



二氧化碳

捕集 封存和利用技术

骆仲泱 方梦祥 李明远
高 林 胡基材 阎维平 编 著
郭绪强 施 耀 曾荣树

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



内 容 提 要

本书主要对目前备受关注的温室气体 CO₂ 减排与控制技术进行阐述。全书共分 11 章。第 1 章系统介绍了温室效应和 CO₂ 排放控制现状；第 2 章重点介绍了 CO₂ 吸收分离技术的基本原理、关键技术、工艺设计和工业应用；第 3 章介绍了 CO₂ 吸附分离原理、方法、工艺和应用；第 4 章阐述了 CO₂ 膜分离与膜吸收技术，介绍了膜分离和膜吸收原理、膜材料选择、工艺设计和应用；第 5 章介绍了富氧燃烧技术原理特点和典型工艺；第 6 章系统阐述了化学链燃烧技术的原理和关键过程；第 7 章系统分析了燃烧前控制 CO₂ 排放的动力系统；第 8 章介绍了 CO₂ 的输送技术，重点介绍了管道输送原理、设计方法与应用；第 9 章和第 10 章分别介绍了 CO₂ 用于采油与置换天然气水合物的原理和应用前景；第 11 章从 CO₂ 油气藏封存、咸水层封存、化学固定与生物固定等方面详细介绍了 CO₂ 的封存、固定与利用技术。

本书可供从事燃煤电厂烟气污染物控制、化工尾气处理、油气开采、大气环境保护工作的相关专业技术人员、研究人员参考，也可作为高等院校热能工程、环境工程、化学工程等领域的研究生、本科生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

二氧化碳捕集、封存和利用技术/骆仲泱等编著. —北京：中国电力出版社，2012. 1

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2598 - 2

I. ①二… II. ①骆… III. ①二氧化碳-收集②二氧化碳-保藏③二氧化碳-利用 IV. ①O613.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 010356 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 428 千字

印数 0001—3000 册 定价 58.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

对比今昔，很多人眼中的“冬暖夏凉、四季分明”等季节特征似乎已渐渐远去，只能成为一种回忆与梦想。如今，洪涝灾害和干旱问题、冰雪灾害与持续温升等极端气候事件，正不断交替出现在公众的视野之中。今昔的强烈反差令公众感到纠结：全球气候到底怎么了？如此继续下去，人类的未来将会是一种怎样的情景？人类活动引起温室气体的大量排放，导致了温室效应的持续恶化，使得全球变暖似乎正变得不可遏制。为抑制全球气温的过快上升，从现在起，我们必须开始大力控制温室气体的排放。在温室气体中，由于二氧化碳（CO₂）的排放量巨大，其对温室效应的贡献已占 60% 以上。因此，控制温室气体的大量排放，首先要控制 CO₂ 的大量排放。

导致 CO₂ 大量排放的人类活动中，以化石燃料为主的能源利用过程中所排放的 CO₂ 量占据绝对主导地位。因此，控制 CO₂ 的排放，首先要控制化石燃料能源利用过程中的 CO₂ 排放。一般而言，控制能源利用过程中 CO₂ 排放的途径主要有：① 节能减排，提高能源利用效率，降低化石能源的使用量；② 大力发展和采用低碳或无碳新能源，如核能、太阳能、生物质能、水能、风能等；③ 推动 CO₂ 捕集和封存技术（carbon capture and storage, CCS）的规模化应用。虽然全球在低碳技术推广、能源效率提高和节能减排方面取得了长足进步，但越来越多的研究表明，在可预见的将来，化石燃料在全球能源利用过程中仍将占据主导地位。因此，在保障能源安全和应对全球气候变化的双重压力下，大力推动 CCS 技术的规模化应用，将有助于在短期内大幅削减 CO₂ 的排放量并有效缓解温室效应。基于这样一种现实，欧美等发达国家和地区近年来积极发展适合本国情况的 CCS 技术，并在 CCS 应用方面给予了资金和政策支持，如美国 2005 年提出了持续到 2017 年的 FutureGen 计划、欧盟 2004~2015 年实施的 Hypogen 计划、澳大利亚 2009~2011 年实施的 ZeroGen 计划、日本将持续到 2020 年的庞大的“新阳光计划”等，无不立足于 CO₂ 的捕集和封存。这些项目的实施，可以探索适合本国的 CCS 技术，进行 CCS 技术储备，同时发展并掌握 CCS 核心技术，以备在未来的市场中占据主导地位。

在 2009 年 12 月的哥本哈根气候峰会上，温家宝总理郑重向全世界承诺：到 2020 年，单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~45%。为实现所承诺的目标，中国除了大力提高能源效率和节能降耗外，还需要在国内推广应用 CCS 技术。2008 年 7 月正式投产的华能北京热电厂 CO₂ 捕集示范工程、2009 年 12 月投入运营的华能上海石洞口第二电厂 CO₂ 捕集工程、2010 年 1 月运营的中电投重庆合川双槐电厂 CO₂ 捕集工程等，都证明了中国正在 CCS 上奋起直追。但是，作为发展中国家，在 CCS 技术推广应用上，必须选择适合中国国情的技术和工艺，不能盲目照搬国外的 CCS 技术，争取在经济和 CO₂ 减排方面取得综合优势。因此，我们认为非常有必要详细介绍 CCS 技术的相关工作原理、优势、存在的问题及研究与应用现状，让更多的有志之士能更深刻地了解 CCS 技术并进行

深入的研究，也让更多的人了解 CCS 技术在能源行业中的应用。基于此，我们编写了这本书。在编写过程中，我们力求兼顾不同读者群的需求，使其既可以作为初学者的入门读物，又可以作为能源、电力、环保、化工等行业技术人员研究 CCS 技术的参考书，还可以作为相关专业本科生和研究生教材。

CCS 技术分为 CO₂ 捕集、CO₂ 输送与储存两部分。CO₂ 捕集技术方面，主要详细介绍了燃烧后 CO₂ 捕集技术、燃烧前 CO₂ 分离技术、富氧燃烧技术和化学链燃烧技术等内容；CO₂ 输送与储存技术方面，详细阐述了 CO₂ 的输送、应用与封存固定等内容。全书共分 11 章，第 1 章系统介绍了温室效应和 CO₂ 排放控制现状；第 2 章重点介绍了 CO₂ 吸收分离技术的基本原理、关键技术、工艺设计和工业应用；第 3 章介绍了 CO₂ 吸附分离原理、方法、工艺和应用；第 4 章阐述了新型的 CO₂ 膜分离与膜吸收技术，介绍了膜分离和膜吸收原理、膜材料选择、工艺设计和应用；第 5 章介绍了富氧燃烧技术原理特点和典型工艺；第 6 章系统阐述了化学链燃烧技术的原理和关键过程；第 7 章系统分析了燃烧前控制 CO₂ 排放的动力系统；第 8 章介绍了 CO₂ 的输送技术，重点介绍了管道输送原理、设计方法与应用；第 9 章和第 10 章分别介绍了 CO₂ 用于采油与置换天然气水合物的原理和应用前景；第 11 章从 CO₂ 油气藏封存、咸水层封存、化学固定与生物固定等方面详细介绍了 CO₂ 的封存、固定与利用技术。

本书的编写集中了浙江大学、中国石油大学（北京）、中国科学院、武汉大学、华北电力大学等高校和科研机构长期从事 CCS 技术研究的教授、专家的集体力量，由骆仲泱教授任主编，方梦祥教授、李明远教授任副主编，高林博士、胡基才教授、阎维平教授、郭绪强教授、施耀教授、曾荣树研究员等为编委。其中，第 1 章由浙江大学骆仲泱教授主笔，第 2、4 章由浙江大学方梦祥教授撰写，第 3 章由浙江大学施耀教授编写，第 5 章由华北电力大学阎维平教授编写，第 6、7 章由中国科学院工程热物理研究所高林博士执笔，第 8 章由武汉大学胡基才教授撰写，第 9、11 章由中国石油大学（北京）李明远教授主笔，其中第 11 章第 2 节（咸水层封存）由中国科学院地质与地球物理研究所曾荣树研究员编写。第 10 章由中国石油大学（北京）郭绪强教授撰写。编写过程中，浙江大学骆仲泱教授对全书的编写进行了规划和指导，方梦祥、李明远教授负责全书的统稿和校核工作。本书编写中，也得到了华中农业大学晏水平博士、华东交通大学张卫风博士、天津大学朱德臣博士等同志的大力帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书编写过程中，我们力争清晰反映 CCS 技术的原理和应用，达到科学、实用、先进的目标，但受水平所限，可能有所疏漏和不足，恳请广大读者批评指正。

编者

2012 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 温室效应和 CO₂ 排放控制状况	1
1.1 温室效应及其对环境的影响	1
1.1.1 温室效应与温室气体	1
1.1.2 温室效应的影响	2
1.2 CO ₂ 排放状况	4
1.2.1 全球 CO ₂ 排放	4
1.2.2 电力、工业和交通运输行业的 CO ₂ 排放情况	4
1.2.3 各国 CO ₂ 排放情况	5
1.2.4 温室效应和 CO ₂ 排放	6
1.2.5 减缓 CO ₂ 排放与国际合作	6
1.3 CO ₂ 排放控制技术	8
1.3.1 可再生能源技术	9
1.3.2 先进发电技术	11
1.3.3 节能技术	14
1.4 CO ₂ 捕集与封存技术	15
1.4.1 CO ₂ 捕集技术	16
1.4.2 CO ₂ 封存技术	23
1.4.3 CCS 技术发展现状	27
1.5 国际合作和清洁发展机制	28
1.5.1 清洁发展机制的基本概念	28
1.5.2 我国 CDM 项目概况	29
参考文献	31
第 2 章 CO₂ 吸收分离技术	32
2.1 CO ₂ 吸收分离原理	32
2.1.1 引言	32
2.1.2 CO ₂ 物理吸收分离原理	32
2.1.3 CO ₂ 化学吸收分离原理	35
2.2 CO ₂ 化学吸收分离关键技术	39
2.2.1 典型 CO ₂ 化学吸收分离工艺系统	39
2.2.2 CO ₂ 化学吸收分离的关键技术	40
2.2.3 典型化学吸收技术	44

2.3	CO ₂ 化学吸收分离工艺设计	47
2.3.1	收集基础资料, 明确设计目标	47
2.3.2	吸收剂种类和浓度比选	48
2.3.3	物料平衡计算	50
2.3.4	填料吸收塔和解吸塔设计	53
2.4	CO ₂ 化学吸收工业应用	58
2.4.1	国外应用状况	59
2.4.2	国内应用状况	62
2.5	CO ₂ 物理吸收分离技术	65
	参考文献	68
第3章	CO₂ 吸附分离技术	69
3.1	吸附分离原理	69
3.1.1	吸附技术背景	69
3.1.2	吸附机理	69
3.2	吸附分离 CO ₂ 技术	72
3.2.1	吸附分离基本原理	72
3.2.2	变温吸附法	73
3.2.3	变压吸附法	73
3.2.4	CO ₂ 吸附剂	74
3.3	吸附工艺	82
3.3.1	固定床	82
3.3.2	流化床	82
3.3.3	移动床	83
3.4	CO ₂ 吸附工业应用	83
3.4.1	变压吸附 (PSA)	83
3.4.2	低压变压吸附 (VPSA)	84
	参考文献	85
第4章	CO₂ 膜分离和膜吸收技术	87
4.1	CO ₂ 膜分离原理	87
4.1.1	膜及膜分离的概念	87
4.1.2	气体膜分离原理	88
4.2	CO ₂ 膜分离材料	93
4.2.1	气体分离膜材料	93
4.2.2	气体分离膜材料的评价	95
4.3	CO ₂ 膜分离工艺设计	98
4.3.1	膜分离器	98
4.3.2	系统及工艺流程	99
4.3.3	促进传递膜	102
4.4	CO ₂ 膜分离工业应用	104

4.4.1	天然气脱酸性气体	104
4.4.2	生物气(沼气)脱除 CO ₂	105
4.4.3	油田气脱除 CO ₂	105
4.5	CO ₂ 膜吸收技术和工艺设计	106
4.5.1	中空纤维膜接触器	107
4.5.2	CO ₂ 在中空膜接触器中的传质	107
4.5.3	CO ₂ 膜吸收法的工艺设计	110
	参考文献	115
第5章	富氧燃烧技术	117
5.1	富氧燃烧技术的基本原理与类型	117
5.1.1	富氧燃烧的技术背景	117
5.1.2	富氧燃烧技术的基本原理与特点	118
5.1.3	富氧燃烧技术的主要类型	119
5.1.4	富氧燃烧技术的经济性分析	120
5.2	空气分离制氧技术	121
5.2.1	制氧技术概述	121
5.2.2	深度冷冻技术	121
5.2.3	变压吸附(PSA)技术	123
5.2.4	膜法富氧技术	123
5.2.5	离子输运膜技术(ITM)	124
5.3	煤粉锅炉富氧燃烧技术	124
5.3.1	系统简述	124
5.3.2	煤粉在 O ₂ /CO ₂ 气氛下的燃烧与污染物排放特性	125
5.3.3	富氧煤粉燃烧器的设计特点	126
5.3.4	富氧燃烧锅炉的设计与传热特点	127
5.3.5	烟气再循环系统	128
5.3.6	煤粉制备与锅炉辅机	131
5.3.7	氧气与烟气的混合	132
5.4	循环流化床锅炉富氧燃烧技术	133
5.4.1	循环流化床空气燃煤锅炉的炉膛设计特点	133
5.4.2	循环流化床富氧燃煤锅炉的炉膛设计特点	134
5.4.3	循环流化床富氧燃煤锅炉的主要特点	134
5.5	增压富氧燃煤流化床锅炉整体化发电技术	135
5.5.1	常压富氧燃烧与捕集 CO ₂ 系统的分析	135
5.5.2	增压富氧燃烧与捕集 CO ₂ 整体发电系统	135
5.6	氧气与空气混合富氧燃烧技术	137
5.6.1	技术背景	137
5.6.2	烟气中 CO ₂ 的分离与捕集	137
5.6.3	主要优点	138

5.7 蒸汽调温的富氧燃烧技术	138
5.7.1 基本原理与系统	138
5.7.2 主要技术特点	139
参考文献	140
第6章 化学链燃烧技术	141
6.1 化学链燃烧原理	141
6.2 化学链燃烧关键问题	142
6.2.1 氧载体的制备及其反应性	142
6.2.2 化学链燃烧反应器的设计和运行	146
6.2.3 化学链燃烧系统集成优化及系统分析	148
6.3 其他化学链循环系统的研究	152
6.3.1 化学链重整	152
6.3.2 太阳能—金属氧化物碳热还原	155
6.3.3 太阳能驱动的水分解研究	155
参考文献	155
第7章 燃烧前控制 CO₂ 排放的动力系统	161
7.1 CO ₂ 分离过程理论基础	161
7.1.1 理论基础	161
7.1.2 不同 CO ₂ 分离方式的能量利用对比	163
7.2 IGCC 系统 CO ₂ 分离	166
7.2.1 IGCC 系统	166
7.2.2 IGCC 系统中 CO ₂ 分离技术	166
7.3 控制 CO ₂ 排放的多联产系统	168
7.3.1 控制 CO ₂ 分离的煤基甲醇多联产系统	168
7.3.2 零能耗分离 CO ₂ 的双燃料制氢多功能系统	177
7.4 控制 CO ₂ 分离的 IGCC 能源动力系统	183
7.4.1 内外燃煤一体化联合循环发电系统	183
7.4.2 控制 CO ₂ 排放的双循环 IGCC 系统	188
参考文献	191
第8章 CO₂ 输送技术	194
8.1 CO ₂ 的输送方式	194
8.1.1 罐车运输	194
8.1.2 船舶运输	195
8.1.3 管道运输	196
8.2 CO ₂ 管道输送原理及其他相关问题	196
8.2.1 CO ₂ 管道输送原理	196
8.2.2 CO ₂ 管道输送关键技术	198
8.2.3 其他相关问题	198
8.3 CO ₂ 管道输送系统设计	200

8.3.1	管道设计	200
8.3.2	CO ₂ 管道输送系统的压缩方案	201
8.4	CO ₂ 输送系统工业应用	203
	参考文献	207
第9章	CO₂ 采油	208
9.1	CO ₂ 采油的基本原理	208
9.1.1	CO ₂ 混相驱与非混相驱	208
9.1.2	CO ₂ 采油机理	210
9.1.3	CO ₂ 采油的影响因素	212
9.2	沥青质沉积对原油/水界面张力的影响	219
9.2.1	原油/水界面张力的测定	219
9.2.2	沥青质沉积对原油/水界面张力的影响	219
9.3	CO ₂ /水/岩石的相互作用	221
9.3.1	CO ₂ 与水、岩石作用对地层渗透率的影响	221
9.3.2	CO ₂ 与水、岩石作用对结垢的影响	223
9.4	CO ₂ 采油技术及发展趋势	224
9.4.1	CO ₂ 采油技术	224
9.4.2	CO ₂ 采油在国外的的发展	224
9.4.3	CO ₂ 采油在国内的发展	230
9.4.4	CO ₂ 采油发展趋势	230
	参考文献	231
第10章	CO₂ 置换法开发天然气水合物	233
10.1	甲烷和 CO ₂ 水合物的性质	234
10.2	CO ₂ 置换法开发天然气水合物中甲烷的热力学	236
10.2.1	置换反应的相平衡实验	236
10.2.2	水合物相平衡计算模型	242
10.2.3	CO ₂ - CH ₄ 体系生成水合物的 V - H 相平衡计算	247
10.2.4	CO ₂ 水合物和 CH ₄ 水合物的分解/生成热	247
10.3	置换反应的化学平衡	248
10.4	置换反应的动力学	248
10.4.1	置换反应的动力学实验	248
10.4.2	置换反应过程的机理	251
10.4.3	置换反应过程的强化方法研究	251
10.4.4	置换反应的动力学模型和计算	253
	参考文献	256
第11章	CO₂ 封存及固定利用	261
11.1	CO ₂ 油气藏封存	261
11.1.1	CO ₂ 在枯竭油气藏的封存	261
11.1.2	CO ₂ 在原油开采中的封存	263

11.1.3	油气藏封存 CO ₂ 的影响因素	263
11.2	咸水层封存	265
11.2.1	概述	265
11.2.2	CO ₂ 深部咸水层封存机制	266
11.2.3	数值模拟方法在 CO ₂ 封存中的应用	269
11.2.4	CO ₂ 封存和监测	272
11.2.5	咸水层封存 CO ₂ 实例	274
11.3	CO ₂ 化学固定	276
11.3.1	CO ₂ 的工业利用	276
11.3.2	矿物碳化固定	279
11.4	CO ₂ 生物固定	284
11.4.1	森林固定	285
11.4.2	微生物固定	287
	参考文献	291

第 1 章

温室效应和 CO₂ 排放控制状况

本章提要 当前，温室效应和全球变暖是全球的热点问题。本章首先介绍了温室效应及其对环境的影响，温室效应与 CO₂ 的关系以及 CO₂ 的排放现状；其次，阐述了各国所采取的 CO₂ 减排措施，包括提高能源利用效率、积极利用新能源和可再生能源以及 CO₂ 的捕获与封存技术；最后，介绍了国际合作和清洁发展机制（CDM）。

1.1 温室效应及其对环境的影响

1.1.1 温室效应与温室气体

温室效应是大气层的一种物理特性。大气层对太阳短波辐射的吸收很少，地表接收大量的太阳短波辐射而升温，并以长波辐射形式向外辐射能量。地面长波辐射绝大部分被大气中的水蒸气、CO₂、臭氧、甲烷等气体吸收，从而加热大气。大气被加热后也以长波辐射的形式向外辐射能量，其中很大一部分辐射能又返回地表（如图 1-1 所示），使地表温

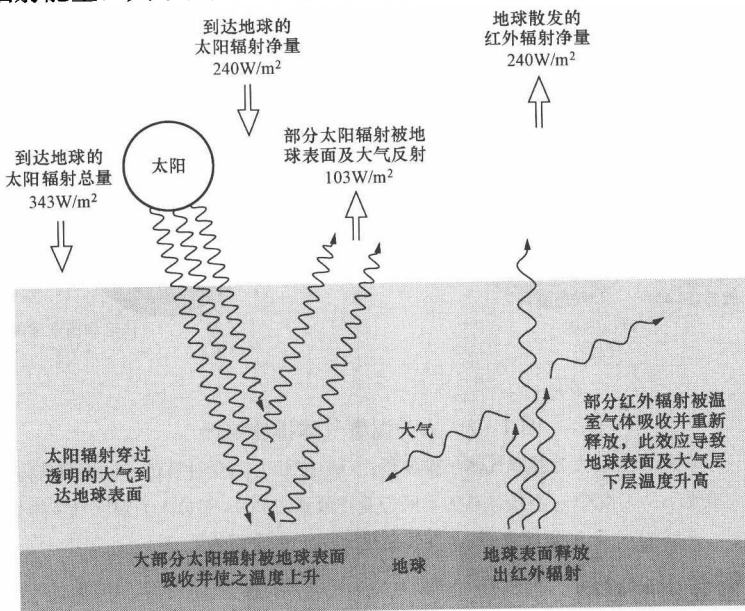


图 1-1 地球大气层热量辐射平衡图



度不会下降太快。这种类似于农业上的温室保温的作用称为温室效应。

由于温室效应，地表年平均气温保持在 15℃ 左右；若无温室效应，地球温度将降至 -18℃，所以适度的温室效应创造了适合生物生存的地球热环境。

引起温室效应的气体，如 CO₂、甲烷、各种氟氯烃、臭氧和水蒸气等，称为温室气体。大气中水蒸气的含量要高于 CO₂ 等人为的温室气体，是导致自然温室效应的主要气体。研究表明，在中纬度地区晴朗天气下，水蒸气对温室效应的影响占 60%~70%，CO₂ 仅占 25%。但水蒸气在大气中的含量相对稳定，因此，目前普遍认为大气中的水蒸气不直接受人类活动的影响；而以 CO₂ 为主的人为排放温室气体，随着人类工农业活动的发展，排放量在逐年增加，因此，目前各国主要关注各种人为温室气体的排放情况。各种人为温室气体排放量及其对温室效应的贡献如图 1-2 所示。尤其是 CO₂，其对温室效应的贡献超过了其他人为温室气体，成为对温室效应贡献最大的人为温室气体，其中，化石燃料所排放的 CO₂ 占温室气体总排放量的 56.6%。

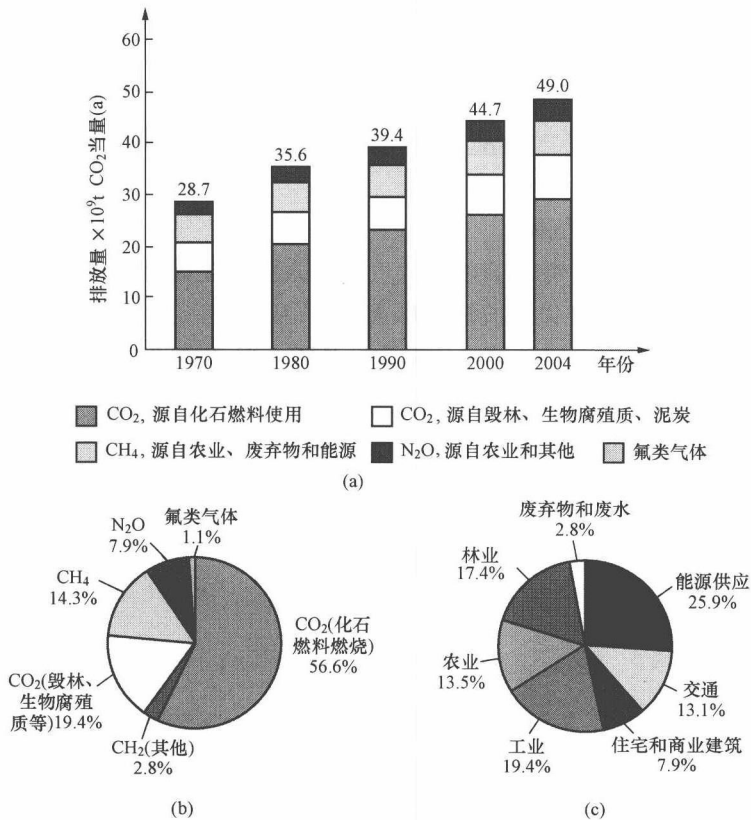


图 1-2 人为温室气体排放统计

(a) 1970~2004 年，全球人为温室气体年排放量；(b) 按 CO₂ 当量计算的不同温室气体占 2004 年总排放的份额；(c) 按 CO₂ 当量计算的不同行业排放量占 2004 年总人为温室气体排放的份额

数据来源：《气候变化 2007：综合报告》。

1.1.2 温室效应的影响

温室效应的加剧必然导致全球变暖，气候变化已成为影响人类生存和发展的重要



因素。

1. 冰川消退，海平面上升

气候变暖，使极地及高山冰川融化，从而使海平面上升。气温升高导致海水受热膨胀，也会使海平面上升。观测表明，近 100 余年来海平面上升了 14~15cm；据预测，未来海平面将继续上升，如表 1-1 所示。

表 1-1 未来海平面变化的预测

预测者	预测年份	上升量 (cm)
世界气象组织 (WMO)	2050	20~140
Mercer	2030	500
日本环境厅	2030	26~165
Bloom	2030	100
欧洲共同体	21 世纪末	20~165
Barth & Titus	2050	13~55
联合国环境规划署 (UNEP)	21 世纪末	65

海平面上升会直接导致低地被淹、海岸侵蚀加重、排洪不畅、土地盐渍化和海水倒灌等问题。若地球温度按现在的速度继续升高，预测到 2050 年，南北极冰山将大幅度融化，上海、东京、纽约和悉尼等沿海城市将被淹没。

2. 气候带北移，引发生态问题

据估计，若气温升高 1℃，北半球的气候带将平均北移约 100km；若气温升高 3.5℃，则会向北移动 5 个纬度左右。这样，占陆地面积 3% 的苔原带将不复存在，冰岛的气候可能与苏格兰相似，而我国徐州、郑州冬季的气温也将与现在的武汉或杭州差不多。

如果物种迁移适应的速度落后于环境的变化速度，则该物种可能濒于灭绝。据世界自然保护基金会 (WWF) 的报告，若全球变暖的趋势不能被有效遏制，到 2100 年，全世界将有 1/3 的动物栖息地发生根本性变化，这将导致大量物种因不能适应新的生存环境而灭绝。

气候变暖很可能造成某些地区虫害与病菌传播范围扩大，昆虫群体密度增加。温度升高会使热带虫害和病菌向较高纬度蔓延，使中纬度面临热带病虫害的威胁。同时，气温升高可能使这些病虫的分布区扩大、生长季节加长，并使多世代害虫繁殖代数增加，一年中危害时间延长，从而加重农林灾害。

3. 加重区域性自然灾害

全球变暖会加大海洋和地表水的蒸发速度，从而改变降水量和降水频率在时间和空间上的分布。研究表明，一方面，全球变暖使世界上缺水地区降水量和地表径流减少，加重了这些地区的旱灾，也加快了土地荒漠化的速度；另一方面，气候变暖又使雨量较大的热带地区降水量进一步增大，从而加剧洪涝灾害的发生。此外，全球变暖还会使局部地区在短时间内发生急剧的天气变化，导致气候异常，造成高温、热浪、热带风暴、龙卷风等自然灾害加重。



4. 危害人类健康

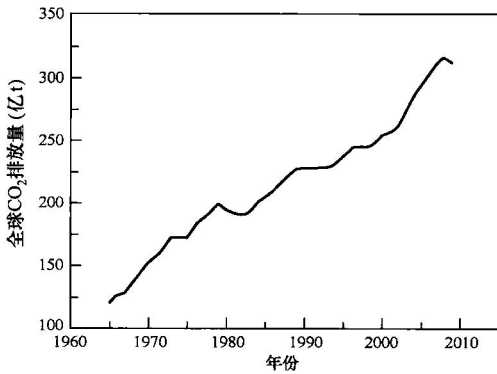
温室效应导致极热天气出现频率增加，使心血管和呼吸系统疾病的发病率上升，同时还会加速流行性疾病的传播和扩散，从而直接威胁人类健康。

当然，全球变暖，大气中 CO₂ 浓度升高，有利于植物的光合作用，可扩大植物的生长范围，从而提高植物的生产力。但整体来看，温室效应及其引发的全球变暖是弊大于利，因此必须采取各种措施来控制温室效应，抑制全球变暖。

1.2 CO₂ 排放状况

1.2.1 全球 CO₂ 排放

自工业革命以来，全球经济总体上保持了一个较高的增长速度，工业和交通运输业所占的比重在相当长的时间内持续上升，化石燃料的消费量也迅速增加，由此导致了 CO₂ 排放量的急剧增加。图 1-3 为 1965~2009 年全球 CO₂ 排放总量的变化情况。虽然全球 CO₂ 排放总量出现过细微波动，但总体而言，全球 CO₂ 排放总量呈持续增长态势，从



1965 年的 119.3 亿 t 增长到 2009 年的 311.3 亿 t，增长了约 160.94%。

图 1-3 1965~2009 年全球 CO₂ 排放总量

数据来源：BP Report, Statistical review of world energy 2010。

1.2.2 电力、工业和交通运输行业的 CO₂ 排放情况

由于全球化石燃料的消费主要集中在工业、电力和交通运输等行业，故全球人为因素引起的 CO₂ 排放亦主要集中在这几个行业。图 1-4 为 1970~2004 年各主要行业的 CO₂ 排放量变化，其排放量约占全球 CO₂ 排放总量的 63.09%~72.96%，其中，电力行业的 CO₂ 排放呈快速增长的趋势，交通运输业的 CO₂ 排放增长也很快。

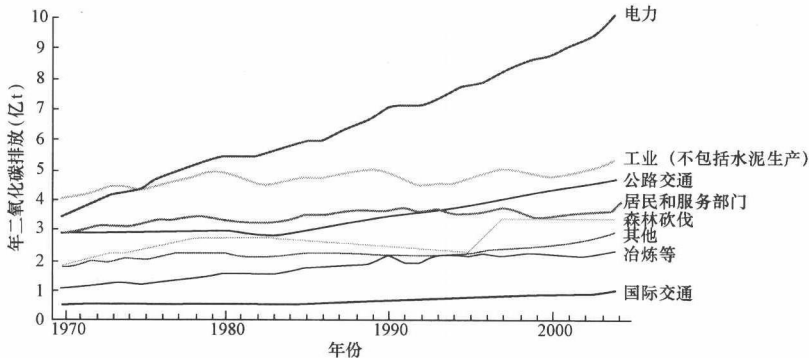


图 1-4 1970~2004 年全球不同行业 CO₂ 排放量

数据来源：BP Report, Statistical review of world energy 2010。



由于上述行业都是能源密集型行业，其 CO₂ 排放强度都很高，所以许多工业化国家正逐步转变能源消费结构，实现由化石能源消费向清洁能源消费的转变，降低对化石能源的依赖，促进减排技术的研发和应用，积极探索和推广 CO₂ 捕获和封存技术，进而减少因利用化石燃料导致的 CO₂ 排放量增加，减缓全球气候变化的速度。然而，由于资源分布和技术水平的制约，随着发展中国家电气化水平的提高和经济的发展，到 21 世纪中叶，电力、工业和交通运输业等仍将是主要的 CO₂ 排放源。

1.2.3 各国 CO₂ 排放情况

蒸汽机的发明，使得煤炭代替薪材成为工业化国家主要的能源，煤炭燃烧排放了大量的 CO₂。随着工业化进程的推进，内燃机的发明又使石油成为工业化国家最主要的能源，尤其是二次世界大战之后，工业化国家的工业和经济迅速发展，以化石燃料为主的一次能源消费量和 CO₂ 排放量也迅速增加，如图 1-5 所示。

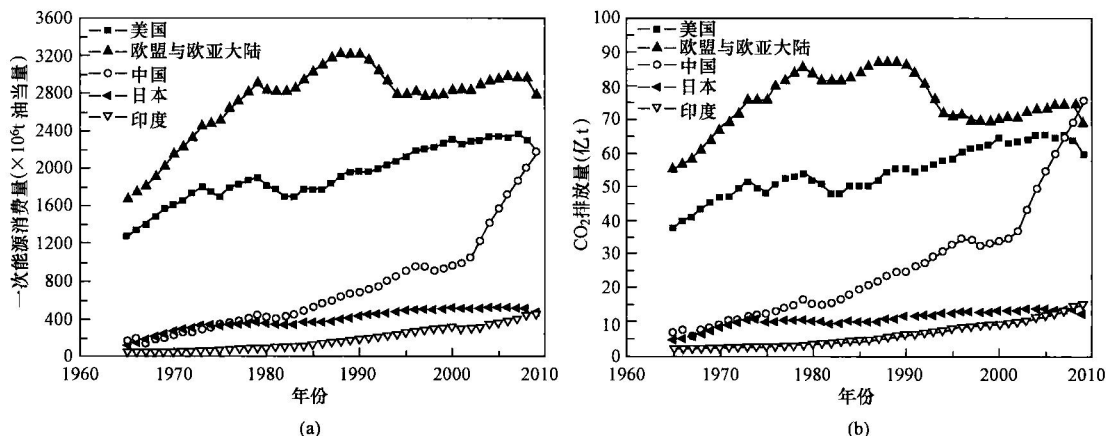


图 1-5 1965~2009 年典型国家和地区的一次能源消费和 CO₂ 排放量

(a) 能源消费量；(b) CO₂ 排放量

数据来源：BP Report, Statistical review of world energy 2007, 2010。

近年来，随着科技的进步，清洁能源在工业化国家能源结构中的比重越来越高，煤炭等化石燃料的份额呈下降趋势。尽管如此，全球的化石能源消费和 CO₂ 排放仍然主要集中在工业化国家，2007 年世界化石燃料 CO₂ 总排放量为 289.6 亿 t，如图 1-6 所示。其中，工业化国家的 CO₂ 排放量约占全球 CO₂ 排放量的 70% 以上，由于发展中国家的工业起步较晚，在历史上的化石燃料消费有限，虽然近年来，一些发展中国家的工业和经济发展速度很快，化石燃料消费量和 CO₂ 排放量也迅速增加，但仍远远低于发达国家。2007 年发展中国家的

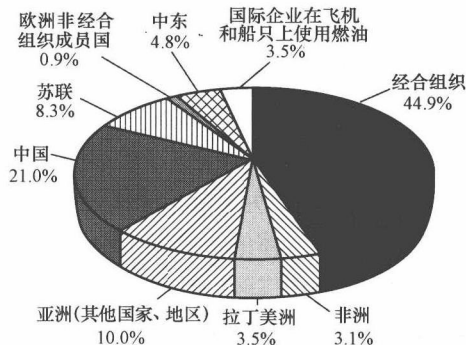


图 1-6 2007 年世界主要国家和地区的化石燃料 CO₂ 排放份额



CO₂ 排放量仅占全球总排放量的 30%左右，其中，我国所占比例最大，达到 21%。因此，发展中国家的 CO₂ 排放仍属于生存型排放。未来发展中国家的能源消费和 CO₂ 排放必然呈现快速增长的趋势，这是工业化发展的必然。

1.2.4 温室效应和 CO₂ 排放

工业革命以来，全球平均气温呈现出逐年升高的趋势，如图 1-7 所示。20 世纪 80 年代以来，应对温室效应加剧的紧迫性和重要性开始逐渐被各国所重视，而“未来气候变化会达到何种程度、气温升高多少会是自然界的临界值”这一命题，已成为一个必须确定的问题。

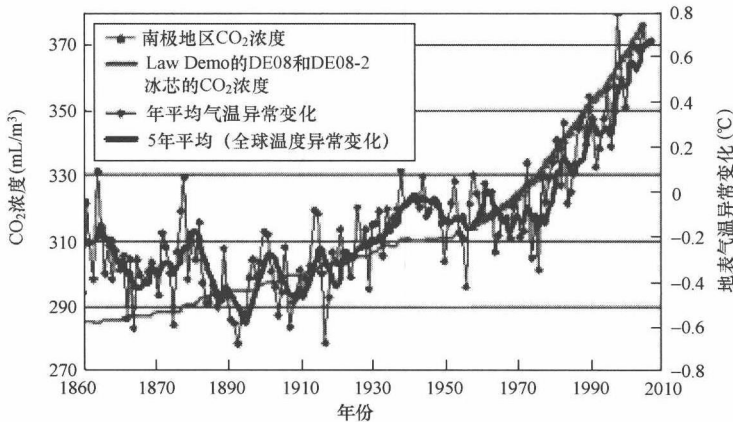


图 1-7 工业革命开始以来全球气温变化

联合国环境规划署的温室气体咨询小组在 1990 年的报告中指出：全球气温升高 2℃ 可能是一个上限，一旦超过，可能导致严重破坏生态系统的风险，其恶果将非线性增加。德国联邦议会的研究委员会也认为，每 10 年气候变暖超过 0.1℃，将对森林生态系统非常危险。德国政府的气候变化咨询委员会 1995 年发现，2℃ 应该是可容忍的气候变暖的上限。

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 认为，多种因素的叠加将使全球升温很快突破 2℃ 这个临界点；当全球平均温度上升的幅度在 1~2℃ 之间时，遭遇水资源短缺和洪灾的风险将增加；当气温上升超过 2℃ 时，将是灾难性气候变化的开始，产生的影响将更巨大；尤其当大气中 CO₂ 浓度超过 500mL/m³，海洋和热带雨林将净排放温室气体，而不是像现在这样吸收 CO₂，从而将推动全球温度进一步提升，海平面进一步升高，导致 90% 的物种灭绝。

1.2.5 减缓 CO₂ 排放与国际合作

CO₂ 等温室气体的影响具有全球性和长期性，与经济发展、能源利用之间存在密切关系。为了缓解全球气候变化对人类造成灾难性的影响，1992 年 6 月在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，会议缔约了《联合国气候变化框架公约》，并于 1994 年 3 月 21 日正式生效。这是世界上第一个为全面控制 CO₂ 等温室气体排放、应对气候变暖给人类经济和社会带来不利影响的国际公约，也是国际社会在应对全球气候变化问题上进行国际