

广州市科学技术协会  
广州市南山自然科学技术交流基金会  
广州市合力科普基金会

资助  
出版

# 生物质能 利用原理与技术

袁振宏 吴创之 马隆龙 等编著

Principles  
and  
Technologies

of  
Bioenergy  
Utilization



化学工业出版社

广州市科学技术协会  
广州市南山自然科学技术交流基金会  
广州市合力科普基金会

资助  
出版

# 生物质能 利用原理与技术

袁振宏 吴创之 马隆龙 等编著



Principles  
and  
Technologies  

---

of  
Bioenergy  
Utilization



化学工业出版社

· 北京 ·

《生物质能利用原理与技术》全面介绍了生物质能利用原理与技术，阐述了生物质能的基础理论，介绍了各种工艺技术的能源转化机理和工艺原理。几乎涉及了所有的成熟技术，包括直接燃烧技术、厌氧过程与沼气技术、生物质压缩成型燃烧技术、生物质气化技术、燃料乙醇技术、热裂解技术、生物质制氢、合成燃料技术、植物油与生物柴油技术、城市生活垃圾处理技术和微生物燃料电池。

《生物质能利用原理与技术》一书希望为从事和关心生物质能工作的人们提供一些有益的帮助，包括从事科学研究工作、技术开发人员和企业界人士，以及相关院校教师和学生。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

生物质能利用原理与技术/袁振宏等编著. —北京: 化学工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-122-25976-9

I. ①生… II. ①袁… 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 (2016) 第 000023 号

责任编辑: 陈 蕾 刘 丹  
责任校对: 王 静

装帧设计: 尹琳琳

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 31 $\frac{3}{4}$  字数 857 千字 2016 年 6 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: 128.00 元

版权所有 违者必究

# 《生物质能利用原理与技术》编写人员

(按姓氏笔画排序)

马隆龙	王忠铭	王 闻	王铁军	亓 伟	孔晓英	邓 欢
田宜水	吕鹏梅	朱顺妮	朱锡锋	庄新姝	刘云云	刘华财
刘汝宽	刘姝娜	刘晓风	闫常峰	许 洁	许 敏	许敬亮
孙冬梅	孙永明	阴秀丽	李 东	李伟振	李连华	李昌珠
李海滨	李培旺	李 颖	杨改秀	杨玲梅	肖志红	肖明松
吴创之	何晓峰	余春江	余 强	张全国	张 宇	张良波
张晓东	张 琦	陈汉平	尚常花	易维明	罗 文	周劲松
周桂雄	周肇秋	赵 海	荆艳玲	姜 洋	袁振宏	徐惠娟
郭 颖	甄 峰	雷廷宙	蔡昌达	谭雪松		



# 序 言

能源是当前人类、社会赖以生存和发展的重要物质基础，影响着人类生活的方方面面。2014年，我国石油进口量大幅增长，原油净进口量首次突破3亿吨，对外依存度更是高达59.6%，是世界上仅次于美国的能源消费大国。随着我国经济持续的高位运行和增长以及汽车保有量的继续增加，我国的石油对外依存度将继续攀升。能源短缺不仅给我国的能源战略安全构成潜在的威胁，而且能源消费所引起的环境问题也已成为制约我国经济、社会持续、快速、健康发展的瓶颈。加快发展生物质能，对于发展能源替代、维护我国能源安全有着极为重要的意义。

近年来，在政府和社会的广泛重视和支持下，我国生物质能开发和利用事业得到了迅猛发展。《生物质能利用原理与技术》一书，充分考虑了时代发展的需要，系统地介绍了生物质能开发利用过程中所涉及的基础理论、工艺流程和应用实践等，集成了各种生物质能转化、利用技术的最新理论、工艺、方法和进展，翔实地展现了生物质能开发利用的全貌。全书内容丰富、编排合理、叙述流畅，既考虑了生物质能开发利用的基础性、系统性和完整性，又注意了撰写内容的实用性和新颖性。

本书的编写人员由长期在一线从事研究的专家、学者组成，具有丰富的理论知识和实践经验，对相关研究领域发展概况和研究进展有着清晰的把握。他们不辞辛劳，为读者编写了这本不可多得的专著。相信该专著的面世，将会有力推动我国生物质能开发、利用事业的发展。建议此书可作为能源环保、生物化工等领域科研人员、生产技术人员参考书，也可作为高等院校化学工程、热能工程、生物化工、能源工程、环境工程和资源利用等专业教师、研究生和本科生的教学用书。

中国工程院院士 陈勇



# 前 言

煤和石油等化石资源是当今社会的主要能源物质。随着历史的进程，它们失去了再生的条件，大量消耗必将导致快速枯竭，同时也带来严重的环境污染。因而，以化石资源为基础的现代化社会的发展模式是难以持续的。寻找可再生性替代能源，已成为维持人类社会可持续发展的紧迫任务。

生物质能，就是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，即以生物质为载体的能量。它直接或间接地来源于绿色植物的光合作用，可转化为常规的固态、液态和气态燃料，取之不尽、用之不竭，是一种可再生能源。在迫切解决能源危机和环境污染两大问题的压力下，世界各国政府投入了大量的人力和财力，近年来生物质能取得了飞速发展。在世界范围内，每年都有大量的论文和专利报道了生物质能利用技术的最新进展，每年都有大量的工业化装置和中试装置在运行或在建。

本书在简单介绍生物质能传统理论的基础上，大量引入了近年来生物质能领域取得的新理论工艺方法等知识，新增了生物质合成燃料技术和微生物燃料电池两章内容，而且还重点介绍了生物质能在产业化方面取得的最新进展突破、存在问题与解决方案，并对未来发展趋势作了详细探讨。本书是该领域内一本难得的实用性强、内容新颖全面的著作。

本书作者全部来自国内生物质能领域著名科研机构 and 高校的一线科研教学人员，有着多年的理论知识积累和丰富的实践经验。本书第一章总论由袁振宏、郭颖和许洁撰写，第二章生物质能资源与能源植物由田宜水、李昌珠、王忠铭、张良波、王闻、尚常花和李培旺撰写，第三章生物质直接燃烧技术由周劲松、陈汉平、庄新姝、余春江、谭雪松、许洁撰写，第四章厌氧过程与沼气技术由蔡昌达、孙永明和李连华撰写，第五章生物质压缩成型燃料技术由雷廷宙、姜洋、李伟振、何晓峰和刘姝娜撰写，第六章生物质气化技术由吴创之、许敏、阴秀丽、张晓东、周肇秋和刘华财撰写，第七章生物质燃料乙醇技术由赵海、许敬亮、肖明松、庄新姝、张宇、荆艳玲、余强、刘云云、谭雪松和周桂雄撰写，第八章生物质热裂解技术由易维明、朱锡锋和亓伟撰写，第九章生物质制氢由闫常峰、张全国和朱顺妮撰写，第十章生物质合成燃料技术由马隆龙、王铁军、张琦和徐惠娟撰写，第十一章植物油与生物柴油技术由李昌珠、罗文、肖志红、杨玲梅、刘汝宽、吕鹏梅撰写，第十二章城市生活垃圾处理技术由李海滨、刘晓风、李东和甄峰撰写，第十三章微生物燃料电池由孔晓英、孙冬梅、杨改秀、李颖和邓欢撰写。

作者试图努力使本书为从事和关心能源转化工作的人们提供一些有益的帮助，包括从事科学研究、技术开发和企业界的人士等，甚至希望本领域高等院校教师和学生也能够从中受益。但是，本领域科技发展日新月异，对最新科技进展介绍，难免疏漏之处，敬请读者批评指正，不胜感激。

编著者

# 目 录

第一章 总论 .....	1	四、木本油料能源植物 .....	43
第一节 生物质能的能源地位 .....	1	五、烃类能源植物 .....	47
一、世界生物质能源消费 .....	2	六、木质能源林 .....	48
二、中国生物质能源消费 .....	3	七、多年生草本能源作物 .....	51
第二节 生物质能利用技术 .....	4	第四节 产油微藻 .....	53
第三节 国外生物质能开发利用概况 .....	4	一、产油微藻的种类 .....	53
一、美国 .....	5	二、微藻的分离和选育 .....	53
二、巴西 .....	6	三、微藻培养 .....	55
三、欧洲 .....	7	四、微藻收获和油脂提取 .....	56
第四节 中国生物质能开发利用现状 .....	8	五、微藻的综合利用 .....	57
一、生物燃气 .....	8	第五节 我国生物质能资源预测 .....	57
二、液体燃料 .....	9	一、农作物秸秆 .....	57
三、生物质固体成型燃料 .....	10	二、林业剩余物 .....	59
四、生物质发电 .....	11	三、木质能源林 .....	59
第五节 生物质能在中国未来可持续发展 战略中的地位 .....	11	四、非粮能源作物 .....	59
第六节 中国生物质能源发展方向与对策 .....	13	五、油料能源林 .....	60
第二章 生物质能资源与能源植物 .....	15	六、废弃食用油脂 .....	60
第一节 生物质能的物质基础 .....	15	七、工业有机废水 .....	61
一、光合作用 .....	15	八、畜禽粪便 .....	61
二、生物质原料类型 .....	16	第三章 生物质直接燃烧技术 .....	62
三、生物质能资源的特点 .....	17	第一节 生物质燃烧原理 .....	62
四、生物质的化学组成 .....	18	一、生物质燃烧过程 .....	62
五、生物质燃料的热值 .....	19	二、生物质燃烧组织特点 .....	66
第二节 我国现有生物质资源 .....	20	三、生物质燃烧污染物排放 .....	69
一、农作物秸秆 .....	20	第二节 民用生物质炉灶 .....	71
二、畜禽粪便 .....	21	一、炊事炉 .....	72
三、林业三剩物 .....	22	二、炊事采暖炉 .....	75
四、淀粉类资源 .....	23	三、采暖炉 .....	76
五、糖类资源 .....	24	四、节能灶 .....	76
六、废弃食用油脂 .....	25	第三节 工业生物质燃烧技术与应用 .....	79
七、城镇生活垃圾 .....	26	一、生物质燃烧技术 .....	80
八、工业有机废水 .....	26	二、生物质热风炉 .....	81
第三节 能源植物 .....	28	三、供热工业锅炉 .....	82
一、能源作物的概念 .....	28	四、直燃发电锅炉 .....	84
二、能源植物品种改良技术 .....	29	五、混燃锅炉 .....	85
三、农业能源作物 .....	32	第四章 厌氧过程与沼气技术 .....	87
		第一节 概念及原理 .....	87

一、基本概念 .....	87	<b>第六章 生物质气化技术</b> .....	173
二、发酵原理 .....	87	第一节 生物质气化原理 .....	173
三、产甲烷代谢途径 .....	88	一、生物质气化的概念 .....	173
四、发酵微生物 .....	91	二、生物质气化的基本热化学反应 .....	174
五、微生物调控工艺 .....	95	第二节 生物质气化系统及装置 .....	175
第二节 工艺技术与设备 .....	97	一、生物质气化系统 .....	175
一、前处理设备及工艺 .....	97	二、气化装置的类型 .....	176
二、进料设备 .....	100	三、固定床气化装置及应用 .....	177
三、搅拌装置 .....	101	四、流化床气化装置及应用 .....	181
四、沼气工程厌氧反应器和工艺流程 .....	101	五、气化装置性能及主要参数 .....	185
五、沼气储存 .....	118	第三节 生物质燃气的净化 .....	187
六、沼气高值化利用工艺及设备 .....	121	一、生物质燃气中的杂质 .....	187
七、沼液、沼渣综合利用 .....	132	二、焦油特点及危害 .....	187
第三节 工程案例及模式 .....	133	三、燃气净化方法及设备 .....	188
一、热电联产工程案例 .....	134	四、燃气净化系统的选型原则 .....	190
二、车用生物燃气工程案例 .....	136	第四节 生物质气化技术的应用 .....	190
三、管道及集中供气工程案例 .....	138	一、生物质气化集中供气 .....	190
<b>第五章 生物质压缩成型燃料技术</b> .....	140	二、生物质气化发电 .....	191
第一节 生物质成型燃料概念与原理 .....	140	三、生物质气化燃气的热利用 .....	194
一、生物质成型燃料概念 .....	140	四、生物质气化用于化工合成 .....	196
二、生物质成型燃料发展历史 .....	141	<b>第七章 生物质燃料乙醇技术</b> .....	199
三、生物质成型燃料性质 .....	142	第一节 乙醇的性质与用途 .....	199
四、生物质压缩成型原理 .....	144	一、乙醇的理化性质 .....	199
第二节 生物质压缩成型技术及设备 .....	145	二、乙醇与汽油柴油性能对比 .....	199
一、生物质压缩成型预处理技术及设备 .....	145	三、内燃机的乙醇代用燃料 .....	199
二、生物质颗粒燃料成型技术及设备 .....	147	第二节 燃料乙醇生产原理 .....	201
三、生物质块状燃料成型技术及设备 .....	152	一、乙醇生产的主要方法 .....	201
四、生物质棒状燃料成型技术及设备 .....	157	二、乙醇发酵的生化反应过程 .....	203
五、生物质成型燃料工业化生产系统 .....	158	三、乙醇发酵的微生物学基础 .....	206
第三节 生物质成型燃料应用技术及设备 .....	162	四、乙醇发酵微生物的选育 .....	210
一、生物质成型燃料燃烧技术及设备 .....	162	第三节 淀粉质原料的乙醇生产 .....	213
二、生物质成型燃料气化技术及设备 .....	164	一、原料粉碎 .....	213
三、生物质成型燃料户用技术及设备 .....	165	二、蒸煮糊化 .....	214
四、用于炭基缓释肥技术及设备 .....	166	三、糖化工艺 .....	216
第四节 生物质成型燃料应用实例 .....	167	四、酒母的培养 .....	217
一、生物质成型燃料规模化生产应用		五、乙醇发酵 .....	217
实例 .....	167	六、乙醇提取与精制 .....	219
二、生物质成型燃料燃烧供热应用实例 .....	170	七、淀粉质燃料乙醇生产工程案例 .....	220
第五节 生物质成型燃料技术及产业发展		第四节 糖质原料的乙醇生产 .....	220
趋势 .....	170	一、糖质原料的类型 .....	221
一、技术发展趋势 .....	170	二、糖蜜原料生产乙醇的特点 .....	221
二、产业发展趋势 .....	171	三、糖蜜生产乙醇的工艺流程 .....	222



四、糖蜜的乙醇发酵 .....	227	三、生物质干馏气的应用 .....	319
五、甜高粱茎秆制取乙醇 .....	228	四、生物质炭化案例 .....	324
六、甜高粱茎秆制取燃料乙醇生产案例 ..	231	<b>第九章 生物质制氢 .....</b>	<b>329</b>
<b>第五节 纤维素原料的乙醇生产 .....</b>	<b>240</b>	<b>第一节 氢能 .....</b>	<b>329</b>
一、纤维素乙醇制备过程及基本原理 .....	241	一、氢能简介 .....	329
二、纤维素原料预处理 .....	241	二、氢的基本性质 .....	329
三、纤维素原料酶解及乙醇发酵 .....	243	三、氢的生物质制备方法 .....	330
四、纤维素乙醇生产案例分析 .....	247	四、氢能的开发利用 .....	331
<b>第六节 燃料乙醇生产经济性分析 .....</b>	<b>247</b>	<b>第二节 生物质热化学制氢 .....</b>	<b>331</b>
一、淀粉类原料燃料乙醇生产经济性		一、简介 .....	331
分析 .....	248	二、生物质制氢反应热力学 .....	331
二、糖类原料燃料乙醇生产经济性		三、生物质热解制氢 .....	332
分析 .....	250	四、生物质气化制氢 .....	333
三、纤维素原料燃料乙醇生产经济性		五、生物质超临界水热法制氢 .....	334
分析 .....	252	六、固体热载法生物质气化制氢 .....	336
<b>第七节 燃料乙醇生产的环境影响及控制 ..</b>	<b>255</b>	七、富氢气体的洁净与纯化 .....	340
一、燃料乙醇生产的污染物形成途径 .....	256	<b>第三节 生物质衍生燃料重整催化制氢 .....</b>	<b>343</b>
二、燃料乙醇生产的废弃物处理 .....	258	一、简介 .....	343
三、燃料乙醇生产的污染控制 .....	261	二、生物油制氢 .....	343
<b>第八节 国内外用生物质开发乙醇燃料</b>		三、甲醇制氢 .....	346
概况 .....	263	四、乙醇制氢 .....	349
一、乙醇燃料的研究与发展 .....	263	五、二甲醚制氢 .....	354
二、中国燃料乙醇工业现状 .....	265	<b>第四节 生物法制氢 .....</b>	<b>357</b>
三、中国燃料乙醇发展展望 .....	269	一、简介 .....	357
<b>第八章 生物质热裂解技术 .....</b>	<b>271</b>	二、直接生物光解制氢 .....	358
<b>第一节 生物质热裂解原理与技术 .....</b>	<b>271</b>	三、间接生物光解制氢 .....	358
一、生物质热裂解的概念 .....	271	四、光发酵制氢 .....	359
二、生物质快速热解特性 .....	272	五、暗发酵制氢 .....	361
三、生物质热裂解工艺 .....	273	六、生物法水气变化制氢 .....	365
四、生物质热裂解技术应用案例 .....	281	<b>第十章 生物质合成燃料技术 .....</b>	<b>367</b>
<b>第二节 生物油提质与应用 .....</b>	<b>284</b>	<b>第一节 合成气催化合成液体燃料 .....</b>	<b>367</b>
一、生物油的理化性质 .....	284	一、合成气催化合成液体燃料的基本	
二、生物油加氢脱氧改质技术 .....	289	原理 .....	368
三、生物油催化裂解改质技术 .....	292	二、合成气催化合成甲醇 .....	368
四、生物油催化酯化改质技术 .....	297	三、合成气催化合成二甲醚 .....	375
五、生物油水蒸气重整制氢技术 .....	299	四、合成气催化合成低碳混合醇 .....	378
六、生物油乳化技术 .....	301	五、合成气催化合成柴油 .....	385
七、生物油燃烧技术 .....	305	六、合成气经由甲醇/二甲醚合成汽油 .....	385
八、生物油应用案例 .....	309	<b>第二节 生物质水相化学催化合成液体</b>	
<b>第三节 生物质炭化燃料 .....</b>	<b>312</b>	<b>燃料 .....</b>	<b>386</b>
一、主要炭化工艺 .....	312	一、生物质水相化学催化合成液体燃料的	
二、生物炭的性质及应用 .....	316	基本原理 .....	387

二、生物质化学催化合成 $C_5 \sim C_6$ 液体 烷烃 .....	395	第三节 城市生活垃圾处理案例 .....	454
三、生物质水相化学催化合成 $C_8 \sim C_{15}$ 液体烷烃 .....	398	一、北京六里屯垃圾卫生填埋场 .....	454
四、生物质水相化学催化合成含氧液体 燃料 .....	402	二、广州李坑垃圾焚烧发电厂 .....	457
第三节 烯烃齐聚合成液体燃料 .....	403	三、北京南宫生活垃圾堆肥厂 .....	458
一、烯烃齐聚合成液体燃料的基本原理 ..	403	四、重庆黑石子餐厨垃圾厌氧消化厂 .....	460
二、烯烃齐聚合成汽油 .....	404	第四节 城市生活垃圾处理展望 .....	462
三、烯烃齐聚合成航空燃油 .....	404	一、城市生活垃圾源头分类收集 .....	462
第十一章 植物油与生物柴油技术 .....	406	二、混杂城市生活垃圾机械分选 .....	463
第一节 植物油燃料 .....	406	三、城市生活垃圾机械-生物综合处理 .....	466
一、植物油的理化性质 .....	406	第十三章 微生物燃料电池 .....	468
二、植物油直接作燃料油的方法 .....	408	第一节 微生物燃料电池基础 .....	468
三、植物油制取工艺 .....	409	一、微生物燃料电池的发展历史 .....	468
四、菜籽油燃料的试验实例 .....	411	二、微生物燃料电池技术发展历程 .....	469
五、棉籽油-柴油混合燃料实例 .....	411	三、电池的导电机理 .....	470
第二节 生物柴油技术 .....	413	四、MFC 工作原理 .....	471
一、生物柴油生产原理 .....	413	五、产电微生物电子传递机理 .....	472
二、生物柴油生产技术 .....	415	第二节 微生物燃料电池技术 .....	473
三、工艺流程与参数设计 .....	416	一、产电微生物 .....	473
四、案例分析 .....	423	二、产电底物 .....	475
五、各国生物柴油产业发展动态 .....	425	三、电池材料 .....	477
六、生物柴油环境影响评价 .....	427	四、MFC 构型 .....	478
第十二章 城市生活垃圾处理技术 .....	429	第三节 微生物燃料电池表征技术 .....	479
第一节 城市生活垃圾的特征 .....	429	一、电化学表征技术 .....	479
一、国外城市生活垃圾特点 .....	429	二、库仑效率与能量效率 .....	482
二、国内城市生活垃圾特点 .....	430	三、电池内阻 .....	483
三、中国城市生活垃圾清运量及处理 现状 .....	431	四、污水的降解效果 .....	484
第二节 城市生活垃圾处理和利用技术 .....	434	五、能量利用率 .....	484
一、卫生填埋 .....	434	六、其他 .....	484
二、焚烧发电 .....	439	第四节 MFC 的应用及功能扩展 .....	484
三、好氧堆肥 .....	446	一、产电 .....	485
四、厌氧消化 .....	450	二、污染物修复与废弃物资源化 .....	486
		三、传感器 .....	488
		四、海水淡化 .....	490
		五、产氢 .....	491
		参考文献 .....	493

# 第一章 总论

生物质能是人类利用最早的能源之一，具有分布广、可再生、成本低等优点。现阶段，生物质能约占全球能源供给的 10%，其中约 2/3 的生物质资源应用在发展中国家。我国作为人口众多的农业国家，生物质能源在能源结构中占有相当重要的地位，尤其在广大农村地区，生物质能曾经是最重要的能源。然而，如果生物质能以直接燃烧为主，不仅热效率低下，而且伴随着大量的烟尘和余灰的排放，成为阻碍农村经济和社会进步的重要因素之一。随着科学技术的发展和进步，生物质能可以通过各种转换技术高效地加以利用，生产各种清洁燃料和电力，以替代煤炭、石油和天然气等矿物燃料，生物质能源路径如图 1-1 所示。所以，开发与利用生物质能源，对实现可持续发展、保障国家能源安全、改善生存环境和减少二氧化碳都具有重要作用和实际意义。

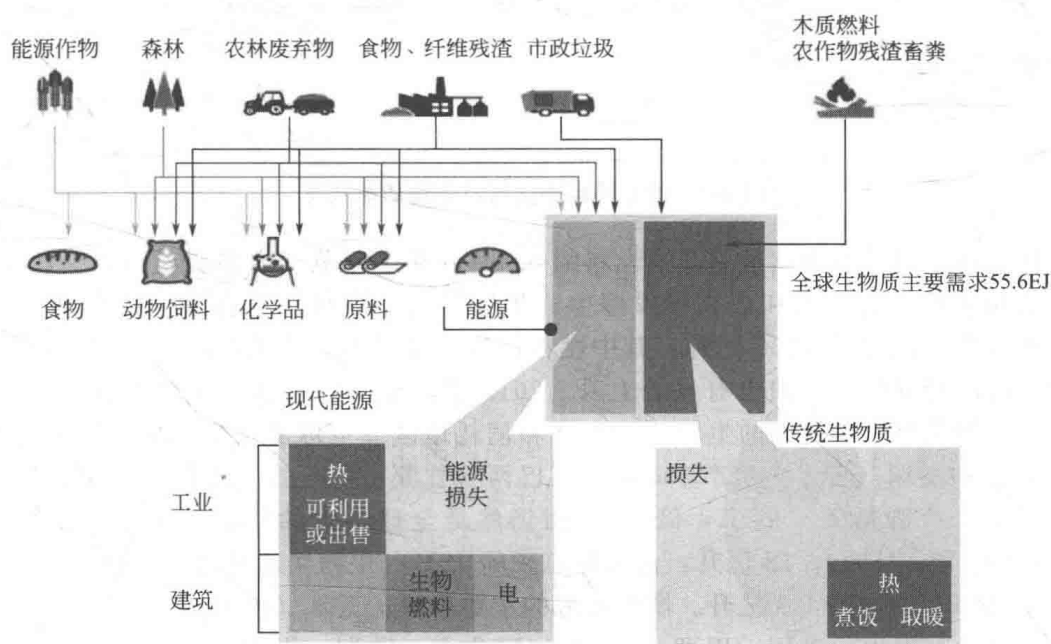


图 1-1 2013 年生物质能源路径

## 第一节 生物质能的能源地位

生物质能是可再生的，在能源分类中将其划为新能源中。能源的大体分类如表 1-1 所示。

表 1-1 生物质能的能源地位

类别		常规能源	新能源
一次能源	可再生	水能	生物质能、太阳能、风能、潮汐能、海洋能
	非再生	原煤、原油、天然气	油质岩、核燃料
二次能源		焦炭、煤气、电力、氢气、蒸汽、酒精、汽油、柴油、煤油、重油、液化气、木炭、沼气、气化气	

注：1. 一次能源是指从自然界取得后未经加工的能源，它有三个初始来源：太阳光、地球固有的物质和太阳系行星运行的能量。

2. 二次能源是指经过加工与转换而得到的能源。

3. 新能源一般是指在新技术基础上加以开发利用的能源；早已被人们广泛利用的能源称为常规能源或传统能源。

## 一、世界生物质能源消费

生物质能在全世界能源消费中仍占有相当的份额（约10%），仅次于石油、煤炭和天然气，居于世界能源消费总量的第4位。

生物质能源的主要形式包括生物液体燃料、生物燃气、生物质成型燃料等。生物液体燃料（主要包括生物酒精和生物柴油）是生物质能的主要组成成分，生物质成型燃料木屑秸秆等主要用于发电和产热；生物燃气的主要成分是甲烷和氢气，通常通过市政和工业垃圾通过厌氧发酵的方式得到；世界可再生能源及生物质能状况如图1-2所示。

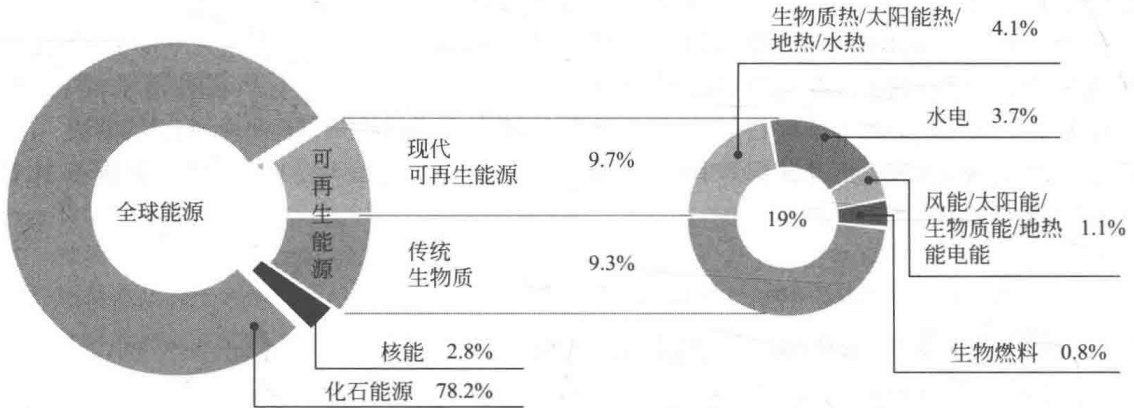


图 1-2 世界可再生能源及生物质能状况

生物液体燃料约占全球道路交通燃料的3.4%。在全球范围内主要通过第一代生物质技术将富含淀粉和糖类的玉米和甜高粱发酵生成生物酒精；油料作物合成生物柴油。2013年，全球生物能源生产总量达1166亿升，其中燃料乙醇872亿升，生物柴油263亿升，而氢化植物油作为一种新型的生物柴油也有显著上升。2013年，北美仍然是全球最大的酒精生产和消耗地区，欧洲仍然是全球最大的生物柴油生产和消耗地区。全球酒精生产由美国和巴西主导，约占87%，其中美国（玉米）生产500亿升，巴西（甘蔗）生产255亿升（巴西甘蔗产酒精效率约为美国玉米产酒精效率的1.4倍）；欧洲仍然是全球最大的生物柴油生产地区，其中：FAME，105亿升；HVO，18亿升，占全球总量的42%；生物柴油其他产区包括：美国51亿升，巴西29亿升，阿根廷23亿升。燃料乙醇的主要原料：玉米（美国）、甘蔗（巴西）、甜菜（欧洲）、甜高粱（中国、美国、巴西）、谷类（加拿大、欧洲）以及木薯（尼日利亚、巴西、泰国、印度尼西亚）；生物柴油主要油料作物包括油菜籽（欧洲）、大豆（美国、拉美）、棕榈和椰子油（马来西亚、印度尼西亚）。2000~2013年，全球生物燃料产量如下图所示。

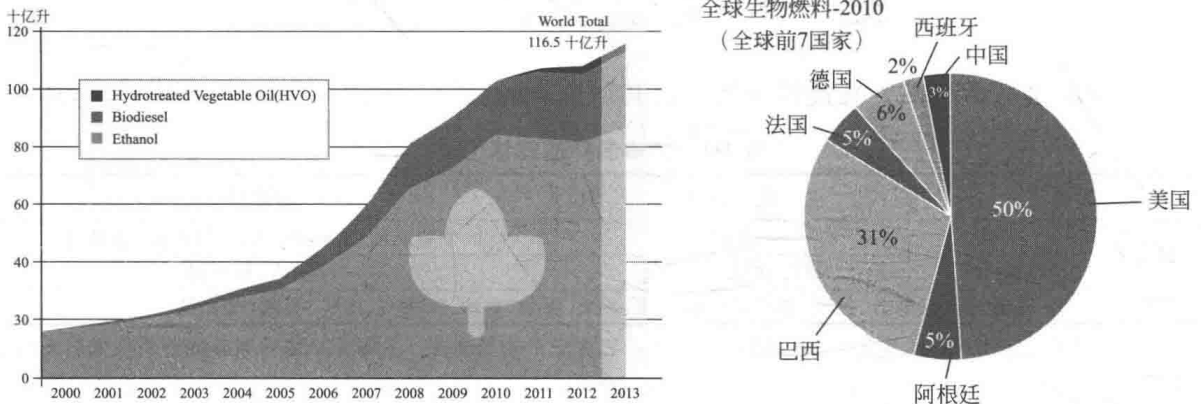


图 1-3 全球生物燃料产量



现阶段，以粮食作物为主要原料的生物质燃料，给全球粮食安全带来巨大压力；虽然生物质能资源种类丰富、应用技术不断变新，世界各国政策通过发电、供热（制冷）、交通等各个领域特别是发电行业激励政策支持生物质能源发展，但各类技术所处发展阶段差异很大，一些科技和经济壁垒阻碍第二代非粮生物质工艺的广泛应用。以 2012 年为例，仅 1/3 生物能源来自农林废弃物：其中：中国 300 万升，美国 200 万升，欧洲也建立了一些示范工厂；生物质成型燃料木屑秸秆等也开始应用于发电和产热，2012 年全球生物发电装机已增长至 8300 万千瓦规模。

目前主要的生物质能利用技术主要可分为以下 3 个类型。①商业化阶段：技术比较成熟，具有一定的经济竞争力，初步实现商业化和规模化应用，如沼气等少量生物质能隶属技术。②政策补贴阶段：已进入商业化早期发展阶段，仍需要通过补贴等经济激励政策增强竞争力，如生物质发电、生物质固体成型燃料、以非粮作物为原料的生物液体燃料等生物质能利用技术等。③研发阶段：更多新兴生物质能利用技术如纤维素乙醇微藻柴油等只处于最初的研发或工程示范阶段，需要在未来逐步实现工业化、商业化应用。

因而，现阶段研究重点和难点主要针对第二代生物液体燃料技术（主要基于农林废弃物和市政工业垃圾）及基于微藻的第三代生物液体燃料技术；随着科学技术的发展和进步，生物质有望可以通过各种转换技术高效地加以利用，生产各种清洁燃料和电力，以替代煤炭、石油和天然气等矿物燃料，并极可能成为未来可持续能源系统的重要组成部分。

## 二、中国生物质能源消费

中国是一个人口大国，又是一个经济迅速发展的国家，21 世纪将面临着经济增长和环境保护的双重压力。因此，改变能源生产和消费方式，开发利用生物质能等可再生的清洁能源资源对建立可持续的能源系统，促进国民经济发展和环境保护具有重大意义。

2012 年全国能源消费总量约 36.2 亿吨标准煤，其中原煤占 4.7%，原油 68.5%，天然气 17.7%，水电、核电、风电、太阳能和生物质等新能源比例较低，约 8.3%，如图 1-4 所示。由于我国与美国等发达国家不同，人口数量庞大，粮食产量还有待提高，因此在生物质能源发展过程中产生了“不与人争粮，不与粮争地”的基本政策，生物质资源主要来自于废弃物资源。我国传统生物质资源的实际利用量在 1 亿吨标准煤左右，约占可利用量的 15%，还具有很大的开发潜力。据估算，2012 年我国可利用的生物质资源量约合 15.4 亿吨标准煤，其中可收集并能源化利用 46.4%；林木生物质资源 10.1 亿吨，约合 5.77 亿吨标准煤，可利用 3.14 亿吨；禽畜粪便 7.8 亿吨，约合 5.3 亿吨标准煤，可利用 5 亿吨；农作物秸秆资源为 7.4 亿吨，约合 3.17 亿吨标准煤，可利用 3.08 亿吨；农产品加工废弃物 1.42 亿吨，约合 0.71 吨标准煤，可利用 1.28 亿吨；生活垃圾 3.12 亿吨，约合 0.45 亿吨标准煤，可利用 1.54 亿吨；湿污泥 3954 万吨，约合 395 万吨标准煤。

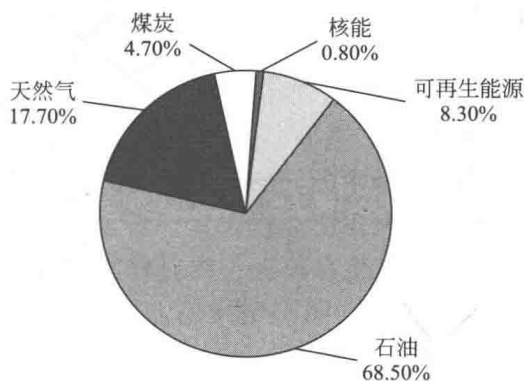


图 1-4 中国能源结构

中国 50% 人口生活在农村，秸秆和薪柴等生物质能是农村的主要生活燃料。尽管煤炭等商品能源在农村的使用迅速增加，但生物质能仍占有重要地位，开发利用生物质能对中国农村更具有特殊意义。广大农村的生活用能以生物质能为主的局面，在较长的时期内不会改变。而生物质能在农村的应用，到目前为止，基本上还是沿用直接燃烧方式，造成能源资源的浪费，并给环境带来污染。发展生物质能利用新技术，为农民生活与生产提供优质燃料，不仅是为节省能源消耗、改善生态环境的一项重要举措，也是帮助农牧民脱贫致富、实现小康目标的一项重要任务。

## 第二节 生物质能利用技术

人类对生物质能的利用已有悠久的历史，但是，在漫长的时间里，总是以直接燃烧的方式利用它的热量。直到 20 世纪特别是近一二十年，当人们普遍地提高了能源与环保意识，对地球固有的化石燃料日趋减少有一种危机感，在可再生能源方面寻求能源持续供给的今天，生物质利用新技术的研究与应用，才有了快速的发展。纵观国内外已有的生物质能利用技术，大体上如框图 1-5 所示。

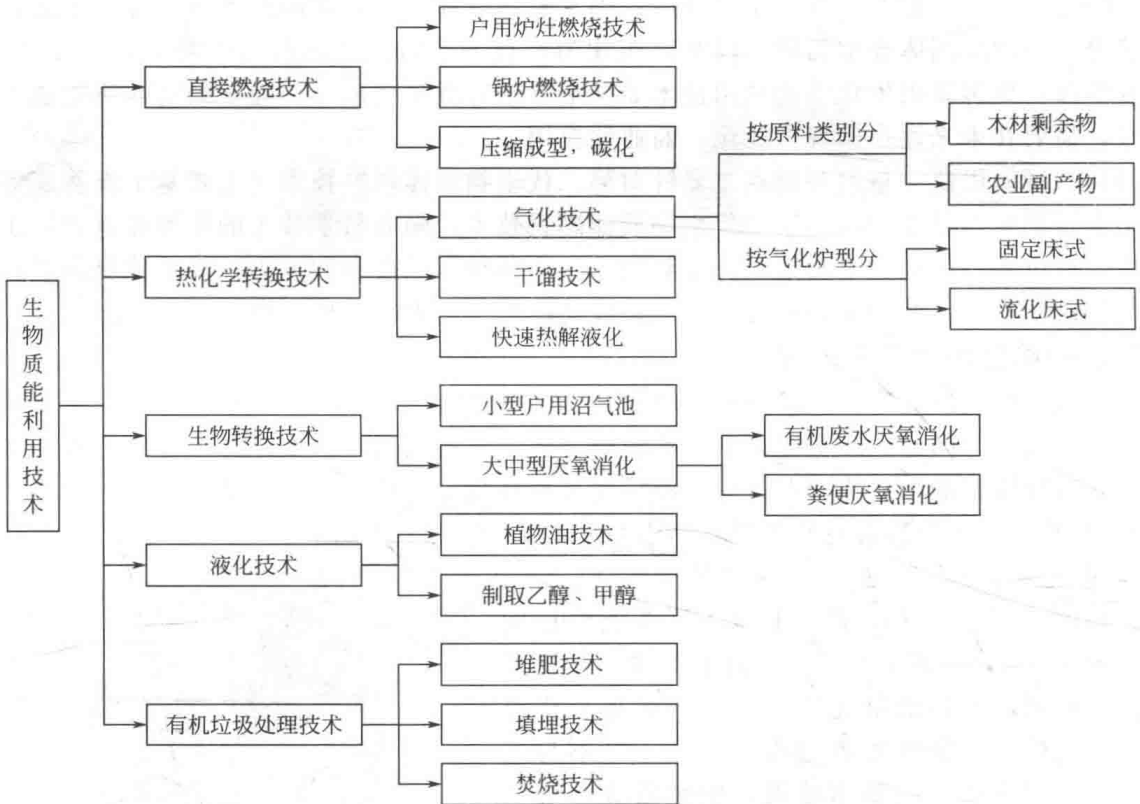


图 1-5 生物质能利用技术

图 1-5 中各项生物质能利用技术都在逐渐完善和向前发展之中，随着研究的深入，技术的进步，其应用的层次在逐步提高。如生物质经气化得到的可燃性气体，既可用于作燃料提供热能；还可用作发电的燃料，从内燃机到燃气轮机，乃至为燃料电池，氨的合成提供原料；用生物质制取的甲醇、乙醇，可代替部分石油作内燃机的燃料，用于交通运输行业中；生物质经干馏得到的木炭可用于有色金属的冶炼及环保行业的吸附剂；土壤的改良剂；生物质在厌氧条件下，被沼气微生物分解代谢，得到含有甲烷可燃性气体（沼气），是民用高热值的气体燃料，亦可与柴油混烧作内燃机的燃料，沼渣、沼液是优质的有机肥料，沼液还可用来浸种。如此等等，说明生物质能利用技术正在向纵深发展，生物质能的应用范围将会越来越广阔。

## 第三节 国外生物质能开发利用概况

自从 1981 年 8 月在内罗毕召开联合国新能源和可再生能源会议以来，许多国家对能源、环境和生态问题越来越重视，特别是利用现代新能源技术和新材料来开发包括生物质能在内的

新能源，备受各国关注。生物质能的技术研究和开发利用已成为世界重大热门课题之一，许多国家都制订了相应的开发研究计划，如日本的阳光计划、印度的绿色能源工程、巴西的酒精能源计划等。另一方面，生物质碳排放具有特殊性：生物液体燃料的碳排放重新被植物吸收存在延迟、碳补偿时间（Carbon Payback）、碳排放与全碳循环分析（A Full Life Cycle Assessments）因生物质原料来源有差异。现阶段，各国针对生物质原料的种类和土地来源制订了相应更细的政策：以推荐或限制使用某些特定生物质原料，鼓励使用空地荒地等边际土地，维持森林可持续性。例如，英国政府 2013 年提供了计算生物质能碳排放的方法。

## 一、美国

2002 年《美国生物质能技术发展路线图》《美国生物质能与生物基产品展望》报告对美国生物质资源研究做出了远景规划。美国农业部和能源部在 2012 年 11 月详细规划了生物质能源原料来源，主要集中在四个方面：林业生物质资源、农业生物质资源、畜禽粪便、污水及固体废弃物。现阶段美国生物质每年可利用量为 13 亿吨；生物质能利用占一次能源消耗总量的 4.6% 左右，2012 年美国能源结构如图 1-6 所示。

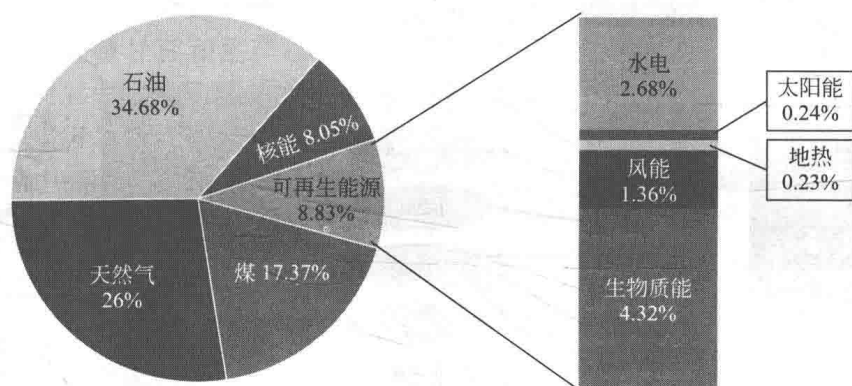


图 1-6 美国能源结构

**生物质成型燃料利用：**美国主要以生物质直燃发电方式加以利用，85% 的木材加工废弃物和林业废弃物用于生物质直燃发电，截至 2012 年年底，美国生物质直接燃烧发电约占可再生能源发电量的 75%，300 多家发电厂采用生物质能与煤炭混合燃烧技术，装机容量达 22000MW，占全国产电能力的 1.3%。除了生物质直燃发电（2013 年直燃发电占生物质发电总量的 66%），美国境内生物质发电垃圾填埋场沼气 16%，有机市政垃圾 12% 和其他废弃物发电 6%。

**液体燃料利用：**美国是全球最大的燃料乙醇和柴油生产国家。近年来美国生物燃料生产主要有 2 个挑战：①汽车效率提高燃料需求减少；②电动汽车和天然气汽车竞争。除了传统的玉米酒精工厂，美国也在积极推进非粮生物质能的发展（截至 2011 年，美国境内利用生物质能源公司主要如图 1-7 所示；表 1-2 列出了截至 2013 年美国境内非粮生物质能产乙醇的厂家）。其中，KiOR Columbus II 主要发展依靠松木碎片生产生物汽油和生物柴油，技术的核心部分是其催化专利系统，这个系统是在现有的在石油精炼上使用了超过 60 年的流化床催化裂化技术（Fluid Catalytic Cracking, FCC）基础上建立了专利技术（Biomass Fluid Catalytic Cracking, BFCC），该公司的技术理念是将上万年的石油生产过程缩短至工业催化时间。POET-DSM 公司与爱荷华州（Iowa）政府合作的 Liberty 计划将利用本地农户的玉米芯、叶子、壳和最少量的秸秆生产纤维素乙醇，将大部分秸秆留在原地堆肥；计划每年生产约 2000 万加仑燃料乙醇。

**生物燃气**是美国发展比较成熟的生物质能源技术之一。截至 2012 年，美国近 8200 个农场沼气工程，包含 192 个规模较大型沼气工程，装机总容量达到 5860 亿瓦；1238 城市污水处理厂沼气工程，平均日处理能力约为 450 万加仑废水，产电 100kW；594 个垃圾填埋场沼气工

程，装机容量达到 1813MW（美国沼气委员会 American Biogas Council）。典型沼气工程如纽约的斯塔藤垃圾处理站，采用湿法处理垃圾，回收沼气，用于发电，同时生产肥料；STM 公司是美国通用汽车公司发展斯特林发动机技术的专业公司，研制出的 STM4-120 发动机被美国能源部评价为世界上最先进的斯特林发动机，可与沼气技术或生物质气化技术相结合，构成 50kW 左右的村级生物质能发电系统。

为了促进生物质能发展，美国联邦以及各州政府不断提供政策法规的支持：《生物质研究法》2000，《美国农业法令》2002，《生物质技术路线图》2002，《美国创造就业法案》2004，《国家能源政策法案》2005，《先进能源计划》2006，《“20in10”能源新战略》2007，《能源自主和安全法案》2007，《国家生物燃料行动计划》2008，《第二代生物质能源发展举措》2010，《联邦公报》2013，相继出台的一系列促进生物质能产业发展的相关政策法规。正是这些政策的支持和引导促进了美国生物质能产业的快速发展（图 1-7 和表 1-2 列举了现阶段美国主要生物质能源公司和纤维乙醇厂家）。

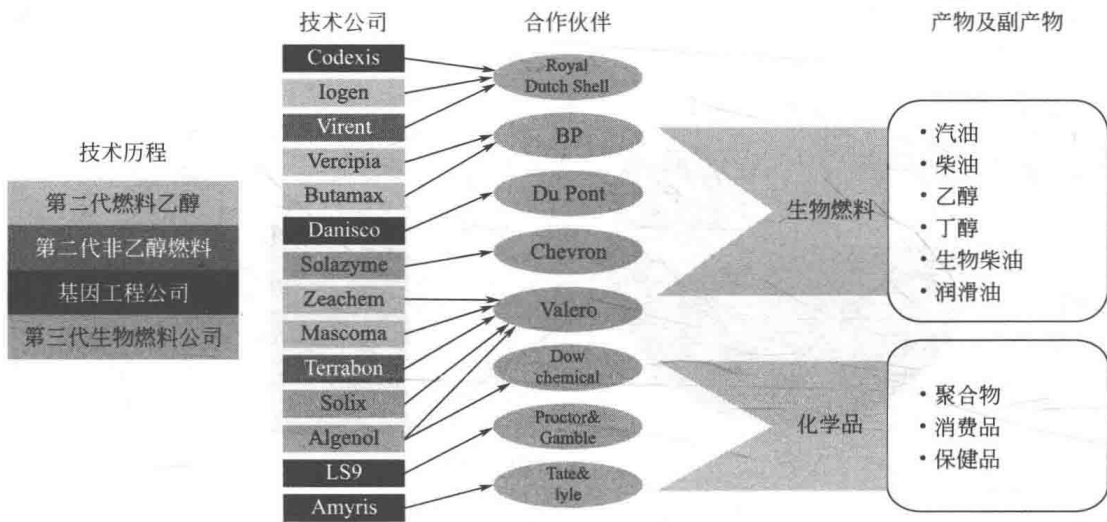


图 1-7 美国主要生物质能源公司（2011）

表 1-2 美国纤维素乙醇前十的厂家（2013）

公司名	生产方式	地点	生产能力 /MGY	原料	投资金额 /美元
KiOR	催化热解 & 水处理	Natchez, MS	41	黄松木	350
ClearFuels	气化 & FT 合成	Collinwood, TN	20	木质生物质	200
Sundrop Fuels	气化 & MTG 合成	Alexandria, LA	50	生物质和天然气混合	500
ZeaChem	稀酸水解 & 乙酸合成酒精	Boardman, OR	25	农业废弃物	391
Abengoa	酶水解制酒精	Hugoton, KS	25	玉米秆	350
BetaRenewable	酶水解制酒精	Sampson County, NC	20	芦竹素、柳枝稷	170
DuPont Biofuel Solutions	酶水解制酒精	Nevada, IA	25	玉米秆	276
POET	酶水解制酒精	Emmetsburg, IA	20	玉米秆, 玉米芯	250
Mascoma	Consoled	Kinross, MI	40	木材	232

## 二、巴西

巴西的能源主要形式为水电、酒精、生物质；由于巴西现阶段可再生能源占最大比重的水电在规模上有所限制，其占巴西能源的比例已逐年减小；巴西拥有广泛土地和优势气候，巴西生物质能源的地位因而将进一步提升。巴西独特的气候、地理及发达的制糖工业等优势，促进了生物质能在巴西的广泛发展。



现阶段，生物质能在巴西能源利用量中约占 30%，其中甘蔗渣和酒精占 13.6%，木材和木炭占 13%，农业废弃物等占 2.7%。巴西是乙醇燃料开发应用最有特色的国家，巴西是盛产甘蔗的国家，拥有全球最大的制糖工艺，伴随着制糖工艺，巴西从 1975 年开始发展生物质燃料乙醇，巴西现在是全球第二大乙醇生产国家，也是全球最大的乙醇出口国（原料主要是制糖工艺中的甘蔗、甘蔗渣等）；巴西国内乙醇燃料已占汽车燃料消费量的 50% 以上。巴西的生物柴油产业从 2005 年开始发展，2013 年已跃居全球第三（巴西境内主要生物燃料产地分布：如下图 1-8 所示）。巴西制糖工艺生物质利用率自 2000 年起有显著上升，除了生产乙醇，甘蔗渣也逐步广泛用于发电和产热。2010 年，巴西共建成 314 座以甘蔗渣为原料的电站发电共 6022MW；截至 2013 年，巴西境内生物质发电能力到达 11.4GW，其中甘蔗渣发电量占全国发电量的 7%，黑液发电占 1.1%。

巴西是世界上最早通过立法手段强制推广乙醇汽油的国家，近 30 年来，巴西政府在国内推进生物质能源发展的措施包括：①巴西政府制订了强制推行在汽油中添加乙醇，在地方使用乙醇加油泵的法律；②对种植甘蔗和生产乙醇的个人和单位提供财政扶持；③固定汽油和燃料乙醇的销售价格；④大规模开发推广灵活燃料汽车，目前巴西销售的汽车中 90% 以上是使用乙醇和汽油混合的灵活燃料汽车；⑤招商引资，以解决国内资金短缺的难题；扩大出口。2012 年巴西能源分布如图 1-8 所示。

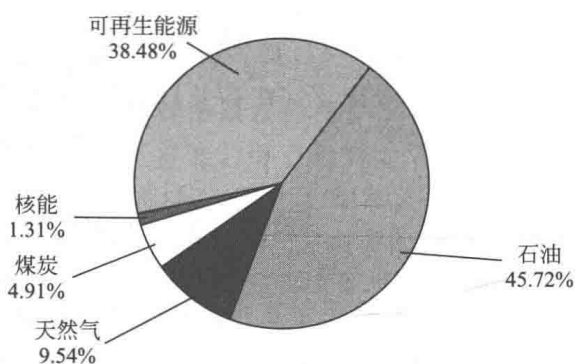


图 1-8 巴西能源分布

### 三、欧洲

欧洲是生物质能开发利用非常活跃的地区，新技术不断出现，并且在较多的国家得以应用。整体来说，现阶段欧洲的生物燃料主流工艺在于生产生物柴油，据估计约 80% 生物质均用于生物柴油生产，欧洲是全球最大的柴油生产和消费市场。2013 年全球约 42% 柴油产自欧洲，其中 FAME，105 亿升；HVO，18 亿升。德国和法国是欧洲的柴油主要产国，即便如此，欧洲约仍需进口 30% 生物柴油。欧洲现阶段法律法规促进了其生物柴油市场蓬勃发展。欧洲生物燃料的主要组成如图 1-9 所示，主要包括生物柴油、燃料乙醇还有部分植物油和车用压缩天然气。

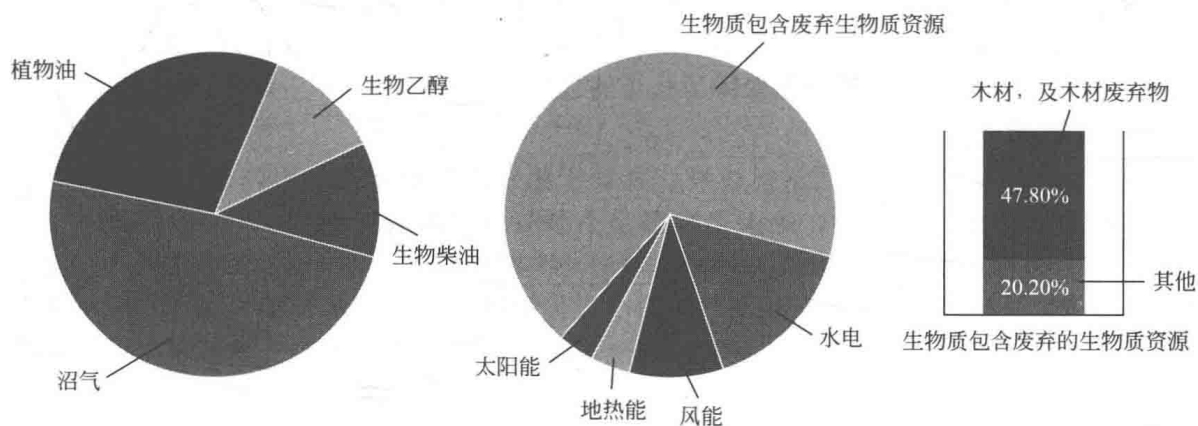


图 1-9 欧洲生物燃料组成

除了广阔的生物燃料市场，欧洲生物质也应用于供热和发电。欧洲是最大的利用生物质现代工艺供热的市场；2013 年欧洲生物质发电量占欧洲总电量来源的 5%。欧洲生物质发电领域