

机遇与挑战

CO₂

——二氧化碳资源开发与利用

师春元 黄黎明 陈赓良 主编



石油工业出版社

PETROLEUM INDUSTRY PRESS

内 容 提 要

本书阐述了二氧化碳的物理、化学性质,二氧化碳排放问题及国际国内政策,二氧化碳的生产、回收、精制和综合利用,二氧化碳的质量标准与分析方法以及二氧化碳的储运、市场分析等,内容全面、详细。

本书适合石油天然气专业技术人员、环保专业技术人员及相关专业院校师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机遇与挑战:二氧化碳资源开发与利用/师春元,黄黎明,陈赓良主编.
北京:石油工业出版社,2006.12

ISBN 978-7-5021-5830-9

I. 机…

II. ①师… ②黄… ③陈…

III. 二氧化碳-基本知识

IV. 0613.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 140797 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

排 版: 北京乘设伟业科技排版中心

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2006 年 12 月第 1 版 2007 年 6 月第 2 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 23

字数: 600 千字 印数: 1001—1800 册

定价: 80.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《机遇与挑战——二氧化碳资源开发与利用》

编 委 会

主 编：师春元 黄黎明 陈赓良

撰 稿 人（以姓氏笔画为序）：

马 卫 方 娅 龙晓达 刘 勇

师春元 陈赓良 钟国利 康 莉

黄黎明 颜廷昭 缪明富

审 稿 人（以姓氏笔画为序）：

刘同斌 张 化 张治林 周志岐

序

在 100 多年前的很长时间里,地球维持了很好的碳循环,大气层中 CO_2 浓度大体稳定在 $260 \sim 280 \text{ml/m}^3$ 。工业革命在给人类带来众多福祉的同时也对环境产生了重大影响;重要影响之一是因化石燃料消耗急剧上升而导致 CO_2 排放量增加,自然界的碳循环无法平衡使大气中 CO_2 浓度升至目前的 370ml/m^3 。全球平均气温因之升高 $0.3 \sim 0.6^\circ\text{C}$ 。多年来的气候异常和自然灾害的频繁发生早已引起人们的关注。在专家们所分析的气候异常的各种原因中,温室效应被认为是一个重要因素,其中, CO_2 对温室效应的贡献率约占 $2/3$ 。

按照目前的发展趋势,全球化石燃料燃烧排放的 CO_2 量将从 2002 年的 $235 \times 10^8 \text{t}$ 上升至 2030 年的 $380 \times 10^8 \text{t}$,至 2100 年,大气中的 CO_2 浓度将升至 560ml/m^3 ,全球气候变暖的形势十分严峻。世界各国合作制订了许多计划并采取多种措施以图控制这一局面,但形势并不十分乐观。

中国是一个能源生产和消费大国,目前 CO_2 排放量约占全球排放总量的 10%;当然,如按人均计算,数量不算高。预计 2025 年中国 CO_2 排放量将超过美国而居世界首位。作为一个负责任的社会主义大国,环境保护是中国的国策,也是落实科学发展观、构建社会主义和谐社会、实现可持续发展的重要任务和目标。中国政府已采取了不少控制和减少 CO_2 排放的措施。然而,随着经济高速增长和人民生活水平迅速提高,能源消耗大幅上升,控制 CO_2 排放仍是一个十分艰巨的任务。

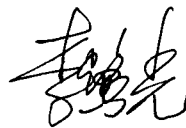
应当着重指出的是,虽然 CO_2 的排放及其产生的影响是当今世界关注的中心,但 CO_2 也具有广泛的用途,也是一种重要的产品和资源,综合利用 CO_2 的各种努力正方兴未艾。例如,对于石油天然气产业而言,使用 CO_2 提高原油及天然气的产量和采收率,就是一种重要的增产措施。在化工及其他行业乃至人民生活, CO_2 也有多方面的用途。只是,各种途径 CO_2 的消耗量与排放量相比,其比例很低而已。因此,在控制与减少 CO_2 排放的同时,加强 CO_2 的回收利用也是很重要的任务。

石油天然气企业应当而且可以为 CO_2 的减排和回收利用做出贡献。比如,增加天然气产量,提高天然气在能源结构中的比例有助于减排 CO_2 ;使用 CO_2 增产油气;提高能源利用效率可减排 CO_2 ;生产和研发以 CO_2 为原料的产品,等等。

本书内容十分丰富,涵盖了与 CO_2 有关的方方面面:既用重要篇幅介绍了 CO_2 排放问题及国际国内政策,也评述了 CO_2 的回收、精制和利用,并有实例,还有 CO_2 的性质、质量标准与分析以及产品的储运乃至市场分析。

编写本书的作者是中国石油西南油气田公司天然气研究院组成的一个老中青结合的班

子,既有国内知名的资深教授主持,又有身处一线、经验丰富的中年专家以及青年技术骨干参与。他们在多年积累的基础上又查阅大量资料并潜心研究,历经两年完成了书稿编写工作,又经资深专家审稿并予修改。我相信,本书的出版将为石油天然气行业以及各行各业关心和涉及 CO₂ 问题的读者提供一本范围广泛而完整的手册。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李先' (Li Xian), located on the right side of the page.

前 言

CO₂ 作为一种温室气体,对人类生存环境有着重要的负面影响,但同时也是一种重要的资源和工业气体,可以在许多方面造福于人类,目前已广泛应用于食品、化工、机械、农业、医药、烟草、运输、石油开采、国防、消防等部门。

碳是构成生物原生质的基本元素,碳在生态系统中周而复始地重复着生态循环,使生物得以生存和繁衍、大气环境得到更新并变得越来越适合生物生存的需要。数亿万年以来,地球的碳元素传递和循环基本上处于一个相对稳定的状态,碳的积累更多的是通过森林、化石燃料、碳酸盐岩石、海底碳沉积等固化方式予以储存,大气中的碳(CO₂)基本处于稳定状态。但自工业革命开始则改变了这样的状态,过去的 250 年中 CO₂ 浓度增加了大约 32%,其中大部分增长出现在最近几十年。

大气中的 CO₂ 浓度大幅度增加,导致了严重的温室效应。全球变暖对人类生产和生活环境产生了重大影响:极端气象和气候现象频繁发生;冰川融化,海平面上升;对动植物种群数目和分布产生影响;全球气候变暖导致越来越严重的缺水问题;全球变暖带来的种种后果将使人类健康问题越来越突出。因此,地球气候变暖已经成为全世界共同关心的重大问题。

CO₂ 的主要排放源是化石燃料的使用,由此途径释放的 CO₂ 约占全球 CO₂ 年排放总量的 95%,来自工业副产以及天然资源等途径的 CO₂ 仅占 5% 左右。目前中国能源消费总量和 CO₂ 排放总量均居世界第二位,但中国能源消费以煤为主,因此 CO₂ 排放特征明显且排放量大,如 2004 年能源消费结构中,煤占能源消费总量的 67.7%,其燃烧所产生的 CO₂ 排放达到 CO₂ 排放总量的 81%。并且,近年来随着中国天然气勘探的进展,相继开发的一些重要气藏其 CO₂ 含量很高,例如海南、大庆、吉林某些气藏的 CO₂ 含量可高达 20% 以上甚至 90% 以上。由此带来了两个问题:一是对中国现有天然气净化技术提出了严峻的挑战,需要积极研究和发 展 CO₂ 脱除技术,以保证商品天然气达到国家标准规定的气质指标和避免大量 CO₂ 直接放空而造成环境问题;二是如何充分利用 CO₂,从而不仅减少排放,也给企业创造巨大的经济利益。后者不仅对酸性气田开发是一种减轻环境污染、提高经济效益的发展趋势,其他 CO₂ 排放企业也都应该看清和认识到这一发展趋势,从环保和经济两方面考虑,及早做好 CO₂ 如何脱除和综合利用的应对措施。

根据本书作者的调查研究,大致可以得出如下认识:(1)无论从保护环境还是从提高企业经济效益的角度看,天然气和各种工业气体及排放尾气中的 CO₂ 的回收利用都具有非常重要的现实意义;(2)从天然气和各种工业气体及尾气中脱除、回收 CO₂ 的方法较多,许多工艺技术也已经比较成熟,但要满足不同原料气条件和净化要求,尚需根据不同的具体情况精心选择

工艺方法和溶液配方;(3)关于 CO_2 利用途径的研究在国内外都得到了广泛关注, CO_2 综合利用是一个有待在 21 世纪全面研发的重大前瞻性课题;(4) CO_2 的化工利用是新世纪天然气化工战略攻关目标之一,对此应予以充分重视;(5)作为物理应用途径, CO_2 在油气田增产作业中的价值应当充分重视;(6)拓展用途和提高利用率都将为 CO_2 产品提供更为广阔的市场。由此可见, CO_2 产品市场潜力大、发展前景好,回收利用 CO_2 必将创造良好的社会和经济效益。

有鉴于此,中国石油西南油气田公司在认真贯彻落实科学发展观、循环经济、环境与生态保护、构建社会主义和谐社会等一系列基本国策以及实施清洁发展机制(CDM)的工作中,组织天然气研究院有关专家和学者,历时两年,完成了本书的编写。全书分为十章,系统介绍了 CO_2 物理化学性质、排放与储存、其污染与温室效应、治理温室效应的国际国内政策和技术对策,重点介绍了二氧化碳分离脱除方法、产品生产与储存、产品标准与分析方法、综合利用的各种途径、产品市场前景与主要利用途径的技术经济指标,全面阐述了二氧化碳作为温室气体带来的挑战和作为工业资源所产生的机遇及经济效益。

本书由师春元、黄黎明和陈赓良主编。第一章由刘勇编写;第二章由黄黎明、方娅编写;第三章由颜廷昭编写;第四章由龙晓达、师春元编写;第五章和第六章由马卫、陈赓良编写;第七章由缪明富、康莉编写;第八章由钟国利、缪明富编写;第九章由方娅、缪明富编写;第十章由陈赓良、黄黎明编写。全书由陈赓良教授统稿。

感谢刘同斌(教授级高级工程师)、张化(教授级高级工程师)、张治林(教授级高级工程师)、周志岐(高级工程师)等几位老专家,在百忙之中抽出宝贵的时间详细审定了本书文稿。

本书可作为石油、天然气、煤炭等能源生产与消耗领域和化工行业科研、设计、生产及管理工程技术人员以及高等院校有关专业师生的参考书。

感谢石油工业出版社对此书的出版给予了宝贵的支持与指导,感谢中国石油西南油气田公司领导对编写此书的支持以及各相关部门和单位在本书编写过程中收集资料与数据时给予的帮助。

由于编写者的学识和认知水平,书中不当与疏漏之处在所难免,恳请读者赐正。

主 编

2006 年 9 月于成都

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 二氧化碳污染	(1)
第二节 治理温室效应的国际国内政策	(5)
第三节 治理二氧化碳污染的技术对策	(7)
第二章 二氧化碳的物理化学性质	(10)
第一节 物理性质	(10)
第二节 化学性质	(15)
第三章 二氧化碳排放与储存	(19)
第一节 二氧化碳资源与排放	(19)
第二节 二氧化碳的减排措施	(25)
第三节 二氧化碳的捕集与储存	(42)
第四章 二氧化碳分离方法	(62)
第一节 溶剂吸收法	(62)
第二节 膜分离法	(111)
第三节 变压吸附法	(121)
第四节 低温分离法	(124)
第五章 二氧化碳的生产	(130)
第一节 概述	(130)
第二节 粗二氧化碳产品的预处理	(132)
第三节 液体二氧化碳产品的生产	(135)
第四节 干冰生产	(145)
第六章 产品储运	(148)
第一节 产品储存	(148)
第二节 运输	(151)
第七章 产品标准和分析方法	(156)
第一节 国外二氧化碳产品质量指标	(156)
第二节 中国二氧化碳产品质量指标	(166)
第三节 二氧化碳产品的安全要求	(171)
第四节 产品分析方法	(175)
第五节 中国标准的修订与高质量产品的发展	(208)

第八章 二氧化碳的综合利用	(213)
第一节 物理利用	(213)
第二节 用于提高油气采收率	(236)
第三节 超临界二氧化碳流体	(249)
第四节 化学利用	(279)
第五节 利用案例	(305)
第六节 发展方向	(308)
第九章 市场与技术经济分析	(312)
第一节 国外产品市场分析	(312)
第二节 国内产品市场分析	(321)
第三节 二氧化碳利用途径的技术经济分析	(329)
第十章 结束语——机遇与挑战	(343)
第一节 二氧化碳排放与温室效应	(343)
第二节 对《京都议定书》的认识	(344)
第三节 油气生产企业面临的挑战与机遇	(345)
第四节 减少二氧化碳排放的途径	(346)
第五节 二氧化碳的捕集和储存	(348)
第六节 流动排放源控制与氢能源开发	(349)
第七节 二氧化碳回收技术的开发动向	(350)
第八节 二氧化碳的资源化	(352)

第一章 概述

第一节 二氧化碳污染

一、碳循环

碳循环是碳元素通过大气圈、生物圈、土壤圈、岩石圈和水圈的变化和传递的总过程(如图 1-1 所示)。碳在生物圈的存在形式主要为 OC(organic carbon, 有机碳);碳在水圈中的存在形式为 DIC(dissolved inorganic carbon, 溶解的无机碳)、DOC(dissolved organic carbon, 溶解的有机碳)、POC(precipitated organic carbon, 沉淀的有机碳)和 OC;碳在岩石圈中的存在形式为 OC(包括化石燃料)和碳酸盐;碳在土壤圈中的存在形式为 OC(活生物和死生物);碳在大气圈中的存在形式主要为 CO_2 和 CH_4 等。

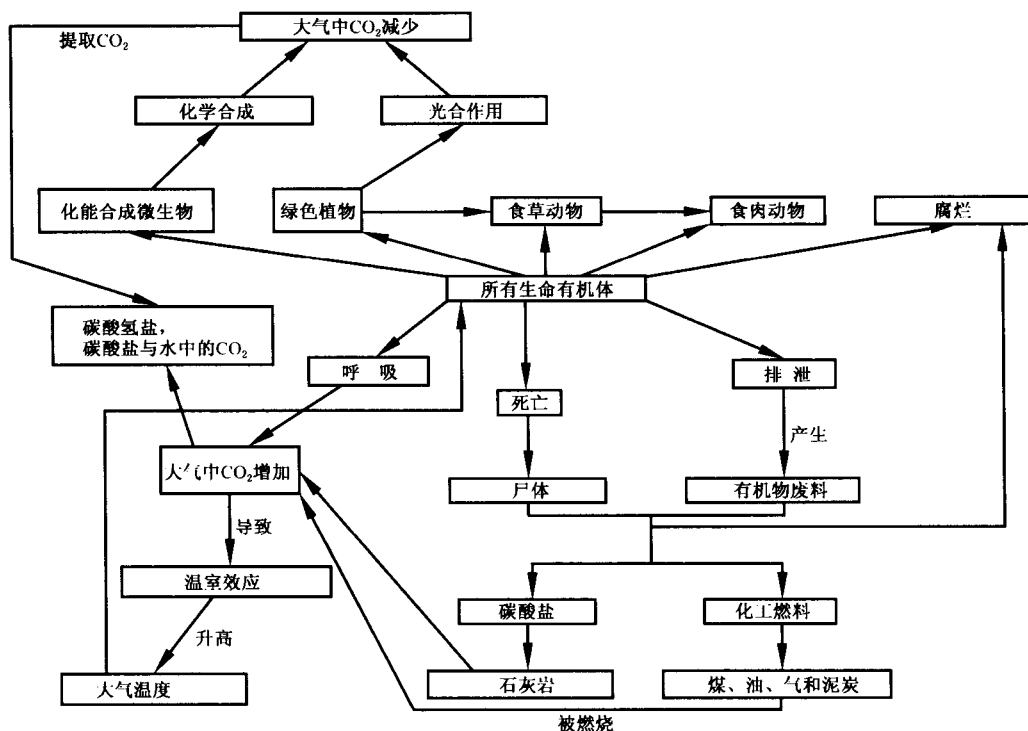


图 1-1 陆地生态系统与全球碳循环示意图

碳是构成生物原生质的基本元素,虽然它在自然界中的蕴藏量极为丰富,但绿色植物能够直接利用的仅仅限于空气中的二氧化碳。生物圈中的碳循环主要表现为绿色植物从空气中吸收二氧化碳,经光合作用转化为葡萄糖,并释放出氧气。碳的生物地球化学循环为大气中氧的

产生提供了必要条件。在这个过程中也少不了水的参与。有机体再利用葡萄糖合成其他有机化合物。碳水化合物经食物链传递,又成为动物和细菌等其他生物体的一部分。生物体内的碳水化合物一部分作为有机体代谢的能源经呼吸作用被氧化为二氧化碳和水,并释放出其中储存的能量。借助于这个碳循环,大气中的二氧化碳大约 20 年就完全更新一次。

在生态系统中,物质从物理环境开始,经生产者、消费者和分解者,又回到物理环境,完成一个由简单无机物到各种高能有机化合物,最终又还原为简单无机物的生态循环。通过该循环,生物得以生存和繁衍,物理环境得到更新并变得越来越适合生物生存的需要。在这个物质的生态循环过程中,太阳能以化学能的形式被固定在有机物中,供食物链上的各级生物利用。

可以说数亿万年以来,地球的碳的传递和循环基本上处于一个平稳妥当的状态,碳的积累更多的是通过森林、化石燃料、碳酸盐岩石、海底碳沉积等固化方式予以储存。大气中的碳(CO_2)基本处于一个稳定的状态。但自工业革命开始则改变了这样的状态。

二、二氧化碳污染问题与温室效应

从格陵兰和南极大陆采集的极冰冰芯中的气泡化石为人类提供了远古时期大气的化学组成样本。这些样本显示,在距今 10000 年到 250 年间,大气中二氧化碳的体积分数非常稳定,维持在 $260 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$ 之间。在过去的 250 年中,二氧化碳体积分数增加到了 370×10^{-6} ,其中大部分增长出现在最近几十年。在此期间,除去大气中的二氧化碳体积分数增加了 31%,过去 10000 年中相当稳定的 CH_4 和 N_2O 的体积分数也分别增长了 151% 和 17%。图 1-2 表示出了 1000—2000 年间 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种温室气体在大气中的体积分数变化情况。这些结果表明,在工业化前,自然碳循环处于很好的平衡态,而伴随着工业化革命,大气中的温室气体大量增加。

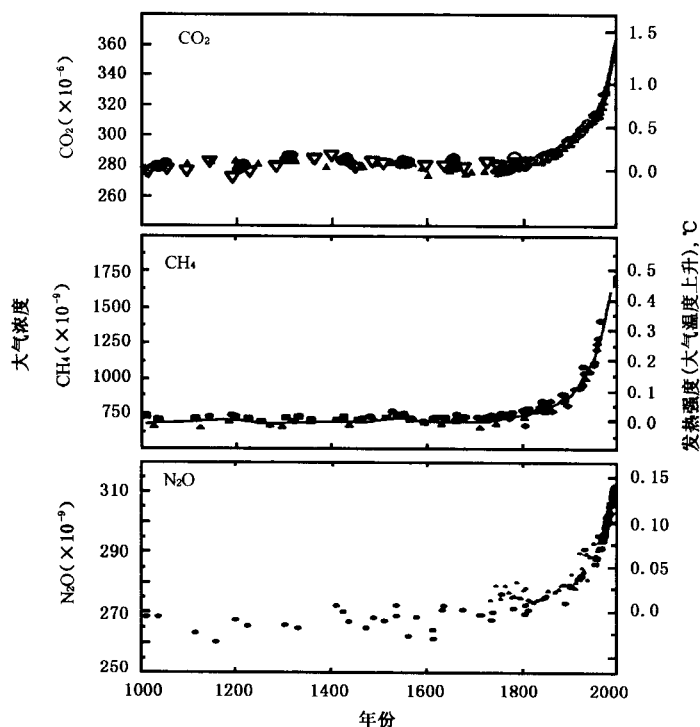


图 1-2 过去 1000 年地球大气中温室气体的体积分数变化

在过去的几千年中,海洋和陆地生态系统等自然源排入大气中的大量 CO_2 已通过光合作用和海洋吸收等自然过程的清除作用几乎完全平衡。后来,人类活动破坏了这种平衡。目前的估算结果表明,人类每年排入大气中的 CO_2 为 $280 \times 10^8 \text{t}$,是植被和土壤呼吸及海表交换排入大气的 CO_2 平均自然通量(总量约为 $5500 \times 10^8 \text{t}$)的 5%。而自然排放可通过植被光合作用和海洋吸收等自然过程抵消。大气中 CO_2 总量的变化由排放(源)和吸收(汇)量之间的净平均差额决定,而并不是各流量本身。从格陵兰和南极大陆采集到的极冰深处远古时期的气泡样本分析,可对过去 42 万年中这种平衡如何变化提供很好的启示。这些证据清楚地表明,在目前所处的间冰期中,工业革命之前的 10000 年大气 CO_2 的体积分数仅在 280×10^{-6} 左右,并以几个百分点的幅度变化。这说明,平均而言,这一时期的自然碳收支处于很好的平衡状态。这些事实和来自其他方面的证据一致表明,人类活动造成的虽小却不断增长的碳收支失衡的积累是过去几百年 CO_2 体积分数增加了 31% 的主要原因。实际上,这是全球碳收支中人类累积的“债务”。

由于大气中温室气体浓度的增加,地球表面温度自工业革命以来,几乎呈指数增加。图1-3表示出了 1860—2000 年间和 1000—2000 年间地球表面的温度变化的模拟情况。从图中可以看出,从 1961 年到 1990 年平均温度骤升。诸多因素清楚地表明,人类活动是温室气体浓度增加的主要原因。其中由 CO_2 引起的温室效应增加占目前温室效应增加的 2/3。有确切的证据表明,这些增长主要源自交通、取暖、发电等人类活动中化石燃料的燃烧。

化石燃料的使用对 CO_2 排放的贡献占人类活动总排放量的 70%~90%。化石燃料用于交通、工业生产、取暖、制冷、发电以及其他诸多方面。其余的 CO_2 来自土地利用活动,如畜牧业、农业、森林空地和森林退化等。其他温室气体的主要来源包括化石燃料的生产与运输、农业活动、废弃物管理和工业生产过程等。

2006 年 1 月 23 日至 27 日在日内瓦召开了全球气候变暖问题研讨会。来自各国的气象气候学家和代表共 500 多人参加了会议。与会者认为全球变暖对地球环境及人类生活环境的几大影响主要包括:一是极端气象和气候现象频繁发生;二是冰川融化,海平面上升;三是对动植物种群数目和分布产生影响;四是全球气候变暖导致越来越严重的缺水问题;五是全球变暖带来的种种后果将使人类健康问题越来越突出。

三、全球化石燃料燃烧的二氧化碳排放状况

化石燃料的燃烧是 CO_2 的主要排放源。2003 年全球由化石燃料燃烧释放的 CO_2 高达 250 多亿吨,约占全球年 CO_2 排放总量的 95%。剩余的 5% 主要来自工业副产以及一些天然的 CO_2 资源。

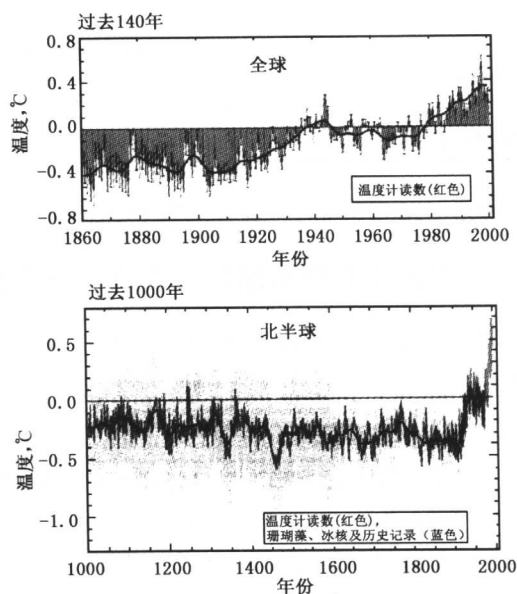


图 1-3 过去 140 年和 1000 年地球表面温度变化情况

图 1-4 表示出了全球 CO₂ 排放前六位的国家化石燃料燃烧的 CO₂ 排放量的情况。表 1-1 列出了全球化石燃料燃烧的 CO₂ 排放量的情况。

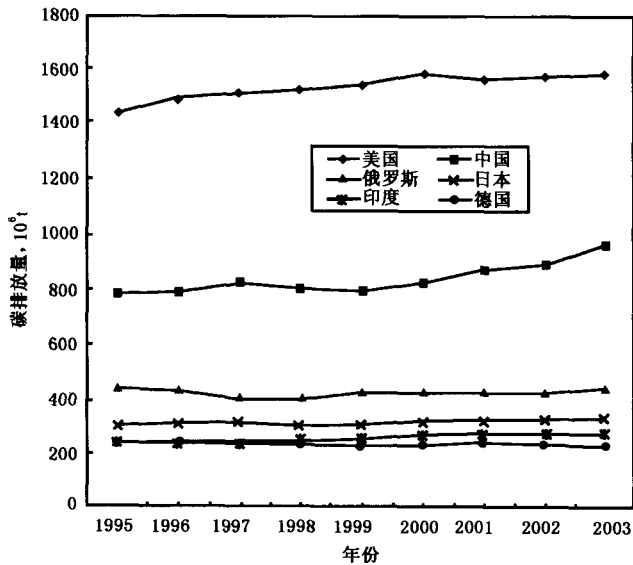


图 1-4 全球 CO₂ 排放前六位国家燃烧化石燃料的 CO₂ 排放量情况

表 1-1 全球 1995—2003 年 CO₂ 化石燃料燃烧排放量情况

年 份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
全球 CO ₂ 排放量, 10 ⁸ t	220.3	225.2	229.1	228.4	231.7	238.5	241.4	244.6	251.6

1995—2003 年间, 全球化石燃料燃烧排放的二氧化碳量以年均近 1.8% 的速度增长。

四、中国化石燃料燃烧的二氧化碳排放情况

2003 年中国由化石燃料燃烧所产生的 CO₂ 排放, 约占当年全球化石燃料 CO₂ 排放的 14.1%。通过同世界发达国家的比较, 可以看出中国能源消费及 CO₂ 排放与它们有很大的差别, 其主要特点表现在以下几个方面^[1]:

(1) 能源消费总量和 CO₂ 排放总量均居世界第二位, 在世界各国中仅次于美国。中国 2001 年、2002 年和 2003 年 CO₂ 排放量分别达到 $31.9 \times 10^8 \text{t}$ 、 $32.7 \times 10^8 \text{t}$ 和 $35.4 \times 10^8 \text{t}$ 。能源消费总量占世界的比例略低于 CO₂ 排放量所占比例。

(2) 以煤为主的能源消费结构是 CO₂ 排放量居高不下的重要原因之一。中国 2004 年能源消费结构中, 煤占能源消费总量的 67.7%, 石油与天然气合计占 25.3% (其中石油 22.7%, 天然气 2.6%), 水能与核能的比例占 7%; 与世界石油、天然气为主 (合计占 61.7%) 的能源消费结构有很大差异。由于煤炭是一种 CO₂ 排放量高的燃料, 其燃烧对温室气体贡献率最大。煤炭消费占中国能耗总量的 67.7%, 但其燃烧所产生的 CO₂ 排放则达到 CO₂ 排放总量的 81%。

(3) 能源消费的 CO₂ 排放强度居世界首位。从能源消费的 CO₂ 排放强度看, 中国是 0.617kg 碳/kg 标准煤, 比世界平均值高 23%; 比美国高 28%; 比日本高 43%; 居世界首位。这也是由于以煤为主的能源结构所致。

(4)人均能源消费量、人均 CO₂排放量均低于世界平均水平,但增长速度高于世界平均水平。1997 年中国人均能源消费量 1.12t,人均碳排放量为 0.69t,分别是世界人均值的 53% 和 66%;在世界上列第 80 位至第 90 位之间。人均二氧化碳排放量是美国的 1/8。但值得注意的是,中国二氧化碳排放年增长率高于世界平均水平。

(5)GDP 的单位能耗和单位 CO₂排放量均高于世界平均水平。1997 年中国单位国内生产总值能耗 15.38t/10⁴美元,单位国内生产总值 CO₂排放量 9.5t/10⁴美元,分别是世界的 3.7 倍和 4.7 倍。中国万美元 GDP 的 CO₂排放量是美国的 5.3 倍、日本的 12.8 倍。

中国能源消费结构中燃煤是主要的一项,而且这种格局在今后相当长的时期内不会有多大变化(见表 1-2)。

表 1-2 中国化石燃料燃烧排放 CO₂ 情况及预测^[2]

化石燃料	CO ₂ 排放量,10 ⁶ t 碳/a			
	1985 年	1990 年	2020 年	2025 年
煤	528.77	541	1152 ~ 1347	1670 ~ 1944
油	75.62	101	188 ~ 220	321 ~ 374
天然气	6.82	8.09	62 ~ 73	91 ~ 105
煤气	8.68	—	40 ~ 73	67 ~ 78
合成油	0	—	3 ~ 3.4	6 ~ 8

第二节 治理温室效应的国际国内政策

一、国际协议

1.《联合国气候变化框架公约》

温室气体排放导致的全球气候变暖正引起普遍关注。由于主要的温室气体 CO₂多数来自于人类活动以及化工和能源工业,因而一些大的公司已寻求措施以降低 CO₂排放。但要达到 CO₂排放量的显著降低,以控制气候的变暖速度,仅靠个人和企业的行动是远远不够的。因此,政府在此担当了更重要的角色,1992 年 6 月 3 日在巴西召开了联合国环境与发展大会。由 143 个国家签署了《联合国气候变化框架公约》(The United Nations Framework Convention on Climate Change)。其后于 1995 年 3 月和 1996 年 7 月相继召开了柏林会议和日内瓦会议。

2. 柏林授权

《联合国气候变化框架公约》是一个原则性的框架协议,规定了发达国家缔约方于 2000 年将其温室气体排放稳定在 1990 年水平上,没有涉及 2000 年以后的排放义务。因此公约第一次缔约国大会认为公约第 4.2 款 A 项和 B 项相关规定是不充足的,同意开始一项进程以谈判一项议定书或其他法律文书,以加强对发达国家缔约方在 2000 年以后所应采取的限控政策和目标,并决定在 1997 年第三次缔约国大会上完成。由于在德国柏林启动,此进程称为“柏林授权”进程。这一进程通过公约“柏林授权”特设工作组展开,制定政策和措施,并确定在 2010 年或 2020 年等指定期限内,实现数量限制和减少的目标。

3.《京都议定书》和《马拉喀什协定》

从1995年8月以来,特设工作组围绕有关政策与措施、温室气体减排目标、推进现有义务的履行,以及法律文书的形式等进行谈判。发达国家之间、发展中国家内部以及发达国家内部都存在激烈的斗争。经过激烈的谈判,《京都议定书》在1997年年底日本京都召开的第三次缔约国大会上获得通过。按照议定书的规定,批准议定书的国家达到足够多数(55个以上),并且这些国家的温室气体排放量的总和达到世界总量的55%,《京都议定书》将生效。据此,该条约已于2005年2月16日正式生效。

《京都议定书》是全球第一次以国际条约的方式缔结的关于控制CO₂排放的政治文件,对人类生活的地球环境状况改善,特别是全球变暖问题的缓解,具有里程碑意义。但是由于全球最大CO₂排放国——美国拒绝批准《京都议定书》,致使《京都议定书》的实际效能大打折扣。

尽管《京都议定书》被大多数国家采纳了,但是还是会有很多可理解的“未尽事宜”存在。因此,在框架协议已有议事进程的同时,又进行新一轮的谈判,继续讨论议定书的具体规则问题,这就是《马拉喀什协定》。《马拉喀什协定》制定了京都机制的实施细则,同时还对整个《联合国气候变化框架协议》的实施提出了一些重要的步骤。

二、中国的二氧化碳减排面临的挑战和对策

中国作为发展中国家虽然没有在条约中承担义务,但是随着中国经济的高速发展和人口增加,目前已成为继美国之后世界第二大温室气体排放国。中国的环境问题已经越来越受到国际社会的关注。中国现已签署和加入多项国际环境条约,制定了相应的履约方案。这意味着,中国要在全球环境保护中履行责任。无论从全面建设小康社会、实现可持续发展的历史使命出发,还是从应尽的国际义务出发,加强中国CO₂等温室气体的排放控制是完全必须的^[1]。

借鉴发达国家的经验教训,根据中国全面建设小康社会的历史任务,应该优化产业结构,改善能源结构,提高能源利用效率,并以法律、政策和经济手段,促进能源合理利用和削减CO₂排放量的设想和对策^[1]:

(1)优化产业结构,实施广义节能,削减CO₂排放。调整优化产业结构,逐步实现由“二一型”产业结构向“三二一型”结构的转化;实现广义节能,从而使国民经济体系能耗下降,产业整体效益提高,CO₂排放减少;发展新兴工业,提升改造传统产业,大力发展高新技术产业,提升改造传统产业,淘汰高耗能、高污染、低效益的工业,促进经济增长模式由外延粗放型向内涵集约型转变;发展生态农业;加快发展耗能少的第三产业。

(2)改善能源结构,降低煤耗比例,削减CO₂排放。充分发挥水能资源优势,提高水电在一次能源消费中的比例;适当发展核电;加大太阳能、风能、地热能、生物能和海洋能等能源的开发利用力度;在继续勘探开发国内石油、天然气的同时,充分利用国外石油天然气资源,提高油气在能源消费结构中的比例;在降低煤炭消费比例的同时,大力推广应用“洁净煤”技术,努力减少CO₂排放和其他污染。

(3)提高能源科学技术水平,节能降耗,削减CO₂排放。加强能源科学技术研究并将其渗透到能源开采、配送、加工、转换和利用的各个环节,全面提高能源系统效益。要推广适合中国国情的效率高、见效快的国内外先进技术和设备,限制和淘汰落后的工艺技术设备。特别是工业部门提高能源利用效率是实行温室气体减排的重要措施之一;从国情出发,强调煤炭的有效

转换,发展电力和城市煤气化。

(4)建立和健全政策法规,以宏观调控和市场机制促进能源节约和 CO₂减排。根据中国国情制订和完善一系列促进能源节约、削减 CO₂排放的法律、法规和政策,加快制定配套法规,引导和规范用能行为。制定和完善主要用能产品能源效率标准,包括工业锅炉、电动机、风机、水泵、变压器等主要工业耗能设备和家用电器、照明器具、建筑、汽车的能源效率标准,为实施淘汰高耗能产品,开展节能产品认证和能源效率标识制度提供技术依据。制定抑制能源过度消费,有利于企业开展能源节约与资源综合利用的税收及税赋转移政策;研究制定能源节约与资源综合利用公共财政支持政策。

第三节 治理二氧化碳污染的技术对策

一、大力推进植树造林,增加森林植被碳汇功能

北京大学方精云^[3]等人利用大量的生物量实测资料及新中国成立以来 50 年的森林资源清查资料,建立了推算区域尺度森林生物量的“生物量换算因子法”,构建了世界上第一个国家尺度的长时间序列的生物量数据库。在此基础上,研究了中国 50 年来森林植被 CO₂源汇功能的动态变化。图 1-5 表明,20 世纪 70 年代中期以前,主要由于森林砍伐等人为作用,中国森林碳库和碳密度都是减少的,碳储量减少了 $0.62 \times 10^8 \text{t}$,年均减少约 $0.024 \times 10^8 \text{t}$ 。在最近的 20 多年中,森林碳库呈增加趋势。由 70 年代末期的 $4.38 \times 10^8 \text{t}$ 增加到 1998 年的 $4.75 \times 10^8 \text{t}$,共增加 $0.37 \times 10^8 \text{t}$,年平均增加 $0.022 \times 10^8 \text{t}$,表明中国森林植被正在起着大气碳汇的作用。近 20 年中,中国森林植被总共净吸收了相当于此间国内工业 CO₂总排放量的 3%~4%。这种碳汇功能的增加主要是由人工造林增加所致。由于人工林增加导致碳汇增加 $0.45 \times 10^8 \text{t}$,年平均增加吸收 $0.021 \times 10^8 \text{t}$ 。人工林的平均碳密度增加了约一倍。除了人工成林增多外,气温上升和 CO₂浓度施肥也可能是促进森林生长的重要因子。这些结果从某些侧面支持了国际社会于 1997 年在日本京都签署的《京都协定书》所提出的用植树造林来缓解大气 CO₂浓度增加的方案的合理性,尽管这只是一个暂时的应急对策。中国目前正在实施的“天然林保护工程”和“植树造林”政策对减缓大气 CO₂浓度上升有一定的贡献。该结果向国际社会表明,中国森林植被净吸收的二氧化碳量可以部分抵消其工业排放量,从而为中国将来争得额外的 CO₂排放份额,给中国的发展带来相当的经济利益。

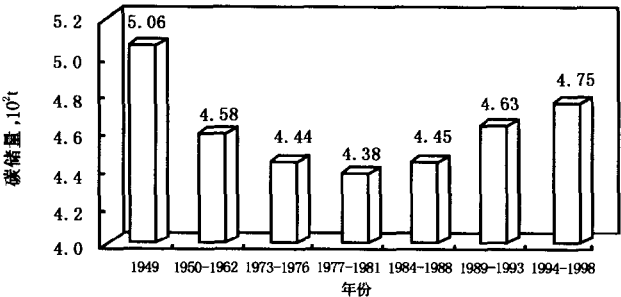


图 1-5 中国半个世纪的森林植被碳储量的变化

二、发展低成本、大规模的二氧化碳回收分离和固定化技术

低成本的 CO₂回收、捕集、提纯浓缩与储存技术将是大规模 CO₂处理的基础。目前,已发出了许多工艺方法,但从总体上讲,这些技术在经济性方面还不能完全满足要求。

图 1-6 示出从各种含 CO₂气体中回收分离及固定化 CO₂的方法。CO₂分离方法用于燃煤火电厂的能耗比较见表 1-3。由此可见,现有分离技术能耗较高,均在 50% 以上,热效率较低,因而导致电能成本增加^[2]。

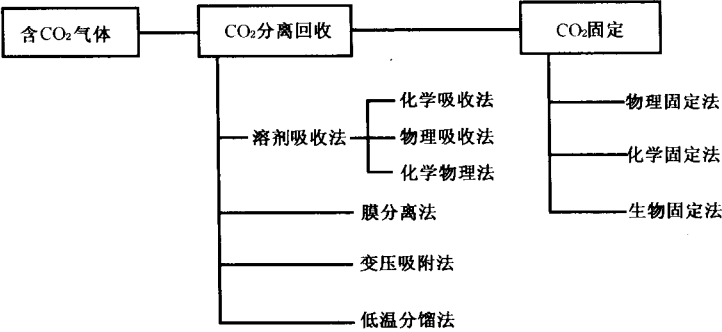


图 1-6 CO₂的回收分离及固定化方法

表 1-3 各种 CO₂分离方法的能耗比较

方法	能耗		煤耗		净 CO ₂ 排放		回收 CO ₂	
	占煤的燃烧能的比例, %	热效率 %	kg 煤/(kW·h)	比值 %	kg CO ₂ /(kW·h)	比值 %	回收值 %	纯度 %
未处理	0	35	0.35	100	0.88	100	0	
胺液吸收法	47~49	7~19	0.66~1.68	189~476	0.17~0.42	19~48	90	90
膜分离法	50~75	9~18	0.72~1.41	200~400	0.35~0.70	40~80	80	80

由于各种工业装置,特别是火力发电厂是当前 CO₂气体排放的主要来源,因此,针对性地开发相应的 CO₂分离回收及固定化技术成为未来发展的重点。德国电力工业巨头 RWE 于 2006 年 4 月宣布,该公司计划投资 10 亿欧元,建设全球第一家不向空中直接排放二氧化碳的火力发电厂,发电容量 400~450MW,将于 2014 年完工并开始发电,总投资包括电厂以及二氧化碳的运输和储藏设施的建设费用。目前,德国在二氧化碳的运输和储藏技术领域处于世界领先地位,该项目的完成将推动电力领域的一场生态革命。

数量巨大的 CO₂量超过社会需求量,必须固化回收。某些国家致力于发展 CO₂深海溶解技术。海洋能对大气中约 50 倍的 CO₂进行溶解。据估计,假如现在海洋 CO₂的吸收量增加 0.4%,即可消除工业革命以来所增加的 CO₂。

日本电力中央研究所进行过 880m³/h 小试,他们将火电厂排放的烟气 CO₂用胺溶液吸收分离,再压缩至 14MPa 的液体,并送入 500m 以下深海,液体 CO₂的密度小于海水,能在上浮过程中溶于海水之中。据他们估算,一个 500MW 级 LNG 火电厂排放的 CO₂经胺法回收,回收率达 90%。液化后深海处理时,需提高电价 60%~100% 以消化 CO₂处理费用。