

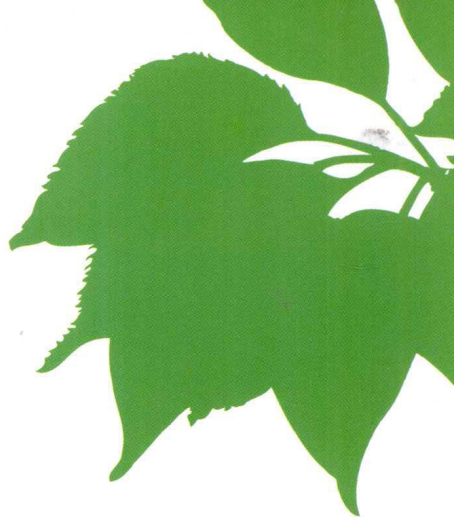


21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国高等院校

环境系列 实用规划教材



空气污染控制工程

郭立新 巴琦 秦传玉 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



中华人民共和国环境保护部
环境工程系列教材

空气污染防治工程

王德明 王 强 王德胜 编



中国环境出版社
CHINA ENVIRONMENTAL PUBLISHING HOUSE

21 世纪全国高等院校环境系列实用规划教材

空气污染控制工程

主 编 郭立新 巴 琦 秦传玉
参 编 刘天元 赵 妍 黄继国



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书共 13 章, 结合大量污染物控制工程实例, 内容注重理论联系实际, 强调培养学生分析和解决大气污染控制工程问题的能力及创新能力。除重点介绍该课程的传统教学内容外, 对近年出现的大气环境新问题和进展较快的空气污染治理新技术也进行了介绍, 在每一章后附有与该章内容相关的思考题与习题, 附录中提供了与空气污染控制工程相关的最新国家法律法规。

本书可作为环境科学、环境工程专业本科生空气污染控制工程课程的教材, 也可供环境科学、环境工程专业硕士研究生、其他相关专业师生和环保科技、设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空气污染控制工程/郭立新, 巴琦, 秦传玉主编 —北京: 北京大学出版社, 2012.1

(21 世纪全国高等院校环境系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-19724-0

I ①空… II ①郭…②巴…③秦… III ①空气污染控制—高等学校—教材 IV. ①X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 231579 号

书 名: 空气污染控制工程

著作责任者: 郭立新 巴 琦 秦传玉 主编

责任编辑: 吴 迪

标准书号: ISBN 978-7-301-19724-0/X · 0049

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16 开本 19.25 印张 445 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

人们对空气污染控制方面的认识在不断深化,空气污染控制理论和技术也在不断发展。空气污染控制工程是环境科学、环境工程专业的主要专业课之一,本书结合作者多年从事空气污染控制工程教学实践经验编写而成,全书共分13章,第1章介绍大气污染的定义,大气污染的发生和发展,大气环境质量控制标准;第2章介绍燃烧过程中污染物的形成与控制,燃烧计算;第3章介绍大气的热力过程,大气污染与气象的关系,大气扩散模式;第4章介绍粉尘的物理性质,除尘器的性能;第5章至第9章介绍机械式除尘器、袋式除尘器、电除尘器、颗粒层除尘器、湿式除尘器的工作原理、结构形式及设计知识;第10章介绍生产性粉尘的治理与综合利用;第11章和第12章介绍气态污染物净化、治理方法与综合利用知识;第13章介绍净化系统的设计及运行管理知识。

本书内容注重针对性和实效性,理论联系实际,通俗易懂,实用性强,在每一章后有与该章内容相关的思考题与习题,便于广大教师的教学和学生的学习,注重培养学生分析和解决空气污染控制工程问题的应用能力。除重点介绍空气污染控制工程的传统内容外,本书对一些近年出现的大气环境新问题和新技术也作了简明扼要的介绍,有助于促进我国高校环境科学和环境工程专业教学质量的提高。

全书由郭立新、巴琦和秦传玉担任主编,参加编写的人员有:长春理工大学郭立新(第1、7、10章),吉林建筑工程学院巴琦(第2、4章),长春理工大学秦传玉(第3、5章),吉林大学黄继国(第6、8章),长春理工大学赵妍(第9、13章),长春理工大学刘天元(第11、12章),全书由郭立新统稿。

本书在编写过程中得到了国内同仁的鼓励和帮助,对本书的修订提出许多宝贵建议。长春理工大学、吉林建筑工程学院的多届本科生为本书的修订提出过许多宝贵建议,在资料收集、图表加工等方面给予诸多帮助,在此,对上述同志表示诚挚的谢意!

由于编者水平有限,在本书的编写过程中难免会出现疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2011年10月

目 录

第 1 章 概论	1	2.3.2 燃烧过程氮氧化物形成与 控制	40
1.1 大气与大气污染	1	2.3.3 燃烧过程中烟尘的形成与 控制	41
1.1.1 大气与大气圈	1	思考题与习题	44
1.1.2 大气的组成	2	第 3 章 污染气象学基础知识	46
1.1.3 大气污染	4	3.1 气象要素	46
1.1.4 当代世界面临的主要大气 环境问题	5	3.2 大气的热力过程	49
1.2 大气污染的发生和发展	10	3.2.1 气温的垂直变化	49
1.2.1 大气污染的回顾	10	3.2.2 大气稳定度	51
1.2.2 大气污染源	11	3.3 大气污染与气象的关系	54
1.2.3 大气污染物及其危害	11	3.3.1 边界层的风与湍流对大气 污染的影响	54
1.2.4 大气污染物的计量	14	3.3.2 大气稳定度与大气污染	58
1.2.5 世界大气污染事件	14	3.3.3 大气温度层结与大气污染	59
1.2.6 中国的大气污染概况	16	3.3.4 降水与大气污染	59
1.3 大气污染综合防治	17	3.3.5 辐射和云对大气污染的影响	59
1.3.1 大气污染综合防治方法 和步骤	17	3.4 大气扩散模式	59
1.3.2 大气污染综合防治措施	17	3.4.1 高斯模式的建立	60
1.4 大气环境质量控制标准	20	3.4.2 常用大气扩散模式	61
1.4.1 大气环境质量标准	21	3.5 污染物浓度估算	62
1.4.2 大气污染物排放标准	22	3.5.1 有效源高	62
1.4.3 空气污染指数	23	3.5.2 大气扩散参数估算	65
思考题与习题	25	思考题与习题	71
第 2 章 燃烧与大气污染	26	第 4 章 颗粒污染物控制基础	74
2.1 燃料及燃烧过程	26	4.1 粉尘的物理性质	74
2.1.1 燃料	26	4.1.1 粉尘的粒径和粒径分布	74
2.1.2 燃料燃烧过程	28	4.1.2 粉尘粒径分布	75
2.2 燃烧计算	32	4.1.3 粉尘的密度	76
2.2.1 燃烧所需理论空气量	32	4.1.4 粉尘的含水率和润湿性	77
2.2.2 烟气量	34	4.1.5 粉尘的黏附性	77
2.2.3 污染物排放量	36	4.1.6 粉尘的电学性能	78
2.3 燃烧过程中污染物的形成与控制	37	4.1.7 粉尘的安息角	79
2.3.1 燃烧过程中硫氧化物的形成 与控制	37	4.1.8 粉尘比表面积	80

4.1.9 粉尘可燃性和爆炸性	80	7.5 电除尘器选型及安装调试.....	148
4.1.10 粉尘的磨损性	81	思考题与习题	151
4.2 除尘器的性能	82	第 8 章 颗粒层除尘器	153
4.2.1 除尘装置分类	82	8.1 颗粒层除尘器的性能	153
4.2.2 除尘器技术性能表示方法	82	8.2 颗粒层除尘器分类与结构型式	154
思考题与习题	85	8.2.1 颗粒层除尘器的分类	154
第 5 章 机械式除尘器	86	8.2.2 颗粒层除尘器的结构型式	155
5.1 重力沉降室	86	思考题与习题	159
5.1.1 工作原理	86	第 9 章 湿式除尘器	160
5.1.2 重力沉降室的设计	88	9.1 湿式除尘器除尘原理	160
5.2 惯性除尘器	90	9.2 湿式除尘器分类与结构	161
5.3 旋风除尘器	92	9.2.1 湿式除尘器的分类	161
5.3.1 旋风除尘器内部流场分布	93	9.2.2 常见湿式除尘器的构造	
5.3.2 旋风除尘器的分类	93	和特点	162
5.3.3 影响旋风除尘器性能的因素	95	思考题与习题	169
5.3.4 常用旋风除尘器的结构		第 10 章 生产性粉尘的治理与综合	
和性能	98	利用	170
5.3.5 旋风除尘器选型	105	10.1 生产性粉尘	170
思考题与习题	106	10.2 锅炉烟气除尘	172
第 6 章 袋式除尘器	108	10.3 冲天炉烟气除尘	176
6.1 袋式除尘器工作原理	108	10.4 水泥厂烟气除尘	178
6.2 袋式除尘器分类	110	思考题与习题	184
6.3 袋式除尘器滤料	113	第 11 章 气态污染物净化	185
6.4 袋式除尘器结构和性能	116	11.1 吸收法净化气态污染物	185
6.5 袋式除尘器设计与应用	123	11.1.1 吸收平衡	185
思考题与习题	126	11.1.2 气液两相间物质传递过	
第 7 章 电除尘器	128	程理论	186
7.1 电除尘器分类	128	11.1.3 吸收气态污染物的工艺	
7.2 电除尘器工作原理	131	配制	188
7.3 电除尘器的结构	136	11.1.4 吸收设备	190
7.3.1 电晕电极	137	11.2 吸附法净化气态污染物	195
7.3.2 集尘电极	139	11.2.1 吸附过程	195
7.3.3 电极清灰装置	141	11.2.2 吸附剂	196
7.3.4 气流分布装置	142	11.2.3 吸附理论	200
7.3.5 电除尘器的壳体	142	11.2.4 吸附流程及吸附设备	201
7.3.6 电除尘器的供电装置	143	11.3 催化转化法净化气态污染物	204
7.3.7 烟气喷雾增湿装置	144	11.3.1 催化剂	204
7.4 影响电除尘器除尘效率的因素	144		



11.3.2 催化作用原理	206	13.2 集气罩	239
11.3.3 多相催化反应的物理 化学过程	207	13.2.1 集气罩的基本形式	239
11.3.4 催化反应器的分类与选择	208	13.2.2 集气罩的性能	243
11.3.5 催化转化法净化气态污 染物的工艺配置	210	13.2.3 集气罩的设计	244
11.4 净化气态污染物的其他方法	211	13.3 管道布置及部件	246
11.4.1 冷凝法净化气态污染物	211	13.3.1 管道的布置	246
11.4.2 燃烧法净化气态污染物	212	13.3.2 管道材料及管道断面形 状选择	248
思考题与习题	218	13.3.3 管道部件	248
第 12 章 气态污染物治理与综合利用	220	13.3.4 管道热补偿	251
12.1 低浓度 SO ₂ 废气净化与利用	220	13.4 净化系统的设计	252
12.2 含 NO _x 废气净化与利用	224	13.4.1 管段流速选择	252
12.3 含氟废气净化与利用	228	13.4.2 管道截面尺寸的确定	253
12.4 有机废气净化与综合利用	231	13.4.3 管道内流体的压力 损失计算	253
12.4.1 含有机溶剂废气的净化	232	13.4.4 并联管道压力平衡	256
12.4.2 催化燃烧净化有机废气	233	13.4.5 风机、泵及电机的选择	257
12.4.3 汽车尾气的催化净化	233	13.5 净化系统运行管理	260
思考题与习题	236	13.5.1 试运行的内容	260
第 13 章 净化系统的设计及运行 管理	237	13.5.2 净化系统的运行管理	261
13.1 净化系统组成及系统设计基本 内容	237	13.5.3 净化系统的保温、防腐、 防磨与防爆	261
		思考题与习题	267
		附录	268
		参考文献	296

第 1 章 概 论

本章教学要点

教 学 要 求	知 识 要 点
了解大气圈及其垂直结构的特征、当代世界面临的主要大气环境问题及其对环境的影响	大气污染的定义、大气圈及其垂直结构的特征、主要大气环境问题
了解我国的大气污染概况，掌握大气污染物及其危害	大气污染物及其危害
掌握大气污染综合防治措施	大气污染综合防治措施
了解大气环境质量标准	大气环境质量标准

1.1 大气与大气污染

1.1.1 大气与大气圈

地球上适于人类生存和发展的自然环境，地球表面环绕着一层很厚的气体，称为环境大气或地球大气。按照国际标准化组织对大气和空气的定义：大气是指地球环境周围所有空气的总和(The entire mass of air which surrounds the Earth)；环境空气是指暴露在人群、植物、动物和建筑物之外的室外空气(Outdoor air to which people, plants, animals and structures are exposed)。大气是自然环境的重要组成部分，是人类赖以生存必不可少的物质。

自然地理学把受地心引力而随地球旋转的大气叫做大气圈，其厚度约为 10^4 km。由于大气圈层与宇宙空间很难确切划分，在大气物理学和污染气象学研究中，常把大气圈层上界定为 1200~1400 km。1400 km 以外，气体非常稀薄，视为宇宙空间。大气圈中的空气分布不均匀，海平面上的空气密度最大，近地层的空气密度随高度上升而减小。在地球表面上空 400~1400 km 的大气层里，空气逐渐变稀薄，地球表面的大气温度不仅随纬度、季节变化，而且随高度变化。

世界气象组织(WMO)根据大气温度垂直分布特点，将大气分为对流层、平流层、中间层、暖层和散逸层。从地球表面向上到大约 80~85 km 高度，大气的主要成分氮和氧的组成比例几乎不变，称作均质大气层，简称均质层。均质层按气温在垂直方向上的变化情况分为对流层、平流层和中间层，均质层以上的大气层，其气体组成随高度变化很大，称为非均质层。非均质层又分为暖层(电离层)和散逸层(外层)。大气圈中的对流层和平流层与大气污染关系密切，尤其是对流层，大气污染主要涉及的是对流层空气污染。

1. 对流层

对流层是地球大气的最低层，底部直接与地面接触，受地面影响最大，厚度最薄。观测表明，对流层的厚度随纬度和季节变化而变化，低纬度地区平均为 17~18 km，中纬度地区平均为 10~12 km，高纬度地区平均为 8~9 km，夏季的厚度大于冬季，整个大气质

量的 70% 及全部水蒸气都集中在对流层中。

对流层内既有空气水平运动, 又有空气垂直运动及不规则的湍流运动, 从而使不同地区和不同层次的空气得以交换。对流层温度随高度升高而降低, 平均每升高 100 m, 气温降低 0.65°C 。近地层热量、水蒸气和杂质通过对流作用向上输送, 导致出现风、云、雨、雪等一系列天气现象。通常所讲的大气污染主要发生在对流层里。1500 m 以下的对流层称为摩擦层或边界层, 该层受地表性质的影响很大, 特别是 50~100 m 以下的贴地层, 主要受地表热力性质和摩擦力影响。这一层是人类活动的主要场所, 进入大气中的污染物绝大部分在该层活动, 气象条件对大气污染物迁移扩散影响很大, 边界层以上的对流层称自由大气层, 受地表面影响较小。

对流层和平流层之间, 有一层厚度约为几百米到 1~2 km 的过渡层, 称对流层顶, 其气温随高度变化几乎不变, 因而对其下层的垂直运动起着阻挡作用。

2. 平流层

从对流层顶向上到 50 km 左右是平流层。平流层中空气密度较小, 垂直运动微弱, 大气比较稳定。对流层顶到 30 km 左右的大气层气温变化很小, 称为同温层。同温层以上的平流层中气温随高度升高而升高, 至平流层顶达 -3°C 左右。平流层集中了大气中大部分臭氧, 在 20~25 km 高度上达到最大值, 形成臭氧层。臭氧层吸收了大量的太阳紫外辐射, 保护地球上的生命免受紫外线伤害。近年来, 臭氧层的臭氧浓度降低, 在极地已形成臭氧洞, 必须引起高度重视。

3. 中间层

平流层顶到 85 km 高度左右的大气层称中间层, 其主要特征是温度随高度的增加迅速降低, 顶部温度可降到 -83°C 以下, 气流有强烈的垂直运动, 又称为高空对流层。

4. 暖层

从中间层顶向上到 800 km 高度为暖层, 在强烈的太阳紫外线和宇宙射线作用下, 气温随高度升高而增高。据人造卫星探测, 其顶部温度可达 1700°C 以上, 暖层空气分子被高度电离, 生成大量的离子和电子, 又称为电离层。

5. 散逸层

散逸层处在暖层顶上面, 又称外大气层, 底部大约在 800 km 高度处, 该层空气极其稀薄, 气体粒子的运动速度很高, 且有向星际空间散逸的特性, 成为整个大气层和星际空间的过渡地带。

1.1.2 大气的组成

自然状态下的大气由清洁的混合气体、水蒸气和悬浮颗粒物组成, 除去水蒸气和悬浮颗粒物的大气称为干洁空气。地球大气的总质量约为 $5.3 \times 10^{15} \text{ t}$, 占地球总质量的百万分之一左右, 其中 98.2% 集中在 30 km 以下的大气层中, 约有 50% 集中在 6 km 以下的对流层中。

1. 干洁大气的组成

干洁大气的主要成分是氮(N_2)、氧(O_2)和氩(Ar), 它们分别占干洁大气总体积的 78.08%、

20.95%、0.93%，其他气体所占体积不到 0.04%，包括二氧化碳(CO₂)、氖(Ne)、氦(He)、氪(Kr)、氙(Xe)、氢(H₂)、臭氧(O₃)等。干洁大气各组分在自然条件下均为气体，不可能液化，是永久气体，可视为一个整体，相对分子质量为 28.966，临界温度为-413.85 K，临界压强为 3.769×10^6 Pa。

由于大气的水平运动、对流、湍流和分子扩散，使不同地区、不同高度的大气得到交换和混合。从地面到 90 km 高度，干洁大气的主要成分和含量基本保持不变。90 km 以上，氮含量稍有减少，氧含量稍有增多，氢和二氧化碳含量明显减少，其中氧和氮分子开始电离。根据火箭探测，在 95 km 高度上，干洁大气中各成分的体积分数约为：氮 77%、氧 21.5%、氩 0.76%。

干洁大气中，对人类活动影响最大的是氮、氧、二氧化碳和臭氧，它们的作用如下。

1) 氧和氮

氧和氮是大气中的恒定气体成分，其中氧是人类和动植物维持生命极为重要的气体，在大气中发生化学反应时，氧起着重要作用。到目前为止，还没有发现空气中氧含量有明显减少，因而影响动植物生命活动的现象，但在土壤和水中，经常出现缺氧现象。氮是地球上有机体的重要组成元素，在有机物中它主要以蛋白质的形式存在，氮也是合成氨等化工生产的基本原料。

2) 二氧化碳和臭氧

在大气中，二氧化碳和臭氧是影响热辐射传输的主要气体。其中二氧化碳虽然随时间地点变化，但在人类活动对大气产生明显影响之前，大气中的二氧化碳含量长期保持在一定水平上。近百年来，由于工业的发展使大气中的二氧化碳浓度逐年增加，且大都集中在 20 km 以下的大气层中。近年来，仅石油和煤的燃烧，每年就有大约 50 亿吨二氧化碳进入大气。从 19 世纪以来，大气中二氧化碳的质量浓度明显增加，由 1800 年的 $511 \sim 560 \text{ mg/m}^3$ 上升到 2007 年的 688 mg/m^3 。

大气中的二氧化碳能吸收地表和低层大气的热辐射，使地面保持较高的温度。大气中二氧化碳含量增加，地表和低层大气的温度就会升高，造成温室效应。

臭氧是大气的微量成分之一，总质量约为 $3.29 \times 10^9 \text{ t}$ ，占大气质量的 0.64×10^{-6} 。臭氧含量随时间和空间变化很大：在 10 km 以下含量甚微；从 10 km 向上含量随高度增高而增加，到 20~25 km 高空处，密度达最大值；再往上则减少，到 55~60 km 高空处，其含量极少。臭氧在水平方向上分布一般由赤道向两极逐渐增加，并随季节变化，最大值出现在春季，最小值出现在夏季。

臭氧在大气中能大量吸收太阳辐射中波长小于 290 nm 的紫外线，保护着地球上有机体的生命活动。据近年观测，在南极和北半球都出现了臭氧浓度减少的现象，多数科学家认为，这主要是人类大量使用氟氯烃类物质的结果。由于臭氧层受到破坏，人类将受到紫外线的危害，因此应禁止使用这类物质，保护臭氧层。

2. 水蒸气

水蒸气是实际大气的重要组成部分，在大气中的平均含量不到 0.5%，而且随空间、时间和气象条件变化而变化。在热带多雨地区，其体积分数可达 4%，沙漠干燥区或极地区可小于 0.01%。一般低纬度地区大于高纬度地区，下层高于上层，夏季高于冬季。观测表明，在 1.5~2 km 高度处，空气中的水蒸气含量已减少为地面的 50%，在 5 km 高度上减少

为地面的 10%。

水蒸气是实际大气中唯一能在自然条件下发生相变的成分。通过水蒸气相变，使地表和大气之间以及大气内部的水蒸气、热和能量得以输送和交换。水蒸气对太阳辐射的吸收能力较小，但对地面长波辐射吸收能力较强，它与二氧化碳一起，对地球起着保温作用。

3. 悬浮颗粒物

实际大气除含有上述气体成分外，还含有固体和液体微粒，称为悬浮颗粒物或悬浮微粒，它是低层大气的重要组成部分。大气中悬浮微粒粒径一般在几纳米到几十微米之间，悬浮微粒包括固体微粒和水蒸气凝结成的水滴和冰晶；固体微粒可分为有机物和无机物两类。其中，有机物微粒数量较少，主要有植物花粉、微生物和细菌等；无机物微粒数量较多，主要来源有岩石或土壤风化后的尘粒、流星燃烧后的灰烬及火山爆发时的尘埃等。悬浮颗粒物多集中于大气底层，不论是含量还是化学成分都是变化的，这些物质中，有许多是引起大气污染的物质。它们的分布随时间、地点和气象条件而变化，通常是陆上多于海上，城市多于乡村，冬季多于夏季。它们的存在对辐射的吸收与散射，云、雾和降水的形成，大气光电现象具有重要作用，对大气污染有重要影响。

1.1.3 大气污染

1. 大气的重要性

空气、水和土壤是人类生存所不可缺少的自然环境要素。人类生存离不开空气，发展工农业生产离不开空气，燃料燃烧离不开空气。人们时刻都要呼吸空气，一个成年人每天大约呼吸 $10\sim 12\text{ m}^3$ 约 $13\sim 15\text{ kg}$ 空气，相当于一天食物量的 10 倍，饮水量的 5~6 倍。生命的新陈代谢离不开空气，一个人 5 周不吃，5 天不喝水，尚可能生存，而 5 分钟不呼吸空气就会死亡。人的生命离不开空气，健康的身体需要新鲜清洁的空气，医学调查表明，肺癌等疾病与大气污染有着密切的关系。

2. 大气污染的含义

随着工业的发展和人口的集中，环境空气，特别是城市空气已经受到了污染。所谓污染，从广义上讲，空气中进入了异物，改变了其原来的组成比例或成分，就可能造成大气污染。但是，通常讲的大气污染是狭义的，是与人们的生产和生活密切相关的。大气污染是指空气中进入了某些物质，其数量、浓度和在空气中的滞留时间足以危害人们的生活、健康和福利，影响动植物生长，损害人们的财产和器物。自然过程和人类活动都会引起大气污染，但主要是人类活动，包括生产和生活活动，如工业生产、交通运输、炊事、取暖等引起的大气污染。就全球而言，火山喷发、山林火灾、海啸、土壤和岩石风化及大气运动等自然过程造成的大气污染，由于自然环境的自净作用，经过一定时间后会消除，逐渐恢复生态平衡，不会影响人类生存，不是大气污染的主要原因。

随着现代工业和交通运输的发展，人口的相对集中，大气污染已成为城市和工业区的重要公害，如大气污染对人们生活和健康的危害，包括对人体正常生活环境和生理机能的影响，可引起慢性病、急性病，甚至死亡；所谓对福利的影响，是指对与人类共存的生物、自然资源以及财产和器物的影响。

1.1.4 当代世界面临的主要大气环境问题

发达国家的环境质量 20 世纪 70 年代后期已有所改善, 中国的环境质量也没有随国民经济发展速度而恶化, 环境污染得到一定控制, 但是, 当代世界仍面临人口膨胀、资源枯竭、生态破坏和环境污染等问题。就大气环境污染而言, 主要是全球性的温室效应、酸雨和臭氧洞等问题。

1. 温室效应

1) 温室效应

存在于大气中的某些痕量物质和存在于对流层中的臭氧具有吸收太阳能在近地表面的长波辐射从而使大气增温的作用, 称之为温室效应(Green-house Effect), 具有这种作用的气体称之为温室气体(Green-house Gases)。在已知的 30 多种与气候变化相关的大气组分中, 二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、氟利昂和臭氧是对气候变暖贡献最显著的 5 种大气成分。主要温室气体及其特征见表 1-1。

表 1-1 主要温室气体及其特征

气体	大气中体积分数 / 10^{-6}	年增长率/%	生存期/年	温室效应 ($\text{CO}_2=1$)	现有贡献率/%	主要来源
CO_2	355	0.4	50~200	1	50~60	煤、石油、森林砍伐
CFC	0.00085	2.2	50~100	>3400	12~20	发泡剂、制冷剂
CH_4	1.7	0.8	12~17	11	15	湿地、稻田、牲畜
N_2O	0.31	0.25	120	270	6	化石燃料、化肥生产
O_3	0.03	0.5	数周	4	8	光化学反应

CO_2 等温室气体产生温室效应的机理, 普遍认为与 CO_2 等温室气体的物理性质有关。这些气体对来自太阳的短波辐射具有高度的透过性, 但能吸收地面的长波辐射。 CO_2 的强吸收带在 $12.5\sim 17\mu\text{m}$ 之间, 其他温室气体的吸收带大多在 $7\sim 13\mu\text{m}$ 范围内。由于 CO_2 等温室气体的含量在大气中的增加, 使大气层吸收地面的长波辐射能力增强, 导致大气层温度升高, 气候变暖, 形成温室效应。燃料燃烧的主要产物是 CO_2 , 随着世界人口的增加和经济的迅速发展, 排入大气的 CO_2 愈来愈多。据估算, 过去 100 年通过燃烧排入大气的 CO_2 约为 $4.15\times 10^{11}\text{t}$, 使大气中 CO_2 含量增加约 15%, 使全球平均气温上升 $0.83\text{ }^\circ\text{C}$ 。该数字与百年来全球气温升高记录接近, 按照目前化石燃料用量的增加速率, 大气中的 CO_2 将在 50 年内加倍, 使中纬度地面温度升高 $2\sim 3\text{ }^\circ\text{C}$, 极地地区气温升高 $6\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$, 温室效应将给人类的生态环境带来难以预测的后果。尽管温室效应不是气候变化的唯一因素, 但 CO_2 等气体浓度的增加是肯定的, 温室效应已引起国际社会的普遍关注。

2) 气候变化对自然界和人类的影响

气候变化对自然界和人类的影响主要表现在以下几个方面。

(1) 雪盖和冰川面积减少。卫星数据显示, 雪盖面积自 20 世纪 60 年代末以来已减少 10% 左右, 最近几十年, 北极海冰厚度在夏末秋初期间减少了 40% 左右, 冬季则减少缓慢。

(2) 海平面上升。在过去 100 年中全球海平面上升 $100\sim 200\text{ mm}$ 。海平面的持续上升将会使一些岛屿消失, 人口稠密、经济发达的沿海地区可能会遭受海水入侵、海滩和海岸



遭受侵蚀，土地恶化，海水倒灌和洪水灾害加剧，港口受损，并影响沿海养殖业，破坏供水系统。

(3) 降水格局变化。总体趋势是，中纬度地区降雨量增大，北半球的亚热带地区的降雨量下降，南半球的降雨量增大。

(4) 导致气候灾害事件发生。全球平均气温略有上升，就可能带来频繁的气候灾害，例如过多的降雨、大范围的干旱和持续的高温。

(5) 影响人类健康。气候变暖会增加人群的发病率和死亡率。

(6) 影响农业和自然生态系统。

3) 人类控制气候变化的途径与策略

人类控制气候变化的途径与策略主要有以下几个方面。

(1) 控制温室气体排放。改变能源结构，控制化石燃料使用量，增加核能和可再生能源使用比例；提高工业生产部门的能源使用效率，降低单位产品能耗；提高建筑采暖等民用能源效率；提高交通部门的能源利用效率；减少森林植被的破坏，控制水田和垃圾填埋场排放甲烷等，由此来控制 and 减少二氧化碳等温室气体的排放量。

(2) 增加温室气体吸收。主要途径有植树造林和采用固碳技术等。固碳技术是指把燃烧气体中的二氧化碳分离、回收，注入深海或地下，或者通过化学、物理及生物方法固定。

(3) 适应气候变化。主要措施有培养新的农作物品种，调整农业生产结构，规划和建设防止海岸侵蚀工程等。

从各国政府可能采取的政策手段来看，一是实行直接控制，包括限制化石燃料的使用和温室气体的排放，限制砍伐森林；二是应用经济手段，包括征收污染税费，实施排污权交易，提供补助资金和开发援助；三是鼓励公众参与，包括向公众提供信息，进行教育、培训等。

面对全球气候变化问题，发达国家已把开发节能和新型能源技术列为能源战略的重点。到 20 世纪 90 年代，美国能源部已把开发高效能源技术和减排温室气体列为中心任务，致力于开发各种先进发电技术及其他新能源技术。

4) 控制气候变化国际行动

为控制温室气体排放和气候变化危害，1992 年联合国环发大会通过《气候变化框架公约》，公约确立的最终目标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。基于“共同但又有所区别的责任”的原则，提出到 20 世纪 90 年代末使发达国家温室气体的年排放量控制在 1990 年的水平。发展中国家温室气体的排放不受限制，但需要报告本国温室气体的排放情况。1997 年，在日本京都召开的缔约国第三次大会上，通过《京都议定书》，规定二氧化碳、氧化亚氮、甲烷、氢氟碳化合物、全氟化碳以及六氟化硫等 6 种受控温室气体，明确了各发达国家削减温室气体排放量的比例，允许发达国家通过相互之间的合作及其同发展中国家之间的合作，完成其有关限制和削减排放的承诺。

2. 酸雨

1) 酸雨的定义

酸雨是指 pH 小于 5.6 的雨、雪或其他形式的大气降水，是一种大气污染现象。空气中 CO_2 的平均质量浓度约为 $621\text{mg}/\text{m}^3$ ，此时被 CO_2 饱和的雨水 pH 为 5.6，故清洁的雨、雪、雾等降水呈弱酸性。由于人类活动向大气排放大量酸性物质，使降水 pH 值降低，当



pH $\leq$ 5.6 时便发生酸雨。

形成酸雨的主要污染物是 SO_2 和 NO_x 等。以 SO_2 为例,大量 SO_2 进入大气后,在合适的氧化剂和催化剂存在时,就会发生化学反应生成硫酸。在干燥条件下, SO_2 被氧化成 SO_3 的反应缓慢;在潮湿大气中, SO_2 转化成硫酸的过程常与云雾的形成同时进行, SO_2 首先生成亚硫酸,而后在铁、锰等金属盐杂质催化下,被迅速氧化为硫酸。

2) 酸雨的地理分布

20 世纪 70 年代以来,随着世界经济的发展和矿物燃料消耗量的增加,矿物燃料燃烧中排放的二氧化硫、氮氧化物等大气污染物总量也不断增加,酸雨分布有扩大的趋势。酸雨最早发生在挪威、瑞典等北欧国家,随后由北欧扩展到东欧和中欧,直至几乎覆盖整个欧洲。20 世纪 80 年代初,整个欧洲的降水 pH 在 4.0~5.0 之间,雨水中硫酸盐含量明显升高。酸雨污染可以发生在其排放地 500~2000 km 的范围内,酸雨的长距离传输会造成典型的越境污染问题。美国是世界上能源消费量最多的国家,大约消费世界 20% 的能源,美国每年燃烧矿物燃料排出的二氧化硫和氮氧化物也占世界首位。从美国中西部和加拿大中部工业心脏地带污染源排放的污染物落在美国东北部和加拿大东南部的农村地区,其中加拿大有一半的酸雨来自美国。

亚洲是二氧化硫排放量增长较快的地区之一,主要集中在东亚,其中我国南方是酸雨最严重的地区,成为世界上又一大酸雨区。

3) 酸雨的危害

(1) 使淡水湖泊、河流酸化,湖水中鱼类减少。湖水或河水的 pH 降到 5 以下时,鱼的繁殖和发育会受到严重影响,土壤和底泥中的金属可被溶解到水中,毒害鱼类。水体酸化还可能改变水生生态系统。挪威在 20 世纪 70 年代开展一项酸沉降对于森林和渔业的影响调查证实,酸雨对北欧生态系统的损害确实存在,在酸雨最严重时期,挪威南部 5000 个湖泊中有 1750 个由于 pH 过低而使鱼、虾绝迹。在瑞典,20% 的湖泊已受到酸雨的损害。

(2) 影响土壤特性。酸雨能够影响土壤中微生物的生长发育,改变土壤的结构,使土壤释放出某些有害的化学成分,危害植物根系的生长发育,酸雨还抑制土壤中有机的分解和氮的固定,淋洗土壤中钙、镁、钾等营养元素,使土壤贫瘠化。

(3) 影响森林生长。酸雨损害植物的新生叶芽,从而影响其生长发育,导致森林生态系统的退化,如图 1.1 所示。

(4) 腐蚀建筑材料及金属结构。酸雨能使混凝土、砂浆等非金属材料表面硬化,出现空洞和裂缝,导致建筑物强度降低,甚至损坏。特别是许多以大理石和石灰石为材料的历史建筑物和艺术品,耐酸性差,容易受酸雨腐蚀。

(5) 影响人体健康。酸雨或酸雾对人的眼角膜和呼吸道黏膜有刺激作用,红眼病和支气管炎是酸雨对人体健康的直接影响。农田土壤酸化,使固定在土壤矿化物中的有害重金属溶出,被作物吸收和富集,人类摄取后发生中毒,这是酸雨对人体健康的间接影响之一。

4) 控制酸雨的措施与策略

控制酸雨污染是大气污染防治法律和政策的一个主要领域,它主要包括两方面的措施:一种是政策手段,即通过制定法律和空气质量标准、实行排放许可证制度等途径,要求采用“最佳可用技术”进行治理,以降低污染物的排放量;另一种手段是经济手段,即通过排污收费、征收污染税或能源税、发放排污许可证和排污权交易等多种途径,刺激和鼓励

削减 SO_2 排放量，此法已越来越多地被各国所接受。美国 1990 年修订了《清洁空气法》，建立 SO_2 排放交易制度。据估计，由于交易制度的实施，只需酸雨控制计划原费用的 50%，就可实现到 2010 年全国电站 SO_2 排放量在 1980 年基础上削减 50% 的目标。



图 1.1 酸雨腐蚀后的森林

为综合控制燃煤污染，国际社会提倡实施煤炭加工、燃烧、转换和烟气净化等清洁煤技术，这是解决二氧化硫排放的最为有效的一个途径。美国能源部在 20 世纪 80 年代就把开发清洁能源和解决酸雨问题列为中心任务，从 1986 年开始实施清洁煤计划，许多电站转向燃用西部的低硫煤，日本、西欧国家已普遍采用烟气脱硫技术。

(1) 控制致酸前体物排放和酸雨的主要途径。对原煤进行洗选加工，减少煤炭中的硫含量；优先开发和使用各种低硫燃料，如低硫煤和天然气；改进燃烧技术，减少燃烧过程中二氧化硫和氮氧化物的产生量；改进汽车发动机技术，安装尾气净化装置，减少氮氧化物的排放。

(2) 酸雨控制国际行动。1972 年酸雨作为国际性环境问题首先由瑞典在斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议上提出，瑞典政府通过环境酸化主题报告，向全世界告知了酸雨的危害，阐述了酸雨及致酸物质的越境迁移，缔结国际公约成为各国酸雨控制对策的重要组成部分。1975 年在赫尔辛基召开全欧安全保障协作会议，提出东西欧协作环境问题提案。1979 年由 33 个国家，包括加拿大和美国，签定长距离跨国大气污染公约。在此基础上欧洲经济合作委员会于 1984 年 9 月制定《欧洲大气污染物远距离输送监测和评价计划》，于 1988 年 1 月生效，其目的是为控制大气污染物越境输送提供基础数据。1984 年 3 月的渥太华环境部长会议后，欧洲 20 多个国家于 1985 年在芬兰的赫尔辛基签定二氧化硫排放控制协定，要求所有缔约国以 1980 年二氧化硫排放量为基准，最迟于 1993 年将其二氧化硫的年排放量或跨国通量削减 30%。

3. 臭氧层破坏

1) 臭氧层破坏机理

臭氧是大气中的微量气体之一，主要集中在平流层 20~25 km 的高空，该层大气也称

臭氧层。臭氧层对保护地球上的生命,调节气候具有极为重要的作用。但是,近几十年来,由于出现在平流层的飞行器逐渐增多,人类生产和使用消耗臭氧的有害物质增多,导致排入大气中的 NO_x 、氯氟烃等增多,使臭氧层遭到破坏。

2) 臭氧层破坏的危害

臭氧层破坏使大量紫外线光辐射到地面,危害人体健康,据估计,臭氧层的臭氧减少 1%,地面紫外线光辐射增加 2%,皮肤癌发病率增加 2%~5%;臭氧减少会使白内障发病率增高,并对人体免疫系统产生抑制作用;紫外光辐射增大,会对动物、植物产生影响,危及生态平衡;臭氧层破坏还将导致地球气候异常,带来灾害。

3) 臭氧层破坏的应对措施与策略。

(1) 开发消耗臭氧层物质的替代技术。在现代经济中,氟利昂等物质应用非常广泛,要全面淘汰,必须找到氟利昂等的替代物质和替代技术。在特殊情况下需要使用,应努力回收,尽可能重新利用。目前,科技人员正在研究开发非氟利昂类型的替代物质和方法,停止 CFCs 的使用。

(2) 制定淘汰消耗臭氧层物质的措施。为推动氟利昂替代物质和技术的开发和使用,逐步淘汰消耗臭氧层的物质,许多国家采取一系列政策措施,一类是传统的环境管制措施,如禁用、限制、配额和技术标准,并对违反规定实施严厉处罚,欧盟国家广泛采用此类措施;一类是经济手段,如征收税费,资助替代物质和技术开发等。美国对生产和使用消耗臭氧层物质的公司实行征税和交易许可证等措施,许多民间团体还发起自愿行动,鼓励生产者和消费者生产和使用不带有消耗臭氧层物质的材料 and 产品,其中绿色冰箱标志得到广泛应用。

(3) 开展淘汰消耗臭氧层物质的国际行动。1985 年,在联合国环境署的推动下,28 个国家通过了保护臭氧层的《维也纳公约》。1987 年,46 个国家联合签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》,对 8 种破坏臭氧层的物质(简称受控物质)提出了削减使用的时间要求。1990 年、1992 年和 1995 年,在伦敦、哥本哈根、维也纳召开的议定书缔约国会议上,对议定书又分别作 3 次修改,扩大受控物质的使用范围,现包括氟利昂(氟氯化碳 CFC)、哈龙(CFCB)、四氯化碳(CCl_4)、甲基氯仿(CH_3CCl_3)、氟氯烃(HCFC)和甲基溴(CH_3Br)等,并提前了停止使用的期限。根据修改后的议定书的规定,发达国家到 1994 年 1 月停止使用哈龙,1996 年 1 月停止使用氟利昂、四氯化碳、甲基氯仿,发展中国家到 2010 年全部停止使用氟利昂、哈龙、四氯化碳、甲基氯仿,中国于 1992 年加入《蒙特利尔议定书》。

目前,向大气层排放的消耗臭氧层物质已开始逐渐减少。从 1994 年起,对流层中消耗臭氧层物质的浓度开始下降。尽管 CFCs 排放在下,但其平流层的浓度还在继续上升,这是因为前些年排放的长寿命 CFCs 还在上升进入平流层。预计在未来几年中,平流层中消耗臭氧层物质的浓度将达到最大限度,然后开始下降。但是,由于氟利昂相当稳定,可存在 50~100 年,即使议定书完全得到履行,臭氧层的耗损也只能在 2050 年以后才有可能完全复原。

阅读材料 1-1

中国控制酸雨和致酸前体物的重大行动

自 20 世纪 80 年代以来中国政府组织了大规模的酸雨研究与监测,从酸雨来源、影响