朱跃钊　廖传华　王重庆　朱廷风　编著

二氧化碳的减排与资源化利用

化学工业出版社

朱跃钊　廖传华　王重庆　朱廷风　编著

二氧化碳的减排与资源化利用

Mitigation and Recovering of Carbon Dioxide

化学工业出版社
·北京·

本书概括性地介绍了 CO_2 产生的温室效应机理以及随着大气中 CO_2 浓度呈指数上升对全球气候和生态环境产生的负面影响；详细阐述了新型高效的 CO_2 分离回收技术、CO_2 封存技术、固定源和流动源的减排 CO_2 工艺技术，提高能效和新型能源技术等；随后针对我国的具体情况阐述了二氧化碳减排的具体措施和综合利用途径。

本书适合化工、发电、冶金行业的科技工作者，节能减排工作管理者以及相关工程技术人员阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

二氧化碳的减排与资源化利用/朱跃钊等编著．
北京：化学工业出版社，2010.10
ISBN 978-7-122-09409-4

Ⅰ.二… Ⅱ.朱… Ⅲ.①二氧化碳-减量-排气-研究②二氧化碳-废物综合利用-研究 Ⅳ.X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 168488 号

责任编辑：戴燕红　　文字编辑：陈　雨
责任校对：徐贞珍　　装帧设计：史利平

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号　邮政编码 100011）
印　　刷：北京永鑫印刷有限责任公司
装　　订：三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm　1/16　印张 16　字数 390 千字　　2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899
网　　址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：68.00 元

版权所有　违者必究

前　言

伴随着高温、洪涝、干旱等灾害性天气的出现，节能减排被提到了前所未有的高度，因为这关系到气候变化；关系到经济增长方式的转变；关系到我们民族发展的未来。

CO_2 是人类活动中排放量最大的温室气体。因此，在满足日益增加的社会经济发展和人民生活需要的能源消费的同时，又使大气中 CO_2 浓度保持在一个可以接受的水平，这是一项十分困难而具有挑战性的任务，必须全球协作共同努力去实现这一战略性目标。为此，可从三个方面入手：一是兑现《京都议定书》上规定的承诺；二是改变能源结构、产业结构、产品结构和人民生活方式，提高能源利用效率，开发非矿产、可再生能源，进一步控制人口数量；三是建立有效的适合各种场所分离回收 CO_2 的一整套创新技术，CO_2 封存技术，固定源和流动源减排 CO_2 工艺技术和利用 CO_2 作为碳资源循环加以利用，可使地球在因 CO_2 引发生态环境危机到来之前制止这种灾难的发生。减排 CO_2 工艺技术将为社会、经济和生态的持续发展找到一条唯一可供选择的最佳途径。

有鉴于此，我们编著了这本《二氧化碳的减排与资源化利用》。全书共分 7 章。第 1 章概括性地对 CO_2 产生的温室效应机理以及发展趋势进行了分析；指出 CO_2 浓度的上升呈指数函数增加，对全球气候和生态环境产生重大的深远的负面影响，《京都议定书》的生效给我国带来挑战和机遇。粗放型的经济增长模式导致我国 CO_2 减排压力日益增加，必须发展新型高效的 CO_2 分离回收技术、CO_2 封存技术、固定源和流动源的减排 CO_2 工艺技术，提高能效和新型能源技术等，为此介绍了国内外二氧化碳的处置现状。第 2 章详细介绍了二氧化碳的几种分离技术。第 3 章针对中国几种主要排放源的特点，详细介绍了其减排二氧化碳的措施。第 4 章详细讲述了几种二氧化碳封存技术的研究现状及存在的风险。第 5 章详细介绍了包括生物质能、太阳能、风能、海洋能等的可再生能源技术对我国未来二氧化碳减排的贡献，指出大力推广应用可再生能源是我国实施二氧化碳减排的一个重要方向。第 6 章讲述了二氧化碳的主要应用领域，为实现二氧化碳的资源化利用提供了依据。第 7 章针对目前中国经济的发展趋势，提出了实施二氧化碳减排时应采用的相应措施与对策。

本书由南京工业大学朱跃钊、廖传华、王重庆和朱廷风编著，全书由廖传华统稿。在编写过程中，南京工业大学黄振仁教授给予了热情的关心和支持，并提出了许多宝贵的建议，在此深表感谢。

特别感谢南京工业大学学科基金对本书编著工作的支持与资助。

本书虽经多次审稿、修改，但由于作者的水平有限，不妥及疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正，作者将不胜感激。

编者

2010 年 9 月于南京工业大学

目　录

第 1 章　概述 …… 1

1.1　温室效应对生态环境的负面影响及发展趋势 …… 1

1.1.1　温室效应 …… 1

1.1.2　温室效应对生态环境的负面影响 …… 2

1.1.3　温室气体增长的态势 …… 3

1.2　《京都议定书》带来的挑战和机遇 …… 4

1.2.1　《京都议定书》 …… 4

1.2.2　减排机制 …… 5

1.2.3　控制温室气体的国际动态 …… 5

1.2.4　面临《京都议定书》的挑战与机遇 …… 6

1.3　中国的能源利用与温室气体排放 …… 7

1.4　联合履约的经济和环境效益 …… 9

1.5　二氧化碳的处置现状 …… 10

1.5.1　生物技术 …… 10

1.5.2　能源革新 …… 11

1.5.3　二氧化碳的收集 …… 12

1.5.4　二氧化碳的地质储存 …… 13

1.5.5　二氧化碳的海洋储存 …… 14

1.5.6　二氧化碳处置的安全性 …… 15

参考文献 …… 16

第 2 章　二氧化碳的分离方法 …… 18

2.1　液相吸收法 …… 18

2.1.1　物理吸收法 …… 18

2.1.2　化学吸收法 …… 21

2.1.3　物理化学吸收法 …… 29

2.2　变压吸附法 …… 30

2.2.1　吸附的类型及其应用 …… 30

2.2.2　变压吸附的基本原理和工艺过程 …… 31

2.2.3　变压吸附二氧化碳的装置流程和适用条件 …… 32

2.2.4　应用实例 …… 33

2.2.5　变压吸附二氧化碳的工艺特点 …… 34

2.3　化学循环燃烧 …… 34

2.3.1　化学循环燃烧工艺 …… 35

2.3.2　载氧体 …… 35

2.4　空气分离/烟气再循环法 …… 37

2.4.1 空气分离/烟气再循环技术的提出 …… 37
2.4.2 空气分离/烟气再循环技术特点 …… 39
2.4.3 尚待解决的问题 …… 40
2.5 膜分离法 …… 41
2.5.1 膜法分离二氧化碳的原理及其工艺流程 …… 41
2.5.2 膜材料 …… 41
2.5.3 膜材料的改性 …… 43
2.5.4 国外酸性气体二氧化碳分离膜的研究 …… 44
2.5.5 国内酸性气体二氧化碳分离膜的研究 …… 45
2.5.6 膜组件 …… 46
2.5.7 气体膜分离技术分离酸性气体二氧化碳的发展前景 …… 46
2.6 低温液化分离法 …… 46
2.6.1 低温液化分离二氧化碳流程 …… 47
2.6.2 两种流程的性能比较 …… 48
2.7 新型可回收烟道气二氧化碳的能源系统 …… 48
2.7.1 天然气和烟气三重整反应原理 …… 49
2.7.2 新型可回收烟道气二氧化碳的多联产能源系统 …… 50
2.7.3 新型可回收二氧化碳的多联产能源系统的初步分析 …… 51
2.7.4 尚需解决的关键性科学问题 …… 53
参考文献 …… 53

第 3 章 主要排放源的二氧化碳减排 …… 57
3.1 中国二氧化碳排放源现状分析 …… 57
3.1.1 能源和工业排放源 …… 57
3.1.2 计算二氧化碳排放源存在的不确定性 …… 58
3.2 火电厂的二氧化碳减排 …… 59
3.2.1 提高热力发电的效率 …… 59
3.2.2 采用先进的发电技术 …… 60
3.2.3 火电厂二氧化碳的减排 …… 61
3.2.4 减排二氧化碳时的系统设计 …… 61
3.2.5 各系统减排二氧化碳的性能分析 …… 64
3.2.6 各系统减排二氧化碳的经济性分析 …… 65
3.3 水泥厂二氧化碳的减排 …… 68
3.3.1 水泥生产过程的二氧化碳排放量 …… 68
3.3.2 减排二氧化碳的措施 …… 69
3.3.3 2008～2012 年中国水泥产量预测和二氧化碳减排潜力分析 …… 72
3.4 钢铁厂二氧化碳的减排 …… 74
3.4.1 钢铁企业的生产过程 …… 74
3.4.2 钢铁工业二氧化碳的排放现状 …… 75
3.4.3 二氧化碳排放影响因素分析 …… 77
3.4.4 钢铁工业 CO_2 减排的主要措施 …… 77

3.4.5 应用太阳能减少炼铁过程中二氧化碳的排放 …… 79
3.5 工业锅炉二氧化碳的减排 …… 82
3.5.1 工业锅炉能源浪费的主要表现 …… 83
3.5.2 影响工业锅炉能耗偏高的因素 …… 83
3.5.3 工业锅炉的节能减排技术 …… 85
3.6 农村户用沼气工程建设对二氧化碳减排的贡献 …… 86
3.6.1 中国农村生活能源消费及户用沼气的发展 …… 86
3.6.2 中国农村户用沼气建设对减排二氧化碳的贡献 …… 88
3.7 交通运输业的二氧化碳减排 …… 90
3.7.1 公路运输业能源消耗现状 …… 91
3.7.2 制约我国公路运输节能降耗的主要因素 …… 91
3.7.3 公路运输节能降耗的主要途径 …… 92
3.7.4 公路运输节能降耗的对策措施 …… 97
参考文献 …… 98

第 4 章 二氧化碳的封存 …… 100
4.1 二氧化碳封存技术 …… 100
4.1.1 二氧化碳封存技术 …… 100
4.1.2 国外二氧化碳封存项目的研发进展 …… 101
4.1.3 二氧化碳封存的环境和安全性分析 …… 103
4.2 二氧化碳的生态封存 …… 104
4.2.1 森林碳汇 …… 104
4.2.2 湿地碳汇 …… 107
4.2.3 城市园林绿地的生态环境效应 …… 108
4.2.4 海洋生物固碳 …… 109
4.3 二氧化碳的地质封存 …… 110
4.3.1 二氧化碳地质封存的机制 …… 110
4.3.2 二氧化碳地质封存的地点 …… 111
4.3.3 碳收集封存的 3 大环节 …… 112
4.3.4 国外二氧化碳地质封存技术的进展 …… 113
4.3.5 碳捕获的技术经济评价 …… 113
4.3.6 碳收集封存对全球减缓碳排放的作用 …… 115
4.3.7 二氧化碳地质封存的风险和环境影响 …… 115
4.3.8 允许二氧化碳地质封存的新法规 …… 116
4.4 二氧化碳的海洋封存 …… 117
4.4.1 海底封存的构想 …… 117
4.4.2 海洋封存的方法及研究现状 …… 118
4.4.3 添加剂对二氧化碳水合物形成的影响 …… 120
4.4.4 海洋碳库的一般特征 …… 123
4.4.5 海洋对二氧化碳的吸收及其通量的估算 …… 125
4.4.6 海洋生态系统在海洋碳循环中的作用 …… 127

4.4.7 深海封存存在的问题 …… 127
4.5 二氧化碳的矿物封存 …… 129
4.5.1 碳酸化体系的反应动力学与机理 …… 130
4.5.2 矿物碳酸化固定原料的选择 …… 131
4.5.3 碳化体系的化学与热力学 …… 131
4.5.4 矿物碳酸化固定的工艺路线 …… 132
4.5.5 国外二氧化碳矿物碳酸化固定的研究进展 …… 135
4.6 二氧化碳置换天然气水合物 …… 137
4.6.1 天然气水合物的一般开发方式 …… 138
4.6.2 二氧化碳置换 CH_4 的工艺流程 …… 139
4.6.3 二氧化碳置换 CH_4 技术的可行性 …… 139
4.7 二氧化碳捕集与封存对我国社会发展的潜在作用 …… 141
4.7.1 二氧化碳捕集与封存对我国社会发展的影响 …… 141
4.7.2 二氧化碳封存方法的优点与不足 …… 143
4.8 我国远期减缓碳排放的对策 …… 144
参考文献 …… 146

第 5 章 可再生能源技术对我国未来二氧化碳减排的贡献 …… 151
5.1 生物质能源 …… 152
5.1.1 生物质能资源 …… 152
5.1.2 生物质能的利用方式 …… 153
5.1.3 国外生物质能发展概况 …… 159
5.1.4 我国生物质能发展现状 …… 160
5.1.5 生物质能对二氧化碳减排的贡献 …… 161
5.2 太阳能 …… 162
5.2.1 太阳能的利用 …… 163
5.2.2 太阳能热发电 …… 163
5.2.3 世界太阳能技术现状 …… 167
5.2.4 太阳能利用技术对我国未来二氧化碳减排作用的估计 …… 167
5.2.5 我国的太阳能利用 …… 169
5.2.6 太阳能利用技术的发展趋势 …… 170
5.3 风能 …… 170
5.3.1 风能的特性 …… 170
5.3.2 风能利用的几种基本形式 …… 171
5.3.3 风力发电的特点和优势 …… 171
5.3.4 全球风力发电的概况及其趋势 …… 173
5.3.5 我国风能技术的现状 …… 175
5.3.6 风能技术的发展方向 …… 177
5.3.7 风能与其他能源互补发电系统 …… 179
5.4 海洋能 …… 181
5.4.1 潮汐能 …… 182

5.4.2 波浪能 …… 183
5.4.3 温差能 …… 186
5.4.4 海流能 …… 187
5.4.5 盐差能 …… 188
5.4.6 能源岛 …… 188
5.5 燃料电池发电 …… 189
5.5.1 燃料电池的基本原理和供能方式 …… 189
5.5.2 固体氧化物燃料电池本体的研究 …… 189
5.5.3 燃料电池的供能方式 …… 190
5.6 地热能 …… 190
5.6.1 地热能的类型及分布 …… 191
5.6.2 地热能发电 …… 192
5.6.3 地热能的直接利用 …… 193
5.6.4 地热能的环境效应 …… 194
5.7 可燃冰 …… 195
参考文献 …… 195

第 6 章 二氧化碳的资源化利用 …… 197
6.1 在无机化工生产中的应用 …… 197
6.2 在有机化工生产中的应用 …… 198
6.2.1 二氧化碳催化加氢 …… 198
6.2.2 制合成气 …… 209
6.2.3 制备 $C_1 \sim C_2$ 混合醇 …… 211
6.2.4 合成混合燃料 …… 211
6.2.5 二氧化碳合成酯和羧酸 …… 212
6.2.6 二氧化碳合成胺 …… 214
6.2.7 合成甲酸及其衍生物 …… 214
6.2.8 合成醛类 …… 216
6.2.9 其他 …… 216
6.3 在有机高分子化合物合成中的应用 …… 217
6.4 在超临界流体技术中的应用 …… 218
6.4.1 超临界二氧化碳的优点 …… 219
6.4.2 超临界二氧化碳萃取技术在食品工业中的应用 …… 219
6.4.3 超临界二氧化碳萃取技术在香料工业中的应用 …… 221
6.4.4 超临界二氧化碳萃取技术在中草药有效成分提取分离中的应用 …… 222
6.4.5 超临界二氧化碳流体技术在高分子科学中的应用 …… 225
6.4.6 超临界二氧化碳流体技术在制革工业中的应用 …… 226
6.4.7 超临界二氧化碳流体技术在染色中的应用 …… 227
6.5 在食品工业中的应用 …… 229
6.5.1 在农产品保鲜领域中的应用 …… 229
6.5.2 在饮料工业中的应用 …… 231

6.5.3 在食品冷藏和冷冻中的应用 …… 232
6.5.4 二氧化碳在食品工业中的其他用途 …… 233
6.6 在其他领域中的应用 …… 233
参考文献 …… 236
第 7 章 减排二氧化碳的建议与对策 …… 240
7.1 能源与环境可持续发展的科技问题 …… 240
7.2 控制温室气体二氧化碳的科技难点 …… 241
7.3 我国减排二氧化碳的建议 …… 243

第1章 概 述

世界经济在不断发展，人口在不断增加（已达68亿），科学技术的突飞猛进大大提升了人类的生活质量，城市化、全球化正广泛展开，这一切推动着巨额能源消费。与此同时，人类惊异地发现，无节制的向大气排放温室气体使全球变暖，对地球生态环境产生了深远的负面影响。据统计，在过去的100年中全球平均地面气温已增加0.3～0.6℃，寒冷季节缩短而温暖季节延长；内陆地区变得更加干旱而炎热，沿海地区热带风暴更加频繁；极地和北半球高纬度地区气温升高了3～5℃，冰川大面积消融，海平面上升，一些岛国和沿海地区不断被海水蚕食，甚至面临“灭顶之灾”。气候的改变还威胁着地球上丰富多彩的生态系统。

近年来，科学界经过反复的争论和研究，逐渐达成共识：造成全球气候变暖的根源是大量燃烧矿物燃料所排放的二氧化碳以及其他人类活动所产生的甲烷、氧化亚氮、氢氟碳、氯氟化碳、哈龙等温室效应气体，它们进入大气中，一方面吸收红外线，另一方面却阻挡地球表面辐射热散发，犹如在地球表面加上一个玻璃罩吸热而保温，致使地球温度不断升高。根据资料显示，自工业革命时代开始以来的一个半世纪里，大气层里的二氧化碳浓度几乎升高了1/3，目前正以每年0.4%的增长率上升，甲烷、氯氟化碳、氧化亚氮的增长率分别高达1.0%、5.0%和0.2%，全球增温速度相应为0.3℃/a，照此发展下去，30年后全球平均温升将达1℃，全球海平面相应上涨20mm。近年来，由于未能有效治理导致温室效应的废气排放量增加，全球气候加速恶化，世界许多地区出现了严重的暴风雪、水灾和旱灾。据初步统计，世界范围的天灾已在2001年对世界造成至少890亿美元的经济损失。华盛顿世界观察研究的一项报告指出，1998年全世界天灾损失总额比1996年创下的600亿美元损失增加48%，也远远超过整个20世纪80年代的总损失550亿美元。面临如此严峻的形势，联合国环境保护机构、世界气象组织及各国科学家都发出呼吁，要求立即行动，防止二氧化碳含量进一步增加。因此，21世纪温室效应气体的控制成为大气污染控制的新焦点。

1.1 温室效应对生态环境的负面影响及发展趋势

1.1.1 温室效应

温室效应是由地球、大气层和太阳相互作用而产生的。太阳可视为表面温度为5800K的黑体，它不断发射0.15～4.0μm各种波长的光，并以0.475μm辐射最强，它们通过大气传到地表，为陆地和海洋吸收。与此同时，地球也会辐射近红外到远红外的光，最大辐射波长为11μm左右。若无大气，在太阳与地球的相互辐射达到平衡时，地球产生250K稳定温度状态。若存在大气层，大气中的二氧化碳、二氧化氮、CH_4、HFCs、PFCs、SF_6等气体会强烈吸收红外辐射。以二氧化碳为例，它的吸收带为2.7μm、4.3μm、12μm和18μm附近，主要集中在11～14μm，所以，二氧化碳对太阳较短的波透明，却吸收地球辐射波能量，二氧化碳与其他一些物质在地球上空形成一层“玻璃”，这种让太阳辐射通过又阻碍地球热的发射，使地球与外层空间形成一巨型温室，大气被加热，致使地球不断变暖的现象，称为温室效应（green-house effect，GHE），产生这种效应的气体称为温室气体（green-house gas，

GHG)。温室效应造成地球气候越来越热，从而导致海平面升高，而且海洋吸收的二氧化碳正在使海水变酸，不断危害海洋和陆地生态系统，这些变化最终威胁到人类自身。其中氯氟化碳和哈龙还会破坏平流层臭氧，加剧到达地面的紫外辐射。

温室效应也有正面作用，它是地球生命演化的必要条件。地球未出现原始植物前，大气中二氧化碳含量大于90%，几乎无氧气，是一死寂状态。当植物出现后产生了一个古老而又最伟大的化学反应——光合作用。在太阳光作用下，二氧化碳与水反应生成动物生存必需的两个物质，即氧气和食物，大气成分也发生根本变化，并使二氧化碳含量保持在270×10^{-6}水平。工业革命后，二氧化碳浓度急速升高，达到目前的390×10^{-6}，每年排入大气的二氧化碳达290亿吨，其中50%停留在大气中。预计大气中二氧化碳含量每年以1.3×10^{-6}的浓度增长，按此速度，2100年二氧化碳浓度将达$(560\sim780)\times10^{-6}$，温室效应将更为强烈。二氧化碳同位素组成观测到大气中氧气的减少，表明大气中二氧化碳增加主要是由于化石燃料燃烧以及森林破坏过程中有机碳氧化所致，前者占80%左右，对温室效应贡献最大。二氧化碳浓度与温度变化的相关性数据表明，大气中二氧化碳的浓度每增加1倍，地表温度就会上升1.5～4.5℃。

大气中的二氧化碳主要有两个来源：一是有机质为细菌等分解、地幔运动和火山喷发以及人与动物呼吸排出的，属自然来源；二是工业、交通、人类生活各个方面所放出的，属人为来源，其中主要是化石燃料燃烧产生。控制能源消费、节约能源是减排二氧化碳的主要途径。

1.1.2 温室效应对生态环境的负面影响

温室效应会对地球生态环境产生一级、二级等深远的负面影响：

第一级影响：全球变暖，地表温度上升。在过去的100年内，地表温度上升了0.3～0.6℃。近五年来，地球的平均温度上升了0.2℃，比正常情况提高了100倍。预计到2050年，地球平均温度将达到16～19℃，超过以往的变暖速度。

第二级影响：气候异常，气候带改变，产生厄尔尼诺、拉尼娜现象。地表升温使水的蒸发量加大，高山雪线上移，一些大江大河将断流而面临枯竭，危及人类生存。由于干旱使地球荒漠化、沙化和草原退化，引发沙尘暴，一些物种消亡，农作物减产，导致饥荒，外来物种入侵加剧，生物多样性丧失，引发多种疾病流行。干旱诱发森林和草原大火，造成环境生态恶化。地球变暖将使北冰洋的冰面变薄、缩小和融化，储存地球2/3淡水的南极冰盖断裂、退缩，破坏海洋生态平衡，海平面上升将使一些地势较低的沿海城市和岛国淹没，海水入侵地下水和江河，使饮用水发生危机。大气中二氧化碳含量上升使海洋pH值下降，破坏海洋生物的生存空间，由$CaCO_3$构成壳或骨骼的浮游生物和珊瑚虫将溶解而死，以它为食物和栖息场所的鱼类面临危机，影响人类鱼蛋白的来源。气候异常使海水蒸发量加大，使暴风雪、热带风暴、暴雨洪涝灾害和泥石流频发，对人类生命财产造成重大损失。气温上升引起的热浪使心脏病和呼吸系统疾病的死亡率上升，传染病流行加剧。

联合国气候变化问题政府间研究小组（IPCC）在2001年的评估中预测，在1990～2100年全球的平均地表温度将提高1.4～5.8℃，这种提速是过去1万年中未曾遇见的。2004年美国五角大楼向布什提供绝密报告，称“今后20年，全球气候变化对人类构成的威胁胜过恐怖主义，这是一种非常独特的国家安全威胁，因为没有任何人拿着枪指着你，这种威胁无从控制。”

罗摩洛·兰考说，全球变暖很快将影响每个人的生活，贫穷的地方受到的影响会更大。斯坦福大学的特里·鲁特（Terry Root）说："我们已经处在灭绝的边缘。"全球变暖带来的后果表现如下：

疟疾这样的热带传染病将会泛滥。

在一段时间内由于北半球的生长期变长，食物会变得充足。比如，在开始的几十年，拉美的大豆和水稻产量将会增加。热带以外区域，尤其是北半球地区将出现植物生长期延长和更茂盛的森林。但到2080年会有几十亿人面临饥荒。

几亿非洲居民和几千万拉美居民将在不到20年内饮用水出现短缺。到2050年超过十亿的亚洲居民将面临水源短缺。根据汽车和工业所排放的温室气体的多少，到2080年水源短缺将威胁11亿～32亿人。

到2030年，由于全球变暖所造成的穷人死亡率将升高。疟疾和登革热以及食用污染海产品所造成疾病的发生率上升。

到2050年，欧洲的小冰川将会消失，陆地大冰川将会显著缩小。到2100年欧洲超过一半的植物物种将会濒临灭亡。

到2080年，由于全球变暖而遭受饥荒的人数将在2亿～6亿。

到2080年，随着海平面的上升，每年遭洪灾的人数约有1亿。

城市的烟霾现象将会严重。21世纪中期由于气候变化导致的臭氧污染将比20世纪90年代增加4.5%，使健康问题恶化。

野生北极熊以及其他动物将会消失。到2050年北极熊只能在动物园中见到，而且它们的特有生活习惯也会完全消失。火蚂蚁这样的害虫会横行。

很多——但不是全部——这些影响可以被阻止，如果我们这一代能够减少二氧化碳的排放，如果温室气体的水平能够稳定下来，如果这些都能做到的话，"对人类福利的主要影响可以避免，但是对生态系统的影响很可能要发生。"

1.1.3 温室气体增长的态势

温室效应的破坏性不仅局限于上述负面影响，更严重的是温室气体不是按线性规律递增，而呈现指数加速增长的趋势。随着世界经济的快速发展，人口的增加和人民生活水平的提高，对能源需求将不断增大，会产生更多的温室气体，并造成以下次生影响：

① 需要更多的电力用于空调制冷，而发电厂将放出更多的二氧化碳。

② 地表温度上升引起干旱，导致森林大火频发，产生更多二氧化碳，并且由于森林破坏使吸纳二氧化碳的能力下降，间接增加了二氧化碳。为了抗旱而抽取地下水后，不仅使地面下沉，还会使地表更干旱，有机质储碳量等进一步减少。

③ 环境温度上升使卡诺循环低温热源温度上升，使热机效率下降，为达到原先的正常效率，同一车间、同一设备、同一工厂和同一产品将会花费更多燃料，放出更多二氧化碳。

④ 海洋升温有可能减小吸纳二氧化碳的能力，北半球永久冻土层的融化过程中又会放出数十亿吨的二氧化碳和甲烷。

⑤ 化石燃料燃烧放出的二氧化碳同时又会产生炭黑气溶胶，它们覆盖在南极冰盖上，使太阳光吸收增强，进一步加剧冰川融化。

⑥ 在排放二氧化碳过程中，（化石燃料的燃烧、生物体的燃烧和无机氮肥的使用）会产生另一温室气体N_2O；在地表升温中，一些水稻田、沼泽地将放出更多甲烷，而甲烷对温

室效应的贡献率为15%。

上述人为因素以及人为因素导致的自然因素均会导致温室气体的排放加剧。依此下去，将会达到一个临界点，形成一个恶性循环，控制温室气体浓度将变得更为困难。全球应尽快达成共识，把一些协议纲领落实到行动中，找寻研发出减排二氧化碳的新技术、新工艺、新产品。

尽管人类还释放甲烷和氧化亚氮等别的温室气体，但目前使地球变暖的主要原因之一即是排放于大气中的各种工业废气中的二氧化碳气体。据专家估计，释放的二氧化碳对全球气候变暖起到2/3的作用，而且在大气中含量最高，因此二氧化碳成为温室效应气体削减与控制的重点。由于二氧化碳在大气中的停留时间约为100年，即使二氧化碳的排放能维持在现有水平上，它的浓度在22世纪仍将翻一番。若想使大气中二氧化碳浓度保持在目前水平，则需将全球的二氧化碳排放量削减60%，由于现代化生产及生活对能源的强烈依赖，使得这一目标很难在近期实现，于是一场广泛而深刻的变革在科学、技术、管理与工程等领域悄然展开。由建筑业房屋隔热、节能性能的研究与应用，到制造业提高燃烧效率和节能技术的开发，可再生能源的应用，燃料电池的研究，二氧化碳的收集、处理、处置技术以及征收碳税的管理手段和减少能源消费的生活模式，二氧化碳的控制已不仅是大气污染治理的目标，更多地渗透到各行各业的生产与人们的生活中。

1.2 《京都议定书》带来的挑战和机遇

1.2.1 《京都议定书》

1992年在巴西的里约热内卢召开的联合国环境与发展大会（简称环发大会）上，中国与其他165个国家共同签署了《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC），主张减轻人为活动对全球气候变化造成的影响。中国是重要的签字国之一，并于1996年批准了这一公约。

气候变化公约的最终目的是“将大气中温室气体的浓度稳定在防止气候系统受到危险的人为干扰的水平上”（公约第二条）。公约规定，经合发组织（OECD）成员国和经济转轨国家（也称为附件一国家）应将其2000年的温室气体排放量限制在1990年的水平［据估计，多数经合发组织成员国（英国和德国除外）不大可能兑现所承诺的温室气体排放目标，而经济转轨国家则因其经济衰退将能履行所承担的义务］。气候变化公约考虑到“发展中国家实现持续经济增长和消除贫困的正当的优先需要”，并没有要求发展中国家在限制温室气体排放方面承担义务，只是呼吁他们在自愿的基础上确定温室气体减排项目。

在1995年柏林举行的气候变化公约第一次缔约国大会上，缔约国在实施气候公约方面取得了进展。缔约国所通过的“柏林授权”要求在两年谈判期限内就建立明确的2000年后温室气体减排目标达成一议定书。该议定书将极有可能只针对附件一国家。“柏林授权”虽然没有向发展中国家提出任何新的义务，但要求发展中国家进一步实施气候变化公约已确定的义务。

第一次缔约国大会也就推动联合履约做了努力。为了推动联合履约，第一次缔约国大会决定开始实施“共同执行活动（Activities Implemented Jointly，AIJ）试验阶段”。该阶段将试验联合履约项目，并在2000年加以审议。联合履约与AIJ的区别是，AIJ要求附件一国家不得从AIJ项目中获得温室气体减排信用；同时要求向AIJ提供的资金应额外于投资国已承担的财政援助义务。第一次缔约国大会的决定还明确指出，AIJ应能产生“切实的、可

测量的、能减缓气候变化的及非此项目将不可能获得环境效益”。

1997 年 12 月，149 个国家和地区的代表在东京召开《UNFCCC》缔约方第三次会议，并通过旨在限制发达国家温室气体排放量及抑制全球变暖的《京都议定书》。《京都议定书》规定，在 2008～2012 年期间，所有发达国家排放的二氧化碳等 6 种温室气体的数量，要在 1990 的基础上年均削减 5.2%，而发展中国家依照“共同但有区别的责任”的原则，制定自愿削减温室气体排放目标。其中美国削减 7%，欧盟 8%，日本 6%，加拿大 6%，东欧 5%～8%。公约的核心是节约能源、提高能源的利用效率，以达到控制和减少二氧化碳排放的目的，这将成为 21 世纪能源科学的主要议题之一。

1.2.2 减排机制

《京都议定书》规定了灵活的履行方式，其中重要的是市场运作的“联合履约”、“清洁发展机制”和“排放交易”三种机制：

(1)“联合履约” 指允许承担减排义务的国家在运作成本较低的另一个承担减排义务的国家投资旨在减少二氧化碳排放的项目，并将此减排额返回投资国，用此抵扣其减排义务。此机制只适用于发达国家之间进行。

“联合履约”的概念是在气候变化公约谈判时，由挪威代表团将其作为降低全球温室气体减排成本的措施首次提出的。正如公约第四条第二款 A 所表示的，缔约国同意开始商议联合履约的措施。按其定义，联合履约是一种双边安排，即一个国家的实体可以通过在其他国家实施低成本的减排项目，部分兑现其所承担的温室气体减排义务。具体来说，联合履约可为发达国家提供在发展中国家低成本实施温室气体减排活动的机会，而不是仅限于在本国内履约。对联合履约投资者来说，联合履约是降低减排成本的有效措施，也是向国外进行投资的机会。对接受者来说，联合履约是一个直接有益于地区及全球环境的活动，并有利于吸引外资，获得非此不能得到的现代、清洁和高效的技术。国家间存在的碳减排费用差为实施联合履约和建立世界范围的碳减排贸易体系提供了基础。

联合履约以及碳减排贸易体系可基于对缔约国有约束力的二氧化碳排放目标上，也可在不具备约束力目标或国家目标不确定或无法强制执行的情况下进行。在这种情况下，碳减排国际贸易体系将有赖于建立碳抵消机制，也就是说，投资联合履约项目的国家能得到抵消其温室气体排放目标的信用。联合履约与碳贸易的先决条件应包括：①至少发达国家应承担有约束力的碳减排目标；②参与国应就碳减排信用达成共识；③国家间有明显的减排费用差；④应有可靠的核实及测定碳抵消的办法。

(2)“清洁发展机制” 简称 CDM(Clean Development Mechanism)，指允许发达国家与发展中国家联合履行。发达国家提供资金与技术，在无减排义务的国家实施减排项目，由此获得额外的低成本减排量作为回报，帮助其实现减排义务。对于发达国家，CDM 提供了一种灵活履约机制。对发展中国家，通过 CDM 项目可获得资金资助与先进技术，实现可持续发展，有利于发展中国家最终实现《UNFCCC》目标。

(3)“排放交易” 指某一国家排放量低于条约规定标准，其剩余额度可出售给完不成规定义务的国家。

上述机制是鼓励发达国家与发展中国家开展“双赢”合作项目，使全球生态环境大为改观。

1.2.3 控制温室气体的国际动态

虽然美国并未在《京都议定书》上签字，但以美国为基地的一些大公司如杜邦、壳牌、

罗门哈斯、BP 等公司均属世界气候变化公约成员。拜尔公司因近 10 年间在气候保护方面的成就获“低碳排放先导奖”，从 20 世纪 90 年代至今已将温室气体的排放量降低了 60%以上。美国有 140 个城市将执行《京都议定书》，2010 年加州将减排 11%，到 2020 年将减排 25%。美国减排研究方面着眼于政策研究、大气研究、燃料电池、热引擎、磁流体动力学与聚变反应，推广 IGCC 发电技术，海洋处置二氧化碳技术等。最近美国政府从能源安全和生态考虑提出乙醇燃料应达到汽车用油 20%的目标。英国则在开发再生能源，节能，热电联产，降低运输部门消耗和住宅隔热等方面进行二氧化碳减排。挪威致力回收与处置二氧化碳的研究。日本投入巨资进行研究，以建立低二氧化碳排放的城市和地区结构、低二氧化碳排放的交通运输系统、低二氧化碳排放的产业结构，低二氧化碳排放的能源供应结构和低二氧化碳排放的生活方式。

为在 21 世纪实现发电效率的大幅度提高和二氧化碳排放的大幅度降低，美国能源部提出并启动了“21 世纪远景计划”，预计到 2050 年，新型系统的二氧化碳等有害物质将有可能实现准零排放，燃煤发电效率达到 60%，天然气发电效率达到 75%。欧盟国家推出了“未来能源计划”，重点是促进欧洲能源利用新技术的开发，减少对石油和煤炭的依赖而造成的环境污染，增加生物质能源和其他可再生能源的利用。日本则试图大量增加核电站，在日本“新日光计划”中，开展了新的能量释放方式的研究，如新型高温空气燃烧方式（节能 30%、氮氧化物排放量降低 50%）、具有氧气/二氧化碳燃烧的动力循环、发展制氢、大规模储运、氢能利用的世界能源网络项目等。

当前，控制温室气体（二氧化碳、氮氧化物等）排放的主要对策为调整能源结构，尽量采用低碳和无碳燃料（如天然气、可再生能源、核能）。另一对策是依靠能源科学技术的发展，在提高能源转换效率的同时开拓二氧化碳的分离、储存和利用技术。二氧化碳的分离、储存和利用等问题都属于二氧化碳控制技术范畴。

开发研究二氧化碳储存和利用技术的目的是为过量的二氧化碳提供最终的归宿。陆地与海洋都是二氧化碳巨大的天然储存库。二氧化碳陆地埋存的形式多种多样，可以储存在油田、气田中，或与矿物质反应生成碳酸盐类物质。提高油田采收率（EOR）技术和强化煤层气开采（ECBM）技术就是二氧化碳储存技术的具体应用。海洋可为二氧化碳提供更大的储存空间，估计二氧化碳排放量中约有 1/3 已经储存在海洋中，但海洋储存的难点和不确定因素要比陆地储存大。生物质和生物储存及回收二氧化碳技术正悄然兴起。通过光合作用，生物质能源利用系统可以实现零二氧化碳净排放率。尽可能地增加植被，可能是回收储存二氧化碳最经济的做法。除了储存以外，二氧化碳也可通过食品、化工等行业和部门加以利用。二氧化碳在储存和利用时，大都要以纯的或较高浓度存在，而多数情况下，二氧化碳的浓度不能达到这个要求，所以必须从二氧化碳混合物中分离它，故分离二氧化碳是温室气体控制技术的第一步。

1.2.4 面临《京都议定书》的挑战与机遇

目前，联合履约正处于试验阶段。虽然联合履约对参与国具有潜在的财政、经济和环境效益，但对中国和很多发展中国家来说它仍是一个新概念。就中国而言，承担温室气体减排义务可能是其实现工业化和现代化道路上的一个挑战。联合履约则可能为它提供一个从发达国家获取资金和技术，以改善其能源效率并减少温室气体排放的机会。因此，中国应给予联合履约以足够的重视。

1.2.4.1 面临《京都议定书》的挑战

《京都议定书》已生效。由于第一阶段不要求中国减排，因此对中国经济不会造成直接影响。据估算，2010年发达国家排放的二氧化碳将降至32%，2020年进一步降至29%。相反，发展中国家二氧化碳的排放量将达一半以上。中国1990～2001年排放的二氧化碳净增量为8.23亿吨，占世界同期增加量的27%。预计2020年，排放量要在2000年基础上增加1.32倍，这一个增量比全世界在1990～2001年的总排量还要大。2025年中国的二氧化碳排放总量将超过美国，居世界第一位，CH_4、N_2O的排放量也居世界前列。第二阶段不可能再享受免排待遇，如果我国不采取行动，世界减排任务也不可能完成，一些发达国家和一些小岛联盟及发展中国家将会对我国施加巨大压力，若处置不当，将影响中国的国际形象和地位。

中国的经济仍在快速发展，粗放式高消耗、高排放、低产出的增长方式并未得到有效遏制，要落实科学发展观还要假以时日，产业结构、能源结构的调整是一个缓慢的过程，不可能快速到位，只能作为中长期目标逐步实现。城市化、生活质量和人们能源消费水平的提高将刺激能源需求显著增长，可再生能源仍属起步阶段。二氧化碳分离、回收与处置的关键技术有待突破。所以，二氧化碳排放量不可避免将大幅度增长，在社会经济增长的同时又履行对减排的庄严承诺是一件十分困难而不得不面对的现实前景。

1.2.4.2 《京都议定书》带来的机遇

① 有利于改善中国的生态环境。中国生态环境脆弱：土地荒漠化每年扩展2460平方公里；洪涝干旱严重；易受海平面上升威胁，自然灾害威胁大，《京都议定书》的实施有利于改善中国的生态环境。

② 促进中国循环经济的发展，走全面协调可持续发展道路，促进二氧化碳的回收与处置，推动二氧化碳作为一种资源的利用。

③ 中国承担减排义务后，会对电力、化工、钢铁、建材、交通运输等高二氧化碳排放企业制定新的限排标准，并与国际接轨，使这些企业在数量和规模上受到限制，将高消耗高排放企业淘汰出局。促进产业结构调整，并提高能源利用率，积极发展优质能源，改善能源结构。

④ 为中国的经济发展和生态保护获得所需的资金与技术。

《京都议定书》的目标是全球在2012年减少50亿吨二氧化碳排放，其中有一半必须依赖CDM为主的碳交易实现。中国可以提供世界CDM项目的一半以上，估计30亿～50亿美元的CDM来自中国，而中国将成为碳交易的主战场，化工企业是受益者。

1.3 中国的能源利用与温室气体排放

自1978年开始推行经济改革以来，中国经济的年平均增长率达9%以上，国内生产总值自改革以来增长了四倍。能源在经济增长诸因素中起着举足轻重的作用，国家在制定发展规划时给予能源生产以头等重要的地位。虽然由于能源效率的不断改善，能源增长与经济增长脱轨，但能源生产的增长在经济发展中仍很重要。初级能源生产的平均增长率在1978年至1990年期间为6%，1991年至1994年低于4%。仅1994年，中国就生产了11.65亿吨初级能源（按标准煤计），其中煤占74%，原油占18%，天然气占2%，水电占6%。1994年，中国超过俄罗斯成为世界上第二大能源生产国和消费国。中国每年的煤产量占世界总产量的1/4强。