



城市与建筑风环境的大涡模拟方法及其应用

顾兆林 张云伟 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

城市与建筑风环境的大涡模拟方法及其应用

顾兆林 张云伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

在全球气候变化背景下,城市气候环境问题日益突出,如城市热岛效应问题、城市近地层的逆温层、城市污染与严重雾霾事件等,直接导致城市能耗的增加和居住环境舒适度的降低,并影响着城市居民的身心健康。本书基于城市小尺度及街谷微尺度上风环境及污染物扩散问题,介绍经验、半经验以及理想街谷等经典研究成果;通过实际街谷内大气流动及污染物的测量,揭示其湍流基本特征以及边界影响因素;利用大涡数值模拟方法,研究近地层内建筑(群)、街谷及街区的空气流动及污染物的扩散,为评估或改进建筑(群)与街谷的布局,利用主导风强化城市内部自然环境风场,构建适宜的街区及城市人居环境提供科学依据。

本书可供大气科学、环境科学的研究人员和城市规划专业人员,以及高等院校相关专业师生参考。本书涉及大涡模拟的理论及应用、气固两相流理论,也可供从事计算流体力学和多相流研究的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市与建筑风环境的大涡模拟方法及其应用/顾兆林,张云伟著. —北京:科学出版社,2014. 6

ISBN 978-7-03-040998-0

I. ①城… II. ①顾…②张… III. ①风-大气湍流-气候影响-城市规划-研究②城市空气污染-研究 IV. ①TU984②X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 128809 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:钟 洋
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2014 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:353 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

在全球气候变化背景下,城市大气环境问题日益突出,如城市热岛效应问题、城市近地层的逆温层与城市污染等。城市大气环境问题直接导致城市能耗的增加和居住环境舒适度的降低,并影响着城市居民的身心健康。

城市气候调控及规划已成为国内外城市建设与发展的重大方向。虽然面向城市规划的需要,城市尺度和小区尺度数值模拟系统等城市大气环境定量分析技术得到了应用,但是深刻理解和解决城市大气环境问题,更需要关注城市实际气象和下垫面条件下城市内部建筑、街谷及街区的大气物理与化学特征、大气运动以及污染扩散的过程。《城市与建筑风环境的大涡模拟方法及其应用》一书在小(微)尺度上,讨论城市近地层内建筑(群)、街谷及街区的空气流动及污染物的扩散行为,通过空气流动及污染扩散的研究,评估或改进建筑(群)与街谷的布局,构建适宜的街区及城市人居环境,利用城市的主导风场形成畅通的城市内部的自然环境风场,降低城市的热岛效应、减轻城市环境污染,是一种新的探索。

城市风环境本质上是一个高雷诺数的流动及污染物扩散问题。该书通过实际街谷内大气流动及污染物的测量,揭示城市近地层内建筑风环境的湍流基本特征以及边界影响因素;针对城市建筑风环境的流动特点,构建了植被层湍流、建筑(群)及街谷内流动的数值模拟模型;利用大涡模拟方法,研究街谷内温度分布、街谷内大气稳定度和行驶车辆诱导湍流对街谷内流动,尤其是街谷底部的湍流强度和污染物分布的影响;对于街谷两侧建筑物布局的非均匀性或时变的背景风场(风速、风向)条件,首次揭示了街谷内的大尺度流动及其对污染物扩散的贡献,体现了城市风环境的最新研究成果。

该书作者从事湍流大涡模拟(LES)方法及应用研究,提出了动态混合长度亚格子模式和通用亚格子模式。书中详细介绍了大涡模拟方法的基本理论及亚格子模式、控制方程的数值解法,并应用于植被层湍流、建筑(群)及街谷内流动的模拟,显示了较高的数值模拟精度。因此,该书不仅是城市与建筑风环境数值模拟的研究专著,同时也是介绍大涡模拟理论及应用的著作,值得从事数值模拟和城市环境研究的工作者参考。

陶文铨

2014年1月16日

前 言

城市人居环境是人类聚居的环境,从生态学的观点来看,是一个由人类的社会、经济、自然等因素组成的复合生态系统,是以人为中心,由建筑-道路(网)-生态环境构成的综合体。城市及高层建筑的立体化及集约化发展,形成了独特的城市近地空间人居环境。随着城市用地不断扩展、建成区建筑密度不断增大,城市土地利用和植被覆盖的空间格局发生了显著的变化,林地、耕地面积大量减少,城市地面大部分被混凝土或沥青构成的不透水铺面和建筑物所覆盖。从气候学的角度来看,城市高强度的经济活动和人类活动改变了城市的下垫面环境,也改变了城市原有的区域气候状况,形成一种与城市周围显著不同的局地气候,即城市气候环境。在气象上,表现为同一时间或时间区间城市与郊区的气象要素的不同,形成了所谓的城市环境气象。城市风环境所关注的是,城市气象和下垫面条件下,城市内部建筑、街谷及街区的大气物理性质及其变化的原理,如局地热环境、污染物的扩散与输送。

在全球气候变化背景下,城市气候环境问题日益突出,如城市热岛效应问题、城市近地层的逆温层与城市污染等。热岛效应是城镇化影响区域气候最突出的表现,其强度与城市规模、市区人口数量、能源消耗量及建筑物密度等成正比。由于城市绿地、植被和水面等生态要素的不合理布局,城市的裸露地表面积越来越大,导致城市的近地层经常出现逆温层现象,并成为容易形成城市灰霾的气象条件之一。城市气候环境问题直接导致城市能耗的增加和居住环境舒适度的降低,并影响着城市居民的身心健康。

在国外,城市气候调控及规划已成为城市建设与发展的重大方向。城市气候环境的研究起源于20世纪80年代的德国,并首先提出了面向城市规划的城市气候环境图技术(urban climatic map, UC-Map)。斯图加特(Stuttgart)市是第一个制作城市气候环境分析图的城市并将其应用于城市规划发展中,其后德国颁布了有关制作城市气候环境图的法律VDI-3787的第一部分与第二部分。20世纪90年代德国开始推行适应生态与气候环境的住区政策。1990年以来,世界上许多国家开展了相应的城市气候环境与城市规划技术研究,位于前列的国家有德国、瑞士、葡萄牙、日本、巴西等。城市气候环境图的编制依赖于城市与建筑的风环境模拟与分析。

20世纪90年代以来,我国一些学者针对城市化进程中城市热岛效应导致的城市热气候环境问题,尝试通过合理的城市空间规划与设计来改善城市气候环境,

即在城市总体层面上进行适当调控,采用合理的开放空间布局与设计,兼顾对气候自然调节的规划指标体系的控制,以及编制相关的规划与设计指引。2006年建设部颁布的新的《城市规划编制办法》第三十一条规定,中心城区总体规划应当划定“禁建区、限建区、适建区和已建区,并制定空间管制措施”。但这只是一个原则性规定,从哪些方面来思考各类区域的划分,如何使空间管制规划反映局地气候环境特点,如何使其更具科学性和可操作性,都需要进一步的探索。建筑与规划领域的学者有时通过对城市不同空间位置上气候“局地差异性”的分析,对城市空间形态、建筑布局、环境要素等进行合理组织与设计研究,有目的地引导和控制城市空间中日照和风等气候要素的时空分布,改善、优化城市局部范围内的气候状况。

利用城市大气多尺度定量分析和评估技术,不仅可以定量再现历史气象环境信息,而且能够展现未来城市大气环境的分布与变化,刻画出研究对象由大到小、由粗到细的环境信息。根据研究对象不同尺度的特点,城市大气环境定量分析的技术方法可分为城市尺度和小区尺度数值模拟系统。城市尺度气象数值模式的模拟网格可变,水平格距在0.1~4.0km内可分辨,主要模拟城市尺度的大气热力和动力系统的特征参数,其数值模拟结果可应用于城市的规划分析。小区尺度模式主要应用于城市小区数平方千米的范围模拟,水平网格距为数米可分辨,模拟建筑物周围的气流分布、热环境及其污染状况分布。应该说城市尺度气象模式和小区尺度模式是城市大气环境的有效工具,但是从模拟方法和技术来讲,由于各量化用评估的分指标主要以数值模式计算结果为基础,因此分指标的选取会受到一定程度的限制。例如,城市尺度气象模式中,选择城市布局因子、绿地布局因子、水体布局因子、工业布局因子和通风走廊布局因子;小区尺度模式选择建筑物布局因子、绿地布局因子和水体布局因子。另外,评估指标及各指标的权重等方面还有待于进一步调查研究,加以改进和完善。值得一提的是,对于上述的城市尺度气象模式和小区尺度模式,所采用的结构化网格关于下垫面的描述比较粗糙,容易造成下垫面的失真。即使是小区尺度模式,虽然水平网格格距在数米,但是在近地层的垂直网格仍然显得稀疏,在人群所感知的尺度(平均身高)上通常只有一个或几个网格,模拟结果与真实的风环境仍有较大偏差。

城市不同高度的建筑物(建筑群)交错布置,道路(街谷)纵横,建筑物外墙立面物理性质和街道地表绿化差异很大,导致下垫面特征非常复杂;街谷内的大气稳定度随太阳辐射的日变化而改变;即使稳定的大气来流,在穿行上游建筑群后通常呈现湍流特征,进一步对下游的流动产生复杂的影响。对于城市设计来说,弄清楚建筑物(群)布局与气象条件的关系是十分重要的,即所谓的风环境评估。实际上,随着计算机技术的发展,对于城市下垫面内小(微)尺度的大气流动或风环境评估,计算流体动力学已经成为一种行之有效的研究方法和技术,取得了显著进展,这也是

本书所要讨论的内容。

本书的指导思想是基于城市近地层内建筑风环境的湍流特征,在介绍经验、半经验以及理想街谷等经典研究成果基础上,通过实际街谷内大气流动及污染物的测量,揭示其湍流基本特征以及边界影响因素;基于高雷诺数的大气流动,在介绍湍流模拟方法的基础上,重点讨论大涡模拟方法、高精度亚格子模式及其建筑群大气流动的模拟验证;详细讨论街谷物理模型及边界条件,揭示影响街谷内空气流动与污染物扩散的物理因素,为进一步的数值预报模式研究提供思路;从建筑(群)边界网格处理的角度,研究建筑(群)物理模型的表达方法,提出建筑(群)与绿化带(植被)等的统一多孔介质单元模型,提高数值模拟计算速度,扩大模拟区域。相比于城市尺度气象模式和小区尺度模式,本书在小尺度,甚至微尺度上,专注于城市近地层内建筑(群)、街谷及街区的空气流动及污染物的扩散,这是影响城市居民身心健康最重要的大气环境;通过空气流动及污染扩散的研究,评估或改进建筑(群)与街谷的布局,构建适宜的街区及城市人居环境;利用城市的主导风场形成畅通的城市内部的自然环境风场,降低城市的热岛效应、减轻城市环境污染。全书共分9章,各章主要内容如下:

第1章是绪论,以城市街谷内的流动与污染物研究为例,重点介绍国内外城市大气环境相关研究领域的进展。

第2章介绍街谷内流场及污染物的现场测量,包括测量仪器和方法。通过对不同城市地区多条街谷内污染物浓度垂直分布和日变化特征的现场测量,揭示城市街谷内,尤其是深街谷内的污染物扩散以及日变化特征,分析其影响因素。

第3章针对城市与建筑风环境的高雷诺数的湍流特点,介绍湍流的数值模拟方法,重点介绍大涡模拟方法的基础理论及高精度亚格子模式。

第4章基于有限容积法介绍计算区域离散化和控制方程离散化,用交叉网格上的SIMPLE算法解决离散方程的速度与压力的耦合问题,以交替方向隐式迭代法求解离散方程,以及OpenFOAM流体计算程序库的开发平台。以最典型的理想街谷为例,对街谷的大气流动与污染物扩散进行数值模拟,同时讨论计算区域、网格精度、边界条件及雷诺数等因素的影响。

第5章以单体建筑和建筑群为例,介绍大涡模拟的数值模拟方法,包括经典的建筑物边界的网格结构化处理方法;以风洞实验数据为例,比较不同亚格子模式下大涡模拟方法的精度,表明作者课题组提出的动态混合长度亚格子模式是一种适合大气流动模拟的高精度亚格子模式。

第6章通过大涡模拟,介绍稳定来流的条件下,街谷形状因子、建筑物布局非均匀性及灌木绿化等街谷结构因素对街谷内空气流动与污染物扩散的影响。

第7章介绍物理参数的日变化特征对街谷内流动与污染物扩散的影响。重点讨论背景风速风向、行驶车辆诱导流动及街谷内大气稳定度等对街谷内空气流动

和污染物扩散的影响。

第8章讨论城市街谷内污染物浓度日变化积分效应的综合模拟模式及其应用。

第9章介绍将建筑物作为多孔介质单元的拟固相两相流方法应用于城市风环境的模拟新方法。随着城市风环境模拟尺度的扩大,建筑物及街区等风环境边界的处理成为影响大涡模拟计算速度的关键,本章借鉴气固两相流的理论及曳力系数的处理方法,将建筑物作为不移动的拟颗粒群处理,提出了建筑物多孔介质单元数值模拟方法。单体建筑 and 建筑群的算例表明,建筑物多孔介质单元数值模拟方法在相同的模拟精度条件下,计算量大大减小;同时,所模拟的建筑区域可以扩大,达到小尺度模式的模拟尺度。

多年来,作者课题组从事湍流大涡模拟方法及应用研究。针对城市建筑风环境大气流动的湍流及其高雷诺数的特点,提出了动态混合长度亚格子模式和通用亚格子模式,并应用于植被层湍流、建筑(群)及街谷内流动的模拟,显示了较高的数值模拟精度。利用大涡模拟方法,研究了街谷内温度分布、街谷内大气稳定性和行驶车辆诱导湍流对街谷内流动,尤其是街谷底部的湍流强度和污染物分布的影响;对于街谷两侧建筑物布局的非均匀性或变化的背景风(风速、风向)条件,除了污染物的湍流扩散外,首次揭示了街谷内的大尺度流动及其对污染物扩散的贡献,分析了经验、半经验模式以及理想街谷模型所模拟或预测的结果误差较大的原因。相关研究发表在 *Europhysics Letters*、*Boundary-Layer Meteorology*、*Atmospheric Environment*、*Building and Environment* 及 *Indoor and Built Environment* 等期刊上。

对香港和西安两个不同气候类型的城市街谷内的流动与污染状况,课题组分别进行了现场测量,获得了第一手测量数据,既可以比较不同城市的污染情况,又可以检验数值模拟的精度。关于测量方法与测量结果的总结在本书的第2章。为了改善城市大气环境,降低城市空间的污染物浓度,作者在 *Nature Geoscience* 上撰文提出了基于风环境设计的城市规划的理念。

对于城市与建筑的风环境模拟来说,建筑物通常作为大气流动的固体壁面处理。因为建筑物结构的复杂性,其边界网格处理通常是一个关键问题,计算的大量时间是网格处理。针对建筑物本身的透气性(所谓的穿堂风),作者课题组根据气固两相流模型的思想,提出建筑物多孔介质单元的处理方法,极大地简化了建筑物壁面的处理,计算速度有了很大提高,使得个人计算机所模拟的尺度达到了小区尺度模式的范围,且模拟精度较高。这部分内容见本书的第9章。

实际上,本书是上述研究内容的系统总结。曾经在本课题组的邱剑博士、焦建英博士、张云伟博士、罗昔联博士、苏军伟博士以及王宁硕士等分别做出了自己的学术贡献。张云伟博士直接参与了本书大纲的制定与有关章节的编著工作。

本书的研究工作得到国家科技支撑计划课题“基于生态-气候监测的关中城市群空间规划管控技术与示范研究”(项目编号:2012BAJ15B06-09)和国家科技基础性工作专项项目“典型城市人居环境质量综合调查与城市气候环境图编制”(项目编号:SB2013FY112500)、国家科技基础性工作专项课题“中国北方及其毗邻地区人类活动规律和人居环境状况及变化调查考察”(项目编号:SB2007FY110300-7),以及中央高校基本科研业务费专项资金“现代城市人居环境规划与调控关键技术研究”(项目编号:2009xjtujc10)的资助,特此致谢。

本书非常荣幸获得 2012 年度国家科学技术学术著作出版基金的资助,作者真诚感谢中国科学院院士安芷生教授、周卫健教授和陶文铨教授,中国工程院院士孙九林教授的推荐。

由于作者水平有限,本书难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 城市建筑及街谷微尺度气候环境	1
1.1.1 建筑与城市街谷	1
1.1.2 街谷微尺度气候环境	2
1.2 城市与建筑风环境的研究方法概述	3
1.2.1 现场观测	3
1.2.2 风洞实验	4
1.2.3 数值模拟	4
1.3 街谷物理模型及数值预报模式开发	5
1.3.1 理想街谷模型	5
1.3.2 街谷流动与污染物扩散的(半)经验模式	7
1.3.3 街谷流动与污染物扩散的计算流体力学方法	10
1.4 实际街谷特征及其对空气流动和污染物扩散的影响	12
参考文献	17
2 街谷内流场及污染物的现场测量	25
2.1 香港深街谷内流场及污染物浓度垂直分布的测量	26
2.1.1 实验地点、仪器和方法	26
2.1.2 测量结果与分析	27
2.2 西安市街谷内污染物浓度的日变化测量	30
2.2.1 测量地点与测量仪器	30
2.2.2 测量结果与分析	32
2.3 结语	40
参考文献	41
3 大气湍流的大涡模拟方法及亚格子模式	43
3.1 大涡模拟的基本原理及控制方程组	43
3.1.1 大涡模拟的基本原理	44
3.1.2 滤波函数	44
3.1.3 大涡模拟的控制方程组	46

3.2 大涡模拟的亚格子模式及发展	48
3.2.1 亚格子模式及其分类	48
3.2.2 涡黏性亚格子模式	50
3.2.3 动态混合长度亚格子模式	62
3.2.4 动态混合长度亚格子模式的算例及验证	67
3.2.5 通用亚格子模式	85
3.2.6 通用亚格子模式的算例及验证	86
3.3 结语	94
参考文献	95
4 大涡模拟控制方程的数值解法及应用	102
4.1 控制方程离散化及离散方程组求解	102
4.1.1 控制方程离散化	102
4.1.2 离散代数方程组求解	106
4.1.3 开源软件 OpenFOAM 简介	107
4.2 理想街谷内空气流动与污染物扩散的模拟	109
4.2.1 数值方法	109
4.2.2 理想街谷内流场与污染物浓度分布	111
4.2.3 计算区域的影响	115
4.2.4 网格分辨率的影响	118
4.3 结语	122
参考文献	122
5 建筑(群)风环境的大涡模拟	126
5.1 单体建筑风场的大涡模拟	126
5.1.1 几何模型及边界条件	126
5.1.2 风洞实验概述	127
5.1.3 数值模拟结果及分析	129
5.2 建筑群风场及污染物扩散的大涡模拟	135
5.2.1 风洞实验与计算条件	135
5.2.2 交错式布置建筑群的数值模拟	137
5.2.3 阵列式布置建筑群的数值模拟	143
5.3 结语	147
参考文献	147
6 稳定来流条件下街谷内的大气流动及影响参数的模拟	149
6.1 街谷形状因子及特征尺度对空气流动与污染物扩散的影响	150
6.1.1 真实街谷尺度和实验模化尺度的理想街谷模拟	150

6.1.2 真实街谷尺度深街谷内污染物的分布与扩散	153
6.2 非均匀街谷内空气流动与污染物的扩散	159
6.2.1 非均匀街谷的物理模型及数值模拟	159
6.2.2 非均匀街谷参数对街谷内流动的影响	162
6.2.3 非均匀街谷参数对街谷内污染物分布及扩散的影响	168
6.3 灌木绿化对街谷内流动及污染物扩散的影响	171
6.3.1 植被层模式及数值模拟	172
6.3.2 绿化街谷内大气流动及污染扩散的数值计算	176
6.3.3 绿化植被层对街谷内流动的影响	177
6.3.4 绿化植被层对街谷内污染物分布的影响	178
6.3.5 街谷顶部污染物的扩散特性	180
6.3.6 街谷大气强不稳定条件下的温度分布	181
6.4 结语	182
参考文献	183
7 街谷内物理参数的日变化特征及对大气流动影响的模拟	187
7.1 行驶车辆对街谷内空气流动的影响	187
7.1.1 机动车运动的曳力模型	188
7.1.2 机动车运动诱导流动的模拟方法	189
7.1.3 机动车运动诱导的流场模拟	190
7.2 真实风环境对街谷内空气流动与污染物扩散的影响	199
7.2.1 真实风环境下动态边界条件的设置	200
7.2.2 真实来流条件下街谷内流动的数值模拟方法	202
7.2.3 真实来流条件下街谷内的大气流动	203
7.2.4 真实来流条件下街谷内污染物的分布与扩散	211
7.3 街谷内建筑物表面受热方式对空气流动的影响	214
7.4 结语	215
参考文献	216
8 城市街谷内污染物浓度日变化积分效应的综合模拟模式	221
8.1 城市街谷内污染物浓度日变化的积分综合模式	221
8.1.1 Addison 综合模式	221
8.1.2 积分综合模式	222
8.2 积分综合模式的数值实现	224
8.2.1 积分综合模式对街谷非均匀的描述	224
8.2.2 机动车尾气排放模型	225
8.2.3 背景污染物浓度日变化模式	228

8.3 模式应用	230
8.3.1 数值实现	230
8.3.2 模拟结果与讨论	230
8.4 结语	231
参考文献	231
9 基于多孔介质双流体方法的小区尺度风场大涡模拟	234
9.1 多孔介质建筑风场的双流体数学模型	235
9.1.1 多孔介质建筑的概念及双流体模型	235
9.1.2 多孔介质建筑(群)风场的控制方程组	237
9.1.3 多孔介质建筑(群)风场数值计算的流程	238
9.2 单体建筑风场的大涡模拟	240
9.2.1 计算步骤及实施	240
9.2.2 数值模拟结果及分析	241
9.3 建筑群风场及污染物扩散的大涡模拟	245
9.3.1 计算步骤及实施	245
9.3.2 交错式布置建筑群风场及污染物扩散的数值模拟	245
9.3.3 阵列式布置建筑群风场及污染物扩散的数值模拟	247
9.4 小区尺度风场的多孔介质双流体方法模拟	248
9.4.1 计算区域及简化	249
9.4.2 网格及边界条件	250
9.4.3 数值模拟结果及分析	251
9.5 结语	259
参考文献	260
索引	262

1 绪 论

我国目前仍然处于高速的城市化进程中,城市规模不断扩大,城市人口与日俱增,随之而来的诸如城市污染、极端天气等问题也越来越严重。加之经济增长,城市居民生活水平的提高,我国私人汽车保有量在 2000 年以来快速增加,导致机动车尾气污染成为城市大气环境治理中首要考虑的重点因素之一。虽然现代社会在汽车内燃机技术、尾气过滤及燃料处理等方面有了很大提高^[1],但是汽车尾气污染物仍然是城市污染物的主要来源。研究显示,21 世纪初期北京市内 $PM_{2.5}$ 来源主要是机动车尾气,占 30% 左右^[2]。

在世界各地的城市地区,尤其是超级大都市,机动车尾气污染物经常高于规定标准^[3,4]。在众多的城市大气污染物中,颗粒污染物浓度超出污染物控制标准的现象尤为普遍^[5]。人类生活环境中颗粒污染物浓度对人类的健康有严重影响,能导致多种急、慢性呼吸道疾病和传染病的发病率上升^[6,7]。世界卫生组织研究结果显示,细颗粒污染物($PM_{2.5}$)浓度比粗颗粒污染物(PM_{10})浓度更严重影响人们的健康^[3]。而机动车尾气中的颗粒污染物恰恰处于 $PM_{2.5}$ 的范围,为城市空气中细颗粒污染物的主要来源^[8,9]。城市街谷,作为机动车尾气的直接接收场所,同时又是人类频繁暴露的活动场所,其内部的环境质量和污染控制,成为 20 世纪 80 年代以来,各国和地区政府关注的重点^[4,10]。2013 年以来,我国开始加强对重点城市 $PM_{2.5}$ 浓度的监测与控制工作,但城市冠层内部颗粒物的扩散机制与控制理论仍需更加深入的研究^[11]。

城市街谷内空气污染控制与治理是一个涉及环境、化工、工程力学与城市规划等多学科的技术难题,需要环境保护、城市规划与交通等多个政府部门的通力协作。从改善城市人居环境、合理规划城市布局出发,以实现更有利于街谷内污染物向外扩散为目标,城市街谷内风场特征和机动车尾气污染物的扩散规律成为当前的研究重点,其成果将为政府有关部门制定相应政策、法规提供理论依据。

1.1 城市建筑及街谷微尺度气候环境

1.1.1 建筑与城市街谷

城市街谷是指城市冠层内两侧都有连续的高大建筑物的相对狭长街道。城市街谷与其周围建筑是构成城市冠层结构的基本几何单元。与开放性街谷不同,城

市街谷是城市街道网络中的一个单元,位于城市冠层的内部,其周围有无数的类似街谷存在;开放性街谷又称孤立街谷,是指单一的街谷模型,通常在风洞实验和数值模拟中用到。但是,二者在数值模拟研究时计算区域和边界条件的选取都有很大差异(见图 1.1),内部的空气流动与污染物分布特征也明显不同。事实上,孤立街谷的情形在实际城市环境内很少见,因此大多数研究针对城市街谷或街谷网络的情形。

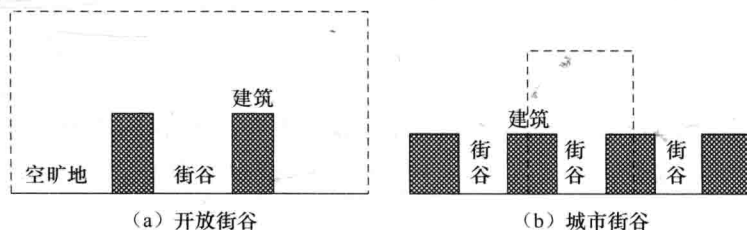


图 1.1 开放街谷与城市街谷模型横截面示意图

1.1.2 街谷微尺度气候环境

城市街谷是城市冠层的基本单元,只是城市大气边界层(urban boundary layer, UBL)底部的非常微小的模块。人为活动已经严重改变了城市边界层的底部粗糙特征,使得城市大气边界层流动具有非常复杂的三维结构,因此很难对其进行详细描述。城市大气边界层按垂直高度大致可分为:城市冠层、城市粗糙层和城市边界层,如图 1.2 所示。在城市大气边界层的底部,从地面到粗糙物单元(建筑、树木等)的高度 z_h ,为城市冠层(urban canopy layer, UCL),它是粗糙层(roughness sublayer, RS)的一部分。城市粗糙层的高度(z^*)与冠层内粗糙单元的高度和密度等参数有关,通常认为 z^* 等于 3~5 倍的 z_h 。紧接粗糙层的上方是惯性子层(intertial sublayer, IS),这里大气流动规律与理想大气边界层相似。在惯性子层上方,边界层大气流动在很大程度上受对流方程控制,这一层被称为城市大气边界层外层(outer urban boundary layer, OUBL)^[12~16]。通常,根据模拟工作中计算区域的选择,将数值模式按尺度分为:中尺度(mesoscale)、局部尺度(local scale)和微尺度(microscale),如图 1.2 所示^[16,17]。中尺度模式又称城市尺度或地区尺度模式,包括一个城市地区的大部分面积,垂直高度包含整个城市边界层;局部尺度又称小区尺度,包括城市核心区的一组建造群或街谷网络,垂直高度一般达到惯性子层内;微尺度模式包括城市核心区域的最基本单元,垂直高度一般在粗糙层内。本书所讨论的城市街谷环境属于微尺度模式范畴。城市街谷内空气流动通常受冠层外自由来流驱动而诱发多旋涡的复杂流场;城市街谷内污染物主要在街谷顶部与冠层外自由流动空气形成交换,通常情况下交换效率不高而导致街谷内污染物累

计和污染物浓度极高。因此,城市街谷内通常形成特征鲜明的大气环境,被称为城市街谷微尺度气候环境^[18]。

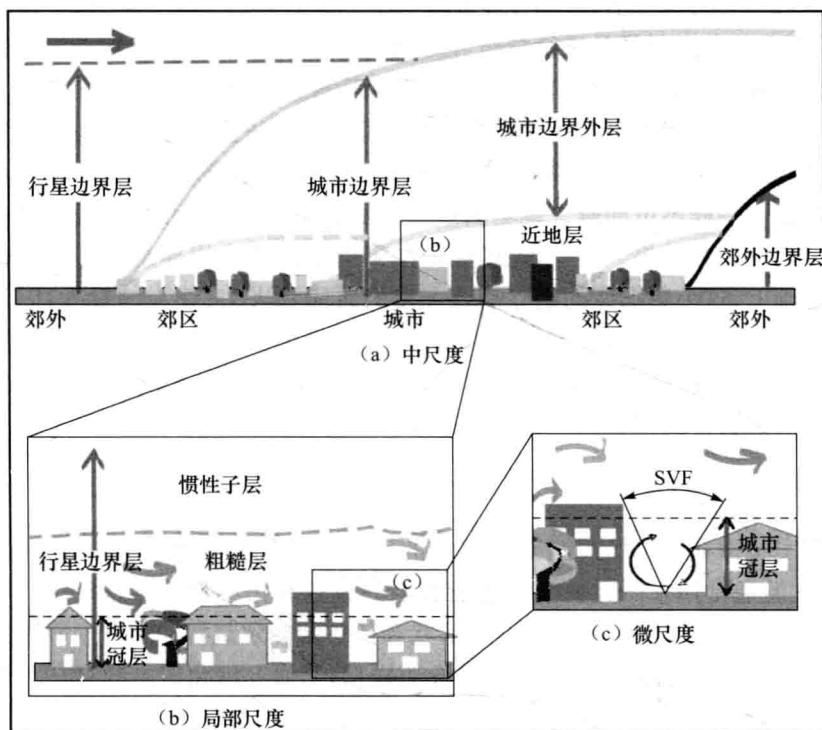


图 1.2 城市边界层结构及子区域分类和名称示意图^[16,17]

1.2 城市与建筑风环境的研究方法概述

大气污染的本质是社会经济发展模式、产业结构和能源结构不合理,污染物集中高强度排放,并长期积累到一定程度的结果,在城市区域表现最为显著。如何在人为活动与污染排放相对集中的城市冠层空间加快污染物的扩散效率,减少污染物在城市区域的累积,在城市大气污染防治对策研究中具有重要意义,这需要城市与建筑风环境的理论研究基础提供支持^[11]。城市与建筑风环境的研究方法主要包括现场观测、风洞实验和数值模拟。

1.2.1 现场观测

现场观测方法是指用仪器直接在街谷内监测流场及污染物浓度的分布与变化^[19~21]。主要仪器包括风速风向仪和污染物浓度测量设备。另外还可能用到测

量温度的设备,包括测量大气温度和测量固体壁面温度的仪器。污染物浓度的测量方法主要分两种:其一是在线仪器直接读取街谷内污染物浓度的适时变化,常用的在线仪器如测量颗粒物浓度的 Dust Track;其二是通过现场采样取得样品,然后在实验室内对样品进行分析,以获取测量时间内污染物浓度的平均值和物理化学特征等,如测量挥发性有机物过程中现场采样结合气相色谱-质谱联用仪分析的方法。现场观测的最大优点在于直接获取最真实的数据,因此现场观测数据往往最具实际意义,可用来指导和考核其他方法的研究^[22]。但是,现场观测方法的缺点与优点一样不可回避。现场测量得到综合复杂环境下的结果,很难单独分析某个因素的影响效果。另外,现场观测结果的实用性及指导意义需建立在大量的实验基础上,这个数据库的建立需要大量的时间和人力、物力的投入,因此现场实验虽然是运用最久的研究方法,但观测结果至今仍然相对缺乏。尤其是从考核数值模式的角度看,已有实验数据不能胜任模式考核。因此,以模式考核为目的而特别设置的实验方法,其现场测量结果更显弥足珍贵。

1.2.2 风洞实验

风洞实验弥补了现场观测研究方法的不足。借助实验室内实验条件的可控性,风洞实验通常用来研究典型理想街谷内的流场和污染物分布特征^[23~25],以及街谷形状因子、壁面受热、建筑物几何形状和街谷两侧建筑物非对称性等因素的影响^[26~28]。还可以植入绿化树木的多孔介质模型,来研究绿化树木的存在对街谷内空气流动和污染物扩散的影响^[29,30]。甚至可以借助机械装置来实现对街谷内行驶车辆的模拟,以研究行驶车辆对街谷内空气流动和污染物扩散的影响^[31]。风洞实验对数据的获取要比现场测量简单得多,而且测量结果的精确性也提高很多,因此风洞实验结果通常被用来验证数值模式的正确性和精确程度。

无论用什么研究方法,人们都希望能实现对街谷内污染物真实扩散过程的重现,甚至对街谷内污染物变化过程的模拟及预报。然而,风洞实验很难模拟复杂的真实环境,因此风洞实验的研究范围至今仍限制在研究个别参数的影响内。而作为实用型的数值预报模式的最终考核,仍然需要现场测量结果。

总体而言,风洞实验人们对街谷内空气流动和污染物扩散的基本规律给予了很大帮助,而且实验数据已经相当多。目前仍有风洞实验在模拟分析城市绿化、行驶车辆等因素对街谷内空气流动和污染物扩散规律的影响。

1.2.3 数值模拟

数值模拟的方法既不需要像现场观测那样消耗人力、物力,也不需要像风洞实验那样受实验装置的限制,同时还能得到连续变化的高分辨率的流场和浓度分布信息,动态显示街谷内流场和污染物扩散的演化过程^[32]。随着计算机技术的不断