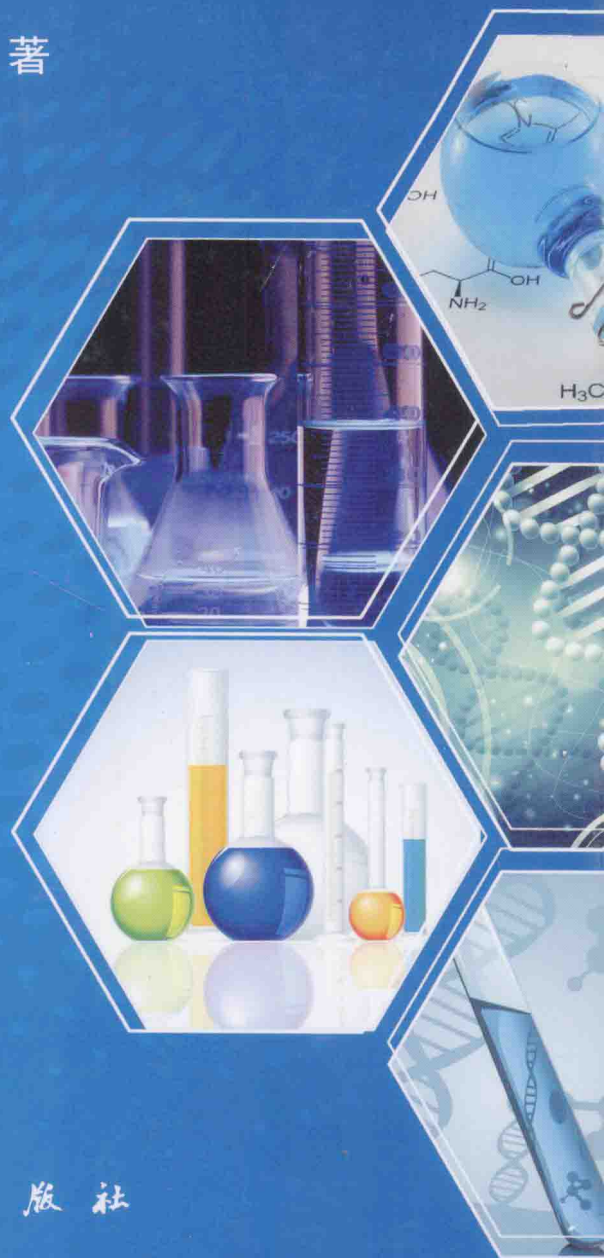


生物质选择性热解制备 液体燃料与化学品

肖 睿 张会启 沈德魁 著



科学出版社

生物质选择性热解制备 液体燃料与化学品

肖 睿 张会岩 沈德魁 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书全面系统地介绍了生物质选择性热解制备液体燃料和化学品的相关技术,包括生物质中纤维素、半纤维素和木质素热解反应途径与热解过程中各组份间的相互作用,生物质快速热解制生物油及生物油提质技术,生物质直接催化热解技术,催化剂在热解反应中积碳行为与调控机理,以及生物质选择性热解反应器。为我国生物质高值化利用提供了一条有效途径。

本书对在高校和科研院所从事生物质能源研究的科技工作者,以及从事生物质技术应用与推广的企业技术与管理人员具有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

生物质选择性热解制备液体燃料与化学品/肖睿,张会岩,沈德魁著. —北京:科学出版社,2015.2

ISBN 978-7-03-043500-2

I. ①生… II. ①肖… ②张… ③沈… III. ①生物燃料—液体燃料—研究 IV. ①T66

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第039455号

责任编辑:张会岩 周丹/责任校对:张怡君

责任印制:肖兴/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年3月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:430 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

由肖睿教授等著《生物质选择性热解制备液体燃料与化学品》一书，即将由科学出版社出版，我很荣幸能阅读该书，并欣然为该书写序。

生物质能是重要的可再生能源。从广义上讲，它不仅包括秸秆、木屑等农林废弃物，还包括畜禽粪便、城市生活垃圾等。生物质能蕴藏量大，分布广泛。据统计，当前世界工业化石资源总碳消耗量大约为 65 亿 t/a，而全球由光合作用造成的生物质碳循环总量约为 950 亿 t/a，因此仅需 10% 的生物质进入工业循环，就可以支撑世界经济发展。我国具有丰富的生物质资源，理论生物质资源约折合 50 亿 t 标准煤。与太阳能、风能等常见的过程性可再生能源不同，生物质能属于含碳、氢的能量，这与煤、石油、天然气等化石能源相似，可直接实现资源替代。此外，生物质利用还有助于改善环境，减轻由秸秆焚烧造成的雾霾，以及由畜禽粪便排放造成的水体污染等。

目前生物质利用率偏低，相关产业尚未发展起来，主要原因可归结到原料、转化过程和产品三个方面。从原料上看，生物质资源分散，能量密度低，造成收集与运输成本偏高；转化过程中许多关键技术还不够成熟，存在转化效率低，没有形成标准化、模块化设计方法等问题；产品以低附加值的电、热为主，高价值的产品如车用燃料和化学品缺乏，价格难以与化石燃料竞争，制约了生物质产业的发展。生物质选择性热解制备液体燃料与化学品技术是在生物质快速热解制油技术上发展起来的一项新技术，该技术可以在较温和的条件下就地生物质快速转化成能量密度高、易运输的生物油，而且在转化过程中通过催化剂的作用，将低价值的生物质定向转化成车用燃料和化学品等高价值的产品，从而解决了生物质利用中原料收集运输与产品高价值两大瓶颈问题，是一项具有发展前景的技术。

围绕生物质选择性热解制备液体燃料与化学品技术，肖睿教授团队在国家“973”、“863”和自然科学基金等多项项目的支持下，在从基础研究到工程应用等方面长期、系统开展工作，该书是他们多年工作成果的总结。该书从生物质热解机理，生物质快速热解制油及油催化提质，生物质就地催化热解制高价值液体燃料和化学品，催化热解中催化剂积碳行为及其调控方法，到反应器放大与工程应用等诸多方面进行了系统的分析与介绍。书中介绍了一些具有原创性的技术与方法，如根据生物油理化性质不同，重质组分制氢，提供给轻质组分加氢提质，实现生物油全组分分级高值利用；加氢采用低温、高温二级加氢，避免传统加氢转化率低且催化剂易失活等问题；根据生物质资源分布特点，提出了采用移动式装置分布式制油，油再集中炼制等技术模式，探索可产业化的生

物质高价值利用途径。该书可作为能源与环境学科大学生、研究生的教材或教学参考书，也可供相关研究人员和工程技术人员参考。

中国工程院院士

2015年2月10日于广州

前 言

生物质是自然界光合作用的产物。生物质能是一种可再生的清洁能源,其组分中基本不含硫,燃烧后不会产生二氧化硫,特别是生物质利用过程中排放的二氧化碳,可以通过光合作用形成新的生物质,不会带来化石能源利用所出现的“温室效应”,因此生物质也被称为“碳中性”的能源。据统计,全球每年新产生的生物质约为 1700 亿 t,可折算成标准煤 850 亿 t 或油当量 600 亿 t,约相当于 2007 年全球一次能源供应总量的 5 倍。我国生物质资源种类繁多,主要包括农业废弃物及林产品加工业废弃物、畜禽粪便等。据中国工程院发布的《中国可再生能源发展战略研究进展》报道,我国目前每年可开发利用的生物质能源相当于 12 亿 t 的标准煤,占全国每年能源总消耗量的 1/3 以上。我国 2011 年林业三剩物及次小薪材产生量约 2 亿 t,畜禽粪便产生量达到 20 亿 t,农作物秸秆理论资源量达到 8.89 亿 t。如能高效利用以上资源,对破解我国目前所面临的能源与环境问题具有重要意义。

生物质选择性热解是近期发展起来的热化学转化技术,它通过传统的热解技术与化学催化技术的有机结合,将生物质定向转化成高价值的生物基液体燃料和化学品,从而实现生物质全组分、高值化利用,而且还具有反应条件温和、原料适应性广等诸多优点。值得一提的是,该技术可以实现生物质分散制油、油集中炼制提质,较适合生物质资源分散的特点,具有很好的商业应用前景。本书综合了本课题组多年的研究成果,从生物质结构,生物质三组分(纤维素、半纤维素、木质素)热解特性及其热解过程中各组分间的相互作用,生物质直接(在线催化热解)与间接选择性热解(热解制油-油催化提质),催化剂在热解过程的积碳的形成与抑制机理,反应器放大规律等多个方面进行了较系统的介绍,可供从事生物质利用领域研究人员借鉴与参考。

本书在撰写过程中得到了本课题组研究生支持,他们是胡珺、邵珊珊、吴石亮、曾德望、罗蒙蒙、乜建龙、董承健、郑健、吴昌松、江洋,在此一并表示感谢。

本书及相关研究工作得到了国家 863 项目(2012AA051801),国家 973 项目(2010CB732206, 2012CB215306),国家自然科学基金项目(91334205, 51476035, 51076031, 51476034, 51106030)等的资助,在此表示感谢!

由于作者水平有限,不妥或疏漏在所难免,敬请读者给予批评、指正。

作 者

2015 年 1 月

目 录

第 1 章 生物质资源及应用现状	1
1.1 生物质种类与分布	1
1.1.1 生物质种类	1
1.1.2 全球的生物质资源分布	2
1.1.3 中国的生物质资源分布	4
1.2 生物质的主要有机组分	7
1.2.1 纤维素	8
1.2.2 半纤维素	9
1.2.3 木质素	10
1.2.4 木质素-碳水化合物复合体	12
1.3 生物质主要有机组分的分离方法	13
1.3.1 纤维素的分离	13
1.3.2 半纤维素的分离	14
1.3.3 木质素的分离	14
1.4 生物质的转化与利用技术	16
1.4.1 燃烧发电技术	16
1.4.2 生物质气化技术	17
1.4.3 生物质热解技术	18
1.4.4 生物质碳化技术	19
1.4.5 生物质制备燃料乙醇技术	20
1.4.6 生物质厌氧发酵技术	21
1.5 生物质选择性热解制备液体燃料与化学品	21
参考文献	22
第 2 章 生物质多糖类组分热解机理研究	27
2.1 模型化合物甘油醛的热解机理	27
2.1.1 甘油醛慢速热解机理	28
2.1.2 甘油醛快速热解机理	31
2.1.3 甘油醛热解主反应和二次反应	32
2.2 纤维素的热解机理	34
2.2.1 纤维素慢速热解机理	35
2.2.2 纤维素快速热解机理	42
2.3 半纤维素的热解机理	47
2.3.1 半纤维素慢速热解机理	48
2.3.2 半纤维素快速热解机理	53
2.4 多糖类热解量子化学模拟	56

2.4.1	量子化学和密度泛函理论介绍	56
2.4.2	甘油醛热解过程量子解析	58
2.4.3	多糖类物质热解途径的量子解析	64
	参考文献	66
第3章	木质素的热解机理	69
3.1	木质素的结构分析	69
3.1.1	木质素的元素分布	70
3.1.2	木质素的傅里叶变换红外光谱分析	70
3.1.3	木质素的二维核磁	72
3.2	木质素慢速热解机理	74
3.2.1	TG-DTG	74
3.2.2	挥发分产物析出分析	77
3.2.3	木质素热解动力学模型	82
3.3	木质素快速热解机理	85
3.3.1	温度对木质素快速热解的影响	92
3.3.2	不同生物质来源木质素的快速热解	93
3.3.3	不同分离方法木质素的快速热解	94
3.3.4	反应途径解析	94
	参考文献	101
第4章	生物质热解过程主要组分间的相互作用	104
4.1	简单混合组分间的相互作用	106
4.1.1	纤维素-木质素相互作用	106
4.1.2	纤维素-半纤维素相互作用	113
4.1.3	半纤维素-木质素相互作用	115
4.2	压片混合组分间的相互作用	117
4.3	自然混合组分间的相互作用	119
4.3.1	样品准备	119
4.3.2	纤维素-半纤维素(综纤维素)	121
4.3.3	纤维素-木质素	123
4.4	相互作用机理	125
4.5	相互作用研究的挑战	128
	参考文献	130
第5章	生物质快速热解制备生物油	132
5.1	生物质快速热解机理	132
5.2	生物质预处理	136
5.2.1	干燥	136
5.2.2	粉碎	137
5.2.3	成型	138

5.2.4 脱灰	139
5.2.5 烘焙	139
5.3 生物质制备生物油影响因素	142
5.3.1 生物质物性的影响	142
5.3.2 反应条件的影响	144
5.4 生物质热解制油反应器	147
5.4.1 鼓泡流化床反应器	147
5.4.2 循环流化床和传输床反应器	148
5.4.3 旋转锥反应器	149
5.4.4 螺旋反应器	149
5.4.5 烧蚀涡流反应器	150
5.4.6 真空热解反应器	150
5.4.7 内循环串行流化床反应器	151
5.4.8 下行床反应器	155
5.4.9 生物质热解反应器前沿动态	157
5.5 生物油理化性质及其应用	158
5.5.1 物理性质	159
5.5.2 化学性质	162
5.5.3 生物油的应用	163
参考文献	164
第 6 章 生物油品质提升	166
6.1 生物油品质传统提升方法	166
6.1.1 物理分离	166
6.1.2 乳化	170
6.1.3 催化酯化	171
6.1.4 催化加氢	172
6.1.5 催化热解	174
6.1.6 其他提质方法	175
6.2 生物油选择性加氢-沸石催化	176
6.2.1 生物油选择性加氢-沸石催化制备烃类化学品工艺流程	177
6.2.2 原料和催化剂	177
6.2.3 实验装置与方法	179
6.2.4 选择性催化加氢结果分析	181
6.2.5 加氢产物的沸石催化转化	184
6.2.6 反应条件对低温加氢-高温加氢-沸石催化生物油的影响	186
6.2.7 水相生物油选择性加氢-沸石催化工艺的经济性分析	190
6.3 千吨级生物油提质制备含氧液体燃料示范	192
6.3.1 示范装置工艺路线	192

6.3.2 系统物料衡算	192
参考文献	196
第7章 生物质催化热解	200
7.1 生物质催化热解途径	200
7.2 催化热解物料和反应装置	201
7.2.1 物料	201
7.2.2 催化剂	201
7.2.3 实验装置和方法	202
7.3 不同催化剂下生物质热解	205
7.3.1 不同催化剂对产物产率分布的影响	205
7.3.2 催化剂和生物质比例对产物分布的影响	207
7.3.3 生物质在连续进料流化床中催化热解	211
7.4 生物质进行沸石催化转化的本质因素——有效氢碳比	215
7.4.1 有效氢碳比作用场所——沸石催化剂	216
7.4.2 不同有效氢碳比生物质原料的转化途径	216
7.4.3 不同有效氢碳比原料催化转化结果分析	217
7.5 生物质和高有效氢碳比原料共催化热解	227
7.5.1 共催化热解中碳和氢的转移特性	228
7.5.2 生物质和甲醇共催化转化	231
7.5.3 生物质和不同醇类共催化热解比较	234
7.5.4 生物质和不同废塑料共催化热解比较	236
7.5.5 生物质和废弃油脂共催化热解	237
参考文献	241
第8章 生物质催化热解中催化剂积碳行为及其调控方法	243
8.1 生物质热解衍生物催化转化中积碳的理化特性表征	243
8.1.1 生物质热解衍生物催化特性对比实验	243
8.1.2 典型生物质热解衍生物催化热解过程中积碳行为表征	246
8.1.3 沸石催化剂的催化机理及失活机理	250
8.2 生物质模型化合物催化热解积碳动力学	252
8.2.1 呋喃催化转化积碳本征动力学	252
8.2.2 呋喃催化转化中活性积碳与惰性积碳的区分	255
8.2.3 程序升温条件下呋喃催化热解催化剂积碳研究	257
8.3 催化剂改性——金属负载	259
8.4 催化剂改性——化学液相沉积法	260
8.4.1 改性催化剂的制备	261
8.4.2 催化剂表征	261
8.4.3 改性剂浓度对催化剂催化性能的影响	264
8.4.4 CLD 处理温度对改性催化剂催化性能的影响	264

8.4.5	CLD 反应时间对改性催化剂催化性能的影响	264
8.4.6	不同改性剂对改性催化剂催化性能的影响	267
8.5	催化剂改性——化学脱铝方法	268
8.5.1	改性催化剂的制备	268
8.5.2	催化剂表征	268
8.5.3	不同的酸对改性催化剂催化性能的影响	271
8.5.4	不同氢离子浓度对改性催化剂催化性能的影响	272
8.5.5	不同的脱铝时间对改性催化剂催化性能的影响	273
8.5.6	不同的脱铝温度对改性催化剂催化性能的影响	274
8.5.7	CLD 与酸处理法改性 ZSM-5 催化剂对比实验研究	275
	参考文献	276

第 1 章 生物质资源及应用现状

生物质 (biomass) 是指能够用作燃料或者工业原料的有机物, 主要来自于树木、农作物及藻类, 以及更广义上的有机废弃物。生物质能的本质是绿色植物通过光合作用, 将太阳能转化形成的化学能。当生物质中的化学键通过热化学、生物化学等技术途径被破坏时, 所存储的化学能被释放出来, 并可形成多种高品位的液体和气体燃料。生物质利用过程中排放的二氧化碳, 可以很快地再次通过光合作用的循环形成新的生物质, 不会造成化石能源利用所出现的“温室效应”, 因此生物质也被称为“碳中性”的能源。

生物质是唯一可以制备固体燃料、燃气、电力和液体燃料等多种高品位能源及高价值化学品、实现化石能源全替代的可再生能源, 也是后化石时代唯一的有机碳来源^[1, 2]。生物质能的能源当量约占世界能源总量的 14%, 仅次于煤炭、石油和天然气, 居第四位。我国具有丰富的生物质资源, 据中国工程院发布的《中国可再生能源发展战略研究进展》报道, 我国目前每年可开发利用的生物质能源相当于 12 亿 t 的标准煤, 占全国每年能源总消耗量的 1/3 以上, 是水能的 2 倍和风能的 3.5 倍。

在过去的几十年中, 生物质的利用受到大家的关注, 出现这一现象主要有以下几个原因^[3]: ①基于现有转化技术的生物质利用成本相对较低, 易于普及; ②生物质资源分布广泛, 储量巨大, 且可再生; ③碳平衡, 环境友好。通过适当的技术将生物质能转化为高品位能源以替代化石原料, 可减轻人类对化石燃料资源的过分依赖, 利于长期的能源安全, 并能降低温室气体的排放, 符合人类社会可持续发展的战略要求。

1.1 生物质种类与分布

1.1.1 生物质种类

按原料来源, 生物质主要可分为农业废物、木材及森林工业废物、城市及工业有机废物、畜禽废物、水生植物, 以及能源作物等。其中能源作物指以能提供制取燃料原料或提供燃料油为目的的栽培植物。

生物质由有机物和无机物两部分组成。无机物包括水和矿物质, 无法用于生物质的利用和能量转化。有机物是生物质的主要组成部分, 但有机物种类繁多, 不易直接测定, 一般对其进行元素分析和工业分析。元素分析是指测定生物质中的元素组成, 即碳、氢、氧、氮、硫等元素的百分含量。不同种类生物质的元素分析见表 1-1^[3-8]。工业分析也称实用分析, 分析项目包括: 水分 (W)、灰分 (A)、挥发分 (V)、固定碳 (FC) 和热值 (HV)。不同种类生物质的工业分析见表 1-2^[3, 5, 6, 9]。

表 1-1 不同种类生物质的元素分析^[3-8]

生物质	C _{ad} (%)	H _{ad} (%)	O _{ad} (%)	N _{ad} (%)	S _{ad} (%)
木材类	46.0~52.0	5.8~7.5	39.0~51.5	0~0.5	0~0.5
农作物类（秸秆等）	38.0~46.2	4.0~7.0	34.5~50.0	0.5~0.8	0~0.2
动物粪便	34.5~45.5	4.3~5.5	21.3~31.0	0.9~2.8	0~0.6
水生植物（藻类等）	44.5~53.0	6.4~7.5	28.5~46.0	3.0~8.1	0~0.5

注：ad 为空气干燥基。

表 1-2 不同种类生物质的工业分析^[3, 5, 6, 9]

生物质	FC _{ad} (%)	V _{ad} (%)	A _{ad} (%)	W _{ad} (%)	低位热值 (MJ/kg)
木材类	19.0~21.5	71.5~74.5	0.5~1.6	4.0~8.0	18.5~21.5
农作物类（秸秆等）	15.0~19.5	61.5~71.8	2.4~16.4	4.3~8.6	14.2~17.8
动物粪便	10.0~20.0	65.0~72.0	15.0~22.0	—	11.0~17.0
水生植物（藻类等）	15.0~20.0	65.0~70.0	1.0~5.0	5.0~8.0	15.0~21.0

注：ad 为空气干燥基。

1.1.2 全球的生物质资源分布

生物质能的开发利用已经受到世界各国的高度重视，并成为重要的国家战略资源。世界全部生物质存量约为 1.9 万亿 t，陆地与海洋合计平均最低更替率为 11 年，可以计算出每年新产生的生物质约为 1700 亿 t，折算成标准煤 850 亿 t 或油当量 600 亿 t，约相当于 2007 年全球一次能源供应总量的 5 倍。全球生物质能资源量见表 1-3^[10]。根据国际能源机构（International Energy Agency, IEA）的定义，生物质能分为固体生物质、木炭、城市固体废物、生物液体燃料和沼气等。固体生物质（指作为燃料直接燃烧或转化为其他形式后燃烧的生物质，包括农作物秸秆、薪柴、木材废弃物，其中也包括木炭）是世界产量最大的可再生资源，占世界一次能源产量的 10.4%，占可再生能源的 77.4%。欧盟委员会在其发布的《欧洲安全、竞争、可持续发展能源战略》中指出，到 2020 年生物质燃料将替代 20% 的化石燃料^[11]。

表 1-3 全球生物质能资源量^[10]

类型	面积 (×10 ⁶ km ²)	初级生产量 (亿 t/a)	平均生物量 (kg/m ²)	生物质存量 (亿 t)	最低更替率 (a)
森林	51.3	761.0	33.200	17 029.0	23.82
草原与草地	37.7	240.1	3.008	1 134.0	4.72
耕地	14.0	91.0	1.000	140.0	1.54
河、海	363.0	138.9	0.008	29.2	1.94
沼泽	2.0	40.0	15.000	300.0	7.50
沙漠和冰原	42.0	16.9	0.311	130.8	7.23
合计	510.0	1 287.9	52.527	18 763	46.75

注：草原与草地数据为推测值；生产量、生物量及生物质存量都以干碳计算。

全球生物质资源分布很不均匀，有些地区生物质资源十分丰富，但有些地区却十分

匮乏，全球生物质资源（农、林、畜废弃物）分布见图 1-1^[12]。美国不但是世界上开发利用生物质能最早的国家之一，而且生物质资源十分丰富。截止到 2012 年年底，生物质能已经成为美国可再生能源的主要来源，占美国全部能源供给量的 3%^[13]。

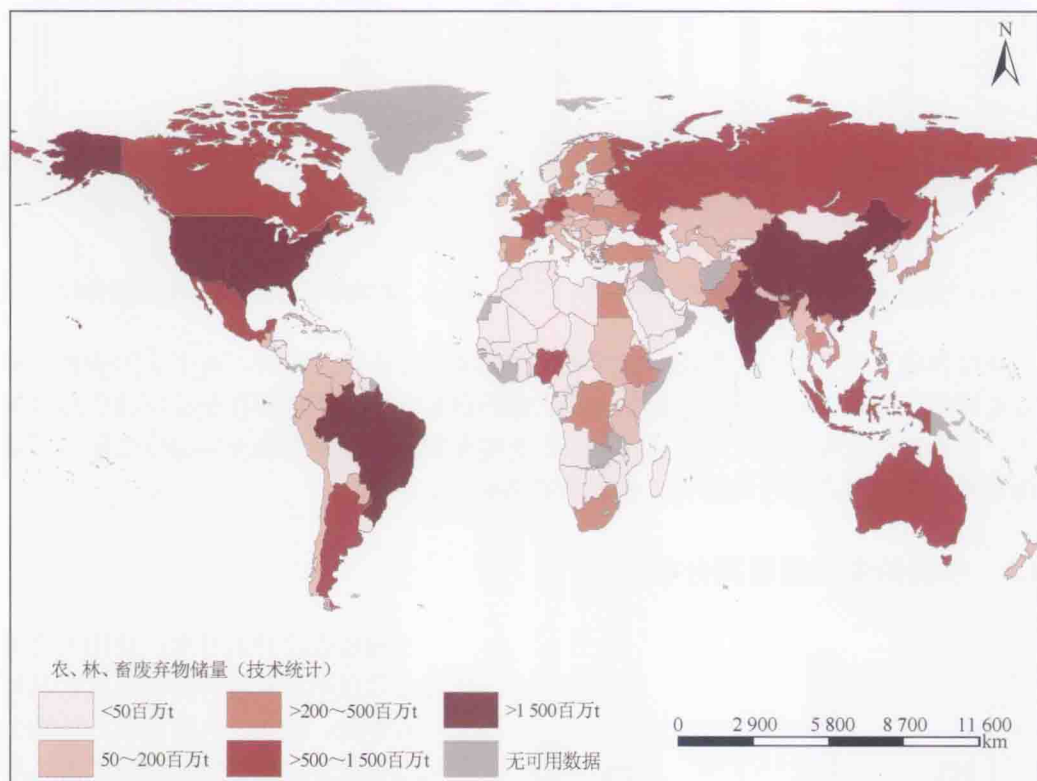


图 1-1 全球生物质资源（农、林、畜废弃物）分布^[12]

2010 年欧盟可再生能源消费总量达 1.52 亿 t 石油当量，占能源消费总量的 10%，占终端能源消费总量的 12.4%。其中生物质能源消费总量达 1.18 亿 t 石油当量，约占可再生能源消费总量的 77.6%，占欧盟所有能源消费总量的 8%，因此发展生物能源对于确保欧盟能源安全是至关重要的^[14]。据估计欧盟 14 国农业废弃物资源潜力总量为 31.0 百万 t 油当量（Mtoe），其分布情况见图 1-2；禽畜废弃物资源潜力总量为 13.1 Mtoe，其分布情况见图 1-3；林业废弃物资源潜力总量为 21.3 Mtoe，其分布情况见图 1-4^[15]。

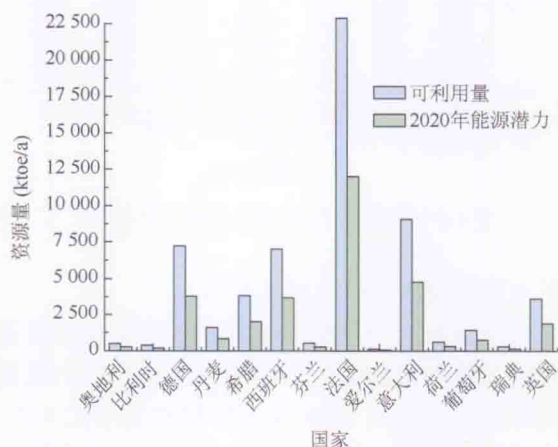


图 1-2 欧盟可利用农业废弃物资源分布^[15]

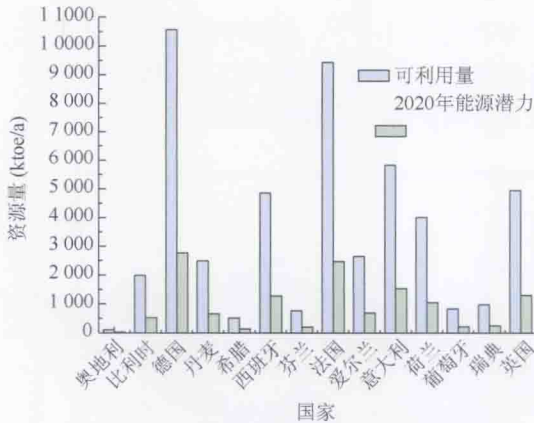


图 1-3 欧盟可利用禽畜废弃物资源分布^[15]

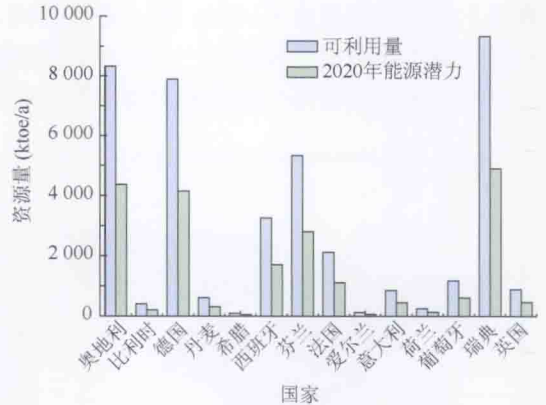


图 1-4 欧盟可利用林业废弃物资源分布^[15]

欧盟各成员国可利用的生物质资源种类、资源量存在较大差异。对于法国来说，其农业废弃物资源和禽畜废弃物资源量丰富；德国禽畜废弃物资源和林业废弃物资源潜力较大；瑞典的林业废弃物资源量远高于其农业废弃物资源量和禽畜废弃物资源量。因此各国在发展生物质产业时均需要考虑本国生物质资源种类。

1.1.3 中国的生物质资源分布

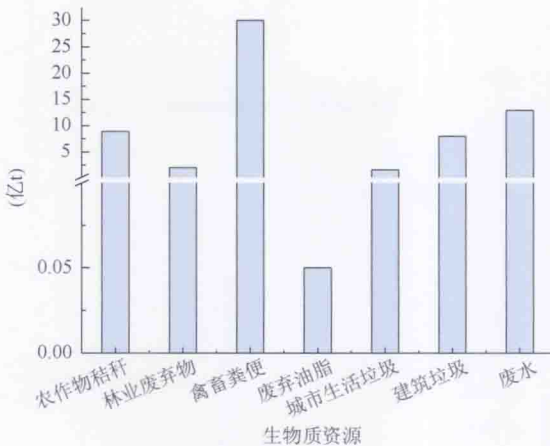


图 1-5 我国 2011 年主要生物质产量^[16]

生物质资源种类繁多，我国生物质资源主要包括农业废弃物及农林产品加工业废弃物、薪柴、人畜粪便、城镇生活垃圾等几个方面。据统计我国 2011 年林业三剩物及次小薪材产生量约 2 亿 t，其中采伐剩余物约占 15%，造材剩余物约占 5%，木材加工剩余物约占 50%；畜禽粪便产生量达到 30 亿 t；农作物秸秆理论资源量达到 8.89 亿 t，其中稻谷 2.01 亿 t，麦秆 1.64 亿 t，玉米秆 3.86 亿 t，棉秆 1980 万 t，糖类作物秸秆 1252 万 t，豆类秸秆 5725 万 t，薯类秸秆 1636 万 t；另外废弃油脂类约 500 万 t。我国 2011

年主要生物质产量见图 1-5^[16]。

我国是一个农业大国，农林类生物质资源丰富，主要包括秸秆及农业加工剩余物、薪柴及林木生物质能。根据我国农产品产量测算，每年的秸秆资源总量约 6.8 亿 t，可获得量约 5 亿 t。根据常见农作物谷草比（表 1-4）^[17]和《中国能源统计年鉴 2012》统计的我国主要农作物秸秆总量（表 1-5）^[18]，分析历年的秸秆组成可以发现，稻谷、小麦和玉米秸秆的产量最高，即我国的农作物秸秆资源组成主要是稻谷秸秆、小麦秸秆

和玉米秸秆。

表 1-4 常见农作物谷草比^[17]

作物种类	谷草比	作物种类	谷草比	作物种类	谷草比
稻谷	1	薯类	0.5	花生	2
小麦	1.4	豆类	1.5	糖类	0.1
玉米	2	棉花	3	麻类	1

表 1-5 我国历年主要农作物秸秆产量及总量^[18] (万 t)

年份	稻谷	小麦	玉米	薯类	豆类	棉花	花生	糖类	麻类	秸秆总量
2005	18 058.8	13 642.3	27 873.1	1 734.3	3 236.5	1 714.3	2 868.3	945.2	110.5	70 183.3
2006	18 171.8	15 185.2	30 320.6	1 350.6	3 005.6	2 259.8	2 577.4	1 046.0	89.1	74 006.1
2007	18 603.4	15 301.7	30 460.1	1 403.9	2 580.2	2 287.1	2 605.5	1 218.8	72.8	74 533.5
2008	19 189.6	15 745.0	33 182.8	1 490.1	3 064.9	2 247.6	2 857.2	1 342.0	62.5	79 181.7
2009	19 510.3	16 116.1	32 794.7	1 497.7	5 790.9	1 913.0	2 941.6	1 227.7	38.8	81 830.8
2010	19 576.1	16 125.3	35 449.1	1 557.1	5 689.6	1 788.3	3 128.8	1 200.9	31.7	84 547.0
2011	20 100.1	16 436.1	38 556.2	1 636.5	5 725.2	1 979.4	3 209.3	1 251.7	29.6	88 924.0
2012	20 423.6	16 943.2	41 122.8	1 646.2	2 595.8	2 050.8	3 338.4	1 348.5	26.1	89 495.4

我国农作物秸秆资源分布非常不均匀,2012 年我国不同地区秸秆总量分布见图 1-6^[18]。可以看出农作物秸秆产量最高的地区是河南、山东和黑龙江,而最少的地区是西藏和青海。总体上来看,我国中东部和东北地区秸秆资源量大,沿海、直辖市和西部地区资源量小。

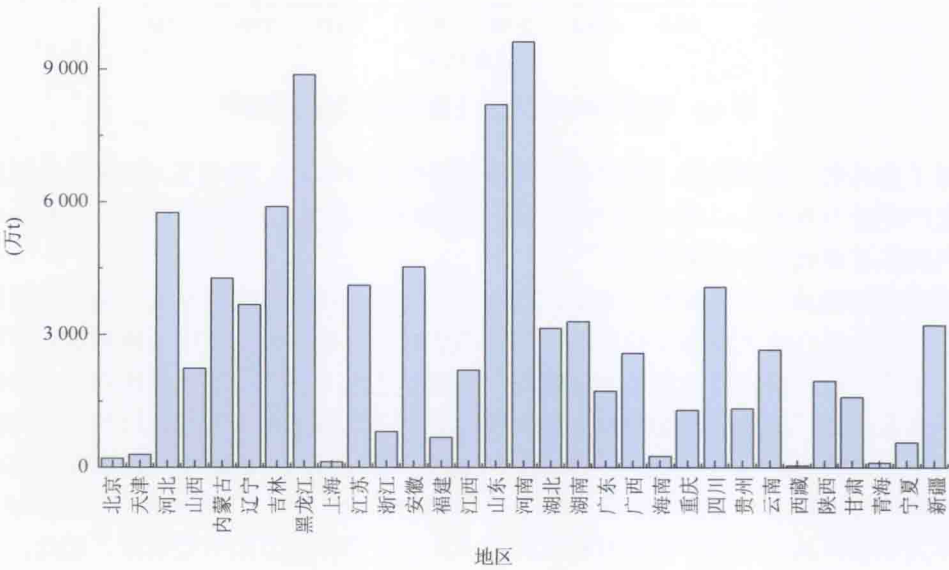


图 1-6 2012 年我国不同地区秸秆总量分布图^[18]

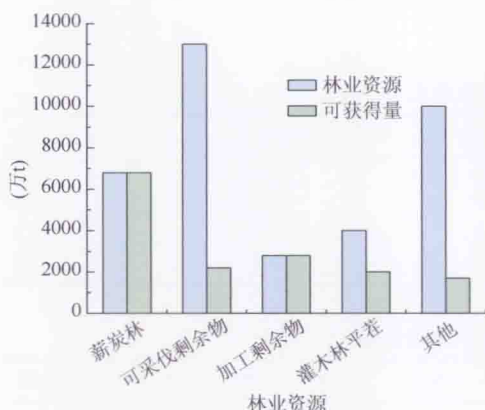


图 1-7 我国林业资源与可获得量分类^[19]

按照能源利用方式可将林木生物质能分为木质生物质能资源和油料生物质能资源两大类。木质生物质能资源主要包括薪炭林、林业剩余物、灌木林平茬复壮以及经济林修剪、造林苗木截干、城市绿化树和绿篱修剪产生的枝条等，我国目前木质林业剩余物资源量约为 1.61 亿 t，折合 9200 万 t 标准煤。油料生物质能资源主要包括木本油料树种，其树种果实可以用来生产生物柴油，据估算，全国主要油料树种果实产量为 224.5 万 t，但目前加工利用量仅为 54.7 万 t。我国林业资源与可获得量分类见图 1-7，我

国不同地区林业生物质资源总量分布见图 1-8^[19]。

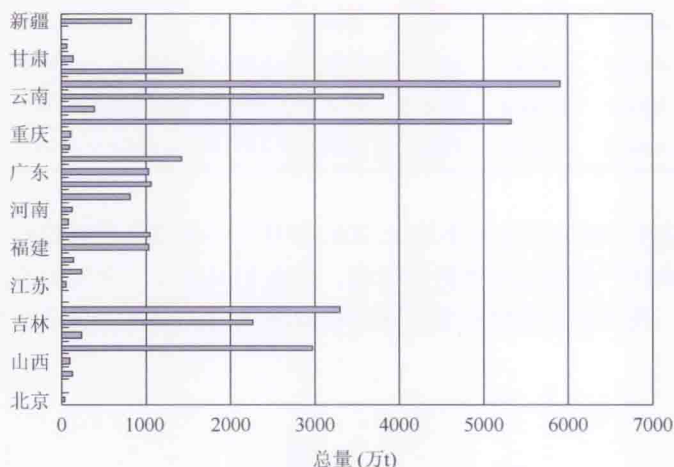


图 1-8 我国不同地区林业生物质资源总量分布图^[19]

除了农林类生物质资源，我国畜禽粪便资源也十分丰富。20 世纪 80 年代，我国畜禽粪便产生量为 6.9 亿 t，到 2010 年我国畜禽粪便排放总量已达到 19.00 亿 t。2010 年我国不同地区畜禽粪便分布见图 1-9^[20]。

废弃动植物油脂也是我国一种重要的生物质资源，可分为生产性废弃油和生活性废弃油。生产性废弃油主要指工业生产中常见的柴油、汽油、机油和化工油脂等剩下的脚油渣；生活性废弃油主要指常见的植物油、动物油这两大剩余和排放的废弃油渣和泔水油。据专家统计，这些废弃油脂的量占食用油消费总量的 20%~30%。以我国年均消费食用油量为 2100 万 t 计，则每年产生废油 400 万~800 万 t，能够收集起来作为资源的废弃油脂量在 400 万 t 左右。另外，我国年产棉花约 486 万 t，利用 900 万 t 的棉籽可年产 160 万 t 棉籽油，据估计全国可收集利用 100 万 t 棉籽油用作生物柴油。因此，全国可利用废弃油脂资源量约为 500 万 t^[5]。