



国际环境工程先进技术译丛

WILEY

生物质加工和转化中的绿色化学

The Role of Green Chemistry in Biomass Processing and Conversion

Haibo Xie

编著

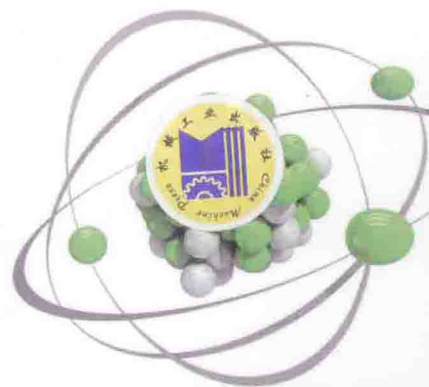
[英] Nicholas Gathergood

曹 峥

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际环境工程先进技术译丛

生物质加工和转化中的绿色化学

Haibo Xie

[英] Nicholas Gathergood

编著

曹 峥 译



机械工业出版社

本书专注于绿色化学在生物质加工与转化中的应用,系统地介绍了将绿色化学技术整合到生物质加工与转化研究领域的最新进展。作者重点讨论了生物质转化过程中用到的主要实验方法(离子液体、超临界二氧化碳、非均相催化、热解、微波、超声、微生物技术等),同时对其中一些新技术对于环境和生态毒性的广泛影响进行了阐述。相比于其他生物质领域书籍,本书更侧重于生物质在分子层面上转化的讨论,非常适合有志于在生物质加工与转化研究领域开展新研究的广大学者,同时也是本领域科研人员了解最新技术进展的重要参考资料。

Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < The Role of Green Chemistry in Biomass Processing and Conversion >, ISBN: 978-0-470-64410-2, by Haibo Xie, Nicholas Gathergood, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2014-3374号。

图书在版编目(CIP)数据

生物质加工和转化中的绿色化学/谢海波,(英)迦泽古德(Gathergood, N.)编著;曹峥译. —北京:机械工业出版社,2014.12

(国际环境工程先进技术译丛)

书名原文:The role of green chemistry in biomass processing and conversion

ISBN 978-7-111-48715-9

I. ①生… II. ①谢…②迦…③曹… III. ①生物能源-能源利用-研究 IV. ①TK6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第279999号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:顾谦 责任编辑:郑彤

责任校对:陈立辉 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2015年2月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·26.75印张·497千字

0001—2600册

标准书号:ISBN 978-7-111-48715-9

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译 者 序

随着国家能源局印发的《生物质能发展“十二五”规划》的提出，生物质能的开发和利用成为我国新能源发展的一大热点。我国是生物质资源大国，但是传统的生物质利用方式，如直燃式炊用或取暖，具有低能效和高污染等问题。目前，我国的生物质能产业发展初具规模，在生物质能利用方面已经取得了显著的成绩，但与发达国家相比仍存在着巨大的差距。因此，引进和自主开发高新技术，从而提高生物质利用的能效和防治环境污染至关重要。

本书将绿色化学技术整合到生物质加工与转化的研究领域，可以作为发展“绿色”生物质能的重要参考资料。书中涉及的技术在利用可再生资源的同时，注重了对于环境的保护，为能源危机和环境污染这两个当今人类面临的巨大挑战提出了解决方案。本书首先对生物质加工与转化过程中用到的绿色化学进行了系统的介绍，其中涵盖了很多化学专业知识，非常适合有志于在生物质加工与转化研究领域开展新研究的广大读者。其次，书中对各相关研究领域的最新进展进行了介绍，并对一些新技术对于环境和生态毒性的广泛影响进行了阐述，因此本书也可作为本领域科研人员了解最新技术进展的参考资料。译者在翻译过程中也学到了不少知识，受益匪浅。

在此，译者对一直以来支持自己的家人表示感谢，没有他们的关心和帮助，译者是不可能完成这份翻译工作的。同时，译者还要感谢负责本书引进工作的机械工业出版社的朋友们。

译者

原 书 序

人们对全球石油生产何时达到峰值已经做出了很多的预测，基于全球对石油需求的不断提升而石油本身产量减少这一事实，大部分人认为这将在 21 世纪初发生。考虑到目前剩余石油较高的开采难度以及环境与经济上的成本，石油价格将在引起市场和政局不稳定前，不可避免地以前所未有的更惊人的速度上涨。尽管公众和大多数政治的注意力都集中在这一问题对于能源成本的影响上，其对基于原油生产的化学品的影响也同时存在。事实上，考虑到能源有非碳替代品，化学品的前景可能更为严峻。显然，必须尽快寻找到经济和环境上无害的可持续性的替代原料，以用来生产主要的大宗化学品。

原料油的经济性和可获得性是推动发展可持续替代品的关键因素，但并不是唯一的驱动力。对于自然环境的保护也被广泛认为是建设一个可持续发展的未来的重要方面。由二氧化碳、甲烷和其他排放导致的全球变暖，在垃圾填埋场和海洋中不断累积的塑料制品，酸雨，笼罩在发达工业地区的烟雾，以及很多其他形式的污染，都可以归结于石油和其他化石燃料的使用。要支持一个可持续的经济体，科学家们面临的挑战是要生产出基于绿色和可持续供应链的物质产品。不能持续地以高于生产资源的速度去消耗资源，也不能持续地以高于地球处理垃圾的速度来制造垃圾。人们需要的是周期短的可再生资源。

生物质是满足人们对于化学和材料需求的唯一可持续并且实用的碳资源。它的循环周期以年计量，而不像化石资源那样以亿万年来计量。生物炼制这一理念是生物质作为化学工业原材料的关键。未来的生物炼制将通过加工生物质生产燃料、能源和化学品。

对于化学品行业，将碳原料由原油换成生物质只解决了一半问题。需要在生物炼制中使用高效率的技术，并且同时对自然环境进行保护。要做到这一点，绿色化学的理念需要被采用。绿色化学最先被提出是为了消除使用或产生对于环境有毒害的化学品，以及减少浪费。当今的绿色化学更多地从生命周期的角度出发，寻求将可再生资源利用环保的生产工艺转换成安全的产品。理想状态下，这

些产品可以在使用后被回收,从而遵守“闭环制造”的原则。它提供了一套技术工具和相关的基本原理,使任何研究者在开发绿色可持续化学产品供应链时都可以使用。本书旨在解决这一挑战,对于如何利用不同的绿色化工技术将生物质转化为绿色可持续发展的化学品进行了深入的探讨。本书的各章节涵盖了良性溶剂的使用、替代能源技术、催化方法和分离技术,以及关于生物质、生物炼制和绿色化学的基础知识。

在对生物炼制和绿色化学的介绍章节之后,有三章将重点介绍如何将绿色化学中的三种研究最多的替代反应介质应用到生物炼制中去。离子液体是绿色化学技术中最吸引人的一个——通过使用强溶剂的非挥发性液体,甚至组合的催化剂-溶剂体系,来避免使用挥发溶剂的问题。离子液体是对付顽固性生物质最可能的解决方案。无论从环保还是从方便的角度考虑,在生物炼制中,没有任何一种溶液能和水相提并论。生物质本身不可避免地含有水,越多地在水中进行加工,炼制出的产品越有可能更加简单、安全和便宜。生物炼制将产生大量的二氧化碳,如何利用这些二氧化碳将是很重要的一个目标。超临界二氧化碳在提取生物质和下游化学反应中可以作为重要的溶剂。在讨论完“替代性介质”之后,下面的章节旨在解决加工中关于纤维素溶解的关键问题——氢氧化钠/尿素/水是溶解纤维素的非常简单而有效的介质,溶解后可以对这些溶液进行直接利用。有溶剂方法,尤其是有机溶剂乙醇法通常能够有助于加工木质纤维素(LC)材料,甚至能够帮助解决木质素稳定物价中的问题。

从生物质发展出来的最流行的一种产品类型一度是热解油,目前它正被认真地列为石油燃料的部分替代物。第8章专注于这一领域,包括产品升级中的重要问题,因为大多数目前生产的热解油质量并不符合要求,如因为它们酸性过高,并不能直接掺入石油中使用。微波技术可以取代传统加热将生物质转化为热解油,并可以应用于生物质的预处理和糖化,这些将在第9章中进行讨论。

催化是最重要的绿色化工技术,从根本上解决了绿色化学在提高效率、更好的选择性和低能耗方面的挑战。有三章内容将讨论不同的催化剂利用不同的方法最大限度地 将生物质作为原料进行利用。第10章着眼于微生物转化,以及它们如何将生物质转化为不同的燃料和化学品。非均相催化剂包括固体酸和碱,以及负载型金属,通常被认为更优于它们的均相对应物,因为它们在加工完成时可以

VI 生物质加工和转化中的绿色化学

实现更简单而少浪费的分离，它们在一些生物质转化中可以被恰当地利用。生物柴油是最成功的生物燃料之一，生物质转化当前一个很有趣的挑战就是利用生产生物柴油过程中大量产生的副产品甘油。甘油的利用将很大程度地支持生物柴油的生产制造，第 12 章将着眼于利用催化剂方法来实现这一点。

绿色化学为传统反应堆和能源提供了替代。除了第 9 章讨论的微波，超声也得到了广泛的关注。它们在生物炼制尤其是生产生物燃料中的应用在第 13 章中进行了阐述。分离往往是化工制造工艺中最大的浪费源，因此如何巧妙地分离生物炼制中的复杂产品尤为重要。第 14 章讨论了先进的膜技术，包括重要的渗透汽化方法和不同的膜材料（高分子和沸石）。最后一章讨论了生物炼制对于生态毒性和环境的影响，包括生物燃料的生产和排放问题。

单单靠生物质的利用并不能解决可持续生产液体燃料和有机化学品的问题。但是，如果能够将绿色化学与其很好地结合起来，将有希望创建一个真正可持续发展的社会。



——James Clark

原 书 前 言

在世界上大多数地区，人们的高质量生活大大地归功于和取决于基于化石的能源和化学品工业。在这些工业产品丰富了人们生活的同时，也将人们生存的环境直接或间接地置于巨大的压力之下。其中最引人关注的一个问题是由温室气体堆积而导致的全球变暖，其根本原因是人们对不可再生的化石资源的过度依赖。为了解决这一问题，绿色化学提出，在对产品和工艺设计时要减少有害物质的使用和产生。其目的就是要避免问题的发生。

化石燃料需用百万年来形成且被认为是不可再生的资源。据估计，化石燃料将于 21 世纪末耗尽。此外，化石燃料的生产和使用引起了相当大的环境上的关注。一个利用可再生资源生产能源和化学品的全球运动正在进行中。这将有助于满足人类对于能源和化学原料不断增长的需求。全球通过自然光合作用利用二氧化碳作为碳源而产生的生物质大概有着 $1.0 \times 10^{11} \text{ t}$ 的年产量。因此，生物质中的碳被认为是一种“碳中性”的碳源，可以通过生物和化学方法来形成化学品和材料。据估计，截至 2025 年，高达 30% 的化工业原材料将来自于可再生资源。为了实现这一目标，需要对整体的技术经济方法进行重大的调整。从可持续发展的角度来看，借鉴于发展了几十年的石油精炼工艺，将绿色化学引进并整合到生物质加工和转化中是避免问题发生的关键因素之一。

生物质可以指物种的生物质，也就是一个或多个物种的量。或指群落生物质，也就是所有物种在群落中的量。它可以包括微生物、植物或动物。在本书中，主要关注 LC 生物质，因为它们代表了最丰富的生物质资源。它们主要由纤维素、半纤维素和木质素组成。为了与石油精炼的研究进行区分，一个基于生物质研究活动的新的生物炼制过程已经被提出。本书第 1 章介绍了当今关于 LC 生物质和生物炼制加工的知识，提供了将生物质转化为有价值的化学品和材料的基本和整体的思路。

自从绿色化学概念的提出，依据被广泛认可的十二项原则，人们在生物质转

VIII 生物质加工和转化中的绿色化学

化领域已经取得了显著的成就，其最新进展在本书的第2章中给予了介绍。对于绿色化学和潜在的绿色环保技术的更深入的理解，可以被利用在生物质加工与转化上面。当人们对生物质加工转化过程中的挑战有了更好的认识之后，引进和探索合适的绿色化学技术对于满足定制加工并转化生物质至关重要。来自不同研究领域的贡献者们为人们提供了利用绿色化学技术进行生物质加工和转化的最新进展和观点。例如，绿色溶剂（如离子液体、超临界二氧化碳和水）、可持续能源（如微波辐射和超声处理）、绿色催化技术，以及先进的薄膜分离技术等。可以相信所有这些都将是将在不久的将来建立和探索一个有成本竞争力的可持续发展的生物经济体的重要基础。

传统上讲，集中于技术的经济评估往往会导致对于社会和环境评估的忽视，这是致使最终经济恶化的原因之一。掌握好经济评估、社会评估和环境评估之间的平衡是任何应用于可持续生物炼制的新兴技术要面对的重要问题。本书的最后一章深入地探讨了对由生物质转化而成的燃料、化学品和材料的环境评估。

生物质加工与转化的研究是一个范围广泛的跨学科研究领域，本书从可持续化学的角度为生物质的应用提供了一个新的多学科的论述。感谢所有为本书做出贡献和提出宝贵建议的人、尊敬的贡献者和勤奋的审稿人，他们为这个项目的成功和本书的出版奠定了基础。



——Haibo Xie 博士，Nicholas Gathergood 博士

贡 献 者

- Matthew T. Agler, 生物和环境工程系, 康奈尔大学。
- Thomas E. Amidon, 造纸和生物过程系, 环境科学与林学院, 纽约州立大学。
- Largus T. Angenent, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Dimitris S. Argyropoulos, 木材组分有机化学实验室, 林业生物材料系, 北卡罗莱纳州立大学; 化学系, 有机化学实验室, 赫尔辛基大学, 芬兰。
- Ian Beadham, 化学科学学院, 都柏林城市大学。
- Weihui Bi, 长春应用化学研究所, 中国科学院; 重点环境材料实验室, 中国科学院。
- Biljana Bujanovic, 造纸和生物过程系, 环境科学与林学院, 纽约州立大学。
- Kerstin Bluhm, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Leming Cheng, 生物系统工程和土壤科学系, 田纳西大学。
- Jiangjiang Duan, 材料科学与工程系, 材料学院, 厦门大学。
- Qirong Fu, 木材组分有机化学实验室, 林业生物材料系, 北卡罗莱纳州立大学。
- Nicholas Gathergood, 化学科学学院, 都柏林城市大学; 细胞生物技术国家研究所, 都柏林城市大学; 能量转化战略研究中心, 都柏林大学。
- Mukund Ghavre, 化学科学学院, 都柏林城市大学, 都柏林。
- Mangesh J. Goundalkar, 造纸和生物过程系, 环境科学与林业学院, 纽约州立大学。
- David Grewell, 农业和生物系统工程系, 爱荷华州立大学。

X 生物质加工和转化中的绿色化学

- Sebastian Heger, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Henner Hollert, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Cuimin Hu, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Birgit Kamm, 生物活性高分子系统研究所; 勃兰登堡技术大学。
- Melissa Montalbo - Lomboy, 农业和生物系统工程系, 爱荷华州立大学。
- Changzhi Li, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Shenghai Li, 长春应用化学研究所, 中国科学院; 重点环境材料实验室, 中国科学院。
- Wujun Liu, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Fang Lu, 生物能源部门, 大连国家清洁能源实验室, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Haile Ma, 食品与生物工程学院, 江苏大学。
- Hong Ma, 生物能源部门, 大连国家清洁能源实验室, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Sibylle Maletz, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Ray Marriott, 生物复合材料中心, 班戈大学, 圭内斯。
- Tomohiko Mitani, 可持续人类领域研究所, 京都大学。
- Xuejun Pan, 生物系统工程系, 威斯康星大学麦迪逊分校。
- Thomas - Benjamin Seiler, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Andreas Schaffer, 环境研究所, 亚琛工业大学。
- Emily Sin, 生物复合材料中心, 班戈大学, 圭内斯。
- Aiqin Wang, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Feng Wang, 生物能源部门, 大连国家清洁能源实验室, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Takashi Watanabe, 可持续人类领域研究所, 京都大学。
- Haibo Xie, 大连国家清洁能源实验室, 大连化学物理研究所, 中国

科学院。

- Xiaopeng Xiong, 材料科学与工程系, 材料学院, 厦门大学。
- Jie Xu, 生物能源部门, 大连国家清洁能源实验室, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- X. Philip Ye, 生物系统工程和土壤科学系, 田纳西大学。
- Weiqiang Yu, 生物能源部门, 大连国家清洁能源实验室, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Zongbao K. Zhao, 生物能源部门, 大连国家清洁能源实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Tao Zhang, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。
- Suobo Zhang, 长春应用化学研究所, 中国科学院; 重点环境材料实验室, 中国科学院。
- Mingyuan Zheng, 催化国家重点实验室, 大连化学物理研究所, 中国科学院。

关于作者

Haibo Xie (谢海波) 博士 (副教授) 目前就职于中国科学研究院 (Chinese Academy of Sciences, CAS) 大连国家清洁能源实验室和大连化学物理研究所 (Dalian Institute of Chemical Physics, DICP)。他于 2001 年在湘潭大学获得理科学士学位, 于 2006 年在中国科学院长春应用化学研究所获得博士学位。他曾在北卡罗莱纳州立大学林业生物材料系任博士后研究员 (2006 ~ 2007 年), 之后在都柏林城市大学 (Dublin City University, DCU) 细胞生物技术国家研究所和化学科学学院任 IRC-SET Embark Initiative 研究员 (2008 ~ 2010 年)。在 2009 年, 他获得都柏林城市大学的 Career Start Program 奖学金。他于 2010 年 3 月通过 DICP 的百人计划加入中国科学研究院大连 DICP 的科研队伍。他的主要研究兴趣为利用绿色溶剂和绿色化学技术将生物质加工转化为生物燃料、附加值化学品和可持续材料。



Nicholas Gathergood 是 DCU 化学科学学院人的一名讲师。他于 1999 年在南安普顿大学 R. Whitby 教授的指导下获得博士学位。之后在丹麦奥胡斯大学催化中心 K. A. Jørgensen 教授和澳大利亚莫纳什大学维多利亚药学院 P. J. Scammells 教授的研究组从事博士后研究。自 2004 年, Gathergood 博士在 DCU 建立了一个庞大的研究组 (15 人以上), 指导过 19 名博士生。



他负责过的职位包括化学工业学会 (Society of Chemical Industry, SCI) 所有爱尔兰组的主席以及 EUChEMS 有机化学部门的爱尔兰代表。他发起了 SCI 主办的爱尔兰绿色化学系列会议, 并与位于爱尔兰的美国环保署密切合作。许多他支持过的博士后研究人员已经在英国、法国和中国开始了他们自己的学术职业生涯。令 Gathergood 博士最为自豪的是他的博士毕业生 100% 的就业率。

他的研究兴趣主要是以绿色化学为工具实现更安全和可持续的有机化学和药物化学 (包括药物发现), 并最终开发环保药品。

目 录

译者序

原书序

原书前言

贡献者

关于作者

第 1 章 生物质和生物炼制导论	1
------------------------	---

1.1 简介	1
--------------	---

1.2 生物炼制技术和生物炼制系统	3
-------------------------	---

1.2.1 背景	3
----------------	---

1.2.2 LCF 的生物炼制	3
-----------------------	---

1.2.3 全作物生物炼制	5
---------------------	---

1.2.4 绿色生物炼制	7
--------------------	---

1.2.5 双平台生物炼制概念	9
-----------------------	---

1.3 平台化合物	10
-----------------	----

1.3.1 背景	10
----------------	----

1.3.2 生物技术在生产平台化合物中担当的角色	11
--------------------------------	----

1.3.3 绿色生物质分离和能源方面	12
--------------------------	----

1.3.4 绿色生物炼制的质量和能量流动	14
----------------------------	----

1.3.5 绿色作物分离过程的评估	16
-------------------------	----

1.4 绿色生物炼制：经济和生态层面	17
--------------------------	----

1.5 展望：以 GJ 为原料生产 L-赖氨酸-L-乳酸	18
------------------------------------	----

1.6 小结	19
--------------	----

参考文献	19
------------	----

第 2 章 绿色化学的最新进展	25
-----------------------	----

2.1 简介	25
--------------	----

2.2 绿色化学	25
----------------	----

2.2.1 绿色化学的十二项原则	25
------------------------	----

2.3 绿色化学的十二项原则案例	26
------------------------	----

2.3.1 预防	26
----------------	----

XIV 生物质加工和转化中的绿色化学

2.3.2 原子经济性	29
2.3.3 低毒害的化学合成	31
2.3.4 设计较安全的化合物	35
2.3.5 使用较安全的溶剂与助剂	36
2.3.6 有节能效益的设计	38
2.3.7 使用可再生资源作为原料	39
2.3.8 减少运用衍生物	40
2.3.9 催化	42
2.3.10 可降解设计	46
2.3.11 及时分析以防止污染	48
2.3.12 采用本身安全且能够防止意外发生的化学方法	49
2.4 小结	51
2.5 展望	52
2.5.1 由可再生的 5-氯甲基糠醛合成雷尼替丁	52
2.5.2 一锅法有机催化	53
缩略语	58
致谢	59
参考文献	59
第3章 基于 IL 的生物炼制	66
3.1 简介	66
3.2 IL 及其绿色所通向的可持续的生物炼制	66
3.3 用于生物质加工和转化的 IL	68
3.3.1 IL 溶解生物聚合物的机制	68
3.3.2 基于 IL 的生物炼制的概念	69
3.3.3 IL 中的木材化学	69
3.3.4 源于 IL 中生物质的可持续材料	71
3.3.5 源于 IL 中生物质的增值化学品	73
3.3.6 通过 IL 生产生物柴油	89
3.4 用于生物炼制的 IL 的毒性和生态毒性	93
3.4.1 概述	93
3.4.2 毒性研究	94
3.4.3 用于生物炼制的 IL 的毒性	104
3.4.4 用于生物炼制的 IL 的生物降解性	105
3.4.5 关于 IL 的毒性和生物降解性的结论	106
3.5 小结与展望	107
3.6 相关的 IL: 全称和缩略语	108

致谢	110
参考文献	110
第4章 基于水的生物炼制	119
4.1 简介	119
4.2 基于水的生物炼制的基本原理	119
4.2.1 在 SCW 中处理生物质的能源效率	120
4.2.2 水在 SCW 状态下独特的可调谐属性	121
4.2.3 适用于生物质提炼、预处理、分离和转化的介质	121
4.3 利用水预处理 LC 以生产生物燃料/生物化学品/生物材料	122
4.4 利用水提炼增值化学品	126
4.4.1 热水提取硬木	127
4.4.2 热水提取中溶解的非碳水化合物来源的材料	127
4.4.3 不溶组分	127
4.4.4 可溶组分	129
4.4.5 热水提取中溶解的非碳水化合物来源材料的潜在应用	130
4.4.6 胶粘剂	130
4.4.7 木质素基聚合物共混物	130
4.4.8 生产氧化芳香族化合物	131
4.4.9 可溶组分的分离和潜在用途	131
4.5 生物质在水中的热解和气化	132
4.5.1 生物质在水中的热解	132
4.5.2 生物质在水中的气化	135
4.6 生物质在 SCW 中的化学转化	139
4.6.1 半纤维素和纤维素	140
4.6.2 单糖	142
4.6.3 木质素	144
4.6.4 甘油三酯和脂肪酸	148
4.6.5 甘油	149
4.6.6 蛋白质和氨基酸	150
4.7 机遇、挑战与展望	151
参考文献	152
第5章 用于生物炼制的良性介质——超临界 CO₂	160
5.1 简介	160
5.2 CO ₂ 的性质	160
5.3 生物炼制中 CO ₂ 的使用	163

5.4 利用 CO ₂ 的提取	166
5.5 脂类的提取	167
5.6 从 LCF 中提取二次代谢产物	168
5.6.1 角质层蜡的潜在应用	172
5.6.2 利用 scCO ₂ 提取的经济考虑	173
5.6.3 生物质致密化	175
5.7 scCO ₂ 中的反应	175
5.8 小结与展望	177
参考文献	177
第 6 章 纤维素在 NaOH/尿素水溶液中的溶解和应用	182
6.1 简介	182
6.2 低温下纤维素在 NaOH/尿素水溶液中的溶解和机理	183
6.3 溶液性质	190
6.4 新型溶剂系统中制备的新型纤维素材料	191
6.4.1 新型纤维素纤维	192
6.4.2 新型纤维素膜	196
6.4.3 新型纤维素凝胶	201
6.4.4 用于合成纤维素衍生物的新介质	205
6.5 小结与展望	209
致谢	210
参考文献	210
第 7 章 由 LC 生产化学品、燃料和材料的有机溶剂生物炼制平台	215
7.1 简介	215
7.2 有机溶剂乙醇法	216
7.3 有机溶剂乙醇法中的化学	216
7.3.1 木质素的反应	216
7.3.2 纤维素和半纤维素的反应	218
7.4 有机溶剂乙醇法作为生物炼制平台	219
7.4.1 有机溶剂乙醇法生物炼制平台	219
7.4.2 有机溶剂乙醇法预处理的质量平衡	221
7.5 有机溶剂乙醇法底物的酶解	223
7.6 有机溶剂乙醇法木质素的特性和应用	224
7.6.1 有机溶剂乙醇法木质素的特性	224
7.6.2 基于有机溶剂乙醇法木质素的聚合物材料	226