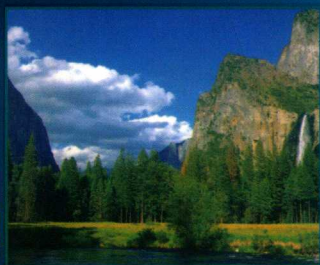


普通高等教育“十三五”规划教材

大气污染控制工程

Air Pollution Control Engineering

王家德 成卓韦 编著



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

大气污染控制工程

Air Pollution Control Engineering

王家德 成卓韦 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《大气污染控制工程》结合我国大气环境保护工作新要求,以及大气污染控制领域推出的新技术和新标准,介绍了大气污染控制工程的经典理论和基本知识,及当前环保政策、法律法规和标准。与现有同类教材相比,本书充实了 VOCs 污染控制内容,增加了大气污染控制工程设计、H₂S 排放与控制、移动源废气污染控制、室内空气质量与控制等章节。本书由 15 章组成,包括概论、大气污染控制工程设计、颗粒污染物控制技术基础、机械力除尘器、电除尘器、过滤式除尘器、湿式除尘器、气态化合物控制技术基础、VOCs 污染控制技术、含硫气态污染物控制、氮氧化物污染控制、移动源废气污染控制、气体收集输送系统的设计、污染物扩散和排气筒设计、室内空气质量与控制。每章附有例题和课后习题,方便读者使用。

《大气污染控制工程》可作为高等院校环境工程等相关专业的教材或教学参考书,也可供相关专业领域的从业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制工程/王家德,成卓韦编著. —北京:化学工业出版社,2019.3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-33780-1

I. ①大… II. ①王…②成… 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 (2019) 第 027956 号

责任编辑:满悦芝 赵玉清
责任校对:张雨彤

装帧设计:张 辉

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 装:中煤(北京)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 19 1/4 字数 473 千字 2019 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 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:58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

进入 21 世纪，我国大气环境保护工作得到快速发展，大气污染控制领域的一些新技术、新标准也不断推出，目标控制污染物也从颗粒物、 SO_2 、 NO_x 扩展到 VOCs 和 O_3 。因此，迫切需要编写一本反映上述变化的《大气污染控制工程》新教材。

大气污染控制工程涵盖内容十分广泛，本书保留了传统大气污染控制工程的经典理论和基本知识，采用了最新的环保政策、法律法规和标准，充实了 VOCs 污染控制内容，设立了大气污染控制工程设计、 H_2S 排放与控制、移动源废气污染控制、室内空气质量与控制等章节，配合例题和课后习题，方便读者使用。

大气污染控制工程设计是环保工程师履行保卫蓝天责任的重要工作。尽管相关污染控制装置和系统的设计内容在一些大气污染控制手册中有描述，但是，工程概念仍是工程师培养过程中十分重要的。因此，本书系统地阐述了大气污染控制系统的原理和工艺流程，描述了解决大气污染物控制的方法和技术，并给出了各种污染控制装置设计和运行的必要参数和数据，以满足环境专业学生工程设计训练要求。

本书力求概念准确、语言简洁、通俗易懂，并反映学科发展的前瞻性，可作为高等院校环境工程等相关专业的教材或教学参考书，也可供相关专业领域的从业人员参考。

本书编著过程参考的文献和资料列在参考文献中，在此对文献作者们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，欢迎读者提出宝贵意见。

作者

2019 年 3 月于杭州

目 录

第1章 概论	1
1.1 大气污染	1
1.1.1 大气及大气污染	1
1.1.2 大气污染物	3
1.1.3 大气污染的影响	5
1.1.4 大气污染物的来源	7
1.2 大气污染防治	8
1.2.1 法律标准规范	8
1.2.2 大气污染防治措施	9
1.3 空气质量指数	10
1.3.1 大气污染物浓度	10
1.3.2 空气质量指数定义	11
1.3.3 空气质量分级	12
习题	13
第2章 大气污染控制工程设计	14
2.1 工程设计	14
2.1.1 大气污染控制系统	14
2.1.2 工程设计程序	14
2.1.3 工程设计主要内容	17
2.2 工程分析	18
2.2.1 物料和能量平衡	18
2.2.2 气流量和污染物排放量	21
2.3 经济核算	25
2.3.1 成本优化原则	25
2.3.2 折旧	26
2.3.3 增量投资回报率	27
2.3.4 大气污染控制设备成本和运行费用估算	28
习题	29
第3章 颗粒污染物控制技术基础	30
3.1 颗粒污染物	30
3.2 颗粒的物理特性	30
3.2.1 颗粒密度	30
3.2.2 颗粒含水率和润湿性	31
3.2.3 颗粒流动性	31
3.2.4 颗粒电学性能	32

3.2.5	颗粒比表面积	33
3.2.6	颗粒自燃性和爆炸性	33
3.3	颗粒粒径分布	34
3.3.1	粒径	34
3.3.2	粒径分布	36
3.3.3	颗粒群平均粒径	40
3.3.4	颗粒粒径分布函数	40
3.4	颗粒在流体中的运动行为	44
3.4.1	力的分析	44
3.4.2	斯托克斯定律	47
3.5	颗粒污染物控制技术	50
3.5.1	颗粒污染物净化方法	50
3.5.2	净化装置性能评价	51
	习题	53
第4章	机械力除尘器	55
4.1	概述	55
4.2	重力沉降室	55
4.2.1	沉降理论	55
4.2.2	沉降室设计	57
4.3	惯性除尘器	58
4.3.1	除尘机理	58
4.3.2	结构形式	59
4.4	旋风除尘器	60
4.4.1	结构和工作原理	60
4.4.2	除尘效率计算	61
4.4.3	最小直径和分割直径	63
4.4.4	压力损失	64
4.4.5	影响因素	66
4.5	旋风除尘器选用	67
4.5.1	旋风除尘器类型	67
4.5.2	旋风除尘器的设计选型	68
	习题	69
第5章	电除尘器	71
5.1	概述	71
5.2	工作原理	71
5.2.1	电除尘器的除尘过程	71
5.2.2	电晕放电	71
5.2.3	粒子荷电	76
5.2.4	粒子捕集	78
5.3	电除尘器的影响因素	80
5.3.1	气流特性	80

3.2.5	颗粒比表面积	33
3.2.6	颗粒自燃性和爆炸性	33
3.3	颗粒粒径分布	34
3.3.1	粒径	34
3.3.2	粒径分布	36
3.3.3	颗粒群平均粒径	40
3.3.4	颗粒粒径分布函数	40
3.4	颗粒在流体中的运动行为	44
3.4.1	力的分析	44
3.4.2	斯托克斯定律	47
3.5	颗粒污染物控制技术	50
3.5.1	颗粒污染物净化方法	50
3.5.2	净化装置性能评价	51
	习题	53
第4章	机械力除尘器	55
4.1	概述	55
4.2	重力沉降室	55
4.2.1	沉降理论	55
4.2.2	沉降室设计	57
4.3	惯性除尘器	58
4.3.1	除尘机理	58
4.3.2	结构形式	59
4.4	旋风除尘器	60
4.4.1	结构和工作原理	60
4.4.2	除尘效率计算	61
4.4.3	最小直径和分割直径	63
4.4.4	压力损失	64
4.4.5	影响因素	66
4.5	旋风除尘器选用	67
4.5.1	旋风除尘器类型	67
4.5.2	旋风除尘器的设计选型	68
	习题	69
第5章	电除尘器	71
5.1	概述	71
5.2	工作原理	71
5.2.1	电除尘器的除尘过程	71
5.2.2	电晕放电	71
5.2.3	粒子荷电	76
5.2.4	粒子捕集	78
5.3	电除尘器的影响因素	80
5.3.1	气流特性	80

5.3.2	颗粒物性质	81
5.3.3	操作参数	82
5.4	电除尘器设计和选用	83
5.4.1	电除尘器的结构	83
5.4.2	电除尘器的类型	86
5.4.3	电除尘器设计	87
	习题	89
第6章	过滤式除尘器	91
6.1	概述	91
6.2	工作原理	91
6.2.1	过滤机理	91
6.2.2	过滤效率	92
6.2.3	压力损失	96
6.2.4	过滤除尘器的影响因素	98
6.2.5	袋式除尘器的运行状态分析	100
6.3	过滤除尘器类型和结构设计	102
6.3.1	过滤除尘器种类	102
6.3.2	除尘器清灰方式	104
6.3.3	袋式除尘器设计	105
6.4	电袋除尘器	107
	习题	108
第7章	湿式除尘器	110
7.1	概述	110
7.2	洗涤理论	110
7.2.1	雨水捕集理论	110
7.2.2	液滴捕集效率	111
7.2.3	接触功率	116
7.2.4	分割粒径	117
7.3	湿式除尘器结构类型	118
7.3.1	湿式除尘器类型	118
7.3.2	自激式洗涤器	119
7.3.3	旋风水膜除尘器	120
7.3.4	泡沫除尘器	120
7.4	文丘里除尘器设计	120
7.4.1	结构和原理	120
7.4.2	压力损失	122
7.4.3	除尘效率	123
7.4.4	设计计算	124
	习题	126
第8章	气态化合物控制技术基础	128
8.1	气态化合物的基本特性	128

18	8.1.1 气体和蒸气	128
28	8.1.2 蒸气压力	128
38	8.1.3 扩散系数	130
38	8.1.4 气液固平衡	131
38	8.2 化学反应	132
38	8.2.1 反应动力学	132
38	8.2.2 热氧化	134
38	8.2.3 催化氧化	136
38	8.3 气体吸收	137
38	8.3.1 传质理论	137
38	8.3.2 吸收塔计算	139
38	8.4 气体吸附	146
38	8.4.1 吸附理论	146
38	8.4.2 吸附剂	151
38	8.4.3 吸附床计算	153
38	习题	156
	第9章 VOCs 污染控制技术	159
38	9.1 概述	159
38	9.1.1 VOCs 及来源	159
38	9.1.2 净化方法及选择	160
38	9.2 高浓度 VOCs 回收技术	161
38	9.2.1 冷凝法	161
38	9.2.2 膜分离法	163
38	9.2.3 热氧化	167
38	9.3 低浓度 VOCs 净化技术	176
38	9.3.1 吸附法	176
38	9.3.2 生物法	181
38	9.3.3 高能粒子氧化	186
38	习题	190
	第10章 含硫气态污染物控制	192
38	10.1 含硫化合物	192
38	10.2 高浓度 SO ₂ 资源化	193
38	10.3 低浓度 SO ₂ 排放控制	194
38	10.3.1 湿式钙法烟气脱硫技术	195
38	10.3.2 喷雾干燥法烟气脱硫技术	198
38	10.3.3 干法烟气脱硫技术	200
38	10.3.4 其他烟气脱硫技术	202
38	10.3.5 烟气脱硫工艺综合比较	204
38	10.4 硫化氢排放与控制	206
38	10.4.1 高浓度硫化氢资源化技术	206
38	10.4.2 低浓度硫化氢处理技术	208

习题	211
第 11 章 氮氧化物污染控制	212
11.1 氮氧化物	212
11.2 NO _x 的形成机理	212
11.2.1 热力型 NO _x	212
11.2.2 瞬时型 NO _x	215
11.2.3 燃料型 NO _x	215
11.2.4 影响燃烧 NO _x 形成的因素	216
11.3 固定源 NO _x 控制	217
11.3.1 燃烧过程控制	217
11.3.2 烟气脱硝技术	219
11.4 同步脱硫脱硝	222
11.4.1 高能束氧化技术	222
11.4.2 吸附技术	223
11.4.3 气/固催化技术	224
习题	226
第 12 章 移动源废气污染控制	227
12.1 移动源	227
12.2 移动源排放量计算	227
12.2.1 道路移动源	227
12.2.2 非道路移动源	228
12.2.3 移动源排放因子	229
12.3 移动源尾气排放与控制	232
12.3.1 移动源发动机特点	232
12.3.2 排放控制	234
12.4 其他管控措施	236
习题	238
第 13 章 气体收集输送系统的设计	239
13.1 通风	239
13.1.1 通风的重要性	239
13.1.2 通风方法	239
13.2 集气单元设计	240
13.2.1 集气罩气流特性	240
13.2.2 集气罩基本形式	241
13.2.3 集气单元计算	243
13.3 管道设计	246
13.3.1 压力损失	246
13.3.2 管道计算	246
13.4 集气输送系统设计	248
13.4.1 管道系统的布置	248
13.4.2 管道和部件	250

13.5 实际案例	252
习题	254
第14章 污染物扩散和排气筒设计	256
14.1 大气的热力过程	256
14.1.1 大气运动	256
14.1.2 烟流形状与大气稳定度	258
14.2 大气污染物扩散运动	261
14.2.1 大气湍流运动	261
14.2.2 高斯扩散模式	261
14.2.3 污染物扩散浓度的估算	263
14.3 排气筒设计	269
14.3.1 排气筒高度的计算	269
14.3.2 排气筒设计中的几个问题	271
习题	273
第15章 室内空气质量与控制	275
15.1 引言	275
15.2 室内空气污染物	275
15.3 源控制与通风	277
15.3.1 源头控制	277
15.3.2 通风	278
15.3.3 清洁空气	278
15.4 室内空气质量的物料平衡	279
习题	283
附录	285
附录1 单位换算	285
附录2 空气物质性质	287
附录3 水的物理性质	289
附录4 其他气体物质性质	291
附录5 一些物质在空气和水中的扩散系数	294
附录6 部分 VOCs 的燃烧热值	295
参考文献	296

第 1 章 概 论

1.1 大气污染

1.1.1 大气及大气污染

1.1.1.1 大气

大气 (atmosphere) 是指包围地球的空气总体。大气总质量约为 $5.32 \times 10^{15} \text{t}$, 约占地球总质量的百万分之一, 其中 99.9% 集中在距地表 48km 范围内的大气层。在环境保护领域, 以大区域或全球性的气流为研究对象时, 采用“大气”一词加以描述; 而对特定场所或区域, 供人和动植物生存的气体则习惯称之为“空气”, 两者经常混用。

大气是地球上一切生命赖以生存的重要物质, 一个成年人每天呼吸约 3 万次, 吸入的气量为 $12 \sim 16 \text{m}^3$ 。如表 1-1 所示, 大气以氮 (N_2)、氧 (O_2)、氩 (Ar) 为主, 混合二氧化碳 (CO_2)、水蒸气、尘埃以及其他气体, 其中 N_2 、 O_2 、 Ar 占大气总体积的 99.9%, 称为恒定气体, 属于洁大气, 其平均分子量为 28.96, 空气密度 (0°C) 为 1.29kg/m^3 ; CO_2 、水蒸气、尘埃等在大气中含量很低, 随时间、地点、高度而变化, 影响大气物理状况, 称为可变气体。 CO_2 含量 (按体积计) 占大气总体积的 0.03%, 能强烈地吸收和放出长波辐射, 对气温影响很大。臭氧 (O_3) 含量不到大气总体积的万分之一, 主要分布在大气层 5~50km 高度, 吸收紫外辐射能力极强, 使 40~50km 高层大气温度升高, 保护地面生物免受过多紫外辐射伤害。水蒸气是大气中唯一能发生相变 (气、液、固三者之间相互转变) 的成分, 也是含量最易发生变化的成分之一, 其含量按体积计, 变化范围为 0%~4%。

表 1-1 大气组成

空气成分	恒定气体			可变气体		
	氮气	氧气	氩气	二氧化碳	尘埃和其他气体	水蒸气
含量/%	78	21	0.9	0.03	0.03	—

描述大气的物理状况要素有气温、气压、湿度、风向、风速、云况、能见度、降水等。气温 (temperature, T) 是表示大气冷热程度的量, 一般是指距地面 1.5m 高处的百叶箱中观测到的空气温度, 其单位一般用摄氏温度 ($^\circ\text{C}$)、热力学温度 (K) 和华氏温度 ($^\circ\text{F}$) 表征。气压 (pressure, P) 是指空气分子在任何表面的单位面积上运动所产生的压力, 其大小同温度、密度、高度等有关, 国际单位为帕 (Pa), 此外还有毫巴 (mbar)、毫米汞柱 (mmHg)、毫米水柱 (mmH_2O) 等, 把温度为 0°C 、纬度 45° 海平面的气压称为标准大气压 (1atm), 其值为 101.325kPa 。空气湿度 (humidity, H) 反映空气中水汽含量和空气潮

湿程度,表示方法有绝对湿度、相对湿度、含湿量、水汽体积分数等,绝对湿度指 1m^3 空气含有的水分质量 (kg),相对湿度 (relative humidity, RH) 为绝对湿度与同温度下空气的饱和湿度 (saturation humidity, H_s) 之比,单位用 % 表示。气象上把水平方向的空气运动称为风,垂直方向的空气运动则称为升降气流,风是一个矢量,具有大小和方向,风向是指风的来向,用方位表示,如风从东方来称东风 (E); 风速 (u) 是指单位时间内空气在水平方向运动的距离,单位用 m/s 或 km/h 表示。

例 1.1 已知大气压为 1atm , 气温为 28°C , 空气相对湿度为 70% , 估算空气的绝对湿度和水分体积含量。

解: 查手册, 气温 28°C 时, 空气的饱和湿度 $H_s=27.0\text{g}/\text{m}^3$ 。相对湿度 $\text{RH}=70\%$, 空气的绝对湿度 H 为:

$$H=\text{RH}\times H_s=0.7\times 27.0=18.9(\text{g}/\text{m}^3)$$

根据理想气体状态方程, 该空气的水分体积含量为:

$$\frac{18.9\text{g}/\text{m}^3}{18\text{g}/\text{mol}}\times\frac{[0.082\text{atm}\cdot\text{L}/(\text{mol}\cdot\text{K})]\times(273+28)\text{K}}{1\text{atm}}\times\frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}}=0.0259$$

1.1.1.2 大气污染

按照国际标准化组织 (ISO) 定义, 大气污染 (atmospheric pollution, air pollution) 通常是指由于人类活动和自然过程引起某种 (些) 物质进入大气中, 呈现出足够的浓度, 达到了足够的时间并因此危害了人体的舒适、健康和福利或危害了环境的现象。

这个定义指明了造成大气污染的原因是人类活动和自然过程。人类活动包括人类的生活活动和生产活动两个方面; 自然过程有火山活动、森林火灾、海啸、土壤和岩石风化以及大气圈的气流运动等。

该定义还明确了形成大气污染的必要条件, 即污染物在大气中要达到足够浓度, 并在此浓度下对受体 (如人和环境) 作用足够的时间, 对受体产生了危害。

一般来说, 自然环境能利用其自身的物理、化学和生物机能 (即自净能力), 对进入大气的污染物, 经过一定时间后自行消除。当进入大气的污染物浓度超过了其自净能力所能容纳的限度, 会导致大气环境质量恶化, 影响、危害人类的生活和生产。

1.1.1.3 大气污染的类型

大气污染包括室内污染和室外污染。依据污染范围, 室外大气污染可分为以下四类。

- ① 局部性污染。如某个工厂排气筒排气所造成的直接影响。
- ② 区域性污染。如工业园区及其附近地区或整个城镇大气受到污染。
- ③ 广域性污染。指更广泛、大区域的大气污染, 如大城市群、大工业区域带出现的灰霾。
- ④ 全球性污染。指跨国界乃至整个地球大气层的污染, 如温室效应、臭氧层破坏等。

进入 21 世纪, 密闭空间 (又称室内) 的空气质量引起广泛关注, 特别是大量现代化、电气化器件和材料的使用, 使得室内空气污染问题日趋严重。

1.1.1.4 室内空气污染

“室内” (indoor) 是指居室、办公室、车间等相对密闭的人类活动空间。很多人一生大约 80% 时间在室内, 因此, 室内空气质量对人体健康的关系更显密切。室内空气污染是指由于各种原因导致的密闭空间空气中有害物质浓度超标, 对人体身心健康产生直接或间接、近期或远期, 或者潜在有害影响。

室内空气污染有化学污染、物理污染、生物污染和放射性污染四种类型。化学污染来自建筑材料、装饰材料、日用化学品、人体排泄物、香烟和燃烧产物等；物理污染主要包括噪声、电磁辐射和光线等；生物污染主要来自霉菌、花粉携带的细菌和病毒以及尘螨等；放射性污染主要来自建筑材料所含的铀、钍和氡等放射性元素。

有专家认为，18世纪工业革命带来的煤烟型污染为第一空气污染时期，19世纪石油和汽车工业带来的光化学烟雾污染为第二空气污染时期，20世纪以来大量使用能源和特殊建筑材料带来的室内空气污染为第三空气污染时期。室内空气污染虽然浓度低，但由于人体接触时间长，累积接触量高，因此，室内空气污染已成为重要环境问题之一。

1.1.2 大气污染物

1.1.2.1 大气污染物定义

大气污染物 (air pollutants) 即引起大气污染的物质，系指人类活动或自然过程排入大气的、对人和环境产生有害影响的物质。因此，大气污染物可分为天然污染物和人为污染物两大类，引起公害的往往是人为污染物。

大气污染物的种类很多，按其存在状态分为颗粒污染物和气态污染物，依据污染物产生机理又可分为一次污染物和二次污染物。一次污染物是指直接从污染源排放到大气中的原始污染物质，二次污染物是指由一次污染物与大气中已有组分之间（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新污染物质。

在大气污染控制中，受到普遍重视的一次污染物主要有颗粒物、含硫化合物 (H_2S 、 SO_x)、含氮化合物 (NH_3 、 NO_x)、碳氧化物 (CO 、 CO_2) 及气态有机物等；二次污染物主要有硫酸烟雾、光化学烟雾以及化学反应生成的转化产物，如 H_2S 和 SO_2 转化成硫酸盐、 NO_x 和 NH_3 转化成硝酸盐、气态有机物反应形成 O_3 和细粒子 ($\text{PM}_{2.5}$) 等。下面逐一描述。

1.1.2.2 颗粒污染物

从大气污染控制的角度，颗粒污染物 (particulate matter, PM) 按照颗粒大小可分为以下两种。

① 粉尘 (dust)。指悬浮于空气中的小固体颗粒，通常是由于固体物质的破碎、研磨、输送等机械过程，以及土壤、岩石风化等自然过程形成的。颗粒形状不规则，粒径为 $1\sim 200\mu\text{m}$ 。大于 $10\mu\text{m}$ 的粒子靠重力作用能在较短时间内沉降到地面，称为降尘；小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子能长期在大气中飘浮，称为飘尘。

② 烟尘 (flume)。指物质燃烧、熔融、冷凝等过程形成的固体或液体颗粒，粒径为 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 。如金属冶炼过程中产生的铅烟、锌烟，氧化铅烟大小在 $0.16\sim 0.43\mu\text{m}$ 之间；燃烧过程产生的烟气和黑烟。

日常生活中，飞灰 (fly ash) 指由燃料燃烧后产生的烟气带走的细小颗粒，粒径一般在 $1\sim 100\mu\text{m}$ 之间，是含碳物质燃烧后残留的固体颗粒。雾 (smog) 泛指小液体粒子悬浮体系，它是由于液体蒸气凝结、液体雾化及化学反应等过程形成的，如水雾、酸雾、碱雾、油雾等，粒径一般小于 $10\mu\text{m}$ 。另外，扬尘是地面上尘土受风力、人为带动及其他活动作用而飞扬进入大气的开放性污染源，是环境空气中总悬浮颗粒的重要组成部分。

上述各种颗粒分散在空气中构成了一个相对稳定的大悬浮体系，即气溶胶体系，因此大

气颗粒物也称为大气气溶胶（atmospheric aerosols）。我国《环境空气质量标准》（GB 3095—2012）根据颗粒污染物粒径大小，将其分为总悬浮颗粒、可吸入颗粒和细粒子。总悬浮颗粒（total suspended particles, 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；可吸入颗粒（inhalable particles, IP）指悬浮在空气中、空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒，用 PM_{10} 表示；细粒子（fine particles, FP）指悬浮在空气中、空气动力学当量直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒，用 $\text{PM}_{2.5}$ 表示。

1.1.2.3 气态污染物

气态污染物（gaseous pollutants）是指在常温常压下以分子状态存在的污染物，包括气体和蒸气。气态污染物的种类很多，总体上可以分为五大类，见表 1-2。

表 1-2 气态污染物分类

污染物	一次污染物	二次污染物
含硫化合物	SO_2 、 H_2S	SO_3 、 H_2SO_4 、硫酸盐
含氮化合物	NO 、 NH_3	NO_2 、 HNO_3 、硝酸盐
碳氧化物	CO 、 CO_2	无
有机化合物	$\text{C}_1 \sim \text{C}_{10}$ 化合物	细粒子、 O_3
卤素化合物	HF 、 HCl	无

① 含硫化合物（sulfur compounds）。污染大气的含硫化合物主要有 H_2S 、 SO_2 、 SO_3 、硫酸雾等。 SO_2 是目前大气污染物中数量大、影响范围广的一种气态污染物。大气中的 SO_2 主要来自化石燃料的燃烧过程，以及硫化物矿石的焙烧、冶炼等热过程， SO_3 是 SO_2 的二次氧化产物，硫酸雾是 SO_3 和空气中水反应形成的硫酸小液滴悬浮体； H_2S 主要来自含硫物质的分解，包括生物厌氧代谢过程及一些工业生产排放。

② 含氮化合物（nitrogen compounds）。污染大气的含氮化合物包括 NH_3 、 NO 、 NO_2 等。人为活动排放的 NO 主要来自化石燃料的燃烧过程，以及硝酸生产和使用。 NO_2 是 NO 的进一步氧化产物， NO_2 参与空气中的光化学反应时，会形成光化学烟雾。

大气中 NH_3 的来源很复杂，主要来自于农牧业。大气中 NH_3 含量增加与作物肥料、畜禽废弃物、大气化学变化、土壤增温等有关系。 NH_3 是大气中唯一的碱性气体，可与酸性气体发生中和反应，生成细小颗粒，在气溶胶形成过程中扮演着重要的角色。

③ 碳氧化物（carbon oxides）。 CO 和 CO_2 是气态污染物中发生量最大的一类污染物，主要来自燃料燃烧、石油炼制、钢铁冶炼、固体废物焚烧等。

CO 是无色、无臭的有毒气体，化学性质较稳定。 CO 能与血红蛋白结合，降低后者的输氧能力，严重时可使人窒息死亡。 CO_2 是无色、无毒气体，对人无害，一般不列为环境污染物。由于大气中 CO_2 浓度不断上升，强烈地吸收和放出长波辐射，引起地球气温变化，能产生“温室效应”，因而受到人们的关注，迫使各国政府实施减排计划。

④ 有机化合物（organic compounds）。有机化合物种类很多，主要由碳、氢组成，还可能含有氧、氮、氯、磷和硫等元素。根据碳原子结合而成的基本骨架不同，有机化合物可分为三大类：链状化合物（脂肪族化合物）、碳环化合物（脂环族化合物和芳香族化合物）、杂环化合物。

非甲烷总烃（non-methane hydrocarbon, NMHC）通常是指除甲烷以外的所有可挥发

的碳氢化合物（主要是 $C_2 \sim C_8$ ）。大气中 NMHC 超过一定浓度，除直接对人体健康有害外，在一定条件下经日光照射还能产生光化学烟雾，对环境和人类造成危害。

挥发性有机化合物（volatile organic compounds, VOCs），是指在常温常压下沸点小于 260°C 的有机化合物。VOCs 在太阳光作用下容易产生光化学烟雾，一定浓度对植物和动物有直接毒性，对人体有致癌、引发白血病的危险。

⑤ 卤素化合物（halogen compounds）。卤素化合物是指含有氟（F）、氯（Cl）、溴（Br）、碘（I）、砹（At）卤族元素（简称卤素）呈负价的化合物。按组成卤化物的键型，可分为离子型卤化物和共价型卤化物，硼、碳、硅、氮、氢、硫、磷等非金属卤化物均为共价型，共价型者大多数易挥发，熔点和沸点低。

大气中的卤素化合物主要来自玻璃、水泥、砖、盐酸等生产过程，以及基础化学品、其他涉及卤代反应和卤素化合物的生产活动。

二次污染中的光化学烟雾（photo-chemical smog）是指在阳光照射下，空气中的氮氧化物、有机化合物等一次污染物和氧化剂之间发生一系列光化学反应而生成的蓝色烟雾（有时带紫色或黄褐色），其主要成分有 O_3 、过氧乙酰硝酸盐、酮类和醛类等。光化学烟雾对大气的污染危害要比一次污染物强烈得多，不仅对人体、动植物、建筑材料造成影响，而且降低能见度、影响出行。

1.1.3 大气污染的影响

世界卫生组织（WHO）和联合国环境规划署（UNEP）曾指出：“空气污染已成为全世界城市居民生活中一个无法逃避的现实。”工业文明和城市发展，在为人类创造巨大财富的同时，也把数十亿吨计的废气和废物排入大气，人类赖以生存的大气圈成了空中垃圾库和毒气库。当大气中的有害气体和污染物达到一定浓度时，就会给人类和环境带来巨大灾难。

1.1.3.1 对人体的伤害

大气污染物主要通过三条途径危害人体：一是人体表面接触大气污染物后受到伤害，二是食用含有大气污染物的食物和水中毒，三是吸入污染的空气后患上各种疾病。表 1-3 概括了主要大气污染物对人体的危害。

表 1-3 主要大气污染物对人体的危害

名称	对人体的影响
SO ₂	视程减少,流泪,眼睛有炎症。胸闷,呼吸困难,呼吸道有炎症,肺水肿,窒息死亡
H ₂ S	恶臭难闻,恶心呕吐,影响人体呼吸、血液循环、内分泌、消化和神经系统,昏迷,中毒死亡
NO _x	支气管炎、气管炎,肺水肿、肺气肿,呼吸困难,直至死亡
颗粒	伤害眼睛,视程减少,慢性气管炎、幼儿气喘病和尘肺
光化学烟雾	眼睛红痛,视力减弱,头疼、胸痛,麻痹,肺水肿,严重的在 1h 内死亡
碳氢化合物	皮肤和肝脏损害,致癌死亡
CO	头晕头疼,贫血、心肌损伤,中枢神经麻痹、呼吸困难,严重的在 1h 内死亡
F ₂ 和 HF	刺激眼睛、鼻腔和呼吸道,引起气管炎、肺水肿、氟骨症和斑釉齿
Cl ₂ 和 HCl	刺激眼睛、上呼吸道,严重时引起肺水肿
铅烟	神经衰弱,腹部不适,便秘、贫血,记忆力低下

例 1.2 受污染的空气中 CO 体积浓度为 100×10^{-6} ，如果吸入人体肺中的 CO 全被血液吸收，试估算人体血液中 COHb 的饱和浓度。已知血红蛋白对 CO 的亲合力大约是对 O_2 的 210 倍，暴露于两种气体混合物中所产生的 COHb 和 O_2 Hb 的平衡浓度可用如下方程式表示：

$$\frac{COHb}{O_2Hb} = (200 \sim 250) \frac{P_{CO}}{P_{O_2}} \quad (1.1)$$

式中， P_{CO} 、 P_{O_2} 分别为吸入气体中 CO 和 O_2 的分压。

解：设人体肺部气体中氧含量与环境空气中氧含量一致，即为 21%，则应用式 (1.1) 得到肺部 COHb 和 O_2 Hb 的平衡浓度比值为：

$$\frac{COHb}{O_2Hb} = 210 \times \frac{100 \times 10^{-6}}{21 \times 10^{-2}} = 0.1$$

血液中 COHb 的饱和浓度为：

$$\frac{COHb}{COHb + O_2Hb} = \frac{COHb/O_2Hb}{1 + COHb/O_2Hb} = \frac{0.1}{1 + 0.1} = 0.091 = 9.1\%$$

1.1.3.2 对动植物的危害

大气污染主要通过三条途径危害动植物的生存和发育：一是使动植物中毒或枯竭死亡，二是减缓动植物的正常发育，三是降低动植物对病虫害的抗御能力。

植物在生长期中长期接触污染的大气，损伤了叶面，减弱了光合作用；伤害了内部结构，使植物枯萎，直至死亡。各种有害气体中， SO_2 、 Cl_2 和 HF 等对植物的危害最大。大气污染对动物的伤害，主要是呼吸道感染和食用了被大气污染的食物，其中以砷、氟、铅、钼等的危害最大。大气污染使动物体质变弱，以至死亡。大气污染还通过酸雨形式杀死土壤微生物，使土壤酸化，降低土壤肥力，危害了农作物和森林生长。

1.1.3.3 对物体的腐蚀

大气污染物对仪器、设备和建筑物等都有腐蚀作用，金属建筑物出现的锈斑、古代文物的严重风化等都与它相关。

1.1.3.4 对全球大气环境的影响

大气污染对全球大气环境的影响表现为三个方面：一是臭氧层破坏，二是酸雨腐蚀，三是全球气候变暖。

① 臭氧层破坏。1984 年，英国科学家首次发现南极上空出现臭氧洞。大气臭氧层的损耗是当前世界上又一个被普遍关注的全球性大气环境问题，它直接关系到生物圈安危和人类生存。臭氧层中臭氧的减少，导致照射到地面的太阳光紫外线增强，对生态系统和各种生物（包括人类）产生不利影响。为保护臭氧层，世界各国签订了《蒙特利尔议定书》。

② 酸雨腐蚀。酸雨是指 pH 低于 5.6 的大气降水，最早是英国科学家史密斯 1872 年在其著作《空气和降雨：化学气候学的开端》中提出的。从专业角度讲，酸雨又称为酸性沉降，分为“湿沉降”与“干沉降”两大类，前者是指所有气态或颗粒污染物随雨、雪、雾或雹等降水过程落到地面，后者是指在下雨时空气中酸性颗粒沉降。形成酸雨的阴离子有硫酸根和硝酸根，酸雨根据其浓度比值分为三类：硫酸型或燃煤型（硫酸根/硝酸根 > 3 ）、硝酸型或燃油型（硫酸根/硝酸根 < 0.5 ）和混合型（ $0.5 \leq \text{硫酸根/硝酸根} \leq 3$ ）。酸雨降到地面后，会导致水质恶化、危及水生动物和植物生存。据估计，酸雨每年要夺走 7500~12000 人