

空气污染气象学 教程

蒋维楣 曹文俊 蒋瑞宾

气象出版社

X16
4424

977309

X16

U4-6

空气污染气象学教程

蒋维楣 曹文俊 蒋瑞宾 编著

气象出版社

(京) 新登字046

内容简介

本书系由中国气象局科教司按“八五”规划，在原南京大学、南京气象学院和北京气象学院三所院校空气污染气象学课程长期教学实践和多次编印的讲稿基础上统一组织编写的大气科学系，大气物理和大气环境等专业本科生用教科书。本书系统地讲授空气污染气象学基本原理、处理方法和应用。

全书共分七章，主要内容包括：大气污染与气象因子的关系；基本理论处理；理想条件下和非均一下垫面条件下空气污染物散布的模式处理；城市与区域多源扩散的模式处理；实验研究方法；空气污染气象学应用等。

本书供高等院校大气科学专业的本科生、研究生及教员使用；也可供工程技术、科学研究、环境、能源、化工、冶金以及国防、卫生等部门的技术人员参考阅读。

空气污染气象学教程

蒋维楣 曹文俊 蒋瑞宾

责任编辑：刘生长 终审：周诗健

封面设计：牛涛 责任技编：席大光 责任校对：启科

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

开本：850×1168 1/32 印张：18.875 字数：486千字

1993年11月第一版 1993年11月第一次印刷

印数：1—3500

ISBN 7-5029-1318-1/P·0577 (课)

定价：8.20元

前 言

空气污染气象学的设课和教学目的是：让学生掌握如何运用气象学的原理和方法，处理以大气扩散为核心的空气污染问题的知识技能和实用本领，包括理论和实验，数学模拟和物理模拟。

空气污染气象学作为一个学科领域，它既是大气科学的一个新分支，又是环境科学的一个重要组成部分。它研究大气环境中由自然因子和人为因子支配构成的大气污染系统的基本特征和变化规律，并运用气象学方法研究空气污染物自源进入大气后的散布规律。目的在于有效地控制并防治大气污染的发生与发展，改善环境空气质量。空气污染气象学处于交叉学科地位，涉及的面很广，应用性很强。

在我国，70年代中期开始设立这门课程，已历时15年了。在这期间，随着学科不断发展，教学内容和教材不断增补更新，但终未能出版一本正式的教科书供教学使用。这次我们根据国家教委气象教材组的安排，着手编写本书，并定名为《空气污染气象学教程》。本书以南京大学大气科学系“空气污染气象学”讲义为基础，并汇集了南京气象学院、北京气象学院等院校的有关教材内容和特点。全书共分七章，第一章绪论，概述了空气污染问题及其影响因子以及空气污染气象学的研究内容、意义和方法。第二章讲述了运用气象学原理，对空气污染气象学的核心问题所作基本理论处理的方法。第三章和第四章分别就理想（均一）条件下和非理想（不均一）条件下的大气扩散问题及其处理作了全面细致的讲述。第五章则专门就城市与区域扩散问题及其处理作了讲述，由于有些领域的深入讨论似已越出本课程教学内容范围，因此只就其问题的各个方面作了简要介绍。第六章和第七章则以

相当大的篇幅讲述空气污染气象学实验研究领域的一些常用方法，着重说明其基本方法和原理。另外，就空气污染气象学的应用方面作了介绍，旨在让学生联系实际学习掌握本课程的基本内容。空气污染气象学近一二十年的进展主要表现在以下几方面。

(1) 大气边界层和湍流场理论与实验研究的进展和大量成果引入本学科领域；(2) 空气污染气象学的数学、物理和实验模拟研究逐步深入到非均一下垫面条件和各种特殊大气过程对空气污染物散布影响的研究领域；(3) 随着空气污染物排放与输送高度增加、尺度变大以及一些跨国界的中远距离输送及其后果的产生，空气污染气象学研究涉及的大气运动尺度更大，扩散机制和影响因子更多更广。在各章内容编写中我们注意这些新的进展和新材料的引入。

本书由南京大学大气科学系蒋维楣主编。第一、二章由北京气象学院蒋瑞宾编写；第六、七章由南京气象学院曹文俊编写；蒋维楣编写了其余各章并对全书作了统稿和审校。在本书编写出版过程中曾得到作者所在单位和其他兄弟院校有关教授专家的支持、关心和帮助，在此谨致谢意。限于我们的学识水平和经验，书中错误和不足之处实属难免，竭诚希望得到批评指正。我们亦希望通过今后的教学实践不断修改完善这份教材。本书图稿由南京大学大气科学系石宗祥先生绘制，在此深表谢意。

作 者

一九九二年七月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
§1 空气污染问题.....	(1)
§2 影响空气污染物散布的主要因子.....	(8)
§3 空气污染气象学研究.....	(18)
第二章 空气污染物散布的基本理论处理	(24)
§1 大气扩散与空气污染物散布的一般描述.....	(24)
§2 梯度输送理论的基本处理.....	(34)
§3 湍流统计理论的基本处理.....	(49)
§4 相似理论的基本处理.....	(60)
§5 三种基本理论处理的比较与讨论.....	(65)
§6 现代新的扩散模拟方法的原理与发展 简介.....	(68)
第三章 理想条件下空气污染物散布的模式处理	(76)
§1 连续点源高斯扩散公式.....	(77)
§2 连续线源、面源和体源扩散计算公式.....	(86)
§3 大气扩散参数.....	(94)
§4 烟流抬升高度.....	(171)
§5 其它非扩散过程.....	(212)
§6 各种条件下的扩散计算.....	(243)
第四章 非均一下垫面条件下的空气污染物散布	(296)
§1 局地建筑物影响与扩散处理.....	(296)
§2 山地地形影响与扩散处理.....	(317)
§3 水陆交界下垫面影响与扩散处理.....	(355)

第五章	城市与区域大气扩散	(386)
§1	城市边界层与空气污染气象学特征.....	(386)
§2	城市大气扩散模式处理与应用.....	(395)
§3	城市大气扩散模式研究与多源扩散应用.....	(411)
§4	区域大气扩散.....	(424)
第六章	空气污染气象学的实验研究方法	(450)
§1	示踪物浓度测量法.....	(450)
§2	光学轮廓法.....	(459)
§3	标记粒子轨迹法.....	(463)
§4	激光测烟法.....	(471)
§5	湍流测量法.....	(480)
§6	空气污染物散布的流体物理模拟.....	(497)
第七章	空气污染气象学应用	(510)
§1	厂址选择与烟囱高度设计.....	(510)
§2	大气环境质量评价.....	(526)
§3	城市与区域环境规划.....	(552)
§4	环境容量与空气污染控制.....	(561)
§5	空气污染预报.....	(567)
§6	全球性空气污染气象学问题.....	(584)

第一章 绪论

空气污染气象学是近代大气科学研究的一个新的分支学科。它作为大气环境问题研究与应用的一个重要领域，研究排放进入大气层的空气污染物的稀释扩散、转化、迁移和清除的规律，模拟并预测空气污染物的浓度分布及其对环境空气质量的影响。本章首先阐述空气污染问题，空气污染物散布与气象因子的关系，以及空气污染气象学研究的内容、意义及其发展。

§1 空气污染问题

一、空气污染

如图1.1示意的途径与系统中，自污染源排放的空气污染物，在一定条件下，历经各种大气过程而达到接受体。这里的核心过程则是大气输送与扩散过程以及在这一过程中发生的迁移变化和清除过程。发生这些过程的范围小至几百米，大至区域、洲际乃

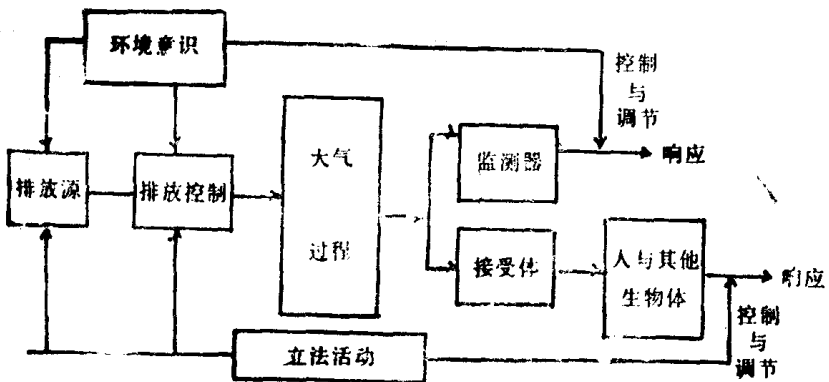


图1.1 大气污染系统与途径

至全球性各种不同尺度。任何情况下，大气层总是一个把污染物从源地输送到接受体的完整体系，而且大多数情况下，它把污染物可消散稀释到人类可以承受的水平。但大气的稀释扩散与输送率的时空变化很大，支配因素很复杂。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，有时甚至会相当大范围地受到沾污并造成危害。于是，定义空气污染是指：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，从而构成了空气污染。显然，这里的三个基本组成要素是：源、污染物排放并达到一定浓度以及构成对人的危害和影响。

自然状态下的洁净大气是由氮、氧、氩、二氧化碳等正常成分的混合气体和水汽以及一些悬浮的固态或液态气溶胶粒子组成，其主要成分在离地高几十公里以下的大气层里，组成比例基本不变。自然大气中亦有微量的其它气体成分，如氟、氦、氖、氙等惰性气体及臭氧、二氧化氮、二氧化硫、一氧化碳等，但量的总和极少，不到空气总容积的0.01%。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。它是指在自然净化能力之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。把满足一定环境目标的污染物排放量定为容许排放总量。只有当污染物排放量超过大气的自净能力，即超过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，就会构成空气污染的。其关系如图1.2示意。由图可见，我们的任务在于：一方面要减少乃至消除空气污染物，另一方面则要摸清规律，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。显然，空气污染状况，包括上述环境容量或容许排放总量，都会随着气象条件等因素的不同而变化的，也就是说，空气污染问题与

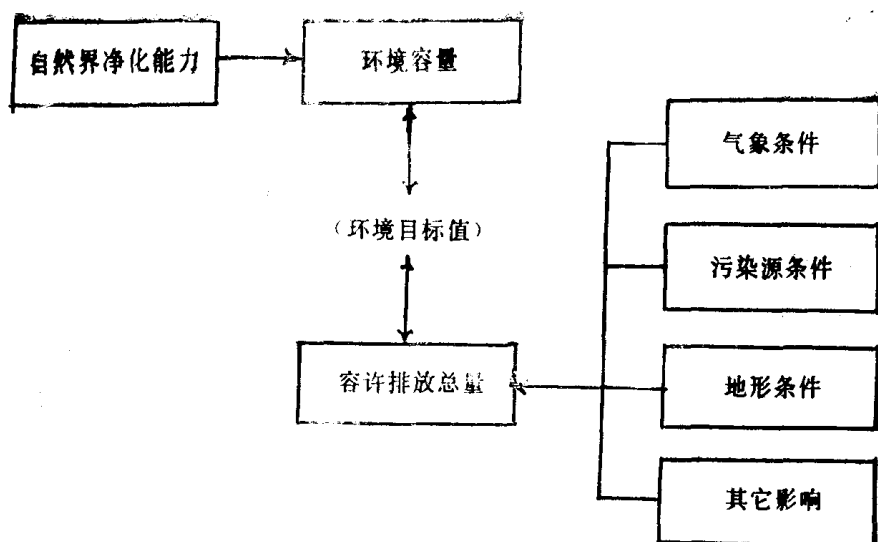


图1.2 环境容量与容许排放总量

气象条件有着十分密切的关系。空气污染物的散布的研究与大气科学的许多基本理论和应用有关。也就是说，应该运用气象学原理与方法研究并处理空气污染问题。

二、空气污染物及其浓度

(一) 空气污染物

以各种方式排放进入大气层并有可能对人和生物、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之为空气污染物。迄今，认为对人类危害较大的，已被人们注意的就有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之为二次污染。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：

1. **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，自分子大小到大于10微米粒径的各种微粒，有飘尘、

降尘等，总称总悬浮微粒（TSP）。

2. 碳的氧化物。主要系二氧化碳、一氧化碳等气体污染物。

3. 氮氧化物。主要系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。

4. 硫化物。主要的是二氧化硫，这是迄今认为的最主要的空气污染物；此外，还有如硫化氢等气体污染物以及由二氧化硫化学转化生成的硫酸盐等酸性污染物。

5. 卤化物。主要的有氟化氢、氯气和氯化氢等气体污染物。

6. 碳氢化合物。主要包括烷烃、烯烃和芳烃类复杂多样的含碳和含氢化合物。

7. 氧化剂。主要是指在空气中具有高度氧化性质的一些化合物，如臭氧及其它过氧化物。

8. 放射性物质。

（二）空气污染物浓度

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，毫克/米³；一是体积浓度，污染物体积与整个空气容积之比，ppm为单位，即污染物体积占空气容积的百万分之一，亦可用ppb、ppt等。显然，它适用于气体污染物计量浓度。两种浓度单位可用下式换算：

$$X = Y \frac{A}{22.4}, \quad \text{毫克/米}^3 \quad (1.1)$$

$$Y = X \frac{22.4}{A}, \quad \text{ppm} \quad (1.2)$$

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或克分子量。

（三）空气污染物的排放源

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。污染源与污染物的分类关系如图1.3所示。

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

大气污染

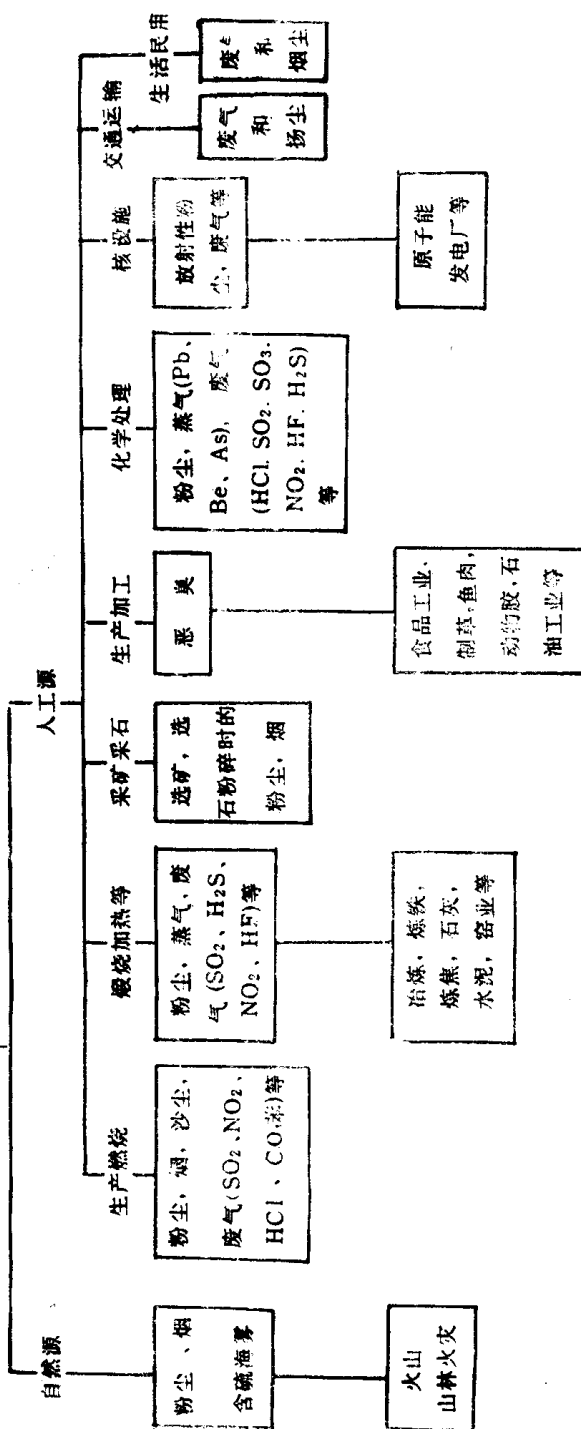


图1.3 空气污染源与空气污染物

行分类。

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。

(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生和有害气体，以及交通运输的废气排放源等。

2. 按污染物排放方式分类

(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。

(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。

(3) 瞬时源 污染物以突发性方式在短时“瞬间”排放的污染源。

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。

(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 无规则或泄漏散逸向大气层排放污染物的源。

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。

(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。

5. 按污染物排放口的形式分类

(1) 点源 污染物的排放口呈一定口径的点状排放的污染

源。

(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的再分布，常以点、线、面、体源的形式，分类选用适当的大气扩散模式予以处理。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，其单位为克/秒或公斤/小时等；对线源，源强是单位时间、单位长度排放的污染物质量，单位为克/(秒·米)；对面源，源强是单位时间、单位面积上所排放污染物的量，单位为克/(秒·米²)或公斤/(小时·公里²)。上述是指连续源排放的源强，而对于瞬时源，其源强则是以一次释放污染物的总量表示的，其单位为公斤、克等。

三、空气污染的危害与影响

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，主要的归结于以下方面：

1. 对人体健康的危害。
2. 对生物体的危害，包括对动物与植物的危害。
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。
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，包括如温室气体效应、气溶胶颗粒物作用和臭氧层破坏等方面的作用和危害。

5. 对酸雨威胁的作用, 降水酸化和其它酸性沉积物的生成都是空气污染的直接后果。

上述诸项中, 有的早已为人们熟知, 有的则是开始为人们认识, 这些构成了空气污染气象学研究与应用的重要课题。

§2 影响空气污染物散布的主要因子

对大气污染状况的监测工作中, 常常会发现, 在同一地点发自同一污染源的空气污染物, 对其浓度监测结果的分析表明, 有时可测到很高的浓度, 有时却测不出来, 不同时间的测量值也有很大差异。这固然与污染源排放条件的变化以及采样点位置的选取有关, 但主要是气象条件的影响所致。大气扩散的理论研究和试验研究表明, 在不同的气象条件下, 同一污染源排放所造成的地面污染物浓度可相差几十倍乃至几百倍。这是由于大气对污染物的稀释扩散能力随着气象条件的不同而发生巨大变化的缘故。日常观察经验也发现, 有时烟囱排出的烟流像一根带子那样飘向远方而迟迟不散开; 另一些时候, 烟气一排入大气就很快散布开来与周围空气混合。不同的烟流形状反映不同的气象状况, 也意味着大气的稀释扩散能力不同。烟气向四周散布的速率越高, 单位时间参予同烟气混合的空气就越多, 也就表示大气的稀释扩散能力越强, 污染物质将会很快被稀释到人类可以接受的程度, 不致造成污染危害。

一、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大气过程, 首先是大气边界层湍流活动支配。

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、地表特征而变, 一般在 $1-2$ 千米。在这一层里, 气流受地面摩擦力和下垫面地形地物的影响, 并受这一层里的动量、热量、水汽和其它物质的输送及其通

量的支配。因此，空气污染物的散布与其密切相关。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米以内。在这层中，分子粘性应力还占有重要地位，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。

2. 近地层 该层高度可达50—100米。这一层直接受下垫面的影响，因此气象要素有明显的日变化。这一层里湍流应力远超过分子粘性应力，柯氏力与气压梯度力可以忽略不计，大气结构主要依赖于垂直方向的湍流输送，而动量、热量和水汽的湍流垂直输送通量随高度变化很小，故又称常通量层。

3. 上部摩擦层(Ekman层) 从近地面层到大气边界层顶。在这一层里，柯氏力、气压梯度力与湍流应力达到同样量级。

由于边界层的厚度随时间和地点而变，即因地表性质不同，可分为海洋边界层、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，空气污染问题亦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，波动愈接近地面愈剧烈，随着接近边界层的上边界而逐渐减弱为零。

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 ε （在确定湍流能量的补充时，与切应力和热通量有关）来表示。混合作用的尺度以湍流积分尺度表示：

$$L_t = \int_0^\infty R(t) dt, \quad L_x = \int_0^\infty R(x) dx$$

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 τ ,以 $u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$ 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 Ri 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

$$L = -\frac{u_*^3}{\frac{g}{T} \frac{H_T}{\delta C_p}}, \text{ 以及混合层厚度 } z_i \text{ 等参量表征。}$$

二、风和湍流

1. 风

空气相对于地面的水平运动称为风,它有方向和大小。排入到大气中的污染物在风的作用下,会被输送到其它地区,风速愈大,单位时间内污染物被输送的距离愈远,混入的空气量愈多,污染物浓度愈低,所以风不但对污染物进行水平搬运,而且有稀释冲淡的作用。同时污染物总是分布在污染源的下风方,于是在考虑风速和风对污染物浓度的影响时,常引入污染系数的概念:

$$\text{污染系数} = \frac{\text{风向频率}}{\text{平均风速}} \quad (1.3)$$

由式可知,风频低,风速高,污染系数小,意指空气污染程度轻。另外,风随高度的变化亦有影响。

2. 湍流

湍流是一种不规则运动,其特征量是时空随机变量。由机械或动力作用生成机械湍流,如近地面风切变,地表非均一性和粗糙度均可产生这种机械湍流活动。由各种热力因子诱生热力作用形成的湍流称热力湍流,如太阳加热地表导致热对流泡向上运动,地表受热不均匀或气层不稳定等都可引起热力湍流。一般情况下,