



创建世界高水平大学项目资助教材

蒋维楣 主编

# 空气污染气象学

**Air Pollution  
Meteorology**

南京大学出版社



创建世界高水平大学项目资助教材

蒋维楣 孙鉴汭 王雪梅 吴 澍 刘红年 编著

# 空气污染气象学

**Air Pollution  
Meteorology**

南京大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

空气污染气象学/蒋维楣主编. —南京:南京大学出版社, 2003. 10

ISBN 7-305-04017-7

I. 空… II 蒋… III. 空气污染-环境气象学  
IV. X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 021144 号

|      |                                                                            |
|------|----------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 空气污染气象学                                                                    |
| 主 编  | 蒋维楣                                                                        |
| 出版发行 | 南京大学出版社                                                                    |
| 社 址  | 南京市汉口路22号 邮编210093                                                         |
| 电 话  | 025-83596923 025-83592317 传真025-83686347                                   |
| 网 址  | <a href="http://press.nju.edu.cn">http://press.nju.edu.cn</a>              |
| 电子邮件 | <a href="mailto:nupressl@publicl.ptt.js.cn">nupressl@publicl.ptt.js.cn</a> |
| 经 销  | 全国各地新华书店                                                                   |
| 印 刷  | 南京紫藤制版印务中心                                                                 |
| 开 本  | 787×960 1/16 印张27 字数513千                                                   |
| 版 次  | 2003年9月第1版 2004年4月第2次印刷                                                    |
| 印 数  | 1 001 - 2 000                                                              |
| ISBN | 7-305-04017-7/P·126                                                        |
| 定 价  | 50.00元                                                                     |

---

\* 版权所有,侵权必究

\* 凡购买南大版图书,如有印装质量问题,请与所购图书销售部门联系调换

# 目 录

|                                           |        |
|-------------------------------------------|--------|
| 第一章 绪论 .....                              | ( 1 )  |
| 1. 空气污染问题 .....                           | ( 1 )  |
| 1.1 空气污染与空气污染物 .....                      | ( 1 )  |
| 1.2 空气污染源 .....                           | ( 4 )  |
| 1.3 空气污染影响 .....                          | ( 6 )  |
| 1.4 空气污染控制与管理 .....                       | ( 6 )  |
| 2. 空气污染气象学研究 .....                        | ( 7 )  |
| 2.1 空气污染气象学影响因子 .....                     | ( 7 )  |
| 2.2 空气污染气象学研究 .....                       | ( 14 ) |
| 2.3 空气污染气象学的实验研究方法 .....                  | ( 17 ) |
| 2.4 空气污染气象学研究应用与发展 .....                  | ( 20 ) |
| 2.5 地球系统与地表圈层 .....                       | ( 21 ) |
| 3. 大气结构与大气动力学基本特征 .....                   | ( 23 ) |
| 3.1 大气组成与热力结构 .....                       | ( 23 ) |
| 3.2 大气状态变量与大气热力学 .....                    | ( 27 ) |
| 3.3 大气层结与稳定度 .....                        | ( 30 ) |
| 3.4 大气动力学与守恒定律 .....                      | ( 33 ) |
| 3.5 粘性流与非粘性流 .....                        | ( 34 ) |
| 3.6 大气系统与空气污染物输送 .....                    | ( 34 ) |
| 4. 大气边界层 .....                            | ( 35 ) |
| 4.1 定义 .....                              | ( 35 ) |
| 4.2 地球 - 大气交换过程(能量、质量、动量通量与陆面过程)<br>..... | ( 36 ) |

|                                      |             |
|--------------------------------------|-------------|
| 4.3 大气边界层与微气象观测事实——风、温、湿的垂直分布 .....  | (38)        |
| 4.4 大气边界层湍流特征与结构 .....               | (40)        |
| 4.5 大气边界层基本理论——梯度输送理论、相似理论 .....     | (42)        |
| 4.6 大气边界层参数化与模拟研究 .....              | (45)        |
| 4.7 对流边界层与稳定边界层 .....                | (49)        |
| <b>第二章 空气污染物散布的基本理论处理 .....</b>      | <b>(52)</b> |
| 1. 大气扩散与空气污染物散布的一般描述 .....           | (52)        |
| 1.1 大气扩散描述的基本途径 .....                | (52)        |
| 1.2 空气污染物散布的一些基本特性 .....             | (55)        |
| 2. 梯度输送理论的基本处理 .....                 | (59)        |
| 2.1 引言 .....                         | (59)        |
| 2.2 湍流扩散方程 .....                     | (60)        |
| 2.3 扩散方程的简化与求解 .....                 | (61)        |
| 2.4 湍流扩散系数 $K$ .....                 | (66)        |
| 2.5 小结 .....                         | (69)        |
| 3. 湍流统计理论的基本处理 .....                 | (70)        |
| 3.1 湍流扩散的拉格朗日描述与特征 .....             | (70)        |
| 3.2 泰勒公式及讨论 .....                    | (72)        |
| 3.3 小结 .....                         | (78)        |
| 4. 相似理论的基本处理 .....                   | (78)        |
| 4.1 拉氏相似性假设与扩散的基本数学处理 .....          | (78)        |
| 4.2 中性层结条件下的平均位移 .....               | (79)        |
| 4.3 非中性层结条件下的平均位移 .....              | (80)        |
| 4.4 相似理论在对流混合层扩散问题中的应用 .....         | (82)        |
| 4.5 小结 .....                         | (82)        |
| 5. 三种基本理论处理的比较与讨论 .....              | (83)        |
| <b>第三章 局地空气污染物散布计算——高斯扩散模式 .....</b> | <b>(86)</b> |
| 1. 连续点源高斯扩散公式 .....                  | (86)        |
| 1.1 无界情形 .....                       | (87)        |
| 1.2 有界情形 .....                       | (89)        |
| 1.3 地面源 .....                        | (90)        |
| 1.4 地面浓度和地面最高浓度 .....                | (91)        |
| 2. 连续线源、面源和体源扩散计算公式 .....            | (93)        |
| 2.1 横风向积分浓度与线源扩散公式 .....             | (93)        |

|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| 2.2 面源扩散公式 .....                         | ( 95 )       |
| 2.3 体源扩散公式 .....                         | ( 97 )       |
| 3. 烟团扩散模式 .....                          | ( 98 )       |
| 3.1 静风烟团模式 .....                         | ( 98 )       |
| 3.2 烟团轨迹模式 .....                         | (102)        |
| 4. 大气扩散参数 .....                          | (111)        |
| 4.1 早期的大气扩散参数处理模式 .....                  | (112)        |
| 4.2 稳定度扩散级别与扩散曲线法 .....                  | (112)        |
| 4.3 风向脉动与扩散函数法 .....                     | (130)        |
| 5. 烟流抬升与大气清除过程 .....                     | (134)        |
| 5.1 烟流抬升及抬升高度计算与应用 .....                 | (134)        |
| 5.2 大气清除过程与计算处理 .....                    | (161)        |
| 6. 各种条件下的扩散计算 .....                      | (178)        |
| 6.1 封闭型扩散计算 .....                        | (179)        |
| 6.2 熏烟型扩散计算 .....                        | (182)        |
| 6.3 长期平均浓度计算 .....                       | (186)        |
| 6.4 箱体模式与窄烟流模式 .....                     | (189)        |
| 6.5 多源高斯模式处理 .....                       | (196)        |
| 6.6 对流边界层扩散处理 .....                      | (199)        |
| 6.7 稳定边界层扩散处理 .....                      | (211)        |
| 6.8 局地建筑物条件下的扩散处理 .....                  | (217)        |
| 7. 非均一下垫面条件下空气污染物散布特征及高斯模式的修正处理<br>..... | (225)        |
| 7.1 山地地形扩散特征与高斯扩散模式的修正 .....             | (225)        |
| 7.2 水陆交界下垫面扩散特征与高斯扩散模式的修正 .....          | (243)        |
| 7.3 城市下垫面扩散特征与高斯模式的修正 .....              | (261)        |
| 8. 大气扩散计算与模拟的发展——数值模式 .....              | (272)        |
| 8.1 近距离梯度输送(K)模式 .....                   | (273)        |
| 8.2 湍流能量(TKE)闭合模式 .....                  | (274)        |
| 8.3 高阶闭合模式 .....                         | (275)        |
| 8.4 大涡模拟(LES) .....                      | (278)        |
| 8.5 拉格朗日随机模式 .....                       | (283)        |
| <b>第四章 中尺度空气污染气象学 .....</b>              | <b>(285)</b> |
| 1. 引言 .....                              | (285)        |
| 1.1 中尺度空气污染气象学问题 .....                   | (285)        |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 1.2 中尺度空气污染气象学研究 .....          | (287)        |
| 2. 中尺度气象学基本特征 .....             | (288)        |
| 2.1 中尺度大气流动及其尺度特征 .....         | (288)        |
| 2.2 中尺度大气流动不同尺度的相互作用 .....      | (290)        |
| 2.3 中尺度环流 .....                 | (291)        |
| 2.4 中尺度对流系统 .....               | (294)        |
| 2.5 小结 .....                    | (296)        |
| 3. 中尺度气象学模拟 .....               | (296)        |
| 3.1 基本特征、基本坐标与支配方程组 .....       | (296)        |
| 3.2 初始条件与边界条件 .....             | (302)        |
| 3.3 闭合方案与次网格参数化 .....           | (304)        |
| 3.4 地面影响、水汽过程和辐射作用 .....        | (306)        |
| 4. 中尺度大气扩散基本问题 .....            | (312)        |
| 4.1 引言 .....                    | (312)        |
| 4.2 中尺度大气扩散与观测研究 .....          | (314)        |
| 4.3 中尺度大气扩散基本特征 .....           | (315)        |
| 4.4 湍流与中尺度大气扩散 .....            | (317)        |
| 4.5 切变与中尺度大气扩散 .....            | (320)        |
| 5. 欧拉空气质量模拟 .....               | (322)        |
| 5.1 引言 .....                    | (322)        |
| 5.2 气象资料和大气动力学描述 .....          | (323)        |
| 5.3 大气输送过程数值解 .....             | (325)        |
| 5.4 大气扩散过程数值解 .....             | (326)        |
| 5.5 数值模拟应用实例——不同下垫面的应用 .....    | (327)        |
| 6. 中尺度空气污染气象学的城市区域应用 .....      | (336)        |
| 6.1 引言 .....                    | (336)        |
| 6.2 城市冠层对中尺度气流的影响 .....         | (337)        |
| 6.3 中尺度气象模式中的城市参数化 .....        | (343)        |
| 6.4 干湿沉积参数化 .....               | (345)        |
| 6.5 能量通量与参数化 .....              | (348)        |
| 6.6 小结与讨论 .....                 | (348)        |
| 6.7 城市空气污染数值预报系统 .....          | (349)        |
| <b>第五章 区域与全球空气污染气象学问题 .....</b> | <b>(365)</b> |
| 1. 区域与全球大气环境问题 .....            | (365)        |
| 1.1 酸雨污染 .....                  | (365)        |



---

|              |                                    |       |
|--------------|------------------------------------|-------|
| 1.2          | CO <sub>2</sub> 及微量气体污染与气候变化 ..... | (372) |
| 1.3          | O <sub>3</sub> 与臭氧层保护 .....        | (379) |
| 2.           | 气溶胶大气化学 .....                      | (388) |
| 2.1          | 气溶胶污染——颗粒物、光化学烟雾、沙尘暴 .....         | (388) |
| 2.2          | 气溶胶大气化学 .....                      | (397) |
| 2.3          | 气溶胶大气化学与气候变化 .....                 | (401) |
| 3.           | 远距离输送扩散与大气化学模拟 .....               | (406) |
| 3.1          | 污染物的远距离输送 .....                    | (406) |
| 3.2          | 大气化学输送模式 .....                     | (406) |
| 3.3          | 大气化学模式和气象模式的耦合过程 .....             | (413) |
| 4.           | 全球变化与生存环境 .....                    | (414) |
| 4.1          | 全球变化 .....                         | (414) |
| 4.2          | 生存环境问题与全球变化研究 .....                | (416) |
| 4.3          | 全球变化研究计划 .....                     | (417) |
| 主要参考书目 ..... |                                    | (419) |



# 第一章 绪 论

空气污染气象学是近代大气科学的一个重要的分支学科,它以污染物在大气中的输送、清除、转化过程为研究对象,并重点研究空气污染物散布与气象因子的关系,预测空气污染物的浓度分布及其对环境空气质量的影响。空气污染气象学是大气环境研究与应用的一个重要领域,对大气环境的保护有重要意义。

## 1. 空气污染问题

### 1.1 空气污染与空气污染物

#### 1.1.1 空气污染

为了解空气污染问题要从了解空气污染和空气污染物的概念开始。空气污染一般是指:由于人为或自然的因素,使大气组成的成分、结构和状态发生变化,与原本情况比增加了有害物质(称之为空气污染物),使环境空气质量恶化,扰乱并破坏了人类的正常生活环境和生态系统,从而构成空气污染。显然,要产生空气污染需要有污染源,并且污染源要向大气中排放污染物。图 1.1 给出了大气污染系统与途径。其中最核心的是大气输送和扩散过程,这也就是空气污染气象学需要研究的主要对象。

近年来,随着空气污染的加剧,空气污染问题已经受到各方面的重视。从最小范围的污染到全球性的污染都时刻影响着人类的生存和发展。在多数情况下,排放进入大气层的污染物质总是被不断的输送、稀释、清除,正是由于大气的输送和稀释作用,使得污染物浓度逐渐降低,直至完全被清除。但大气的稀释扩散与输送率随时空变化很大,受到多种因素支配,这是一个很复杂的问题。有时大气自然通风与输送很有限,环境空气质量会受到很大损害,有时甚至会使相当大的范围受到污染并造成危害,但也可能由于大气的自净能力强,

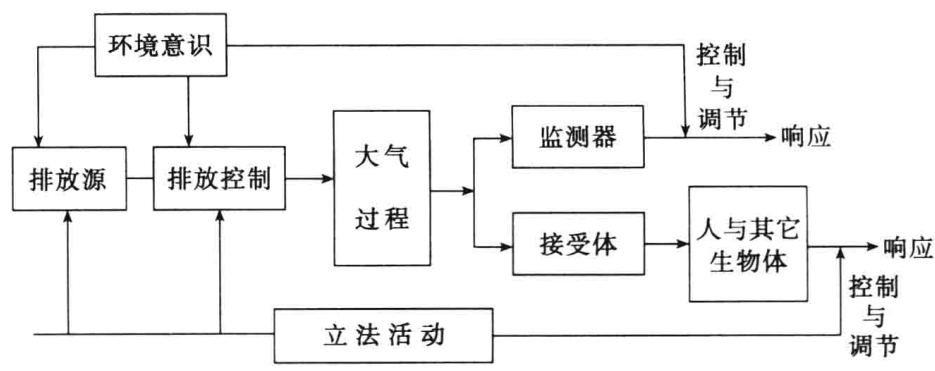


图 1.1 大气污染系统与途径

即使排放的污染物较多,但并没有造成严重的污染。污染物排放到大气当中,是否会造成严重污染与气象条件关系非常密切,也就是说大气对污染物的输送、扩散能力强烈地依赖于气象条件。例如,风速很小时,少量的大气污染物就会造成比较严重的污染,但是风速很大时,较多的污染物才能造成同样的影响。从这个意义上说,要研究和解决空气污染问题,首先要从研究气象条件对污染的影响入手。

气象学中把未受污染的大气称为洁净大气,它主要是由氮、氧、氩、水汽、二氧化碳等成分构成的混合物,并且其中还含有一些悬浮的固态或液态气溶胶粒子。大气的主要成分在离地面几十公里高度以下,比例基本不变。此外,自然大气中也含有其它气体成分,如氦、氖、氟等惰性气体及臭氧、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳等,这些气体在大气中含量很少,不到空气总容积的0.01%,通常被称为痕量气体。由于人为原因使自然大气成分与结构改变,一旦一些杂质气体量达到并超过一定限度,就构成空气污染的危害。另一方面,大气圈通常具有一定的自净能力,即大气环境具有一定的容量。大气环境容量是指在自然净化能力以内,所容许的污染物排放量,也就是不至于破坏自然界物质循环的极限量。当污染物排放量超过大气环境容量时才构成空气污染。可见,并不是一有污染物质存在,就会构成空气污染。大气环境容量与地形、气象条件密切相关,在不同地点、不同时间是会发生变化的。通过对空气污染气象学的研究,一方面要减少乃至消除空气污染物的排放,另一方面则要摸清大气对污染物的输送、扩散、清除规律,充分利用大气环境的自净能力,做到既发展生产又保护环境。要运用空气污染气象学的原理和方法来研究和解决空气污染的问题。

1.1.2 空气污染物及其浓度

(1) 空气污染物

以各种方式排放进入大气,有可能对人和生物、建筑材料以及整个大气环境构成危害或带来不利影响的物质称为空气污染物。目前认为对人类危害较大的,已被人们注意的空气污染物就有 100 多种。排放进入大气的污染物质,在与空气成分的混合过程中,还会发生各种物理变化与化学变化。这样,把原始排放的直接污染大气的污染物质称之为一次污染物,而把经化学反应生成的新的污染物质称之为二次污染物。这种产生二次污染物的过程称为二次污染。根据空气污染物的物理形态和化学成分,将其分为以下几类:

a. 颗粒污染物。指以固体或液体微粒形式存在于空气介质中的分散体,从分子尺度大小到大于 10 微米粒径的各种微粒,主要有飘尘、降尘等,总称总悬浮颗粒物(TSP)。总悬浮颗粒物的成分非常多样,有地面扬尘、植物花粉、大气化学反应的产物、海盐粒子等。由于总悬浮颗粒物的存在,使大气能见度下降,空气污浊,并且有一些半径较小的粒子还能被人类吸入到呼吸系统中,这些粒子被称为可吸入颗粒物(IP),这可以引起呼吸系统疾病。大气中的颗粒物还能影响地气系统的辐射收支,参与非均相的化学反应。总体上看,总悬浮颗粒物来源复杂,成分各异,危害也不尽相同,是大气科学、环境科学研究的一个重点和难点问题。

b. 碳的氧化物。主要有二氧化碳、一氧化碳等气体污染物。

c. 氮氧化物。主要有一氧化氮和二氧化氮等气体污染物,以及由此可能产生的二次污染物。氮氧化物主要来自于石油的燃烧,尤其是机动车的废气排放。氮氧化物能与大气中的一些物质反应,并能在太阳紫外线作用下发生光化学反应,生成一些有强烈刺激性和毒性的有机物,形成光化学烟雾,严重污染环境,损害人类健康。

d. 硫化物。最主要是二氧化硫。二氧化硫主要来自于含硫煤炭的大量燃烧、自然界的火山爆发等。二氧化硫被排放到大气中后,会参与氧化过程,与一些氧化性比较强的物质发生化学反应,能转变为三氧化硫,三氧化硫溶解于降水中形成酸雨。这是迄今认为的最主要的空气污染物。此外,还有硫化氢等气体污染物以及由二氧化硫通过化学转化生成的其它酸性污染物。

e. 卤化物。主要有氟化氢、氯气和氯化氢等气体污染物。

f. 碳氢化合物。主要包括烷烃、烯烃和芳烃类复杂多样的含碳含氢化合物。

g. 氧化剂。主要是指在空气中具有高度氧化性质的一些化学物质,例如臭氧及其它过氧化物。

h. 放射性物质。除了上述常见的空气污染物外,还可能由于一些偶然事件使大气受到放射性污染物的污染。例如由于核装置的事故能使大气受到放射性污染,在 20 世纪 80 年代,前苏联(现在的乌克兰)切尔诺贝利核电站发生

反应堆外泄事故,引起大火,使大量的放射性尘埃被排放到大气中,造成大范围、长时间的严重空气污染,数千人死亡或病变。图 1.2 中列出了常见的空气污染源和污染物。

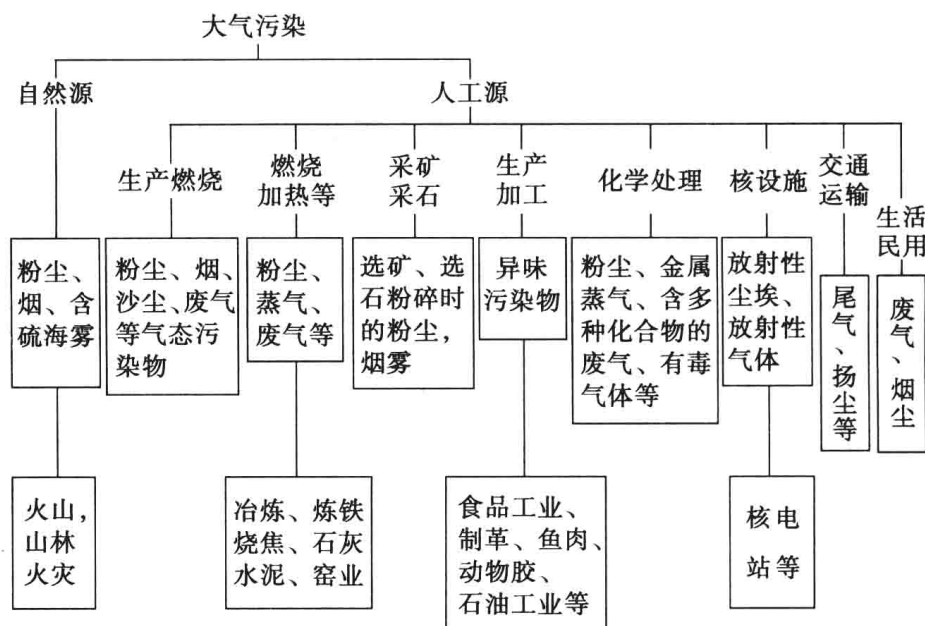


图 1.2 空气污染源与空气污染物

## (2) 空气污染物浓度

空气污染物浓度有两种表示法:一是质量浓度,单位体积空气中含污染物质量,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;一是体积浓度,污染物体积与整个空气容积之比,  $\text{ppm}$  为单位,即污染物体积占空气容积的百万分之一,亦可用  $\text{ppb}$  和  $\text{ppt}$  等。显然,它适用于气体污染物计量浓度。两种浓度单位可以相互转换:

$$X = YA / 22.4 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

$$Y = 22.4 X / A (\text{ppm})$$

式中:  $X$  表示质量浓度单位,  $Y$  表示体积浓度单位,  $A$  表示污染物的摩尔质量。

## 1.2 空气污染源

排放空气污染物进入大气的源称之为空气污染源,它分为自然源和人工源两大类。按照不同情况和研究目的,可以从不同角度对空气污染源进行分类。

### 1.2.1 按照人类生产活动内容分类

(1) 工业污染源 指在工业生产过程中排放出废气污染物的源,主要是各种工厂的烟囱。

(2) 农业污染源 指农田在使用农药化肥过程中产生或残留在地面和土壤中,并经大气输送和扩散进入大气层的污染物的源。

(3) 城市生活污染源 指城市商业,交通,生活活动中排放废气污染物,如居民生活用炉灶和采暖锅炉放出大量烟尘和有害气体,交通运输的废气排放源等。

### 1.2.2 按污染源排放方式分类

(1) 连续源 污染物以持续、定常的方式向大气层排放的污染源。例如持续生产的工厂的烟囱。

(2) 间歇源 污染物以规则或不规则的间歇性方式排放的污染源。例如非连续生产的工厂烟囱。

(3) 瞬时源 污染物以突发性的方式在短时间内排放的污染源。例如爆炸。

### 1.2.3 按污染源排放位置分类

(1) 固定源 位置固定不变的污染源,如烟囱排放源、居民生活排放源。

(2) 移动源 位置是移动的污染源,如车、船、飞机等排放源。

(3) 无组织排放源 无规则或泄漏向大气层排放污染物的污染源,例如火灾、事故排放。

### 1.2.4 按污染物排放高度分类

(1) 高架源 污染物通过离地一定高度的排放口排放污染物的源,例如工厂烟囱。

(2) 地面源 污染物通过位于地面或低矮高度上的排放口排放的源,例如居民生活排放。

### 1.2.5 按污染物排放口的形式分类

(1) 点源 污染物的排放口是一定口径的点状排放的污染源,例如烟囱。

(2) 线源 污染物排放口构成线状排放源,如工厂车间天窗排气,或由移动源构成线状排放的源,如道路车辆的废气排放。

(3) 面源 在一定区域范围,以低矮密集的方式自地面或不大的高度排放污染物的源。

(4) 体源 由源本身或附近建筑物的空气动力学作用使污染物呈一定体积向大气层排放的源,如楼房的通风排气设施等。

在空气污染气象学领域,为计算污染物浓度及其自源排放后在空间中的分布,常以点、线、面、体源的形式,分类选用适当的大气扩散模式进行计算。

同时常以源强来表示污染源排放污染物质量的速率,也就是污染物的排放率。对点源,源强是单位时间排放污染物的质量,其单位为  $\text{g/s}$ 、 $\text{kg/h}$  等;对线源,源强是单位时间、单位长度排放的污染物质量,单位为  $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{m})$ ;对面源,源强是单位时间、单位面积上所排放污染物质量的量,单位为  $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$  或  $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{km}^2)$ 。以上是指连续源,对瞬时源是以一次排放污染物的总质量表示源强的。

### 1.3 空气污染影响

污染源、污染物(达到一定浓度)以及对人类及其生存环境造成危害与影响,这是构成空气污染问题的基本要素。当今的人们已经比较充分地认识到了空气污染的各方面危害和影响,主要归结于以下方面:

#### 1.3.1 对人体健康的危害

例如,由于人体受光化学烟雾刺激,可能是呼吸道粘膜受损,严重的能引起气管、肺部疾病。由于可吸入颗粒物,会导致许多种呼吸系统病变,目前国际上对如何减少、如何预报可吸入颗粒物非常关注。

#### 1.3.2 对生物体的危害

包括对动物与植物的危害。例如,放射性污染物发出的高能射线能破坏动植物的正常生理过程,甚至使基因产生突变。

#### 1.3.3 对各类物品的危害

如建筑材料、金属制品、纺织、橡胶、皮革、纸品以及各类文化艺术和文物的危害。例如,长期的酸雨能使建筑物表层剥落、褪色,并会造成钢结构的桥梁腐蚀,缩短使用寿命。

#### 1.3.4 对全球气候变化的影响

这是近一二十年来特别令人关注的课题,包括如温室效应、气溶胶颗粒物作用和臭氧层破坏等方面的作用和危害。由于二氧化碳和甲烷等温室气体排放量增加,使大气温度上升,水体膨胀,从而导致海平面升高、大气环流发生改变,导致气候异常。

#### 1.3.5 对酸雨威胁的作用

降水酸化和其他酸性沉积物的生成都是空气污染的直接后果。对降水酸化的控制都是各国环境领域的主要任务之一,因为酸雨对土壤、农作物、森林植被乃至整个生态系统都有非常显著,而且是长期的影响。

### 1.4 空气污染控制与管理

由于空气污染问题与排放量、气象条件有关,是一个比较复杂的问题。因

而为了改善大气环境状况,就必须综合考虑各种可能影响大气环境质量的因素,实行一定的管理和控制标准。我国现阶段实行浓度控制和总量控制的对策。

浓度控制就是通过控制污染源排放口排出的污染物浓度,来控制大气环境质量的方法。国家制订统一的污染物排放浓度标准,任何排放源排出的污染物都要求在国家标准以内。浓度控制办法有效地推动了污染源的技术改造,对煤烟型的大气污染治理起到了明显的推动作用。但是,它也存在一些缺陷。主要表现在国家排放标准无法考虑大气污染的局域性,无法结合不同地点大气污染的特征和经济技术现状,可能会对一些地区显得过于严格,而对另一些地区可能过于宽松。此外,浓度控制的方法还无法考虑无规则的居民生活污染源。在实际实行过程中,会出现某些地区的污染源是达到浓度控制国家标准的,但是由于排放源多,仍然使大气环境质量状况恶化,原因是虽然每个排放源都达标,但排放总量却超过了大气的自净能力,即大气环境容量。这就需要在推行浓度控制的方法基础上,还要对污染物排放的总量也进行控制。

所谓总量控制就是通过给定被控制区域内污染源允许排放总量,并优化分配到源,来保证大气环境质量的办法。通过总量控制,可以从总体上控制某地区的大气环境质量状况,并且可以制定出大气污染物排放总量控制的削减量与大气环境质量改变的关系,建立最低限度的污染物削减与最低治理投资费用的关系,对大气污染综合防治进行总体优化,降低污染治理投资费用,避免盲目控制污染源的被动局面,逐步控制大气污染,并逐步改善大气环境质量。与浓度控制所不同的是,实施总量控制以后,对任何一个污染源来说,除了排放浓度要达到国家标准之外,它的排放总量还必须在所分摊得的数量以内,不能不加控制的排放。

通过实行浓度控制与总量控制的政策,使环境保护管理部门有足够的依据来控制和管理当地的大气环境,同时也能相对容易地制定地方性排放法规,在促进经济发展的同时最大限度地保护大气环境。

## 2. 空气污染气象学研究

### 2.1 空气污染气象学影响因子

对大气污染状况的监测工作中,常常会发现,在同一地点来自同一排放源的污染物浓度监测结果却不一定相同,有时可测到很高的浓度,有时浓度却非



常低,出现了很大差异。这种现象说明在不同的气象条件下,污染物的输送、扩散规律是不相同的。气象条件是影响污染物浓度的一个重要因子。直观地看,有时烟囱排出的烟气随风向下风向输送,形状很像一条带子,经过很长的时间都不容易散开。这种情况下,如果监测的采样点正好处在烟气输送的路径上,必然会得到很高的浓度,但污染影响的范围却不是很大。有时烟气一离开烟囱口,很快就在水平和垂直方向散开了。如果监测点的位置不变,那么必然会采到很低的污染物浓度,甚至由于浓度过低,几乎不会造成污染。污染监测的事实说明,气象条件对浓度有相当明显的影响,因而,空气污染物的散布的主要影响因子就是气象条件。气象变化是非常复杂的,因而影响空气污染物散布的气象因子也是多种多样的,主要有以下一些:

### 2.1.1 大气边界层结构及其特征

空气污染物排放进入大气层,其活动决定于各种尺度的大气过程,首先受到大气边界层湍流活动的支配。大气边界层是直接受地表影响最强烈的垂直气层,它占有整个空气质量的  $1/10$ ,其厚度随天气条件和地表特征而变,一般从地面到  $1\text{—}2\text{ km}$  高度。在这一层里气流受地面摩擦力和下垫面地形地物的影响比高层大气显著得多,并且与地面有物质和能量的交换,具体来说是动量、热量、水汽和其他物质的输送。按动力学特征,常把大气边界层分为三层:

(1) 贴地层 是最贴近地面的一层,厚度在  $1\text{ m}$  以内。在这层中空气分子粘性应力占有重要地位,同时还要考虑湍流应力。地表的细致结构直接影响着该层的空气运动。在贴地层的最底部,空气与地面粘负在一起,认为地面处空气不流动。

(2) 近地层 该层高度可达  $50\text{—}100\text{ m}$ 。这一层内气象要素有明显的日变化,湍流应力远超过分子粘性应力,柯氏力与气压梯度力可忽略不计,大气与地面的相互作用主要依赖于垂直方向的湍流对动量、热量、水汽的输送。在近地层中,动量、热量和水汽的湍流垂直输送通量随高度变化很小,常被称为常值通量层。并且,在近地层内风速随高度升高近似满足线性地增大关系。

(3) Ekman 层(上部摩擦层) 从近地层顶到大气边界层顶被称为 Ekman 层。这一层的主要特征是气压梯度力、柯氏力、湍流应力具有同样的量级,都不能被忽略。Ekman 层可以看作大气由强烈地受地面影响向上部自由大气过渡的一层,也是地面输送的动量、热量、水汽进入自由大气的通道。

由于边界层的厚度随时间和地点变化,因地表性质不同可以分为海洋边界层、城市边界层等。一般把白天大气边界层分为近地面层、混合层和挟卷层,把夜间大气边界层分为近地面层、稳定边界层和残余层,各层具有各自不同的特性。

大气边界层与人类活动的关系最密切、最直接,空气污染问题也主要发生

在这一层中。边界层中气象要素场具有特征性的日平均垂直梯度,并在日平均值上再叠加以昼夜为周期的波动,波动越接近地面越剧烈,随着接近边界层的上边界而逐渐减弱为零。

在没有外部强天气系统影响时,风的日变化完全取决于湍流混合状况,温度的日变化可以看作是太阳辐射变化引起的热波及地面长波辐射引起的冷却,这热波和冷却借助于湍流由地面向上传播。

污染物在大气边界层中的扩散也取决于湍流发展,湍流的强弱常常用脉动量的均方根  $\sigma_w = (\overline{w'^2})^{1/2}$ ,湍流强度  $i = \frac{\sigma}{u}$  以及湍流耗散率  $\epsilon$  来表示。混合

作用的尺度以湍流积分尺度表示:  $L_t = \int_0^\infty R(t)dt$ ,  $L_x = \int_0^\infty R(x)dx$

维持边界层湍流的动力因素主要是空气动力学粗糙度  $Z_0$  和切应力  $\tau$ ,用  $u_* = (\frac{\tau_0}{\rho})^{1/2}$  表示。促使湍流增强或减弱的热力层结作用,通常用理查逊数

$R_i$  来表征,还有自地面向上的垂直显热通量  $H_T = \rho C_p \overline{w'\theta'} = -\rho C_p K_H \frac{\partial \theta}{\partial t}$ 、莫宁

—奥布霍夫长度  $L = -\frac{u_*^2}{x \frac{gH_T}{T\delta C_p}}$ ,以及混合层厚度  $Z_i$  等参量表示。

### 2.1.2 风和湍流

空气相对于地面的运动形成风,风是一个矢量,既有大小,又有方向。气象学中风向指风的来向。有风时,排放到大气中的污染物将向下风向输送,而不会影响到上风向。并且风速越大,单位时间内污染物被输送的距离就越远,与空气的混合也越充分,单位体积空气中污染物的含量就越低,即浓度越低。由于风既能输送污染物,又能使污染物与空气混合降低浓度,因而风对污染物浓度起很大作用,是空气污染气象学中一个主要的影响因子。一般在考虑风对污染影响时,常使用污染系数的概念:

$$\text{污染系数} = \text{风向频率} / \text{平均风速}$$

风频越低,风速越高,污染系数就越小,污染程度就越轻。

湍流是流体的一种特有运动方式,主要特征是湍流运动时流体的主要的脉动物理属性如脉动速度、脉动温度、脉动压力等随时间和空间以随机的方式发生变化。湍流产生的具体原因目前还不清楚,但是基本可以分为动力或机械作用和热力作用两类。动力作用主要是指速度的切变,例如风速风向随高度变化就是风的切变,切变是空气运动在空间中的不均匀性,它的产生原因主要是地面的摩擦、地形的阻挡、起伏造成。风切变越显著,湍流就越容易发展。热力作用主要指由于空气内部温度不均匀并且造成了不稳定导致的湍流发展。造成空气内部不稳定的因子可以有很多种,例如地面对大气的加热,导致