

大气环境学

唐永奎 曾星舟 编著



中山大学出版社

大气环境学

唐永奎 曾星舟 编著

中山大学出版社

大 气 环 境 学

唐永鑫 曾星舟 编著

*

中山大学出版社出版发行

广东省新华书店经销

广州红旗印刷厂印装

*

850×1168毫米 32开本 12.625印张 31万字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数1—2200册

ISBN7-306-00061-6/X·1

统一书号: 13339·29 定价: 2.15元

内 容 简 介

大气环境学是研究物质和能量在大气圈中，特别是在行星边界层的水平和垂直分布、变化和运动的规律。全书共分八章，重点论述影响大气扩散的基本因素，以及在这些因素作用下形成的大气扩散规律，并进行了数学模拟。

本书可作为环境科学、大气科学、地理系有关专业本科生、研究生的教材和参考书，也可供从事环境科学研究和环境管理工作的人员作参考之用。

61-171.5

序

环境科学经过上百年、特别近几十年的发展，进入了成熟阶段，环境科学已为国内外广大人民所认识和承认：

由于环境科学具有明确的研究对象，它逐步形成系统的理论和研究方法。

特别是，它表现出有解决环境问题的能力，使五十至六十年代世界许多大城市严重污染的环境，现在已逐步获得改善，有的还发生了本质变化，成为清洁美丽的城市。此外，江、河、湖、海的水质，全球的空气和广大农村的环境均有所改善，国内也有类似的情况。

环境科学具有较庞大的体系，有许多分支学科，其中环境学是环境科学中一个主要分支。它包括大气环境学、水体环境学、土壤环境学、生态环境学、环境质量评价、环境管理和环境规划等。本书是环境学中的一个小分支。

本书着重介绍污染物在不同大气环境中的迁移扩散。首先分析在平原地区大气扩散的基本规律和计算模式，然后较详尽分别论述山地丘陵区、海岸带和城市大气环境的复杂性和特殊性，及其对大气扩散的影响，从而归纳出这些特殊环境大气扩散的特殊规律，指出模拟这些特殊规律的途径、方法和手段。最后介绍了在各种自然环境中均可能出现的特殊气象条件下大气的扩散及其模拟，并对中距离扩散作了简要论述。各章中除列举了国际上常用的大气扩散模式以外，对数值模拟方法作了重点介绍，并

举有特例说明该方法的运用。

本书是本人与曾星舟合作写成。采用的资料为1987年以前国内、外发表的有关书籍和论文,不少是作者及其指导的研究生多年研究的成果,可作为环境科学系及有关专业本科生和研究生教科书或参考书,也可供从事环境科学研究和从事实际工作的人员参考。

书中错误之处,希读者批评指正。

唐永奎

1987.夏

目 录

第一章 绪论	(1)
一、研究对象和任务.....	(1)
二、发展的动态.....	(2)
三、基本理论.....	(4)
(一) 大气边界层理论.....	(4)
(二) 大气层光波筛选理论.....	(5)
(三) 气溶胶界面理论.....	(5)
四、基本研究方法.....	(6)
(一) 大气监测.....	(6)
(二) 低空探测.....	(6)
(三) 模拟.....	(6)
第二章 大气	(8)
一、大气的结构和组成.....	(8)
(一) 大气的结构.....	(8)
(二) 大气的组成.....	(11)
二、大气的能量.....	(13)
(一) 能量来源及其变化.....	(13)
(二) 气温.....	(14)
(三) 大气稳定度.....	(14)
(四) 混合层高度.....	(21)
三、大气的水平运动——风.....	(23)
(一) 自由大气中的风.....	(23)

(二) 行星边界层中的风.....	(25)
参考文献.....	(30)
第三章 大气湍流	(31)
一、大气湍流的性质.....	(31)
(一) 大旋涡.....	(32)
(二) 中旋涡.....	(32)
(三) 小旋涡.....	(33)
(四) 微小旋涡.....	(33)
(五) 旋涡与主流.....	(34)
二、湍流运动.....	(35)
(一) 平均流和湍流.....	(35)
(二) 湍流判据.....	(36)
(三) 湍流状况.....	(43)
三、湍流运动方程.....	(44)
(一) 粘滞性.....	(44)
(二) 湍流切应力.....	(45)
(三) 尤拉方程.....	(47)
(四) 内维-斯托克斯方程.....	(47)
(五) 雷诺方程.....	(53)
(六) 边界层方程.....	(54)
四、湍流边界层能量的转化.....	(61)
(一) 湍能的转化.....	(61)
(二) 能谱分析.....	(63)
(三) 相关分析及其能湍之间关系.....	(65)
(四) 能量方程.....	(69)
五、湍流扩散.....	(72)
(一) 基本概念.....	(72)
(二) 基本理论.....	(74)

(三) 扩散方程.....	(88)
参考文献.....	(90)
第四章 平原地区的大气扩散	(92)
一、大气扩散的基本特点.....	(92)
二、常用的扩散模式.....	(93)
(一) 高斯扩散模式.....	(93)
(二) 萨屯扩散模式.....	(99)
(三) 赫-帕斯奎尔模式.....	(102)
三、烟气抬升.....	(105)
(一) 烟气抬升过程.....	(105)
(二) 影响烟气抬升的因素.....	(107)
(三) 烟气抬升模式.....	(107)
四、扩散参数.....	(117)
(一) 浓度法.....	(117)
(二) 示踪法.....	(119)
(三) 照相法.....	(121)
(四) 激光雷达法.....	(123)
(五) 超声风速仪法.....	(125)
(六) 经验法.....	(126)
五、烟囱高度上的风速.....	(136)
六、浓度计算值.....	(137)
七、举例.....	(137)
参考文献.....	(139)
第五章 山地丘陵区的大气扩散	(141)
一、影响大气扩散的主要因素.....	(141)
(一) 山谷风.....	(141)
(二) 逆温.....	(146)
(三) 过山气流.....	(147)

(四) 湍流·····	(149)
二、几种简易的大气扩散模式·····	(154)
(一) 丘陵、山地高于烟云高度·····	(154)
(二) 烟云超越丘陵和山地·····	(158)
(三) 举例·····	(160)
三、扩散参数的探讨·····	(161)
四、数学模拟·····	(163)
(一) 流场模拟·····	(163)
(二) 浓度场模拟·····	(205)
参考文献·····	(209)
第六章 海岸带的大气扩散 ·····	(210)
一、定义和范围·····	(210)
(一) 定义·····	(210)
(二) 范围·····	(210)
二、影响大气扩散的主要因素——海陆风·····	(211)
(一) 海陆风地表特征·····	(211)
(二) 海陆风环流·····	(213)
(三) 影响海陆风的因素·····	(215)
三、扩散参数·····	(220)
四、数值模拟·····	(222)
(一) 流场模拟·····	(222)
(二) 浓度场模拟·····	(261)
五、硬件模式·····	(268)
参考文献·····	(269)
第七章 城市的大气扩散 ·····	(271)
一、城市环境·····	(271)
二、影响城市大气扩散的主要因素·····	(278)
(一) 城市环境因素·····	(278)

(二) 大环境因素.....	(286)
三、常用的扩散模式.....	(289)
(一) 高架点源.....	(289)
(二) 线源.....	(300)
(三) 面源.....	(310)
(四) 多源模式.....	(319)
四、数值模拟.....	(321)
(一) 复合源二氧化硫的扩散.....	(322)
(二) 汽车尾气的光化学产物的扩散.....	(332)
(三) 城市建筑物对污染物扩散的影响.....	(334)
参考文献.....	(345)
第八章 特殊气象条件下的大气扩散和中距离输送	(348)
一、逆温下的大气扩散.....	(348)
(一) 逆温现象.....	(348)
(二) 逆温条件下的扩散模式.....	(352)
二、小风速条件下的大气扩散.....	(359)
(一) 静风条件下的大气扩散.....	(359)
(二) 准静风条件下的大气扩散.....	(360)
(三) 小风条件下的大气扩散.....	(361)
三、中距离输送.....	(373)
(一) 中距离扩散尺度的确定.....	(375)
(二) 中距离扩散特征及其影响因素.....	(376)
(三) 经典扩散理论的适用性.....	(379)
(四) 中长距离迁移模式.....	(381)
(五) 沉降和清洗作用.....	(387)
参考文献.....	(391)

第一章 绪 论

当代世界五大问题：能源 (Energy)、环境 (Environment)、生态 (Ecology)、人口 (Population) 和污染 (Pollution)，即所谓 3E 和 2P 问题。这五个问题是相互关联的，可概括为“环境问题”。二十世纪以来，特别六十年代以来，各个学科深入环境领域进行研究，形成许多边缘学科，如环境地质学、环境化学和环境医学等；七十年代以后，更向纵深方向发展，逐渐形成完整的环境科学基本理论和研究方法，构成多学科的环境体系。这个体系的核心学科为环境学，其中可分为大气环境学、水体环境学、土体环境学和生物环境学等。

一、研究对象和任务

大气环境学是研究物质和能量在大气圈中，特别在行星边界层中的水平和垂直分布、变化和运动规律的科学。

由于地球表面有海洋和陆地，陆地上山川起伏，地形变化多端，大城市和特大城市兴起，高层建筑密集，加上人类的活动，深刻地影响着近地面大气层中空气的流动，促使空气运动规律复杂化。研究在海陆边界层、山地边界层和城市边界层内，物质和能量的迁移和转化的特殊规律，便是大气环境学研究的主要内容之一。本书除阐明物质和能量在行星边界层内运动的一般的、普遍的、基本的规律以外，着重论述在近地面大气层迁移、转化的特殊规律。

大气环境学是基本理论和应用科学之间的边缘学科。它须研

究物质和能量在大气中迁移和转化的物理和化学过程，也须研究这些过程对生态系统和人群健康的影响，及其控制和预防的途径。

二、发展的动态

大气环境学是新兴科学。而它的形成和发展经历了上百年的历史。在五十年代以前，大气圈中物质转变的化学过程和迁移的物理过程分在两条途径进行研究，大气圈的形成和大气圈层中物质的来源、迁移和转化为地球化学和化学地理的研究内容之一。大气运动为气象学的研究内容。此时可算为大气环境学的萌芽阶段。

第二次世界大战以来，世界工业发达国家在大气中广泛进行核试验和建立核电站，为了预防放射性核素在大气中扩散，进行了大量大气扩散试验和研究，1968年D. H. 斯莱德出版的《气象学与原子能》一书，是这方面研究的系统总结。大战以后，各国为了振兴经济，工业化和城市化迅速进展，各种污染物质大量排入大气层中，特别城市大气中出现污染、甚至严重污染，以致造成污染事件。例如1948年美国洛杉矶出现的光化学烟雾，1954年英国伦敦出现的硫酸烟雾，以及1970年日本东京常出现的硫酸烟雾和光化学烟雾混合烟雾等，影响范围之大，受害人数之多，为历史上所未见。城市大气污染的防治便一度成为各国环保部门的一项重要工作。由于上述原因和社会的迫切需要，促使对大气中物质的化学和物理过程进行了广泛而深入的研究。大气化学便从地球化学和化学地理中分化出，成为独立学科。五十年代以来，《大气化学》和《大气污染化学》的专著不断出现。

由于边界层理论的建立和发展，以及对大气湍流的深入研究，揭露了物质在大气中扩散(Diffusion)的规律。分子相似理论、混合长理论、统计理论和湍流相似理论等相继出现，为从理论上阐

明大气规律，建立扩散数学模式，描述物质浓度在大气中变化的规律，依此进行预测预报，以预防烟雾事件突然袭击提供了有力工具。大气扩散论著如雨后春笋大量出现，其中不少名著如萨屯 (Sutton, O. G.)《微气象学》，巴斯奎尔 (Pasquill, F.)《大气扩散》。为了专门研究污染物扩散，建立了污染气象学。

由于物质在大气中发生的化学和物理过程同时进行和相互影响，将两者截然分开进行研究，每每不能很透彻地阐明大气环境问题形成的机理，更不易找出其有效解决的途径，因此，七十年代以来，大气环境工作者提出将两者综合进行研究。从而出现了《大气污染》这类著作，为大气环境学的建立“鸣锣开道”。

由于大气扩散理论及依此建立的数学模式，只实用于湍流稳定时的平原地区，事实上，湍流场是不稳定的，下垫面异常复杂，理论和模式的运用有一定局限性。七十年代以来，国际上加强了对污染物在海陆边界层、复杂地形和城市边界层中弥散过程的研究。我国的大气环境科学工作者在北京、天津、沈阳、太原、兰州、乌鲁木齐、南宁、上海、茂名、深圳等城市也进行过类似的实验研究。这些实验研究促使大气环境科学的理论向纵深发展，并大大提高了解决实际问题的能力。

由于欧、美各国多年来采取高烟囱排放措施，烟囱多在250米以上，最高者达360米。排放的二氧化硫和氮氧化物，在大气中形成硫酸和硝酸气溶胶，大气中没有碱性物质将其中和时，这些酸性气溶胶转入云层，溶化在雨滴中，下降为酸雨。它影响范围广大，使土壤和湖泊水质酸化，从而对农、林、牧、渔业产生影响，酸雨便成为北美和西北欧一个突出的环境问题。八十年代以来，加强了对酸雨的研究，进行了较大范围的、国际性的野外测定和室内模拟试验，以探求酸雨形成的机理，及酸性气溶胶中距离和远距离的输送规律。六十年代以前流行大气扩散的理论和模式，限于研究10公里以内的物质输送。因此，研究几十公里、

甚至几百公里的中距离和远距离输送与干沉降和湿沉降，以及弥散 (Dispersion) 理论和模式成为当前国际上关心的问题。我国第七个五年计划 (1986—1990 年) 环境保护科学研究的攻关题目中，就有研究西南的四川和贵州与华南的广东和广西的酸雨课题。

对人群健康危害较大的重金属微粒，在大气中弥散，形成气溶胶。致癌物质如苯并(α)芘等多环芳烃吸附在气溶胶上，随气流飘荡，大气中许多化学反应，如二氧化硫的氧化作用和光氧化作用等几乎在气溶胶界面上进行。七十年代以来，气溶胶的化学组成 (包括无机、重金属和有机组分)，气溶胶界面上化学反应的机理。气溶胶组成的粒子谱、气溶胶的沉降和弥散过程，亦为重要研究课题。这些研究近年进展甚快。兰州、沈阳和太原等城市对大气溶胶的研究获得了良好结果。我国许多城市对硫酸气溶胶形成机理有较深入研究。在兰州和深圳市，对光化学作用形成强氧化剂和光化学烟雾气溶胶也进行过调查研究。

到目前为止，大气环境科学尚处在年青阶段，基本理论尚待深化，研究方法须充实和完善，不过该学科具有青春活力，正快速向前发展。

三、基本理论

大气环境学是新兴的边缘学科，在该学科发展的最初阶段，必需借用其他学科的理论和方法，然后在自身的研究发展中将其融合成为本学科的基本理论和方法。

(一) 大气边界层理论

大气环境学主要研究范围为行星边界层，即为地面向上到 1000 至 2000 米高度的大气层。此层大气底部，直接与地面接触，其间存在界面。当空气沿地表运动，在界面上产生摩擦力。由于摩擦力的反作用，近地面空气层出现扰动，这种扰动可波及到

1000至2000米高度，因此，此层称为摩擦层或扰动层。地表受太阳照射加热增温，形成浮力，促使空气上下对流，故又称为机械混合层。因此，此层空气运动的特点与自由大气显然不同。在行星边界层中物质的弥散过程就制约于此层大气运动。由于行星边界层内包含有海陆边界层、山地边界层和城市边界层，使局地环流更趋于复杂化，物质在大气中弥散规律有其地区特殊性。大气边界层理论是大气环境学中的基本理论，该理论是由流体力学中流体粘滞性理论引伸发展而来。

（二）大气层光波筛选理论

太阳光是地球表面和大气层的能量来源，由此引起大气中物质发生化学反应，通称光化学反应。太阳光由许多光波组成，波长不同，具有的能量不同，光波愈短，能量愈高。

大气圈从地面至高层，不同层次的化学组成不同。大气圈主要由氮、氧和氩组成，此外含有二氧化碳和水汽。高度愈大这些气体含量愈少，即愈高空气愈稀薄。约20公里以上平流层内是以臭氧为主的气层，通称为臭氧层。它对太阳光波有筛选作用，其中紫外线被臭氧层吸收，透过臭氧层到达地面的可见光，其波长为2900至8000埃（ $\text{\AA}$ ）（即为2.9—8.0微米）。因此，在臭氧层及其上部，光化学过程是在紫外线作用下进行；臭氧层以下，特别在行星边界层内，光化学过程是在可见光作用下进行。两者的化学反应有本质的不同。研究大气圈光化学作用必须遵循这一基本理论。

（三）气溶胶界面理论

固体和液体在空气中分散后，形成气溶胶。在气溶胶界面上能吸附氧气、水汽，及其他气态和液态、固态物质，它们相互作用，发生化学反应。例如二氧化硫转化为三氧化硫，再与水汽结合，形成硫酸，就是在气溶胶界面上发生，铁、锰等重金属参加

其中起触媒作用。可见大气发生的化学反应，与水体中进行的反应的方式是不同的。

四、基本研究方法

大气环境学在于研究进入大气中物质的迁移转化规律。即研究：

- ①物质在大气层中弥散的机理；
- ②物质浓度在大气层中时、空变化的规律；
- ③各种物质在大气中相互作用，形成另一种物质的机理。

此外，在上述研究基础上，还须弄清存在大气中的原生和次生物质对生态系统和人群健康的影响。

要弄清上述问题，常采用下列基本研究方法：

（一）大气监测

大气环境学研究的对象是大气中气体和气溶胶（液滴和固体颗粒物），要监测其活动，需有一套采样和分析、鉴定的方法。

为了使样品有代表性，需进行正确的布点，按源的位置和特点，常采用方格、同心圆和扇形布点法。

（二）低空探测

为了查明物质在大气中的弥散过程，首先须知道空气运动的特点，除收集常规的气象资料外，须进行低空探测，查明风场和温度场的水平和垂直变化，计算扩散参数。

（三）模拟

模拟是大气环境学的重要和常用的研究方法。预测物质在大气中迁移和转化的趋势，须采用这一方法。模拟法分物理、化学和数学模拟。

1. 物理模拟