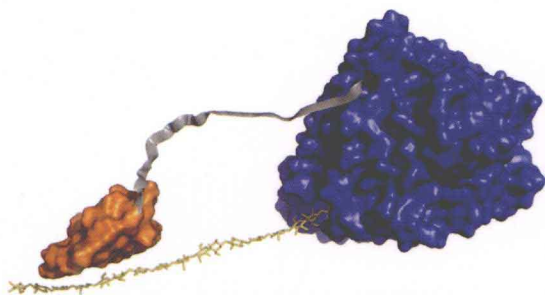


Lignocellulose Degrading Enzymes
and Biorefinery

木质纤维素降解酶 与生物炼制

曲音波 等编著

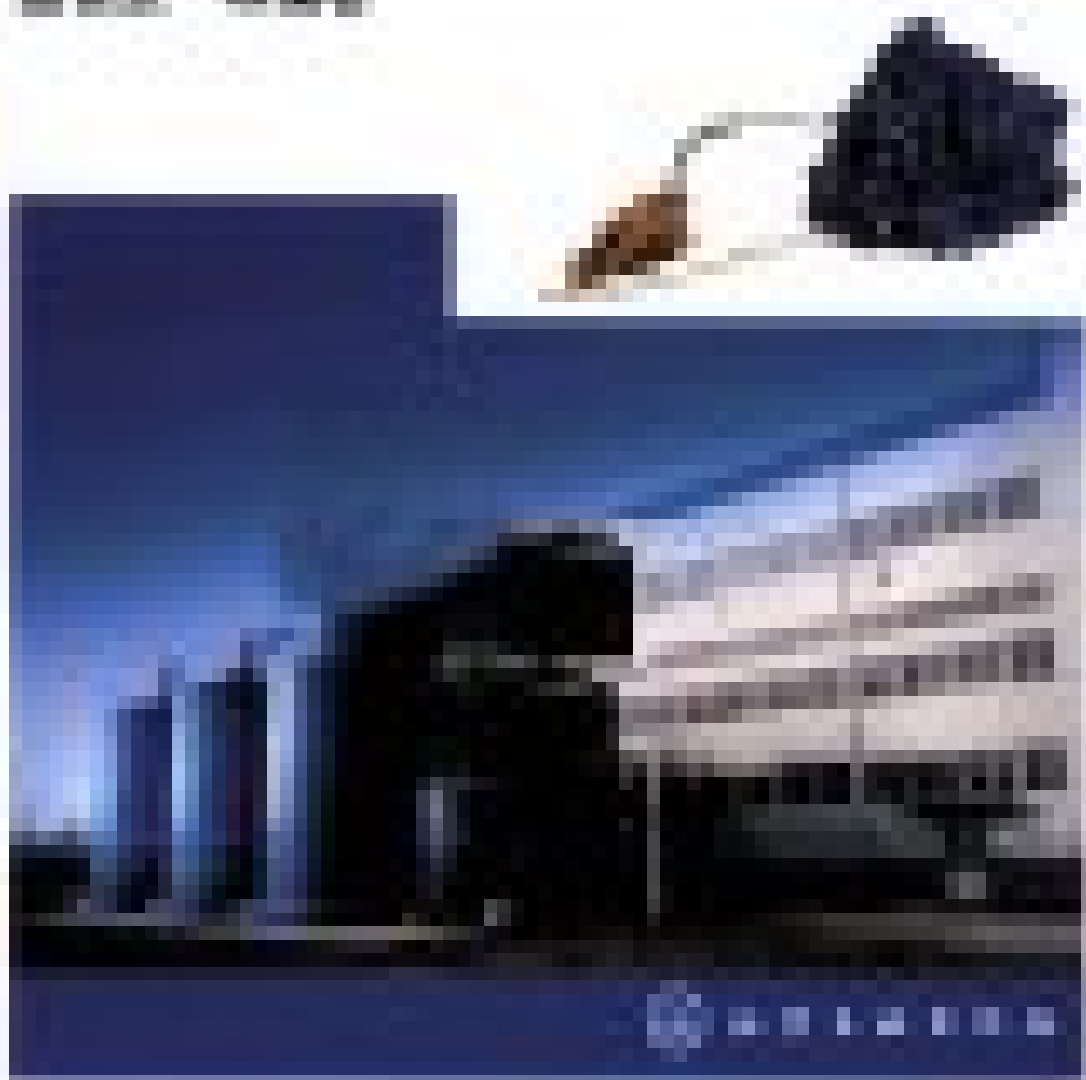


化学工业出版社

Lignocellulosic Degradating Enzymes
and Biorefinery

木质纤维素降解酶 与生物炼制

曹文虎 主编



9 787302 010000

**Lignocellulose Degrading Enzymes
and Biorefinery**

木质纤维素降解酶 与生物炼制

曲音波 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

木质纤维素降解酶与生物炼制/曲音波等编著. —北京:
化学工业出版社, 2011.7
ISBN 978-7-122-11311-5

I. 木… II. 曲… III. 木纤维-纤维素酶-生物降解
IV. Q814

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 092105 号

责任编辑: 孟嘉 傅四周
责任校对: 顾淑云

装帧设计: 关飞

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: 三河万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 447 千字 2011 年 9 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: 79.00 元

版权所有 违者必究

编著人员

(按姓名汉语拼音排序)

鲍晓明

陈冠军

方 诩

高培基

刘巍峰

曲音波

沈 煜

汪天虹

王禄山

赵 建

前言

进入 21 世纪以来,越来越多的人认识到,石油等关键矿产资源将在本世纪中后期逐步接近枯竭。同时,化石燃料的燃烧导致二氧化碳排放量不断增加,造成全球气候变暖。能源、资源、环境问题已经成为制约新世纪社会经济可持续发展的主要瓶颈,引起了人们的广泛关注。现有的工业发展模式已经难以为继,开发新的可持续的绿色替代能源和资源已成为世界各国的紧迫任务。

生物质是地球上唯一可大规模再生、足以支撑人类生存发展的能源和实物性资源。其中非粮的木质纤维素部分价格低廉,供应充足,且未得到充分开发利用。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,既可以减缓石油等不可再生资源的消耗,降低我国对原油的过度依赖,有效地缓解能源资源紧缺,保证国家能源安全,维持国家经济的有效运转,又能够在保护生态环境和减缓温室效应的同时,开拓新的经济增长点,加快经济发展方式转变,促进全球经济的可持续发展。同时,对农业生产延伸、农村经济发展、农民就业增收,及维护社会的和谐与稳定将产生积极的促进作用。对于我国这样一个人口众多、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,作为支撑和保护组织,植物细胞壁在长期的自然进化中形成了木质纤维素复杂的化学成分和结构,成为其抗微生物和酶攻击的天然屏障,使生物质难以被降解。当前,已有的木质纤维素的生物转化过程多半都还是不够经济的。只有加强相关的基础研究,实现技术进步,开发出新一代生物炼制技术,才能实现生物燃料和化学品的可持续性供给,并在价格上具有优势。

生物降解转化的核心关键技术是如何将复杂的生物质高聚物高效降解为单糖,及其中的特殊单糖如何高效转化为生物基产品。人们在相关的结构基础及材料预处理、酶法水解等方面已经开展了大量的研究工作,取得了一些进展。但当前生物质转化相关技术的建立主要还是依靠经验的方法,基于对生物质生物学或化学属性的理解与知识很有限,还很不深入。近年来飞跃发展的分子生物学和系统生物学,特别是最近对植物发育、碳水化合物化学、细胞壁超微结构、微生物降解机理等方面的研究,为研究者们提供了生物质转化研究的新视角,为认识和改造植物和微生物提供了近乎无限的机遇和可能。

国内相关基础研究目前起步良好,有机会与各国在同一起跑线上竞争。但要想在这一关系经济、民生的重大战略问题上取得先机,急需针对生物质抗降解屏障与生物转化的难点,继续围绕相关的关键科学问题开展更深入的研究。所以,完全有必要编写一本与“木质纤维素降解酶与生物炼制”相关的专门著作,针对新技术涉及的一系列难点和问题,系统介绍该领域的基础知识和前沿进展,为培养一支高级专业技术队伍提供专门的教材和参考书,提高我国相关生物技术产业的理论与实践的水平。

山东大学的微生物学科开展纤维素降解微生物学、纤维素酶学及降解机理、生物质转化

等相关研究已有近 50 年的历史。经过王祖农教授、高培基教授等几代人几十年坚持不懈的努力，在纤维素降解、转化的基础和技术研究领域取得了大量备受国内外同行关注的研究成果，发表的纤维素酶相关的 SCI 论文数量在国内排在首位，在全球研究单位中排名第 18 位。先后获得了 10 余项国家和省部级二等以上的科研奖励。

在基础研究方面，所在的微生物技术国家重点实验室组织成立了由近 20 位教师参加的木质纤维素微生物降解转化课题协作组，连续获得并主持了一项相关的国家 973 项目 (2011CB707400，木质纤维素资源高效降解转化中的关键科学问题研究) 和另外两个相关项目的课题 [糖苷酶及其催化反应特性 (2003CB716006) 和秸秆纤维素酶解过程分子结构变化与高效降解纤维素生物构建 (2004CB719702)]，以及大量国家自然科学基金项目。在深入进行了木质纤维素的微生物降解机理研究的基础上，探讨了微生物降解纤维素的限速因素；利用现代分子生物学技术改造了木质纤维素降解菌及其酶蛋白分子，筛选到了新的降解酶或新蛋白因子。实验室从自然界中筛选到一株能高效降解植物纤维类生物质的斜卧青霉菌株，并获得该菌的多株抗降解物阻遏纤维素酶高产突变菌株。最近，已完成了对多株斜卧青霉菌株的全基因组测序，正在利用系统生物学技术深入探讨其酶系组成和酶合成调控机理。实验室还开展了细菌及丝状真菌纤维素、半纤维素降解和代谢酶的酶学及分子生物学研究，以及酿酒酵母木糖代谢工程研究。

在应用基础和技术研究方面，“高活性纤维素酶的制造方法”等 10 余项成果获得了国家发明专利。选育出的青霉纤维素酶抗降解物阻遏高产突变株，早已用于规模化生产工业用酶；已开发出多种利用纤维废物生产纤维素酶、酒精和菌体蛋白饲料的新工艺。开发出的玉米芯生物炼制生产纤维素乙醇技术，已经建成可年产 3000t 纤维素乙醇的中试车间，正在进行成套生产工艺的中试放大和设备改造研究，投资建设年产万吨级以上纤维素乙醇的示范工厂。

基于这些科研方面经验的积累，组织本实验室从事相关研究的部分专业人员，利用各自的特长，共同编写了这本书。本书侧重介绍了相关的研究内容及技术前沿进展，包括木质纤维素生物降解转化技术的意义、进展与展望 (第 1 章，曲音波、王禄山)、植物纤维资源的结构及其理化性质 (第 2 章，赵建)、降解纤维素的微生物及其酶系 (第 3 章，陈冠军、刘巍峰、王禄山)、纤维素酶类糖苷水解酶及其降解机理 (第 4 章，王禄山、高培基)、纤维素酶基因及酶系的分子改造与优化 (第 5 章，汪天虹)、纤维素原料全糖乙醇发酵菌株选育与改造 (第 6 章，鲍晓明、沈煜)、原料预处理技术 (第 7 章，赵建)、纤维素酶生产和纤维素糖化发酵技术 (第 8 章，方翎)、木质纤维素资源的生物炼制技术及其前景 (第 9 章，曲音波)。曲音波对全书进行了统一校改。

本书突出的特点在于，参与写作的每位作者都长期从事与所写章节相关领域的研究，对各章的内容有较深刻的理解和体会，在介绍相关基础知识的同时，在写作中注意突出了对包括笔者的研究在内的最新研究进展的介绍，可以帮助新近进入这一研究领域的科学研究工作者和工程技术人员，能够对这一复杂的多学科交叉的科学和工程技术问题较快地获得较深入的了解，进而积极加入到这一项关系人类未来的战略性科技革命中来。

当然，木质纤维素资源的微生物降解转化研究和生物炼制技术研发本身就处于它的发展初期，其中涉及的很多科学技术难题目前都还没有真正突破，作者们也只能提出和讨论相关的问题，而无法给出圆满和完整的答案，还需要行业内的科研人员共同来研究突破。同时，

由于作者们都还是第一线的研究工作者，繁重的科研教学任务使编写工作显得有些匆忙，难免会出现一些纰漏和不足，非常期望专家和读者们能不吝赐教，以使这项工作做得更好。

在本书的编写过程中，部分同行专家和化学工业出版社的编辑同志们给予了很多鼓励和帮助，部分研究生同学提供了一些支持，稿件中引用了部分同行发表或提供的资料，本书的编写和出版还得到了国家 973 计划项目（2011CB707401）等科学基金的资助，作者在此一并致以诚挚和衷心的感谢！

真诚地希望，通过本书的编写和出版，可以认真总结我们多年来的相关研究经验，通过介绍相关的基础知识和研究进展，传播相关知识，培养出一支我国木质纤维素类生物质降解转化的专门科学技术队伍，推动我国相关生物技术的快速发展，特别是推动木质纤维素资源的广泛应用，对构建植物生物质生物炼制新型产业发挥积极的促进作用，为实现经济社会的可持续发展做出应有的贡献。

曲音波

2011 年 6 月

目 录

第 1 章 概论——木质纤维素生物降解转化技术的意义、进展与展望	1
1.1 社会发展过程中的资源、能源、环境问题	1
1.2 木质纤维素生物降解转化技术的工艺路线和研究进展	6
1.2.1 植物纤维原料预处理技术	8
1.2.2 纤维素酶生产技术	8
1.2.3 乙醇发酵菌株选育和戊糖代谢工程菌构建	9
1.2.4 纤维素糖化发酵工艺	9
1.3 纤维素发酵产乙醇技术的产业化	10
1.3.1 国外纤维素乙醇产业化的进展	10
1.3.2 国内纤维素乙醇产业化的进展	10
1.3.3 生物炼制和产物多样化	11
1.3.4 纤维素资源生物炼制技术的发展战略	12
1.4 木质纤维素生物降解转化研究中的关键科学难点问题	12
1.4.1 植物纤维类生物质的抗生物降解性	13
1.4.2 物理化学预处理仍是暴露细胞壁纤维素的有效方法	14
1.4.3 木质纤维素生物降解机理和相关酶类的工作效率	15
1.4.4 微生物攻击天然植物生物质的机理及其多样性和新酶源的发现	16
1.4.5 真菌降解木质纤维素复杂酶系的解析、合成调控及重组	16
1.4.6 纤维来源糖类的发酵进入了系统和合成生物学时代	18
1.5 新一代纤维素降解转化技术的发展思路和研究策略	19
1.6 实现纤维素生物炼制技术产业化的前景	21
参考文献	22
第 2 章 植物纤维资源的结构及其理化性质	24
2.1 可再生的木质纤维素资源及分类	24
2.1.1 木材纤维原料	24
2.1.2 非木材纤维原料	25
2.1.3 二次纤维原料	25
2.2 木质纤维素资源的组织结构层次	25
2.2.1 植物纤维原料的生物结构	25
2.2.2 细胞壁的微观结构	27
2.2.3 主要化学成分在细胞壁中的分布情况	29
2.3 木质纤维素的组成成分及分析技术	32

2.3.1	纤维素	32
2.3.2	半纤维素	33
2.3.3	木素	35
2.3.4	次要成分	37
2.3.5	木质纤维素成分的分析测定技术	38
2.4	纤维素的结构层次分析及定量测定技术	41
2.4.1	纤维素的结晶结构	41
2.4.2	纤维素超分子结构中的氢键	42
2.4.3	纤维素的细纤维结构	43
2.4.4	纤维素结构的分析及定量测定技术	43
2.5	木质纤维素生物质结构的复杂性及其抗降解屏障	46
	参考文献	48

第3章 降解纤维素的微生物及其酶系 50

3.1	降解纤维素的微生物	50
3.1.1	细菌域微生物	50
3.1.2	古菌域微生物	54
3.1.3	真核生物域	55
3.2	微生物的纤维素降解酶系	61
3.2.1	纤维素酶的催化类别	61
3.2.2	纤维素酶系的组合形式	61
3.3	高效降解纤维素微生物的筛选及选育过程	67
3.3.1	常规方法筛选纤维素酶产生菌	67
3.3.2	高产纤维素酶生产菌种的选育	68
3.3.3	基因工程途径构建产纤维素酶高效工程菌	70
3.3.4	关于耐热纤维素酶的研究	73
3.3.5	环境基因组与未培养微生物纤维素酶的筛选	73
3.3.6	环境蛋白质组学及其在寻找新纤维素酶及非酶因子中的应用	80
3.4	纤维素酶合成的调控机理	81
3.4.1	诱导机制假设	81
3.4.2	诱导因子与纤维素酶及半纤维素酶的诱导表达模式	81
3.4.3	纤维素与半纤维素酶基因的转录调控	82
3.5	纤维素酶活力测定方法	84
3.5.1	外切纤维素酶活力测定方法	85
3.5.2	内切纤维素酶活力测定方法	85
3.5.3	β -葡萄糖苷酶活力测定方法	85
3.5.4	纤维素酶总活力测定方法	85
3.5.5	影响酶活力测定的因素与评价技术	86
	参考文献	88

第4章 纤维素酶类糖苷水解酶及其降解机理 94

4.1 导 言	94
4.2 纤维素酶系统的组成	95
4.3 糖苷水解酶家族	96
4.4 厌氧细菌纤维素酶的结构与功能	97
4.4.1 纤维小体的一般组装模式	97
4.4.2 粘连模块与对接模块	98
4.4.3 纤维小体上的催化模块	100
4.4.4 碳水化合物结合模块 CBM	101
4.4.5 纤维小体的多样性	101
4.4.6 纤维小体基因在基因组中的分布规律	103
4.4.7 微型人造小体的研究进展	103
4.5 好氧真菌纤维素酶的结构与功能	104
4.5.1 催化结构域及催化断键机理	104
4.5.2 纤维素结合结构域的结构与功能	107
4.5.3 连接区的结构与功能	108
4.6 纤维素酶持续性降解结晶纤维素的动态催化过程	109
4.6.1 纤维素酶分子-底物之间的结合过程	109
4.6.2 外切纤维素酶对底物分子的催化断键过程	110
4.6.3 外切纤维素酶催化降解结晶纤维素的分子内协同模型	113
4.6.4 外切纤维素酶持续性催化过程动力从何而来	114
参考文献	115

第5章 纤维素酶基因及酶系的分子改造与优化 121

5.1 纤维素酶的分子改造	121
5.1.1 纤维素酶的理性设计	121
5.1.2 纤维素酶的定向进化	125
5.1.3 纤维素酶结构域拼接和结构域工程	130
5.2 纤维素酶组分的协同作用和酶系改造	131
5.2.1 纤维素酶组分的协同作用	131
5.2.2 纤维素酶系组分的重构与改造	134
5.3 纤维素酶系表达调控机理与改造	135
5.3.1 纤维素酶系的表达调控	135
5.3.2 启动子和信号肽序列的改造	137
5.3.3 纤维素/半纤维素酶系组分的过表达	138
5.3.4 纤维素酶表达调控蛋白的修饰与改造	138
5.4 产酶丝状真菌分子改造的新策略	139
5.4.1 产酶丝状真菌的基因敲除策略	139

5.4.2	蛋白质分泌的优化与工程菌的稳定性	142
5.4.3	全基因组改组提高纤维素酶产量	144
5.4.4	与丝状真菌蛋白质表达和分泌相关的组学研究	145
5.4.5	比较基因组学预测纤维素酶/半纤维素酶基因	148
5.4.6	利用宏基因组学和生物信息学工具发现新的纤维素酶基因	149
5.4.7	酶系筛选的新策略与新方法	150
5.5	展望	151
	参考文献	152

第6章 纤维素原料全糖乙醇发酵菌株选育及改造 155

6.1	戊糖代谢途径	155
6.1.1	木糖代谢途径	155
6.1.2	阿拉伯糖代谢途径	156
6.2	戊糖发酵微生物的选育	156
6.2.1	自然界中的戊糖发酵菌种	157
6.2.2	采用原生质体融合技术选育发酵木糖产乙醇的微生物	158
6.2.3	代谢工程在戊糖发酵菌种选育上的应用	158
6.2.4	酿酒酵母戊糖代谢工程改造	159
6.3	酿酒酵母戊糖代谢工程改造	159
6.3.1	戊糖的专一性运输	159
6.3.2	木糖代谢途径的引入	160
6.3.3	下游代谢途径的改进	161
6.3.4	氧化还原平衡与有氧呼吸对木糖代谢的影响	162
6.3.5	阿拉伯糖代谢工程改造	162
6.4	酿酒酵母戊糖代谢的辅酶工程	163
6.4.1	辅酶在酵母中的作用及转化形式	163
6.4.2	木糖利用重组酿酒酵母的辅酶工程	164
6.5	生物加工过程中的抑制物对酿酒酵母的影响及应对措施	168
6.5.1	木质纤维素生物加工过程中抑制物的形成、影响及其作用机制	168
6.5.2	发酵前预处理原料的脱毒	170
6.5.3	利用进化工程提高菌种对抑制物耐受性	170
6.5.4	基因工程改造提高酿酒酵母的耐受性	172
6.5.5	发酵过程控制减少抑制物影响	173
6.6	酿酒酵母纤维素乙醇统合加工(CBP)的策略及研究进展	173
6.6.1	影响外源基因在酿酒酵母中表达水平的因素	174
6.6.2	纤维素酶和半纤维素酶在酿酒酵母中的表达	176
6.6.3	利用酿酒酵母统合加工纤维素乙醇的策略	178
	参考文献	180

第7章 原料预处理技术 187

7.1 稀酸预处理技术	188
7.1.1 稀酸预处理工艺简介	188
7.1.2 预处理过程分析	189
7.1.3 几种原料的稀酸预处理效果	190
7.1.4 稀酸预处理技术存在的问题	192
7.2 蒸汽预处理/蒸汽爆碎技术	192
7.2.1 技术简介	192
7.2.2 作用过程分析和影响因素	192
7.2.3 蒸汽预处理/蒸汽爆碎技术的应用效果实例	194
7.2.4 两段蒸汽预处理	195
7.2.5 蒸汽爆碎法现存的问题	195
7.3 低温氨爆处理	195
7.4 湿氧化法及其他脱木素技术	196
7.4.1 湿氧化法	196
7.4.2 碱性预处理技术	198
7.4.3 氧化脱木素技术	200
7.4.4 有机溶剂脱木素技术	201
7.4.5 亚硫酸盐脱木素技术	203
7.4.6 生物预处理技术	204
7.5 原料预处理过程中结构变化分析	205
7.5.1 原料性质和结构变化分析	206
7.5.2 纤维素性质和结构变化分析	207
7.5.3 木素性质和结构变化分析	208
参考文献	209

第8章 纤维素酶生产和纤维素糖化发酵技术 211

8.1 纤维素酶生产用工业微生物	211
8.1.1 瑞氏木霉	212
8.1.2 斜卧青霉	214
8.1.3 溶纤维素枝顶孢霉	215
8.1.4 勒克瑙金孢	216
8.2 产纤维素酶菌种的改良技术	217
8.2.1 诱变育种技术	217
8.2.2 抗降解物阻遏突变株筛选技术	219
8.2.3 原生质体融合技术	220
8.2.4 基因组重排技术	221
8.2.5 基因工程技术	223

8.3 影响纤维素酶生产的因素和产酶工艺	223
8.3.1 纤维素酶的生产方式	223
8.3.2 纤维素酶生产效率评价指标	225
8.3.3 丝状真菌液体深层发酵的产酶过程	225
8.3.4 液体产酶发酵中的补料技术	226
8.3.5 其他产酶影响因素	226
8.3.6 外来杂菌污染的控制	229
8.4 纤维素糖化发酵工艺	229
8.4.1 分步水解发酵法	229
8.4.2 同步糖化发酵法	230
8.4.3 纤维素酶现场生产和同步糖化发酵工艺的整合	232
8.4.4 统合生物加工工艺	233
参考文献	235

第9章 木质纤维素资源的生物炼制技术及其前景

9.1 生物炼制技术的概念和实践	238
9.2 木质纤维素组分分离和综合高效利用	242
9.3 木质纤维素类生物物质的生物炼制技术研发和产业化举例	243
9.3.1 纸浆-乙醇-饲料酵母联产技术	243
9.3.2 玉米芯生物炼制：木糖产品-乙醇联产技术	244
9.3.3 玉米秸秆生物炼制联产丁醇-纤维素衍生物-多元醇技术	247
9.3.4 燃料-饲料联产技术产业化	249
9.3.5 油棕树生物炼制技术	250
9.4 木质纤维素生物炼制生产生物基化学品和生物材料	251
9.4.1 利用大肠杆菌由纤维水解糖生产琥珀酸	251
9.4.2 微生物发酵秸秆水解液生产乳酸	253
9.5 木质纤维素生物炼制工艺和产物的多样化	254
9.5.1 玉米全株生物炼制技术	255
9.5.2 热化学平台与生物化学平台的整合	256
9.5.3 木素转化高值化学品	256
9.6 木质纤维素生物炼制技术的前景展望	257
参考文献	258

第 1 章

概 论

——木质纤维素生物降解转化技术的意义、进展与展望

曲音波 王禄山

1.1 社会发展过程中的资源、能源、环境问题

从 1750 年前后开始起步,到 20 世纪得到飞跃发展,特别是第二次世界大战结束以来,大大加速了的工业革命,以化石资源的深度开发利用为经济基础,取得了辉煌的成就,极大地推动了全球经济持续、高速的发展,给人类带来了丰富的物质文明,使人类社会发展到一个全新的高度。然而,这场工业革命是以大量生产、大量消费和大量废弃为基本特征的。其大规模使用的化石资源在地球上的储量是有限度的,且是不可再生的。快速的工业发展导致了在 200 多年的时间里,特别是最近数十年里,把地球进化 25 亿年来积累下来化石型能源——石油、煤炭、天然气等迅速地消耗。特别是石油资源,现在已接近或达到了其生产和消费的最高峰,并将开始逐步地走向枯竭。进入 21 世纪以来,以现有的消费水平计算,可采的石油储量仅可供人类再使用大约 50 年、天然气为 75 年、煤炭为 200~300 年。中国面临的形势更加严峻。我国具有的石油储量仅占世界的 2%,而年消费量却居世界第 2 位。自 1993 年开始,我国已经成为石油的净进口国。2008 年,中国已经成为在美、日之后的第三大石油进口国。国家能源局数据显示,中国 2009 年净进口原油达到 1.99×10^8 t,原油对外依存度已经超过了 52%。过分依赖进口原油,对我国能源和资源供应的战略安全构成了潜在的威胁。而汽车工业的迅速发展使我国对液体燃料的需求还在继续迅猛地增长。根据 2008 年年底获得批准的《全国矿产资源规划(2008~2015)》预测,至 2020 年,中国原油对外依存度将达到 60%。这种高度的对外依存度直接威胁了中国经济和社会的安全和稳定。2009 年,有消息称中国的汽车销售量首次超过美国,成为世界上最大的汽车消费市场。按美国阿尔贡(Argonne)国家实验室的预测,中国车辆的迅速增长将持续到 2050 年,液体运输燃料的需求也将从目前的约 1.6×10^8 t 猛增到 8×10^8 t 以上。如何应对这一巨大的需求增长,是对中国政府的一项严峻挑战。而如果中国的人均石油消费能够达到美国目前的水平,全球的石油供应将出现危机,难以满足中国的石油需求。在大力促进石油资源节约和节能减排的同时,立即着手寻找新的可替代资源是刻不容缓的任务。

另一方面,目前地球所面临的环境危机也直接或间接与化石燃料的使用有关。例如,化石燃料燃烧后放出的大量 CO_2 、 SO_x 、 NO_x 等,被认为是形成局部环境污染、产生酸雨以及温室气体等全球性环境问题的根源。随着化石燃料燃烧所导致的二氧化碳排放量的不断增

加，空气中二氧化碳浓度已经在不断升高，造成了全球气候的变暖，人与自然的和谐关系受到了严重的威胁，人类面临着前所未有的生存与发展的危机。从 2000 年到 2020 年，中国二氧化碳排放量将年均净增 $(1.5\sim 3)\times 10^8\text{t}$ 。如果中国不能及时转换生产和生活方式，赶上和超过美国只是时间问题。这就大大增加了国际社会上要求中国二氧化碳减排的压力，要求我国尽快寻求缓解途径。

总之，能源、资源、环境问题已经成为 21 世纪人类社会生存发展所面临的最严峻挑战。其中，作为现代文明社会“血液”的石油资源面临的局势最为危急。德国经济和社会学家赫尔曼·舌尔在他的著作《阳光经济：生态的现代战略》中指出，“世界经济的现代化，是建筑在化石能源基础之上的一幅没有未来的图景——这一经济的资源载体将在 21 世纪上半叶迅速接近枯竭的边缘”（舍尔，2000）。开发可持续利用的替代资源已成为人类社会面临的紧迫任务。

地球上每年通过植物光合作用产生生物质的总量可以高达 10^{11}t 以上。其中，仅陆地植物每年就可吸收和固定 $5.64\times 10^{10}\text{t}$ 碳（Field 等，1998）。因而，生物质是地球上唯一可大规模再生的、足以支撑人类生存发展的能源和有机碳资源。生物质既是可再生能源，可以不断地为人类提供能量；也是可再生资源，为人类提供物质性生产所需的原料，而且其生产及使用过程可以对环境比较友好。植物生物质的生产过程也就是二氧化碳吸收和固定化的过程，发展生物质的生产是减缓气候变化的最主要途径。而将可再生的生物质资源转化为洁净的液体燃料和化工原料，以部分代替石油资源，不仅可以使人类摆脱对有限石油资源的过分依赖，而且能够大幅减少污染和温室气体的排放，促进社会的可持续发展，其意义无论如何评价也不为过。正如赫尔曼·舌尔指出的，“面向阳光型能源和原料基础的转型，对于确保全球社会的未来安全将具有划时代的重要意义，其深度的、广度的和长远的影响可以与工业革命相匹敌”（舍尔，2000）。

生物能源产业的另一大优势是：与化石能源产业相比，能创造更多的就业岗位，而且投资相对较低。巴西生物乙醇产业的数据显示，每生产一单位能源，生物乙醇产业可提供 152 个工作岗位，石油产业仅提供 1 个，水电提供 3 个，煤炭提供 4 个。2007 年，巴西的燃料乙醇产业提供了 76 万个就业岗位，其中一半为种植甘蔗，另一半为从事加工。

世界很多国家都已在本国能源发展战略中把高效利用生物质能摆在了非常重要甚至是优先的地位。从 20 世纪 70 年代初期因为部分产油国家对西方实行石油禁运而出现第一次石油危机以来，美国政府就开始为发展生物质能产业组织各种研究活动。自 1997 年以来更是开始大幅增加生物质能源研究经费，提出了生物质能源发展路线图，相继出台了一系列促进生物质能产业发展的相关政策法规，使生物能源产业得到迅猛发展。2007 年美国前总统小布什签署了能源法案（H. R. 6），将推行新的可再生燃料标准。其主要内容是逐步增加生物燃料在交通运输行业中的消费比例以减少汽油消费量，争取到 2022 年生物燃料总量达到 $360\times 10^8\text{US gal}$ ^①，其中包括 $150\times 10^8\text{t}$ 以玉米和谷物为原料的乙醇， $160\times 10^8\text{US gal}$ 的纤维素乙醇以及 $50\times 10^8\text{US gal}$ 的其他燃料。也就是说，要通过使用这种替代性生物燃料来降低未来美国的石油消费，并明确提出了到 2030 年要达到替代 30% 石油产品的战略目标。

美国奥巴马政府上台后，虽然面临严峻的经济形势，其能源政策有所调整，但对大力开发生物燃料的方针没有改变。美国政府期望通过发展新能源来激发新的技术革命，创造新的经济增长点，营造全新的经济发展模式，从而彻底走出经济危机的阴霾。在其 1200 亿美元的科技刺激基金中，可再生能源和提升能源使用效率就占了 468 亿美元。这不仅是由于传统的化石燃料即将耗尽，还因为全球气候变暖的态势正愈演愈烈，而且与寻找替代能源的成本

① $1\text{US gal}=3.78541\text{dm}^3$ 。

下降以及新能源使用效率的提高也是密不可分的。美国总统奥巴马在2009年4月22日的地球日演讲中庄严地宣称：“哪个国家在清洁能源技术中领先，哪个国家就将引领21世纪的全球经济。”他满怀信心地提出要尽快确立美国在新能源竞赛中的领先地位，要成为清洁能源出口大国。奥巴马总统提议，由美国环境保护署、美国能源部和美国农业部成立了跨机构的工作小组，协调制定生物燃料研发的相关政策，共同支持先进燃料以及灵活燃料汽车的研发和生产。在他提出的雄心勃勃的一系列应对气候变化的计划中，每年将投资150亿美元，发展包括风能、太阳能、生物燃料以及清洁煤技术等新技术，其中生物质转化研究的投入每年不少于8亿美元。美国能源部科学办公室计划在5年内投资7.77亿美元在36个州的大学、国家实验室、非营利性机构以及公司等成立46个能源前沿研究中心。其中20个研究中心研究可再生、碳中性能源，包括太阳能、生物燃料、先进核能以及二氧化碳的地下封存技术等。

除美国外，世界各国也都纷纷制定了自己的生物能源发展战略。欧盟委员会制定了“再生能源规划草案”，要求2020年时所有成员国的交通运输（除海运和空运）能源中的20%将来自于生物燃料。日本的“阳光计划”、加拿大的“生态能源计划”、印度的“绿色能源工程计划”，以及南非、印度尼西亚等发展中国家制定的有关的“生物燃料计划”、泰国的“E10法令”等，都把发展生物质能源作为国家的重大战略计划。

中国对生物质工程和生物炼制也十分重视，已在各种重大科技计划中做了一些部署，支持包括燃料乙醇、生物柴油、生物制氢、生物材料、生物化工产品等研究和开发，并积极推动生物炼制技术的产业化。

石油资源的大量消耗和逐步枯竭对人类社会发展的最直接和紧迫的威胁是液体燃料的持续供应问题。因而，在生物能源领域中发展最快的品种是燃料乙醇。现在各国一般将生物乙醇按一定比例掺入汽油中用作混合燃料。混合燃料提高了燃料的辛烷值，取代了污染环境的添加剂，改善了汽油的防爆性能，从而降低了汽车尾气中的一氧化碳排放。因为乙醇的含氧量高，掺入汽油后还可以促进燃料充分燃烧，使油耗相应减少。2007年，美国生产玉米生物乙醇 195×10^5 t，进口 132×10^4 t，替代了4.5%的汽油；巴西生产 1749×10^4 t燃料乙醇，替代了国内50%的汽油；欧盟2006年生物燃料使用量为 538×10^4 t油当量（生物柴油 428×10^4 t，生物乙醇 125×10^4 t），占运输燃料消耗的1.8%。现在巴西全国有35000个加油站提供乙醇燃料，汽油中至少含有25%的生物乙醇，是世界上唯一在全国范围内不供应纯汽油的国家。

2008年的全球乙醇产量已超过 5000×10^4 t，原料主要为可食用的玉米和甘蔗。2000年前后，中国批准建设了吉林燃料乙醇、黑龙江华润酒精、河南天冠燃料乙醇和安徽丰原燃料酒精4家定点生产厂，以玉米和小麦为主要原料，年生产约 160×10^4 t燃料乙醇，成为继美国和巴西之后的全球第三大燃料乙醇生产国。自2001年至今，乙醇混合汽油E10已经在中国的黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽、广西全境内以及在河北、山东、江苏、湖北省的部分地区被广泛使用。以10%添加进汽油构成的汽油醇E10，已占据了国内约20%的汽油市场。国家发展和改革委员会（以下简称国家发改委）正式发布的《可再生能源中长期发展规划》中宣布，至2020年，中国将发展燃料乙醇总量为 10^7 t，从而实现除少数边远地区外，在全国全面推广E10。

然而，对中国这样的人口众多的发展中大国来说，全面解决全体人民的吃饭和提高饮食质量问题已属不易。因此，从长远看，利用淀粉和糖类大规模生产燃料和化工产品来解决资源和能源问题，肯定是不太现实的。2006年底到2007年初，部分地是由于燃料乙醇工业的快速发展，玉米等主要原料的国内外价格快速增长，使得用淀粉和糖类发展燃料和化工产品生产受到很大限制。2006年12月14日，国家发改委与财政部联合下发通知，控制地方首