



“十三五”江苏省高等学校重点教材（修订教材）  
中国矿业大学“十三五”品牌专业建设工程资助项目

# 大气污染控制工程

王丽萍 赵晓亮 田立江 主编

Air Pollution  
Control Engineering

中国矿业大学出版社  
China University of Mining and Technology Press

国家一级出版社  
全国百佳图书出版单位

# Air Pollution Control Engineering

责任编辑 周红 封面设计 肖新生



ISBN 978-7-5646-4170-2



9 787564 641702 >

定价：38.00 元



“十三五”江苏省高等学校重点教材(修订教材)

中国矿业大学“十三五”品牌专业建设工程资助项目

2016-1-091

# 大气污染控制工程

主 编 王丽萍 赵晓亮 田立江  
副主编 何士龙 蒋家超

本教材由中国矿业大学《大气污染控制工程》(第二版)编写组编写,在《大气污染控制工程》(第三版)的基础上,根据原国家教委高等工科院校环境工程专业教学委员会制定的教学基本要求与煤炭教育协会环境类专业教学委员会《环境工程专业教学基本要求》(2010年)的要求,在编写过程中不断汲取前两版的教学反馈,对内容进行了合理的选择、更新和整合,突出了重点内容,充实与巩固了基础知识点,结合专业适当引进新理论、新知识和新技术,以使学生了解学科前沿和专业发展的动态,拓宽学生知识面。

在修订过程中,对教材结构体系以“污染源发生—源—净化原理—净化设备设计”为主线,按照理论、技术方法,根据我国煤烟型与汽车尾气的工艺的基础上组织教材内容,把相关控制理论、技

述了我国大气污染现状及特征大气污染综合防治的基本原理,介绍了大气污染控制理论和大气环境质量标准,重点介绍了汽车尾气的排放与控制,第

中国矿业大学出版社  
地址:江苏省徐州市徐海路  
电话:0516-838831  
邮编:221116  
网址:www.cupm.com.cn

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了大气污染控制工程的基本理论、设备工艺与设计,以大气污染控制技术的基础知识、基本方法和设计为主体,注重理论与工程实际相结合。主要内容涉及大气污染的现状与特征、综合防治的基本思想与方法、大气环境质量标准;燃烧计算与燃烧污染物的生成控制;气溶胶力学基础、微粒凝并、除尘器性能等除尘技术基础;机械式除尘器、湿式除尘器、电除尘器、过滤除尘器等传统除尘工艺与设备,新增开放源抑尘、布袋除尘器和低温电除尘器等新型除尘工艺与设备;吸收法、吸附法和催化转化法等气态污染物控制理论与方法,新增生物法、等离子体、高级氧化等新方法;大气污染控制工艺系统设计及应用、燃煤烟气净化技术挥发性有机物和机动车尾气等净化技术;集气罩、管道系统设计;大气扩散的基本理论及工程应用。

本书可作为高等院校本科环境工程、环境科学专业的教材,也可供环境科学与工程相关专业研究生的教材和参考书,还可供从事环境规划、环境设计和环境管理的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制工程/王丽萍,赵晓亮,田立江主编.

—徐州:中国矿业大学出版社,2018.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4170 - 2

I. ①大… II. ①王… ②赵… ③田… 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(2018)第 232528 号

书 名 大气污染控制工程

主 编 王丽萍 赵晓亮 田立江

责任编辑 周 红

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83884103 83885105

出版服务 (0516)83885789 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail:cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 24.5 字数 612 千字

版次印次 2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷

定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

大气污染是我国面临的迫切需要解决的重大环境问题之一。“大气污染控制工程”是高等学校环境工程专业的一门重要专业课程。该课程内容涵盖大气污染气象学、气溶胶力学、化学工程三个学科,综合性和理论性极强,而且对工程实践要求较高。

本教材由中国矿业大学王丽萍教授主编,作为煤炭教育协会规划教材《大气污染控制工程》(第一版)于2002年出版,于2005年遴选为江苏省高等教育精品教材。在此基础上《大气污染控制工程》(第二版)于2012年再版。《大气污染控制工程》(第三版)是根据原国家教委高等工科院校环境工程专业教材委员会制定的教学基本要求与煤炭教育协会环境类专业教材委员会的规划要求,在第二版基础上修订而成。本教材在体系、结构和内容诸多方面进行了优化和完善,在编写过程中不断汲取前两版的教学反馈,对内容进行了合理的选择、更新和整合,突出了重点内容,充实与巩固了基础知识点,结合专业适当引进新理论、新知识和新技术,以使学生了解学科前沿和专业发展动态,拓宽学生知识面。

在修订过程中,对教材的体系结构和教材内容进行了相应的调整。教材结构体系以“污染源发生—源头控制—净化控制技术—排放控制(大气扩散)”为主线,按照理论、技术方法和设计篇依次编排,具体控制技术的章节结构按照“净化原理—净化设备设计—净化工艺流程配置或应用”方式组织。同时,本书根据我国煤烟型与汽车尾气型的混合污染特征,在传统大气污染控制理论与技术工艺的基础上组织教材内容,围绕当前国内外大气污染热点问题、前沿研究领域,把相关控制理论、技术方法和工艺系统地组织起来,具体体现在:绪论阐述了我国大气污染的现状与特征、大气综合防治的基本思想与方法、大气污染控制理论和大气环境质量标准。第二章增加了“机动车尾气的排放与控制”,第

三章除尘技术基础增加了“微粒的凝并”，第五章湿式除尘器增加了“开放源抑尘”，第六章电除尘器增加了“湿式电除尘器超低排放”等内容。在气态污染物净化理论与技术方面，第十章催化转化法净化气态污染物增加了“催化剂及其再生”等内容，同时充实了燃煤烟气脱硫脱硝新技术、有机废气污染控制技术等相关内容。教材的每一章都介绍了工程应用案例，章后附有习题和思考题，引导学生结合大气污染控制问题进行自主学习、独立思考，培养学生解决实际问题的能力，以实现课程的教学目标。

本书具体编写分工如下：中国矿业大学王丽萍编写第一、三、十（第一、二、三节）、十三章，辽宁工程技术大学赵晓亮编写第四、七、十（第四、五节）章，中国矿业大学田立江编写第八、九、十二章，中国矿业大学何士龙编写第二（第五节）、六、十一章，中国矿业大学蒋家超编写第二（第一、二、三、四节）、五章。全书由王丽萍统一定稿。

本书在编写过程中参考了许多相关教材和资料，在此一并向作者表示谢意。限于编者学识水平，书中难免存在错误和不足之处，热忱希望读者指正。

编者

2018年5月

132	第三节...生物净化.....	微射已基类的器尘剂由.....	节三第	293
133	第四节...膜分离法.....	用速已程书件对的器尘剂由.....	节四第	296
	第五节...电子束照射法.....			301
143	第六节...低温等离子体技术.....		器尘箱友器	章六第
144	第七节...光催化技术.....	取用中工由器尘剂由.....	节一第	304
145	.....	得位能封的器尘剂由.....	节二第	
152	第十二章...集气罩及管道设计.....	友整神除的器尘剂由.....	节三第	306
153	第一节...净化系统的组成与设计.....	器尘剂由合复器由.....	节五第	306
	第二节...集气罩的捕集机理.....			308
163	第三节...集气罩的结构型式及主要性能.....		器尘箱友器	章十第
164	第四节...集气罩的设计.....	类代具器封尘箱的器尘剂由.....	节一第	318
	.....			
173	第一章 绪论.....			1
173	第一节 大气污染.....			1
174	第二节 全球性大气污染问题.....			5
183	第三节 我国大气污染的现状与特征.....			9
	第四节 大气污染综合防治.....			13
184	第五节 大气环境标准.....			16
184	第六节...提高捕集效率.....	高平能产的中器尘剂由.....	节一第	357
	.....			
200	第二章 燃烧与大气污染.....			22
200	第一节 燃料.....			22
204	第二节 燃料的燃烧.....			26
208	第三节 燃烧过程计算.....			28
	第四节 燃烧过程中污染物的生成与控制.....			33
209	第五节 机动车污染与控制.....			41
222	.....			
	.....			
232	第三章 除尘技术基础.....			54
232	第一节 粉尘粒径及粒径分布.....			54
242	第二节 粉尘的物理性质.....			60
	第三节 尘粒的流体阻力与沉降分离机理.....			65
252	第四节 微粒的凝并.....			74
252	第五节 除尘器的分类与性能.....			82
252	.....			
	.....			
270	第四章 机械式除尘器.....			88
270	第一节 重力沉降室与惯性除尘器.....			88
272	第二节 旋风除尘器.....			98
	.....			
282	第五章 电除尘器.....			115
282	第一节 电除尘器的工作原理.....			115
282	第二节 影响电除尘效率的因素.....			127

第三节	电除尘器的类型与构造	132
第四节	电除尘器的设计计算与应用	139
<b>第六章</b>	<b>袋式除尘器</b>	<b>143</b>
第一节	袋式除尘器的工作原理	143
第二节	袋式除尘器的性能分析	146
第三节	袋式除尘器的结构型式	148
第五节	电袋复合式除尘器	159
<b>第七章</b>	<b>湿式除尘器</b>	<b>163</b>
第一节	湿式除尘器的除尘机理及分类	163
第二节	喷淋塔除尘器与旋风水膜除尘器	167
第三节	自激式除尘器	173
第四节	文丘里除尘器(脱水装置)	175
第五节	开放源抑尘	182
<b>第八章</b>	<b>吸收法净化气态污染物</b>	<b>187</b>
第一节	吸收过程中的气液平衡	187
第二节	伴有化学反应的吸收动力学	193
第三节	吸收物料衡算与操作线方程	200
第四节	吸收塔的设计计算	204
第四节	吸收法净化气态污染物的应用	208
<b>第九章</b>	<b>吸附法净化气态污染物</b>	<b>222</b>
第一节	气体吸附原理与吸附剂	222
第二节	吸附理论	230
第三节	吸附反应器及其计算方法	236
第四节	吸附法净化气态污染物的应用	245
<b>第十章</b>	<b>催化转化法净化气态污染物</b>	<b>255</b>
第一节	概述	255
第二节	催化转化反应动力学	257
第三节	催化剂及其再生	262
第四节	固定床催化反应器	270
第五节	催化转化法净化气态污染物的应用	279
<b>第十一章</b>	<b>气态污染物的其他净化方法</b>	<b>285</b>
第一节	燃烧净化	285
第二节	冷凝净化	290

第三节	生物净化	293
第四节	膜分离法	296
第五节	电子束照射法	301
第六节	低温等离子体技术	303
第七节	光催化技术	304
<b>第十二章</b>	<b>集气罩及管道设计</b>	<b>306</b>
第一节	净化系统的组成与设计内容	306
第二节	集气罩的捕集机理	308
第三节	集气罩的结构型式及主要性能	313
第四节	集气罩的设计	318
第五节	管道系统的设计计算	328
<b>第十三章</b>	<b>大气扩散</b>	<b>344</b>
第一节	影响大气污染物散布的主要因子	344
第二节	大气扩散的基本理论简介	352
第三节	点源扩散的高斯模式	353
第四节	烟流抬升高度	357
第五节	扩散参数的选择确定	359
第六节	特殊情况下的扩散模式	367
第七节	烟囱高度的设计	370
第八节	厂址选择	374
<p>大气中的悬浮颗粒主要是大气尘埃和悬浮颗粒。人类的活动或自然的作用,会使某些</p>		
<b>参考文献</b>		<b>380</b>

表 1-1 干燥空气的组成

成 分	相对分子质量	体积分数/%	类 别	相对分子质量	摩尔分数/%
氮(N <sub>2</sub> )	28.01	78.09	氮(N <sub>2</sub> )	36.01	1.61 × 10 <sup>-2</sup>
氧(O <sub>2</sub> )	32.00	20.95	氧(O <sub>2</sub> )	4.000	1.5 × 10 <sup>-3</sup>
氩(Ar)	39.94	0.93	氩(Ar)	85.00	1.0 × 10 <sup>-3</sup>
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	44.01	0.03	氢(H <sub>2</sub> )	2.016	5.5 × 10 <sup>-5</sup>
甲烷(CH <sub>4</sub> )	16.04	2.1 × 10 <sup>-5</sup>	氦(He)	4.003	(0.05~1.0) × 10 <sup>-5</sup>
			氟(F <sub>2</sub> )	38.00	(0.01~0.08) × 10 <sup>-5</sup>

大气污染通常指由人类活动和自然过程引起某些物质进入大气后,呈现出足够的浓度,达到足够的时间,并因此对人体的舒适、健康和福利或环境造成危害。所谓对人体的舒适、健康的危害,包括对人体正常的生活环境和生理机能的影响,引起急性病、慢性病以至死亡等,而损害福利,则包括与人类协调并共存的生物、自然资源以及财产

# 第一章

## 绪 论

### 第一节 大气污染

#### 一、大气与大气污染

##### (一) 大气的组成

大气是人类和一切生物生存必不可少的环境要素之一,其重要性仅次于或近似等同于阳光对生命的意义。空气的质量直接影响我们接收到的阳光的量和类型,从而直接或间接地影响人类生活。

大气是由多种气体混合组成的,按其成分可以概括为干洁空气、水汽和悬浮微粒三部分。干洁空气的组成如表 1-1 所列。干洁空气的组成比例在与地表垂直方向上 0~90 km 范围内基本保持不变,大气中的水汽含量变化较大,其变化范围可达 0.02%,许多天气现象都与水汽含量有关。

大气中的悬浮微粒主要是大气尘埃和悬浮杂质。人类的活动或自然的作用,会使某些物质进入大气,这些物质以微粒或有害气体的形式存在,是大气污染的物质基础。

表 1-1 干洁空气的组成

成 分	相对分子质量	体积分数/%	成 分	相对分子质量	体积分数/%
氮(N <sub>2</sub> )	28.01	78.08	氖(Ne)	20.18	1.8×10 <sup>-4</sup>
氧(O <sub>2</sub> )	32.00	20.95	氦(He)	4.003	5.3×10 <sup>-4</sup>
氩(Ar)	39.94	0.93	氪(Kr)	83.80	1.0×10 <sup>-4</sup>
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	44.01	0.03	氢(H <sub>2</sub> )	2.016	0.5×10 <sup>-4</sup>
甲烷(CH <sub>4</sub> )	16.04	1.5×10 <sup>-4</sup>	氙(Xe)	131.30	0.08×10 <sup>-4</sup>
			臭氧(O <sub>3</sub> )	48.00	(0.01~0.04)×10 <sup>-4</sup>

##### (二) 大气污染

大气污染通常指由人类活动和自然过程引起某些物质进入大气后,呈现出足够的浓度,达到足够的时间,并因此对人体的舒适、健康和福利或环境造成危害。

所谓对人体的舒适、健康的危害,包括对人体正常的生活环境和生理机能的影响,引起急性病、慢性病以至死亡等;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。人类活动包括生活活动和生产活动,但造成大气污染的主要因素首先是工业生产活动。但交通和取暖、空调等生活方式对大气污染也起至关重要的作用。所谓自然过程,是指火山活动、山林火灾、海啸、土壤和岩石风化及大气圈的空气运动等。但是,一般说来,由于自然环境所具有的物理、化学和生物机能,即自然环境的自净作用,会使自然过程造成的大气污染,经过一段时间后自动消除,从而使生态平衡自动恢复。所以可以说,大气污染主要是由人类活动造成的。

(三) 大气污染物含量

清洁空气与被污染空气中的污染物的含量如表 1-2 所列。

表 1-2 清洁空气与被污染空气中污染物的含量

污染物	清洁空气中的含量/ $10^{-6}$	污染空气中的含量/ $10^{-6}$
二氧化硫	0.001~0.01	0.02~2
氮氧化物	0.001~0.01	0.01~0.5
碳氢化物	1	1~20
一氧化碳	<1	5~200
二氧化碳	310~330	350~370
颗粒物	10~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	70~700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

(四) 大气污染的类型

按大气污染的范围来说,大致可分为四类:① 局限性和局部地区大气污染,如受某个工厂烟囱排气的直接影响;② 涉及一个地区的区域性大气污染,如工矿区域及其附近地区或整个城市大气受到污染;③ 涉及更广域的大气污染,在大城市、大工业地带可以看到的广域污染;④ 从全球范围考虑的全球性大气污染,如大气中硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳和飘尘的不断增长,造成跨国界的酸性降雨和温室气体效应。全球性大气污染受到世界各国的关注,需要国际合作加以解决。

二、大气污染物

大气污染物是指由于人类活动或自然过程排放到大气,并对人或环境产生有害影响的物质。

(一) 污染物的种类

大气污染物的种类很多,按其存在状态可概括为两大类:颗粒污染物和气态污染物。

1. 颗粒污染物

颗粒污染物也称为气溶胶状态污染物,是指固体粒子、液体粒子或它们在气体介质中的悬浮体。根据气溶胶的来源和物理性质,可将其分为如下几种:

① 粉尘(dust)系指悬浮于气体介质中的细小固体粒子。通常是由固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等自然过程形成。粉尘粒径一般在  $1\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

② 烟(fume)通常系指由冶金过程形成的固体粒子的气溶胶。它是由熔融物质挥发后生成的气态物质的冷凝物,在生产过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应。烟是很细的微粒,粒径范围一般为  $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 。

③ 飞灰(fly ash)系指由燃料燃烧产生的烟气带走的灰分中分散得较细的粒子。灰分(ash)系含碳物质燃烧后残留的固体渣,尽管其中可能含有未完全燃尽的燃料,作为分析目

的而总是假定它是完全燃烧的。

④ 黑烟(smoke)通常系指由燃烧产生的可见气溶胶。黑烟的粒度范围为  $0.05 \sim 1 \mu\text{m}$ 。

⑤ 液滴(droplet)系指在静止条件下能沉降、在紊流条件下能保持悬浮的这样一种尺寸和密度的小液体粒子,主要粒径范围在  $200 \mu\text{m}$  以下。

此外,在大气污染控制中,还根据大气中尘颗粒的大小进行分类,可分为总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物。总悬浮颗粒物(TSP):指能悬浮在空气中,空气动力学当量直径  $\leq 100 \mu\text{m}$  的颗粒物。可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ ):指悬浮在空气中,空气动力学当量直径  $\leq 10 \mu\text{m}$  的颗粒物。

## 2. 气态污染物

气体状态污染物种类极多,常见的有五大类:以二氧化硫为主的含硫化合物、以一氧化氮和二氧化氮为主的含氮化合物、碳的氧化物、碳氢化合物及卤素化合物等,如表 1-3 所列。

表 1-3 气体状态大气污染物的种类

污 染 物	一 次 污 染 物	二 次 污 染 物
含硫化合物	$\text{SO}_2, \text{H}_2\text{S}$	$\text{SO}_2, \text{H}_2\text{SO}_4, \text{MSO}_4$
碳的氧化物	$\text{CO}, \text{CO}_2$	无
含氮化合物	$\text{NO}, \text{NH}_3$	$\text{NO}_2, \text{HNO}_3, \text{MNO}_3$
碳氢化合物	$\text{C}_n\text{H}_m$	醛, 酮, 过氧乙酰硝酸酯, $\text{O}_3$
卤素化合物	$\text{HF}, \text{HCl}$	无

注: M 代表金属离子。

气态污染物可分为一次污染物和二次污染物。若大气污染物是从污染源直接排出的原始物质,则称为一次污染物。若是由一次污染物与大气中原有成分或几种一次污染物之间经过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)和光化学烟雾(photochemical smog)。硫酸烟雾是由大气中的二氧化硫等硫化物,在含有水雾、重金属的飘尘或氮氧化物存在时,发生一系列化学或光化学反应而生成的硫酸雾或硫酸盐气溶胶。光化学烟雾是由大气中的氮氧化物、碳氢化合物与氧化剂之间在阳光照射下发生一系列光化学反应所生成的蓝色烟雾(有时带紫色或黄褐色),其主要成分有臭氧、过氧乙酰基硝酸酯(PAN)、酮类及醛类等。

受到世界各国普遍关注的传统大气污染物有二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、总悬浮微粒(TSP)、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、一氧化碳(CO)以及光化学氧化剂。据测算,前三种污染物( $\text{SO}_2$ 、TSP、 $\text{NO}_x$ )中只有 TSP 排放量目前全球有所降低,其余均有所增加。目前我们关心的大气污染物名单加入了許多新化学物质,包括铅、石棉、汞、砷、酸类( $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ )、卤素类、呔喃、聚氯联苯( $\text{PCB}_n$ )等。

### (二) 大气污染物的来源和发生量

根据对主要大气污染物的分类统计表明,其主要来源有三大方面:① 燃料燃烧;② 工业生产过程;③ 交通运输。前两类污染源通称为固定源,交通运输工具(机动车、火车、飞机等)则称为流动源。

自 20 世纪 70 年代的能源危机以来,为了节约能源,多国普遍开始建造密闭型房屋,以

增加保暖效果。室内空调的普遍采用和室内装潢的流行,都影响着室内空气质量(Indoor Air Quality, IAQ)使 IAQ 问题日趋严重。国外学者调查表明室内空气污染物种类已高达 900 多种,主要包括甲醛等挥发性有机物、臭氧、一氧化碳、二氧化碳、氡及其子体等。按照室内污染物的性质,可将室内空气污染分为三类:化学污染、物理污染以及生物污染。室内空气主要污染物及其来源综合列在表 1-4 中。

表 1-4 室内空气主要污染物及其来源

污染种类	污染物	污 染 源
化学污染	甲 醛	建筑材料:各种含脲醛树脂的建筑材料,绝缘材料等 装饰材料:木制家具,墙壁涂料,油漆,黏合剂,化纤地毯等 生活用品:液化石油气的燃烧,化妆品,清洗剂,消毒剂,香烟烟雾,书刊杂志(油墨印刷)等
	颗粒物	石棉,燃料燃烧,吸烟,发烟蚊香,室内清扫,日化用品(如空气清新剂,臭氧剂,化妆品)等
	挥发性有机物	涂料,化妆品,油漆,清洁剂,杀虫剂,鞋油,指甲油,摩丝等
	臭 氧	室外光化反应进入,复印机高压产生
	一氧化碳	燃料燃烧,吸烟,燃气热水器使用不当
	二氧化碳	燃料燃烧,吸烟,人类呼吸代谢,植物呼吸作用
	氮氧化物	燃料燃烧,吸烟,使用电炉
	有机氯化物	纺织品,杀虫剂,集成电路半导体元件使用的有机氯清洗剂
物理污染	放射性污染	氡及其子体,建筑材料中的放射性物质,建材(水泥、砖、地板等),地壳本体,地下坑道中的冷气及放射线
	电磁辐射污染	各种家电如电视机、电脑、微波炉、空调、冰箱、手机等
	光污染	采光不合理
生物污染	过敏反应物	植物花粉,孢子,家畜(猫、狗等),螨类
	菌类微生物	人体,空调器,湿度器,家畜,不清洁的毛毯

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 2 369.6 万 t,超过美国,成为世界二氧化硫排放量第一大国。近年来,我国采取一系列措施,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(表 1-5)。

表 1-5 我国 2011~2015 年主要大气污染物总排放量 万 t

年度	项目	二氧化硫排放量			烟尘排放量		
		合计	工业	生活	合计	工业	生活
2011		2 217.9	2 017.2	200.4	1 278.8	1 100.9	114.8
2012		2 117.6	1 911.7	205.7	1 234.3	1 029.3	142.7
2013		2 043.9	1 835.2	208.5	1 278.1	1 094.6	123.9
2014		1 974.4	1 740.4	233.9	1 740.8	1 456.1	227.1
2015		1 859.1	1 556.7	296.9	1 538.0	1 232.6	249.7

### 三、大气污染的影响

#### 1. 对人体健康的影响

大气污染物影响人体健康主要有三条途径:表面接触、食用含有大气污染物的食物和水、吸入被污染的空气,其中以第三条途径最为重要。大气污染对人体健康危害的主要表现是引起呼吸道疾病。通常长期接触低浓度大气污染物会引起慢性呼吸道疾病,而急性危害一般出现在污染物浓度较高的工业区及其附近。

#### 2. 对农林水产的影响

大气污染对农业生产也造成很大危害。酸雨可以直接影响植物的正常生长,又可以通过渗入土壤及进入水体,引起土壤和水体酸化、有毒成分溶出,从而对动植物和水生生物产生毒害。严重的酸雨会使森林衰亡和鱼类绝迹,导致农业减产、林木衰败。

#### 3. 对器物和材料的影响

大气污染对建筑物和金属制品、油漆涂料、皮革制品、纸制品、纺织制品、橡胶制品等材料的损害也是严重的。这种损害包括玷污性损害和化学性损害两个方面。玷污性损害主要是粉尘、烟等颗粒物落在器物表面或材料中造成的,有的可以通过清扫冲洗除去,如煤油中的焦油等。化学性损害是指由于污染物的化学作用,使器物 and 材料腐蚀或损坏。

排入空气中的二氧化硫、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,而衍生的二次污染物光化学烟雾、酸雨等会造成更大危害。例如光化学烟雾会腐蚀建筑材料,酸雨能使非金属建筑材料(混凝土、砂浆和灰砂砖)表面硬化水泥溶解,出现空洞和裂缝,导致强度降低等。

#### 4. 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、臭氧层破坏、温室效应等全球性环境问题,给人体健康及全球环境带来更严重的危害。

## 第二节 全球性大气污染问题

### 一、温室效应与气候变化

#### (一) 温室效应与温室气体

地球的温度是由太阳辐射照到地球表面的速率和吸热后的地球将红外辐射线散发到空间的速率决定的。长期来看,地球从太阳吸收的能量必须同地球及大气层向外散发的辐射能相平衡。大气中的二氧化碳和其他微量气体如甲烷、一氧化二氮、臭氧、氟氯烃(CFCs)、水蒸气等,可以使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,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”。

二氧化碳和上述那些微量气体,则称为“温室气体”。几种主要温室气体及其特征列于表1-6中。在已知的30多种温室气体中,CO<sub>2</sub>对温室效应的贡献最大。甲烷、氧化二氮、氟利昂和臭氧也起到重要作用,氟利昂在大气中的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达12%~20%,仅次于CO<sub>2</sub>,氟利昂是效应极强的温室气体。

表 1-6

主要温室气体及其特征

气体	大气中体积分数/%	年增长率/%	生存期	温室效应 (CO <sub>2</sub> =1)	现有贡献率/%	主要来源
CO <sub>2</sub>	$3.55 \times 10^{-4}$	0.4	50~200 a	1	50~60	煤、石油天然气、森林砍伐
CFC	$0.85 \times 10^{-8}$	2.2	50~102 a	3 400~15 000	12~20	发泡剂、气溶胶、制冷、清洗剂
CH <sub>4</sub>	$1.7 \times 10^{-6}$	0.8	12~17 a	11	15	湿地、稻田、化石燃料、牲畜
N <sub>2</sub> O	$3.1 \times 10^{-7}$	0.25	120 a	270	6	化石燃料、化肥、森林砍伐
O <sub>3</sub>	$(0.01 \sim 0.05) \times 10^{-6}$	0.5	数周	4	8	光化学反应

如果没有温室气体的存在,地球将是十分寒冷的。据计算,如果大气层仅有 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>,则地表平均温度为 -6 °C 才能平衡来自太阳的入射辐射,低于现在的 15 °C。如果没有大气层,地表温度将是一 -18 °C。

## (二) 温室气体与气候变化

### 1. 人类活动与气候变化

自然界本身产生各种温室气体,同时自然界也在吸收或分解它们。在地球的长期演化过程中,大气中温室气体的变化是很缓慢的,处于基本平衡的循环状态。

工业革命以来,大量森林植被被迅速砍伐,发达国家消耗了全世界大部分化石燃料,CO<sub>2</sub> 累积排放量惊人。人为排放的 CO<sub>2</sub> 不断增加和森林植被的大量破坏,破坏了 CO<sub>2</sub> 产生和吸收的自然平衡,大气中 CO<sub>2</sub> 已从 1750 年的  $280 \times 10^{-6}$  增加到目前的  $360 \times 10^{-6}$  左右。预计到 21 世纪中叶,大气中 CO<sub>2</sub> 的体积分数将达到  $(540 \sim 970) \times 10^{-6}$ 。二氧化碳含量的增加已成为全球变暖的主要原因。

除 CO<sub>2</sub> 外,大气中其他温室气体的含量也在不断增加。200 多年前,大气中 CH<sub>4</sub> 的体积分数为  $800 \times 10^{-9}$ ,1992 年增加到  $1\,720 \times 10^{-9}$ 。工业革命前,大气中 N<sub>2</sub>O 的体积分数为  $285 \times 10^{-9}$ ,现在已升至  $310 \times 10^{-9}$ ,每年以 0.2%~0.3% 的比例增加。

大气中温室气体的增加,导致吸收来自地表的长波辐射增多,地球及大气向外层空间散发的能量减少,长期形成的能量平衡被破坏,造成地表及大气温度升高,全球气候变暖。

### 2. 对气候变化的影响

温室效应使得冰雪覆盖和冰川面积减少。卫星数据显示,雪盖面积自 20 世纪 60 年代末以来,很可能已减少了 10% 左右;另外还会导致海平面上升,并且改变全球降水格局,预计在 1990 年~2100 年间,全球海平面将上升 8~9 cm。全世界有 1/3 的人口生活在沿海岸线 60 km 以内,海平面上升将使一些岛屿消失,人口稠密、经济发达的河口和沿海低地可能被淹没,迫使大量人口内迁陆地。北半球中纬度地区和南半球降雨量增加,北半球亚热带地区降雨量下降。过多的降雨、大范围的干旱和持续的高温等,进而造成大规模的灾害损失。与过去的 100 年相比,自 20 世纪 70 年代以来厄尔尼诺事件更频繁、更持久,且强度更大。

温室效应影响人类健康。高温热浪给人群带来心脏病发作、中风或其他疾病的风险,引起死亡率增加。在气候变暖时,一些疾病(如疟疾、登革热引起的脑炎等)的发病率有可能增加。

## (三) 应对措施

### 1. 改变能源结构、控制温室气体排放

控制温室气体排放的主要途径有改变能源结构,控制化石燃料使用量,大力发展清洁型

能源(核能、水能、太阳能、风能等);提高能源转换率和利用率;降低单位产品的能耗,控制污染型能源(煤、石油、天然气)的使用量;减少森林植被的破坏,控制水田和垃圾填埋场排放甲烷等。

根据我国的煤炭开采能力和 CO<sub>2</sub> 排放的要求,未来煤炭供给应控制在 30 亿 t 标准煤以下,这是我国能源结构调整的主要方向。国家规划到 2020 年核电的装机容量将达到 0.8 亿 kW,核电在总能中所占比例将从 2006 年的 0.8% 分别增长为 2020 年 2%、2035 年 6%、2050 年 4%;国家规划到 2020 年可再生能源在总能中的比例要达到 16%,而且随着技术的发展其比例将不断增加。

## 2. 增加温室气体吸收

增加温室气体吸收主要通过植树造林和采用固碳技术等方法。植树造林是吸收温室气体最有效的途径。固碳技术是指将燃烧气体中的二氧化碳分离、回收,然后注入深海或地下,或者通过化学、物理以及生物方法固定。

## 二、臭氧层破坏

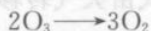
距离地球表面 10~20 km 高处的平流层,稀薄空气内含有  $(300\sim 500)\times 10^{-9}$  的臭氧层。臭氧层具有较强的吸收紫外线的功能,可以吸收太阳光紫外线中对生物有害的部分 UV-B。因此,臭氧层有效地阻挡了来自太阳紫外线的侵袭,使得地球上各种生命能够存在、繁衍和发展。20 世纪 70 年代中期,美国科学家发现南极洲上空的臭氧层有变薄现象。近年来臭氧层损耗现象日益严重。

### (一) 臭氧层破坏的机理

臭氧层破坏的机理主要包括两个反应:



减缓并与这两个反应竞争的其他反应在平流层也在进行,但是如果忽略其他反应,合并这两个反应并消去同类项,可知总的反应如下:



其中没有氯原子的净消耗。这样,一个氯原子可将许多臭氧分子转化为普通的氧气分子。估计一个氯原子可以破坏  $10^4\sim 10^6$  个臭氧分子。(这个机理通常称为臭氧的催化破坏,因为氯原子对这个反应表现为不消耗的催化剂)

除了原子氯外,其他对臭氧层产生破坏的气体还包括奇氢类 HO<sub>x</sub> (H、OH、HO<sub>2</sub>),奇氮类 NO<sub>x</sub> (NO、NO<sub>2</sub>),以及其他奇卤类化合物 XO<sub>x</sub> (ClO、Br、BrO) 等。

### (二) 臭氧层破坏的危害

臭氧层破坏已导致全球范围内地面紫外线照射加强。据报道,北半球中纬度地区冬、春季紫外线辐射增加了 7%,夏、秋季增加了 4%;南半球中纬度地区全年平均增加了 6%;南北极春季分别增加了 130% 和 22%。地面紫外线照射的加强,将带来如下危害:

① 对人体健康带来危害,如导致人类白内障和皮肤癌发病率增加,降低对传染病和肿瘤的抵抗能力,降低疫苗的反应能力等。

② 影响陆生及水生生态系统。UV-B 辐射增强将破坏植物和微生物组织,并减少浮游生物的产量,进而影响生物链和整个生态系统。

③ 影响城市空气质量,加速建筑材料的降解和老化变质。

④ 改变地球大气的结构,破坏地球的能量收支平衡,影响全球的气候变化。

### (三) 应对措施

开发消耗臭氧层物质的替代技术和物质是减少臭氧层破坏的主要措施。在现代经济中,氟利昂等物质应用非常广泛,目前许多国家都在开发氟利昂类物质的替代物质和方法,如水清洗技术、氨制冷技术等。发达国家已经比预期更快的速度和更低的成本,停止了CFCs的使用。泡沫行业使用水、二氧化碳、碳氢和HCFC,制冷和空调行业大都使用CFC作为替代品。

制定淘汰消耗臭氧层物质的措施也是减少臭氧层破坏的途径之一。许多国家采取了一系列政策措施,一类是传统的环境管制措施,如禁用、限制、配额和技术标准,并对违反规定者实施严厉处罚。欧盟国家和一些经济转轨国家广泛采用这类措施。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实行了征税和交易许可证措施。另外,许多国家的政府、企业和民间团体还发起了自愿行动。

保护臭氧层受到了国际社会的关注。针对臭氧层,继1985年通过的《保护臭氧层维也纳公约》以及1987年签署的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》之后,1990年、1992年和1995年的三次议定书缔约国国际会议扩大了受控物质的范围,现包括氟利昂(CFCs)、哈龙(CFCB)、四氯化碳( $\text{CCl}_4$ )、甲基氯仿( $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ )、氟氯烃(HCFC)和甲基溴( $\text{CH}_3\text{Br}$ )等,并提前了停止使用的时间。修改后的议定书规定,发达国家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2010年全部停止使用这四种ODSs。但是由于氟利昂相当稳定,即使《蒙特利尔议定书》得到完全履行,预计臭氧层的破坏要在2050年之后才有可能完全复原。

## 三、酸雨问题

酸雨是指pH值小于5.6的酸性降水,但现在泛指以湿沉降或干沉降形式从大气转移到地面的酸性物质。湿沉降是指酸性物质以雨、雪形式降落到地面;干沉降是指酸性颗粒物以重力沉降、微粒碰撞和气体吸附等形式由大气转移到地面。酸雨形成的机制非常复杂,是一种复杂的大气物理过程。

### (一) 酸雨的形成机理

降水在形成和降落过程中,会吸收大气中的各种物质。如果吸收的酸性物质多于碱性物质,就会形成酸雨。

$\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 是酸雨的主要成分,它们主要是由 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 转化而来的。其中, $\text{SO}_2$ 可以通过催化氧化作用、光氧化作用以及与光化学作用形成的自由基结合,形成三氧化硫。 $\text{NO}_x$ 转化为硝酸的机理与 $\text{SO}_2$ 类同。大气中形成的硫酸和硝酸可与漂浮在大气中的颗粒物形成硫酸盐和硝酸盐气溶胶,粒径很小,有更长的生命周期作远距离迁移。

酸雨的形成过程如下,水蒸气凝结在硫酸盐、硝酸盐等微粒组成的凝结核上,形成液滴,液滴吸收 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 和气溶胶粒子,并相互碰撞、絮凝而组合在一起形成云和雨滴,而云下的酸性物质则会被雨滴从大气中捕获、吸收、冲刷带走。

### (二) 酸雨的危害

酸雨的危害包括以下几个方面:① 危害人体健康。酸雨或酸雾会明显刺激人体眼角膜和呼吸道黏膜,导致红眼病和支气管炎发病率升高。② 腐蚀建筑物及金属结构,破坏历史建筑物和艺术品等。③ 损害森林生长。酸雨损害植物的新生叶芽,从而影响其生长发育,