

—《能源工程技术丛书》—

生物燃料工程 技术进展与分析

肖 钢 纪钦洪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

能源工程技术丛书

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

生物燃料工程技术进展与分析

肖 钢 纪钦洪 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

生物燃料工程技术进展与分析/肖钢,纪钦洪编著. —武汉:武汉大学出版社,2015.10

能源工程技术丛书

ISBN 978-7-307-16225-9

I. 生… II. ①肖… ②纪… III. 生物燃料—工程技术—研究
IV. TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 140292 号



责任编辑:孙 丽

责任校对:刘小娟

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:10.5 字数:198千字

版次:2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16225-9 定价:86.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前言

能源已渗透到了现代文明的每个角落,与我们的生活息息相关。现代社会的正常运转又依赖于能源的稳定供给,人口和经济增长也驱动能源需求持续上涨。预计到2040年,全球人口数量将从现在的70亿增长到接近90亿,经济产出将翻番,能源需求将比2010年高出30%。工业文明发展至今,不但面临着石油、天然气以及煤炭等不可再生能源的资源危机(《BP世界能源统计年鉴2014》指出,截至2013年底,世界石油探明储量只能满足53.3年的全球生产需求,天然气是55年,而煤炭也只有113年),而且,以高排放碳氢化石燃料为主的能源消费结构,也引发了环境污染、气候变暖等一系列问题。为此,我们需要思考什么样的能源及能源结构可以满足未来的经济增长和更大人口基数下的能源需求,并逐步解决已经存在的能源、水和食物匮乏等各种危机和大气污染、气候变暖等环境问题。

开发利用可被消费者和社会接受的储量丰富的能源新资源是全球面临的共同挑战。在寻求能源新资源方面,各国进行了大量的尝试,普遍聚焦于可再生能源,包括太阳能、水能、风能和生物能等。其中,通过合适的技术把存储在生物质中的太阳能转化为可直接利用的生物燃料将是解决能源现有困境的一种重要的绿色能源方案,目前已达到了前所未有的热度。生物燃料资源量丰富(源自太阳)、可获取(已有成熟技术,先进转化技术也进入示范阶段,同时前沿技术正在开发)、可接受(属于清洁燃料,价格越来越有竞争力),符合全球正在寻求的能源新资源的基本要素条件。相信通过应用创新和先进技术,生物质所储藏的永不衰竭能源终将被广泛利用,并能突围能源现有困局,尤其是在增加能源供应、保障能源安全和保护生态环境等方面发挥作用,这样,有助于全球经济发展与环境保护的协调同步,实现每个人寻求更高生活标准的愿景。

本书对不同技术水平的生物燃料以及不同能源形态的生物燃料的发展做了详细介绍,旨在为广大读者系统、深入地介绍全球生物燃料产业状况和技术开发进展情况等。内容丰富、信息量大、思路新颖、条理清晰、结构严谨、通俗易懂、文献引用全面以及数据资料新是本书的主要特点,同时,本书紧跟国内外生物燃料产业发展的步伐,紧密联系不同生物燃料发展的瓶颈技术及前沿技术的开发。

本书分为5章。绪论部分重点介绍全球能源需求、化石能源隐忧、寻找能

源新资源及生物燃料替代化石能源的优势。第2章是“第一代生物燃料——多元化发展”，介绍国内外第一代生物燃料的产业进展，并以燃料乙醇、生物柴油为重点，阐述固体生物燃料、液体生物燃料和气体生物燃料的发展概况，例如秸秆直燃发电、成型燃料和沼气等。第3章介绍了以纤维素乙醇、生物质气化/热解合成汽柴油(BTL)为代表的第二代生物燃料——植物纤维燃料，对生物质资源的供给、生物转化和热化学转化两大技术路径的加工工艺、核心技术问题以及国内外中试研究进展进行了详细阐述。第4章是“第三代生物燃料——藻类能源”，全面介绍了藻类能源技术链的各个环节，包括上游工艺的藻类生物学与藻类培养，下游工艺的藻类收获、脱水、干燥、产物提取、藻类能源转化技术和副产品开发等。第5章是“质疑和展望”，对国内外质疑和批评生物燃料威胁粮食安全、生物燃料生产的能效为负和生物燃料不能减排温室气体等主要问题进行澄清，最后展望国内生物燃料的发展，提出以液体生物燃料为主导，推进第二、第三代生物燃料技术的开发与产业化。

本书内容涉及能源工程、化学工程、生物化工、工业生物技术、林产化工和农业工程等领域，可供能源企业的科研人员、工程技术人员和经营管理人员参阅，也可作为高等院校相关专业师生的参考用书。对初涉生物燃料领域的本科生、研究生，本书提供了概括性介绍，同时，本书可为能源企业的科研及工程技术人员提供研究思路与方向，也为希望认识生物燃料的其他领域的人员提供一种有效途径。

由于科学技术发展日新月异，加之编者水平和编写时间有限，书中难免有疏漏和不当之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2015年6月

目 录

1 绪论——从化石能源到生物燃料	(1)
1.1 增长中的能源需求	(2)
1.2 化石能源的隐忧	(4)
1.3 寻找能源新资源	(7)
1.4 绿色生物燃料	(8)
2 第一代生物燃料——多元化发展	(11)
2.1 固体生物燃料	(12)
2.2 液体生物燃料	(25)
2.3 气体生物燃料	(54)
3 第二代生物燃料——植物纤维燃料	(64)
3.1 植物纤维原料	(64)
3.2 植物纤维燃料	(66)
4 第三代生物燃料——藻类能源	(99)
4.1 藻类	(101)
4.2 藻类能源	(103)
5 质疑和展望	(141)
5.1 质疑与澄清	(142)
5.2 思考与展望	(151)
5.3 结束语	(159)

1 绪论——从化石能源到生物燃料

“能源不够了,怎么办?”还有绿色生物燃料。

从古人“钻木取火”起,生物质就是人类的主要燃料,时间跨度长达数十万年,其间,人类采用最简单、应用最广泛的转换方式——直接燃烧,来获取生物质中储存的能量。伴随着科技进步,人类对生物质有了新的认识。

现代社会中,能源已经渗透进每个人的生活(图 1-1)。



图 1-1 能源的各种应用形式^[1]

从汽车到手机,从药物到塑料,从空调到热水等,能源已成为我们生活的一部分,而且比以往任何时候都更加重要。但是,能源应用带来的方便及好处远远不止我们在家庭中、工作中以及路上单独使用时所享受到的这些。一系列基本的社会活动,包括农业、制造业、建筑业、医疗卫生及公共服务等都有赖于现代能源的稳定供给。

此外,倘若没有石油和天然气生产塑料、化工品和化肥等,那么许多我们熟悉的现代生活元素也将不复存在。

1.1 增长中的能源需求

人口和经济的增长驱动了能源需求的增长。

2011年10月31日凌晨,在媒体聚光灯的环绕下,全球第70亿人口——丹妮卡·卡马乔在菲律宾首都马尼拉诞生(图1-2)。70亿的概念是,我们每一个人所想得到的一切乘以70亿倍。在全球能源供给不稳定、粮食安全存在隐忧、环境污染严峻的今天,每一个新生命的诞生意味着需要向地球索取更多食物、更多淡水和更多能源,等等。

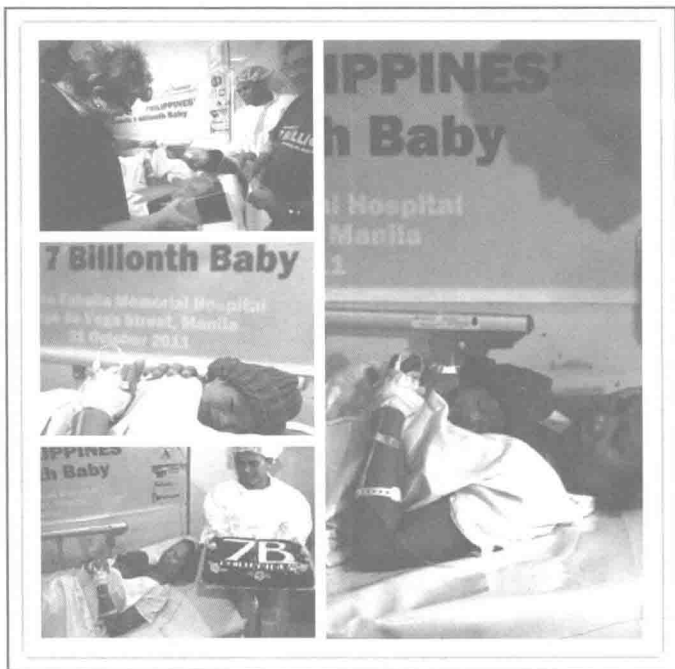


图 1-2 全球第 70 亿人丹妮卡·卡马乔在菲律宾诞生

70 亿人的基本需求,对人类来说已是巨大的挑战,然而世界人口还在继续增加。联合国人口基金《2011 年世界人口状况报告》指出,尽管全球生育率不断下降,但每年新增人口仍达 8000 万左右,相当于德国或埃塞俄比亚的人口数量^[2]。

能源是贯穿 70 亿人口衣、食、住、行的主线,与经济增长、生态环境保护紧密相关。维持现有经济发展水平和大力发展经济都需要充足的能源供给作保障。全球发展中国家仍有几十亿人在努力争取发展的权利和空间,同时越来越多的人正享受着现代生活带来的便利——他们购买了一生中的第一台冰箱、第一台电脑或第一辆汽车。现代化、城市化趋势带来的结果显而易见——能源需求增长,而且将持续数十年。2013 年全球一次能源消费总量达到 12730.4 百万吨油当量,较 2012 年增长 2.3%(表 1-1)。能源消费量净增长的 80%来自新兴经济体,其中中国对全球能源消费净增量贡献最大^[3]。

表 1-1 全球能源消费量^[3]

年份	消费量/百万吨油当量
2003	9943.8
2004	10428.2
2005	10714.4
2006	11020.8
2007	11319.5
2008	11466.2
2009	11325.9
2010	11955.6
2011	12231.5
2012	12483.2
2013	12730.4

而埃克森美孚公司的《2040 年能源展望报告》指出,世界能源需求仍将继续增长。2040 年全球人口数量将从现在的 70 亿增长到接近 90 亿,经济产出将翻番,能源需求将比 2010 年高出 30%。经济合作与发展组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)国家的能源需求将保持相对稳定,但是中国和其他非经济合作与发展组织(Non OECD)国家将引领全球能源需求增长。2010—2040 年,非经济合作与发展组织国家的能源需求预计将增长近 60%^[4]。

此外,伴随人口的快速增长和生活水平的提高,食物消费将更多,这就需要更多的淡水来生产食物。满足全球对于水和食物的需求,是全球能源需求增长的又一因素。水的加工、运输、淡化和回收利用都需要消耗大量的能源。现代农业技术是能源和淡水密集型技术,需要使用大量的化肥,而化肥又来自化石燃料。另外,生产化石能源同样需要水——钻井、洗井和加工原油时都需要用水。因此,能源、水和食物生产之间有着密切的联系。未来全球实现可持续发展时,必须以更全面的眼光看待这种关系,因为将有更多的国家面临水资源供给的巨大压力。如何生产能源,或者选择种植和吃什么食物,都应考虑是否有充足的水资源,以及水资源的获取成本有多高。同时,还需要节约用水——这将有助于高效管理能源需求,降低能源消耗及二氧化碳排放量。

1.2 化石能源的隐忧

工业文明发展至今,不仅面临能源需求持续增长带来的能源资源危机,而且还面临着以高排放碳氢化石燃料为主的能源消费结构所引发的环境污染、气候变暖等问题。《BP 世界能源统计年鉴 2014》指出,2013 年化石燃料在全球能源消费中的份额高达 87%。截至 2012 年年底,世界石油探明储量约为 1.6879 万亿桶,可满足 53.3 年的全球生产需求;全球天然气探明储量 185.7 万亿立方米,可保证 55.1 年的全球生产需求;世界煤炭探明储量能满足 113 年的全球生产需求,是目前为止化石燃料中储产比最高的燃料(图 1-3)。^[3]从 BP 公司发布

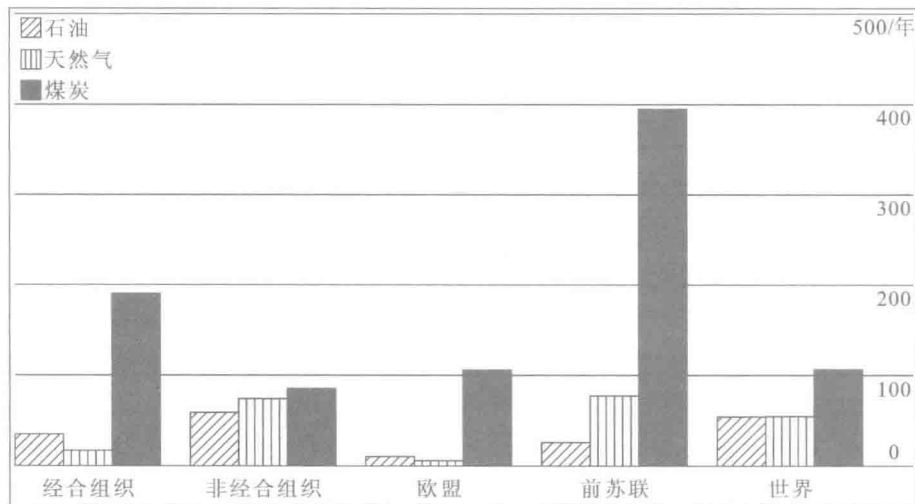


图 1-3 全球化石燃料的储产比^[3]

的数据看,尽管世界油气资源供应并不存在结构性短缺,但实际上能源供给存在很多不确定的因素。由全球政治经济不稳定所引起的各种危机很可能导致能源供应紧张甚至中断,同时化石能源漫长的开发时间及某些地区以各种形式存在的勘探开发限制仍在形成挑战和阻碍,使得难以用合理价格去供应能源,满足不断增长的能源需求。

化石能源的大量消耗,令全球的二氧化碳及其他温室气体排放总量逐年增加,并远超地球的容纳能力,致使大气中温室气体的浓度持续攀升,温室效应日益明显。自工业化时代以来,人类活动已引起全球温室气体排放量增加,其中1970—2004年期间增加了70%(图1-4)。2005年大气中的 CO_2 和 CH_4 的浓度远远超过了过去65万年的自然变化的范围。气候系统变暖是毋庸置疑的,从全球平均气温和海温升高、大范围积雪和冰融化以及全球平均海平面上升的观测中可以看出这一变化是明显的(图1-5)。

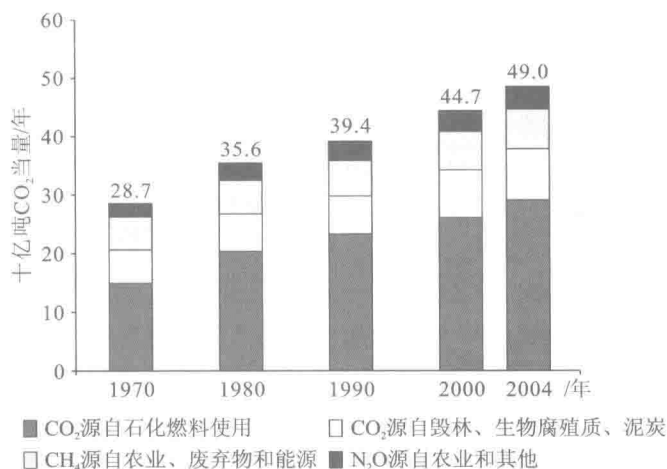


图 1-4 全球人为温室气体年排放量^[4]

然而,目前气候变暖并未得到有效控制,全球与能源使用有关的二氧化碳排放总量还在增长,顶峰有望在2030年前后出现,之后2030—2040年基本稳定,排放总量维持在350亿吨/年左右(图1-6)。其中,到2040年非经济合作与发展组织国家的二氧化碳排放总量占全球排放总量的70%以上,而这一比例在2010年是60%^[1]。

大量化石燃料使用所引发的问题越来越明显、越来越集中,而全球经济还需发展,新兴经济体的现代化仍需进行。为此,我们需要思考什么样的能源及能源结构可以满足未来的经济增长和更大人口基数下的能源需求,并逐步解决已经存在的各种危机(能源、水和食物的缺乏等)和环境问题(大气污染、气候变暖等)。

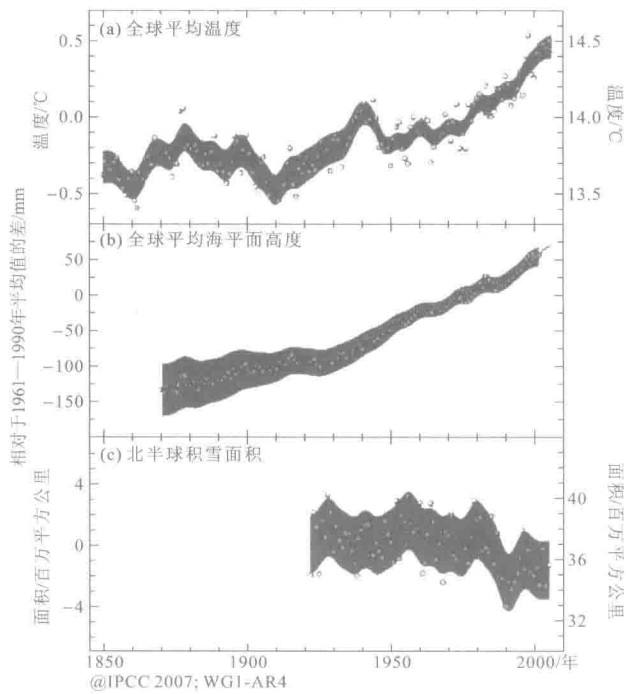


图 1-5 全球温度、海平面和北半球积雪变化^[4]

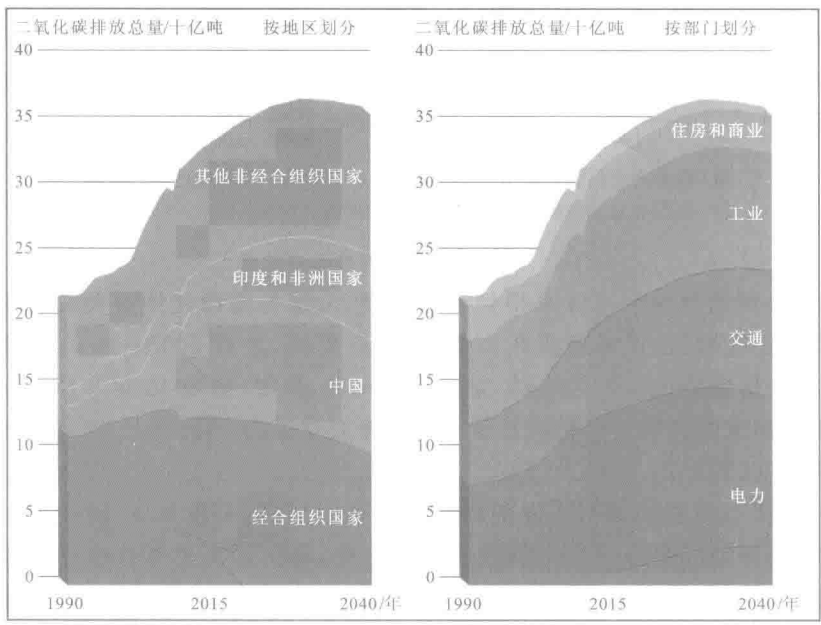


图 1-6 与能源使用相关的全球二氧化碳排放总量预测^[4]

1.3 寻找能源新资源

现今,全球发展过程中面临的复杂经济形势、人口增长、二氧化碳排放控制、水和食物供给安全等问题,都将取决于企业、政府和消费者是否有能力构建安全、可持续的能源体系。所谓“安全”,主要指由人口增长和经济发展带来的能源需求持续增加能得到满足,而“可持续”则是能源的获取和使用能与生态环境和谐共处。能源消耗时时刻刻进行着,能源问题已经深深触动每个人的神经。为此,我们不仅需要找到储量丰富的能源新资源,还必须开发相应的技术进行开采利用,并且确保采取的方法能够被消费者和社会所接受。

在寻求能源新资源方面,各国进行了大量尝试,普遍聚焦在可再生能源身上,包括太阳能、水能、风能和生物能等。但无论是太阳能和风能,还是水能和生物能,它们都是太阳辐射能的直接或间接转化形式,其根本来自太阳。太阳时刻发生氢聚变成氦的核聚变反应(图 1-7),其释放的能量以电磁波辐射形式扩散。进入地球表面的太阳辐射能,以大气、水和专用设施为载体转化为动能、势能、热能和电能等物理态形式运行,但是没有储存和再转化的载体和机制。直到地球出现绿色植物以后,植物通过叶绿体的光合作用将太阳辐射能转化为化学能,并以生物质的形式储存下来(图 1-8)。千千万万年来植物光合作用形成的生物质,经地质作用转化为煤炭、石油和天然气。绿色植物作为地球上唯一能捕获、转化、储存和再转化太阳辐射能的载体,同时也是化石能源(石油、天然气、煤炭等)和生物质能源之源。

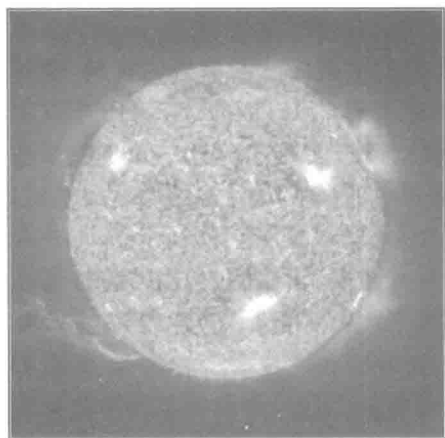


图 1-7 太阳燃烧发光发热

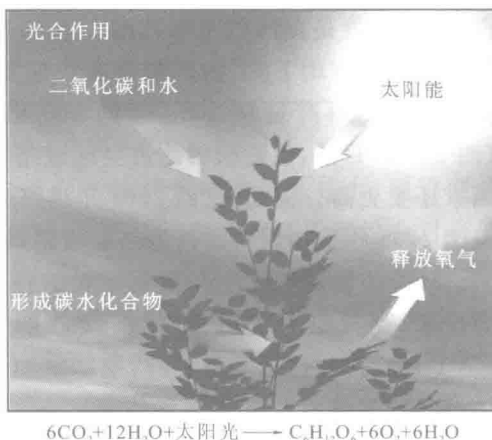


图 1-8 植物光合作用

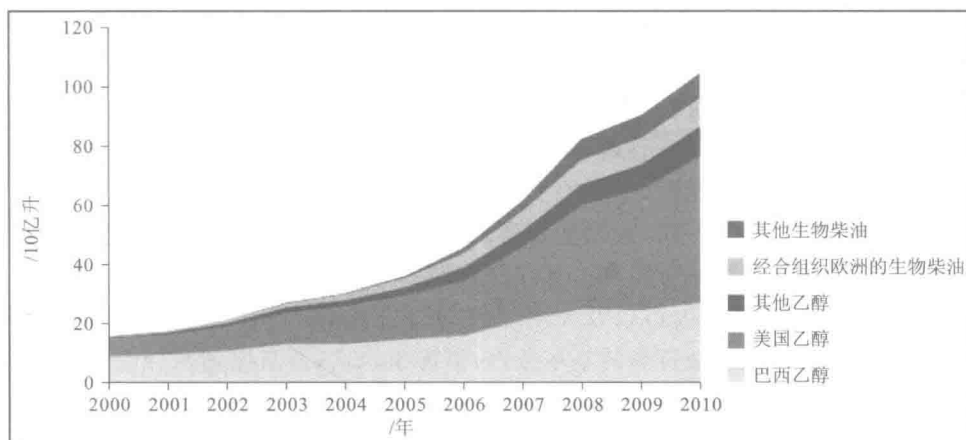
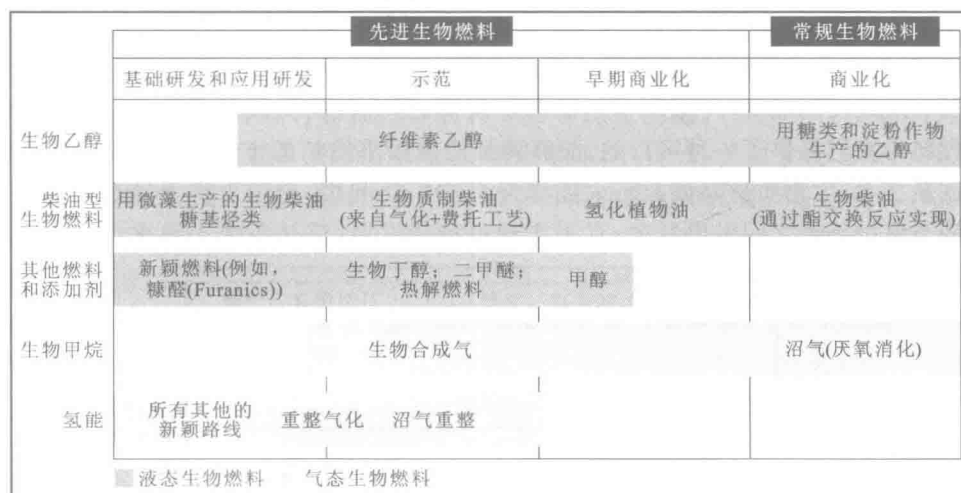
尽管太阳已发光放热 40 多亿年,但科学研究估计,太阳仍将燃烧几十亿年。太阳每小时送达地球的辐射能满足全人类一年的能源消费需求,因而太阳是人类取之不尽、用之不竭的能源宝库。生物质作为太阳辐射能的转化储存形式,只要太阳还燃烧,地球仍存在并适合居住,就可年年再生。正如唐朝诗人白居易的五言律诗《草》所描述的:“离离原上草,一岁一枯荣,野火烧不尽,春风吹又生。”地球上的植物通过光合作用每年产生的生物质高达 1400 亿~1800 亿吨(干重),这是一笔极为丰富的能源资源,其拥有的能量,远远超过全世界每年的能源消费总量,但可惜目前人类对生物质资源的利用量只有区区 60 亿吨,仅占总量的 3.5%^[5]。因此,通过合适的技术把存储在生物质中的太阳能转化为可直接利用的生物燃料,将是解决现有能源困境的一种亟待推进实施的重要能源方案。

1.4 绿色生物燃料

生物燃料与人类文明史同步,是人类利用已久的能源。

从古人“钻木取火”起,生物质就是人类的主要燃料,时间跨度长达数十万年,其间,人类采用最简单、应用最广泛的转换方式——直接燃烧,来获取生物质中储存的能量。伴随着科技进步,人类对生物质有了新的认识。虽然人类从 19 世纪开始尝试利用生物质制取液体燃料,但直到 20 世纪 40 年代,生物液体燃料才被认为是可行的交通运输燃料,而石油等化石燃料的价格优势却阻止生物液体燃料的进一步发展。机遇出现在 20 世纪 70 年代,两次石油危机的爆发,促使各国反思和调整能源战略,于是生物燃料的发展潮兴起,先是巴西的甘蔗乙醇,接着是美国的玉米乙醇。进入 21 世纪,在气候变暖、能源安全等多重因素的交织推动下,生物燃料进入快速发展期。根据国际能源署的资料,全球液体生物燃料产量从 2000 年的 160 亿升增加到 2010 年的 1000 亿升以上(图 1-9)。目前,生物燃料约占全球道路运输燃料总量的 3%,这一比例在某些国家还要更高。例如,巴西 2008 年道路运输燃料的 21%是由生物燃料提供的,美国 2008 年生物燃料占其道路运输燃料的 4%^[6]。

现今生物质转化生产生物燃料的技术种类繁多,从成熟的淀粉基/糖基乙醇技术,到发展示范中的纤维素乙醇技术,以及前沿的藻类能源技术等(图 1-10),产品包括燃料乙醇、生物柴油、生物甲烷和颗粒成型燃料等,涵盖固体、液体、气体以及电等多种能源形态。与风能、太阳能、水能等可再生能源相比,生物质最大的亮点是可以生产液体生物燃料,这也是目前生物燃料中发展最快、比重最大的能源形态,包括燃料乙醇和生物柴油。液体生物燃料的大发展与各国调整过分依赖石油的能源结构和强化能源安全等密切相关。

图 1-9 全球液体生物燃料生产状况^[6]图 1-10 主要生物燃料技术的商业化发展状况^[6]

石油是现代交通运输业的“血液”，然而石油开采难度越来越大，更重要的是石油资源有限，并终将枯竭。但是人口和经济增长驱动着交通运输业对石油的需求继续上升。埃克森美孚公司预计，交通是能源需求增长第二快的领域，仅次于发电。到2040年，全球对石油和其他液体燃料的需求将增长近30%，增长的很大部分都将与交通相关。因此，深海、油砂、致密油、天然气液体和生物燃料的供应比例将增长，以满足对液体燃料的需求。^[1]

液体生物燃料提供了一种向低碳、清洁环保和非石油燃料过渡的方式，对石油的替代具有优势。液体生物燃料的使用通常只需简单改动，甚至不改变现有车辆和配送基础设施，而效果却是显著的，既减少了对石油的依赖，进而增强

能源安全,又减排二氧化碳,同时还降低汽车尾气污染。以美国为例,2013年美国玉米乙醇已具消费规模,并且为美国减排了3790万吨 CO_2 ,相当于790万辆汽车一年的 CO_2 排放量。^[7]另外,生物燃料给农村地区创造了新的收入来源,并支持了农村经济的发展。因此对严重依赖石油的现代交通运输业来讲,液体生物燃料是优质的备选能源。

世界各国的国情不同,发展生物燃料的侧重点也有所不同。但相同的是,发展生物燃料的初衷——能源安全、保护环境、发展经济,也即是各种生物燃料良好的社会效益、环境效益以及经济效益得到认可。换句话说,生物燃料符合全球正在寻求的能源新资源的基本条件:资源量丰富(源自太阳)、可获取(已有成熟技术,先进转化技术进入示范阶段,前沿技术在开发)和可接受(属于清洁能源,价格越来越有竞争力)。

对可靠且承担得起的能源需求分分秒秒不停歇。

全球超过70亿人口,每天都在使用现代能源让自己的生活更富足,更富有成效,更安全和更健康,这就是能源需求增长的最大驱动力。因此,我们需要更加有效地使用能源,并不断寻求能源新资源,努力转向低碳可再生燃料。生物燃料为我们提供了一种可行的、能够满足能源需求增长的方案。相信通过应用创新技术,生物质所储藏的巨大能源终将被广泛利用,全球也将无须在发展经济与保护环境之间做出取舍,真正实现可持续发展,满足每个人寻求更高生活标准的愿景,以促进人类进步。

“能源不够了,怎么办?”还有绿色生物燃料。

参考文献和资料

- [1] 美国埃克森美孚公司. The Outlook for Energy: A View to 2040, 2012.
- [2] 联合国人口基金. 2011年世界人口状况报告, 2011.
- [3] 英国石油公司. BP世界能源统计年鉴, 2014.
- [4] 联合国政府间气候变化专门委员会. 气候变化2007:综合报告, 2008.
- [5] 曹湘洪. 积极培育生物燃料产业减少对石油的过度依赖. 中国工程科学, 2011, 13(2): 4-12.
- [6] 国际能源署. 交通用生物燃料技术路线图, 2012.
- [7] 美国可再生燃料协会. 2014 Ethanol Industry Outlook, 2014.

2 第一代生物燃料——多元化发展

现阶段全球生物燃料中主要是第一代生物燃料在起主导作用。相比于先进的植物纤维燃料和藻类燃料,第一代生物燃料技术成熟,能源形态多样化,包括固体燃料、液体燃料以及气体燃料等多种优质能源。

现阶段全球生物燃料中主要是第一代生物燃料在起主导作用。相比先进的植物纤维燃料和藻类燃料,第一代生物燃料技术成熟,能源形态多样化,包括电力、固体燃料、液体燃料以及气体燃料等多种优质能源。在第一代生物燃料的选择和发展上,世界各国国情不同,侧重点也不同,比如,美国重视玉米乙醇,巴西选择甘蔗乙醇,德国推崇生物柴油。2013 年世界生物燃料产量达到 6534.8 万吨油当量(图 2-1),相比 2012 年增长了 6.1%。这主要是由于北美洲、中南美

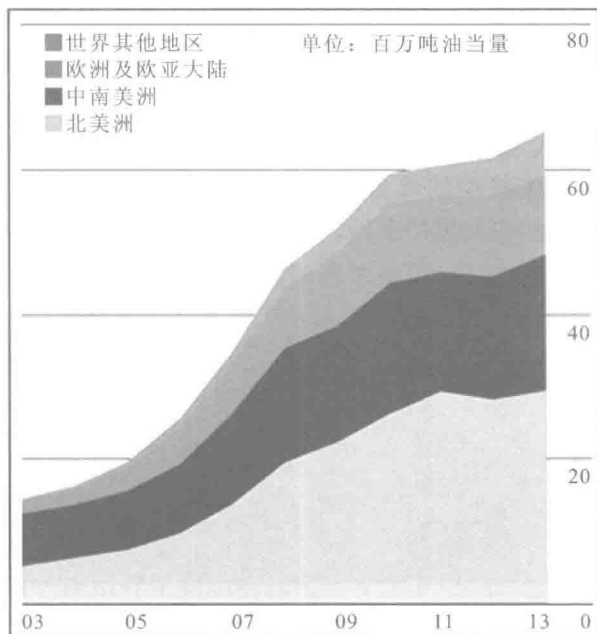


图 2-1 世界 2013 年生物燃料产量^[1]