

· 新能源丛书 ·

生物能源

——阳光与大地的恩赐

Bioenergy — A Treasure from
the Sun and the Earth

肖 钢 纪钦洪 © 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

· 新能源丛书 ·

生物能源

——阳光与大地的恩赐

Bioenergy — A Treasure from
the Sun and the Earth

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

生物能源——阳光与大地的恩赐/肖钢,纪钦洪编著. —武汉:武汉大学出版社,2013.3

新能源丛书

ISBN 978-7-307-10591-1

I. 生… II. ①肖… ②纪… III. 生物能源 IV. TK6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 056306 号

责任编辑:蔡巍 孙丽

责任校对:刘小娟

装帧设计:吴极

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.wdp.com.cn)

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:188千字

版次:2013年3月第1版 2013年3月第1次印刷

ISBN 978-7-307-10591-1/TK·4 定价:55.00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。

◎ 丛 书 序

“能源”，并不总是人们茶余饭后津津乐道的话题。说起“能源”，不少人会想到石油和国内三大石油公司的强大，还会联想到环境污染和全球气候变暖，但很少有人会想到“能源”本身，以及自己与“能源”的关系。然而，穷人类历史之长，尽人类足迹之远，仰人类文明之高，“能源”可谓与我们的生活息息相关，休戚与共，我们时时、处处都在利用它、依赖它。也正因为如此，“能源”反而更易被人们忽略，就像直到窒息时才想起原来我们是多么地依赖空气一样。日常生活中，我们不可避免使用能源，但很难挑选使用何种能源，无法影响或决定能源的来源、生产方式和价格，更无法通晓纷繁芜杂的能源技术及其发展方向。

时至今日，改变正在发生。随着资源、环境和气候问题的凸显，全球正在一步步迈入新一轮的能源变革，陈旧的能源开采、转化、利用方式正被逐渐淘汰，而新能源事业正悄然兴起，新资源、新技术、新理念层出不穷，一个崭新的时代即将到来，届时人与能源的关系都将发生改变。对于老百姓，不再是被动地接受能源，而是积极地创造，主动地分享，智能地消费。在中国，大多数人可能还无法想象很多丹麦人已经可以轻松通过电脑软件，随时选择并任意切换不同来源、不同价格的电力供应；更无法想象不少西班牙人每天都会关注全国各地的天气预报，来估算自己在不同地方买下部分股权的太阳能电池能发多少电，并给自己带来多少利润；而美国人已经考虑在自己的车库里安装电网连接设备，用低谷电价给自己的电动汽车充电，并在用电高峰时送电上网，赚取差价……

能源问题，是全球性问题，中国亦不可避免。从某种意义上来说，经济高速增长的中国存在着更为突出的能源问题，而中国人并非后知后觉，也不会熟视无睹。几百年的落后使国人自省，30多年的改革让国人自信，对变革的必要性我们有着清醒的认知，但使我们困惑和迷茫的是怎样付诸实践，向哪些国家学习，优先发展何种能源，以怎样的力度发展，达到怎样的效果，以及能否在改革中保持和谐稳定。

曾经听过一则寓言：一只青蛙遇到了一条蜈蚣，青蛙自忖自己有四条腿，

跳跃自如，而蜈蚣却有无数条腿，竟也行走流畅。青蛙觉得很奇怪，便问蜈蚣道：“你有这么多条腿，那你行走时都是先迈哪条腿呢？”蜈蚣听了青蛙的问话，不由地思考了起来。不料，蜈蚣一思考，竟从此不会走路了。原来蜈蚣从不曾执着于这个问题，只是目视前方，一心向前，自然而然就朝前走了。自从考虑先迈哪条腿后，它忘记了向前看，只盯着自己的脚，结果无数条腿互相磕绊，从此再也迈不开步子了。我想，蜈蚣不久就会明白：孰先孰后并不重要，重要的是认准方向，明确目标，一心向前。中国的能源改革同样如此，我们百般纠结于眼前的主次和先后之时，是否已经找到并确定了改革的正确方向和终极目标呢？

此套丛书介绍的是高效的能源转化技术、方兴未艾的非常规能源勘探开发技术、梯级利用的节能技术和绿色低碳的可再生能源技术。编者旨在通过此套丛书来唤起更多人对我国能源问题的思考，提升同仁们对未来能源事业的参与度和积极性。

十方来，十方去，共成十方事；万人施，万人用，同结万人缘。我诚望书中的一些知识能对有缘的读者提供小小的启发，并在此恭候各位的批评指正。



◎ 序 言 (一)

(翻译稿)

能源是人类发展过程中最重要的因素，是发展的主要资源，对人类的衣、食、住、行等方面具有决定性的影响。同时，新能源对当今世界的重要性正在得到人们的普遍认同。作为世界工业催化行业的领军企业，哈尔杜·托普索公司也认为我们的世界正面临一个清晰而紧迫的需求——能源的新型、清洁和高效的利用方式。

我已经100岁了，比肖钢博士年长48岁，我们是难得的忘年交。大约20年前，年轻的肖钢博士在托普索公司开始他的职业生涯时，托普索家族就了解他并彼此成为好朋友了。从一开始结识他，他的才干以及他对多学科知识的驾驭能力便给我留下了深刻印象。我非常享受与他见面的时光，与他的每一次见面都是一个让我了解更多能源系统与大千世界的绝妙机会。时光飞逝，现在肖钢博士已经成长为一名世界级的领军科学家。他的科学技术知识面十分宽广，横跨无机化学、有机化学、电化学、物理化学和地球科学。他的热情、做事时的巨大激情以及他独特的人格魅力让人印象深刻。肖钢博士是英国皇家化学会院士，这是化学界一个殊胜的头衔，我为有这样年轻而优秀的朋友感到自豪。

肖钢博士近日告诉我他正在为中国读者编写一套“新能源丛书”。我非常高兴能为这套丛书作序，并借此机会向所有对新能源的进步感兴趣的同仁推荐肖钢博士的作品。

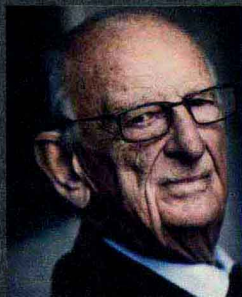
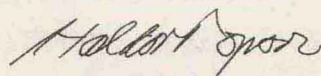
哈尔杜·托普索

托普索先生序言原稿

Energy is the most significant factor in human growth since it is the main resource for development and it determines food, transport, industry, housing and so on. At the same time, it is widely recognized that new energy is an area of increasing importance to our world. As one of the leading companies in the catalysis industry, Haldor Topsoe company fully shares the view that this world has a clear and compelling need to use our energy resources in new, clean and efficient ways.

I am now 100 years old. With an age difference of 48 years, I have enjoyed a friendship with Dr. Gang Xiao between generations. The Topsoe family has known Dr. Gang Xiao for 20 years, since he as a young man began his career with the company many years ago. Right from the beginning I was impressed by his talents and multidiscipline approach and I have always enjoyed his presence, and every time we are together I use the opportunity to learn more about energy systems and the wider world. Since our early encounters Dr. Xiao has developed into a world leading scientist with active knowledge across a broad spectrum of science and technology, including inorganic and organic chemistry, electrochemistry, physical chemistry, and geosciences. His enthusiasm, tremendous passion, and his unique appealing personality have always impressed me very much. Dr. Gang Xiao is a Fellow of the Royal Society of Chemistry (UK). This is a distinguished title in the chemistry world. I feel honored to have such a young and outstanding friend.

Dr. Gang Xiao recently told me that he is writing a set of books on new energy technologies to the Chinese readers. I am delighted to recommend Dr. Gang Xiao's books to all those interested in the progress and possibilities in the field of new energy.



哈尔杜·托普索先生简介

哈尔杜·托普索，1936年毕业于丹麦技术大学（DTU），1940年创立哈尔杜·托普索公司。公司成立70多年来，一直秉持着只有通过应用基础研究才能建立和保持独一无二的催化市场地位的理念，是世界工业催化领域家喻户晓的领军企业。由于成绩斐然，对社会的贡献巨大，哈尔杜·托普索先生曾被授予诸多国际荣誉，包括丹麦皇室授予的皇家大爵士勋章。

◎ 序 言（二）

当前，人类活动同自然界之间的相互影响进一步加深。面对全球温室气体排放及其引发的气候变化，有效促进资源可持续利用、环境可持续发展，努力实现人与自然的和谐，已经成为一个世界性的重大课题。这就需要我们开辟更多的途径，找到更好的办法，而优化能源结构、提高能源转化和使用效率尤其重要。

纵观当今世界，“绿色”不再是业余消遣，不再是流行口号，而是逐渐真正成为发展、建造、设计、制造、工作及生活的方式。当把环境保护等所有的成本都纳入进来时，包括非常规油气在内的新能源变成了最时尚、最有效率、成本最低的做事方式，这是世界正在经历的最伟大的转变。绿色从只是流行变得更加可用，从一种选择变成了一种必需，从一种时尚变成了必胜的战略选择，从一个无法解决的问题变成了一个巨大的机遇。

我们有理由深信：发展清洁的新能源和高效能源技术将会变成决定未来50年国家经济地位、环境健康、能源安全及国家安全的战略选择。这场清洁技术革命关系到国家强大与否。今天，我们为了走上绿色道路所做的每一件事都会使我们国家更强大、更健康、更安全、更具创新力、更有竞争力、更能受到尊重。我们在解决自身问题的同时也在帮助全世界解决问题。

从本质上来说，科技决定未来能源。在替代能源发展过程中，到底哪一种能源应该占主导地位，各种新能源应该如何布局，应该由技术论证、环境评测和市场验证来决定。对于这点，科技界提出了林林总总的方案，有些具备了产业化的条件，有些正在开发，有些处于研究阶段，还有些则属于大胆的设置。这些人类的大课题涵盖了很多的学科领域、很广的技术专业、很深的知识层面及很大的行业范围，因此很少有人以通俗易懂的方式将这些技术情况系统地展现给读者。

恰逢此时，我很高兴看到肖钢博士及其合作者正在编写一套“新能源丛书”，该丛书系统地介绍了高效能源转化技术、非常规天然气技术及可再生能源技术等诸多方面的最新进展，这对科研人员掌握国际上新能源发展现状大有裨益，也为希望了解新能源技术概况的人士提供了有用的信息。

肖钢博士是国家引进的海外高级人才，在能源领域成果丰硕。他已经出版了数本学术专著，希望他主持的这套“新能源丛书”也会受到读者喜爱。

中国工程院院士 曾恒一



曾恒一院士简介

曾恒一，海洋石油工程专家，中国工程院院士。主持设计、建造我国第一代海上石油钻探船、海上石油平台导管架下水大型驳船、海上浮式生产储油轮等。主持国家“863”工程的“海洋边际油气田资源开发技术”项目研究并组织编制了海上油气田总体开发方案。主持完成的科研成果“渤海五号、七号自升式钻井船”获国家科技进步二等奖。

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 2012》指出,截至 2011 年底,世界石油探明储量只能满足 54 年的全球生产需求,天然气是 64 年,而煤炭也只有 112 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

2012年12月

目 录

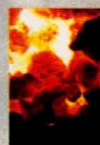
1 绪论——从化石能源到生物燃料	1
1.1 增长中的能源需求	4
1.2 化石能源的隐忧	6
1.3 寻找能源新资源	9
1.4 绿色生物燃料	11
参考文献和资料	14
2 第一代生物燃料——多元化发展	15
2.1 固体生物燃料	18
2.1.1 生物质直燃发电	18
2.1.2 成型燃料	24
2.2 液体生物燃料	30
2.2.1 燃料乙醇	31
2.2.2 生物柴油	51
2.3 气体生物燃料	59
2.3.1 概况	59
2.3.2 应用推广	62
参考文献和资料	67
3 第二代生物燃料——植物纤维燃料	69
3.1 植物纤维原料	71
3.2 植物纤维燃料	73
3.2.1 植物纤维原料供应	75
3.2.2 植物纤维原料加工转化	78
参考文献和资料	100
4 第三代生物燃料——藻类能源	103
4.1 藻类	106
4.2 藻类能源	109

4.2.1	藻类能源概况	109
4.2.2	藻类能源技术链	110
4.2.3	资源评价与选址	125
	参考文献和资料	129
5	质疑和展望	131
5.1	质疑与澄清	133
5.1.1	粮食安全问题	134
5.1.2	大于1还是小于1	136
5.1.3	增排还是减排	139
5.2	思考与展望	142
5.2.1	替代石油的选择	142
5.2.2	生物燃料的发展	144
5.2.3	对国内发展生物燃料的思考	146
5.3	结束语	150
	参考文献和资料	151

● 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)。

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。



▲ 图 1-1 能源的各种应用形式^[1]

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。

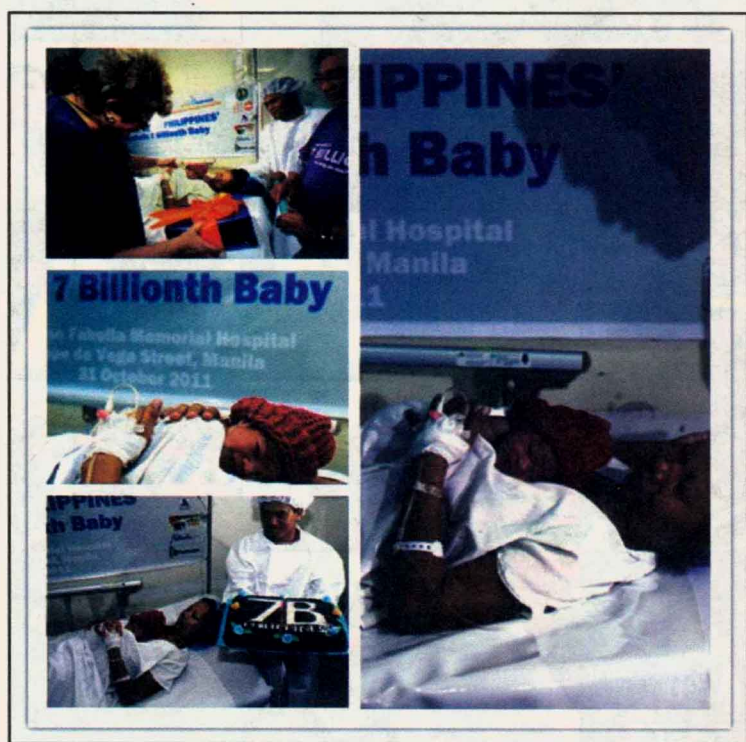


图 1-2 全球第 70 亿人丹妮卡·卡马乔在菲律宾诞生

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]。