



普通高等学校“双一流建设”能源与动力专业精品教材

SHENGWU ZHI BEHUAN XUE ZHUANHUAYUANLI JI GAOXIAO LIYONG JISHU

# 生物质热化学转化原理 及高效利用技术

汪一 江龙 徐俊 主编



普通高等学校“双一流建设”  
能源与动力专业精品教材

生物质热化学转化原理  
及高效利用技术

汪一 江龙 徐俊 主编

华中科技大学出版社



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>



普通高等学校“双一流”建设能源与动力专业精品教材

# 生物质热化学转化原理 及高效利用技术

汪一 江龙 徐俊 主编  
熊哲 苏胜 胡松 尚军 副主编

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书为普通高等学校“双一流”建设能源与动力专业精品教材。本书详细阐述了生物质能及其热转化过程中的基本原理、反应装置和工艺流程等,集成了现今生物质能转化领域的最新理论、工艺及应用实例。全书共分为9章,主要内容包括绪论、生物质预处理技术、生物质热解原理与技术、生物油的性质与应用、生物质水热转化技术、生物质气化技术、生物质燃烧理论与技术、生物质热转化系统分析计算方法与实例,以及生物质热转化过程研究分析表征方法。

本书是生物质能源的通识类教材,兼顾各专业方向,旨在帮助学生了解生物质能源热化学利用的概貌,重点学习生物质热转化原理、主要工艺技术及设备,并通过工程案例了解生物质热化学转化的主要应用。本书兼具基础性、通识性及科学性,可以作为高等学校新能源科学与工程、热能工程等专业的主干课教材,可供能源相关专业本科生及研究生阅读,也可供能源工程、环境工程、化学工程等领域科研人员、工程技术人员和管理人员等参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

生物质热化学转化原理及高效利用技术/汪一,江龙,徐俊主编.—武汉:华中科技大学出版社,2021.12  
ISBN 978-7-5680-1680-3

I. ①生… II. ①汪… ②江… ③徐… III. ①生物能源-热化学-转化-高等学校-教材 IV. ①TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 258475 号

生物质热化学转化原理及高效利用技术

汪一 江龙 徐俊 主 编

Shengwuzhi Rehuaxue Zhuanhua Yuanli ji Gaoxiao Liyong Jishu

策划编辑:余伯仲

责任编辑:罗 雪

封面设计:廖亚萍

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉开心印印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:28.75

字 数:730千字

版 次:2021年12月第1版第1次印刷

定 价:89.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

生物质能源作为仅次于煤炭、石油、天然气的第四大能源,也是碳替代、碳循环发展潜力最大的可再生能源。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,是一种环境友好、分布广泛、总量丰富、应用潜力巨大的可再生能源,同时也是唯一可再生碳源。国家主席习近平在 2020 年 9 月 22 日召开的联合国大会上表示:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,争取在 2060 年前实现碳中和。”因此,在“2030 碳达峰、2060 碳中和”的背景下,作为“碳中和”能源的生物质能将会发挥重要的作用,相关产业也将迎来重大发展机遇期。

目前,对生物质能的利用手段主要为热化学与生物化学方式。热化学方式主要包括燃烧、热解、气化;生物化学方式主要为厌氧发酵。通过上述方式,生物质能可以以固体成型燃料、生物油(热解油)、生物质炭(热解炭)、气化气、发酵沼气燃料等形式存在,具备非常广阔的应用前景。本书针对生物质资源热化学转化利用方式,重点介绍热化学转化过程中所涉及到的反应原理、反应装置、工艺流程以及常见技术问题等。同时,编者总结了部分生物质利用领域最新的研究成果,可供读者进一步深入了解此领域热点研究方向和最新成果进展,希望对从事相关科研工作的读者有所启发。

本书共分 9 章,分别为绪论、生物质预处理技术、生物质热解原理与技术、生物油的性质与应用、生物质水热转化技术、生物质气化技术、生物质燃烧理论与技术、生物质热转化系统分析计算方法与实例,以及生物质热转化过程研究分析表征方法。本书由华中科技大学汪一、江龙、徐俊任主编,熊哲、苏胜、胡松、向军任副主编。编者均为国内高校从事生物质能研究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 1 章由汪一、江龙、向军撰写;第 2 章由汪一、徐俊、胡松撰写;第 3 章由汪一、徐俊、熊哲撰写;第 4 章由汪一、江龙、熊哲撰写;第 5 章由江龙、徐俊、陈文撰写;第 6 章由江龙、徐俊、何立模、陈文撰写;第 7 章由徐俊、江龙、许凯、苏胜撰写;第 8 章由徐俊、江龙、韩亨达撰写;第 9 章由徐俊、江龙、汪一撰写。全书由汪一、江龙、徐俊统稿。华中科技大学能源与动力工程学院研究生邓伟、汪雪棚、郭俊豪、马立群、方舟、刘佳、杜宽、莫文禹、黄德馨、张雅妮、徐龙飞、刘佳薇、陈德志、王鑫、钟毓秀、柳顺等参与了文字和图表处理等工作。

编者期望并努力将本书打造为学习生物质热化学转化原理与技术的入门读物,为相关专业学生及科研人员快速了解生物质能利用现状提供帮助。在当下“碳达峰、碳中和”的大背景下,生物质能利用领域发展势头更加迅猛,相关研究成果日新月异。因此,本书也难以对整个领域进行面面俱到的阐述。同时,限于编者水平与时间,书中难免存在疏漏或不妥之处,敬请读者批评指正,以便在后续版本中加以改进和完善。

编 者

2021 年 6 月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 能源基本概念 .....	(1)
1.2 我国能源结构分析 .....	(2)
1.3 生物质能源与资源 .....	(4)
1.3.1 生物质的组成与结构 .....	(4)
1.3.2 生物质能的分类 .....	(12)
1.4 碳中和背景下生物质能源的重要性 .....	(12)
1.4.1 碳中和的概念与实现方法 .....	(12)
1.4.2 生物质能源的重要性 .....	(13)
1.5 生物质能转化利用技术概述 .....	(14)
1.6 生物质能发展现状与趋势 .....	(15)
1.6.1 国内外生物质能发展现状 .....	(16)
1.6.2 我国生物质能的发展趋势 .....	(16)
思考题 .....	(18)
本章参考文献 .....	(18)
<b>第 2 章 生物质预处理技术</b> .....	(21)
2.1 生物质预处理的必要性 .....	(21)
2.2 生物质物理预处理原理与技术 .....	(24)
2.2.1 生物质物理预处理原理 .....	(24)
2.2.2 生物质物理预处理技术 .....	(26)
2.3 生物质热预处理原理与技术 .....	(43)
2.3.1 生物质热预处理原理 .....	(43)
2.3.2 生物质热预处理技术 .....	(44)
2.4 生物质化学预处理原理与技术 .....	(48)
2.4.1 生物质化学预处理原理 .....	(48)
2.4.2 生物质化学预处理技术 .....	(49)
思考题 .....	(54)
本章参考文献 .....	(54)
<b>第 3 章 生物质热解原理与技术</b> .....	(56)
3.1 生物质热解原理 .....	(56)
3.1.1 生物质热解过程与产物 .....	(60)
3.1.2 影响生物质热解过程的主要因素 .....	(62)
3.2 热解反应类别及特性 .....	(68)
3.2.1 慢速热解 .....	(69)
3.2.2 快速热解 .....	(69)

3.2.3	水热液化和溶剂分解	(72)
3.2.4	闪速热解	(73)
3.2.5	超快速热解	(73)
3.3	热解反应模型	(74)
3.3.1	简单反应模型	(74)
3.3.2	独立平行多反应模型	(75)
3.3.3	竞争反应模型	(75)
3.3.4	连续反应模型	(75)
3.3.5	组合模型	(76)
3.4	热解技术的应用	(76)
3.4.1	热解液化技术	(76)
3.4.2	热解炭化技术	(82)
3.5	热解反应器	(85)
3.5.1	固定床热解反应器	(86)
3.5.2	鼓泡流化床热解反应器	(87)
3.5.3	流化床反应器	(89)
3.5.4	闪速热解反应器	(91)
3.5.5	烧蚀热解反应器	(92)
3.5.6	旋转锥热解反应器	(94)
3.5.7	真空热解反应器	(96)
3.5.8	其他热解反应器	(97)
3.6	生物质热解多联产技术与应用	(99)
3.6.1	生物质热解多联产原理	(100)
3.6.2	生物质热解多联产产物特性	(101)
3.6.3	生物质热解多联产技术应用	(103)
3.6.4	生物质热解多联产技术经济性分析	(104)
	思考题	(105)
	本章参考文献	(105)
<b>第4章</b>	<b>生物油的性质与应用</b>	<b>(109)</b>
4.1	生物油物理化学性质	(109)
4.1.1	物理性质	(110)
4.1.2	化学性质	(115)
4.2	生物油物理化学性质的影响因素	(119)
4.2.1	反应条件的影响	(119)
4.2.2	生物质原料的影响	(121)
4.3	生物油的直接应用	(122)
4.3.1	燃烧	(122)
4.3.2	气化	(124)
4.3.3	化学品制备	(124)
4.3.4	制备合成气	(128)

4.3.5 制备氢气 .....	(129)
4.4 生物油物理提质技术 .....	(129)
4.4.1 物理过滤 .....	(129)
4.4.2 溶剂添加 .....	(130)
4.4.3 组分分离 .....	(134)
4.5 生物油化学提质技术 .....	(138)
4.5.1 催化裂解 .....	(139)
4.5.2 催化加氢 .....	(140)
4.5.3 水蒸气重整 .....	(144)
4.5.4 酯化 .....	(148)
4.5.5 超临界流体法 .....	(149)
思考题 .....	(151)
本章参考文献 .....	(151)
<b>第5章 生物质水热转化技术 .....</b>	<b>(154)</b>
5.1 生物质水热转化技术简介 .....	(154)
5.1.1 生物质水热转化技术历史沿革 .....	(156)
5.1.2 生物质水热转化技术原理 .....	(158)
5.2 水热液化 .....	(174)
5.2.1 工艺条件影响 .....	(178)
5.2.2 产物分析与利用 .....	(182)
5.2.3 水热液化机理研究 .....	(191)
5.3 水热气化 .....	(196)
5.3.1 工艺条件影响 .....	(196)
5.3.2 产物分析与利用 .....	(211)
5.3.3 水热气化机理研究 .....	(213)
5.4 技术发展展望 .....	(218)
5.4.1 水热液化 .....	(218)
5.4.2 水热气化 .....	(224)
思考题 .....	(230)
本章参考文献 .....	(230)
<b>第6章 生物质气化技术 .....</b>	<b>(232)</b>
6.1 气化技术简介 .....	(232)
6.1.1 气化技术历史沿革 .....	(232)
6.1.2 气化原理 .....	(234)
6.2 气化工艺 .....	(245)
6.2.1 气化剂分类 .....	(245)
6.2.2 气化炉分类 .....	(250)
6.2.3 气化压力分类 .....	(257)
6.3 气化气净化与调变 .....	(265)
6.3.1 颗粒物脱除 .....	(268)

6.3.2	气体污染物脱除	(273)
6.3.3	痕量金属脱除	(276)
6.3.4	焦油脱除	(277)
6.3.5	气化气调变	(285)
6.4	气化气应用	(287)
6.4.1	气体燃料	(288)
6.4.2	费-托合成	(290)
6.5	气化技术面临的实际问题	(296)
6.5.1	原料问题	(296)
6.5.2	气化效率	(299)
6.5.3	气化炉过程控制及自动化	(301)
	思考题	(303)
	本章参考文献	(303)
<b>第7章</b>	<b>生物质燃烧理论与技术</b>	<b>(306)</b>
7.1	生物质燃烧过程	(306)
7.1.1	生物质燃烧过程概述	(306)
7.1.2	生物质燃烧各阶段典型特征	(307)
7.1.3	影响生物质燃烧特性的因素	(316)
7.2	燃烧过程化学计量	(318)
7.2.1	生物质燃烧过程化学计量分析	(318)
7.2.2	生物质燃烧过程分类	(320)
7.2.3	热值与火焰温度	(321)
7.3	生物质直燃理论与技术	(325)
7.3.1	层燃技术	(326)
7.3.2	悬浮燃烧技术	(330)
7.3.3	流化床燃烧技术	(331)
7.4	生物质混燃技术	(336)
7.4.1	混燃技术的特点与优势	(336)
7.4.2	生物质与煤混燃的方式	(337)
7.4.3	生物质与煤混燃的运行问题	(339)
7.4.4	烘焙生物质与煤混燃	(342)
7.4.5	生物质与煤粉混燃实例	(344)
7.5	结焦与腐蚀特性及防治	(349)
7.5.1	生物质燃烧灰分特性	(349)
7.5.2	结焦与腐蚀特性	(350)
7.5.3	结焦与腐蚀防治技术	(353)
7.6	生物质燃烧过程中污染物生成与控制	(354)
7.6.1	生物质燃烧过程中的主要污染物	(354)
7.6.2	生物质燃烧过程中主要污染物防治技术	(358)
7.6.3	生物质燃烧及碳捕集与封存	(361)

思考题 .....	(362)
本章参考文献 .....	(362)
<b>第 8 章 生物质热转化系统分析计算方法与实例 .....</b>	<b>(368)</b>
8.1 Aspen Plus 在生物质耦合燃煤发电系统研究中的应用 .....	(368)
8.1.1 600 MW 燃煤锅炉系统模型构建 .....	(369)
8.1.2 600 MW 燃煤锅炉计算模型构建 .....	(371)
8.1.3 600 MW 燃煤锅炉系统模型验证 .....	(373)
8.1.4 生物质气化系统模型构建 .....	(373)
8.1.5 生物质热解模型构建 .....	(376)
8.1.6 生物质耦合燃煤发电系统 .....	(378)
8.1.7 生物质耦合燃煤发电系统质量平衡计算 .....	(379)
8.2 生命周期评价(LCA)方法 .....	(386)
8.2.1 LCA 方法概述 .....	(387)
8.2.2 基于 LCA 的生物质热化学处理分析概述 .....	(390)
8.2.3 基于 LCA 的生物质耦合燃煤发电系统 CO <sub>2</sub> 排放分析 .....	(390)
8.3 计算流体力学及其应用实例 .....	(395)
8.3.1 计算流体力学特点 .....	(395)
8.3.2 计算模型与方法 .....	(396)
8.3.3 生物质耦合燃煤锅炉燃烧过程数值模拟实例 .....	(400)
思考题 .....	(418)
本章参考文献 .....	(418)
<b>第 9 章 生物质热转化过程研究分析表征方法 .....</b>	<b>(419)</b>
9.1 概述 .....	(419)
9.2 气体组分分析方法 .....	(420)
9.2.1 常规气体分析方法 .....	(420)
9.2.2 特殊气体分析方法 .....	(421)
9.2.3 热反应产气连续检测方法 .....	(422)
9.3 液体组分分析表征方法 .....	(423)
9.3.1 色谱分析法 .....	(423)
9.3.2 光谱分析法 .....	(427)
9.4 固体性质及结构分析表征方法 .....	(432)
9.4.1 工业分析和元素分析方法 .....	(433)
9.4.2 生物质及生物质炭形貌分析方法 .....	(435)
9.4.3 粒径及孔隙分析方法 .....	(440)
9.4.4 生物质及生物质炭分子结构表征方法 .....	(442)
9.5 热反应性分析方法 .....	(446)
思考题 .....	(448)
本章参考文献 .....	(448)



# 绪论

能源即能量资源,是人类生存、发展的基础,但随着经济的快速发展,化石能源消耗量持续增加,人类正面临着日益严重的能源短缺和环境破坏问题,全球气候变暖已成为国际关注的热点。当今的能源主要来自于矿物燃料,包括煤炭、石油、天然气等。一方面,矿物能源的应用推动了社会发展,但其却在日益消耗,如世界石油探明储量和煤炭探明储量分别约为2446亿t和10696亿t(截至2019年年底)。按当前的技术水平和开采量计算,石油可开采49.9年,煤炭可开采131.6年。另一方面,由于化石能源的过度使用已引起了日益严重的环境问题,如全球气候变暖、臭氧层破坏、生态圈失衡、有害物质排放、酸雨等自然灾害,因此,开发和寻找新的可替代能源已成为人类社会亟待解决的重大问题之一。生物质能源是未来最重要的可替代能源之一,人们期望其在从化石燃料到可替代能源的过渡以及使全球能源系统向碳中和发展过程中发挥重要作用。

## 1.1 能源基本概念

凡是自然界存在的、通过科学技术手段能转换成各种形式能量(热能、机械能、电能、化学能等)的物质资源都称为能源。其中:自然界原来就存在,即没有经过加工或转换的能源统称为一次能源,如煤炭、石油、天然气、水能、太阳能、风能、生物质能、核能、地热能等;由一次能源经过加工或转换而得到的人工能源称为二次能源,如重质燃料油、煤气、热力、电能等。

在我们所生活的地球上,一次能源来源于三个方面。第一个方面是来自地球以外天体中的太阳辐射能。这一能量来源的30%以短波辐射的形式直接反射和散射到宇宙空间,其余70%被大气、海洋、陆地、生物等接收;这70%中的47%左右直接转变成热能,再以长波辐射的形式离开地球,其余约23%成为一次能源的来源。作为一次能源的太阳辐射能,一部分使地表的水蒸发成为蒸汽上升至高空,遇到冷空气凝结成雨雪又降落到地面而形成河流,河水落差形成的势能就是水能;一部分照射大气层导致各处由于气温不同产生气压差而形成风能,或照射海洋使海水产生温差且密度不同而形成海流;还有一部分被植物通过光合作用吸收而生成生物质能,这些植物若长久沉积在地下,就形成化石燃料,如煤炭、石油、天然气等。因此,人类和动物由食物中取得的能量都来自于太阳的辐射能。

第二个方面是来自地球本身的能量,诸如地热能、火山能、地震能以及核燃料(铀、钍、钷)等。这方面的能源目前可以利用的主要是地下热水、地下蒸汽、热岩等地热能,以及地壳和海洋中蕴藏的各种核燃料。这类能源目前尚未得到大范围应用,但其应用前景非常可观,据估计,此类能源总量为全部已探明煤炭能量的一亿多倍,如海水中每克重氢(氘)在聚变反

应中可释放出  $9.3 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$  的能量。

第三个方面是地球和其他天体相互作用而产生的能量。如在天体运动中,因太阳和月亮对地球表面的水的吸引力作用而产生的潮汐能就属于这类能源。

一次能源可以根据它们是否能够再生而分为可再生能源和不可再生能源。可再生能源是指能够重复产生的自然能源,它可供人类长期使用而不会枯竭,如太阳能、风能、水能、海洋能、潮汐能、地热能和生物质能等。不可再生能源是指那些不能重复产生的自然能源,这些能源消耗一些就少一些,在短期内不会重复产生并且最终会枯竭,如煤炭、石油、天然气、核燃料等。

能源按其性质可以分为燃料能源和非燃料能源。燃料能源有化石燃料(煤炭、石油、天然气等)、生物燃料(柴草、木材、沼气、有机废弃物等)、化工燃料(丙烷、甲醇、乙醇、废旧塑料制品等)和核燃料(铀、钍、钷等)四类。非燃料能源多数具有机械能,如风能、水能、潮汐能、波浪能等,有的含有热能,如地热能和太阳能等。

能源按其使用情况可分为常规能源和新能源。常规能源是指在现阶段科学技术的水平下已被广泛使用,而且利用技术比较成熟的能源,如煤炭、石油、天然气、水能等。那些虽然早已被利用或已引起人们重视,但尚未被广泛利用或在利用技术方面尚待完善或正在研究中的能源,都称为新能源。随着科学技术的发展,新能源因利用技术日益完善而逐渐被广泛采用,新能源也就成为常规能源。在现阶段,核能、太阳能、风能、地热能、生物质能、海洋能等都被列为新能源。

能源按其对环境的影响程度又可分为清洁能源和非清洁能源。一般而言,可再生能源如太阳能、风能、水能、海洋能、潮汐能、地热能和生物质能等都属于清洁能源,而不可再生能源如煤炭、石油、天然气、核燃料等都属于非清洁能源。

值得注意的是,建立上述能源分类方法的目的是从不同属性区分各种能源形式,并指导人们更好地对其加以转化利用。每种能源形式都有其自身特点,同类能源中的不同能源可能也存在较大差异。因此,我们需要根据实际情况,客观认识并运用好能源分类方法。

## 1.2 我国能源结构分析

我国正处于经济转型的新时期,经济总量呈现持续增长的趋势,能源作为经济增长背后的推动力,在新的历史时期,正面临着前所未有的挑战,能源的变革时代即将到来。从总体上来看,我国能源资源在发展过程中存在着一系列问题,能源资源发展与人们的日常生活及社会生产之间的矛盾日益凸显。另外,在全球变暖的当下,传统的能源格局悄然改变,能源资源的变革也蓬勃兴起。因此,我国能源转型任重道远,也势必推动我国经济进入一个新的常态。以习近平总书记为核心的党中央高度重视能源资源变革,强调立足我国能源的现状,大力推进能源产业发展,为全面推进我国经济进步、建成小康社会提供支持。

我国能源结构的特点是以煤炭为主,多样化发展,受自给率约束。如图 1-1 所示,横向对比 2018 年中国、美国、日本、欧盟和全球平均一次能源需求结构,可见:①从化石能源的合计份额来看,中国与全球平均水平相当(85%),美国略低(84%),日本较高(88%),欧盟较低(仅 75%)。②化石能源具体包括石油、天然气、煤炭,由于我国的化石资源禀赋一直是“富煤、缺油、少气”,因此我国化石能源大幅偏重于煤炭,直到 2018 年煤炭在我国一次能源中的

需求占比仍然高达 58%，而石油和天然气仅分别占 20% 和 7%。从全球平均水平来看，石油、天然气、煤炭的占比更加均衡，分别为 34%、24%、27%；美国、欧盟的化石能源都更加依赖于石油和天然气，而煤炭占比仅分别为 14%、13%。③低碳能源包括核电、水电、可再生能源。中国的低碳能源以水电为主，水电份额（为 9%）高于美国、日本、欧盟的水平（分别为 3%、4%、5%）；但中国的核能份额仅为 2%，大幅低于美国、欧盟（分别为 8%、11%），日本在福岛核事故后核电份额大幅下降，目前也仅为 2%；可再生能源方面，欧盟和日本的份额较高（分别为 9%、6%），美国为 5%，中国和全球平均水平一致（均为 4%）。

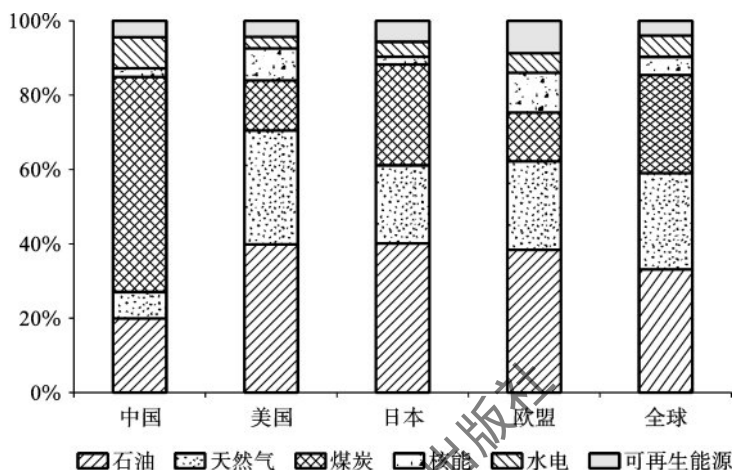


图 1-1 2018 年平均一次能源需求结构对比

从一次能源结构变化来看，我国在能源结构的多样性方面已经得到一定改善，尤其是 2010 年以来化石能源的份额从 92% 下降到 85%，其中煤炭份额更是从 70% 下降到 58%。政策方面，2017 年 1 月印发的《能源发展“十三五”规划》和 2017 年 4 月印发的《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》中，对能源消费总量、能源结构、单位能耗、能源自给率等方面均提出了发展目标，如表 1-1 所示。

表 1-1 能源领域相关政策目标

目 标	2015 年	2020 年	2030 年	2050 年
能源消费总量	43 亿 t 标准煤	49.8 亿 t 标准煤	60 亿 t 标准煤以内	保持稳定
煤炭占比	64%	57.6%	—	—
非化石能源占比	12%	24.3%	—	超过 50%
天然气占比	5.9%	8.1%	15%	—
单位 GDP <sup>a</sup> 能耗	—	—	达世界平均水平	达世界先进水平
能源自给率	84%	80% 以上	保持较高水平	保持较高水平

<sup>a</sup>GDP：国内生产总值。

从全球一次能源结构历史变化来看，能源结构也呈现出多样化的趋势，其中低碳能源的份额逐渐上升（尤其是风电、光伏等可再生能源份额上升），而化石能源当中的天然气份额也呈现上升趋势。

主要国家和地区当中，美国页岩油（气）革命后，成为石油输出国家之一，能源消费结构中的油气份额也继续增加，煤炭份额近年来快速减少。日本则由于福岛核事故导致能源

结构发生重大改变,核能份额大幅减少,而化石能源份额逆向增加,煤炭份额也因此出现回升。欧盟的能源结构多样化程度则更加领先,非化石能源份额已经达到 25%。

从美国、日本、欧盟等国家及地区能源结构的历史变化中可以看出,能源结构呈现多元化发展趋势,同时技术进步、核泄漏等特殊事件,也可能会影响能源结构的发展。

值得关注的是,我国在《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》等政策中提出了能源自给率的目标,要求 2020 年后能源自给率保持在 80% 以上。我国的能源自给率从 2000 年起自 100% 持续下降,到 2020 年已经下降到 80.7%,其间甚至曾降至 78.4%,因此能源自给率成为能源结构改变的重要约束条件。考虑到近年来国际形势的复杂性增加,能源安全的重要性也随之上升。若煤炭在化石能源中的比例快速下降,能源自给率将进一步下降,进而影响到能源安全。因此,我们认为煤炭份额的下降速度可以放缓,并且核能、太阳能、风能、生物质能等非化石能源份额需要逐步提升。

## 1.3 生物质能源与资源

生物质是指通过光合作用而形成的各种有机体,包括所有的动植物和微生物。生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式,是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。生物质能的原始能量来源于太阳,所以从广义上讲,生物质能是太阳能的一种表现形式。

### 1.3.1 生物质的组成与结构

瑞典博物学家林奈(Carolus Linnaeus, 1707—1778)在 18 世纪提出,生物可分为动物和植物。自然界植物是经过长时间进化发展而来的,种类繁多,形态各异。迄今为止,已知的植物有 50 多万种,它们的形态、结构、生活习性以及对环境的适应性各不相同,千差万别。根据植物在进化过程中所形成的特点,通常将地球上的植物分成高等植物和低等植物两大类。

低等植物的植物体是单细胞或多细胞的叶状体,有的分枝,有的不分枝,一般没有根、茎、叶等器官的分化,没有中柱。它们只能用分裂的方式和孢子来传宗接代,生殖器官也是单细胞的,合子(精子与卵结合而成)发育成新植物体不经过胚的阶段。根据营养方式,低等植物可分为藻类植物、菌类植物和地衣植物。

高等植物的形态和结构比低等植物的复杂许多。高等植物大多有根、茎、叶的分化,有中柱,生殖器官是多细胞的,合子发育成新植物体经过胚的阶段。根据营养器官分化程度和生殖器官不同,高等植物分为苔藓植物、蕨类植物和种子植物三大类。

藻类植物、菌类植物、地衣植物、苔藓植物和蕨类植物的孢子比较显著,植物在生活过程中能产生孢子,用孢子繁殖,完成生活周期,因此这几类植物统称为孢子植物。孢子植物也称为隐花植物,即它们一生中从不开花,好像把花隐藏了起来一样。

种子植物也称为显花植物或有花植物,即它们一生中要开花,可分为裸子植物和被子植物两类。裸子植物比较低级,它的突出特征是种子裸露,没有被果皮包被,它的受精已脱离了水的限制。被子植物在植物界的发展中后来居上,成为最高等的类型,它的最大特点是出

现了花和果实,而且种子被保护在果实中,胚珠由子房包被着。被子植物是绿色开花植物。

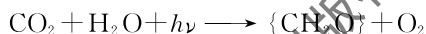
生物质的种类和蕴藏量都是极其丰富的,科学家曾经估计全球生物物种有 150 万种。随着科学研究的深入,这一数字已经上升到 3000 万~ 5000 万,热带雨林的生物多样性最为丰富,那里生活着全世界半数以上的物种。

### 1.3.1.1 光合作用

地球上的生物按照碳素营养方式不同,可分为异养生物和自养生物两大类。

异养生物只能以现成的有机化合物为营养源,如动物、许多微生物和少数植物;自养生物能够以无机碳化合物为营养源,如绝大多数植物和少数微生物。自养生物中,有的利用无机物氧化获得能量合成有机物,如硝化细菌、硫细菌等;还有的通过光合作用将无机物合成为有机物,如绿色植物(包括孢子植物和种子植物)。植物通过光合作用将太阳能转化为化学能并储存有机物,也为其他直接或间接依靠植物生存的生物提供有机物和能量。

光合作用是绿色植物通过叶绿体,利用太阳能,把二氧化碳和水合成为储存能量的有机物,并且释放出氧气的过程。植物生物质是在叶绿素和水的存在下,通过太阳的能量将大气中的二氧化碳转化为碳水化合物而形成的。动物通过食用植物或其他生物物种来生长。植物通过光合作用吸收太阳能(见图 1-2)。在特定波长的阳光照射下,绿色植物分解水以获得电子和质子,并利用它们和二氧化碳生成葡萄糖,释放氧气。该过程可表示为



其中: $h\nu$  是来自太阳的能量;  $\{\text{CH}_2\text{O}\}$  是光合作用产物的基本形式,葡萄糖为  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 。

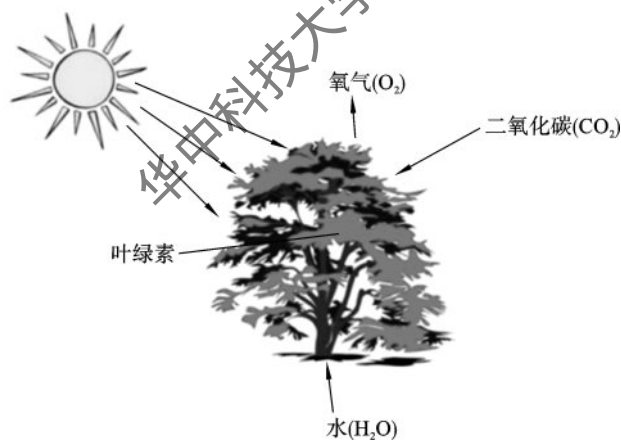


图 1-2 植物光合作用

从光合作用的全过程来看,其可分成两个阶段(见图 1-3)。一个是有光能才能进行化学反应的阶段,叫作光反应阶段。光反应阶段的化学反应在叶绿体内基粒的囊状结构上进行,首先将水分子分解成氧(O)和氢(H),释放出氧气;然后在光照下将二磷酸腺苷(ADP)和无机磷合成为三磷酸腺苷(ATP),将光能转化为活泼化学能储存在 ATP 的高能磷酸键中。另一个是没有光能也可进行化学反应的阶段,叫作暗反应阶段。暗反应阶段的化学反应在叶绿体内的基质中进行,首先是二氧化碳的固定,即二氧化碳与五碳化合物结合,形成三碳化合物;其中一些三碳化合物接受 ATP 释放的能量,被氢还原,再经过一系列复杂的变化,形成糖类,ATP 中活跃的的化学能转变为糖类有机物中稳定的化学能。这个循环过程是由美

国生物学家卡尔文(M. Calvin)等人发现的,又称卡尔文循环。

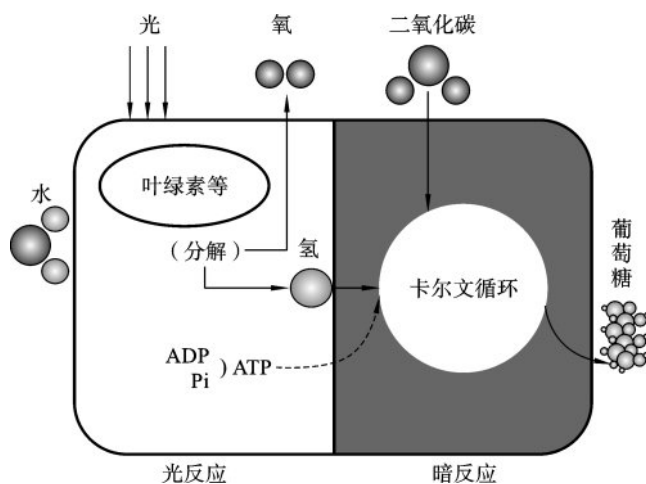


图 1-3 光合作用机制示意图

光合作用将太阳能转化为化学能并储存于有机物,这是植物赖以生长的主要物质来源和全部能量来源,也是其他直接或间接依靠植物生存的生物的有机物和能量来源。而且,埋藏在地层中的煤炭、石油和天然气等常规能源也是古代植物通过光合作用形成的有机物演变而来的。从物质转变和能量转变的过程来看,光合作用是地球生命活动中最基本的物质代谢和能量代谢方式。

光合作用对生物的进化也起到了重要的作用。因为如果没有光合作用,地球上有关呼吸的生物就不可能出现。事实上,在原始大气中并没有氧气。直到距今 20 亿~30 亿年以前,地球上的一种藻类植物通过光合作用产生氧气,地球的大气中氧含量才逐渐增加,从而使地球上进行有关呼吸的生物得以生存和进化。同时,光合作用释放氧气,维持了大气中氧气和二氧化碳之间的平衡。

### 1.3.1.2 植物细胞的结构

细胞是生物体形态结构和生命活动的基本单位,它的发现与显微镜的发明密切相关。1665 年,英国物理学家胡克(R. Hooke, 1635—1703)用显微镜观察软木,看到其中有许多蜂窝状的小室,就把它称为细胞。19 世纪 30 年代,德国植物学家施莱登(M. Schleiden)和动物学家施旺(T. Schwann)根据对植物和动物的观察研究,并总结前人工作,正式提出细胞学说,即“一切动物和植物都是由细胞组成的”。

植物细胞形状多样,有球状体、多面体、纺锤形和柱状体等。植物细胞体积一般很小,最小的球菌细胞直径只有  $0.5\ \mu\text{m}$ ,在种子植物中,一般细胞直径为  $10\sim 100\ \mu\text{m}$ 。

不同植物的形态千差万别,组成植物体的细胞形态各异,功能亦各不相同,它们的组成却有许多共同点。典型植物细胞包括细胞壁、原生质体及细胞内含物三个基本部分(见图 1-4)。原生质体主要包括膜系统、细胞核、细胞质及细胞器等,是以蛋白质与核酸为主的复合物。它是细胞各类代谢活动进行的主要场所,是细胞最重要的组成部分。

细胞质是原生质体的基本组成成分,为半透明、半流动的基质。细胞核是细胞生命活动的控制中心,有一定结构,可分为核膜、核液、核仁和染色质四部分。细胞器是细胞中具有一

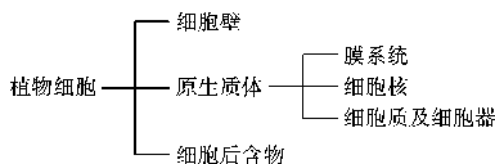


图 1-4 植物细胞的基本结构

定形态结构、组成和特定功能的微器官,包括质体、液泡、线粒体、内质网、核糖体、微管、高尔基体、溶酶体、微体等。其中质体分为白色体、叶绿体和有色体。叶绿体是含有绿色色素(主要为叶绿素 a、b)的质体,为绿色植物进行光合作用的场所。

### 1.3.1.3 原生质体的化学组成

原生质体中含有多种化学元素,主要有 C、H、N、O、P、S、Ca、K、Cl、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 和 Mo 等。其中,C、H、N 和 O 四种元素占 90% 以上,是构成各类有机化合物的主要成分。其他元素的含量较少或很少,但也非常重要。各种元素或以原子通过各种不同形式的化学键相互结合而形成各种化合物,或以离子形式存在于植物体内。

组成植物细胞的化合物分为无机化合物和有机化合物两大类。无机化合物包括水和无机盐,其分子量较小。生命是离不开水的,最初原始生命就是从原始海洋起源的,植物体中生命活动旺盛的细胞含水量高达 85%<sup>①</sup> 以上。细胞中的无机盐通常以离子状态存在,如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  及  $\text{Cl}^-$  等。也有金属离子与一些无机物的阴离子或有机物的阴离子结合而成盐。有些盐是难溶盐类,如草酸钙。

有机化合物是含 C 和 H 等元素的化合物,包括糖类、蛋白质、脂质、维生素和核酸等。不同植物、不同细胞中各类化合物含量和组成差别较大,此种差异也反映在核酸和蛋白质上。

糖类是由 C、H 和 O 元素组成的一大类中性化合物,包括蔗糖、淀粉、葡萄糖、糖原、纤维素和戊聚糖等,主要来源于植物(如谷物、蔬菜、水果和豆类等),为生命代谢活动提供能量,是自然界存在最多、分布最广的一类重要有机化合物。绿色植物光合作用的主要产物是糖类,植物体内有机物运输形式也是糖。

糖类的分子中 H 和 O 的比例通常为 2 : 1,与水分子中的比例一致,可用通式  $\text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n$  来表示,因此糖类亦称为碳水化合物。后来人们发现有些化合物按其构造和性质应属于糖类,可是它们的组成并不符合  $\text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n$  通式,故碳水化合物这个名称并不确切,但因已经使用了很长的时间,所以沿用至今。

糖类根据其能否被水解及水解产物的情况可分为以下三类。

(1) 单糖:分子式为  $(\text{CH}_2\text{O})_n$ ,其中  $n$  是碳原子的数目,通常不小于 3。单糖按碳原子的数目命名。丙糖为三碳糖,如甘油糖;戊糖为五碳糖,最重要的戊糖有核糖、脱氧核糖和核酮糖,常见的戊糖还有木糖和阿拉伯糖,是半纤维素的组成成分;己糖是六碳糖,包括葡萄糖、果糖、半乳糖和甘露糖等,各种六碳糖的分子式都是  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ,但结构式各不相同,为同分异构体。

① 本书中,含水量均用质量分数表示。此外,本书中物质含量、浓度、产率等,若无特殊说明,均用质量分数表示。

(2)寡糖:由少数(2~6个)单糖缩合而成,水解后生成两分子单糖。常见的寡糖有蔗糖、麦芽糖和纤维二糖等。

(3)多糖:由多分子单糖分子脱水缩合而成分支或不分支的长链分子,能水解生成许多单糖分子。常见的多糖有淀粉、糖原和纤维素等。

#### 1.3.1.4 细胞壁的化学组成

细胞壁是原生质体生命活动的产物,是植物细胞周围没有生命的部分,具有一定的韧性,可分为胞间层、初生壁和次生壁三层。胞间层存在于细胞壁最外面,是相邻两个细胞共用的薄层,由亲水性果胶类物质组成,它能使相邻细胞粘连在一起。在植物细胞生长过程中,由原生质体分泌的纤维素、半纤维素和少量果胶质存在于胞间层内侧,形成初生壁。细胞壁停止生长后,在初生壁的内侧逐渐一层层地积累一些纤维素、半纤维素和少量木质素等物质,形成次生壁,使细胞壁加厚。由此可见,细胞壁主要由纤维素、半纤维素和木质素等构成。

##### 1) 纤维素

纤维素是世界上含量最丰富的有机化合物,是植物细胞壁的主要成分,构成了植物支撑组织的基础。棉花几乎全部是由纤维素所组成的(占98%),亚麻中约含80%纤维素,木材中纤维素平均含量约为50%。

纤维素的结构单位是D-葡萄糖,是无分支的链状分子,结构单位之间以糖苷键结合而成长链,见图1-5。经X射线测定,纤维素分子的链与链之间借助于分子间的氢键形成绳索状结构,绳索状结构具有一定机械强度和韧性,在植物体内起着支撑作用。

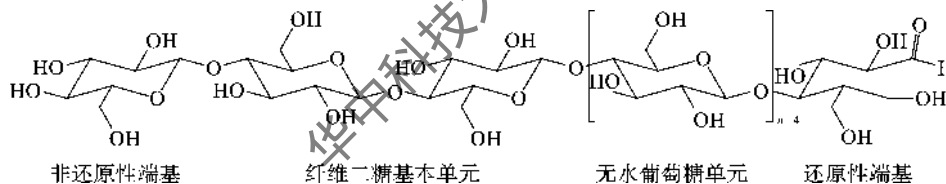


图 1-5 纤维素结构示意图

纤维素是白色物质,不溶于水,无还原性。纤维素比较难水解,一般需要在浓酸中或用稀酸在加压下进行。在水解过程中可以得到纤维四糖、纤维三糖、纤维二糖,最终产物是D-葡萄糖。

##### 2) 半纤维素

半纤维素是由多种糖单元组成的一类多糖,其主链由木聚糖、半乳聚糖或甘露糖组成,在其支链上带有阿拉伯糖或半乳糖。半纤维素大量存在于植物的木质化部分,如秸秆、种皮、坚果壳及玉米穗等,其含量依植物种类、部位和老幼程度而有所不同。

半纤维素与纤维素的主要区别为:半纤维素由不同的糖单元聚合而成,分子链短且带有支链,见图1-6。半纤维素中某些成分是可溶的,在谷类中可溶的半纤维素称为戊聚糖,大部分则具有不可溶性。

##### 3) 木质素

木质素是一类复杂的有机化合物,存在于植物细胞壁中。它在植物界的含量仅次于纤维素含量,广泛地分布于高等植物中,是裸子植物和被子植物所特有的化学成分。木材中木