

大气污染物理学基础

DAQI WURAN WULIXUE JICHU

● 朱岗崑 编著

高等教育出版社

923257

X51
2522

X51
2522

大气污染 物理学基础

朱岗崑 编著

高等教育出版社

内 容 提 要

本书全面地论述了大气污染物理学基础,共分十七章。首先介绍大气污染物来源及其效应、大气层结构和近地面层物理状况;进而叙述了大气扩散的理论、烟柱和烟云的行为,以及高斯烟柱模型和实际应用,对于大气的品质模型、大气的清除过程和气溶胶物理亦清楚扼要的作了介绍,对当代关注的环境问题,包括酸雨、二氧化碳和臭氧,均分章予以论述,对大气放射性污染的来源和有关的核污染事件,根据最近的研究作了报导。此外,本书还介绍了室内空气污染、污染物质的测量和大气污染控制等内容。

本书可作为大专院校环境科学、环境工程、大气物理、气象、地理和核物理、核工程等专业,以及环保部门的专业基础或专业知识的必修或选修课程的教材;对于这些专业的教师、研究生和有关科研、生产部门的技术工程人员也有参考价值。

大气污染物理学基础

朱岗崑 编著

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张10.625 字数260 000

1990年9月第1版 1990年9月 第1次印刷

印数 00001—0 790

ISBN 7-04-003137-X/Q·167

定价 3.50 元

目 录

第一章 大气污染物质、来源及其效应	1
§ 1.1 大气污染系统与控制	1
一、大气污染系统	1
二、大气污染的控制	2
§ 1.2 大气污染物质的分类	2
§ 1.3 大气污染浓度单位	4
§ 1.4 大气中的颗粒物质	5
§ 1.5 大气污染的效应	7
一、大气污染效应的表现形式	7
二、气溶胶在呼吸道中的沉积	8
§ 1.6 大气污染浓度水平	10
一、“清洁”对流层大气与城市污染大气的比较	10
二、污染标准指数(PSI)	12
§ 1.7 大气污染文献和情报	12
参考文献	13
第二章 大气层结构和近地面层物理	15
§ 2.1 地球大气层的结构	15
§ 2.2 近地面边界层和行星边界层	17
§ 2.3 大气流体力学的基本方程	19
一、静止大气	21
二、运动大气	22
三、地转风层	25
§ 2.4 大气湍流的统计描述	27
§ 2.5 平均物理量的方程	31
§ 2.6 湍流传输的混合长度模型	32
§ 2.7 大气层中风随高度的变化	35
一、绝热条件下近地面层中的平均风速	36
二、近地面层的温度效应或浮力的影响	39

三、非绝热条件下近地面层中的风速分布	44
四、测定摩擦速度(u_*)和平均风速经验公式	47
§ 2.8 大气稳定度和 Pasquill 稳定度级别分类	49
§ 2.9 对流边界层及其高度估计	53
参考文献	54
第三章 大气扩散理论概要	56
§ 3.1 湍流扩散的一般概述	56
一、欧拉途径	56
二、拉格朗日途径	57
三、两途径的比较	59
§ 3.2 湍流中平均浓度的控制方程	59
一、欧拉途径	59
二、拉格朗日途径	62
三、二者的比较	64
§ 3.3 大气扩散理论的简要总结	67
一、K 理论	68
二、统计理论	73
三、拉格朗日相似理论	78
参考文献	79
第四章 烟柱和烟云的行为	82
§ 4.1 瞬时源和连续源	82
§ 4.2 连续烟柱的类型	84
§ 4.3 真实烟柱的一些特点	86
一、烟柱上升“顶帽”模式	86
二、源区附近的烟柱轨迹	90
三、环境稳定度对烟柱上升的影响	91
四、烟柱上升取决于环境湍流	92
§ 4.4 源区附近障碍物的影响	94
§ 4.5 关于烟云扩散	96
一、统计途径	97
二、相似性途径	97
参考文献	99

第五章 高斯烟柱模型和实际应用	101
§ 5.1 高斯模型的广泛性	101
§ 5.2 高斯浓度分布	101
§ 5.3 另一解法	103
§ 5.4 高斯点源扩散公式总表	105
§ 5.5 高斯模型中扩散参数的确定	105
一、稳定度级别法	108
二、风向 σ_x 与 σ_y 或相似理论法	111
§ 5.6 高斯烟柱方程中其他参数的确定	113
§ 5.7 高斯烟柱方程的其他性质	117
参考文献	119
第六章 大气扩散方程和大气品质模型	121
§ 6.1 平均风速和涡旋扩散率函数的选定	121
一、平均风速	121
二、垂直涡旋扩散系数(K_{zz})	122
三、水平涡旋扩散系数(K_{xx} 和 K_{yy})	124
§ 6.2 常定大气扩散方程的解	125
一、连续点源的扩散	125
二、连续线源的扩散	126
§ 6.3 大气品质模型	127
§ 6.4 大气扩散方程的数值解法	130
一、有限差分法或格点法	130
二、有限元法	131
三、裂解法	131
四、用于特定算子的技术	132
五、总结	133
§ 6.5 城市大气扩散模型	134
§ 6.6 复杂地形的扩散计算	137
§ 6.7 水面上和沿海岸的扩散	139
§ 6.8 冷、重毒气的扩散	141
§ 6.9 关于长距离的传输和扩散	141

参考文献	144
第七章 大气的清除过程	147
§ 7.1 引言	147
§ 7.2 大气清除过程的普遍表达式	148
§ 7.3 微粒的降水清洗	150
一、碰撞效率	151
二、清洗率	153
§ 7.4 气体的降水清洗	156
一、不可逆、可溶气体的清洗	157
二、可逆、可溶气体的清洗	159
§ 7.5 重力沉降与干沉积	161
一、重力沉降	162
二、干沉积	164
三、各种阻抗的计算	165
四、干沉积的实验观测	169
§ 7.6 长期传输模型与大气驻留时间	170
参考文献	172
第八章 大气中的气溶胶	175
§ 8.1 气溶胶的粒度分布特性	175
一、基于 $\log D_p$ 的分布	176
二、粒度分布的性质和对数—常态分布	177
三、大气气溶胶与能见度的削减	179
§ 8.2 单一气溶胶粒子的动力学	181
一、斯托克定律及其修正	182
二、气溶胶粒子的布朗宁运动	186
三、气溶胶粒子的生长或蒸发	190
§ 8.3 气溶胶的热力学特性	192
一、Kelvin 方程与 Köhler 曲线	192
二、均相晶核形成理论	195
三、均相—多相的晶核形成	198
§ 8.4 气溶胶族的动力学	200
一、凝聚率和凝聚系数的测定	200

二、分立和连续的动力学方程	204
三、凝聚方程的解	205
四、凝结方程的解	207
五、气粒转换对气溶胶粒度分布的影响	208
参考文献	210
第九章 大气污染物质及有关环境条件的测量	213
§ 9.1 指导思想和测量要素	213
§ 9.2 大气污染物质的测量	214
一、测量准备工作	214
二、取样地点和时间的选定	215
三、取样方法	215
四、取样程序或流程	216
五、化学分析	220
§ 9.3 放射性污染物质的测量	220
一、放射性衰变定律	220
二、核辐射及常用的放射单位	222
三、核辐射的测量	224
四、其他	226
§ 9.4 气象条件的测量	226
参考文献	227
第十章 酸雨和酸性沉降	229
§ 10.1 总论	229
§ 10.2 化学与物理过程	230
§ 10.3 源区(源)—受体(汇)关系	231
§ 10.4 酸雨的效应及其防治	232
参考文献	233
第十一章 大气层中的CO₂问题	234
§ 11.1 序言	234
§ 11.2 大气层中CO ₂ 含量的增加	234
一、产业革命前的CO ₂ 含量	234
二、夏威夷 Mauna loa 观测计划	235

三、CO ₂ 增加的模式研究	236
§ 11.3 CO ₂ 含量增加的可能效应和缓解措施	238
一、CO ₂ 增加所产生的后果	238
二、若干缓解措施	240
参考文献	241
第十二章 大气层中的臭氧(O₃)	244
§ 12.1 引言	244
§ 12.2 平流层化学与 O ₃ 的生灭	246
§ 12.3 平流层微量成分的垂直分布	249
§ 12.4 南极上空臭氧洞问题	251
参考文献	252
第十三章 室内空气污染	254
§ 13.1 室内空气质量研究	254
§ 13.2 室内污染物质分类及浓度	255
§ 13.3 室内污染物质的主要来源及防治措施	256
参考文献	258
第十四章 大气核污染的来源	260
§ 14.1 自然(天然)放射性	260
一、地球来源的放射性	260
二、由宇宙线所引起的放射性	262
§ 14.2 裂变和核活化产物	264
§ 14.3 采矿、碾磨与核燃料的制作	266
§ 14.4 核反应堆	267
一、反应堆的类型	267
二、反应堆失事	268
§ 14.5 核废料的处理	270
§ 14.6 核武器爆炸的灰尘沉降	271
§ 14.7 核能的和平利用	274
参考文献	275
第十五章 关于核爆炸的侦察和地球物理效应	277
§ 15.1 侦察核爆炸的类型	277

§ 15.2	产生电磁脉冲的不同机制及其地球物理效应	278
§ 15.3	高空核爆炸试验	278
§ 15.4	1961年10月30日苏联核爆炸和1980年5月18日美国 圣海伦火山爆发	280
§ 15.5	核战争的全球气候效应——“核致冬季”现象	280
	附录：新地岛大当量空爆在我国引起的气压扰动	286
第十六章 关于切尔诺贝利事件、核致冬季和大气污染研究		
	290
§ 16.1	切尔诺贝利事件	290
§ 16.2	“核致冬季”的研究	294
§ 16.3	核安全防护研究	295
§ 16.4	关于非放射性的大气污染研究	296
第十七章 大气污染控制		298
§ 17.1	若干控制概念	298
	一、排除大气污染的发射	298
	二、减少大气污染发射通量	299
	三、减少气体污染和气体污染废物至最小程度	299
	四、逃散发射的处置	300
	五、充分利用空气资源进行污染控制	300
§ 17.2	控制技术与方法	301
	一、概论	301
	二、控制效率的度量	302
	三、基于重力与离心力的分离装置	302
	四、清滤装置	303
	五、烟囱气体脱流(FGD)技术	305
	六、静电沉降器(ESP)	307
	七、湿抹刷器或洗涤剂	310
	八、其他	313
§ 17.3	不同过程的发射与控制	316
	一、燃料及其使用	316
	二、空间加热和蒸汽的产生	317

三、动力的产生	318
四、城市垃圾的焚烧	319
五、城市交通污染	320
六、不同工业过程的发射	322
参考文献	328

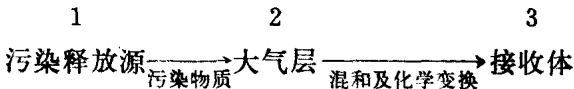
第一章 大气污染物质、来源及其效应

§ 1.1 大气污染系统与控制

一、大气污染系统

气态、固态和放射性的污染物质被释放至大气层后,要经历各种物理、化学过程。首先,污染物质随大气运动而迁移,气体分子可能发生:(1) 气体分子间的化学作用;(2) 被微粒或液滴吸收,同时发生化学反应;(3) 被带至平流层,或者与地面相互作用而被清除。固体微粒可能发生与其他颗粒凝聚;可能吸收汽化分子而长大;由于自身的重力作用而沉降,也可能与水滴一起被清洗。

大气污染系统由三个基本分量组成,如下所列:



大气污染无疑会损害人类、动物、植物或物质材料,造成很大的经济和精神损失(§ 1.5)。研究大气污染系统的目的在于寻求减免污染的最优途径。该途径包括大量的、长期的经济投资,甚至牵涉到生活方式和能源使用的改变,因此除了科技因素之外,社会和政治因素等,对此目标的寻求和解决,也起着巨大的作用。图 1-1 为大气污染系统示意图,图中从污染源至接收体,每一方框均表示在系统链中的一个过程,虚线表示可由自动控制 and 立法行为影响(减低污染浓度)的方面。

主要的污染源:(1) 运输,包括火车、汽车、飞机等;(2) 电力厂或核电站;(3) 废物燃烧(*refuse burning*);(4) 工业和家用燃料的燃烧;(5) 各种工业过程;(6) 其他自然的和人为的行为,

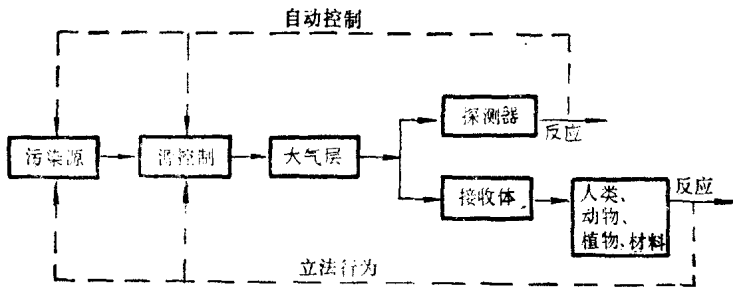


图 1-1 大气污染系统示意图

包括火山爆发、森林火灾和战争等。

二、大气污染的控制

控制或缓解大气污染,包括对污染源、大气层及接收体三方面,其中以对污染源的控制最基本、最重要。对污染放射源控制最可行和最实用的手段,为清尘和清气技术,改变燃料或其使用方式等等。大气层作为污染体运输和迁移的媒介,对其可起稀化及理化变换等作用,因此可考虑利用风力和改变风流以减少污染,亦可考虑发送大量热以改变大气温度的结构。对接收体的控制,主要使用过滤和空调技术,对人体保护可使用防毒面具及服装等。

本章限于化学成分及微粒污染的探究。关于大气放射性污染的来源及其有关问题,将在本书其他章节专门讨论。

§ 1.2 大气污染物质的分类

大气污染物可按物态、输入大气层方式及其化学组成进行分类。如按物态区分,有气体、液体及固体三态,其中后两者一般构成颗粒或液滴,故实际上只有气体和颗粒体两种。如按输入大气

层方式,可分为原始污染体和次生污染体两类。原始污染体为直接由污染源输入大气层的污染物,例如高浓度二氧化硫(SO_2),及燃料燃烧后的尘粒等。次生污染体为在大气层中由原始污染体之间、或与大气层成分之间发生化学作用后所产生的污染体。例如以汽油为燃料的汽车、飞机等排出的废气,在大气层中生成氧化氮、臭氧及碳的氧化物等,特别在大城市,包括洛杉矶、东京、雅典和罗马等污染甚为严重。此外,由于太阳辐射及工业光化学反应等,产生的所谓光化烟雾(*Photochemical Smog*)也属次生污染体。

大气污染物质多按化学成分进行分类,一般可分为6类:(1)含硫化合物;(2)含氮化合物;(3)含碳化合物;(4)含氯化合物;(5)有毒物质;(6)放射性物质。实际上化学周期表的任何元素,在大气层中均可发现,表1-1仅列出前4类化合物在大气层中的主要污染物及其来源。关于放射性物质,将有专章进行讨论;关于有毒物质现公布已有37种之多,包括砷(As)、石棉、苯(C_6H_6)、汞

表 1-1 前 4 种化合物在大气层中的主要污染物质及其来源

编号	类别	主要污染物质	污染源
1	含硫化合物	$\text{SO}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{CS}_2, \text{COS}, \text{SO}_3, \text{CH}_3\text{SH}, (\text{CH}_3)_2\text{S}, \text{SO}_3^{2-}$	生物衰变、动物粪便、化石燃料与有机物质燃烧、火山活动、海水溅泼
2	含氮化合物	$\text{NO}_2, \text{NO}, \text{N}_2\text{O}, \text{PAN}, \text{NH}_3, (\text{NO}_3^-, \text{NO}_2^- \text{ 和 } \text{NH}_4^+)$ 的盐	天然的氮固定:生物为主;人类的氮固定:生物、工业为主,燃料为次
3	含碳气体及化合物	$\text{CO}, \text{CO}_2, \text{CH}_4$ 及有机含碳化合物:烷烃、烯烃、芳烃、醛和酮	燃烧、汽车废气、生物呼吸作用、森林大火
4	含氯化合物	$\text{HCl}, \text{CH}_3\text{Cl}, \text{CH}_2\text{Cl}_2, \text{CHCl}_3, \text{CCl}_4, \text{CH}_2\text{ClCl}_3, \text{C}_2\text{HCl}_3, \text{C}_2\text{Cl}_4, \text{CCl}_2\text{F}_2(\text{F12}) \cdots \text{CHCl}_2\text{F}(\text{F21}), \text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3(\text{F11}), \text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4, \text{C}_2\text{ClF}_5$	燃烧、溶剂、火山活动
5	其它微量气体	$\text{H}_2, \text{HF}, \text{O}_3, \text{H}_2\text{O}, \text{SF}_6, \text{CF}_4, \text{CH}_3\text{Br}, \text{CH}_3\text{I}$	汽车废气、火山活动、平流 O_3 层、海水蒸发

(Hg)、氯乙烯(C_2H_3Cl)和放射性核素等,将在§ 1.5 中予以简介。

§ 1.3 大气污染浓度单位

在大气化学污染中,常用的污染浓度单位为 $\mu g/m^3$ 和 ppm。换算公式为:

$$\text{某污染物质 } i \text{ 的浓度 (ppm)} = \frac{8.314 \times 10^{-2} T}{PM_i} \text{ 乘以 } \mu g/m^3$$

为单位时 i 的浓度值。需指出,ppm 实际为一无量纲的体积分数 (*parts-per-million by volume*)。除 ppm 外,有时还使用 pphm (*parts-per-hundred million*)、ppb (*parts-per-billion*) 和 ppt (*parts-per-trillion*)。当谈及有机含碳化合物时,还使用 ppmC 之类,其中 C 为分子中的含碳数。

由于历史发展的实际需要(例如 ppm 之类)和多学科交叉的原因,本书使用的单位,对非放射性污染物质,兼用 cgs 制和 SI 制。对放射性污染物质(参看本书第 14 章)。表 1-2 和表 1-3 简要地列出各单位制使用的符号及常用的换算公式。

表 1-2 基本计量单位

	cgs 制		SI 制	
	单位名称	单位符号	单位名称	单位符号
长度	米	m	米	m
质量	克	g	千克	kg
时间	秒	s	秒	s
换算	1 t = 10^3 kg = 10^6 g, 1 Mt = 10^{12} g = 1 Tg			
公式	1 cm = 10^{-2} m, 1 mm = 10^{-3} m, 1 μ m = 10^{-6} m, 1 nm = 10^{-9} m, 10^{-4} m = 0.1 mm = 100 μ m			

表 1-3 常用的放射单位

单位名称	符号	简短说明	附注
居里	Ci	每秒 3.7×10^{10} 核嬗变	旧制, 放射性强度
贝柯勒尔	Bq	每秒 1 次核嬗变	SI 制强度
伦琴	R	每 kg 空气 2.58×10^{-4} C	照射量
拉德	rad	0.01 J/kg	剂量
戈瑞	Gy	1 J/kg, 等于 100 rad	SI 制剂量
剂量当量	H	剂量 $\times Q \times$ 任意修正因子	辐射防护
品质因数	Q	辐射的生物学有效性	辐射防护
雷姆	rem	rad $\times Q \times$ 任意修正因子	剂量当量
西弗特	Sv	Gy $\times Q \times$ 任意修正因子	SI 制剂量当量
帕克	rep	93 erg/g ≈ 100 erg/g = rad, H = DQN Sv = GyQN	旧制, 已少使用

注: 强度 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
 剂量 $100 \text{ rad} = 1 \text{ Gy}$
 剂量当量 $100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$
 照射量 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \approx 1 \text{ rad} = \text{rem}$

§ 1.4 大气中的颗粒物

这里所指的颗粒物,除纯水滴外,为在正常条件下大于分子(约 2 \AA),而直径小于 μm 级 ($\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-4} \text{ cm}$) 的液态或固态颗粒。它们的大小常按实际直径或等效直径来量度。一般,大气颗粒物包括气溶胶、尘霾、轻雾、烟雾、烟、油烟等等。

大气中的颗粒按其大

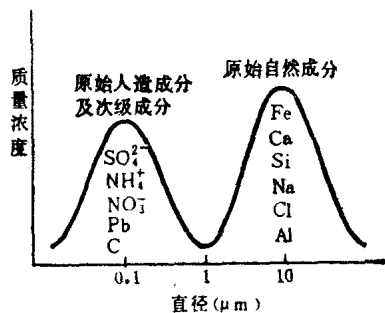


图 1-2 粗细颗粒双峰态浓度分布及其主要成分

小可分为粗、细两类,直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的为细颗粒, 大于 $2.5 \mu\text{m}$ 的为粗颗粒, 在讨论气溶胶时, 这是一个基本的划分。细颗粒又可分为核态($0.005 \sim 0.1 \mu\text{m}$)和累积态($0.1 \sim 1 \mu\text{m}$)两类。图 1-2 表示理想的粗细颗粒的双峰态及其主要成分。硫酸盐、阿摩尼亚、硝酸离子、铅、含碳物质(包括油烟及凝结的有机物质)、毒性物质(如 As, Se, Cd 和 Zn)等属于细颗粒成分, 而地壳物质 Fe、Ca 和 Si 属于粗颗粒。表 1-4 为直径小于 $20 \mu\text{m}$ 的颗粒的自然来源, 表 1-5 为美国由于人类活动所产生的颗粒的来源和年总量。

表 1-4 直径小于 $20 \mu\text{m}$ 颗粒的自然来源

来 源	估算年产量(Tg/a)
土壤与岩石碎屑	50~250
森林火灾	1~50
海盐溅泼	300
火山碎屑	25~150
由于 H_2S 、 NH_3 、 NO_x 和 HC 气体发射所形成的颗粒	345~1100
自然来源颗粒总额	721~1850

注: 取自文献 United Nations(1979)。

表 1-5 美国由于人类活动所产生的颗粒来源和年总量

来 源 分 类	年总量 (Tg/a)
燃料燃烧和工业过程	10
工业过程中逃逸发射	3.3
非工业逃逸发射	110~370
交通运输	1.3
总 额	125~385

注: 取自美国 EPA(1982)统计。