



实用农村环境保护知识丛书

农村生物质综合处理与 资源化利用技术

甄广印 陆雪琴 苏良湖 魏俊 赵由才 编著



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn



实用农村环境保护知识丛书

农村生物质综合处理与 资源化利用技术

甄广印 陆雪琴 苏良湖 魏俊 赵由才 编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2019

内 容 提 要

本书共分 11 章, 包括: 农村生物质的来源与特性; 生物质秸秆原位机械粉碎与还田技术; 生物质饲料转化技术; 生物质堆肥与过程调控技术; 生物质厌氧发酵与能源转化技术; 生物质压缩成型燃料化技术; 生物质原料化利用技术; 生物质热化学转化技术; 生物质燃料乙醇制备技术; 栽培基料化利用技术; 生物柴油技术。

本书可供从事生物质处理技术研发工作的科研人员、从事农村生物质处理的投资建设、工艺设计、运营管理的工程技术人员阅读, 也可供高等院校环境工程专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

农村生物质综合处理与资源化利用技术/甄广印等编著. —北京: 冶金工业出版社, 2019. 1

(实用农村环境保护知识丛书)

ISBN 978-7-5024-7948-0

I. ①农… II. ①甄… III. ①农村—生物能源—综合利用
IV. ①S216. 07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 269221 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7948-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版, 2019 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12.5 印张; 243 千字; 187 页

48.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

序 言

据有关统计资料介绍，目前中国大陆有县城 1600 多个：其中建制镇 19000 多个，农场 690 多个，自然村 266 万个（村民委员会所在地的行政村为 56 万个）。去除设市县级城市的人口和村镇人口到城市务工人员数量，全国生活在村镇的人口超过 8 亿人。长期以来，我国一直主要是农耕社会，农村产生的废水（主要是人禽粪便）和废物（相当于现在的餐厨垃圾）都需要完全回用，但现有农村的环境问题有其特殊性，农村人口密度相对较小，而空间面积足够大，在有限的条件下，这些污染物，实际上确是可循环利用资源。

随着农村居民生活消费水平的提高，各种日用消费品和卫生健康药物等的广泛使用导致农村生活垃圾、污水逐年增加。大量生活垃圾和污水无序丢弃、随意排放或露天堆放，不仅占用土地，破坏景观，而且还传播疾病，污染地下水和地表水，对农村环境造成严重污染，影响环境卫生和居民健康。

生活垃圾、生活污水、病死动物、养殖污染、饮用水、建筑废物、污染土壤、农药污染、化肥污染、生物质、河道整治、土木建筑保护与维护、生活垃圾堆场修复等都是必须重视的农村环境改善和整治问题。为了使农村生活实现现代化，又能够保持干净整洁卫生美丽的基本要求，就必须重视科技进步，通过科技进步，避免或消除现代生活带来的消极影响。

多年来，国内外科技工作者、工程师和企业家们，通过艰苦努力和探索，提出了一系列解决农村环境污染的新技术新方法，并得到广泛应用。



鉴于此，我们组织了全国从事环保相关领域的科研工作者和工程技术人员编写了本套丛书，作者以自身的研发成果和科学技术实践为出发点，广泛借鉴、吸收国内外先进技术发展情况，以污染控制与资源化为两条主线，用完整的叙述体例，清晰的内容，图文并茂，阐述环境保护措施；同时，以工艺设计原理与应用实例相结合，全面系统地总结了我国农村环境保护领域的科技进展和应用技术实践成果，对促进我国农村生态文明建设，改善农村环境，实现城乡一体化，造福农村居民具有重要的实践意义。

赵由才

同济大学环境科学与工程学院

污染控制与资源化研究国家重点实验室

2018年8月

前 言

随着中国经济的飞速发展和城镇化进程的推进，农村生产生活结构发生巨变，生物质废物的产生呈现多元化、规模化和繁杂化。近年来，我国农村在生物质能开发利用，尤其在沼气利用方面取得了瞩目成就，但由于技术人员匮乏，跟踪维修管理欠缺等原因，导致总体运行效果欠佳。目前，生物质废物仍以简易堆放或无序焚烧为主，资源开发利用效率低下，生态环境问题日趋严峻。特别是随着化石燃料的持续消耗和人类对能源需求的持续增加，生物质能作为重要的替代能源和一种集生产与治理相结合的新型环保产业而备受关注。农村生物质资源丰富，劳动成本相对低廉，因此有效开发利用农村生物质废物，对于保护农村生态环境，推动乡村振兴战略，缓解能源危机，构建低碳循环社会具有重要意义。

本书结合作者及相关领域的最新研究成果，系统阐述了农村生物质综合处理与资源化利用技术的发展现状、应用前景及面临的挑战。本书编写分工为：第1章生物质概述，由甄广印、唐英湘、陆雪琴、石磊、甄远庆编写；第2章生物质秸秆原位机械粉碎与还田技术，由甄广印、王建辉、赵由才编写；第3章生物质饲料转化技术，由甄广印、郑韶娟、陆雪琴、张衷译编写；第4章生物质堆肥与过程调控技术，由苏良湖、孙旭、赵由才编写；第5章生物质厌氧发酵与能源转化技术，由甄广印、支忠祥、陆雪琴、李玉友、张衷译编写；第6章生物质压缩成型燃料化技术，由甄广印、潘阳、陆雪琴、张衷译编写；第7章生物质原料化利用技术，由苏良湖、孙旭、赵由才编写；第8章



生物质热化学转化技术，由魏俊、高全喜编写；第9章生物质燃料乙醇制备技术，由张秋卓、侯进菊编写；第10章栽培基料化利用技术，由甄广印、潘阳、陆雪琴、赵由才编写；第11章生物柴油技术，由朱学峰、甄广印编写。全书由甄广印、陆雪琴、苏良湖、魏俊和赵由才负责统稿工作。本书是在国家自然科学基金、上海高校特聘教授（东方学者）岗位计划、上海市科技创新行动计划国际合作项目、上海市浦江人才计划、上海污染控制与生态安全研究院等的支持下完成的，在此表示感谢！

由于作者水平有限，且农村生物质处理与资源化涉猎面较广，相关技术的研究还在不断更新和完善中，因此书中若有不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

作者

2018年8月

目 录

1 农村生物质的来源与特性	1
1.1 生物质的来源	1
1.2 生物质的种类	2
1.3 生物质的特点	6
1.3.1 生物质来源与种类	6
1.3.2 生物质是唯一可固碳的可再生能源	6
1.3.3 生物质能源是未来全球能源发展的必然趋势	6
2 生物质秸秆原位机械粉碎与还田技术	9
2.1 技术概念与原理	9
2.1.1 秸秆原位还田	9
2.1.2 机械化秸秆还田	9
2.2 秸秆直接还田技术的发展史与特点	10
2.2.1 增加土壤养分、有机质和肥力	10
2.2.2 降低秸秆处理与农作物产出成本	12
2.2.3 环境友好、发展潜力巨大	12
2.3 技术与应用现状	12
2.3.1 玉米秸秆原位粉碎还田技术	12
2.3.2 麦-稻秸秆原位粉碎还田技术	14
2.3.3 秸秆粉碎还田机	15
2.3.4 秸秆原位粉碎还田技术瓶颈以及前景	19
2.4 典型案例	20
3 生物质饲料转化技术	22
3.1 生物质饲料转化技术概念及原理	22
3.2 生物质饲料转化技术发展历程	23
3.3 生物质饲料转化技术分类与应用现状	24
3.3.1 青贮饲料生产技术	24
3.3.2 微贮饲料生产技术	28



3.3.3	氨化饲料生产技术	31
3.3.4	膨化和热喷处理	33
3.3.5	菌体蛋白饲料	35
3.4	典型案例	38
4	生物质堆肥与过程调控技术	39
4.1	堆肥化和堆肥产品的定义	39
4.2	堆肥过程的各阶段	40
4.2.1	中温阶段	40
4.2.2	高温阶段	41
4.2.3	冷却阶段	42
4.2.4	腐熟阶段	43
4.3	堆肥过程的参数调控	44
4.3.1	底物来源	44
4.3.2	营养元素	45
4.3.3	碳氮平衡	46
4.3.4	温度调控	47
4.3.5	pH 值	48
4.3.6	通气	48
4.3.7	水分含量	49
4.3.8	外源微生物的接种	49
4.3.9	过程优化控制	52
4.4	堆肥工艺及实用技术	52
4.4.1	堆肥工艺	53
4.4.2	堆肥工艺选择	54
4.4.3	堆肥工艺流程	56
4.4.4	条垛式堆肥工艺实用技术	57
4.4.5	槽式堆肥工艺实用技术	59
4.4.6	反应器堆肥实用技术	60
5	生物质厌氧发酵与能源转化技术	62
5.1	农村生物质厌氧发酵应用历史与发展现状	62
5.2	技术概念、原理及影响因素	63
5.3	技术分类与应用现状	66
5.3.1	沼气池	66



5.3.2 大中型沼气工程技术	68
5.4 典型案例	75
5.4.1 日本中空知卫生设施组合	75
5.4.2 北京市某污水处理厂污泥厌氧发酵处理工程	76
5.4.3 青岛某污水处理厂剩余污泥厌氧发酵工程	78
6 生物质压缩成型燃料化技术	80
6.1 技术概念与原理	80
6.2 技术发展和特点	82
6.2.1 发展历史	82
6.2.2 生物质压缩成型燃料特点	84
6.3 技术分类与应用现状	84
6.3.1 原料收集	85
6.3.2 预处理	85
6.3.3 生物质压缩成型工艺	86
6.3.4 成型设备	89
6.4 典型案例	92
6.4.1 典型案例一：生物质成型与燃料化	92
6.4.2 典型案例二：瑞典生物质能利用	93
7 生物质原料化利用技术	95
7.1 作物秸秆造纸技术	95
7.1.1 横管式连续蒸煮技术	95
7.1.2 热置换蒸煮技术	96
7.1.3 新型立式连续蒸煮技术	96
7.1.4 其他制浆技术	97
7.1.5 秸秆化学制浆技术的比较	97
7.1.6 农业秸秆制浆黑液处理技术	98
7.1.7 农业秸秆制浆造纸推荐技术	99
7.2 秸秆建材化利用技术	100
7.2.1 秸秆建筑材料的物理特性	100
7.2.2 秸秆建材的特点与优势	101
7.2.3 秸秆建材的发展瓶颈	102
7.2.4 秸秆墙板的种类	103
7.3 秸秆生产一次性餐具技术	106



8 生物质热化学转化技术	107
8.1 生物质热化学转化概念	107
8.2 生物质燃烧原理	107
8.2.1 燃烧热力学	107
8.2.2 生物质燃烧反应动力学	108
8.3 生物质热解原理	113
8.3.1 生物质热解热力学原理	113
8.3.2 生物质热解动力学原理	115
8.4 技术发展史与特点	118
8.4.1 燃烧	118
8.4.2 热解	119
8.5 技术分类与应用现状	123
8.5.1 燃烧	123
8.5.2 热解	125
8.6 典型案例	135
8.6.1 生物质直燃发电项目	135
8.6.2 鸡粪沼气发电项目	137
9 生物质燃料乙醇制备技术	139
9.1 生物质燃料乙醇的发展现状	139
9.1.1 生物质燃料乙醇的定义及性质	139
9.1.2 生物质燃料乙醇的研究现状	140
9.2 生物质燃料乙醇的生产原料	141
9.2.1 第一代生物质燃料乙醇生产原料	141
9.2.2 第二代生物质燃料乙醇生产原料	142
9.3 生物质燃料乙醇发酵微生物	142
9.3.1 发酵用酵母菌种	143
9.3.2 发酵用细菌菌种	143
9.3.3 发酵用菌种的选育	143
9.4 生物质燃料乙醇发酵原理及工艺流程	144
9.4.1 生物质燃料乙醇生产方法	144
9.4.2 生物质燃料乙醇的生产过程	144
10 栽培基料化利用技术	150
10.1 技术概念与原理	150



10.2 技术发展历史和特点	151
10.2.1 发展历史	151
10.2.2 技术特点	152
10.3 技术分类与应用现状	153
10.3.1 秸秆食用菌栽培技术	153
10.3.2 桑枝食用菌栽培技术	157
10.3.3 沼液食用菌栽培技术	158
10.4 浙江省某县食用菌循环经济模式	159
11 生物柴油技术	161
11.1 技术概念与原理	161
11.1.1 生物柴油的概念	161
11.1.2 生物柴油发展的原因及潜力	161
11.1.3 中国农村生物质能的现状及发展生物柴油的有利条件	162
11.1.4 生物柴油制备的技术原理	164
11.2 技术发展史与特点	164
11.2.1 生物柴油的历史	164
11.2.2 生物柴油技术的发展史	167
11.2.3 生物柴油的特点	168
11.3 生物柴油技术的分类与应用现状	169
11.3.1 生物柴油技术的分类	169
11.3.2 生物柴油技术的应用现状	171
11.4 生物柴油技术典型案例分析	173
11.4.1 微藻制备生物柴油	173
11.4.2 地沟油制备生物柴油	176
11.4.3 农村秸秆制备生物柴油	177
参考文献	180



农村生物质的来源与特性

能源是人类生活发展的物质基础和国家发展的重要战略物资，按照来源可分为：（1）来自地球外部的能量，主要是太阳能；（2）地球本身蕴藏的能量；（3）地球和其他天体相互作用产生的能量，如潮汐能。按生产方式可以分为一次能源和二次能源，一次能源主要是天然能源，包括可再生的水能、风能、太阳能、地热能、生物能、海洋能和核能等以及不可再生的煤炭、石油和天然气等化石能源。二次能源主要是指一次能源经过加工后直接或间接转化而来的电能、化石燃料产品和沼气等。按照对环境的影响来分，又可分为清洁型能源和污染型能源。除此之外，还可以按能源是否作为商品进入能源市场进行交易分为商品能源和非商品能源。

随着工业时代的到来，化石燃料在历史的舞台上燃起熊熊烈火，为人类现代生活带来了光明与希望，解放了人类的双手，人们的物质生活水平得到极大的改善，但同时也灼烧了地球的容颜。经济迅速腾飞，接踵而至的是能源危机、全球变暖、生态环境恶化等不容忽视的现实。作为可再生的、清洁型的“太阳能改装工厂”，生物质能逐渐成为能源发展的重要方向。

1.1 生物质的来源

生物质是指通过光合作用而形成的各种有机体，即一切有生命的可以生长的有机物质的总和。生物质能是太阳能以化学能的形式贮存在生物质中的一种能量，生物质能源是仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源，占世界一次能源消耗的14%。每年约2200亿吨有机物通过光合作用合成，相当于人类每年所需能耗的10倍。生物质能分布广泛，具有可再生性、环境友好性和碳中性，也是唯一可固碳的可再生资源，是来自太阳的优质燃料，生物质的产生与资源化流程如图1-1所示。

生物质的狭义定义是指农林畜牧业生产过程中除粮食、果实以外产生的秸秆、树木和禽畜粪便以及再次加工产生的脚料等物质，但这一定义已不满足现阶段生物质能源发展应用现状。目前国内外所利用的生物质原料的内容大大丰富，能源作物和微生物等生物质能原料也登上舞台，能源植物通常包括速生薪炭林、能榨油或产油的植物、可供厌氧发酵用的藻类和其他植物等，如绿色藻类可将二氧化碳转化为一种高浓度的液体能源物质。

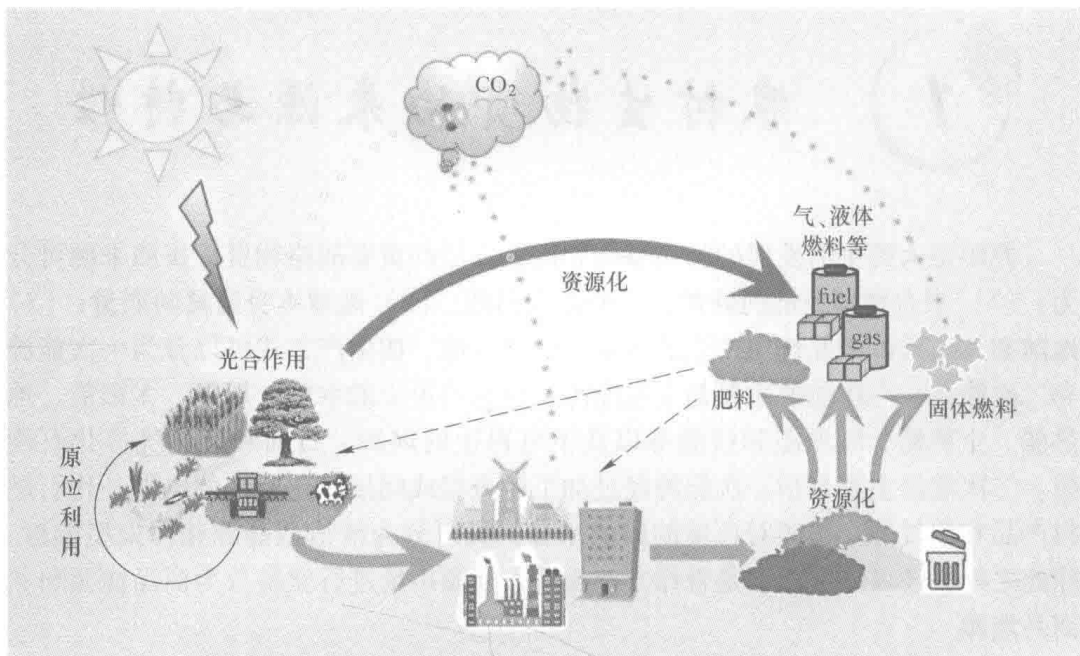


图 1-1 生物质的产生与资源化流程

1.2 生物质的种类

生物质按照原料成分可分为糖类、淀粉类和木质纤维素类。一些生物质还含有脂肪等物质。目前主要按照原料来源进行分类：(1) 农作物秸秆；(2) 林业生物资源，如乔、灌、草；(3) 农林产品加工的废弃物；(4) 禽畜粪便；(5) 生活和工业有机垃圾和废物等；(6) 能源作物（能源植物、能源藻类、能源微生物）。生物质的实物与分类如图 1-2 和图 1-3 所示。

农作物秸秆是指小麦、水稻、玉米、油菜、棉花等农作物在收获籽实后的剩余部分，富含氮、磷、钾、钙等元素，秸秆的传统处理方法是作为饲料、柴薪，但是秸秆的能量密度低，约 $100\text{kg}/\text{m}^3$ （生活垃圾约 $200\text{kg}/\text{m}^3$ ，原煤约 $1400\text{kg}/\text{m}^3$ ），直接燃烧的热值低，且燃烧产生的气体会影响大气环境。煤与部分生物质的热值和组成成分的对比见表 1-1。目前，还田、固化成型、厌氧发酵、生物质热化学转化等方法是实现秸秆等生物质高效利用的重要途径。

林业生物质资源主要有三类：(1) 木质纤维素类包括薪炭林、灌木林等；(2) 木本油料类包括油桐、黄连木等；(3) 木本淀粉类包括板栗、芭蕉芋等。中国现有森林面积 208 万平方千米，生物质总量超过 180 亿吨。林业生物质资源的主要利用方法有厌氧发酵、生物质热化学转化等。



图 1-2 典型农村生物质实物

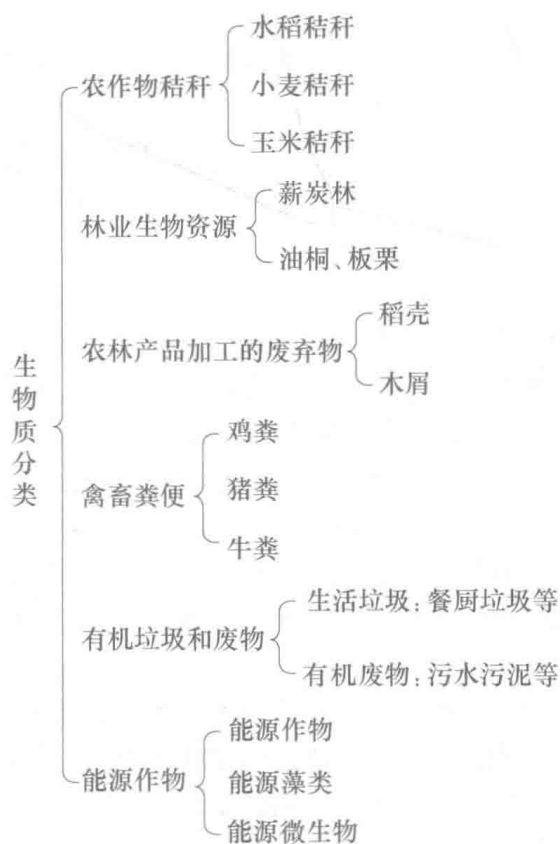


图 1-3 生物质的分类



表 1-1 煤与部分生物质热值、组成成分的对比

燃料种类	高位热值 /kJ·kg ⁻¹	低位热值 /kJ·kg ⁻¹	水分/%	工业分析法（不含水分）			元素分析法（不含水分）		
				挥发分 /%	灰分 /%	固定碳 /%	碳/%	氮/%	硫/%
西部煤	30471	21564	6.0	38.5	9.7	51.8	75.9	1.5	2.8
中部褐煤	15875	10585	32.2	57.6	13.7	28.7	59.9	1.0	1.5
硬木	19771	15353	50	80.0	2.3	17.1	48.9	0.2	0.01
秸秆	—	12130	8.39	67.36	10.9	19.35	49.04	1.05	0.34
杂草	—	13050	9.43	68.77	11.46	16.4	—	—	—
花生壳	—	15790	13.8	68.1	1.6	22.42	—	—	—
稻壳	—	12370	11.6	62.61	5.62	13.95	46.2	2.58	0.14
杉木	—	13798	13.2	81.2	0.74	14.79	52.8	0.1	—

农林产品加工的废弃物在农林资源生产加工利用的过程中产生，主要是植物纤维类物质，如水稻的稻壳、木屑等，处理方法有饲料转化、堆肥、发酵产沼等。

禽畜粪便包括猪、牛、羊、鸡、鸭、狗等禽畜的粪便排泄物，其含有大量的有机物，富含氮元素，可作为有机肥的重要原料。在化肥尚未普及之前，禽畜粪便是最主要的农业肥料来源。干燥后的禽畜粪便也可以作为燃料直接燃烧供热。禽畜粪便和秸秆也是沼气发酵的两大主要原料。此外，现代禽畜粪便的处理方法还包括精制有机肥、堆肥、饲料转化等。

生活和工业有机废物包括生活垃圾（如餐厨垃圾）、有机废物（如污水污泥）等。处理方式有焚烧、热化学转化和厌氧发酵等。餐厨垃圾占生活垃圾较大比例，具有高资源性的特点。据联合国粮农组织（FAO）报道，全球大约有 1/3 的食物（约 13 亿吨）在生产或食用过程中流失或被浪费。污水污泥在污水生化处理过程中产生，富含有机质，同时也含有大量的有毒有害物质，如重金属、病原体等。国家统计局数据显示，中国每年的污水产量约 700 亿吨，而单位体积污水约产生 0.3%~0.5% 的污泥。污水污泥的不当处理会造成严重的环境问题和卫生问题，反之，则会带来巨大的环境效益和经济效益。这类生物质的处理方法通常有堆肥、厌氧发酵、饲料转化等。

能源作物是直接以制取燃料为目标的栽培作物，主要分为能源植物、能源微生物和能源藻类。甘蔗和油菜等植物富含糖淀粉和油脂，同时也是人类优质的粮食来源，开发时不宜与农争地，因此，筛选和开发能源富集型野生和半野生植物是能源作物来源的关键。藻类也是生产生物燃料的可靠来源，可以累积并储存油脂，一定条件下，油脂含量可达细胞干重的 10%~50%。微生物具有细胞增殖



快、生产周期短、能连续大规模生产等优点，能源微生物如酵母、霉菌、细菌等可以利用碳水化合物、碳氢化合物和普通油脂合成油脂，且不占用农林用地。

生物质原料多元性也决定了处理技术和产品的多元化。不同生物质的化学成分不同，这对生物质资源化处理技术的适用性提出了严峻挑战。生物质主要的转化利用方式分为三类，即物理处理技术（主要是利用机械力将秸秆等生物质原位机械粉碎还田和压缩固化成型燃料化等，物理处理通常作为化学和生物处理技术的预处理环节）、化学处理技术（直接燃烧、热化学转化为乙醇和生物柴油等燃料物质）和生物处理技术（厌氧发酵、原料化等）。在实际生产应用过程中，三种处理技术通常联合使用，以达到最佳处理效果。现代生物质能利用是指借助热化学、生物化学等手段，通过一系列先进的转化技术，生产出固、液、气等高品位能源来替代化石燃料，为人类生产生活提供电力、交通燃料、热能、燃气等终端能源产品。部分生物质元素成分及资源化方向见表 1-2。

表 1-2 部分生物质元素成分及资源化方向

生物质	化学元素（质量分数）/%				资源化方向
	C	H	O	N	
麦稻秸秆	42.37	5.84~6.92	43.41~48.84	0.74~1.05	还田、堆肥、厌氧发酵等
玉米秸秆	43.38	5.75	49.00	0.97	还田、堆肥、厌氧发酵等
稻壳	46.20	6.10	45.00	2.58	堆肥、饲料转化、厌氧发酵等
杉木	52.80	6.30	40.50	0.10	厌氧发酵、生物质热化学转化等
鸡粪	31.54	4.48	59.70	4.28	堆肥、厌氧发酵、饲料转化等
猪粪	43.03	6.08	47.09	3.08	堆肥、厌氧发酵、饲料转化等
牛粪	42.07	5.60	50.58	1.75	堆肥、厌氧发酵、饲料转化等
城市生活垃圾	15.59~16.64	2.78~3.04	11.30~13.06	0.41~0.44	焚烧发电、热化学转化、厌氧发酵等
污泥	34.04	5.027	23.482	6.09	堆肥、厌氧发酵、饲料转化等
餐厨垃圾	43.52	6.22	34.50	2.79	堆肥、厌氧发酵、饲料转化等