

· 新能源丛书 ·

二氧化碳

——可持续发展的双刃剑

Carbon Dioxide — A Double-Edged Sword for
Sustainable Development

肖 钢 常 乐 © 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

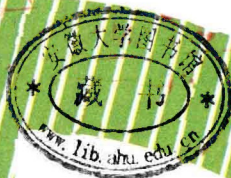
· 新能源丛书 ·

二氧化碳

——可持续发展的双刃剑

Carbon Dioxide — A Double-Edged Sword for
Sustainable Development

肖 钢 常 乐 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

二氧化碳——可持续发展的双刃剑/肖钢,常乐编著. —武汉:武汉大学出版社,2012. 11

新能源丛书

ISBN 978-7-307-10343-6

I. 二… II. ①肖… ②常… III. 二氧化碳—减量—排气—研究
IV. X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 289027 号

责任编辑:余 梦

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:9.5 字数:164 千字

版次:2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-10343-6/X · 34 定价:50.00 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地通过电脑软件，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。

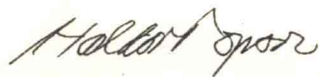
哈尔杜·托普索

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 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

以 CO_2 为代表的温室气体排放给人类社会的可持续发展带来负面影响,降低碳排放将是我国经济社会发展过程中面临的一场持久战,相应地,“低碳经济”一词也被社会各界广泛使用。“低碳经济”被认为是应对气候变化的必由之路,它是人类社会继原始文明、农业文明、工业文明之后的又一大进步,它既是发达国家经济转型的方向,也是发展中国家应遵循的可持续发展道路。

如何实现“低碳”,是一项复杂的系统问题,解决方法涉及政治、经济、法律、技术、人文等多个学科。从系统层次而言,碳减排途径可总结为两类:控制排放源头(通过提高能源系统各个环节的能源效率或引入低碳元素,以及降低终端能源需求,实现降低含碳能源的消耗和碳排放)和碳排放后处理(针对能源系统产生的碳排放,采取后处理方式延缓或阻止 CO_2 排入大气中,如 CO_2 资源化利用和 CO_2 封存技术等)。

“科学技术是第一生产力”。实现人类社会的 CO_2 减排,科学技术仍将发挥核心作用。鉴于此,本书作者力图展现给读者一个系统的、易懂的、最新的关于低碳技术及其应用的说明。低碳技术是一个多学科交叉的综合领域,涵盖物理、化学、机械、材料、化工、控制和环保等多个专业,本书特色在于语言浅显易懂、行文轻松明快,并结合大量图表来说明低碳技术的原理与应用,使不同学科背景的读者都有可能融会贯通,从而进入低碳技术的研究殿堂。

本书第 1 章阐述了 CO_2 减排与可持续发展之间的关系;第 2 章系统剖析了 CO_2 减排的实现途径;第 3 章介绍了 CO_2 的基本性质;第 4~7 章分别描述了 CO_2 捕捉分离技术、 CO_2 运输技术、 CO_2 的资源化利用技术(包括物理利用、化学利用和其他新型资源化利用技术)、 CO_2 封存技术(包括生态封存、地质封存、海洋封存、矿物封存等),内容涉及工艺原理、流程设备、技术特点和发展方向等维度。本书的独特之处还在于:行文并未停留在单项低碳技术环节,而是在第 8 章将内容扩展到完整的 CCUS 基础设施供应链,指出发展 CCUS 是一项复杂的系统工程,需要因时因地制宜、全生命周期优化。从而,本书实现了既有重点阐述对象,又不乏对系统全局的整体把握。

由于低碳技术的发展日新月异,随时都有进一步改进更新的可能,同时作者水平有限,书中难免有疏漏之处,诚望读者提出宝贵意见。如果读者通过本书的阅读能够得到些许收获,作者将感到不胜荣幸。

编 者
2012 年 11 月

目 录

1	CO ₂ 减排与可持续发展	1
1.1	温室气体、气候变化与可持续发展	3
1.2	我国 CO ₂ 排放基本情况	6
2	CO ₂ 减排的途径	9
2.1	控制 CO ₂ 排放源头	11
2.2	CO ₂ 排放后处理	12
3	CO ₂ 的基本性质	21
3.1	CO ₂ 的物理性质	23
3.2	CO ₂ 的化学性质	24
3.3	超临界 CO ₂ 的特性	25
4	CO ₂ 捕捉技术	29
4.1	概述	31
4.2	吸收法分离 CO ₂ 技术	33
4.3	吸附法分离 CO ₂ 技术	41
4.4	膜分离 CO ₂ 技术	43
4.5	深冷分离 CO ₂ 技术	45
4.6	不同 CO ₂ 分离技术的比较	45
4.7	CO ₂ 捕捉技术在我国发电领域的应用	47
5	CO ₂ 的运输	49
5.1	概述	51
5.2	CO ₂ 罐车运输	51
5.3	CO ₂ 船舶运输	52
5.4	CO ₂ 管道运输	53
6	CO ₂ 资源化利用	61
6.1	CO ₂ 物理利用技术	63

6.2	CO ₂ 化学利用技术	65
6.3	CO ₂ 其他利用技术	85
7	CO ₂ 的封存	95
7.1	概述	97
7.2	CO ₂ 生态封存	98
7.3	CO ₂ 地质封存	100
7.4	CO ₂ 海洋封存	117
7.5	CO ₂ 矿物封存	120
7.6	CO ₂ 置换天然气水合物	125
8	发展 CCUS 是一项复杂的系统工程	127
8.1	CCUS 技术供应链	129
8.2	CCUS 的发展	130
	参考文献	133

1 CO₂减排与可持续发展

温室气体的排放与气候变化、可持续发展关系密切，而我国在近期内CO₂年排放量仍将呈上升趋势，这意味着我国将面临很大的国际压力，因此，降低碳排放将是我国经济社会发展过程中面临的一场持久战。



1.1 温室气体、气候变化与可持续发展

对于过去半个世纪全球气候变化的原因,有多种不同的理解和争论。例如,有科学家认为全球变暖是地球气候循环的正常表现,有科学家认为是太阳耀斑等自然原因造成的。但是,绝大多数科学家认为全球气候变暖和人类活动密不可分,尤其是和人类活动造成的温室气体浓度升高有很大的相关性。

至于人类活动是如何对大气变暖产生影响的,科学家的解释也不尽一致。不过,绝大多数科学家都认为,因人类活动造成的大气中温室气体浓度上升,大地植被改变所引起的地球大气能量失衡是当前气温升高的罪魁祸首。尤其是人类大量利用化石能源所排放的 CO₂ 等温室气体及其所引发的温室效应加剧,是导致气温升高的主要原因。

气候变化已经对地球生态系统和人类社会造成了影响,并在未来继续影响地球和人类,至于影响的程度,则要看人类如何采取应对措施了。科学家普遍认为,越早采取措施来控制温室气体排放,地球面临的威胁和人类遭受的损失就会越小。

大气中 CO₂ 浓度的提高将导致海洋酸度增加。相对工业革命前,当前海洋的 pH 值已经下降了 0.1,如果 CO₂ 的排放不受控制,海洋表面 pH 值在未来 100 年内还会下降 0.14~0.35。因为温度的升高,绝大部分永久冻土都将解冻,永久积雪将会融化;北极和南极地区的海洋冰川将会融化,最严重的预测是北极地区的冰盖在夏季甚至会完全消失。由于海洋表面的温度升高,未来台风的强度和频率将会增加。随着风的模式、温度分布继续变化,高纬度地带的暴风雪将会向极地迁移,极端气候事件将更加频发。

气候变化将导致淡水资源的分布发生变化,从而使得其管理方式需要发生相应的变革。预计到 21 世纪中叶,高纬度地区降水量将增加 10%~40%,从而带来局部地区的涝灾;与此同时,部分目前受涝灾危害的中纬度和低纬度地区降水量将减少 10%~30%,从而可能面临旱灾的威胁。旱区面积可能增加,而同时一些突发事件导致的洪灾频发,危害增大。当前供给全世界 1/6 人口用水的冰川将会加速融化,从而威胁到这些地区人们的生活和生产。

粮食以及林业生产将面临一些新的挑战。在中高纬度,由于气温的上升,粮食作物将增产。但是在低纬度地区,很可能会减产,从而引发饥荒。从全球范围来看,如果21世纪中期全球平均气温上升 $1^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$,总的粮食产量会增产,如果超过这一数值,则有可能减产。而由于洪涝灾害和旱灾的发生频率增加,将对粮食生产产生负面影响,这在低纬度地区将更为明显。从全球角度来看,由于全球变暖,林木的生长速度会加快,但同时不同地区之间的差异也会加大,这将对当前林木生产和贸易带来新的挑战。

气候变化同样将对工业、居民和社会产生影响。最容易受影响的是沿海地区和河流冲积平原地区,这些地区的经济和社会发展最容易受到影响,尤其是当城市化进程迅速发生的时候。贫困地区最容易受到伤害,因为这些地区缺乏应对气候变化的能力和资源,且更加依赖那些易受气候变化影响的资源。

气候变化还将对海岸系统产生巨大影响。由于受到气温上升、海平面上升以及人类活动的影响,海岸线将受到严重侵蚀。但是包括沿海湿地和红树林等的沿海地貌以及生态系统不会受到负面影响,反而会有一定程度的增长。到2080年,每年将有数百万的沿海居民受到洪灾的威胁,沿海地区人口密集、海平面低,应对气候变化的能力较弱,且同时还还将受到台风和土地被大海吞噬等因素的威胁。这种威胁对于亚洲和非洲的河流三角洲地区,尤其是海岛地区影响最为显著。由于适应能力不足,发展中国家比发达国家更容易受到海岸侵蚀的威胁。

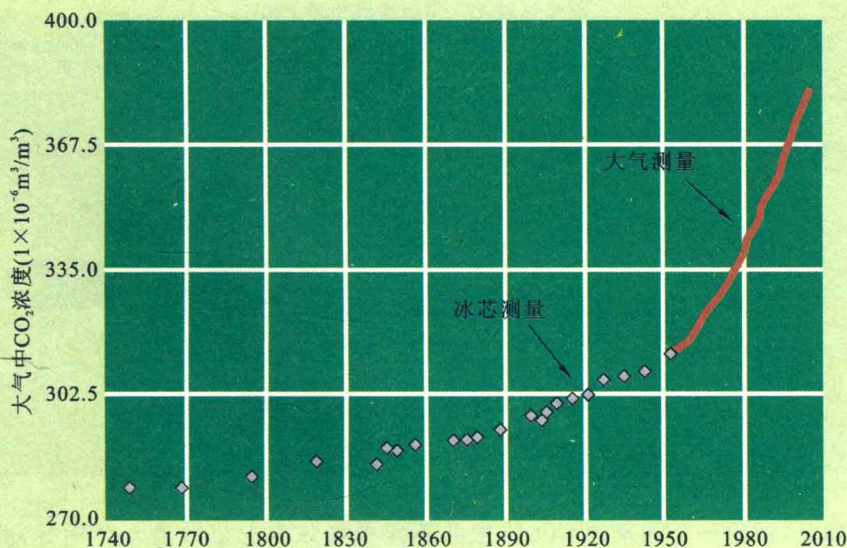
气候变化将威胁诸多人口的健康,尤其是贫困人口的健康:加剧了儿童营养不良现象的发生以及相应的病变;热浪、洪水、火灾和干旱所导致的死亡和疾病增多;气候变化引起的地面臭氧浓度增加导致心脏病和传染病多发。气候变化还可能导致其他多种事故,如疟疾等。对于寒冷地区来说,气候变暖也许会对人们的健康产生正面影响,不过就全球范围而言,主要是负面的影响,尤其对于发展中国家更是如此。

“温室效应”是指地球大气层的一种物理特性。由于地球大气层中某些气体的存在(通常称之为“温室气体”),能够选择性透过不同波长的辐射,使得太阳的短波辐射能够顺利到达地面,而地表和大气的长波辐射则不容易穿透大气逸出,就如同玻璃房子一样保护着地球,使得其热量不容易散失到宇宙空间,从而使地球类似处于一个“温室”当中。而导致温室效应的气体即温室气体,它们能够选择性吸收辐射能。我们通常说的温室气体主要包括:二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)和六氟化硫(SF_6)。大气中这些温室气体的浓度曾在相当长时期内保持稳定,

但自从 1750 年工业革命以来,由于人类农业生产、土地利用方式的变革,以及化石燃料的大量开采利用等因素,大气中主要温室气体的浓度急剧增加。

CO₂是最主要的人为产生的温室气体。1750 年前的 65 万年中,大气中的 CO₂ 浓度约为 $280 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$,到 2005 年,这一值上升为 $379 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。并且,当前大气中 CO₂ 的浓度正加速增大。1960—2005 年,大气中 CO₂ 浓度平均每年增加 $1.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$,最近 10 年(1995—2005 年)这一增幅加大到每年 $1.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$,如图 1-1 所示。导致工业革命之后 CO₂ 浓度大幅度上升的主要原因是化石燃料的大量利用,土地利用方式的改变也导致了 CO₂ 显著增加,但相对前者来说,其影响小得多。

近 30 年来,温室气体的排放总量增速惊人。在 1970—2004 年间,全球温室气体的排放量增长了 70%,从 287 亿吨 CO₂ 当量增长到 490 亿吨 CO₂ 当量。其中,不同的温室气体的增幅不一样,CO₂ 占了整个温室气体的 77%,其排放量在过去 30 年中的增幅为 80%,高于所有温室气体的加权平均值。从行业来看,能源部门是温室气体排放量最大的部门,同时也是增幅最大的部门。



▲ 图 1-1 大气中 CO₂ 浓度的历史曲线(1744—2007 年)

数据来源:美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)、美国橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)