



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大气污染控制工程

(第二版)

姜宁 季学李 徐斌 等编著



化学工业出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大气污染控制工程

(第二版)

羌 宁 季学李 徐 斌 等编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地介绍了大气污染的产生、扩散及管理控制的思想、理论和技术,重点论述了大气污染控制的技术原理、装置及设计计算,并强调管理在大气污染控制方面的作用,同时引入了室内空气污染控制的基础内容。书中还简要介绍了当今大气污染控制工程的新技术和发展趋势,注重引导学生开拓思路。每章节均给出了内容提要,有利于读者学习领会。

本书主要作为高等学校环境工程专业学生的教材,也可供环境保护的管理人员、有关的工程技术人员和相关的大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制工程/羌宁,季学李,徐斌等编著. —2版.
北京:化学工业出版社,2015.1
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-22598-6

I. ①大… II. ①羌…②季…③徐… 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(2014)第300643号

责任编辑:满悦芝

文字编辑:郑直

责任校对:宋玮李爽

装帧设计:刘剑宁

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张23¼ 字数595千字 2015年4月北京第2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:49.80元

版权所有 违者必究

前 言

距本书第一版出版已有近十年，中国大气污染的形势和控制要求也发生了巨大的变化。 $\text{PM}_{2.5}$ 和挥发性有机物已越来越被关注，迅猛发展的互联网技术也给知识的汇集和传播方式带来了巨大的变化。本书在继承第一版对大气污染控制工程基本概念、原理和技术路线清晰明了介绍的基础上，更进一步强调对学生工程思维能力、基本技能和创新能力的训练，并通过技术发展沿革的介绍，解析大气污染控制技术进步的动力和途径。

本次修订中，第1章中更新了一些大气污染状况的材料，引进大气污染物迁移转化概念图说明大气污染物的转化归宿，还列举了一些参考资料的来源网址。对第2章、第3章的部分内容进行了精简。第4章，精炼了对大气污染源控制的基本方法的介绍，补充了一些与环境大气质量相关的标准煤、标准油的概念，调整了低氮燃烧方面的内容。第5章，对空气质量标准情况及空气质量模型概述进行了修改。第6章，从物料衡算的角度改进了颗粒物捕集效率的说明方式，增加了电除尘、袋式除尘的技术发展内容。第7章，主要对吸附、燃烧和常温氧化技术等方面进行了完善。第8章，主要对垃圾焚烧烟气净化、挥发性有机物控制工艺和机动车污染防治的相关内容进行了改写。第9章，主要从强化工程设计的角度进行了一些改写。

本次修订中，第1、2、4、5、7、8、10章由羌宁编写，第3、6章由徐斌编写，第9章由刘涛编写。在编写过程中苟志萌、陈檬、李照海和吴娅等也承担了大量的工作，在此表示感谢。

本教材为教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材，同济大学“十二五”规划教材，得到了同济教材、学术著作出版基金委员会资助，在此表示衷心感谢。

编著者

2015年2月于同济生态楼

第一版前言

空气是人类基本生存环境的重要组成部分，人一刻也不能脱离空气。空气一直处于不同尺度的运动之中，污染物在空气中的扩散几乎不受限制。被污染的空气，不但直接影响生态，危害人体健康，而且会引发一系列环境问题。由此可见空气环境的重要性和复杂性。

随着社会发展，能源、资源消耗增大，污染物排放不断增加；同时，人们的环境意识增强，对环境质量的要求越来越高。虽然人们在环境整治方面已做了巨大努力，但目前的环境空气质量仍不能尽如人意。因此防治污染、改善空气环境是当今的迫切任务。

“空气污染控制工程”是高等学校环境工程专业的主干专业课之一。本书是在总结 20 多年教学经验的基础上编写的教材，主要对象是环境工程专业本科生，也可供环境科学、环境监测、环境管理等专业的学生选用，同时也适合工程技术人员参考。教材必须具有系统性和适当的覆盖面，符合教学要求，为此编著者在内容选取和安排上做了仔细斟酌，以保证教学效果。专业课必须理论联系实际，对此本书特别注重：在阐明基本理论的基础上，介绍主要污染控制技术、控制设备的原理、结构及其工程应用，并且强调控制系统的整体性和实用性。

近年来科学技术发展迅速，空气污染控制技术也日新月异。本书力求既要把基本内容讲透，也对近年研发的新技术进行必要的评价，并适当介绍学科当前主要发展前沿和热点。

实践证明仅靠工程技术不能完全解决治理污染、改善环境的问题。若解决上述问题，必须给未来的环境工作者以完整、系统的概念，所以本书适当增加了大气环境规划和管理方面的内容。

室内空气环境对人体健康的影响最为直接，是空气污染控制工程的一部分，近年来受到普遍关注，本书也引入了这方面的新内容。

本书第 1 章概述空气环境及近期污染的发生、影响与综合防治措施；第 2 章介绍污染气象学和大气扩散方面的内容；第 3 章阐述污染物动力学原理，侧重于颗粒物动力学，对气态污染物动力学等在基础课中已有的内容均不重复；第 5 章主要介绍城市空气质量管理，包括体系、法规、大气环境规划和城市空气环境质量报告和预报；第 4 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章依次阐述污染物的产生、散发及控制原理和技术；第 9 章是污染控制设施的系统化和工程应用；第 10 章介绍室内空气环境品质和污染防治。

本书第 2 章、第 3 章、第 6 章、第 9 章由季学李编写，第 5 章、第 7 章、第 8 章、第 10 章由羌宁编写，第 1 章、第 4 章由季学李、羌宁合写。

本书编写过程中刘道清、郭小品、沈秋月、王晨昊、裴冰和樊奇等参与了大量的工作，在此表示感谢。

本教材为同济大学“十五”规划教材，教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材，得到了同济教材、学术著作出版基金委员会资助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，缺点和错误在所难免，敬请读者赐教。

2005 年 4 月

于同济

目 录

第 1 章 概述	1	2.5.1 无限空间点源扩散模式	25
1.1 大气及洁净大气的组成	1	2.5.2 高架点源扩散模式	26
1.2 大气污染及大气污染物	1	2.5.3 地面点源扩散模式	27
1.2.1 大气污染	1	2.5.4 线源扩散模式	27
1.2.2 大气污染物	2	2.5.5 面源扩散模式	28
1.2.3 大气污染的衡量方式	3	2.6 污染物浓度估算	29
1.3 大气污染源	4	2.6.1 烟流高度计算	29
1.4 大气污染类型和现状	5	2.6.2 扩散参数确定	30
1.4.1 大气污染的类型	5	习题	33
1.4.2 国内外大气污染状况	5	第 3 章 污染物动力学基础	35
1.5 大气污染的影响	6	3.1 颗粒的受力与运动	35
1.5.1 对人体健康的影响	7	3.1.1 颗粒在流体中的运动阻力	35
1.5.2 对植物的伤害	9	3.1.2 抛射运动	37
1.5.3 对器物 and 材料的伤害	9	3.1.3 重力沉降	39
1.5.4 对大气能见度的影响	9	3.1.4 惯性碰撞	42
1.5.5 全球性和区域性影响	10	3.1.5 离心力沉降	42
1.6 大气污染物的转化与归宿	13	3.2 颗粒的扩散	43
1.7 大气污染的控制	15	3.2.1 布朗运动与扩散	43
习题	15	3.2.2 紊流扩散	44
第 2 章 污染气象学原理与大气扩散	16	3.3 颗粒的凝并	44
2.1 大气层及气象要素	16	3.3.1 布朗运动与凝并	44
2.1.1 大气层结构	16	3.3.2 凝并速率与影响因素	45
2.1.2 气象要素	17	3.4 颗粒的电泳、热泳、光泳和扩散泳	46
2.2 大气热力过程与竖向运动	18	3.4.1 电泳	47
2.2.1 低层大气的加热和冷却	18	3.4.2 热泳	47
2.2.2 气温的绝热变化	18	3.4.3 光泳	48
2.2.3 大气竖向温度分布与静力稳定度	18	3.4.4 扩散泳	48
2.2.4 逆温	19	3.5 颗粒的附着与反弹	49
2.2.5 大气稳定性与烟流扩散	21	3.5.1 颗粒的附着与去除	49
2.3 大气的水平运动	21	3.5.2 颗粒的反弹	50
2.3.1 水平方向的作用力	21	3.6 分子扩散和反应	51
2.3.2 近地层风速轮廓线	22	3.6.1 自由空间分子扩散	51
2.4 局地气象特征	23	3.6.2 扩散-反应方程	52
2.4.1 城市气象特征	23	3.7 多孔固体中的扩散	54
2.4.2 山区气象特征	24	3.7.1 主体扩散	54
2.4.3 水陆交界处的影响	25	3.7.2 微孔扩散	54
2.5 大气扩散模式	25	3.7.3 表面扩散	55
		3.8 污染物的相转变	56

3.8.1	相界面上的气液平衡	56	6.2	颗粒物净化条件及装置类型	117
3.8.2	成核过程	57	6.2.1	颗粒物与载气分离的条件	117
3.8.3	蒸发过程	58	6.2.2	颗粒物分离方法和装置	118
习题		59	6.3	颗粒物捕集设备的性能	118
第4章 污染源的控制	60		6.3.1	效率	118
4.1	污染源及其控制思想	60	6.3.2	阻力	121
4.1.1	污染源的种类与特性	60	6.4	颗粒物的机械分离	122
4.1.2	污染排放量估算	61	6.4.1	重力沉降室	122
4.1.3	大气污染源控制的基本方法	62	6.4.2	惯性除尘器	124
4.2	燃烧过程的污染控制	63	6.4.3	旋风除尘器	126
4.2.1	燃料	64	6.5	静电沉积	134
4.2.2	燃烧过程和燃烧方式	66	6.5.1	静电沉积的原理	134
4.2.3	烟气体积及污染物排放量计算	68	6.5.2	电除尘器的类型和构造	144
4.2.4	不完全燃烧产物的发生和控制	72	6.5.3	电除尘器的设计计算和应用	148
4.2.5	氮氧化物的发生与控制	73	6.6	过滤	160
4.2.6	硫氧化物的发生与控制	78	6.6.1	过滤机理和滤层特性	160
4.2.7	飞灰的形成和控制	80	6.6.2	过滤设备的种类	163
4.2.8	汞的形成与排放	81	6.6.3	袋式除尘器	165
4.3	生产过程污染散发的控制	82	6.6.4	电袋除尘器	172
4.3.1	局部空气污染的控制方法	82	6.7	湿式除尘器	173
4.3.2	局部排气	82	6.7.1	湿式除尘的原理和特点	173
4.3.3	全面换气	90	6.7.2	湿式除尘器的类型和性能	175
习题		91	习题		182
第5章 大气质量管理	93		第7章 气态污染物控制技术	185	
5.1	空气环境质量的 influencing 因素及控制 路线	93	7.1	气态污染物净化的特点	185
5.2	空气质量管理体系	94	7.2	冷凝	186
5.3	空气质量管理法规标准体系	95	7.2.1	冷凝分离的原理	186
5.3.1	制定空气污染管理控制政策、法规 的原则方法	95	7.2.2	冷却方式和冷凝设备	187
5.3.2	我国的空气质量管理法规标准 体系	99	7.2.3	冷凝系统设计	188
5.4	大气环境规划	101	7.3	燃烧	188
5.4.1	大气环境规划的内容	101	7.3.1	燃烧的基本原理	188
5.4.2	大气环境规划的方法	102	7.3.2	燃烧装置	189
5.5	空气质量模型概述	104	7.3.3	热回收装置	190
5.6	区域及城市空气质量报告及预报	105	7.3.4	燃烧法净化大气污染物技术发 展趋势	191
5.6.1	空气质量报告	105	7.4	吸收法净化气态污染物	191
5.6.2	区域和城市空气质量预报和 预警	107	7.4.1	吸收过程的基本原理	192
第6章 颗粒污染物的净化	108		7.4.2	吸收速率	193
6.1	颗粒物的性质	108	7.4.3	吸收传质计算	198
6.1.1	颗粒物的主要性质	108	7.4.4	吸收剂和吸收设备	206
6.1.2	颗粒物的粒度	110	7.5	吸附	209
			7.5.1	吸附原理	209
			7.5.2	吸附传质计算	214
			7.5.3	吸附剂和吸附设备	220

7.5.4 吸附器设计计算	227	9.3.2 气态污染物净化设备的选型	319
7.6 催化转化	231	9.4 排气筒设计	321
7.6.1 催化反应原理	232	9.4.1 排气筒高度的计算	321
7.6.2 催化剂和反应器	237	9.4.2 提高排气扩散效果的措施	324
7.6.3 气固催化反应器设计计算	241	9.5 管道设计	324
7.7 气体生物净化	247	9.5.1 管道的材料和构造	324
7.7.1 气体生物净化原理	247	9.5.2 管道系统的安排	324
7.7.2 气体生物净化理论基础	249	9.5.3 防爆、保温、防腐蚀和防磨损 措施	326
7.7.3 气体生物净化过程因素分析	252	9.6 管道计算和风机选用	328
7.7.4 生物净化应用	256	9.6.1 管内气体流动和压强分布	328
7.8 气态污染物控制新技术	257	9.6.2 管道计算	328
7.8.1 常温氧化技术	258	9.6.3 风机选用	334
7.8.2 膜分离技术	261	9.7 净化系统的施工安装和运转管理	343
7.8.3 等离子净化技术	264	9.7.1 施工安装	343
习题	267	9.7.2 运转管理	343
第8章 主要大气污染物净化工艺	270	习题	345
8.1 烟气脱硫脱硝技术	270	第10章 室内空气污染控制	346
8.1.1 烟气脱硫	270	10.1 室内空气污染与室内空气品质	346
8.1.2 烟气脱硝	284	10.1.1 室内空气污染及特征	346
8.1.3 烟气污染物协同脱除技术概要	287	10.1.2 室内空气品质	347
8.2 城市垃圾焚烧烟气净化	287	10.2 室内空气污染物及污染来源	347
8.2.1 城市垃圾焚烧尾气特性	287	10.2.1 室内空气污染物	347
8.2.2 生活垃圾焚烧烟气的控制技术	290	10.2.2 室内空气污染物的主要来源	348
8.3 气态挥发性有机物控制	293	10.3 室内空气污染及控制历程概况	349
8.3.1 气态挥发性有机化合物 (VOCs) 污染概述	293	10.4 常见室内空气污染物的性质和影响	350
8.3.2 气态 VOCs 的净化方法概要	294	10.4.1 甲醛	350
8.4 机动车污染控制	298	10.4.2 氢及其子体	351
8.4.1 机动车污染的来源	299	10.4.3 VOCs	352
8.4.2 机动车排放标准	300	10.4.4 氨	354
8.4.3 机动车排气污染控制	301	10.5 通风与室内空气质量	355
习题	309	10.5.1 室内空气质量与室外空气质量的 关系	355
第9章 废气净化系统的设计、施工和 运转	312	10.5.2 通风换气作用	356
9.1 净化系统设计的基本程序	312	10.5.3 通风换气中的一些基本概念	357
9.1.1 基础调查	312	10.6 室内空气污染源的控制	357
9.1.2 技术设计	313	10.7 室内空气污染净化控制技术概要	358
9.1.3 成果表达	314	综合思考题	360
9.1.4 后期工作	314	附录	361
9.2 净化过程的预处理和后处理	314	附录1 空气的重要物性	361
9.2.1 废气的预处理	314	附录2 空气的物理参数 (101325Pa)	362
9.2.2 污染物的后处理	316	附录3 《环境空气质量标准》规定的各项污 染物的浓度限值 (摘自 GB 3095— 2012)	364
9.3 净化设备选型	317		
9.3.1 微粒污染物净化设备的选型	317		

附录 4	排气柜工作口气速	364	附录 8	圆断面风管统一规格	366
附录 5	镀槽表面控制风速	365	附录 9	局部阻力系数	367
附录 6	各种粉尘的爆炸浓度下限	365	附录 10	常用风机的性能范围	369
附录 7	几种可燃气体或蒸气的特性	366	参考文献		371

第 1 章 概 述

本章提要

了解大气的组成、掌握大气污染与主要大气污染物的分类，了解大气污染的来源、了解大气污染的影响（包括局地 and 全球）与大气污染物的转化与归宿，建立大气污染综合控制的概念。

重点是掌握、理解与大气污染及大气污染物有关的一些基本概念。

1.1 大气及洁净大气的组成

地球的周围包裹着一层由空气构成的大气层。大气是自然界中最宝贵的资源。每个人每时每刻都要呼吸空气。一个成年人 24h 内大约需要 $12\sim 15\text{m}^3$ 的空气，相当于一天的食物量的 10 倍，饮水量的 6 倍。资料表明，一个人 5 周不吃食物，5 天不喝水仍可维持生命，而 5 分钟不呼吸空气，将会导致生命的终结。空气，特别是洁净的空气，对于动植物的生长和人类的生存起着十分关键的作用。

通常所指的空气是一种混合体，其构成成分包括干燥清洁的空气、水汽和悬浮颗粒。在人类活动的范围内，干洁空气的组成和物理性质基本相同，空气中主要含有 78.09% 的氮气，20.95% 的氧气及 0.93% 的氩气和一定量的 CO_2 ，它们的含量占全部干洁空气的 99.996%（体积分数），氦、氖、甲烷等次要成分只占 0.004% 左右。干洁大气的平均相对分子质量为 28.996，在标准状态下（273.15K，1atm）的密度为 $1.293\text{kg}/\text{m}^3$ ，可近似看作理想气体。大气含水量随时间、地点、气象条件等不同而有较大变化，变化范围可达 0.02%~6%。大气中水分对气象、气候的影响很大。大气中水分导致的云、雾、雨、雪、霜、露等天气现象不仅引起大气中湿度的变化，而且还引起热量的转化。同时水汽所具有的很强的吸收长波辐射能力对地面的保温起着重要作用。悬浮微粒主要是大气尘埃和悬浮在大气中的其他物质及水汽变成的水滴、冰晶。悬浮微粒对大气中的各种物理现象和过程有着重要的影响，如削弱太阳辐射、在大气中形成各种光学现象、影响大气能见度等。

由于大气具有全球流动的特点，加上动、植物代谢等的气体循环作用，所以大气的基本组成成分是稳定和均匀的。

1.2 大气污染及大气污染物

1.2.1 大气污染

大气污染系指由于人类活动或自然过程引起的某些物质进入大气中，呈现出足够的浓度、持续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。自然过程包括火山活动、森林火灾、岩石和土壤风化、动植物尸体的腐烂等，自然过程的污染往往不会超过自然的承受容量。目前我们所关注的大气污染问题主要是由人类活动所造成的。

大气污染影响着我们全部的现代生活，它来自生产、运输过程以及为人们的生产、生活、娱乐等提供能量的能源使用过程。其中各类燃烧产能过程是造成大气污染的最主要的原因。

大气具有良好流动性和相当大的稀释容量，因此与受到边界条件约束的水体和固体污染相比，其污染特性也就表现出局地的严重性、区域性和全球性的特点。

局地的严重性是指早期大气污染严重的区域往往出现在污染源附近，污染的急性效应往往随扩散距离而迅速衰减，同时局地的污染状况与地形、地理位置、气象条件等密切相关。

大气污染的区域性和全球性体现在大气无国界，对于那些在大气中具有较长停留时间的污染物或在大气中二次反应生成的污染物可扩散传播到数千千米尺度的范围甚至全球各地，其中在迁移转化过程中产生出的影响全球气候、生态系统等的慢性效应，包括全球气候模式变化、臭氧层破坏和酸雨三大问题。

1.2.2 大气污染物

大气污染物是指由于人类的活动或是自然过程所直接排入大气或在大气中新转化生成的对人或环境产生有害影响的物质。

迄今为止，人们从环境大气中已识别出的人为大气污染物超过 2800 种，其中 90% 以上为有机化合物（包括金属有机物），而不到 10% 为无机污染物。燃料燃烧污染源，尤其是机动车，排放出大约 500 种组分的污染物。然而，目前人们仅对很少的已知种类大气污染物进行了测定，并且也只有大约 200 种污染物的健康和生态效应数据。

影响健康的主要大气污染物是悬浮颗粒物（烟雾、灰尘、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{1.0}$ ）、二氧化硫（及进一步氧化产物三氧化硫、硫酸盐）、氮氧化物、一氧化碳、挥发性有机化合物（碳氢化合物和氧化物）、臭氧、铅和其他有毒金属。目前在我国很多地区频发的雾霾现象就是由区域大气中积聚或二次生成的细微颗粒物所造成的。

污染物按存在的形态可分为两大类：颗粒态污染物和气体状态污染物。

颗粒态污染物指分散在气体相中的固态或液态微粒，其与载气构成非均相体系。按来源和物理性质可将其分为以下几种。

(1) 粉尘 (dust) 固体颗粒，能重力沉降，但可以在某段时间内保持悬浮，由物理破碎、风化等形成。粒子范围在 $1\sim 200\mu m$ 。

(2) 烟 (fume) 指冶金过程形成的固体离子气溶胶，为熔融物质挥发后的冷凝物，往往为氧化产物。烟的粒子尺寸很小，一般为 $0.01\sim 1\mu m$ 。

(3) 飞灰 (fly ash) 系指随燃烧过程产生的烟气飞出的分散得较细的灰分。

(4) 黑烟 (smoke) 黑烟一般系指由燃料燃烧过程产生的可见气溶胶，我国将冶金和化学过程形成的固体粒子气溶胶称为烟尘，燃烧过程的飞灰和黑烟也称为烟尘，而其他情况或泛指小固体粒子时则统称粉尘。

(5) 雾 (fog) 是气体中液体悬浮物的总称。

(6) 烟雾 (smog) 是固液混合态气溶胶。当烟和雾同时形成时就构成了烟雾。Smog 一词本身就是由 smoke 和 fog 两个词复合而成的。

通常在大气质量管理和控制中，还根据大气中粉尘（或烟尘）颗粒的大小将其分为总悬浮颗粒 (TSP)、降尘、飘尘和微细颗粒物。总悬浮颗粒系指大气中空气动力学直径小于 $100\mu m$ 的所有颗粒物。降尘是大气中空气动力学直径大于 $10\mu m$ 的固体颗粒。飘尘又称为可吸入尘、 PM_{10} ，是指空气中空气动力学直径小于 $10\mu m$ 的固体颗粒。微细颗粒物，亦即

PM_{2.5}，是指空气中空气动力学直径小于 2.5μm 的固体颗粒。就颗粒物的危害而言，小颗粒较大颗粒的危害要大得多。

气态污染物指在大气中以分子状态存在的污染物，与载气构成均相体系。气态污染物的种类很多，常见的有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、碳氧化物、碳氢化合物及卤素化合物和臭氧等。

污染物按形成过程又可分为一次污染物和二次污染物。

一次污染物是指由污染源直接排入环境大气中且在大气中物理和化学性质均未发生变化的污染物，又称为原发性污染物，如 SO₂、CO、NO 和 VOCs 等。

二次污染物是指由一次污染物与大气中已有成分或几种污染物之间经过一系列的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，又称为继发性污染物。如一次污染物 SO₂ 在环境中氧化生成的硫酸盐气溶胶，氮氧化物、碳氢化合物等在日光紫外线辐射下生成的臭氧、过氧化乙酰硝酸酯、醛等，以及各类污染物在大气中转化形成的二次颗粒物等。通常二次污染物对环境和人体的危害比一次污染物严重得多。

目前颗粒污染物中的 PM₁₀ 或 PM_{2.5}、硫氧化物中的 SO₂、氮氧化物中的 NO₂ 及 CO、铅和臭氧等被划分为标准污染物，世界各国都对其制定了相应的大气质量标准。世界卫生组织（WHO）2006 年提出 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、Pb、CO 和 O₃ 的全球大气质量指导值。我国 2012 年修订的空气质量标准中共提出了 10 种物质的空气质量标准，增加了 PM_{2.5} 指标。美国的国家环境空气质量标准中对 6 种污染物制定了标准。

几种主要大气污染物的空气本底浓度和典型污染空气中的浓度情况如表 1.1 所示。

表 1.1 本底空气和典型污染空气中污染物情况对比

污染组分	本底空气	典型污染空气
颗粒物	10~20μg/m ³	260~3200μg/m ³
SO ₂	(0.001~0.01)×10 ⁻⁶ (体积比)	(0.02~3.2)×10 ⁻⁶ (体积比)
CO ₂	(300~330)×10 ⁻⁶ (体积比)	(350~700)×10 ⁻⁶ (体积比)
CO	1×10 ⁻⁶ (体积比)	(2~300)×10 ⁻⁶ (体积比)
NO _x	(0.001~0.01)×10 ⁻⁶ (体积比)	(0.3~3.5)×10 ⁻⁶ (体积比)
总碳氢化合物	1×10 ⁻⁶ (体积比)	(1~20)×10 ⁻⁶ (体积比)
总氧化剂	0.01×10 ⁻⁶ (体积比)	(0.01~1.0)×10 ⁻⁶ (体积比)

1.2.3 大气污染的衡量方式

大气污染的程度目前大多数还是以浓度及其相应的指数形式来表示的，并通过暴露时间与浓度的累积形式-剂量的方式来评估污染受体的受害程度。本节主要讨论一下大气污染物浓度的表达形式。

大气污染物浓度可用单位量的大气中所含污染物的量来表示。对于气溶胶颗粒物通常采用单位体积大气中颗粒物的质量表示，由于大气体积受温度、压力的影响很大，为便于相互比较，往往采用标准状态下的大气体积，即浓度单位为 mg/m³（标准状态），有时也采用 μg/m³（标准状态）。在某些情况下，尤其是对于空气洁净工程还采用单位体积空气内颗粒物的个数来表示。对于气态污染物通常也采用 mg/m³（标准状态）来表示，但还有一种常用的单位，即 10⁻⁶（体积比）。10⁻⁶（体积比）无量纲，其物理含义为百万分之一，对于气体污染物可表示为：

$$10^{-6}(\text{体积比}) = \frac{1 \text{ 体积气体污染物}}{10^6 \text{ 体积含污染物空气}} \tag{1.1}$$

对于 0℃，一个大气压（101.325kPa）（标准状态），mg/m³（标准状态）与 10⁻⁶（体积比）的关系式为：

$$\text{mg/m}^3(\text{标准状态}) = \frac{10^{-6}(\text{体积比}) \times \text{污染物相对分子质量}}{22.4}$$

(1.2)

注意：日本、美国等国采用 25℃、一个大气压（101.325kPa）为标准状态，此时式(1.2)中理想气体的摩尔体积为 24.5L/mol。例如，我国大气质量标准（GB 3095）中二类地区的 SO₂ 和 NO₂ 的日平均浓度标准限值分别是 0.15mg/m³（标准状态）和 0.12mg/m³（标准状态），按式(1.2)折算后得到的相应浓度为 SO₂ 0.053×10⁻⁶（体积比），NO₂ 0.058×10⁻⁶（体积比）。SO₂ 和 NO₂ 的年平均浓度标准限值分别是 0.06mg/m³（标准状态）和 0.08mg/m³（标准状态），按式(1.2)折算后得到的相应浓度为 SO₂ 0.021×10⁻⁶（体积比），NO₂ 0.039×10⁻⁶（体积比）。

采用 10⁻⁶（体积比）（即 ppm）的优点是可直接进行数据比较，而无须考虑载气的状态。ppm 在我国已为法定废除单位，但在美国等国家仍在使用的。

1.3 大气污染源

大气污染的来源可分为天然污染源和人为污染源两类。天然污染源是指因自然原因向环境释放污染物的污染源，如火山爆发、森林火灾、飓风、海啸、土壤和岩石的风化及生物腐烂等。人为污染源是指人类活动形成的污染源。

尽管大气污染源有人为和天然之分，但对大气污染而言，绝大多数是由于人为造成的。表 1.2 为主要大气污染物和人为来源的简要情况。

表 1.2 主要大气污染物和人为来源

污染物	人为来源
二氧化硫	以煤和石油为燃料的火力发电厂、工业锅炉、垃圾焚烧炉、生活取暖、柴油发动机、金属冶炼厂、造纸厂等
颗粒物(灰尘、烟雾、PM ₁₀ 、PM _{2.5})	以煤和石油为燃料的火力发电厂、工业锅炉、垃圾焚烧炉、生活取暖、餐饮烹调、各类工厂、柴油发动机、建筑、采矿、水泥厂、裸露地面等
氮氧化物	以煤和石油为燃料的火力发电厂、工业锅炉、垃圾焚烧炉、机动车、氮肥厂等
一氧化碳	机动车、燃料燃烧
挥发性有机化合物(VOCs),如苯	机动车、加油站泄漏气体、油漆涂装、石油化工、干洗等
有毒微量有机物(如多环芳烃、多氯联苯、二噁英等)	垃圾焚烧炉、焦炭生产、燃煤、机动车
有毒金属(如铅、镉)	机动车尾气(含铅汽油)、金属加工、垃圾焚烧炉、石油和煤燃烧、电池厂、水泥厂和化肥厂
有毒化学品(如氯气、氨气、氟化物)	化工厂、金属加工、化肥厂
温室气体(如二氧化碳、甲烷)	二氧化碳:燃料燃烧,尤其是燃煤发电厂 甲烷:采煤、气体泄漏、废渣填埋场
臭氧	挥发性有机化合物和氮氧化物形成的二次污染物
电离辐射(放射性核物质)	核反应堆、核废料储藏库
气味	污水处理厂、污水泵站、垃圾填埋场、化工厂、石油精炼厂、食品加工厂、油漆制造、制砖、塑料生产

从表 1.2 中可知，人为的大气污染源种类繁多。根据对主要大气污染物的分类统计，大气污染源可大致划分为燃料燃烧、工业生产和交通运输三类，通常前两类统称为固定源，交通运输类

则称为移动源。另外，还有一类越来越得到关注的大气污染源就是散发源（主要为扬尘）。

目前各个国家的政府网站均有主要大气污染物排放量的数据。

1.4 大气污染类型和现状

大气污染的主要来源是能源和交通。对发达国家而言，由于主要采用了洁净的天然气和较为洁净的其他燃料，固定源的污染所占的份额相对较低，交通所造成的污染比重较大。而我国由于燃料结构的原因，目前阶段而言，大气污染的主要问题仍然还是集中在燃煤过程的能量生产上，但近年来随着机动车保有量的剧增，柴油车和汽油车等交通污染问题也越来越突出。各类生产生活过程的有毒有害污染物问题也越来越受到关注。有关世界能源的情况可参见英国石油公司每年出版的世界能源报告等资料。

1.4.1 大气污染的类型

大气污染的类型可分为煤烟型污染、石油型污染和混合型污染三种。

煤烟型污染的主要原因是燃煤。由于燃煤烟气中含较高浓度的 SO_2 、 CO 和颗粒物，遇上低温、高湿度的阴天，在风速很小并伴有逆温存在时，这些污染物扩散受阻，易在低空聚积， SO_2 能被雾滴和微粒中的各种金属杂质转变生成硫酸盐和硫酸气溶胶烟雾。1952 年冬季的伦敦烟雾事件便是这种类型，所以又称伦敦烟雾型。它能引起呼吸道和心肺疾病。

石油型污染物的主要来源是汽车尾气和燃油锅炉的排气。由于采用石油作燃料，排气中的主要污染物是氮氧化物和碳氢化合物。它们受阳光中的紫外线辐射而发生光化学反应，生成二次污染物，如臭氧、醛类、过氧化乙酰硝酸酯、过氧化氢等物质。它能使橡胶制品开裂，对人的眼部有强烈刺激作用，并能引起呼吸系统疾病。这种烟雾首次出现于美国洛杉矶，所以又称洛杉矶烟雾。

混合型污染是指煤炭和石油燃烧产生的污染物与从工矿企业排放出的各种化学物质，互相结合在一起所造成的大气污染。早期的如 1948 年美国宾夕法尼亚州发生的多诺拉污染事件和 1961 年日本四日市发生的哮喘事件，都属于混合型污染。有人认为这些地区高浓度的 SO_2 及其氧化产物和 NO_x 与金属粉尘、金属氧化物反应生成的硫酸盐、硝酸盐，它们与大气中的尘埃结合在一起是造成危害的主要原因。而近年来我国中东部区域的灰霾现象呈现出区域性复合污染的特征。

1.4.2 国内外大气污染状况

(1) 国外大气污染概况 国外发达国家在其工业化的进程中都不同程度地产生了大气污染。20 世纪 50 年代前，由于主要还是采用煤为能源，所以主要是以烟尘和 SO_2 为主的煤烟型污染。其后，随着石油在能源中比重的剧增和机动车的发展，发展成为石油型污染。由于严重的环境污染、经济发展到了一定的水平及环境对经济发展的制约作用等因素的综合作用，各国政府开始重视大气污染的控制工作。自 20 世纪 70 年代以来，通过大量的人力、物力和财力的投入，通过立法等管理手段和污染控制技术进步两方面的作用，污染控制工作取得了显著的成效，环境质量得到明显的改善。各发达国家在工业、经济增长的情况下，大气污染物的浓度却不断下降。

第二次世界大战后的欧洲经济恢复期间，大量的污染物排放到大气中后形成了严重的污染。如德国的法兰克福 1965 年左右 SO_2 年均浓度也高达 $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ （标准状态），自 20 世

纪70年代采取产业结构调整、燃料替代、烟气脱硫、绿化等措施后, SO_2 的浓度逐渐下降, 20世纪80年代时降到 $0.075\text{mg}/\text{m}^3$ (标准状态), 20世纪90年代时降到 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$ (标准状态), 目前在 $0.01\sim 0.02\text{mg}/\text{m}^3$ (标准状态)。但由于燃油和交通等因素, 法兰克福大气中的 NO_x 年均浓度较1965年前后有所上升。

在美国, 尽管出现了洛杉矶烟雾事件, 部分城市如匹兹堡和圣路易斯的大气质量也很糟糕, 联邦政府也于1956年就推出了首部空气污染控制法, 但城市大气污染这个词在1968年前对大多数的美国人来说还相当陌生。到了1969年, 美国人的环境意识开始迅速提高, 1970年颁布的《洁净空气法》有力地推动了全美范围的空气污染控制活动。从20世纪70年代初开始, 美国制定了一系列的法律控制大气污染, 各州还根据自身的情况制定了地方法规, 如加州的机动车污染控制措施是全球最严格的, 这些都对大气质量的改善做出了贡献。1990年的《洁净空气法》修正案在原有只考虑局地大气污染问题的基础上, 开始增加有关酸雨、臭氧耗竭等区域性、全球性问题的内容。就污染源排放控制而言, 2012年与1970年相比, 美国在人口增长53%, GDP增长2.19倍及公路行驶总里程增加1.69倍的情况下, 六种主要污染物的排放量却下降了72%。目前大多数的美国城市的空气质量比较好, 但一些地区由于地形和气象因素等的原因, 空气质量仍不能满足美国的环境空气质量要求。

第二次世界大战后, 日本在工业和经济被全面摧毁的情况下, 采取了各种措施以保证经济快速增长, 但是没有考虑环境后果。在20世纪60年代和70年代初发生了一系列的水污染和大气污染灾难之后, 日本政府终于在70年代中期承认需要治理污染。当时东京的大气污染问题严重到会出现学生们在操场上晕倒的现象, 很多人行道上不得不安装投币式吸氧机。很快, 污染被视为“社会犯罪”。通过采取严格执行改燃煤为燃低硫油的能源替代政策, 工业装置上广泛安装污染控制设备、建成高效电气化铁路和地铁网、减少汽油中的铅含量并于1975年开始使用无铅汽油等政策措施, 东京的大气质量得到明显改善。在这个有2000万人的城市里, 二氧化硫、悬浮颗粒物和大气中铅含量明显下降。现在主要的大气质量问题是由于机动车辆, 特别是柴油卡车的大量增加造成的高浓度二氧化氮和臭氧问题。

总的来说, 发达国家在过去的三十年中, 已经较有效地控制了煤烟型的污染, 并在部分程度上控制了石油型污染的发展, 加上其他的措施, 其大气质量已得到了很大的提高。但近年来随着煤炭在一次能源中比例的回升, 烟尘和 SO_2 的控制问题又重新引起各国的注意。酸沉积已成为地区性的污染问题。而伴随机动车产生的 NO_x 、HC 和光化学臭氧的污染仍然困扰着一些发达国家的城市。

(2) 国内大气污染概况 经历了30多年的快速经济增长, 我国已成为全球最大的产品制造基地, 同时也付出了巨大的环境代价, 近来我国中东部广大地区饱受雾霾之扰, 控制大气污染已成为全体中国人民共同关注的焦点。国家环保部网站每年的环境状况公报对大气状况予以公告, 同时网上实时显示主要城市地区的实时空气质量情况。

1.5 大气污染的影响

大气污染影响范围广, 情况复杂。大气污染的主要危害有: 污染的大气直接产生危害; 大气中的污染物通过干沉降、湿沉降或水面和地面吸收, 进而污染土壤和水体, 产生间接危害; 大气中的污染物还会影响地表能量的得失, 改变能量平衡关系, 影响气候, 也能产生间接危害, 见图1.1。

1.5.1 对人体健康的影响

大气污染通过三种途径对人体健康产生影响，即表面接触、食入含污染物的食物和水、吸入被污染的空气，其中第三种途径的影响贡献最大。

很早以前，人们就认识到撇开数量概念来谈论某一物质是否有害是毫无意义的。物质的剂量决定其是否产生毒害作用，对大气污染也是如此。为了更好地叙述大气污染对人的毒害作用，我们需考虑的是人所接受的剂量，即：

$$\text{剂量} = \int \text{吸入空气浓度} \times \text{时间} \quad (1.3)$$

目前所关注的大气污染危害主要集中在长期低浓度的暴露（产生慢性的反应）。短期、高浓度的暴露（产生急性效应）只在工业事故类的大气污染事件期间才会出现。早期出现过的一些工业污染事件目前已很少发生。

为了确定什么剂量是有害的，就需要建立一条剂量-危害响应曲线。而这类曲线只能是针对某一种污染物而获得，通常无法做出某一类大气污染的剂量-危害响应曲线（无法考虑协同反应，如硫氧化物就存在协同效应）。

污染物的剂量-危害曲线有两种类型。一类为无阈值曲线，另一类为有阈值曲线。无阈值曲线的剂量情况可采用式(1.3)计算。而所谓有阈值曲线考虑的是人体对某些毒物具有一定的自我清除能力或某一浓度下污染物产生的毒害作用难以觉察，可以忽略。此时式(1.3)可变成：

$$\text{有害剂量} = \int [\text{呼吸速率} - \text{人体排毒去除速率}] \times \text{时间} \quad (1.4)$$

建立剂量-危害曲线的可能途径有三种：动物实验、实验室内的人体志愿实验和人群流行病学统计研究。

总的来说，动物和人体实验主要可以用来研究大气污染危害发生的机理，而只有通过细致全面的人群流行病学研究才能最终确定污染-健康的响应因子。

空气污染的流行病学研究方法包括对死亡率和住院率与所测量的空气污染浓度的关系的研究。这方面的工作可以从调查历史记录（回顾研究）或选择一类或更多类的人群跟踪其健康和寿命及所暴露的空气污染物质浓度的情况（展望研究）来进行。

美国 EPA 曾选择 36 个城市进行了死亡率与细微颗粒物浓度关系的 14 年的展望研究。研究的结果表明，在对吸烟和空气中其他一些因素进行修正以后，得到的死亡率与空气细微颗粒物浓度的关系基本上为线性，并且不存在阈值。研究的结果反映的是较低浓度水平下的情况，所得到的研究结果成为美国在 1997 年修改颗粒物标准的重要数据之一。

空气污染物对人体的主要影响包括：中毒、致癌、致畸、刺激眼睛及呼吸道；增加了人体对病毒感染的敏感性而易于患上肺炎、支气管炎，同时会加重心血管疾病等。许多情况下空气污染物还具有协同效应，如二氧化硫的危害会因颗粒物的存在而成倍增加。城市地区的呼吸道疾病很大程度上是空气污染的结果之一。

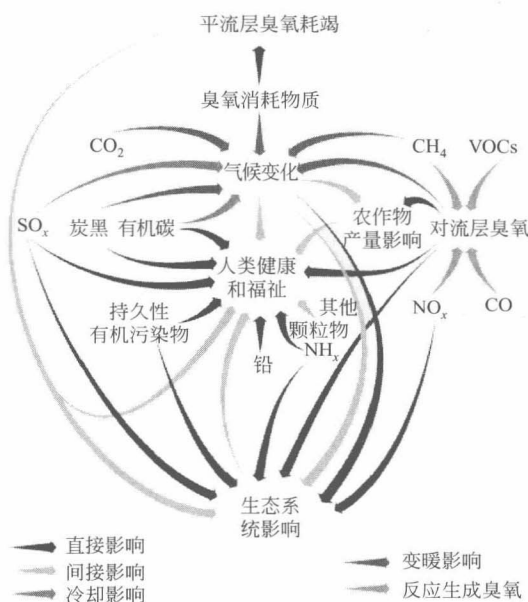


图 1.1 大气污染物的影响及其相互关系

一些主要空气污染物的危害概述如下。

(1) 颗粒物 空气中的颗粒物是由有机物和无机物构成的复杂混合物，包括天然海盐、土壤颗粒以及燃烧生成的烟尘，空气中二次转化生成的硫酸盐、硝酸盐等。人们越来越认识到，是细颗粒物 $PM_{2.5}$ 而不是总悬浮颗粒物 (TSP) 导致了城区人口患病率和死亡率的增加。 $PM_{2.5}$ 的浓度即使相对较低也能引起肺功能的改变，导致心血管和呼吸系统疾病（哮喘）增加。原因在于细颗粒物空气动力学直径较小，可以一直进入到人体的下呼吸道和肺泡，并直接与血液接触；令人十分不安的是细颗粒物可能没有一个安全浓度阈值。到达肺泡的细颗粒物一般不可能被无害地排出，更多的情况是被吸收进入血液对人体形成危害；或者如果细颗粒物不溶解，吸入的数量又很大，这些颗粒物可能存留于肺中，引起肺病（如肺气肿）。空气中的细颗粒物可能含有经过再次凝结的有机物或金属蒸气，使得其毒性更明显。柴油发动机排放的黑色油质细颗粒物（如煤烟或碳颗粒）中含多环芳烃类的复杂有机化合物。对动物的实验研究表明，多环芳烃具有致癌性。多环芳烃是由两个或两个以上的苯环组成的有机化合物，其中苯并[a]芘是致癌性最强的物质之一。

(2) 硫氧化物 二氧化硫对人体的呼吸器官有较强的毒害作用，造成鼻炎、支气管炎、哮喘、肺气肿、肺癌等。此外，二氧化硫还通过皮肤经毛孔侵入人体，或通过食物和饮水经消化道进入人体而造成危害。但硫氧化物中对人体影响最大的为硫酸和硫酸盐的危害，动物实验表明，硫酸烟雾引起的生理反应要比单一的 SO_2 气体强 4~20 倍。

(3) 一氧化碳 一氧化碳是一种影响全身的毒物，它之所以能影响健康是因为它妨碍血红蛋白吸收氧气，恶化心血管疾病，影响神经并导致心绞痛。通过呼吸摄入的一氧化碳会进入血液。人体血液中血红蛋白的正常功能之一是把氧气输送到身体的各个组织，但血红蛋白与一氧化碳的亲合力很强，会形成碳氧血红蛋白，占据了结合氧的位置。一氧化碳与血红蛋白的亲合力是氧与血红蛋白亲和力的 200~240 倍。因此，吸入一氧化碳的后果是降低血液的输氧能力，并可能使脑和其他组织缺氧。

(4) 氮氧化物 造成空气污染的 NO_x 主要是 NO 和 NO_2 ，其中 NO_2 的毒性要比 NO 大 5 倍。另外，若 NO_2 参与了光化学作用而形成光化学烟雾，其毒性更大。接触较高水平的二氧化氮会危及人体的健康。 NO_2 的危害性与暴露接触的程度有关，据资料报道，若在含 NO_2 为 $(50\sim100)\times10^{-6}$ （体积比）的气氛中暴露几分钟到 1h，有可能导致肺炎。二氧化氮的急性接触可引起呼吸系统疾病（如咳嗽和咽喉痛），如果再加上二氧化硫的影响则可加重支气管炎、哮喘病和肺气肿。这对幼童和哮喘病患者格外有害。实验室研究显示， $765\mu g/m^3$ 的二氧化氮浓度（城市地区有时会达到这一浓度）可以增加人对传染病的敏感度。

NO 的活性和毒性都不及 NO_2 。与 CO 和 NO_2 一样， NO 也能与血红蛋白作用，降低血液的输氧功能。然而，在大气污染物中， NO 的浓度远不如 CO ，因此，它对人体血红蛋白的危害是有限的。

(5) 光化学氧化剂 臭氧、过氧乙酰硝酸酯 (PAN)、过氧苯酰硝酸酯 (PBN) 等氧化剂及醛等其他能使碘化钾的碘离子氧化的痕量物质，称为光化学氧化剂。空气中的光化学氧化剂主要是臭氧和 PAN。光化学氧化剂（主要是 PAN 和 PBN）对眼睛有很强的刺激性，当它们和臭氧混合在一起时，会刺激鼻腔、喉，引起胸腔收缩，接触时间过长还会损害中枢神经。臭氧还会引起溶血反应、使骨骼早期钙化等。长期吸入光化学烟雾会影响体内细胞的新陈代谢，加速人体的衰老。

(6) 有机化合物 某些挥发性有机化合物会刺激眼睛和皮肤，引起困倦、咳嗽和打喷嚏