

城市大气环境的数值模拟

崔桂香¹, 许春晓¹, 张兆顺¹, 王志石²

1. 清华大学工程力学系, 北京 100084
2. 澳门大学科技学院, 澳门特别行政区

[摘要] 空气质量是城市可持续发展的保证, 是改善人居环境的重要条件之一。大气环境是多尺度的流体运动, 本文介绍了城市尺度和居民小区尺度大气环境的现代数值预测方法——大涡数值模拟方法, 着重说明该尺度下复杂环境流动的特点和数值模拟需要注意的问题, 例如下垫面的处理方法、边界条件的合理提法等; 以典型城市和模型小区为例, 说明数值预测方法的应用, 展示不同下垫面对城市大气环境的影响、风速与小区空气质量的关系等。

[关键词] 城市大气环境; 多尺度现象; 湍流扩散; 大涡模拟

[中图分类号] X169

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)14-0015-07

Numerical Simulation of City Atmospheric Environment

CUI Guixiang¹, XU Chunxiao¹, ZHANG Zhaoshun¹, WANG Zhishi²

1. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. Faculty of Science and Technology, Macau University, Macao SAR, China

Abstract: Air quality is one of essential conditions for essential development for modern cities and is an important factor in the resident environment. The atmospheric environment is a multi-scale fluid flow. This paper discusses modern numerical methods for predicting atmospheric environment in a city and resident area. Particular emphases are put on the peculiar feature of this complex environmental multi-scale flow and the problems that need to be tackled, for instance, the treatment of the complicated canopy catalog and the boundary conditions. The application of the numerical method is illustrated by two examples, a typical city and a model resident area. The influence of canopy catalog on the city atmospheric environment is demonstrated and the relationship between wind speed and air quality in the resident area is obtained.

Key Words: city atmospheric environment; multi-scale phenomenon; turbulence dispersion; large eddy simulation

CLC Number: X169

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)14-0015-07

0 引言

城市大气环境愈来愈受到重视, 空气质量是城市可持续发展的保证, 是改善人居环境的重要条件之一。随着城市规划科学性和人居环境质量要求的不断提高, 传统的经验预测或工程估计方法难以满足要求。由于计算机资源的迅速改善, 用现代计算流体力学方法数值模拟城市大气环境已成为城市大气环境预测的重要手段。

城市大气环境是全球大气的子系统^[1], 它本身也是

一个复杂系统; 城市居民小区又是城市大气环境的子系统, 它是一个微尺度的复杂系统。全球大气到居民小区环境, 是跨越 4 个几何尺度量级的地球物理现象, 当代计算机不可能在全球大气数值模拟中精细地分辨出城市和居民小区的大气环境, 这种跨越很大尺度范围的现象只能用分尺度方法来研究。在不同尺度范围中, 研究对象的物理条件不同, 数值模拟方法也应随之而异。

大气科学家最早提出湍流大涡数值模拟方法

收稿日期: 2007-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (NSFC-10572073), 澳门科技发展基金项目 (FDCT 022/2006/A)

作者简介: 崔桂香, 北京市海淀区清华大学工程力学系, 教授, 研究方向为湍流、环境流动的数值模拟;

E-mail: cgx@mail.tsinghua.edu.cn

张兆顺 (通讯作者), 北京市海淀区清华大学工程力学系, 教授, 研究方向为湍流、环境流动的数值模拟;

E-mail: zzs@mail.tsinghua.edu.cn

(Large Eddy Simulation, LES)^[2],该方法的基本思想是将湍流运动中的小尺度脉动过滤掉,将小尺度脉动对大尺度(大涡)的作用建立模型。近年来,这种方法的研究和应用取得很大发展,中尺度大气数值预报的 ARPS (Atmospheric Research Prediction System)^[3]采用大涡数值模拟计算方法。城市和居民小区大气环境是处在中尺度大气边界层内的微环境气象,这类环境现象的大涡数值模拟计算有其特殊性。下面简要介绍大气环境数值模拟方法的基本原理;然后,分别讨论城市和居民小区大气环境中应用大涡数值方法的特点;最后,以典型城市和居民小区的算例说明该方法的具体应用。

1 大气环境数值模拟的基本原理

大气环境数值模拟的控制方程属于低速变密度空气运动,流场密度的变化不是由速度变化引起的,而是由大气层高度范围内压强和温度变化产生的,它属于可压缩流体运动。描述运动过程的质量、动量和能量方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) - u_3 \frac{\partial \theta}{\partial x_3} + \frac{\partial T_i}{\partial x_i} + S_\theta \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial G_i}{\partial x_i} + S_c \quad (4)$$

$$p = R\rho(\theta + \theta_0) \quad (5)$$

方程中的速度、密度、压强和温度都是过滤后的物理量,称为可解尺度物理量,或简称大尺度物理量。方程(1)是质量守恒方程。方程(2)是动量方程,方程中除了分子黏性应力外(右边第2项),还有过滤掉的小尺度湍流对大涡的作用 τ_{ij} ,称为亚格子应力,方程(2)中外力项 f_i 包括浮力和地球自转的科氏力等。方程(3)是能量守恒方程,这里温度已分解为静平衡的大气温度 θ 和由于空气运动引起的扰动温度 θ' ,方程(3)右边第1项是分子扩散, κ 是分子热扩散系数;第2项是平均温度梯度在对流中产生的扰动温度变化;第3项是小尺度涡产生的热对流输入到大尺度涡的热量,称为亚格子热通量;最后1项是热平衡的源项 S_θ ,例如辐射热、蒸发潜热和化学反应热等。方程(4)是污染物浓度的守恒方程,右边是分子扩散项、亚格子质量通量项 G_i 和污染物的源项 S_c ,例如机动车或电厂的排放。方程(5)是空气的状态方程。

大气环境数值模拟需要求解的物理量是压强、温度、密度、浓度和速度(有3个分量),总共有7个变量,控制方程也有7个(1个连续方程、3个动量方程、1个

能量方程、1个浓度输运方程和1个状态方程)。以上方程组似乎可以求解,实际上在大涡数值模拟中,亚格子应力和亚格子通量都是未知量,需要用湍流模型予以封闭。在湍流理论中有各种亚格子模式^[4],复杂流动中常用的模式是涡黏和涡扩散模式

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} \quad (6)$$

$$T_i = \kappa_t \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (7)$$

$$G_i = D_t \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (8)$$

式中, μ_t , κ_t , D_t 分别为亚格子涡黏、亚格子热涡扩散和亚格子质量涡扩散系数。

大气数值模拟中,常常将以上方程组改写为方便求解的形式,例如大气科学中习惯于使用位温;又例如,为了适应地形变化,常常在随体坐标系(以地面为坐标面)中数值求解流动方程组^[3]。

无论是全球大气和中尺度大气数值预报还是城市与居民小区的大气环境数值预测,它们的基本方程是相同的,由于计算对象的尺度不同,方程中各个源项和边界条件的处理也不同。例如,在全球大气环境中,科氏力和重力是不可忽略的,而在城市和居民小区大气环境的数值预测中,科氏力可以忽略不计。在选择亚格子应力的模型方面,全球大气环境的数值预测中,它的作用相对于其他源项为小,可以采用较为简单的模型,例如 Smagorinsky 模型;而在城市和居民小区大气环境的数值预测中,亚格子应力起着重要作用,因此需要采用较为精细的亚格子应力模型。这些将在下面的计算实例中分别说明。

数值计算空气运动时,需要给出计算域边界上合理的物理条件,并采用准确的数值处理方法,这是城市或居民小区大气环境数值预测最重要而又最困难的工作。对于具体的方程类型,依照数学原理,有若干种边界条件提法(数学上称为适定条件),但需根据实际情况决定何种边界条件是适用的。例如,航空工程的飞机绕流,在机身上给定流体无滑移条件时,远离飞机的气流是匀速直线运动。在全球和中尺度大气运动的计算中,起伏不定的粗糙地面难以应用无滑移边界条件,只能采用粗糙表面的近似边界条件。下面将根据城市和居民小区大气运动的特点说明边界条件的提法。

2 城市大气环境的数值预测

城市大气运动现象可以大致描述如下:空气在复杂地形和地表条件下产生局部环流,如山谷背风面的漩流;太阳辐照产生地面高温,形成热对流风场;不同植被的温度差可以产生水平方向的对流,特别是沿海

城市,陆地和海洋间较大温差可以产生海陆风。根据以上特点,城市大气环境的数值预测采用以下的计算方法。

数值预测区域选为长方体,长方体的长和宽根据城市大小确定,长方体的高度应当超过大气边界层高度,通常在数公里以上。由于城市地形的起伏,应在随体坐标中求解大涡模拟方程。

数值计算的边界条件是实现数值预测城市大气环境的关键,根据过去的经验,以下的边界条件可以提供比较正确的数值预测结果。

1) 高空边界的条件

给定风速风向,其他物理量的法向导数等于零。

2) 计算域侧面的边界条件

由于城市地形的起伏,边界面附近不是开阔的平地,这时采用边界延拓方法,将边界平行延拓一段距离,在计算边界上令物理量的法向导数等于零。城市边界上的大气流动和地形与水平温差对流有关,不能任意给定边界上的速度,而是给定延拓边界上法向导数等于零,边界面上风速由计算获得。

3) 下垫面边界条件

下垫面的边界条件比较复杂,理论上,流体在固体壁面上的速度等于当地固体运动速度(流体力学中称为无滑移条件),实际上,下垫面植被比较复杂,有裸地、草地、水域及建筑物等。即使是裸地,它的地面具有不同粗糙度的起伏不平的复杂几何边界。所以,在城市尺度或城市尺度以上的大气环境数值预测中放弃无滑移条件,而采用表面粗糙度和地面摩擦系数之间的半经验关系式,这些半经验关系式经过大量实验验证,不同植被的粗糙度是不同的,例如森林、农田和草地的粗糙度都有不同的经验系数^[3]。

下垫面的温度边界条件对于预测城市大气环境是

十分重要的,它直接影响大气对流。下垫面的温度和日照、植被含水量等物理因素有关,正确地给定这些参数是数值预测城市大气环境的关键。大气物理的研究成果已经提供了丰富的下垫面的物理参数、例如不同植被类型的辐射、蒸发过程的物理关系式^[3]。在城市大气环境数值计算中正确利用这些关系式和给定初始参数是获得可靠预测结果的关键。

亚格子应力模型是应用大涡模拟方法预测城市大气环境的另一重要问题。在全球大气数值预测中,可以选择简单的代数亚格子模型,例如 Smagorinsky 模型。在城市大气环境数值预测中,Smagorinsky 模型的耗散过大,选择亚格子动能和湍动能尺度构造的亚格子应力模型可以获得较合理的预测结果。

下面是应用大涡数值模拟预测的澳门行政区大气环境结果。求解域尺寸为 $10\text{ km} \times 15\text{ km}$,其中澳门的地形数据精确,而横琴岛的数据根据航拍图估算,平面网格间距为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$,网格数为 50×75 ;计算域高度为 4.8 km ,网格数为 50,垂直于地面方向的网格不均匀,在近地面的 100 m 高度范围是最密的,第一层网格距地面 2 m ,越往上网格宽度越大。

图 1 是澳门行政区的航拍地图,图 2 是澳门行政区下垫面的分类,其中深蓝色表示水面,浅蓝色表示建筑物,红色表示裸地,绿色表示绿地,图中左边是大陆的横琴岛,该处的植被是估计的。图 3 是平面计算域和网格,图中彩色灰度表示地形高度。

图 4 是高空风速为 0.2 m/s 时地表类型不同的 3 个地点的地温演变过程,红色为裸地,蓝色为建筑物,黑色为草地。由于太阳辐射,地温开始升高,傍晚后气温下降,第 2 天上午气温又开始升高。裸地湿度最小,气温上升最高,草地湿度大气温上升少。

图 5 是白天典型时刻、离地面 2 m 高度的风向,陆



图 1 澳门行政区航拍图
Fig. 1 Map of Macao

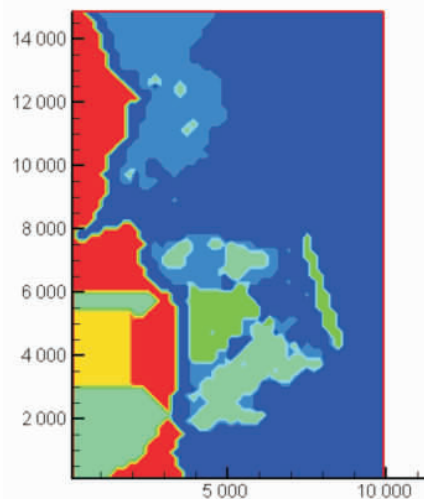


图 2 下垫面分类(坐标单位:m)
Fig. 2 Canopy catalog

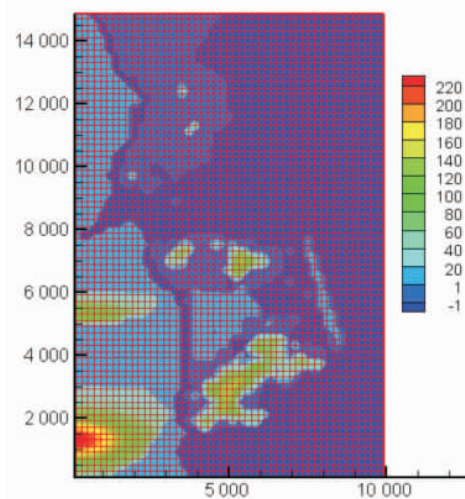


图 3 网格和地形高度(坐标单位:m)
Fig. 3 Grid and height of terrain

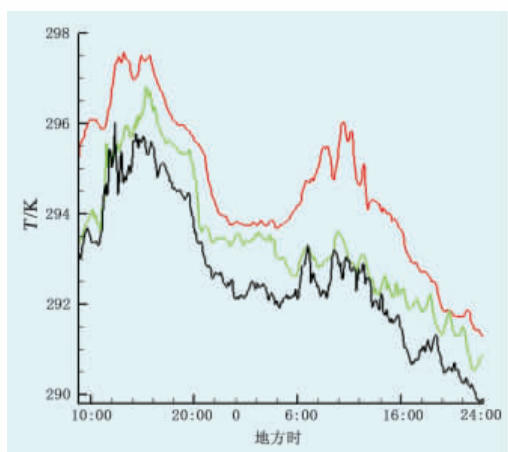


图 4 不同下垫面的温度演变

Fig. 4 Evolution of the ground temperature at different canopy

地和海洋间温差产生明显的海陆风, 高空大气风向为西北, 近地面风向从海面吹向陆地。晚间海陆风几乎消

失(图 6), 高空大气风向仍为西北, 除局部地区外, 近地面风向从陆地吹向海面。图中彩色灰度是地形高度, 白色箭头指风向, 长度反映风速大小。

进一步考察污染物扩散, 在澳门电厂位置给定污染气体排放源(图上黑点标记), 图 7 和图 8 展示了电厂排放造成的近地面污染气体浓度分布, 图中彩色灰度标志地形高度, 黑色等值线表示浓度分布。图 7 是白天的浓度分布, 虽然高空风向是西北, 吹向海面, 由于近地面海陆风影响, 电厂排放气体向岛内扩散; 图 8 是晚上的浓度分布, 晚间海陆风基本消失, 排放气体向海面扩散。

以上典型算例的风速、地温采用 ARPS 程序计算; 污染物扩散的计算采用作者自行开发的程序嵌入 ARPS 进行计算。数值预测结果和澳门实际情况基本符合, 在数量上还有待实测数据的验证。在典型地区设置监测点后, 将选择夏冬两季的典型气象条件做进一步数值模拟的研究。

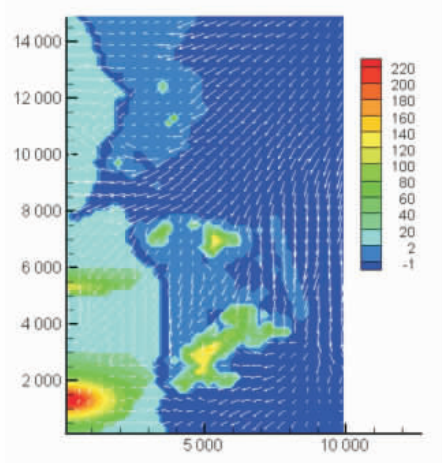


图 5 白天地面的风速风向(坐标单位:m)

Fig. 5 Ground wind speed in daytime

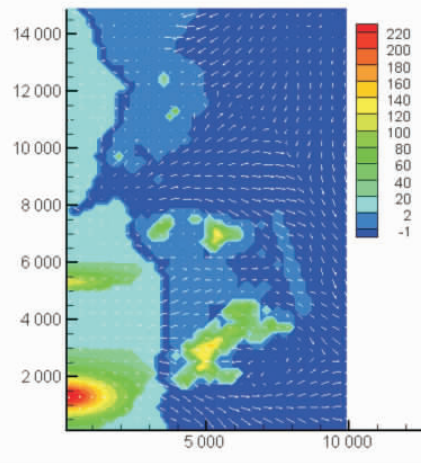


图 6 晚上地面的风速风向(坐标单位:m)

Fig. 6 Ground wind speed at night

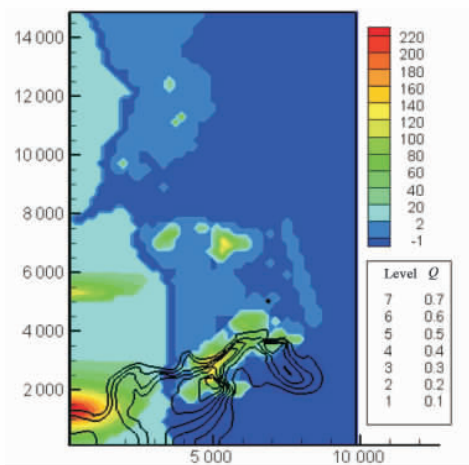


图 7 白天的地面浓度分布图(坐标单位:m)

Fig. 7 Ground concentration in daytime

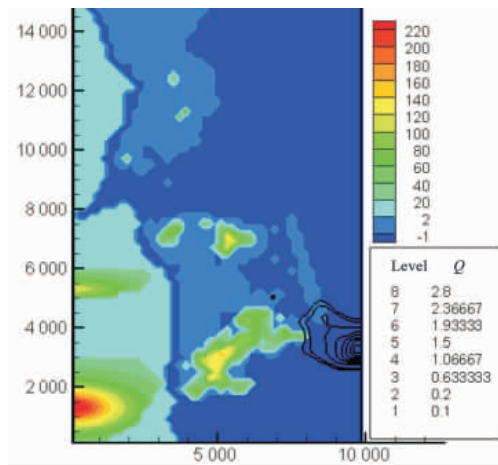


图 8 晚上的地面浓度分布图(坐标单位:m)

Fig. 8 Ground concentration at night

3 居民小区大气环境的数值预测

居民小区的大气环境包括街道和居民区的风速风向和污染物的浓度。计算域仍然取作长方体,平面计算域的长宽根据居民小区的范围加上向外延拓的长度,计算域高度为大气边界层厚度。

居民小区大气环境的数值预测需要精细的流场和浓度场数据,不能采用 ARPS 计算,而由作者自行开发的大涡模拟程序进行计算,详细计算方法可参见文献[5]。该程序的主要特点是:采用高精度的有限体积离散方法;建筑表面和地面采用流体在物面的无滑移条件;亚格子应力采用较为精细的动力模式。在后面的计算实例中,将用对比的方法说明采取以上精细计算的必要性。边界条件的提法如下。

1) 顶部边界条件

给定风速风向,其他物理量的法向导数等于零。

2) 建筑物表面边界条件

采用浸没边界法满足流体在物面的无滑移条件,具体算法详见文献[5]。

3) 草地或水面

仍采用参数化的粗糙度和壁面摩擦应力的关系式。

4) 迎风面边界条件

迎风面给出大气边界层的速度剖面 and 气流脉动强度。大气边界层中气流脉动很大,脉动均方根可以达到来流的 30%~40%,计算时用随机函数给出边界面上每一时间步的气流脉动。后面的算例结果将清楚地显示,入口脉动对于数值计算精度的影响。

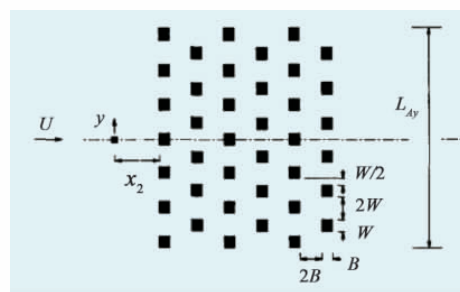
5) 计算域下游边界条件

在延拓的下游边界上,流动以充分发展状态流出边界。

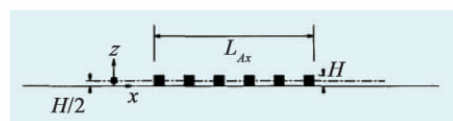
居民小区环境的数值预测需要精细的流动计算(相对于中尺度或城市大气环境的数值计算),需要采用耗散小的动力亚格子应力模式,对于复杂地形,采用拉格朗日时间平均的动力模式。

下面以模型居民小区为例,给出计算结果及其与实验数据的比较。图 9 是模型建筑群的几何图形^[6],39 个立方体交错排列,立方体长宽高(B, W, H)均为 0.12 m,立方体流向和横向间距 $2B$ 和 $2W$ 为 0.24 m,在第 1 排建筑物前 $x_0=1.2$ m 处释放二氧化碳气体作为污染源,模型实验在风洞中完成,实验过程中测量建筑群间的气流速度和二氧化碳浓度。图 9 中 x 为流向坐标, y 为横向坐标, z 为垂直地面坐标。图 10 是数值模拟的计算域,计算域的高度、宽度和长度分别取立方体长度 H 的 10 倍、30 倍和 70 倍;流向、展向和垂向网格数分别为 162,116 和 30,在贴近建筑物和地面处,网格加密。

图 11 是计算所得速度分布和测量结果的比较,为



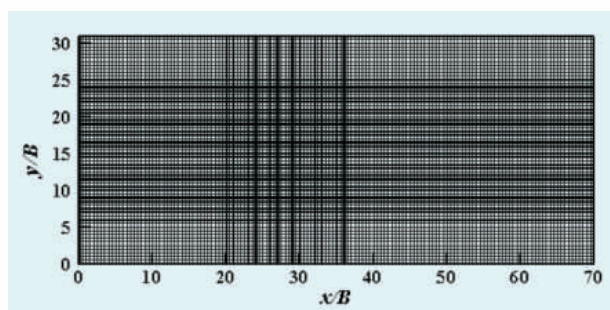
(a) 俯视图
(a) planform



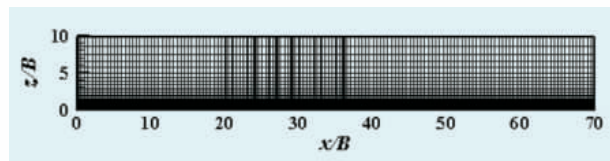
(b) 侧视图
(b) side elevation

图 9 建筑群模型

Fig. 9 Model of resident area



(a) 俯视图
(a) planform

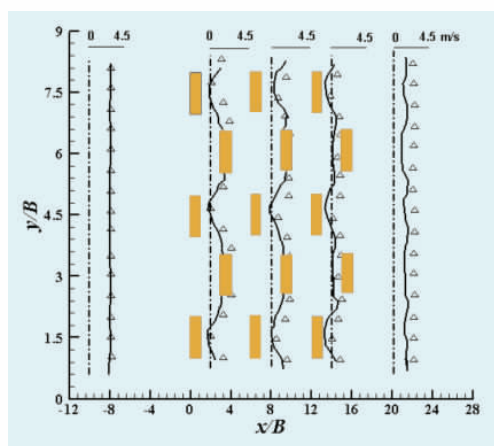


(b) 侧视图
(b) side elevation

图 10 计算网格

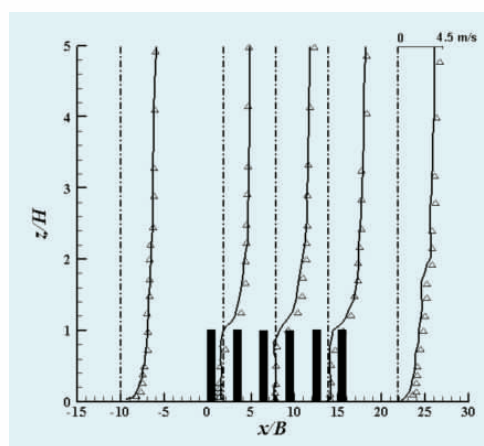
Fig. 10 Grids

为了清晰地显示结果,建筑物的高度 H 或宽度 H 放大 3 倍, B 是立方体建筑物的长度。由图可见,数值模拟的结果和风洞实验数据符合良好。为了显示建筑群间的风速和污染程度,将建筑物半高处的速度在横向平均的流向风速的流向变化结果示于图 12(a),其中 U_0 为来流风速, Q 为污染源强度,可见气流进入建筑群后速度下降,离开建筑群后速度再增大。污染物浓度则进入建筑群后持续下降。注意图 12(b)是展向平均浓度。计算结果表明,数值模拟和实验数据符合良好,计算平均速度低于实验数据,可能是大涡模拟亚格子模型不够准



(a) 流向速度展向分布

(a) Spanwise profiles of streamwise velocity



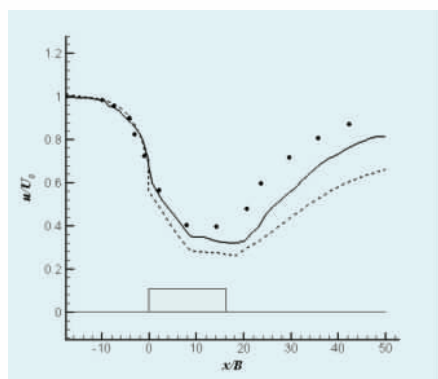
(b) 流向速度的垂向分布

(b) Vertical profile of streamwise velocity

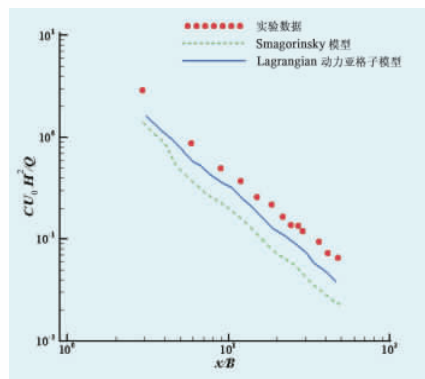
Δ : 实验测量; ---: 数值模拟 (建筑物高度、宽度放大 3 倍)

图 11 建筑群间的平均速度分布

Fig. 11 Distribution of mean streamwise velocity

(a) 平均的流向速度 u 沿流向的变化

(a) Variation of mean streamwise velocity in streamwise direction

(b) 平均浓度 C 沿流向的变化

(b) Variation of mean concentration in streamwise direction

图 12 建筑物半高处展向平均的流向速度和浓度的流向变化

Fig. 12 Streamwise distribution of mean streamwise velocity and concentration

确造成的, 图中比较了两种亚格子模型——简单的 Smagorinsky 模型和较为精细的拉格朗日动力模型, 由图可见, 后者明显优于前者。

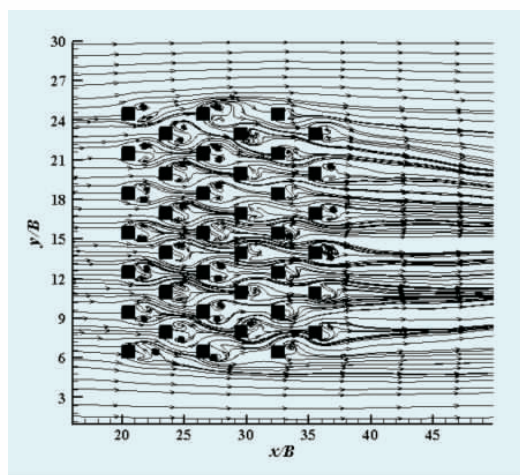
图 13 为建筑群之间的流线谱, 展示了建筑群之间的流动状态, 可以明显看到建筑物后的旋流, 在流线密集的区域, 空气速度高于平均速度。在侧视图上可以看出, 在建筑物间距为 2 倍高度的情况下, 建筑物可被视为孤立粗糙元。在本算例范围内, 风速对建筑群间的气流速度分布和流动状态影响不大, 但对浓度分布影响较大。图 14 是不同风速下中心线上污染物浓度的流向变化, 结果说明风速小, 建筑物间的浓度增高, 风速达到 2 m/s 以上, 浓度分布变化不大。

图 15 是建筑群中心线上第 5、6 排中间的脉动风速均方根的垂向分布。结果说明, 大气边界层的气流脉

动对建筑群数值模拟结果的影响: 迎风边界只给平均风速、不给气流脉动时, 建筑群间气流脉动很小; 在迎风边界面上给定近似大气边界层的气流脉动, 建筑群间的气流脉动数值模拟结果与实验数据符合很好。该算例说明迎风边界面上气流脉动数据对居民小区的风场和浓度场数值模拟的准确度有较大的影响。

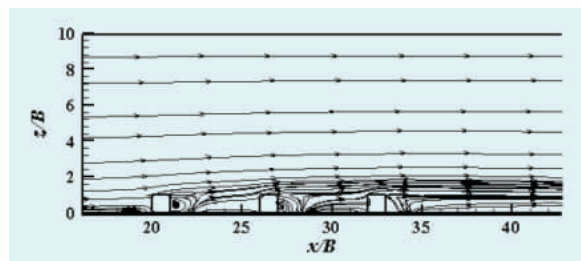
4 结论

大气环境数值模拟方法可以较详细地给出城市和居民小区的环境数据, 可为城市规划和居民小区建设提供科学依据, 为人居环境的舒适性、安全性提供服务。本文研究结果表明, 所开发的以大涡模拟为核心的数值方法, 成功地预测了城市和居民小区的大气环境。数值模拟与现场监测、工程估计结合将成为预测、控制



(a) 俯视图

(a) planform



(b) 侧视图

(b) side elevation

图 13 建筑群之间的流线谱

Fig. 13 Flow patterns inside resident area

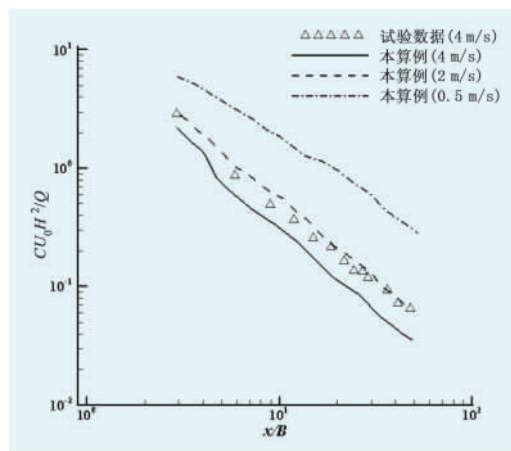


图 14 风速对污染物浓度的影响

Fig. 14 Effect of wind speed on the pollutant concentration

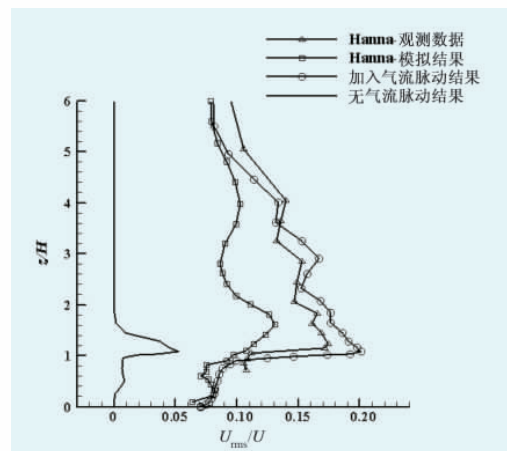


图 15 入口边界条件对数值模拟结果的影响

Fig. 15 Influence of inlet boundary condition on the numerical results

和改善城市及居民小区环境质量的有效途径, 为提高城市居民的生活质量做出贡献。

参考文献 (References)

- [1] BRITTER R E, HANNA S R. Flow and dispersion in urban area [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 469-495.
- [2] DEARDOFF J W. Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1974, 7: 81-106.
- [3] XUE M, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS): A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75: 161-193.
- [4] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流理论和应用 [M] 北京: 清华大

学出版社, 2005.

ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, XU Chunxiao. Theory and applications of turbulent flows [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

- [5] 徐 岚. 大涡模拟的高精度有限体积法的研究及其在可逆式水轮机中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- XU Lan. Study on high accurate finite volume method for large eddy simulation and its application to reversible runner[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [6] DAVIDSOR M J, et al. Wind tunnel simulation of plume dispersion through groups of obstacles [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(22): 3715-3731.
- [7] HANNA S R, et al. Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36 (32): 5067-5079.

(责任编辑 朱 宇)