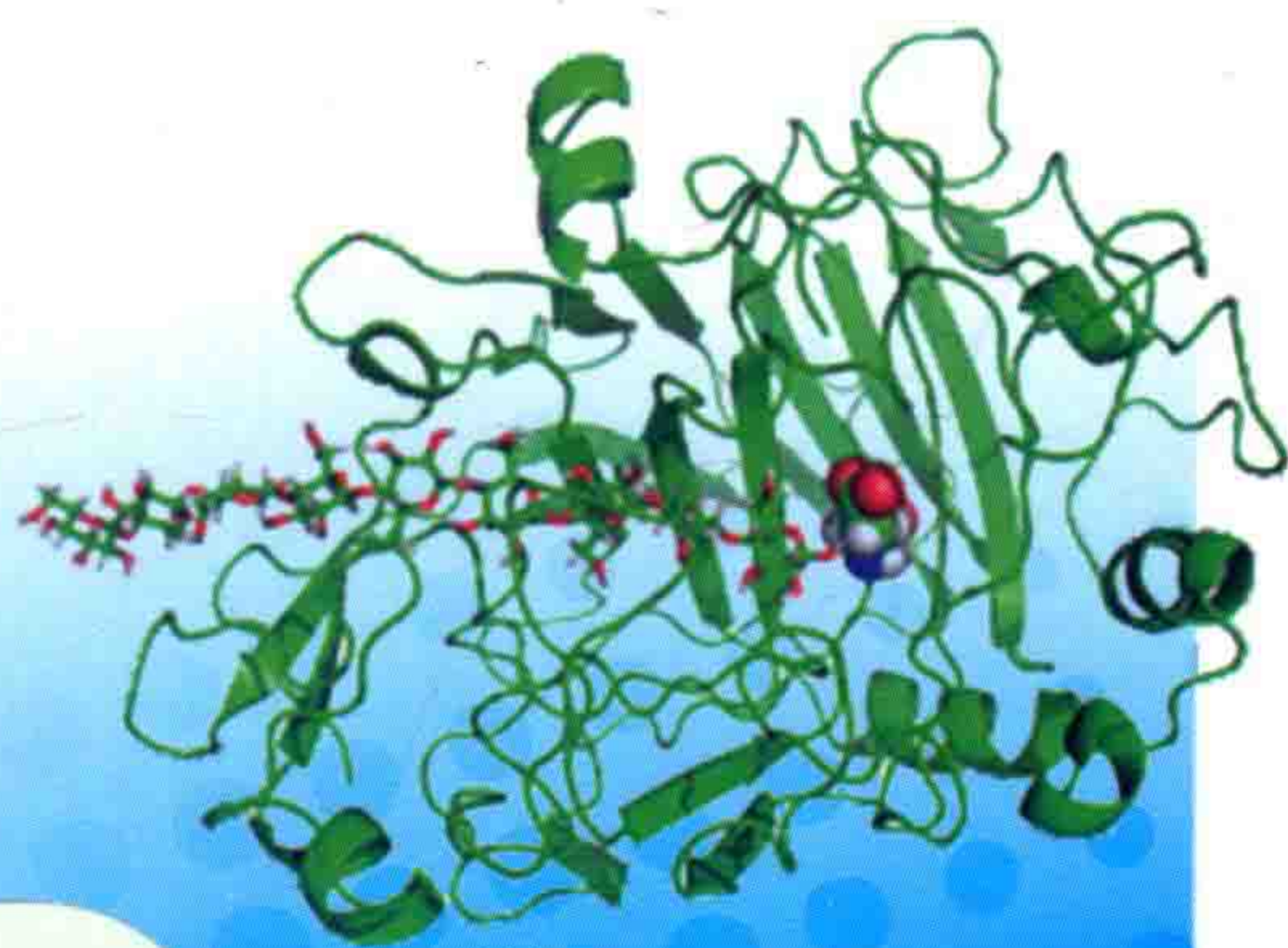


Unedible Biomass Biorefinery Technology  
Lignocellulosics Degradation Enzyme System and Its Synthesis Regulation

# 非粮生物质炼制技术

## 木质纤维素生物降解机理及其酶系合成调控

曲音波 等著



**Unedible Biomass Biorefinery Technology**  
**Lignocellulosics Degradation Enzyme System and Its Synthesis Regulation**

# 非粮生物质炼制技术

木质纤维素生物降解机理及其酶系合成调控

曲音波 等著



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

非粮生物质炼制技术——木质纤维素生物降解机理及其酶系合成调控 / 曲音波等著. —北京 : 化学工业出版社, 2016.8

ISBN 978-7-122-27452-6

I . ①非… II . ①曲… III . ①木纤维-纤维素-生物降解  
②木纤维-纤维素酶-合成酶 IV . ①TQ352.6

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第145183号

---

责任编辑 : 傅四周  
责任校对 : 吴 静

装帧设计 : 韩 飞

---

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 : 三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张20 彩插4 字数488千字 2017年1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 : 99.00元

版权所有 违者必究

# 著者名单

(按姓氏汉语拼音排序)

蔡鹏丽	陈冠军	陈玲	陈秀珍	崔球	戴欣	东秀珠
董亮	董志扬	樊飞宇	公维丽	黄力	江艳萍	李福利
李忠海	林良才	刘国栋	刘睿	刘巍峰	刘亚君	刘志丹
卢雪梅	孟冬冬	倪金凤	秦玉琪	曲音波	田朝光	王禄山
韦小敏	魏勇军	许成钢	严兴	杨腾腾	张翀	张坤迪
张丽丽	张伟欣	周志华	邹根			

## 主要著者

曲音波	山东大学微生物技术国家重点实验室
崔球	中国科学院青岛生物能源与过程研究所
刘巍峰	山东大学微生物技术国家重点实验室
董志扬	中国科学院微生物资源国家重点实验室
王禄山	山东大学微生物技术国家重点实验室
周志华	中国科学院上海生命科学研究院
田朝光	中国科学院天津工业生物技术研究所

## 序言

当今社会的发展模式过于依赖以石油为主体的化石资源，导致的能源、资源、环境危机已成为21世纪制约社会经济可持续发展的主要瓶颈。开发新的可持续再生的替代资源已成为世界各国的紧迫任务。木质纤维素是地球上最丰富的可再生资源。通过生物炼制过程将其各组分转化为液体燃料和大宗化学品，可以有效地减少对不可再生资源的依赖，保护生态环境，对加快转变经济发展方式，开拓新的经济增长点，实现社会经济的可持续发展具有十分重要的战略意义。

木质纤维素生物炼制的核心是如何将复杂的木质纤维素资源高效降解，以及如何将其高效转化为高价值的生物基产品。植物细胞壁复杂的化学组成和结构成为其抗降解的天然屏障，使得木质纤维素难以被降解。而传统的预处理手段效率低下或成本高昂，往往只能获得部分组分，并且会含有多种抑制性的降解产物，因此其全组分高效转化利用是亟待解决的关键问题。木质纤维素原料的生物炼制技术一直是近三十年来的研究热点，就其研发本身仍然处于它的发展初期，但随着近年来的科技发展，很多过去的技术难点正在逐渐被突破。木质纤维素生物降解转化研究的局势也已经发生了巨大的变化，利用木质纤维素原料制备气体燃料、液体燃料、大宗化学品等均已实施产业化制备或正处于大规模产业化生产的前期探索。

受曲音波教授与姜岷教授的委托，为本书作序，初看书稿之余，欣然领命。正值国家“十三五”规划开年之际，本书的出版顺应了“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念。我国人口众多，而能源和资源的自给率在逐年下降，木质纤维素资源的高效利用转化具有十分重要的战略价值和现实意义。虽然受到近年石油价格下行的冲击，但通过木质纤维素制备诸多产品依旧拥有广阔的发展前景。本书不仅是国家“十二五”期间国家重点基础研究发展计划（973计划）项目（2011CB707400，木质纤维素资源高效生物降解转化中的关键科学问题研究）的成果总结，而且是从事相关研究的专业人员多年来在科研方面经验的积累。作为项目的跟踪专家，共同见证并参与了该项目技术攻关的历程。参与写作的每位作者都是国内长期从事所著章节相关领域的专家和一线研究者，对各章节内容具有较深的理解与体会。

我真诚地希望，通过本书的编写和出版，传播相关的基础知识和研究进展，吸引更多的专家学者参与木质纤维素生物炼制技术的研发，进而推动我国相关生物技术产业的快速发展和木质纤维素资源的广泛有效利用，为实现社会经济的可持续发展做出贡献。



中国工程院院士 南京工业大学教授

2016年6月

## 前言

木质纤维素类生物质资源是地球上最丰富的可再生性有机资源。利用可再生性木质纤维素资源，降解转化生产液体燃料和化学品，是解决资源、环境和农村发展等紧迫问题，实现人类社会可持续发展的根本途径。木质纤维素资源的生物降解转化研究和生物炼制技术的产业化代表了生物化工产业的发展方向，有着广阔的发展前景，已经引起了越来越广泛的关注。其中生物降解途径的糖平台是国际普遍重视的最主要的技术路线。然而，自然界中木质纤维素的生物降解效率通常都达不到使新技术实现产业化的要求，从而成为木质纤维素生物炼制技术得以实际应用的主要瓶颈。不少读者迫切希望了解这方面的基础知识和最新进展。

2011年，化学工业出版社曾出版过本书部分作者所编著的《木质纤维素降解酶与生物炼制》一书，对相关研究发挥了很好的推动作用。为加强相关的基础研究，探索突破技术屏障的方案，我们于2010年组织了中科院6家研究所和4所国内知名大学的30余位优秀中青年学者，合作申报了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目《木质纤维素资源高效生物降解转化中的关键科学问题研究》（2011CB707400），并成功获得了国家2800万元的经费支持。五年多来，项目组成员紧紧围绕相关的科学问题，开展了深入的研究工作，圆满地完成了计划任务。为了更好地向社会传播新增的理论和最新的技术研发进展，我们这次组织项目组的部分成员，认真整理和总结最近几年在国家巨额资金支持下所取得的重要研究进展，合作编写了两本专著：第二、三、四课题侧重木质纤维素微生物降解相关的基础研究，编写了《非粮生物质炼制技术——木质纤维素生物降解机理及其酶系合成调控》；第一、五、六课题侧重相关过程工程的技术研发，编写了《非粮生物质炼制技术——木质纤维素生物炼制原理与技术》，介绍给全国的相关读者，算是在上一本书的基础上对相关知识的扩展和深化。

作为木质纤维素生物炼制技术的核心知识基础，本书系统地介绍在长期的自然进化过程中，微生物所形成的多种多样的木质纤维素降解机制：丝状真菌如何把数十种与生物质降解相关的蛋白质分泌到自己菌丝的周围，协同降解结构和组分十分复杂的天然植物纤维材料；个体较小的细菌害怕自己辛苦合成的酶蛋白所产生的产物被“邻居”抢走，就在自己的细胞壁上组建了结构复杂的“分子机器”[纤维小体（纤酶小体）或未知的第三种策略]，把降解产生的糖及时吸收进自己的细胞；在牛、白蚁、堆肥等复杂生境中，动物与微生物或微生物之间紧密协作，相互配合，共同构建了高效的降解体系。为了尽可能节省自己在降解难降解生物质过程中的能量和物质消耗，微生物在亿万年的进化过程中，形成了极其精细的酶系合成、分泌途径的调节控制网络，尽可能地让其合成的酶蛋白刚好能满足自己的最基本需求，

而不造成一点儿浪费。而这些为微生物自身服务的精细调控过程的目标，恰恰与人们希望某些微生物能无私地为人类服务而大量、高效、无限地生产胞外降解酶系的期望是相反的。本书将集中介绍我们对这些复杂降解酶系及其精细调控网络的一些最新认识，进而讨论如何利用这些认识，去设计利用分子改造来提高酶系合成效率的可能策略。

尽管目前我们对这些复杂降解体系的认识仍然还很初步，但是我们相信，书中介绍的木质纤维素降解酶系合成调控网络和酶系组成重构的成功事例，必将会启发大家去更活跃地大胆思考，为有兴趣的读者提供创新的思路，更有力地推动我国木质纤维素生物降解的研究发展。让我们共同为提高木质纤维素资源的生物降解效率，实现我国非粮生物质生物炼制技术的产业化，为破解我国经济和社会发展所面临的资源、环境、就业等瓶颈，建立清洁的绿色生物经济，最终为人类社会的可持续发展的永续发展做出较大的贡献。

由于本书是国家973计划项目成果的结晶，涉及作者众多，难免会出现一些问题和不足，敬请同行专家和细心的读者提出批评和建议，留待我们今后进一步修订改正。



2016年4月12日

## 1 导论：人类社会的可持续发展与木质纤维素降解酶系的改造

1

1.1 发展生物质经济，应对人类社会可持续发展面临的严峻挑战	1
1.1.1 以石油为代表的化石能源的供应不可持续，急需开发绿色替代能源	1
1.1.2 减少温室气体排放、控制气候变暖，实现绿色低碳经济转型	3
1.1.3 生物能源与生物炼制产业——经济发展的新增长点	4
1.2 木质纤维素生物炼制产业发展面临的机遇和挑战	5
1.2.1 纤维素乙醇技术已开始进入产业化阶段	5
1.2.2 木质纤维素生物炼制产业发展仍面临巨大挑战	8
1.3 木质纤维素资源高效生物降解转化中的关键科学问题	11
1.3.1 木质纤维素类生物质的抗降解屏障	12
1.3.2 微生物木质纤维素降解酶系组成的复杂性和多样性	15
1.3.3 微生物木质纤维素降解酶系合成的调节与控制	31
1.3.4 木质纤维素降解真菌的组学研究	38
1.4 纤维降解酶的分子改造与高效降解酶系的构建	40
1.4.1 纤维素酶家族及其催化结构域分子改造	40
1.4.2 纤维降解酶系组成的改造	45
1.4.3 人工构建高效纤维素降解复合酶体系	46
参考文献	46

## 2 厌氧细菌纤维素降解多酶复合体的解析及重构

53

2.1 高温厌氧纤维素降解细菌及其降解酶系统	53
2.1.1 高温厌氧纤维素降解细菌的多样性	53
2.1.2 高温厌氧细菌纤维素降解酶系的多样性	54
2.1.3 多模块糖苷水解酶热适应性机制	56
2.1.4 糖苷水解酶底物选择性机制	58



2.2	纤维小体的表达调控	59
2.2.1	纤维小体基因在基因组中的分布规律	59
2.2.2	热纤梭菌纤维素降解相关酶系的表达调控	61
2.2.3	解纤维梭菌纤维素降解相关酶系的表达调控	62
2.2.4	纤维小体 <i>cip-cel</i> 基因簇的进化规律	63
2.3	纤维小体的解析、体外重构和性能改良	65
2.3.1	纤维小体模块单元的结构特征	65
2.3.2	人工纤维小体构建及体外功能分析	69
2.3.3	产纤维小体梭菌的基因工程改造	71
2.3.4	纤维小体的体内功能分析及改良	74
2.4	纤维小体及产纤维小体梭菌在生物燃气中的应用	76
2.4.1	生物燃气的重要性	76
2.4.2	秸秆高效转化生物燃气的意义与瓶颈	77
2.4.3	纤维素降解菌强化同步糖化产气研究现状	77
2.4.4	产氢微生物群落结构解析	79
2.4.5	秸秆高效转化生物氢烷工艺探索与中试实践	81
2.5	展望	84
	参考文献	85

### 3 好氧细菌降解纤维素的机制

95

3.1	褐色热裂孢菌的纤维素降解酶体系	95
3.2	哈氏噬纤维菌与纤维素降解	97
3.2.1	哈氏噬纤维菌纤维素酶的性质	98
3.2.2	哈氏噬纤维菌的糖转运相关蛋白	99
3.3	滑动细菌的运动及分泌相关蛋白	100
3.4	预测的第三种纤维素降解机制模型	104
	参考文献	104

### 4 天然木质纤维素生物复合降解系统解析

108

4.1	白蚁木质纤维素降解系统	108
4.1.1	白蚁及其肠道消化系统	108

4.1.2	低等白蚁的木质纤维素降解系统	111
4.1.3	高等白蚁的木质纤维素降解系统	112
4.2	瘤胃纤维素降解微生物的元基因组学和元转录组学研究	114
4.2.1	瘤胃木质纤维素降解过程及其降解菌	115
4.2.2	瘤胃木质纤维素降解的元基因组学研究	116
4.2.3	瘤胃木质纤维素降解的元转录组学研究	120
4.3	堆肥微生物区系的动态变化和元蛋白组分析	121
4.3.1	堆肥微生物区系	122
4.3.2	堆肥微生物区系的动态变化	123
4.3.3	堆肥群落的功能分析	126
4.4	苕麻池元基因组文库构建和功能基因筛选	126
4.4.1	碱性苕麻池微生物多样性分析	127
4.4.2	碱性苕麻池 Fosmid 文库的构建	127
4.4.3	Fosmid 文库中生物质降解酶的筛选	127
4.5	沼气污泥元基因组文库构建和功能基因筛选	129
4.5.1	厌氧沼气发酵系统	129
4.5.2	沼气厌氧发酵系统的群落结构解析	130
4.5.3	沼气污泥的元基因组分析	131
4.5.4	沼液元基因组 Fosmid 文库的构建和功能筛选	133
4.5.5	木质纤维素酶基因的获取、表达和功能分析	134
	参考文献	137

## 5 里氏木霉纤维素降解酶系的合成调控与分子改造

143

5.1	诱导里氏木霉纤维素酶表达的外界因子及其作用方式	143
5.2	里氏木霉 $\beta$ -葡萄糖苷酶的种类及其功能研究	144
5.2.1	里氏木霉 $\beta$ -葡萄糖苷酶的种类	144
5.2.2	里氏木霉 $\beta$ -葡萄糖苷酶在纤维素酶诱导表达过程中的作用	145
5.3	与里氏木霉纤维素酶表达相关的转录因子	147
5.3.1	ACE II	148
5.3.2	Xyrl	148
5.3.3	CreI	149

5.3.4	ACE I	150
5.3.5	Hap2	151
5.4	调控水解酶表达的信号途径 (信息高速公路)	152
5.4.1	环腺苷酸cAMP信号转导途径	152
5.4.2	G蛋白信号转导途径	152
5.4.3	MAPK信号转导途径	153
5.4.4	钙离子信号转导途径	153
5.5	里氏木霉糖转运蛋白在纤维素酶诱导合成中的作用	154
5.6	从“组学”的角度解析影响里氏木霉纤维素酶产量的关键因素	157
5.7	里氏木霉纤维素酶生物合成研究的新视点:表观遗传修饰	159
	参考文献	160

## 6 青霉木质纤维素降解酶系及其合成调控

165

6.1	草酸青霉的菌株选育和产酶特征	165
6.1.1	草酸青霉的菌株选育	166
6.1.2	草酸青霉主要纤维降解酶的结构和性质	168
6.1.3	纤维素酶的翻译后修饰及其作用	176
6.1.4	草酸青霉木质纤维素降解酶系合成的调控	178
6.2	草酸青霉基因组学、转录组学和蛋白分泌组学研究	182
6.2.1	草酸青霉的基因组和蛋白质组	182
6.2.2	野生株与高产纤维素酶突变株的比较基因组学研究	191
6.2.3	草酸青霉转录组学和分泌组学分析	195
6.3	草酸青霉纤维素酶合成调控中诱导信号的产生和传递	200
6.3.1	草酸青霉纤维寡糖转运蛋白参与诱导物的转运	201
6.3.2	草酸青霉的 $\beta$ -葡萄糖苷酶及其在纤维素酶系中的作用	205
6.3.3	胞内 $\beta$ -葡萄糖苷酶参与纤维素酶系的诱导合成	209
6.4	纤维素降解酶系表达调控网络中的信号传递	212
6.4.1	G蛋白信号通路与纤维素酶合成调控的关系	212
6.4.2	酪蛋白激酶2对纤维素酶和淀粉酶合成的正向调控作用	214
6.5	草酸青霉纤维降解酶系合成调控涉及的转录因子	215
6.5.1	草酸青霉转录因子基因缺失突变体库的构建和筛选	216

6.5.2	CreA对纤维素酶表达的调控	219
6.5.3	ClrB对纤维素酶表达的调控	220
6.5.4	XlnR对纤维素酶表达的调控	223
6.5.5	转录因子对 $\beta$ -葡萄糖苷酶基因表达的调控	223
6.6	草酸青霉纤维降解酶系合成调控网络的解析与重构	225
6.6.1	CreA和ClrB调控纤维素酶基因表达的协同配合	226
6.6.2	纤维素酶与淀粉酶表达的耦联调控	230
6.6.3	转录因子调控纤维素酶基因表达的剂量效应	234
6.6.4	胞内Bgl2与转录因子在表达调控中的累加效应	236
6.6.5	调控网络改造对木质纤维素降解酶系组成的影响	242
	参考文献	245

## 7 真菌纤维降解酶系合成、分泌及动态酶谱分析

251

7.1	粗糙脉胞菌纤维素降解酶系的合成与分泌机理	251
7.1.1	木质纤维素酶系的诱导	251
7.1.2	纤维素酶系表达的转录调控	256
7.1.3	内质网应激和纤维素酶合成分泌分子机理研究	258
7.2	丝状真菌酶谱时序分析及胞外蛋白质组比较研究	263
7.2.1	糖苷水解酶动态酶谱方法的建立	264
7.2.2	黑曲霉、里氏木霉及草酸青霉酶谱时序分析	265
7.2.3	三类真菌胞外分泌蛋白质组学的差异比较	267
	参考文献	270

## 8 木质纤维素降解酶系的改造和高效酶系重构

275

8.1	底盘生物遗传操作系统的构建和改造	275
8.1.1	底盘生物遗传操作方法	275
8.1.2	底盘生物遗传转化系统的选择标记	278
8.1.3	底盘生物遗传操作的改造优化	279
8.2	酶合成调控元件——调控因子和启动子改造	282
8.2.1	正调控转录因子	282

8.2.2	负调控转录因子	283
8.2.3	利用酶合成调控元件进行启动子改造	284
8.3	转译后修饰对酶活性和分泌的影响	286
8.3.1	<i>N</i> -糖基化修饰途径	286
8.3.2	<i>N</i> -糖基化修饰对酶活和分泌的影响	287
8.3.3	<i>O</i> -糖基化修饰途径	288
8.4	复合酶系的复配及其在细胞工厂中的合成	292
8.4.1	木质纤维素的组成和结构	292
8.4.2	木质纤维素降解需要多种酶的共同作用	292
8.4.3	天然木质纤维素酶系的局限性和解决办法	296
8.4.4	真菌中高效表达异源纤维素酶的问题和策略	299
	参考文献	299

# 1

## 导论：人类社会的可持续发展与木质纤维素降解酶系的改造

曲音波 王禄山 刘国栋

### 1.1 发展生物质经济，应对人类社会可持续发展面临的严峻挑战

第二次世界大战结束之后，人类社会进入了一个长时间相对稳定的和平发展时期。和平发展的重要原因之一是随着石油等化石能源的大规模开发利用，社会经济迅猛发展，人们的生产能力和生活水平快速提高，抑制了各种矛盾和战乱的发生和发展。可以毫不夸张地说，以石油为代表的化石资源是现代工业文明社会发展的基石。然而，进入21世纪以来，越来越多的人开始认识到，作为关键性化石资源的石油等是不可再生的。随着全球经济的不断发展，这些一次性的化石资源迅速地被消耗，必将在本世纪的中后期出现供应紧张，并逐步接近枯竭。很明显，化石资源的不可再生属性对现代文明的可持续发展构成了巨大的威胁。与此同时，原来深埋地下的大量化石燃料被突然开挖出来并被燃烧掉，导致二氧化碳等温室气体的排放量不断增加，大气中的二氧化碳浓度升高，造成了全球气候不断变暖，开始引发冰川减少、海平面升高、气候异常等生态灾害，引起了越来越多民众的广泛关注。能源、资源、环境问题已经成为制约新世纪人类社会经济和生态可持续发展的主要瓶颈。在中国，经济的快速发展使我们面临的问题更加突出：一方面是快速增长的能源消费使中国的石油对外依存度达到了近60%，在消耗了国家大量外汇的同时，直接威胁了国家的经济安全；另一方面是化石燃料的大量燃烧，使中国的生态环境受到严重破坏，雾霾等恶劣天气已成为部分地区的常态。实践证明，现有的工业和经济发展模式已经难以为继，开发新的可持续的绿色清洁替代能源，已成为世界各国的紧迫任务。

#### 1.1.1 以石油为代表的化石能源的供应不可持续，急需开发绿色替代能源

毫无疑问，石油是现在世界上不可缺少的最重要的资源。环顾我们的四周，不论是地上跑的汽车、天上飞的飞机，还是身上穿的衣服、家里用的器具用品，人们的衣食住行都已经与石油和石油化工产品无法分离了。如今，世界每天消耗的原油就高达9000余万桶。世界经济的现代化，很大程度上得益于石油、天然气、煤炭等化石能源的广泛使用。因而可以说，现代经济和现代文明都是建筑在化石能源基础之上的经济和文明。然而，令人不安和恐惧的是，石油等化石资源的储量是有限的，而现有的地质环境下已经不再具备其大规模快速生成的条件，因而它们是不可再生的资源，而不是可以取之不尽、用之不竭的。按现在的石油开采速度，乐观地估计，也就至多能再开采百年而已。而随着人类需求量的不断增大，可能这个时间还要提前。2008年全世界探明的石油总储量为1838.8亿吨，全年的石油开采量为36.48亿吨。按照这一开采水平，到2058年，全世界的石油资源就将“枯竭”。当然随着

科技的进步，全世界仍在不断发现新的油田，新增探明石油储量，同时采收率也可提高，能源利用效率也可能提高，真正出现“枯竭”的时间会晚一些。比较突出的例子是，近年来，随着新的开采技术的发展，美国兴起页岩气开发浪潮，页岩气产量大幅度增长，2011年达到1720亿立方米，使美国的天然气和石油进口大幅下降。据美国能源信息署（EIA）预计，2030年前后北美地区将成为石油净出口地区。但是整体看，全球新增的探明石油储量总是低于新增的石油消费量，并无法改变石油等化石资源终将枯竭的宿命，我们只是不知道何时会终结罢了。我们不能消极地等待化石能源的耗竭，积极寻找新的替代能源是我们唯一的出路。只是人类一直寄以巨大希望的核聚变工业，到2050年还没有实现产业化的希望，无法替代化石能源需求。如不能及时寻找到新的替代能源，化石能源供应与化工原料链条的中断，必将导致世界经济危机和冲突的加剧，最终葬送现代经济和现代文明。

我国是石油资源相对贫乏的国家。大庆油田、胜利油田等大型油田在经过多年的大规模开发之后，已经进入了高含水、低采出、总体产量逐步递减的阶段。而中西部地区的石油资源埋藏得太深、地表复杂，开采技术要求很高。由于中国还缺乏深水勘探技术及设备，我国的海洋石油勘探进展缓慢。自大庆油田开发仅30年之后的1993年，中国就再次成为石油净进口国。此后，中国的石油储采比（探明的剩余可采储量与当年采量之比，即目前石油剩余可采储量可供开采的年数）就一直维持在14至16的范围内，仅及2004年世界石油平均储采比43的1/3。根据国家的有关资料显示，中国的石油储备量仅占全球石油储备量的2%。有专家乐观预计，全球现有的石油储量可维持100年左右的消耗。而如果按现有的消耗量，中国的原油资源不到50年就将消耗殆尽。2016年1月26日，国家智库中国石油集团经济技术研究院发布的《2015年国内外油气行业发展报告》（<http://www.in-en.com/finance/html/energy-2233459.shtml>）称，2015年中国的实际石油消费增速达到4.4%，达到5.18亿吨。石油净进口量达到3.28亿吨，较2014年增长6.4%。2015年中国石油的对外依存度首次突破60%，达到60.6%。预计到2030年，中国每年将消费8亿吨原油，其中近3/4将需要进口。石油稳定供应已成为国家经济安全问题。随着美国页岩油气开采技术的提高，其国内石油生产明显回暖，自给率持续上升。而中国近年来的石油生产增长缓慢，消费需求却还在不断增加，中国必将超越美国，成为最大的石油进口国。我国页岩气可采资源也有巨大的发展，但开发的难度要比美国高得多，短期内能否发展存在很大争议。

石油资源的短缺早已不是什么新鲜的话题了。当石油等不可再生能源出现紧张乃至枯竭时，人类社会的生存和发展将受到很大的制约。如果不能正确地处理好国际间的供求关系，为了石油而燃起的战火也可能是难以避免的。我们应该尽快开发出更好的新替代资源和实用技术，尽可能为我们的子孙后代保留部分珍贵的石油资源，尽量延缓石油资源枯竭时刻的到来。作为后发展国家，中国面对日益严重的能源危机，必须未雨绸缪，早作打算，努力开创人类可持续发展的新文明。开发新的可持续供应的替代能源，将成为中国应对能源危机的必然选择。

生物质是地球上唯一可超大规模再生、足以支撑人类生存发展的能源和实物性资源。一般地估算，每年地球上通过植物光合作用合成的植物生物质有数千万吨。其中除部分用作人类的粮食和动物的饲料外，相当一部分非可食用的木质纤维素材料是生物质资源的主体部分（占其总量的80%以上），价格低廉，供应充足，尚未得到充分的开发利用。我国是世界上最大的农业国，仅每年的农作物秸秆总产量就超过7.8亿吨。据2010年的统计数据显示，当年我国农作物秸秆年产出量中，秸秆还田及收集损失约占15%，剩余的5亿多吨秸秆中除了部

分作为饲料、工业原料外，大部分被就地焚烧或作为农村的初级燃料，利用效率极低，而且造成了严重的环境污染。如果把全国年产约8亿吨农作物秸秆中的一半用来生产纤维乙醇，按5吨秸秆生产1吨乙醇的收率计算，可以生产8000万吨燃料乙醇，相当于2012年的全国汽油消费总量。而且，废弃的秸秆转化乙醇完全不涉及占用土地和水资源的问题，具有特别重要的意义。利用现代生物技术，大规模开发和利用可再生性的非粮木质纤维素类生物质资源，将其降解转化为液体燃料和大宗化学品，可以减缓石油等不可再生资源的消耗，降低人类社会对原油的过度依赖，通过能源供应的本地化和能源品种的多元化，开发利用本地资源来替代进口石油，保证国家的能源独立和经济安全，有效地缓解能源、资源紧缺，维持经济社会的有效运转，迈向绿色低碳经济未来，开辟人类后化石燃料的循环经济新时代。

### 1.1.2 减少温室气体排放、控制气候变暖，实现绿色低碳经济转型

2013年9月30日，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布了其第一工作组第五次评估报告《气候变化2013：自然科学基础》（<http://www.climatechange2013.org/>）。报告指出，“二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的大气浓度至少已上升到过去80万年以来前所未有的水平。自工业化以来，二氧化碳浓度已增加了40%，这首先是由于化石燃料的排放”，“对总辐射强度的最大贡献来自于1750年以来的大气CO<sub>2</sub>浓度的增加”，“对于1950年以来观测到的变化，人为因素极有可能是显著和主要的影响因素”。报告指出，“温室气体继续排放将会造成进一步增暖，并导致气候系统所有组成部分发生变化。限制气候变化将需要大幅度 and 持续地减少温室气体排放。”

2014年6月17日，中国和英国政府于伦敦发表了《中英气候变化联合声明》。声明严正指出，气候变化危险所带来的威胁是我们面临的最大全球挑战之一。政府间气候变化专门委员会第五次评估报告的发布已确认，气候变化已在发生，而且很大程度上是由人类活动所导致。威胁人类生命财产的极端天气事件，其频率正在增加。海平面在上升、冰层正融化，其速度比我们预期更快。报告明确提出，除非我们现在就开始行动，否则气候变化的影响将在未来几十年更加恶化。此外，化石能源燃烧造成严重的大气污染，影响了千百万人的生活质量。双方认识到气候变化和大气污染在很多方面同根同源，许多解决方法也是共通的。这需要我们立即采取行动。声明中明确指明了化石能源燃烧与气候变化、环境污染的关系，也为我们指明了“控制或减少排放、推动低碳发展”的发展方向。我们必须为此做出积极的努力。部分发达国家试图通过征收碳税，或建立更稳定的可再生燃料标准（Renewable Fuel Standards）或低碳燃料标准（Low-Carbon Fuel Standards）来限制化石燃料使用，推动可再生能源发展，正是这种努力的具体表现。

中国是发展中国家，人均生产力水平还较低，仍需要继续发展经济。按照规律，随着经济的增长，二氧化碳的排放总量会跟着增加。但只要我们采取“绿色低碳”的发展路径，对发展方式和能源结构进行较大的调整，仍然能使经济增长和碳排放脱钩。为解决严重的污染问题，中国这个全球最大的碳排放国家，早在2009年就设下在2020年使单位国内生产总值的二氧化碳排放量较2005年下降40%至45%、非化石能源占一次能源消费的比重达到15%左右等目标，并为此出台一系列的治理措施。截至2013年，中国的碳强度已经下降28.56%，相当于减少25亿吨二氧化碳的排放；非化石能源占一次能源消费的比重则达到了9.8%，因此有信心确保2020年能实现目标。2014年11月12日中美两国政府在北京亚太经合组织（APEC）会议期间发表了关于气候变化的联合声明，宣布“中国计划2030年左右二氧



碳排放达到峰值且将努力早日达峰，并计划到2030年非化石能源占一次能源消费的比重提高到20%左右”。而实现这一宏伟目标，我们需要付出艰苦的努力。

发展生物能源将是减少温室气体排放、发展低碳经济的重要举措之一。虽然生物燃料燃烧使用时也会产生二氧化碳，但由于生物燃料本身的生成就是植物利用光合作用吸收二氧化碳的结果，整个过程构成了一个封闭循环，没有多余的二氧化碳净生成。因而，生物能源是低碳的和对环境友好的，对生物能源（生物燃料）的利用只是人类利用自然界碳循环的一个环节来为自己服务，不会对气候造成太大的影响。在这个过程中，没有什么废物，因为所有用过的“废料”（包括二氧化碳）都将被用作新产物的原料。

现有粮食类生物质的生产过程是需要消耗大量化石能源的（机械耕作收获、化肥农药使用、人工灌溉等），以至使用粮食转化的生物燃料真正能减少的化石能源消费比较有限，加上其对粮食供应的影响，发展粮食转化生物能源技术（如谷物或甘蔗生产乙醇、油脂生产生物柴油等），受到了部分人群的强烈质疑和反对。而利用农林废弃物（秸秆、工业残渣、木屑等）、城市有机垃圾等转化生产乙醇等生物燃料，就不存在这类问题。特别是如将秸秆中的木质素部分用于燃烧产汽、发电，不仅可以供应加工过程中的能量消耗，甚至还会有部分电力外输。

### 1.1.3 生物能源与生物炼制产业——经济发展的新增长点

发展生物能源与生物基化学品生产能够在减少化石能源消耗、保护生态环境和减缓温室效应的同时，还可以开拓新的经济增长点，加快经济发展方式的转变，促进全球经济的可持续发展。特别是对农业生产延伸、农村经济发展、农民就业增收，以及维护社会的和谐与稳定，都将产生积极的促进作用。这对于我们这样一个人口众多，能源和资源紧张的国家来说，具有特别重要的战略意义和现实意义。

然而，目前的生物能源和生物炼制技术多半是以植物中人类可食用的部分（淀粉、糖分、脂肪等）为主要原料生产的。而粮食的增产是受到可耕种的土地、淡水和肥料等同样紧缺的资源的严格限制的。作为世界最大的人口大国，中国的可耕地和淡水资源明显不足，粮食增产受到限制。利用粮油发展生物经济已经或必将产生粮食供应问题。目前中国每年进口粮食超过7000万吨，随着城市化和农耕面积日渐缩小，这个数字可能还会再提高。中国发展生物经济绝不能走欧美利用粮油来发展生物能源产业的老路。对此，中国政府已有清醒的认识，明令限制粮食乙醇和玉米深加工产业的发展。而高效利用农林废弃物等非粮生物质来发展生物经济，将会极大地推动农业的发展，有利于增加农民收入，促进国家的协调和谐发展。我国《可再生能源中长期发展规划》指出，要积极发展以纤维素生物质为原料的生物液体燃料技术。2012年国家发布的《生物产业发展规划》也明确把“突破纤维素乙醇原料预处理、低成本水解糖化关键技术瓶颈”作为生物产业的主要任务之一。

我们可以发展的替代石油的新能源的种类很多，如水电、风电、核电、太阳能、潮汐能等。但能直接以液态燃料和有机化工产品的方式来替代石油资源的，则非生物质莫属。在中国，约70%的石油最终用途是汽车、轮船、飞机等交通运输工具的液体燃料，其余约30%的石油是用于制造化工产品等工业品。由于可以直接替代紧缺的汽油等液体石化燃料的燃料乙醇市场缺口巨大，乙醇作为乙烯、高级燃料和化学品原料的潜力也很大，纤维素乙醇在短期内仍将是生物能源和生物炼制产业最被看重的产品。

值得注意的是，乙醇只是目前受到关注的主要产品，随着电动汽车技术的进步和普及，