



化学工业出版社学术著作出版基金资助出版

二氧化碳 捕集和利用

CO₂ CAPTURE AND UTILIZATION

王献红 主编

CO₂



化学工业出版社



化学工业出版社学术著作出版基金资助出版

二氧化碳 捕集和利用

CO₂ CAPTURE AND UTILIZATION

王献红 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从世界能源结构尤其是中国的能源结构现状和未来出发, 总结梳理了二氧化碳的排放现状, 在此基础上系统介绍了二氧化碳的捕集和利用技术的最新进展。捕集技术中重点介绍了离子液体捕集技术、多孔金属有机骨架材料捕集技术、极稀浓度二氧化碳的捕集技术等近几年发展起来的新技术。二氧化碳的利用方面, 重点介绍了二氧化碳作为碳氧资源化学固定为高分子材料和二氧化碳作为碳资源化学固定为能源化学品等技术。

本书可供化学、化工、发电、冶金等领域从事二氧化碳捕集的工程技术人员、从事二氧化碳利用的研发人员、企业和政府从事碳减排管理的管理人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

二氧化碳捕集和利用/王献红主编, —北京: 化学工业出版社, 2016.2

ISBN 978-7-122-25695-9

I. ①二… II. ①王… III. ①二氧化碳-收集②二氧化碳-废物综合利用 IV. ①X701.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 282835 号

责任编辑: 傅聪智
责任校对: 边涛

文字编辑: 孙凤英
装帧设计: 刘丽华

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: 三河市胜利装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 20½ 字数 424 千字 2016 年 4 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: 98.00 元

版权所有 违者必究

二氧化碳是最主要的温室气体，自工业化革命以来二氧化碳排放逐年递增，到2014年全世界的二氧化碳排放已经超过370亿吨，尽管还存在各种各样的争议，但由此带来的温室效应正引起大家的共识。从1997年的京都议定书，到引起世界各国高度重视的2009年哥本哈根世界气候大会，加上近几年世界气候大会给出的更切实际的数据（2011年墨西哥坎昆，2012年卡塔尔多哈，2013年波兰华沙，2014年秘鲁利马），世界各国越来越接近达成温室气体减排的共识。2015年底的法国巴黎世界气候大会将通过新的气候议定书，取代届满的京都气候议定书。2014年11月12日中美两国共同发表《中美气候变化联合声明》，美国计划于2025年实现在2005年基础上减排26%~28%的全经济范围减排目标，并将努力减排28%，中国计划2030年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰，并计划到2030年非化石能源占一次能源消费比重提高到20%左右。这次协议的签署意味着全球对温室气体的减排的高度共识。因为无论采用什么样的角度去思考，气候异常是个现实问题，二氧化碳也因此成为世界各国难以回避的一个词。

二氧化碳的捕集和封存一度成为解决二氧化碳减排问题的方案，但由此带来的成本和后续潜在的负面效应使得人们开始研究更合适的解决方案，其中二氧化碳的利用，尤其是化学转化和利用正日益受到世界各国的广泛关注。2010年我们编写了《二氧化碳的固定和利用》一书，主要讨论了二氧化碳的物理利用和化学转化的原理和技术，尤其是二氧化碳合成塑料方面的工作进展。随着二氧化碳议题的不断深入，二氧化碳的低能耗捕集并作为大宗化工材料和能源化学品的原料已经成为目前二氧化碳议题的优先领域和热点研究内容。

借此我们编撰本书，本书由6章构成。第1章从世界能源结构尤其是中国的能源结构现状和未来出发，总结梳理二氧化碳的排放，分析了工业过程如燃煤发电、水泥、炼钢、石化、酿造行业集中排放二氧化碳的现状。此外本章也分析了分散和移动排放过程如汽车、摩托车行业的二氧化碳现状，这一部分二氧化碳的排放约占整个二氧化碳排放的40%以上，但直接现场回收在经济上

是不可行的。第2章总结了目前集中排放的二氧化碳的捕集技术,探讨了新型、低能耗捕集技术如离子液体捕集技术、多孔金属有机骨架材料捕集技术的可行性。第3章探讨了极稀浓度二氧化碳的捕集技术,主要从能耗和经济性考虑大气为代表的极稀浓度气氛下二氧化碳的捕集技术,并分析著名的浓盐电化学方法捕集二氧化碳并转化为能源化学品的“绿色自由”思路的可行性。二氧化碳的化学利用主要分为碳氧资源的全部利用和碳资源利用两个方面,因此在第4章梳理二氧化碳作为碳氧资源化学固定为小分子化合物,其中成熟的例子如尿素、水杨酸、无机碳酸盐或有机环状碳酸酯,正处在研发中的例子如碳酸二甲酯、甲基丙烯酸甲酯等。第5章则阐述二氧化碳作为碳氧资源化学固定为高分子材料方面的工作,评述了二氧化碳基塑料和二氧化碳基聚氨酯方面的最新进展,同时也评述了非光气法聚碳酸酯和聚氨酯的研究和工业化进展。这是最近十年的热门研究领域,原因在于将二氧化碳作为合成高分子材料的基础原料,不仅有助于缓解二氧化碳效应,还能为高分子工业的原料来源多元化提供依据。第6章总结了二氧化碳单独作为碳资源应用的可行性,主要是采用还原反应将二氧化碳转化为大宗能源化学品的最新进展,尤其是二氧化碳制备甲醇、甲烷(合成气)、甲酸、一氧化碳的工作。其中能耗和经济分析是决定该领域竞争性和前途的关键。

本书由中国科学院长春应用化学研究所二氧化碳基塑料研发团队负责编写,再由本人统一修改并定稿。本书第1章“二氧化碳的排放”由任冠杰博士编写,第2章“集中排放二氧化碳的捕集”由刘顺杰博士编写,第3章“极稀浓度二氧化碳的捕集”由王勇博士编写,第4章“二氧化碳作为碳氧资源化学固定为小分子化合物”由盛兴丰博士编写,第5章“二氧化碳作为碳氧资源化学固定为高分子材料”由本人与吴伟博士、高永刚博士编写,第6章“二氧化碳作为碳氧资源化学固定为能源化学品”由顾林博士、秦玉升博士编写。本书在编写过程中得到了我的同事秦玉升博士的全力支持,他负责本书专业方面的修订,同时我们实验室的张薇女士对全书的文字和格式方面进行了仔细修订,没有他们的辛勤劳动是不可能完成本书的,在此深表感谢。

王献红

2015年10月

第1章 二氧化碳的排放	1
1.1 能源结构变迁与二氧化碳排放.....	1
1.1.1 能源结构变迁.....	1
1.1.2 二氧化碳的排放.....	3
1.2 二氧化碳问题的纷争.....	7
1.2.1 二氧化碳引起的气候变化.....	8
1.2.2 气候变化造成的影响.....	10
1.3 可能的解决方案.....	15
1.3.1 减少二氧化碳的排放.....	15
1.3.2 CO ₂ 的捕集和储存.....	16
1.3.3 二氧化碳的利用.....	16
1.3.4 减少二氧化碳排放的政策与工具.....	17
1.4 未来能源结构下二氧化碳的排放——评述与展望.....	19
参考文献.....	20
第2章 集中排放二氧化碳的捕集	23
2.1 二氧化碳捕集的理论基础.....	23
2.1.1 燃烧后脱碳.....	24
2.1.2 燃烧前脱碳.....	24
2.1.3 富氧燃烧技术.....	25
2.2 集中排放二氧化碳的捕集.....	26
2.2.1 物理吸附和解析技术.....	26
2.2.2 物理吸收技术.....	34
2.2.3 化学吸收和解析技术.....	36
2.2.4 物理与化学联合捕集技术.....	43
2.2.5 膜分离技术.....	48
2.3 食品级二氧化碳的提纯.....	56
2.3.1 食品级二氧化碳的主要应用领域.....	56
2.3.2 食品级二氧化碳提纯技术.....	58

2.4 二氧化碳捕集新技术	63
2.4.1 离子液体技术	63
2.4.2 多孔金属有机骨架吸附技术	66
2.5 本章总结与展望	70
参考文献	70
第3章 极稀浓度二氧化碳的捕集	77
3.1 空气中 CO ₂ 浓度及变化趋势	77
3.2 气候变暖带来的问题	78
3.3 从空气中捕集二氧化碳的迫切性	79
3.3.1 生物体利用二氧化碳的局限性	79
3.3.2 二氧化碳的捕集和封存技术 (CCS) 的局限性	80
3.3.3 空气中直接捕获 CO ₂ 的技术	81
3.4 DAC 技术的能耗分析	82
3.5 DAC 吸收塔的设计	84
3.6 用于 DAC 的吸附剂	86
3.6.1 无机吸附剂	86
3.6.2 负载化的有机胺吸附剂	90
3.6.3 阴离子交换树脂	95
3.7 解吸的技术	96
3.8 DAC 的费用以及可行性	97
3.9 总结和展望	98
参考文献	99
第4章 二氧化碳作为碳氧资源化学固定为小分子化合物	104
4.1 二氧化碳的分子结构和物化性能	104
4.1.1 二氧化碳的分子结构	104
4.1.2 二氧化碳的物理性质	105
4.1.3 二氧化碳的化学性质	106
4.2 二氧化碳固定为尿素	107
4.2.1 尿素简介	107
4.2.2 尿素生产理论基础	107
4.2.3 尿素工艺发展概况	108
4.3 二氧化碳制备环状碳酸酯	109
4.3.1 催化剂发展史	109
4.3.2 二氧化碳与环氧化物加成反应的机理	118

4.3.3	新型环状碳酸酯的合成和反应性能	121
4.4	二氧化碳固定为无机碳酸盐	125
4.4.1	二氧化碳固定为碳酸钠	125
4.4.2	二氧化碳固定为碳酸钙	128
4.5	二氧化碳固定为水杨酸	132
4.5.1	水杨酸的合成方法	132
4.5.2	水杨酸的应用	133
4.6	二氧化碳直接与甲醇反应制备碳酸二甲酯	134
4.6.1	催化剂发展史	134
4.6.2	脱水剂的使用	139
4.6.3	CO ₂ 和甲醇反应直接制备DMC的反应机理	140
4.7	二氧化碳制备甲基丙烯酸	142
4.7.1	基本原理	143
4.7.2	催化剂发展史	144
4.8	评述与展望	145
	参考文献	146

第5章 二氧化碳作为碳氧资源化学固定为高分子材料

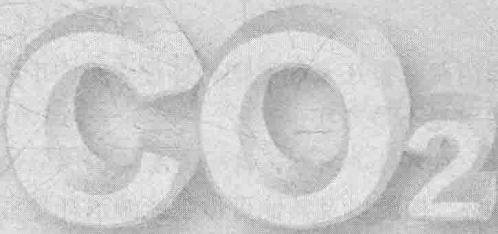
5.1	二氧化碳参与的聚合反应	153
5.1.1	二氧化碳与炔烃/二卤代物的缩聚反应	153
5.1.2	二氧化碳与二元胺的缩聚反应	154
5.1.3	二氧化碳与二元醇钾盐/ α,ω -二卤代物的缩聚反应	154
5.1.4	二氧化碳与烯烃化合物的共聚反应	155
5.1.5	二氧化碳与二炔类化合物的共聚反应	155
5.1.6	二氧化碳与环硫化合物的共聚反应	156
5.1.7	二氧化碳与环氮化合物的共聚反应	156
5.1.8	二氧化碳与环氧化物的共聚反应	156
5.1.9	二氧化碳参与的三元共聚反应	166
5.2	二氧化碳-环氧化物共聚物	168
5.2.1	非均相催化剂	169
5.2.2	均相催化剂	183
5.2.3	二氧化碳-环氧丙烷共聚物的结构与性能	216
5.2.4	二氧化碳基塑料的改性	236
5.3	二氧化碳基聚氨酯	241
5.3.1	二氧化碳制备聚碳酸酯醚多元醇	241
5.3.2	二氧化碳基聚氨酯的结构与性能	248

5.4	非光气路线制备聚碳酸酯	249
5.4.1	碳酸二甲酯的制备方法	250
5.4.2	从碳酸二甲酯制备碳酸二苯酯的方法	255
5.4.3	碳酸二苯酯与双酚 A 的缩聚反应	261
5.5	非光气路线合成聚氨酯	263
5.5.1	非光气路线制备异氰酸酯	264
5.5.2	非异氰酸酯路线制备聚氨酯	268
5.6	评述与展望	269
	参考文献	270

第 6 章 二氧化碳作为碳氧资源化学固定为能源化学品 280

6.1	二氧化碳加氢制备甲醇	280
6.1.1	二氧化碳制备甲醇的理论基础	280
6.1.2	催化剂发展史	284
6.1.3	反应器设计及最优化	288
6.1.4	工业化实践	289
6.2	二氧化碳制备甲酸	289
6.2.1	二氧化碳制备甲酸的理论基础	290
6.2.2	催化剂发展史	290
6.2.3	机理研究	297
6.3	二氧化碳加氢制备一氧化碳	299
6.3.1	催化剂	300
6.3.2	反应器	301
6.3.3	反应机理	301
6.4	二氧化碳加氢制备甲烷	303
6.4.1	二氧化碳加氢制备甲烷的理论基础	303
6.4.2	催化剂发展	304
6.4.3	反应机理	307
6.5	二氧化碳加氢制备碳氢化合物	309
6.6	评述和展望	312
	参考文献	312

第1章



二氧化碳的排放



1.1 能源结构变迁与二氧化碳排放

1.1.1 能源结构变迁

能源的开发利用与人类社会生产力的发展水平密切相关，能源结构可作为衡量人类社会生产力发展水平的最重要指标。

从能源开发利用角度分析，人类社会至今已经历了三个能源时代^[1]。第一个时代是薪柴能源时代，原因在于在 18 世纪中期第一次工业革命以前，社会生产力水平低下，人类以自然界广泛分布而又容易获取的可再生能源（即薪柴）为主要能源。

蒸汽机的发明揭开了人类社会第一次能源变革的序幕，人类第一次把蕴藏在煤炭中的自然能量转变为具有经济意义的能量，煤炭逐渐替代薪柴，到 19 世纪 70 年代，煤炭在一次能源消费结构中的比重已上升到 24%，到 20 世纪初，又进一步上升到 60%，从而用了近 150 年时间完成了煤炭取代薪柴的能源转换过程，完成了世界能源消费结构的第一次重大变革，使人类社会进入了第二个能源时代——“煤炭时代”。

第三个能源时代是“石油”时代。第二次世界大战以后世界上许多发达资本主义国家大力推广使用石油，有些国家开始弃煤用油来生产电力，石油工业开始进入蓬勃发展时期，石油在与煤炭的竞争中地位日渐增强，而煤炭工业因能源效率问题受到很大影响，煤炭一统天下的地位受到严重影响。据联合国统计，石油在能源消费结构中的比重从 1929 年的 14% 迅速上升到 1950 年的 27%，而同期煤炭则从 76% 下降到 61%，1967 年更是上升到 40.4%，而煤炭却从 1950 年的 61% 下降到 38.8%，从而完成了石油替代煤炭能源的所谓第二次能源变革，标志着人类社会开始进入能源的“石油时代”。

当前化石燃料依然是全球一次能源消耗的主要来源，并且在逐年增加。BP 发布的《世界能源统计回顾 2011》数据显示，2010 年中国一次能源消费量为 24.32 亿吨油当量，同比增长 11.2%，占世界能源消费总量的 20.3%。美国一次能源消费量为 22.86 亿吨油当量，同比增长 3.7%，占世界能源消费总量的 19.0%^[2]。尽管在国家统计局随后发布的公报中，中国 2010 年能源消费总量折算成标准油约为 22.75 亿吨，中国的能

源消费总量还未超美国。即便“第一”的帽子花落谁家未定，但中国作为能源消耗大国已是不争之实。

如图 1-1 所示，世界能源结构中原油消耗量占 34%，煤消耗量占 30%，天然气占 24%，核能以及其他可再生能源消耗量占 12%。不过，虽然石油消耗量在能源总消耗量中所占的比例仍然最大，但其在每年能源消耗量中所占的份额正在逐年降低。2010 年，石油消耗量相比于 2009 年消耗量增长 3.1%，在所有化石能源中增长最低。而煤消耗量却相比于 2009 年增加了 7.6%，在所有化石能源中增长最大。煤的消耗量占世界能源总消耗量的份额达到了 30%，是 1970 年以来的最高值。事实上，石油消耗量在世界一次能源消耗量中所占比例已经连续十一年下降，而煤和天然气消耗量在世界一次能源消耗量中的比值则持续增加。

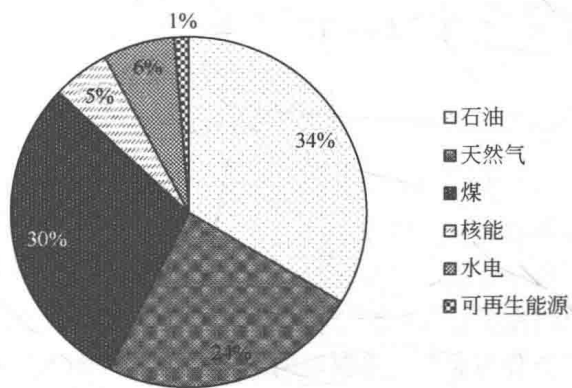


图 1-1 2010 年世界一次能源消费结构
(资料来源: BP公司Review of World Energy 2011)

尽管目前正经历着第三次能源变革，即从石油、煤炭和天然气等化石能源向着太阳能、风能和氢能等方向发展，进而发展到可再生能源时代。

化石能源品种间的消耗比例已经根据能源效率和环境因素进入快速调整阶段。但是根据国际能源署 (IEA) 预测，2007—2030 年间全球一次能源需求量将从 120 亿吨油当量增加到 168 亿吨油当量，增幅达 40%^[3]，其中 3/4 以上的能源消耗来自化石燃料，可见能源结构的变革需要相当长时间的积累。尽管石油占整个能源消费的比例会下降，其依然是最大的一次燃料消费品，全球石油需求将增长 24%，即从 2008 年的 0.85 亿桶·天⁻¹ (1 桶=158.987dm³，下同) 上升至 2030 年的 1.05 亿桶·天⁻¹^[4]。另外，随着清洁煤炭技术的应用，煤炭将成为需求增长最快的能源商品，在一次能源中的比例将由 2007 年的 32 亿吨油当量增加到 2030 年 49 亿吨油当量，年均增速达到 1.9%，不仅高于油气等传统化石能源，也高于核能、生物能等能源，仅低于由风能引领的新兴可再生能源 (年均增速达到 7.3%)^[5]。此外，由于天然气在化石能源中是最清洁的，随着低碳经济的发展，全球天然气的需求将呈现长期增长的趋势，预计到 2030 年，全球天然气的需求将增长 41%，即从 2007 年的 3.0 万亿立方米增加到 2030 年的

4.3 万亿立方米。天然气储量丰富，全球可使用的天然气资源超过 850 万亿立方米，世界探明的天然气储量足以满足全球 58.6 年的需求。值得庆幸的是，天然气资源中的 45% 是非传统气源（包括页岩气、煤源气等），目前只有 66 万亿立方米的天然气被开采，不到全球总储量的 8%^[6]。

尽管化石能源在短时期内可满足世界能源需求的增长，但能源枯竭的风险依然如同达摩克利斯之剑（The Sword of Damocles）高悬在世界能源安全的上空，而且持续的大量能源消耗进一步加重了环境负荷，经常引起极端气候的发生。因此，发展清洁和可持续的能源是世界各国的共识。

核能作为一个低碳能源开始得到更全面的认识，2010 年世界核能发电量比 2009 年增长了 2%，其中三分之二的增长来自欧洲^[2]。尽管 2011 年 3 月日本福岛第一核电站事故使世界各国重新评估核能的安全性，但并未改变中国、印度、俄罗斯和韩国等国的核电政策，实际上为应对化石资源过度消耗所带来的问题，2035 年前核电将增加 70% 以上^[7]。另一方面，太阳能、生物质能、风能和潮汐能、地热能等可再生能源开始进入快速发展通道，但目前仍需要克服一系列瓶颈问题以实现其大规模商业应用。全世界可再生能源预期到 2035 年会增加两倍，届时太阳能发电将占全球总发电量的 2%，生物燃料的使用也将增长 4 倍多，即从 2010 年的 100 万桶·天⁻¹ 增加到 2035 年的 440 万桶·天⁻¹，占道路运输燃料的比例则从 2010 年的 3% 增长到 2035 年的 8%^[8]，水力和风力发电为主的可再生资源发电在全球发电量中所占的比例会由 2008 年的 19% 上升至接近三分之一。随着化石资源价格的上涨和可再生资源的成熟，可再生资源会越来越显现其独特的竞争力。

综上所述，虽然在未来的 20 年内，化石能源仍然在全球一次能源中占主导地位，但石油、煤和天然气所占比例会有变化。而核能和可再生能源等低碳能源在全球一次能源中将发挥越来越重要的作用，这不仅是化石资源的逐渐枯竭所导致的结果，也与化石资源所带来的环境气候等方面的副作用密切相关，其中最重要的一个副作用就是二氧化碳的过度排放。

1.1.2 二氧化碳的排放

煤与石油等化石资源从地壳中被开采出来，通过燃烧过程以满足交通、取暖、电力、石化等生产过程的需要，与自然界通过碳循环将二氧化碳固定的过程相比，该过程产生二氧化碳的速度更快、量更大，导致大气中二氧化碳浓度在第一次工业革命开始后以前所未有的速度增加^[9]。图 1-2 显示了历史上 CO₂ 浓度的变化。由于人类消耗化石燃料和土地利用的变迁，二氧化碳浓度从第一次工业革命前的 280 mL·m⁻³ 增长到 2005 年的 379 mL·m⁻³。1995—2005 年的 CO₂ 浓度年均增长率（1.9 mL·m⁻³）比有观测史以来（1960 年开始连续和直接观测大气中关键气体的浓度，1960—2005 年以来年均增加 1.4 mL·m⁻³）高 35% 以上^[10]。大气中二氧化碳浓度增加的趋势一直没有明显的变化，据二氧化碳数据分析中心（CDIAC）的数据显示，2012 年 11 月份大气中二氧化碳浓度已达 391.2 mL·m⁻³，自 2005 年来年均增速也达到 1.7 mL·m⁻³，尽管

增速相比前十年开始下降，但依然保持较高的增速水平。

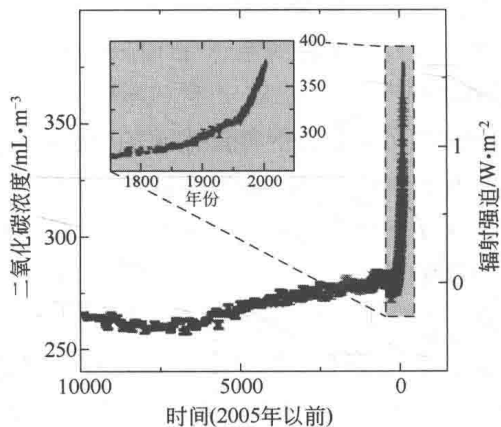


图 1-2 大气中 CO₂ 浓度的变化

(资料来源：IPCC气候变化2007综合报告，时间坐标中0表示2005年)

如图 1-3 所示，在 1970—2004 年期间，CO₂ 年排放量从 210 亿吨增加到 380 亿吨，增加了约 80%，在 2004 年 CO₂ 年排放量占人为温室气体排放总量的 77% [图 1-3(a)]，毫无疑问 CO₂ 是最重要的温室气体。此外，在 1995—2004 年，CO₂ 排放的年增加速率 (9.2 亿吨·年⁻¹) 比前一个十年期 (1970—1994 年，4.3 亿吨·年⁻¹) 高得多。从排放行业来看，1970—2004 年期间温室气体排放的最大增幅来自能源供应、交通运输和工业，而住宅建筑和商业建筑、林业 (包括毁林) 以及农业等行业的温室气体排放则以较低的速率增加。以 2004 年温室气体的行业排放情况为例 [见图 1-3(c)]，能源供应和交通行业排放量约占 2004 年人为温室排放量的 40%。

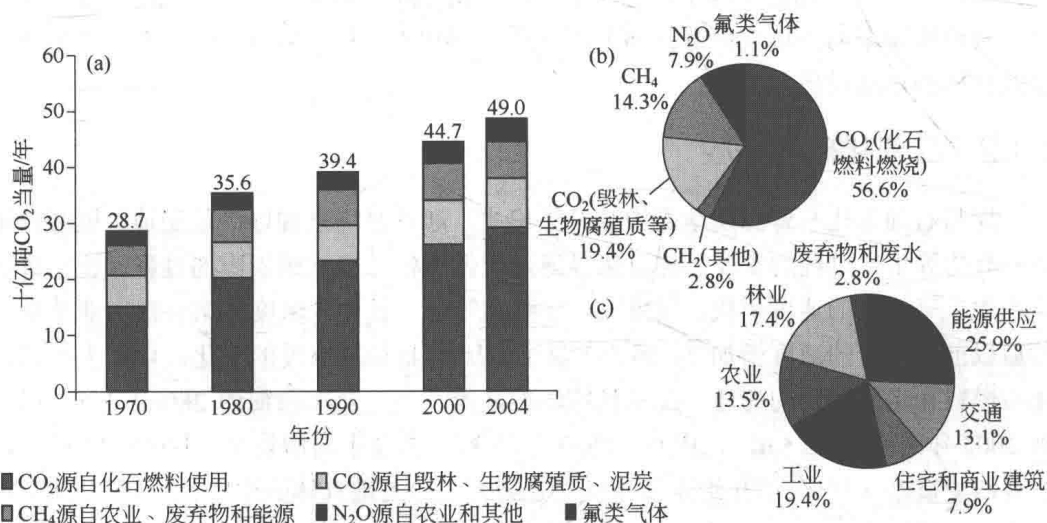


图 1-3 按行业划分的全球人为温室气体排放

(a) 1970—2004年期间全球人为温室气体年排放量； (b) 按CO₂重量计算的不同温室气体占2004年总排放量的份额； (c) 按CO₂重量计算的不同行业排放量占2004年总人为温室气体排放份额

图 1-4 是历年化石燃料燃烧所排放的 CO₂ 量, 从 1971—2009 年排放的 CO₂ 量一直呈上升趋势, 2009 年达到近 300 亿吨。据《IPCC 排放情景特别报告》(SRES, 2010) 预估, 在 2000—2030 年期间化石燃料仍在世界能源结构中占主导地位, 该期间 CO₂ 排放将至少增加 40%, 即到 2030 年全球温室气体排放至少增加 97 亿吨 CO₂ 当量, 总量将超过 367 亿吨 CO₂ 当量^[11]。世界能源署 2010 年发布的能源技术展望 (ETP 2010) 也指出, 煤的大量使用会大幅度增加 CO₂ 的排放^[12], 2035 年煤排放的 CO₂ 达 144 亿吨^[13], 石油燃烧排放的 CO₂ 达 126 亿吨^[13], 而天然气排放的 CO₂ 也达 84 亿吨^[14]。

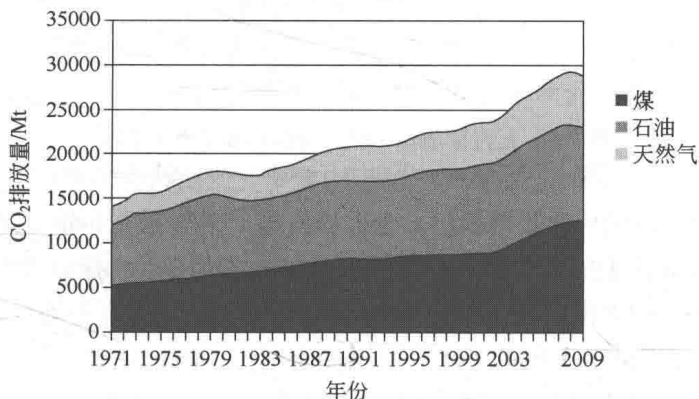


图 1-4 燃料燃烧排放的 CO₂

(资料来源: CO₂ emissions from fuel combustion highlights, 2011, International Energy Agency)

1.1.2.1 不同国家和地区的二氧化碳排放

尽管发展中国家排放的温室气体所占份额快速增长, 目前温室气体的排放仍然以工业化国家为主。图 1-5 显示了 2009 年世界上排放 CO₂ 的十个主要国家, 占全球排放总量的三分之二, 其中中国和美国共排放了 120 亿吨, 占全球的 41%。最近, 据荷兰环境署 2012 年的报告, 中国和美国 2011 年排放的二氧化碳占全球的 45%, 其中中国的排放量达到世界排放量的 29%^[15]。

CO₂ 排放量/GDP 的数值可用于描述二氧化碳排放对经济增长的制约关系, 图 1-6 显示了五大排放国的 CO₂ 排放量/GDP 值的变化, 印度和日本在 1990 年已经拥有了较低的 CO₂ 排放量/GDP 值, 2009 年俄罗斯的 CO₂ 排放量/GDP 值最高, 中国、俄罗斯和美国在 1990—2009 年间显著地降低了排放量/GDP 值, 其中中国的 CO₂ 排放量/GDP 值已经接近美国。

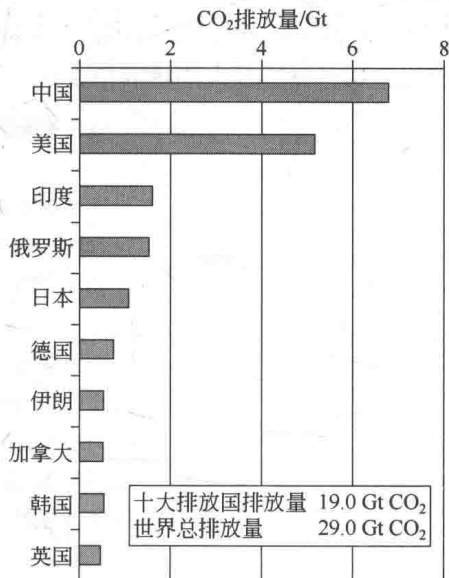


图 1-5 2009 年 CO₂ 的十大排放国
(资料来源: CO₂ emissions from fuel combustion highlights, 2011)

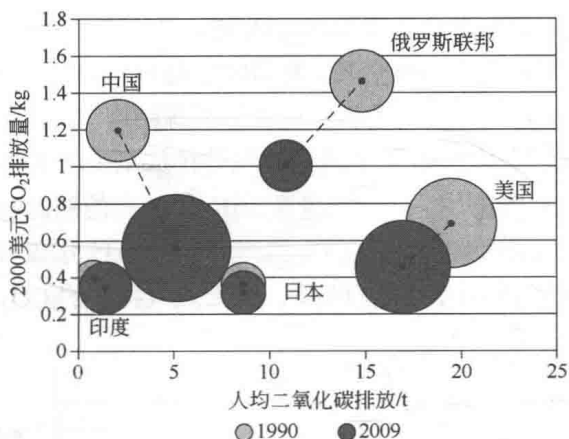


图 1-6 五大排放国 CO₂ 排放量/GDP 变化趋势

(资料来源: CO₂ emissions from fuel combustion highlights, 2011)

与 CO₂ 排放量/GDP 的数据相比,全世界人均 CO₂ 排放量也很有说服力。该数据随不同国家和地区使用能源的方式呈现较大差异。在世界五大排放国中,人均排放量从印度的人均 1t,到中国的人均 5t,再到美国的人均 17t。拥有不到世界 5%人口的美在 2009 年排放了世界 18%的 CO₂。中国拥有世界 20%的人口,排放的 CO₂ 占全世界的 24%,而印度拥有世界上 17%的人口,排放的 CO₂ 只占世界总份额的 5%。

如图 1-7 所示,工业化国家的人均排放量远超过世界人均水平。然而近 20 年来经济发展迅速的发展中国家的人均排放量在迅速增长,1990—2009 年,中国人均排放量增加 2.5 倍,印度人均排放量也增加了一倍,而俄罗斯和美国的人均排放量分别降低了 27%和 13%。据荷兰环境评估局 2012 年的报告,2011 年中国人均排放量已增加到 7.2t,这一数值已经接近欧盟的人均排放量 7.5t,而印度人均排放量则增加到 1.6t,美国则达 17.3t^[15]。

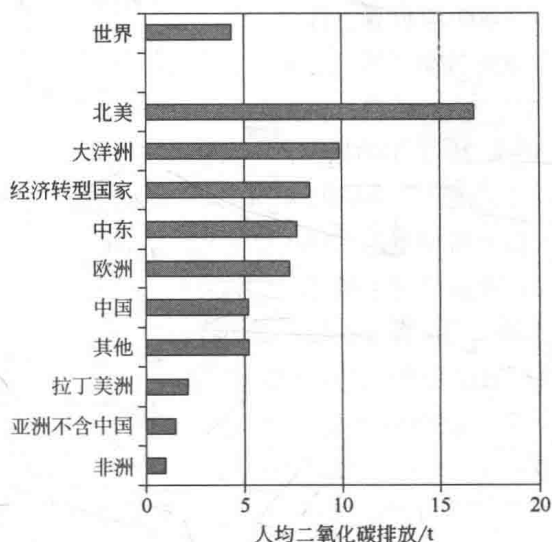


图 1-7 2009 年世界主要地区人均排放量

(资料来源: CO₂ emissions from fuel combustion highlights, 2011)

1.1.2.2 不同部门二氧化碳的排放

图 1-8 为 2009 年各行业排放 CO₂ 的情况,截至 2009 年,发电供热以及交通两大领域产生的 CO₂ 占全球总排放量的 41%,接近三分之二,是迄今为止最大的 CO₂ 排放源。由于煤燃烧在三种化石燃料中产生的 CO₂ 量最大,而发电与供热都强烈地依赖于煤,从而增加了此领域在全球 CO₂ 排放中所占的份额,如澳大利亚、中国、印度、波兰和南非的 68%~94% 的电力和热量均来源于煤。

图 1-9 为 2008—2009 年两年中发电和供热领域产生的 CO₂ 的大致情况,该领域产生的 CO₂ 大多数来自煤,但与 2008 年相比,2009 年的 CO₂ 排放量下降了 1.7%,其中来自石油的二氧化碳排放量降幅最大,下降 2.8%,而煤炭和天然气分别有 1.9% 和 0.7% 的下降。未来发电和供热领域排放 CO₂ 的量强烈依赖于低 CO₂ 排放的发电燃料所占份额,如可再生资源和核能的份额^[14]。

交通领域是 CO₂ 排放的第二大来源,由图 1-8 可知,2009 年此领域排放的 CO₂ 占全球排放量的 23%。在可预见的范围内,全球范围内对交通的要求将持续增大,世界能源展望 2010 (WEO2010) 预计用于交通领域的燃料需求到 2035 年将增长 40%。为了降低交通领域的排放,必须发展电动汽车或混合动力汽车,同时提高交通工具的能量使用效率,以减少交通领域二氧化碳的排放,降低对化石能源的依赖。

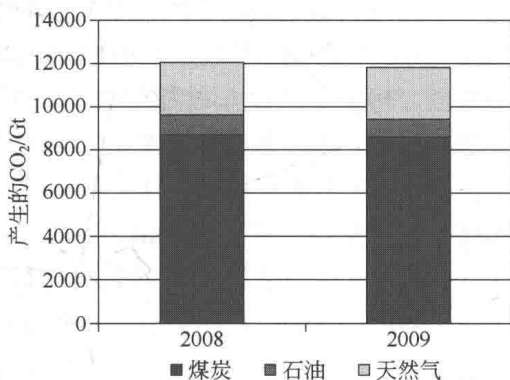
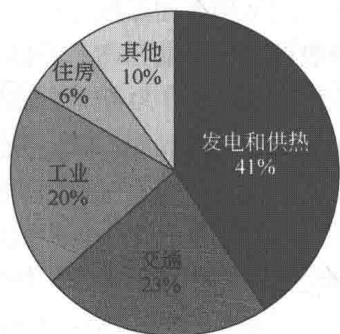


图 1-8 2009 年世界各行业 CO₂ 排放占比 图 1-9 发电和供热领域 2008 年和 2009 年产生 CO₂
(资料来源: CO₂ emissions from fuel combustion highlights, 2011)

1.2 二氧化碳问题的纷争

历史上二氧化碳等温室气体在地球生命体的形成中发挥了重要作用。大约 40 亿年前,地球大气富含氢气,而二氧化碳含量则很低,随着时间的推移,大气逐渐被以氢气和二氧化碳为主的气层取代。由于二氧化碳的存在,当时的地球表面温度远比现在高。直到大约 35 亿年前,地球的气候才逐渐变得适合生命的存在,产生了地球上最低等的生命形式——单细胞藻类植物。藻类植物通过光合作用,进一步改变了大气成分,使大气中二氧化碳的含量减少到大气总量的万分之三,氧气增加到 20%。生物

在其进化过程中逐步改变并适应了地球环境，最终进化到具有语言和逻辑思维能力的人类。由此可见，正是大气中温室气体的存在，为生命的存在提供了必要的物质条件，地球也因此成为人类、动物和植物共同生活和生长的家园。

地球本身存在着稳定的碳循环，大气中二氧化碳可被植物以光合作用方式吸收，同时可以与海洋进行交换，使得前工业时期的几千年里，地球上二氧化碳浓度一直在 $280\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右波动。由于人口增加，加上人类不断发展的生产活动和生活方式，导致二氧化碳排放速度加快，排放量剧增，排放到大气中的二氧化碳不能被地球碳循环所平衡，造成大气中二氧化碳浓度增加，导致温室效应加剧，地球温度升高，并引起一系列极端气候变化。

1.2.1 二氧化碳引起的气候变化

温室气体导致的气候变化并不是简单地导致全球气温一致增高，而是在整体气温增高的同时出现经常性气候异常，主要表现在以下几个方面。

第一是气候变暖。图 1-10 是 1880—2011 年间地球表面温度示意图，地球表面温度在此期间呈上升趋势。根据 IPCC 在 2007 年发表的第四次评估报告，1995—2006 年的 12 年中，有 11 年位列观测以来最暖的 12 个年份。1906—2005 年的地表温度平均每年上升 0.74°C （波动范围为 $0.56\sim 0.92^\circ\text{C}$ ），比《第三次评估报告》（TAR）给出的每年 0.6°C （波动范围为 $0.4\sim 0.8^\circ\text{C}$ ）要高得多。20 世纪地球表面温度升高发生在两个时期，1910—1945 年以及 1976 年之后。尽管地球表面温度普遍升高，升幅依然存在地域差异，其中北半球较高纬度地区温度升幅较大，在过去的 100 年中，北极温度升高的速率几乎是全球平均速率的两倍。自 1961 年以来的观测表明，全球海洋平均温度升高已延伸到至少 3000m 的深度，海洋已经吸收的热量占气候系统增加热量的 80% 以上，并且这一趋势还将持续。同时，日间温度和夜间温度都在上升，但夜间温度上升比日间温度快，从而缩小了昼夜温差。据 IPCC 预测，到 2100 年地表平均气温将上升 $1.4\sim 5.8^\circ\text{C}$ ，升温的趋势在高纬度地区更明显。由于温室气体在大气层中的长期存在以及气候系统的惯性，即使各个国家积极采取措施应对，气候变化还是会持续几十年^[16]。

第二是海平面的上升。基于测潮仪的记录，全球平均海平面在 20 世纪上升了 10~20cm，海平面上升的主要因素是冰川融化进入大海所致，另外由于温度升高引起的海水热膨胀也是一个原因^[10]。据 IPCC 统计，在 1961—2003 年期间，全球平均海平面以每年 1.8mm（波动范围 1.3~2.3mm）的平均速率上升，其中 1993—2003 年全球平均海平面竟以每年大约 3.1mm（波动范围 2.4~3.8mm）的速率上升。近年来中国海平面上升也是很显著的，据 2013 年 2 月 26 日国家海洋局发布的“2012 年中国海平面公报”，1980 年以来中国沿海海平面上升速率为 $2.9\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，远高于全球平均水平。