

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21世纪新能源丛书

生物质热解原理与技术

朱锡锋 陆 强 编著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪新能源丛书

生物质热解原理与技术

朱锡锋 陆 强 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

生物质能本质上是绿色植物通过光合作用转换和储存下来的太阳能,也是唯一一种具有碳源的可再生能源。生物质热解技术由于具有工艺过程短、原料适应性强、反应迅速、转化率高、易于工业化等诸多优点而备受人们的广泛关注。为进一步推动该项技术的研究与应用,编者基于多年的研究积累撰写成本书。全书内容共分7章,分别讲述了我国的能源形势和生物质能特点,生物质的组成、结构和性质,生物质的热解原理,生物质的热解炭化、热解气化和热解液化,以及生物油的性质与应用等,全书较好地构成了一套完整的生物质热解技术体系。

本书可作为高等学校和科研院所相关专业的研究生和高年级本科生的教材使用,也可以作为生物质能领域工程技术人员的参考资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

生物质热解原理与技术/朱锡锋,陆强编著. —北京:科学出版社,2014.6

(21世纪新能源丛书)

ISBN 978-7-03-040761-0

I. ①生… II. ①朱… ②陆… III. ①生物能源-热解气化 IV. ①TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 111129 号

责任编辑:钱俊 鲁永芳/责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:398 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《21 世纪新能源丛书》编委会

主 编 徐建中

副主编 陶文铨 匡廷云 欧阳平凯 金红光

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 静 马重芳 王如竹 王志峰

朱锡锋 李小森 吴创之 何雅玲

汪集旸 张明明 张寅平 陈海生

姜胜耀 骆仲泱 郭烈锦 戴松元

《21 世纪新能源丛书》序

物质、能量和信息是现代社会赖以存在的三大支柱。很难想象没有能源的世界是什么样子。每一次能源领域的重大变革都带来人类生产、生活方式的革命性变化，甚至影响着世界政治和意识形态的格局。当前，我们又处在能源生产和消费方式发生革命的时代。

从人类利用能源和动力发展的历史看，古代人类几乎完全依靠可再生能源，人工或简单机械已经能够适应农耕社会的需要。近代以来，蒸汽机的发明唤起了第一次工业革命，而能源则是以煤为主的化石能源。这之后，又出现了电和电网，从小规模的发电技术到大规模的电网，支撑了与大工业生产相适应的大规模能源使用。石油、天然气在内燃机、柴油机中的广泛使用，奠定了现代交通基础，也把另一个重要的化石能源引入了人类社会；燃气轮机的技术进步使飞机突破声障，进入了超声速航行的时代，进而开始了航空航天的新纪元。这些能源的利用和能源技术的发展，进一步适应了高度集中生产的需要。

但是化石能源的过度使用，将造成严重环境污染，而且化石能源资源终将枯竭。这就严重地威胁着人类的生存和发展，人类必然再一次使用以可再生能源为主的新能源。这预示着人类必将再次步入可再生能源时代——一个与过去完全不同的建立在当代高新技术基础上创新发展起来的崭新可再生能源时代。一方面，要满足大规模集中使用的需求；另一方面，由于可再生能源的特点，同时为了提高能源利用率，还必须大力发展分布式能源系统。这种能源系统使用的是多种新能源，采用高效、洁净的动力装置，用微电网和智能电网连接。这个时代，按照里夫金《第三次工业革命》的说法，是分布式利用可再生能源的时代，它把能源技术与信息技术紧密结合，甚至可以通过一条管道来同时输送一次能源、电能和各种信息网络。

为了反映我国新能源领域的最高科研水平及最新研究成果，为我国能源科学技术的发展和人才培养提供必要的资源支撑，中国工程热物理学会联合科学出版社共同策划出版了这套《21 世纪新能源丛书》。丛书邀请了一批工作在新能源科研一线的专家及学者，为读者展现国内外相关科研方向的最高水平，并力求在太阳能热利用、光伏、风能、氢能、海洋能、地热、生物质能和核能等新能源领域，反映我国当前的科研成果、产业成就及国家相关政策，展望我国新能源领域未来发展的趋势。

本丛书可以为我国在新能源领域从事科研、教学和学习的学者、教师、研究生提供实用系统的参考资料，也可为从事新能源相关行业的企业管理者和技术人员提供有益的帮助。



中国科学院院士

2013 年 6 月

前 言

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。纵观人类社会历史，从人类学会使用火开始，到工业化的今天，人类文明的每一次重大进步都伴随着能源技术的改进和提升。

改革开放以来，随着我国经济和社会的快速发展，我国能源消耗平均以 6%~7% 的年增长率快速增长，现已成为世界上第一大能源生产国，并已接近成为世界上第一大能源消费国。另一方面，我国人均能源资源拥有量在世界上却处于较低水平，其中煤炭资源人均拥有量相当于世界平均水平的 50%，石油和天然气的人均资源量仅为世界平均水平的 5%~6%。因此，在我国大力研究和开发应用包括生物质能在内的各种可再生能源，意义十分重大。

生物质能本质上是绿色植物通过光合作用转换和储存下来的太阳能，也是唯一一种具有碳源的可再生能源。我国生物质资源非常丰富，主要有农作物秸秆、薪柴和森林废弃物、能源植物、工业有机废弃物和生活有机垃圾等。采用热解等现代生物炼制技术将这些可再生的生物质资源转化为具有较高品质的能源产品，既可以减少石油等化石资源的消耗，又能够在保护生态环境的同时，开拓新的经济增长点和促进美好乡村的建设。

本人于 1997 年年底开始从事生物质能研究。当时本人即将结束在中国科学技术大学的博士后研究，在聆听了浙江大学岑可法院士来学校所做的关于能源利用技术的学术报告后，更加坚信生物质能是很有应用前景的一种可再生能源，故决定选择生物质热解作为自己留校工作后的研究方向。时光荏苒，17 年悄然已过，本人在生物质热解领域从启蒙到了解，从小试到中试，再从中试到示范，一直没有停止对该项技术的探索和创新。

本人能够在生物质热解领域追梦至今，当要感谢原中国科学技术大学校长朱清时院士。朱清时先生于 19 世纪 20 年代初倡导绿色化学研究，1999 年开始关注本人在生物质热解转化方面所做的工作。为支持和加快学校在生物质能领域的研究，朱先生于 2001 年发起成立了中国科学技术大学生物质洁净能源实验室，并亲自兼任实验室主任。朱先生除了对我们的研究工作给予学术指导外，更是以坚韧不拔的毅力带领我们申请国家 973 计划等重大项目。朱先生对科学与真理的执着追求，一直深深地影响着本人。

本人能够在生物质热解领域追梦至今，还要感谢导师、原中国科学院院长路甬

祥院士。先生每当获悉本人在生物质热解研究方面取得的进展时，总是给予勉励。在本人的生物质热解液化技术第一次产业化示范开始不久，先生于 2007 年 5 月莅临现场指导，并欣然命笔题词：“官产学研结合，发展生物质可再生能源”。

生物质热解技术因具有工艺过程短、原料适应性强、反应迅速、转化率高和无污染物排放等诸多优点而备受人们的广泛关注。为进一步推动该项技术的研究与应用，本人基于多年的研究积累撰写了本书。全书内容共 7 章，分别讲述我国的能源形势和生物质能特点，生物质的组成、结构和性质，生物质的热解原理，生物质的热解炭化、热解气化和热解液化，以及生物油的性质与应用等。全书虽然较好地构成了一套完整的生物质热解技术体系，但在生物质热解机理方面的叙述还不够深入，在生物质热解技术方面的叙述还不够深刻。如果本书能够对读者有所启发，本人将感到莫大的欣慰。

本书能列入“十二五”国家重点图书出版规划项目《21 世纪新能源丛书》，主要感谢中国科学院工程热物理研究所金红光院士的大力推荐和殷切勉励。金先生在燃料化学能梯级利用技术领域所取得的成就和他那“学而不厌、诲人不倦”的品格一直鼓舞着本人、激励着本人。

本书能够在不太长的时间内编撰完成，还要感谢编者之一、现为华北电力大学副教授的陆强博士。从本科三年级到博士毕业，7 年间他一直跟随本人从事生物质热解技术的研究，期间共计发表了 27 篇学术论文，2010 年毕业时荣获中国科学院院长优秀奖。他承担了本书五分之一的编写工作。

中国科学技术大学生物质洁净能源实验室的郭庆祥教授、阎立峰教授、傅尧教授、李全新教授等老师和研究生对于本书的编写给予了大力支持和热情帮助。在此谨向他们表示衷心的感谢！

在本书的编写过程中，作者广泛参考了国内外已出版和发表的相关资料。在此对本书所借鉴的研究成果的完成者表示衷心的感谢！

本书研究成果是在过去十余年时间内持续攻关取得的，研究工作得到了国家 973 计划（2007CB210203 和 2013CB228103）、国家 863 计划（2012AA051803）、国家科技支撑计划（2007BAD34B02）、国家自然科学基金（50576091、50876099 和 50930006）、中国科学院知识创新工程（KGCX2-YW-306-4 和 KGCX2-YW-330）和重点部署项目（KGZD-EW-304-3）的宝贵资助。在本书编写和出版过程中获得了同行专家和科学出版社编辑的很多鼓励和帮助，在此一并致以深深的谢意！

限于编者水平，书中难免存在不足之处，恳请读者不吝赐教。

朱锡锋

2014 年 4 月

目 录

《21 世纪新能源丛书》序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 能源的基本概念	1
1.2 绿色植物光合作用	3
1.3 生物质资源与分类	6
1.4 生物质的物理性质	10
1.4.1 生物质的含水率	10
1.4.2 生物质的密度	10
1.4.3 堆积角、内摩擦角和滑落角	11
1.4.4 生物质炭的机械强度	12
1.4.5 生物质的比表面积	13
1.4.6 生物质的孔隙率	13
1.4.7 生物质的比热容	13
1.4.8 生物质的导热系数	13
1.5 生物质的燃料特性	14
1.5.1 生物质的燃烧	14
1.5.2 生物质的发热量	15
1.5.3 生物质燃料的化学当量比	17
1.6 生物质能源转换技术	18
参考文献	22
附录 1-1 我国农作物秸秆资源及其分布	22
附录 1-2 固体生物质燃料全水分测定方法	27
第 2 章 生物质的组成与结构	30
2.1 生物质的组成和结构	30
2.2 生物质的元素分析	36
2.3 生物质的工业分析	41
参考文献	47
附录 2-1 纤维素聚合度的测定方法及常见生物质原料的组成成分	48

附录 2-2 常见生物质原料的分析结果	56
第 3 章 生物质的热解原理	80
3.1 纤维素热解机理	80
3.1.1 纤维素热解机理概述	80
3.1.2 纤维素热解液体产物组成	81
3.1.3 LG 的形成	81
3.1.4 其他脱水糖衍生物的形成	90
3.1.5 呋喃类产物的形成	93
3.1.6 小分子醛酮类产物的形成	94
3.1.7 纤维素快速热解的整体反应途径	97
3.2 半纤维素热解机理	100
3.2.1 半纤维素热解机理概述	100
3.2.2 半纤维素热解液体产物组成	100
3.2.3 脱水糖衍生物以及呋喃类产物的形成	100
3.2.4 小分子物质的形成	104
3.2.5 木聚糖快速热解的整体反应途径	104
3.3 木质素热解机理	107
3.3.1 木质素热解机理概述	107
3.3.2 木质素模型化合物及其热解机理	107
3.4 生物质热解的主要影响因素	118
3.4.1 加热速率的影响	118
3.4.2 热解温度的影响	118
3.4.3 热解时间的影响	122
3.4.4 原料种类的影响	122
3.4.5 原料性质的影响	123
3.4.6 其他因素的影响	124
参考文献	125
第 4 章 生物质的热解炭化	130
4.1 概述	130
4.2 生物质热解炭化原理	130
4.3 生物质热解炭化装置	132
4.3.1 传统生物质热解炭化装置	133
4.3.2 新型生物质热解炭化装置	140
4.4 生物质炭的性质与应用	146
4.4.1 生物质炭的组成	146
4.4.2 生物质炭的性质	147

4.4.3 生物质炭的应用	149
4.5 醋液与焦油的性质与应用	152
4.5.1 醋液的组成与性质	152
4.5.2 醋液的应用	156
4.5.3 焦油的组成与性质	157
4.5.4 焦油的应用	159
参考文献	160
第5章 生物质的热解气化	165
5.1 概述	165
5.2 生物质气化技术分类	167
5.2.1 按气化压力进行分类	167
5.2.2 按气化温度进行分类	168
5.2.3 按气化剂进行分类	168
5.2.4 按加热方式进行分类	169
5.2.5 按气化炉结构进行分类	170
5.3 生物质热解气化原理	174
5.3.1 气化基本原理	174
5.3.2 气化反应动力学	176
5.3.3 气化反应平衡分析	179
5.3.4 气化主要影响因素	181
5.3.5 气化主要评价参数	184
5.4 典型气化炉及其设计举例	186
5.4.1 生物质气化装置的构成	186
5.4.2 下吸式固定床气化炉	187
5.4.3 上吸式固定床气化炉	188
5.4.4 气化炉设计计算举例	189
5.5 生物质气化气体的净化	191
5.5.1 燃气中焦油的特点及其危害	191
5.5.2 传统的焦油去除方法	192
5.5.3 催化裂解去除焦油方法	193
5.6 生物质气化技术的应用	196
5.6.1 生物质气化供热	196
5.6.2 生物质气化集中供气	197
5.6.3 生物质气化发电	198
5.6.4 生物质气化制氢	199
5.6.5 生物质气化合成液体燃料	200

参考文献	207
附录 5-1 生物质气化集中供气站建设标准	207
第 6 章 生物质的热解液化	215
6.1 概述	215
6.2 生物质原料预处理	216
6.2.1 破碎预处理	216
6.2.2 干燥预处理	219
6.3 生物质进料系统	225
6.3.1 螺旋进料系统概述	225
6.3.2 螺旋进料系统的动力学分析	227
6.3.3 螺旋进料器的设计	229
6.4 热解液化反应器	231
6.4.1 流化床式热解反应器	231
6.4.2 非流化床式热解反应器	235
6.4.3 典型热解反应器的设计计算	237
6.5 热解产物气固分离	242
6.5.1 概述	242
6.5.2 旋风分离器	243
6.5.3 过滤式除尘器	246
6.5.4 气固分离装置的发展趋势	248
6.6 热解气冷凝与生物油收集	249
6.6.1 热解气的组成	249
6.6.2 热解气的冷却与冷凝	249
6.6.3 喷雾降膜冷凝的机理	251
参考文献	257
第 7 章 生物油的性质与应用	259
7.1 概述	259
7.2 生物油的化学组成及其分离与分析	259
7.2.1 生物油的化学组成	259
7.2.2 生物油的分离与分析	266
7.3 生物油的理化性质	272
7.3.1 生物油的微观多相性	272
7.3.2 生物油的水分	274
7.3.3 生物油的相溶性	275
7.3.4 生物油的热值	276
7.3.5 生物油的黏度和流变特性	276

7.3.6	生物油的闪点	277
7.3.7	生物油的倾点和浊点	277
7.3.8	固体颗粒和灰分	278
7.3.9	生物油的挥发降解特性	279
7.3.10	生物油的润滑性	279
7.3.11	生物油的腐蚀性	280
7.3.12	生物油的安定性	280
7.3.13	生物油的毒性	281
7.3.14	生物油的降解性	281
7.3.15	小结	281
7.4	生物油的化工应用	282
7.4.1	分离高附加值化学品	282
7.4.2	制备特定化学品	287
7.4.3	生物油气化制备合成气	288
7.4.4	生物油重整制备氢气	291
7.4.5	生物油化工应用前景	294
7.5	生物油的燃烧应用	294
7.5.1	生物油的基本燃烧特性	294
7.5.2	生物油的雾化燃烧特性	297
7.5.3	生物油的燃烧应用	298
7.5.4	生物油燃烧应用前景	302
	参考文献	304
	附录 7-1 生物油性质的分析方法	308
	索引	314

第 1 章 概 述

1.1 能源的基本概念

能源(energy source)亦称能量资源或能源资源,是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。纵观人类社会发展的历史,人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替。能源的开发和有效利用程度以及人均能源消费量,是生产技术、生活水平和社会发展的标志之一。

凡是自然界存在的、通过科学技术手段能够转换成各种形式能量(热能、电能、光能、化学能和机械能等)或可做功的资源都被统称为能源。其中凡自然界原来就存在、没有经过加工或转换的能源称为一次能源,如煤、石油、天然气、煤层气、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能源称为二次能源,如电力、焦炭、煤气、汽油、柴油、热力等。

地球上的一次能源主要来源于三个方面^[1]。

一是来自地球以外天体中的太阳辐射能。这方面的能量 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、生物等接受。这 70%中有 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,绝大部分使地表的水蒸发成为蒸汽上升至高空,在随大气环流过程中遇到冷空气凝结成雨雪又降落到地面而形成河流,河流水落差而生成的势能就是水能;另一部分照射大气层导致各处由于气温不同而产生气压差别并形成风能,或照射海洋使海水产生温差而引起密度不同并形成海流;还有一部分通过光合作用被植物吸收而生成生物质能,这些植物若被长久沉积在地下,就形成矿物燃料,如煤、石油和天然气等。人类和动物由食物中取得的能量都是直接或间接来自于太阳的辐射能。

二是来自地球本身的能量,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。这类能源目前多数尚未得到大量应用,但其前景非常可观,据估计能源总量约为全部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 1015kW·h 的能量。

三是地球和其他天体相互作用而产生的能量。例如,在天体运动中,太阳和月

亮对地球表面的水有着吸引力作用而产生的潮汐能就属于这一类能源。

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两类。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,这些能源用一点就少一点,在短期内不会重复产生并最终会枯竭,如煤炭、石油、天然气、核燃料等。

能源根据其是否具有物质形态可以分为燃料能源和非燃料能源两类。燃料能源有矿物燃料(煤、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、酒精、废旧塑料制品等)和核燃料(铀、钍、钷、氡等)四种。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。

能源根据其使用的普及情况分为常规能源和新能源两类。常规能源是指在现有科学技术的水平下已被广泛使用的能源,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,但尚未广泛被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,新能源的技术日益完善而被逐渐广泛采用,新能源也就成为常规能源。在我国现阶段,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。

能源根据其与环境友好的情况又分为清洁能源和非清洁能源两类。清洁能源是指在能源生产和使用过程中对环境不造成或基本不造成危害,而非清洁能源是指在能源生产和使用过程中会对环境造成危害。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。

表示能源的量主要有焦耳(J)、千焦(kJ)、兆焦(MJ)、吉焦(GJ)、太焦(TJ)、拍焦(PJ)、艾焦(EJ)等,以及国家标准已废除但工程上还常使用的卡(cal)和大卡(kcal)等。它们的换算关系是: $1\text{ cal}=4.18\text{ J}$, $1\text{ kcal}=1000\text{ cal}$ 。

能源的种类不同,计量单位也不同,如煤炭、石油等按吨计算,天然气、煤气等按立方米计算,电力按千瓦小时计算。因此,为了求出不同品种和不同含热量的能源的总量,需要将它们按各自不同的含热量折合成标准含量的统一计算单位的能源——煤当量或油当量。

煤当量和油当量分别是按标准煤和标准油的发热量计算各种能源量的换算指标,国际能源机构(IEA)规定: $1\text{ kg 煤当量}=7000\text{ kcal/kg}=29\,307\text{ kJ/kg}$ 或 29.3 GJ/t , 以及 $1\text{ kg 油当量}=10\,000\text{ kcal/kg}=41\,868\text{ kJ/kg}$ 或 41.9 GJ/t 。

目前,我国已经成为世界上第一大能源生产国和能源消费国^[2]。2011年我国一次能源生产总量为31.8亿吨标准煤,其中煤炭占77.5%,石油占9.4%,天然气占

3.8%，其他(水电、核电、风电等)占 9.3%；同年，我国一次能源消费总量为 34.78 亿吨标准煤，其中煤炭占 69.6%，石油占 18.7%，天然气占 3.9%，其他(水电、核电、风电等)占 7.8%。今后一段时期，我国仍将处于工业化、城镇化加快发展阶段，能源需求会继续增长，能源供应保障任务更加艰巨。我国能源形势严峻，主要表现在以下几个方面。

一是能源资源结构不理想。我国已探明的煤炭资源可采储量占化石资源总的可采储量的 93.7%，而石油和天然气分别只占 2.9%和 3.4%，煤炭资源比重偏大，石油、天然气资源相对较少。

二是人均能源资源拥有量较低。我国人口众多，人均能源资源拥有量在世界上处于较低水平。煤炭资源人均拥有量相当于世界平均水平的 50%，石油和天然气的人均资源量仅为世界平均水平的 5%~6%。

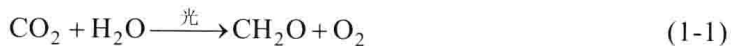
三是资源储存与能源消费地域存在明显差别。我国能源资源分布广泛但不均衡，煤炭资源主要储存在华北、西北地区，石油和天然气资源主要储存在东、中、西部地区和海域，而我国主要能源消费地区集中在东南沿海经济发达地区，大规模、长距离的北煤南运、北油南运、西气东输、西电东送是我国能源流向的显著特征和能源运输的基本格局。

四是能源资源开发难度较大。与世界相比，我国煤炭资源地质开采条件较差，大部分储量需要井下开采，极少量可供露天开采；石油天然气资源地质条件复杂，埋藏深，勘探开发技术要求较高。

1.2 绿色植物光合作用

光合作用(photosynthesis)，即光能合成作用，是植物、藻类和某些细菌，在可见光的照射下，经过光反应和暗反应，利用光合色素将二氧化碳和水(细菌为硫化氢和水)转化为有机物，并释放出氧气(细菌释放氢气)的生化过程^[3]。

植物的光合作用实际上只在植物的叶和茎中进行，因为在植物的这些部位存有许多叶绿体，叶绿体上分布着许多叶绿素分子，它吸收光能后就互相传递并引发一系列的化学反应，如发生光化反应生成氧气、发生二氧化碳同化反应生成碳水化合物等。植物光合作用过程的总反应式为

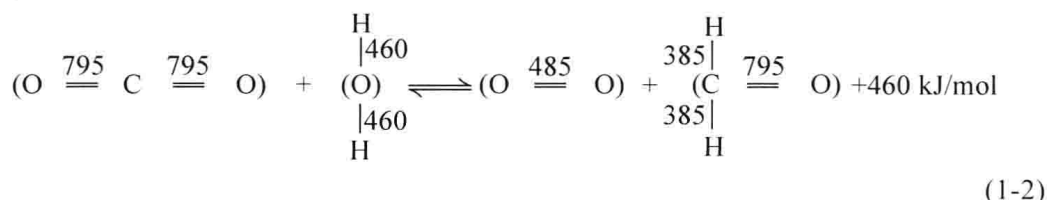


光合作用是生物界赖以生存的基础，也是地球碳氧循环的重要媒介。全球的绿色植物通过光合作用每年约吸收 7×10^{11} 吨二氧化碳和合成 4.7×10^{11} 吨有机物。正是因为有了光合作用，地球上 60 多亿人类和近 200 万种生物(其中动物 150 多万种、

植物 30 多万种)的生命活动所需的食物才能不断地得到供应。

从能量利用角度来看,光合作用又是一个巨型的能量转换过程,它是地球上唯一能够大规模地将太阳能转变成可以储存的化学能的生物学过程。虽然通过光合作用固定的太阳能大约只占到达地球表面太阳能的千分之一,但其每年合成的有机物所蕴含的能量非常巨大,约为世界每年所耗能量的 10 倍,而目前的利用率不到 3%。

为什么光合作用能把太阳能转变为化学能储存起来呢?这是因为化合物的能量实际上可以看成是形成化合物的原子之间的化学键所储藏的。从上述光合作用总反应式可以看出,反应前和反应后的碳原子、氢原子和氧原子的数目都没有变化,只是这三种元素作了重新排列,即原子的结合不同了。不同结合的原子之间的化学键所储藏的能量是不同的,氢氧原子之间的键能(H—O)每摩尔为 460kJ,氧氧原子之间的键能(O—O)每摩尔为 485kJ,氧碳原子之间的键能(O—C)每摩尔为 795kJ,碳氢原子之间的键能(C—H)每摩尔为 385kJ,这样就可算出光合反应前二氧化碳和水的总键能是 2510kJ,而光合反应后氧气和碳水化合物的总键能是 2050 kJ,如式(1-2)所示。



因此,反应后氧气和碳水化合物里的键能比反应前二氧化碳和水里的键能小。键能小,就是所处的化学势位高,容易向键能大、化学势位低的方向转化,这种转化趋势就是化学能。光合作用在这里所得到的化学能是每摩尔 460 kJ。我们利用有机物时,如将有机物燃烧,只要把 1mol 碳水化合物和 1mol 氧气结合起来,变成更稳定的 1mol 二氧化碳和 1mol 水,就可以同时获得 460 kJ 的能量。

表 1-1 列出了世界上一些植物的干物质生产与光能利用率^[4]。从表中可见,不同植物的光合作用效率存在明显差异。植物按其光合作用中碳的同化过程来区分,可以分为三碳(C₃)植物和四碳(C₄)植物两种。

大多数植物同化二氧化碳的途径都一样,即二氧化碳进入叶子后,先与腺三磷生成一种叫做磷酸甘油酸的中间化合物,然后再经若干次反应生成碳水化合物。由于磷酸甘油酸是一种具有三个碳原子的化合物,故这一类型的植物都叫做三碳(C₃)植物。另有一些起源于热带地区的植物,它们的碳同化过程在开头还要先生成一种比较稳定的叫做草酰乙酸的中间化合物,这个中间化合物经过一些变化后放出二氧化碳,然后再如三碳植物一样,通过磷酸甘油酸而发生一系列同化反应,最后生成