



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大气污染控制工程

DAQI WURAN KONGZHI GONGCHENG

童志权 ○ 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
21世纪高等教育环境工程系列规划教材

# 大气污染控制工程

主 编 童志权  
参 编 王京刚 童 华 黄 妍  
马乐凡 刘迎云 张俊丰



机械工业出版社

本书是根据全国高等工业学校环境工程专业教材编审委员会制定的教学基本要求,为适应环境工程专业本科生大气污染控制工程(80~100学时)的教学需要而编写的教材。

本书内容按“大气污染物的生成控制—粉尘污染物控制—气态污染物控制—稀释扩散控制”的主线编排,力求理论联系实际,注重培养学生分析和解决大气污染控制工程问题的能力。除重点介绍该课程的传统内容外,本书对一些近年出现的大气环境新问题和发展较快的新技术也作了简明扼要的介绍。

本书主要内容包括:绪论、大气污染物的生成控制、除尘技术基础、机械式除尘器、电除尘器、过滤式除尘器、湿式除尘器、气态污染物吸收净化法、气态污染物的吸附净化法、催化转化法净化气态污染物、气态污染物的其他净化法、烟(废)气脱硫脱硝、其他几种废气处理技术、废气净化系统的组成和设计、大气污染的稀释扩散控制。考虑到工程专业的学生今后应该具有解决工程问题的能力,因此本书非常重视以上各章中工程设备的计算问题。

本书可作为环境工程专业本科生大气污染控制工程课程的教材,也可供环境工程专业硕士生、高校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

大气污染控制工程/童志权主编. —北京:机械工业出版社,2006.7  
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)  
(21世纪高等教育环境工程系列规划教材)  
ISBN 7-111-19381-4

I. 大... II. 童... III. 空气污染控制—高等学校—教材  
IV. X510.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第065572号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:马军平 版式设计:霍永明 责任校对:刘志文  
封面设计:王伟光 责任印制:杨曦  
北京外文印刷厂印刷  
2006年9月第1版第1次印刷  
184mm×260mm·27.5印张·677千字  
定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68326294  
编辑热线电话(010)88379711  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是根据全国高等工业学校环境工程专业教材编审委员会制定的教学基本要求，以童志权、陈昭琼 1987 年版《大气污染控制工程》为基础，结合湘潭大学、北京化工大学、长沙理工大学、南华大学等四所高校多年讲授大气污染控制工程课程的经验，并参考国内其他大气污染控制工程教材编写的环境工程专业本科教材。本书可供环境工程专业本科生 80~100 学时教学使用。学时数较少时，可选部分内容供学生自学。本书也可供环境工程专业硕士生、高校其他相关专业师生和环保科技、设计人员参考。

本书内容按大气污染控制工程的基本程序编写，即按“大气污染物的生成控制—粉尘污染物控制—气态污染物控制—稀释扩散控制”的主线编排，力求理论联系实际，注重培养学生分析和解决大气污染控制工程问题的能力。除重点介绍该课程的传统内容外，本书对一些近年出现的大气环境新问题和发展较快的新技术也作了简明扼要的介绍。

第 1 章“绪论”中介绍了有关大气污染的基本概念、概况、综合防治基本知识和全球性大气污染问题、室内空气污染问题以及气体参数的换算等。

第 2 章为“大气污染物的生成控制”，主要论述能源及燃烧与大气污染的关系，燃烧过程中各种污染物的生成机理及减少其生成量的控制方法以及清洁生产知识、机动车污染控制（目前机动车污染控制的大量工作仍然是“污染物的生成控制”）等。

第 3~7 章和第 8~14 章分别以较大的篇幅阐述了“大气污染控制工程”的主体内容——粉尘污染物控制和气态污染物控制的原理、方法、典型设备及其设计计算、几种主要气态污染物的治理方法、工艺和净化系统的组成与设计；考虑到“工程”专业的学生今后应该具有解决“工程”问题的能力，因此本书非常重视以上各章中工程设备的计算问题。

第 15 章论述了影响污染物稀释扩散的气象因素、大气扩散的基本理论、大气污染浓度估算及烟囱高度设计、城市规划原则等。

本书由湘潭大学童志权主编，湘潭大学的黄妍、张俊丰，北京化工大学王京刚、童华，长沙理工大学马乐凡，南华大学刘迎云等老师参编。各章编写分

工如下：童志权编写第 1、5、6、15 章；马乐凡编写第 2 章；王京刚、童志权合编第 3、4 章；刘迎云编写第 7、14 章；童华编写第 8、12 章；张俊丰编写第 9 章；黄妍编写第 10、11 章；童志权、张俊丰合编第 13 章。童志权编写了全书的大纲，并对全书各章节进行了认真、仔细的修改和审定。本书部分习题选自郝吉明、马广大老师主编的《大气污染控制工程》，在此向该书作者表示感谢。湘潭大学的部分本科生和研究生为本书的完善提出了许多建议，在此表示诚挚的谢意。

本书配有教学课件，向授课教师免费提供，需要者请参见书末信息反馈表中的联系方式。

由于编者水平有限，书中错误和缺点难免，热情希望读者提出批评和建议。

**编 者**

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 大气的组成及结构 .....	1
1.1.1 大气的组成 .....	1
1.1.2 大气层结构 .....	2
1.2 大气污染、污染物和污染源 .....	3
1.2.1 大气污染的定义及分类 .....	3
1.2.2 大气污染物 .....	4
1.2.3 大气污染源 .....	5
1.2.4 大气污染的危害 .....	6
1.2.5 我国大气污染的现状 .....	6
1.3 全球性大气污染问题 .....	7
1.3.1 温室效应与气候变化 .....	7
1.3.2 臭氧层破坏 .....	10
1.3.3 酸雨 .....	12
1.4 室内环境污染 .....	13
1.5 大气污染综合防治 .....	15
1.5.1 综合防治的基本概念 .....	15
1.5.2 大气污染综合防治措施 .....	16
1.6 大气环境标准 .....	17
1.6.1 大气环境标准的种类 .....	17
1.6.2 环境空气质量标准 .....	17
1.6.3 大气污染物排放标准 .....	19
1.7 主要气体参数的换算与计算 .....	19
1.7.1 气体的湿度 .....	19
1.7.2 气体密度的换算 .....	21
1.7.3 气体体积的换算 .....	22
1.7.4 气体粘度的换算 .....	23
1.7.5 气体的单位量定压热容及定压热 计算 .....	24
1.8 大气污染控制工程系统 .....	27
习题 .....	28
<b>第 2 章 大气污染物的生成控制</b> .....	29
2.1 能源与大气污染 .....	29
2.1.1 能源的分类 .....	29
2.1.2 能源利用与大气污染 .....	29
2.1.3 能源利用过程中的污染控制 .....	30
2.2 固定源燃烧过程中大气污染物的生成 机理及控制 .....	30
2.2.1 燃料的分类 .....	30
2.2.2 烟尘的生成机理及控制 .....	32
2.2.3 含硫污染物的生成机理及控制 .....	34
2.2.4 $\text{NO}_x$ 的生成机理及控制 .....	39
2.3 燃烧计算 .....	46
2.3.1 气体燃料的燃烧计算 .....	46
2.3.2 液体和固体燃料的燃烧计算 .....	49
2.4 机动车大气污染物的生成控制 .....	51
2.4.1 概述 .....	51
2.4.2 汽油车的污染控制 .....	53
2.4.3 柴油车大气污染物的生成控制 .....	57
2.5 清洁生产 .....	61
2.5.1 清洁生产概况 .....	61
2.5.2 清洁生产的实施 .....	62
习题 .....	63
<b>第 3 章 除尘技术基础</b> .....	65
3.1 粉尘的物理性质 .....	65
3.1.1 粉尘的密度 .....	65
3.1.2 粉尘的比表面积 .....	65
3.1.3 粉尘的含水率及润湿性 .....	66
3.1.4 粉尘的荷电性及导电性 .....	67
3.1.5 粉尘的粘附性 .....	67
3.1.6 粉尘的爆炸性 .....	68
3.2 粉尘的粒径及粒径分布 .....	68
3.2.1 粉尘的粒径 .....	68
3.2.2 粉尘的粒径分布 .....	70
3.2.3 粉尘粒径的分布函数 .....	71
3.3 微粒在流体中的运动阻力 .....	75
3.3.1 微粒在流体中的运动阻力和阻力 系数 .....	75
3.3.2 滑动修正系数 .....	76
3.4 微粒沉降分离机理 .....	77
3.4.1 重力沉降 .....	77
3.4.2 离心沉降 .....	79
3.4.3 电力沉降 .....	79

3.4.4 惯性沉降 .....	79	6.2.1 影响过滤效率的主要因素 .....	132
3.4.5 扩散沉降 .....	81	6.2.2 袋式除尘器的压力损失 .....	133
3.4.6 其他沉降机理 .....	83	6.2.3 袋式除尘器的运行状态分析 .....	134
3.5 除尘器的分类与性能 .....	85	6.3 袋式除尘器的结构形式 .....	136
3.5.1 除尘器的分类 .....	85	6.3.1 滤料 .....	136
3.5.2 净化装置的性能指标 .....	85	6.3.2 袋式除尘器的分类 .....	137
3.5.3 除尘器的除尘效率 .....	86	6.3.3 袋式除尘器的结构形式 .....	138
习题 .....	89	6.4 袋式除尘器的选择设计及应用 .....	142
<b>第4章 机械式除尘器</b> .....	92	6.5 颗粒层除尘器 .....	144
4.1 重力沉降室 .....	92	习题 .....	147
4.1.1 层流沉降原理 .....	92	<b>第7章 湿式除尘器</b> .....	149
4.1.2 湍流沉降机理 .....	94	7.1 湿式除尘器的分类与性能 .....	149
4.1.3 经济沉降室尺寸的确定 .....	95	7.1.1 湿式除尘器的分类 .....	149
4.2 惯性除尘器 .....	95	7.1.2 湿式除尘器的特点及一般性能 .....	150
4.3 旋风除尘器 .....	97	7.1.3 湿式除尘器的除尘效率 .....	150
4.3.1 工作原理 .....	97	7.2 重力喷雾塔与离心式洗涤器 .....	152
4.3.2 压力损失 .....	98	7.2.1 重力喷雾塔 .....	152
4.3.3 除尘效率 .....	99	7.2.2 离心式洗涤器 .....	154
4.3.4 旋风除尘器的结构形式 .....	102	7.3 自激式洗涤器 .....	158
4.3.5 旋风除尘器的卸灰装置 .....	106	7.4 文丘里洗涤器 .....	159
4.3.6 选型设计 .....	107	习题 .....	165
习题 .....	108	<b>第8章 气态污染物吸收净化法</b> .....	166
<b>第5章 电除尘器</b> .....	110	8.1 气体的溶解与相平衡 .....	166
5.1 电除尘器的工作原理、分类和特点 .....	110	8.1.1 溶解度曲线 .....	166
5.2 电晕放电 .....	112	8.1.2 亨利定律 .....	167
5.2.1 电晕的发生和空间电荷的形成 .....	112	8.1.3 伴有化学反应的相平衡 .....	168
5.2.2 起晕电压和伏安特性 .....	113	8.1.4 相平衡与吸收过程的关系 .....	173
5.2.3 影响电晕放电的因素 .....	115	8.2 气液传质理论 .....	174
5.3 粒子荷电 .....	117	8.2.1 分子扩散与菲克定律 .....	174
5.3.1 电场荷电 .....	117	8.2.2 扩散系数 .....	174
5.3.2 扩散荷电 .....	118	8.2.3 对流扩散 .....	175
5.4 粒子的捕集 .....	119	8.3 吸收速率方程式 .....	177
5.4.1 捕集效率方程 .....	119	8.3.1 吸收过程机理 .....	177
5.4.2 粒子驱进速度 .....	120	8.3.2 吸收速率方程式 .....	177
5.4.3 影响捕集效率的因素 .....	121	8.3.3 伴有化学反应的吸收速率 .....	181
5.5 电除尘器的基本结构与选择设计 .....	123	8.4 吸收塔的计算 .....	187
5.5.1 电除尘器的基本结构 .....	123	8.4.1 吸收塔的基本计算 .....	188
5.5.2 电除尘器的选择设计 .....	126	8.4.2 填料吸收塔的计算 .....	190
习题 .....	129	8.4.3 板式吸收塔的计算 .....	194
<b>第6章 过滤式除尘器</b> .....	131	8.4.4 伴有化学反应的吸收塔计算 .....	195
6.1 袋式除尘器的除尘过程 .....	131	8.5 吸收设备 .....	199
6.2 袋式除尘器的性能 .....	132	8.5.1 填料吸收塔 .....	200
		8.5.2 板式吸收塔 .....	201

8.5.3 喷淋(雾)塔	202	<b>第 11 章 气态污染物的其他净化法</b>	265
8.5.4 鼓泡塔	203	11.1 燃烧法	265
8.5.5 超重力吸收器	203	11.1.1 燃烧法概述	265
习题	204	11.1.2 燃烧基本原理	265
<b>第 9 章 气态污染物的吸附净化法</b>	206	11.1.3 直接燃烧	268
9.1 吸附基本理论	206	11.1.4 热力燃烧	268
9.1.1 物理吸附与化学吸附	206	11.1.5 热能回收及安全	271
9.1.2 吸附平衡	207	11.2 冷凝法	272
9.1.3 吸附速率	210	11.2.1 冷凝净化原理	272
9.2 吸附剂与吸附设备	212	11.2.2 冷凝设备	273
9.2.1 吸附剂	212	11.2.3 冷凝计算	274
9.2.2 吸附设备及流程	214	11.3 膜分离法	278
9.3 固定床吸附过程计算	217	11.3.1 气体分离膜的特性参数	279
9.3.1 吸附负荷曲线与透过曲线	217	11.3.2 气体膜分离机理	281
9.3.2 影响透过曲线斜率的因素	219	11.3.3 气体膜分离设备	283
9.3.3 透过曲线的计算	220	11.4 生物净化法	283
9.3.4 等温固定床吸附器的计算	221	11.4.1 微生物净化气态污染物的原理	284
9.4 移动床吸附过程计算	229	11.4.2 净化工艺与设备	284
9.5 吸附浸渍与吸附剂的再生	232	11.5 高能电子活化氧化法	286
9.5.1 吸附浸渍	232	11.6 光催化与分解净化法	286
9.5.2 吸附剂的再生	233	习题	288
9.5.3 吸附剂的劣化现象与 残余吸附量	234	<b>第 12 章 烟(废)气脱硫脱硝</b>	289
习题	235	12.1 烟气脱硫概述	289
<b>第 10 章 催化转化法净化气态污染物</b>	237	12.2 湿法脱硫技术	291
10.1 概述	237	12.2.1 石灰石/石灰法	291
10.1.1 催化转化法及其分类	237	12.2.2 间接石灰石/石灰法	293
10.1.2 催化作用	237	12.2.3 海水脱硫技术	295
10.1.3 催化剂	238	12.2.4 钠碱吸收法	296
10.2 气固相催化反应宏观动力学	240	12.2.5 湿式氨法脱硫技术	297
10.2.1 气固相催化反应过程	240	12.2.6 金属氧化物法	298
10.2.2 表面化学反应速率方程	241	12.3 干法和半干法脱硫技术	300
10.2.3 气固相催化反应宏观动力学	243	12.3.1 喷雾干燥法	300
10.3 气固相催化反应器设计	246	12.3.2 烟气循环流化床脱硫技术	301
10.3.1 气固相催化反应器类型及选择	246	12.3.3 炉内喷钙脱硫技术	303
10.3.2 气固相催化反应器设计基础	247	12.3.4 荷电干吸收剂喷射脱硫法	304
10.3.3 气固相催化反应器设计	249	12.3.5 活性炭吸附法	304
10.3.4 流体通过固定床层的压力降	254	12.3.6 气相催化氧化法	304
10.4 催化转化法的应用	254	12.4 烟(废)气脱硝概述	305
10.4.1 催化净化法工艺	254	12.5 还原法脱硝技术	306
10.4.2 有机废气的催化燃烧	256	12.5.1 选择性非催化还原法	306
10.4.3 机动车尾气的催化净化	260	12.5.2 非选择性催化还原法	307
习题	263	12.5.3 选择性催化还原法	307
		12.6 吸收法脱硝技术	311



12.6.1 稀硝酸吸收法 .....	311	14.2.5 吹吸式排气罩 .....	360
12.6.2 碱液吸收法 .....	311	14.3 管道系统的设计 .....	362
12.6.3 氧化吸收法 .....	313	14.3.1 管道布置的一般原则 .....	362
12.6.4 液相还原吸收法 .....	314	14.3.2 管道系统的设计计算 .....	364
12.6.5 液相络合吸收法 .....	314	14.3.3 风机、泵及电动机的选择 .....	368
12.7 吸附法脱硝技术 .....	315	习题 .....	371
12.8 同时脱硫脱硝技术 .....	317	<b>第 15 章 大气污染的稀释扩散控制</b> .....	372
12.8.1 高能电子活化氧化法 .....	317	15.1 主要气象要素 .....	372
12.8.2 SNOX 脱硫脱硝技术 .....	318	15.2 大气的热力过程 .....	374
12.8.3 DESONOX/REDOX 脱硫脱硝 技术 .....	318	15.2.1 低层大气的增热与冷却 .....	374
习题 .....	319	15.2.2 气温的绝热变化 .....	374
<b>第 13 章 其他几种废气处理技术</b> .....	321	15.2.3 大气稳定度 .....	376
13.1 有机废气处理技术 .....	321	15.2.4 逆温 .....	377
13.1.1 有机废气的来源和危害 .....	321	15.2.5 大气稳定性和烟流的关系 .....	379
13.1.2 净化方法及选择 .....	322	15.3 大气的水平运动 .....	380
13.1.3 燃烧法净化有机废气 .....	322	15.3.1 水平方向作用于空气的力 .....	380
13.1.4 吸附法净化有机废气 .....	326	15.3.2 大气边界层内风随高度的变化 .....	380
13.1.5 吸收法净化有机废气 .....	329	15.3.3 近地层风速廓线模式 .....	381
13.1.6 冷凝法净化有机废气 .....	331	15.4 大气的湍流运动 .....	382
13.1.7 生物法和脉冲电晕法净化有机 废气 .....	333	15.4.1 产生 .....	382
13.2 含氯废气的净化 .....	334	15.4.2 判据 .....	382
13.2.1 吸收法净化含氯气废气 .....	334	15.4.3 描述 .....	383
13.2.2 吸附法净化含氯气废气 .....	339	15.4.4 大气混合层 .....	383
13.2.3 含氯化氢废气的净化 .....	339	15.5 下垫面的影响 .....	383
13.3 含氟废气的净化与利用 .....	340	15.5.1 城市气象特征 .....	384
13.3.1 含氟废气的来源和性质 .....	340	15.5.2 山区的气象特征 .....	384
13.3.2 含氟废气的净化方法与设备 .....	341	15.5.3 海陆风和海陆边界层 .....	385
习题 .....	344	15.6 湍流扩散的基本理论 .....	386
<b>第 14 章 废气净化系统的组成和 设计</b> .....	345	15.6.1 湍流扩散的梯度理论 .....	386
14.1 废气净化装置的选择与系统组成 .....	345	15.6.2 湍流扩散的统计理论 .....	389
14.1.1 除尘器的选择 .....	345	15.7 实用的大气扩散模式 .....	390
14.1.2 气态污染物净化方法的选择 .....	347	15.7.1 有界条件下的基本扩散模式 .....	390
14.1.3 净化装置的费用 .....	347	15.7.2 几种常用的大气扩散模式 .....	391
14.1.4 净化系统的组成 .....	349	15.8 大气污染物浓度估算方法 .....	392
14.2 集气罩的设计 .....	350	15.8.1 有效源高的计算 .....	393
14.2.1 密闭罩 .....	350	15.8.2 扩散参数的确定和污染物浓度的 估算 .....	395
14.2.2 排气柜(半密闭罩) .....	352	15.9 特殊气象条件下的扩散 .....	401
14.2.3 外部吸气罩 .....	353	15.9.1 封闭型扩散 .....	401
14.2.4 外部排气罩 .....	358	15.9.2 熏烟型扩散 .....	403
		15.9.3 微风下的扩散 .....	404
		15.9.4 危险风速下的污染物浓度 .....	405
		15.10 城市和山区的大气扩散模式 .....	406

15.10.1 城市大气扩散模式·····	406	附录 A 空气的物理参数(压力为	
15.10.2 山区扩散估算·····	409	101.325kPa)·····	419
15.11 长期平均污染物浓度估算·····	410	附录 B 水的物理参数·····	421
15.11.1 大气污染分析中常用的气候		附录 C 通常状态下空气的性质·····	421
资料·····	410	附录 D 干空气的物理性质	
15.11.2 长期平均污染物浓度的估算·····	411	( $1.013 \times 10^5$ Pa)·····	422
15.12 烟囱高度设计·····	412	附录 E 烟道气的物理参数·····	422
15.12.1 烟囱高度计算方法·····	412	附录 F 气体平均质量定容热容·····	423
15.12.2 烟囱高度设计中应考虑的几个		附录 G 可燃气体的主要热工特性·····	423
问题·····	414	附录 H 几种气体或蒸气的爆炸特性·····	424
15.13 城市规划与厂址选择·····	415	附录 I 部分物理量的单位和因次·····	424
习题·····	417	附录 J 国内常用标准筛·····	424
附录·····	419	参考文献·····	425

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 大气的组成及结构

按照国际标准化组织 (ISO) 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)。可见, “大气”和“空气”是同义词, 其组成成分在均质层内是一样的, 区别仅在于“大气”指的范围更大, “空气”指的范围相对小些。大气的总质量约为  $5.3 \times 10^{15} \text{t}$ , 其密度随高度增加而迅速减少, 98.2% 的空气集中在 30km 以下的空间。本书除在讨论大气的组成及结构、臭氧层破坏时所用“大气”一词涉及更大范围以外, 其余部分所用“大气”或“空气”一词都是指与人类活动关系密切的下层“环境空气”, 个别情况指室内空气。

大气是自然环境的重要组成部分, 是人类及一切生物赖以生存的物质。人离开空气, 5min 就会死亡。同时, 人们也通过生产和生活活动影响着周围大气的质量。人与大气环境之间的这种连续不断的物质和能量的交换, 决定了大气环境的重要性。

#### 1.1.1 大气的组成

大气由于洁空气、水蒸气和悬浮微粒三部分组成。干洁空气的主要成分是氮 ( $\text{N}_2$ )、氧 ( $\text{O}_2$ ) 和氩 (Ar), 三者共占大气总体积的 99.96%, 其他次要成分仅占 0.04% 左右。干洁空气的组成见表 1-1。

表 1-1 干洁空气的组成

气体成分	相对分子质量	体积分数 (%)	气体成分	相对分子质量	体积分数 (%)
氮 ( $\text{N}_2$ )	28.01	78.084	氦 (Kr)	83.80	$1.0 \times 10^{-4}$
氧 ( $\text{O}_2$ )	32.00	20.948	氢 ( $\text{H}_2$ )	2.016	$0.5 \times 10^{-4}$
氩 (Ar)	39.94	0.934	氧化二氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ )	44.01	$0.3 \times 10^{-4}$
二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )	44.01	0.033	氙 (Xe)	131.30	$0.08 \times 10^{-4}$
氖 (Ne)	20.18	$1.8 \times 10^{-4}$	臭氧 ( $\text{O}_3$ )	48.00	$0.02 \times 10^{-4}$
氦 (He)	4.003	$5.2 \times 10^{-4}$	甲烷 ( $\text{CH}_4$ )	16.04	$1.5 \times 10^{-4}$

由于大气的湍流运动和动植物的气体代谢作用使不同高度、不同地区的空气进行交换和

混合,因而在 85km 以下的大气层中除  $\text{CO}_2$  和臭氧外,干洁空气组成的比例基本上保持不变,称为均质层。均质层以上的大气层中,以分子扩散为主,气体组成随高度而变化,称为非均质层。干洁空气的平均相对分子质量为 28.966,在标准状态下 (273.15K, 101325Pa),其密度为  $1.293\text{kg}/\text{m}^3$ 。二氧化碳和臭氧是干洁空气中的可变成分,对大气的温度分布影响较大。

$\text{CO}_2$  来源于大气底层燃料的燃烧、动物的呼吸和有机物的腐解等,因此它主要集中在 20km 以下的大气层内,其含量因时空而异,夏季多于冬季,陆地多于海洋,城市多于农村。

臭氧是大气中的微量成分之一,总质量约为  $3.29 \times 10^9\text{t}$ ,占大气质量的  $0.64 \times 10^{-6}$ 。它的含量随时空变化很大,在 10km 以下含量甚微,从 10km 往上,含量随高度增高而增加,到 20~25km 高空处,含量达到最大值,称为臭氧层,再往上又减少。臭氧层能大量吸收太阳辐射中波长小于  $0.32\mu\text{m}$  的紫外线,从而保护地球上有机体的生命活动。

大气中的水蒸气来源于地表水的蒸发,其平均体积分数不到 0.5%,随时空和气象条件而变化。在热带多雨地区,其体积分数可达 4%;而在沙漠或两极地区,其体积分数可小于 0.01%。一般低纬度地区大于高纬地区,夏季高于冬季,下层高于上层。观测表明,在 1.5~2.0km 高度上,空气中水蒸气已减少到地面的 1/2,在 5km 高度上则减少到地面的 1/10,再往上就更少了。

水蒸气是实际大气中惟一能在自然条件下发生相变的成分,这种相变导致了大气中云、雾、雨、雪、雹等天气现象的发生。

水蒸气和  $\text{CO}_2$  对地面和大气长波辐射的能量吸收较强,对地球起到保温作用。

大气中的悬浮微粒物有固体和液体两类。前者包括粉尘、烟尘、宇宙尘埃、微生物和植物的孢子、花粉等;后者则指悬浮于大气中的雾滴等水蒸气凝结物。悬浮微粒粒径一般在  $10^{-4}\mu\text{m}$  到几十微米之间,多集中于大气低层,含量和成分都是变化的。一般陆地多于海上,城市多于农村,冬季多于夏季。其中有些物质是引起大气污染的物质。它们的存在对辐射的吸收和散射,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。

### 1.1.2 大气层结构

受地心引力而随地球旋转的大气称为大气圈。虽然在几千千米的高空中仍有微量气体存在,但通常把地球表面到 1200~1400km 的气层视为大气圈的厚度,1400km 以外被看作宇宙空间。

大气圈具有层状结构。大气层结构是指气象要素的垂直分布情况,如气温、气压、大气密度和大气成分的垂直分布等。根据气温在垂直于地球表面方向上的分布,一般将大气分为对流层、平流层、中间层、暖层和逸散层等 5 层(见图 1-1)。

(1) 对流层 对流层是大气圈最低的一层,其特征是:①层内气温随高度增加而降低,每升高 100m 平均降低  $0.65^\circ\text{C}$ ,因而大气易形成强烈的对流(升降)运动;②因热带气流的对流强度比寒带强,故对流层厚度随纬度增加而降低,赤道处约 16~17km,中纬度地区约 10~12km,两极附近约 8~9km,对同一地区,其厚度夏季大于冬季;③对流层虽较薄,但却集中了大气总质量的 75%和几乎全部的水蒸气,主要天气现象和通常所说的大气污染都发生在这一层,对人类活动影响最大;④层内温度和湿度的水平分布不均匀,在热带海洋上

空，空气温暖潮湿，在高纬度内陆上空，空气寒冷干燥，因此也常发生大规模的空气水平运动。

对流层下层（地面至 1~2km）的大气运动受地面阻滞和摩擦的影响很大，因此称对流层下层为大气边界层或摩擦层。由于受地面冷热的直接影响，层内气温的日变化很大。气流由于受地面摩擦力的影响，风速随高度增加而增大；加上气流的对流作用，层内大气的运动总是表现为湍流形式，从而直接影响着大气污染物的输送、扩散和转化。

大气边界层以上的大气运动，几乎不受地面摩擦力的影响，大气可看作没有粘性的理想气体，因此称大气边界层以上为自由大气层。

(2) 平流层 对流层顶到 50~55km 高度的一层称为平流层，层内几乎没有大气的对流运动。从对流层顶到 22km 左右的一层，气温几乎不随高度而变化，为  $-55^{\circ}\text{C}$  左右，称为同温层；同温层之上，气温随高度增高而上升，至平流层顶达  $-3^{\circ}\text{C}$  左右，称为逆温层。平流层集中了大气中大部分臭氧，在 20~25km 高度内形成臭氧层。

(3) 中间层 平流层顶到 80~85km 高度为中间层。这一层气温随高度增高而降低，层顶可降到  $-83^{\circ}\text{C}$ ，大气具有强烈的对流运动。

(4) 暖层 中间层顶到 800km 高度为暖层。由于强烈的太阳紫外线和宇宙射线的作用，气温随高度增加而增高，层顶温度可达 500~2000K，极为稀薄的气体分子被高度电离，存在着大量的离子和电子，故又称为电离层。

(5) 逸散层 暖层以上的大气层统称为散逸层。它是大气的外层，气温很高，空气极为稀薄，气体离子的运动速度很高，可以摆脱地球引力而散逸到太空中。

对流层和平流层大气质量占大气总质量的 99.9%，中间层大气质量占大气总质量的 0.099%，暖层及其上层大气质量仅占大气总质量的 0.001%。

## 1.2 大气污染、污染物和污染源

### 1.2.1 大气污染的定义及分类

按照 ISO 的定义，“空气污染通常是指由于人类活动和自然过程引起某些物质进入大气

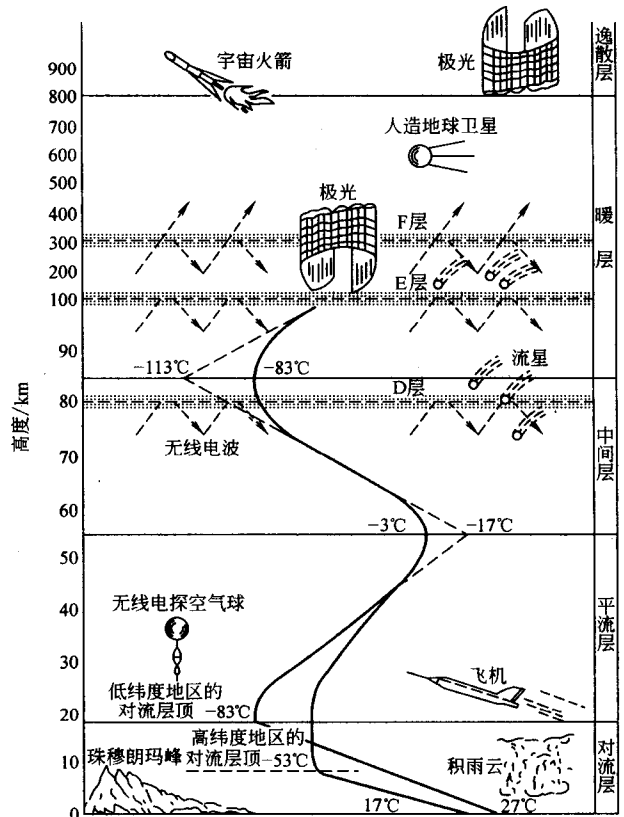


图 1-1 大气垂直方向的分层

中,呈现出足够的浓度,达到了足够的时间,并因此而危害了人体的舒适、健康和福利,或危害了环境。”所谓人体舒适、健康的危害,包括对人体正常生理机能的影响,引起急性病、慢性病,甚至死亡等;而所谓福利,则包括与人类协调并共存的生物、自然资源,以及财产、器物等。

自然过程包括火山活动、森林火灾、海啸、土壤和岩石的风化、雷电、动植物尸体的腐烂及大气圈空气的运动等。但是,由自然过程引起的空气污染,通过自然环境的自净化作用(如稀释、沉降、雨水冲洗、地面吸附、植物吸收等物理、化学及生物机能),一般经过一段时间后会自动消除,能维持生态系统的平衡。因而,大气污染主要是由于在人类的生产与生活活动中向大气排放的污染物质,在大气中积累,超过了环境的自净能力而造成的。

按污染所涉及的范围,大气污染大体可分为如下四类:①局部地区污染,如由某个污染源造成的较小范围内的污染。②地区性污染,如工矿区及其附近地区或整个城市的大气污染。③广域污染,即超过行政区划的广大地域的大气污染,涉及的地区更加广泛。④全球性污染或国际性污染,如大气中硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳和飘尘的不断增多和输送所造成的酸雨污染和大气的暖化效应,已成为全球性大气污染问题。

按照能源性质和污染物的种类,可将大气污染分为如下四类:①煤烟型,由煤炭燃烧放出的烟尘、二氧化硫等造成的污染,以及由这些污染物发生化学反应而生成的硫酸及其盐类所构成的气溶胶污染。20世纪中叶以前和目前仍以煤炭作为主要能源的国家和地区的大气污染属此类污染。②石油型,由石油开采、炼制和石油化工厂的排气以及汽车尾气的碳氢化合物、氮氧化物等造成的污染,以及这些物质经过光化学反应形成的光化学烟雾污染。③混合型,具有煤烟型和石油型的污染特点。④特殊型,由工厂排放某些特定的污染物所造成的局部污染或地区性污染,其污染特征由所排污染物决定。

### 1.2.2 大气污染物

按照 ISO 定义,“空气污染物是指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人或环境产生有害影响的那些物质”。

大气的污染物种类很多,按其存在状态,可分为气溶胶态污染物和气态污染物两类。

#### 1. 气溶胶态污染物

气溶胶是指悬浮在气体介质中的固态或液态微小颗粒所组成的气体分散体系。从大气污染控制的角度,按照气溶胶颗粒的来源和物理性质,可将其分为如下几种:

(1) 粉尘 (Dust) 指固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等自然过程形成的悬浮小固体粒子。通常,又将粒径大于  $10\mu\text{m}$  的悬浮固体粒子称为落尘,它们在空气中能靠重力在较短时间内沉降到地面;将粒径小于  $10\mu\text{m}$  的悬浮固体粒子称为飘尘,它们能长期飘浮在空气中;粒径小于  $1\mu\text{m}$  的粉尘又称为亚微粉尘 (Sub-micron Dust)。

(2) 炱 (Fume) 熔融物质经高温挥发并伴随一些化学反应而生成的气态物质经冷却凝结而成的固体粒子,粒径一般小于  $1\mu\text{m}$ 。

(3) 飞灰 (Fly Ash) 指由固体燃料燃烧产生的烟气带走的灰分中的较细粒子。

(4) 烟 (Smoke) 通常指燃料燃烧过程产生的不完全燃烧产物,又称炭黑,粒径一般为  $0.01 \sim 1.0\mu\text{m}$ 。

(5) 雾 (Fog) 在工程中,雾泛指小液滴的悬浮体,是由液体蒸气的凝结、液体的雾

化和化学反应等过程形成的,如水雾、酸雾、碱雾等。在气象中,雾指造成能见度小于1km的小水滴悬浮体。

(6) 化学烟雾 (Smog) 如硫酸烟雾、光化学烟雾等。

在我国的环境空气质量标准中,还根据颗粒物的大小,将其分为总悬浮颗粒物 (Total Suspended Particles, TSP) 和可吸入颗粒物 (Inhalable Particles,  $PM_{10}$ )。前者是指悬浮在空气中,空气动力学当量直径 $\leq 100\mu m$ 的颗粒物;后者是指空气动力学当量直径 $\leq 10\mu m$ 的颗粒物。

在实际工作中,以及国内外一些文献资料中,常常未对“粉尘”、“飞灰”、“烟”、“雾”等名词作严格区分,多统称为“粉尘”或“烟尘”。本书中,对除尘对象的气溶胶颗粒,常以“粉尘”称之,在述及燃料燃烧产生的固体粒子时,常用“烟尘”一词。

## 2. 气态污染物

气态污染物包括无机物和有机物两类。

无机气态污染物有硫化物 ( $SO_2$ 、 $SO_3$ 、 $H_2S$  等)、含氮化合物 ( $NO$ 、 $NO_2$ 、 $NH_3$  等)、卤化物 ( $Cl_2$ 、 $HCl$ 、 $HF$ 、 $SiF_4$  等)、碳氧化物 ( $CO$ 、 $CO_2$ ) 及臭氧、过氧化物等。

有机气态污染物则有碳氢化合物 (烃、芳烃、稠环芳烃等),含氧有机物 (醛、酮、酚等),含氮有机物 (芳香胺类化合物、腈等),含硫有机物 (硫醇、噻吩、二硫化碳等),含氯有机物 (氯化烃、氯醇、有机氯农药等) 等。挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 是易挥发的一类含碳有机物的总称,近年来 VOCs 引起的大气污染已受到广泛的关注。

直接从污染源排出的污染物称为一次污染物;一次污染物与空气中原有成分或几种污染物之间发生一系列化学或光化学反应而生成的、与一次污染物性质不同的新污染物,称为二次污染物。在大气污染中受到普遍重视的二次污染物主要有硫酸烟雾 (Sulfurous Smog)、光化学烟雾 (Photochemical Smog) 和酸雨。

硫酸烟雾是空气中的二氧化硫等含硫化合物在水雾、重金属飘尘存在时,发生一系列化学反应而生成的硫酸雾和硫酸盐气溶胶。光化学烟雾则是在太阳光照射下,空气中的氮氧化物、碳氢化合物和氧化剂之间发生一系列光化学反应而生成的淡蓝色烟雾,其主要成分是臭氧、过氧乙酰基硝酸酯 (PAN)、醛类及酮类等。硫酸烟雾和光化学烟雾引起的刺激作用和生理反应等危害要比一次污染物强烈得多。

监测数据表明,在我国大气环境中,影响普遍的广域污染物为悬浮颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳和臭氧等。

### 1.2.3 大气污染源

大气污染物的来源包括自然过程和人类活动两个方面。人类活动排放的大气污染物主要来自三个方面:①燃料燃烧;②工业生产过程;③交通运输。前两者称为固定源,后者(如汽车、火车、飞机等)则称为流动源。此外,在污染源的调查与评价中,还常按污染物的来源分为工业污染源、农业污染源和生活污染源三类。

根据大气污染源的几何形状和排放方式,污染源可分为点源、线源、面源;按它离地面的高度可分为地面源和高架源;按排放污染物的持续时间可分为瞬时源、间断源和连续源。污染源还可分为稳定源和可变源,冷源和热源等。通常将工厂烟囱的排放当作高架连续点

源；将成直线排列的烟囱、飞机沿直线飞行喷洒农药、汽车流量较大的高速公路等作为线源；将稠密居民区中家庭的炉灶和大楼的取暖排放当作面源。大城市或工业区各种不同类型的污染源都有，则称为复合源。污染源的这种划分都是相对于扩散的空间和时间的尺度而言的。例如，在研究某城市污染时，一个工厂的烟囱可视为点源，将该城市视为各种类型源的复合源；但当研究一个大的区域或全球污染时，却又把一个城市当作点源。

#### 1.2.4 大气污染的危害

大气污染将造成很多方面的危害，其程度取决于大气污染物的性质、数量和滞留时间。这些危害包括：

(1) 对人体健康危害 大气污染对人体健康的危害包括急性和慢性两方面。急性危害一般出现在污染物浓度较高的工业区及其附近。慢性危害是在大气污染物直接或间接的长期作用下对人体健康造成的危害。这种危害短期表现不明显，不易觉察。据我国 10 个城市统计，呼吸道疾病的患病率和检出率在工业重污染区为 30% ~ 70%，而在轻污染区只有其 1/2。

(2) 居民生活费用增加 大气污染造成的居民生活费用增加，包括清扫、洗涤和生活物质损坏三方面。根据 1985 年估算，每年全国损失达 16 亿元。

(3) 物质材料破坏 排入大气中的二氧化硫、氮氧化物、各种有机物等不仅直接腐蚀建筑物、桥梁、机器和设备，而且衍生的二次污染物光化学氧化剂、酸雨等能对这些物质材料产生更大的破坏。

(4) 农林水产损失 大气污染物对我国农业、森林、水产造成严重的危害，其中特别是农业和森林受害最大，导致农业减产、林木衰败。

(5) 影响全球大气环境 大气污染物不仅污染低层大气，而且能对上层大气产生影响，形成酸雨、破坏臭氧层、气温升高等全球性环境问题，可能给人类带来更严重的危害。

#### 1.2.5 我国大气污染的现状

(1) 我国大气污染物的排放量 我国最主要的大气污染物是二氧化硫和颗粒物，其排放量很大。1995 年我国二氧化硫排放总量达 2369.6 万 t，超过美国，成为世界二氧化硫排放第一大国。近年来，我国采取了一系列措施，使我国主要大气污染物的排放量有所降低，但总体上仍保持在很高的水平上（见表 1-2）。

表 1-2 我国近年来主要大气污染物的排放量 ( $\times 10^4 \text{t}$ )<sup>①</sup>

年 份	1995	1998	1999	2000	2001	2002	2003
SO <sub>2</sub>	2369.6	2091.4	1857.5	1995.1	1947.8	1926.6	2158.7
烟尘	1743.6	1455.1	1159	1165.4	1069.8	1012.7	1048.7
工业粉尘	1731.2	1321.2	1175.3	1092	990.6	941	1021

<sup>①</sup> 摘自中国环境公报。

(2) 我国大气污染的特点 概括地说，我国的大气污染是以颗粒物和 SO<sub>2</sub> 为主要污染物的煤烟型污染，北方城市的污染水平高于南方（尤以冬季为甚），冬季高于夏季，早晚高于中午。北方城市的突出问题是冬季（采暖期）的颗粒物污染和 SO<sub>2</sub> 污染（虽然非采暖期大气中颗粒物浓度也较高，但主要来自风沙和粉尘），南方城市则是 SO<sub>2</sub> 污染和酸雨污染。

我国大气污染的特点是由于我国能源以煤炭为主，且大部分直接燃烧，能源利用方式落



后, 利用率低, 能耗高, 排污大, 烟气净化水平不高等造成的。此外, 南方气候湿润, 土质偏酸, 大气中碱性物质少, 对酸的缓冲能力弱, 加上大气中  $\text{SO}_2$  浓度高, 有利于酸雨的形成。

随着机动车数量的剧增, 机动车尾气已成为北京、上海、广州等大城市中大气污染物的重要来源。我国特大城市的空气污染正由煤烟型向混合型转变。

(3) 我国城市大气污染现状 据中国环境公报报道, 2003 年我国城市空气质量总体上有所好转, 但仍处于污染较重的水平。在监测的 340 个城市中, 仅有 142 个城市达到环境空气质量二级标准 (居住区标准), 占 41.7%; 空气质量为三级和劣于三级标准的城市占 58.3%。

监测结果表明, 颗粒物和  $\text{SO}_2$  仍是影响我国城市空气质量最主要的两种污染物。在监测的 340 个城市中, 有 54.4% 的城市颗粒物浓度超过二级标准, 颗粒物污染较重的城市主要分布在西北、华北、中原和四川东部。有 25.6% 的城市  $\text{SO}_2$  超过二级标准,  $\text{SO}_2$  污染较重的城市主要在山西省、河北省、河南省、湖南省、内蒙古自治区、陕西省、甘肃省、贵州省、四川省和重庆市。

2003 年, 由  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  造成的酸雨污染仍然是我国大气污染的主要问题之一。

## 1.3 全球性大气污染问题

### 1.3.1 温室效应与气候变化

#### 1. 温室气体与温室效应

大气中的水蒸气、二氧化碳和其他某些微量气体, 如氟利昂类 (CFCs)、甲烷等, 可以让太阳的短波辐射几乎无衰减地通过, 同时强烈吸收地面及空气放出的长波辐射。因此这类气体有类似温室的效应, 称为“温室气体”。温室气体吸收的长波辐射部分反射回地球, 从而减少了地球向外层空间散发的能量, 使空气和地球表面变暖, 这种暖化效应称为“温室效应”。

已经发现, 能产生温室效应的 30 多种气体中, 二氧化碳起最重要作用, 它对暖化效应的贡献率达 50% ~ 60%, 氟利昂、甲烷、氧化二氮和臭氧也起重要的作用 (见表 1-3)。氟利昂是效应极强的温室气体, 大气中其体积分数虽显著低于其他温室气体, 但对暖化效应的贡献率却很大, 达 12% ~ 20%。

表 1-3 主要温室气体及其特征

气体	大气中体积分数 ( $10^{-6}$ )	年增长 (%)	生存期	温室效应 ( $\text{CO}_2 = 1$ )	现有贡献率 (%)	主要来源
$\text{CO}_2$	355	0.4	50 ~ 200 年	1	50 ~ 60	煤、石油、天然气、森林砍伐
CFC	0.00085	2.2	50 ~ 102 年	3400 ~ 15000	12 ~ 20	发泡剂、气溶胶、制冷、清洗剂
$\text{CH}_4$	1.7	0.8	12 ~ 17 年	11	15	湿地、稻田、化石燃料、牲畜
$\text{N}_2\text{O}$	0.31	0.25	120 年	270	6	化石燃料、化肥、森林砍伐
$\text{O}_3$	0.01 ~ 0.05	0.5	数周	4	8	光化学反应