

# 大风条件下城市冠层流场模拟\*

王宝民<sup>1)</sup> 刘辉志<sup>2)</sup> 桑建国<sup>1)</sup>  
王晓云<sup>3)</sup> 张 清<sup>3)</sup> 李 炬<sup>3)</sup>

1)(北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

2)(中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

3)(北京市气象局, 北京 100081)

**摘 要** 发展了基于  $k-\epsilon$  湍流闭合方法的都市冠层流场模式, 建筑群采用多孔介质来表示, 对气流的阻力以形式阻力来描述, 采用该模式模拟北京市一个小区的流场, 并将模拟结果与北京 325 m 气象塔观测资料进行比较, 结果表明: 在大风情况下, 计算风廓线与观测拟合风廓线比较吻合。该模式可以用于大风条件下城市冠层流场的模拟。

**关键词:** 城市冠层; 有效空气体积比; 形式阻力

## 1 引言

城市边界层是边界层气象学研究的一个重要分支, Okke<sup>[1]</sup>于 1987 年提出了城市冠层 (Urban Canopy Layer) 的概念, 并将其定义为由地面至建筑物屋顶的这一层。该层大气受人类活动影响最大, 城市热岛和夜间城市边界层的形成就是城市建设和开发活动的直接结果。城市发展对风场的影响也是显著的, 周淑贞<sup>[2]</sup>、李兆元<sup>[1]</sup>对上海市和西安市多年风速资料的研究结果表明, 随着城市发展的速度加快, 建筑群增多、增密、增高, 导致下垫面粗糙度加大, 因而使城市的地面风速减小。

随着城市的不断发展、居民生活水平的提高, 人们对居住环境的要求也越来越高。目前, 专业人员进行城市规划或设计居民小区时都要考虑绿地覆盖率、建筑物的形状与高度、建筑材料的选取以及环境气象要素的分布<sup>[3]</sup>等因素。其中建筑物的分布是影响流场和湍流结构的重要因素, 在水平尺度为  $10^0 \sim 10^1$  km 的城市边界层模式中, 建筑群的摩擦阻力大多通过粗糙度表示, 在尺度为  $10^1 \sim 10^2$  m 的单个或少数建筑物的流场模式中, 建筑物的影响通过其几何形状产生的边条件实现。

在城市冠层中, 由于建筑群分布复杂多样, 导致城市冠层内流场分布很复杂, 这直接影响了污染物的输送扩散特征。例如, 夜间城市上空高架逆温限制了污染物的垂直扩散, 从而造成地面较高的污染物浓度。城市汽车尾气污染, 越来越受到政府部门以及气象和环保工作者的关注, 如何有效控制城市交通发展带来的大气污染已成为研究热点。迄今为止, 对城市街谷等较小尺度的流场和空气污染物输送扩散的研究已比

2001-08-02 收到, 2001-12-13 收到修改稿

\* 中国科学院知识创新工程项目 KZCX2-204、北京市“城市规划与气象条件和大气污染关系研究”项目和国家重点基础研究发展规划项目 G1999045700 共同资助

1) 李兆元等, 西安城市气候研究分报告, 中国不同气候区域城市气候的研究, 1990, 50~60.

较多<sup>[4-6]</sup>, 然而对小区尺度城市冠层的相应研究尚少。

我们开发了一个  $10^2 \sim 10^3$  m 尺度的城市冠层流场模式 (Numerical Model of Flow Field in an Urban Canopy), 适用于单个或数个居民小区, 该模式对建筑群中单个建筑物的几何形状没有明确的要求, 但也不能将整个小区视作整片不规则的粗糙下垫面来考虑, 而是对建筑群的整体空间分布要有一定的把握。因此, 本模式可以为小区通风情况、建筑高度、建筑布局以及环境规划和污染治理等方面提供合理化的建议。

## 2 流场模式

在城市冠层中, 建筑群对城市气候的影响包括动力和热力作用两方面。其中热力作用主要是指建筑群对辐射的传输、感热和潜热通量影响, 包括城市中人为加热过程的影响; 动力作用主要是建筑群对气流的阻挡作用。本文主要模拟建筑群阻力对城市冠层流场结构的影响。建筑群的作用采用多孔介质表示, 而其对气流的形式阻力则用参数化形式表示。

目前, 研究钝体绕流几种比较常用的方法有  $k - \epsilon$  方法、大涡模拟方法 (LES) 直接数值模拟方法 (DNS) 等等, 应用比较广泛的是  $k - \epsilon$  方法。本模式仍然采用  $k - \epsilon$  闭合方法, 在城市冠层流场模拟中, 引进了有效空气体积比和形式阻力的概念。

### 2.1 有效空气体积比和形式阻力

有效空气体积比  $G(x, y, z)$  定义为

$$G(x, y, z) = \frac{V_0(x, y, z) - V_a(x, y, z)}{V_0(x, y, z)}, \quad (1)$$

其中,  $V_0(x, y, z)$  为中心位于  $(x, y, z)$  点的网格体积,  $V_0(x, y, z) = \Delta x \Delta y \Delta z$ ,  $V_a(x, y, z)$  为该网格内建筑物所占的体积。有效空气体积比反映了网格中建筑物所占的百分比。

形式阻力  $F_{\text{form}}$  定义为

$$F_{\text{form}} = -\alpha c_f u_i |u_i|, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

其中,  $c_f = 1 - G(x, y, z) = V_a(x, y, z) / V_0(x, y, z)$ ;  $u_i$ 、 $|u_i|$  分别为水平风速分量及其相应的绝对值;  $\alpha$  为形式阻力系数, 是一个由现场观测或风洞实验确定的半经验常数, 表示建筑物对气流的阻挡作用。

### 2.2 基本大气方程组及其湍流闭合方案

三维准静力大气动力—热力学方程组包括: 连续方程、水平运动方程、准静力方程、热力学方程和湍流能量方程。引入有效空气体积比和形式阻力, 经过空间平均后, 大气方程组可以写成 (为简便起见, 采用如下惯例, 即某坐标的下标在一项中出现二次, 则该项对该下标求和):

$$\frac{1}{G} \frac{\partial (G u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial (G u_i u_j)}{\partial x_j} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x_i} + \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} (K_j \frac{\partial G u_i}{\partial x_j}) + F_{\text{form}}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\frac{g}{\theta}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{G} \frac{\partial (G u_j \theta)}{\partial x_j} = \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K_j \frac{\partial G \theta}{\partial x_j} \right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} = & \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial z} \left[ G \left( \frac{K_m}{\sigma_k G} \frac{\partial G k}{\partial z} \right) \right] + K_m \left[ \left( \frac{1}{G} \frac{\partial G u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{1}{G} \frac{\partial G v}{\partial z} \right)^2 \right] \\ & - \frac{g}{\theta} \frac{K_m}{\sigma_\theta G} \frac{\partial G \theta}{\partial z} - \epsilon, \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $u_j$ 、 $\theta$ 、 $\pi$ 、 $k$ 、 $\epsilon$  分别为水平风速分量、位温、Exner 函数、湍流动能、湍流动能耗散率; (4) 式中  $K_j$  表示湍流动量扩散系数, 当  $j = 3$  时, 令  $K_3 = K_m$ , 表示垂直湍流动量扩散系数,  $K_m = c_\mu k^2 / \epsilon$ ; (6) 式中  $K_j$  表示湍流热量扩散系数。方程组同时忽略了科里奥利力及粘性项, 对  $10^2 \sim 10^3$  m 尺度来说, 影响不大。

$\epsilon$  由湍流耗散率预报方程给出:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = & \frac{1}{G} \frac{\partial}{\partial z} \left[ G \left( \frac{K_m}{\sigma_\epsilon G} \frac{\partial G \epsilon}{\partial z} \right) \right] + c_1 \frac{\epsilon}{k} \left\{ K_m \left[ \left( \frac{1}{G} \frac{\partial G u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{1}{G} \frac{\partial G v}{\partial z} \right)^2 \right] \right. \\ & \left. - \frac{g}{\theta} \frac{K_m}{\sigma_\theta G} \frac{\partial G \theta}{\partial z} \right\} - c_2 \frac{\epsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (8)$$

根据桑建国<sup>[7]</sup>的结果, (7)、(8) 两式中常数取值为:  $c_\mu = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $c_1 = 1.44$ 、 $c_2 = 1.92$ 、 $\sigma_\theta = 0.74$ 。

### 3 有效空气体积比确定

模式模拟的小区位于北京市土城路和八达岭高速公路交叉口附近, 东西、南北长各 800 m, 中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔位于其东南角。北京市气象局提供了由地理信息系统获得的 1999 年该小区建筑高度分布和建筑体积比, 水平和垂直网格距均为 10 m, 有效空气体积比可以由建筑体积比转化得到。小区建筑高度分布见图 1。为模式计算考虑, 在小区的西部和北部虚拟了各 100 m 的平坦地形, 暂不考虑周边建筑对该小区流场的影响。小区平均建筑高度约 13.6 m, 最高建筑约 75 m。

### 4 气象塔观测资料

中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔位于 ( $39^\circ 58' N$ ,  $116^\circ 22' E$ ), 海拔高度 49 m, 在北京市德胜门以北约 2.7 km, 距离北三环路约 1 km。塔体采用通风良好的钢管格构式结构 (通风系数为 0.25), 塔横截面是上下一致的等边三角形, 边长为 2.7 m, 塔身由相隔 120 度的 3 组钢丝绳 (每组 5 根) 固定在地锚上。塔上共装有 15 层观测平台, 观测高度分别为 8、15、32、47、63、80、102、120、140、160、180、200、240、280 和 320 m。每个观测层次上均按盛行风向装有两个活动伸臂, 一个指向东南, 一个指向西北, 臂端离开塔柱边缘约 4.1 m。安装两个伸臂是为了减少由于气流通过塔体时造成的绕流对测风传感器的影响。观测基本气象要素为水平风速、风向、气温和

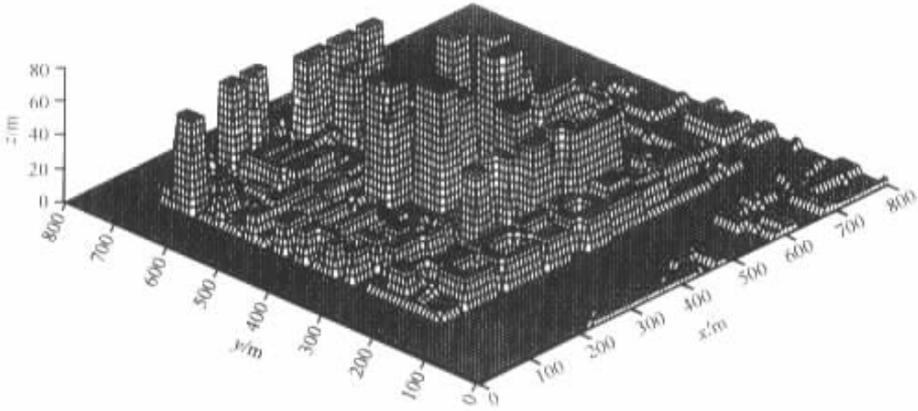


图1 小区建筑高度分布[西南视图,气象塔坐标(800,0)]

相对湿度,观测频次为每 20 s 一组数据,塔上仪器检测到的信号通过屏蔽电缆传输到地面计算机房进行数据处理。有关气象塔观测系统更详细的情况可以参阅文献[8]。

气象塔建成于 1979 年,随着北京市不断发展,现已经处于市区内。因而,气象塔观测资料为研究城市冠层内的气象要素特征提供了很大的方便。北京市冬季以偏北风为主导风向,本文采用 1999 年 11 月 7、13、17 日三天共 4 组观测资料进行模拟,风向均为西北风,包括两种大风和两种小风,观测资料值采用气象塔 30 min 的平均值。

## 5 模拟区域及初、边条件

### 5.1 模拟区域

模拟区域位于中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔附近(图 1),东西和南北方向均为 800 m,垂直方向为 350 m;垂直网格距 10 m,水平网格距 20 m,整个模拟区域共划分成  $41 \times 41 \times 36$  个格点。

### 5.2 初始条件

风场初始条件选为幂指数形式:  $u(z) = u_r (z/z_r)^p$ , 其中  $u_r$  为参考高度  $z = z_r$  处的风速,  $p$  为经验常数。温度场初始条件为  $\theta(z) = \theta_0 + \Gamma z$ , 其中  $\Gamma = d\theta/dz$  为位温垂直梯度,  $\theta_0$  为地面位温。采用气象塔 1999 年 11 月的观测资料,有关 4 个个例初始条件参数见表 1。

### 5.3 边界条件

在模式顶部,为避免扰动的反射,最上部的五层设为吸收层。入流边条件取为定常,其余三个侧边界取为开放边界,即变量与邻近内点上变量数值相同。

## 6 结果及讨论

### 6.1 风速廓线

入流、气象塔观测及数值模拟风廓线见表 2 及图 2。

表 1 初始条件参数表

项目 (日期)	例 1 (11-07, 09:29)	例 2 (11-07, 20:29)	例 3 (11-13, 19:29)	例 4 (11-17, 09:59)
风速情况	大风	大风	小风	小风
风向	NW	NW	NW	NW
$z_r/m$	10.0	10.0	10.0	10.0
$u_r/m s^{-1}$	7.58	8.34	4.09	4.47
$p$	0.08	0.14	0.08	0.08
$\theta_0/K$	285.70	285.92	279.22	280.55
$\Gamma/K m^{-1}$	-0.01	0.00	0.005	-0.01
稳定度	不稳定	中性	稳定	不稳定

由结果可以看出,两种大风情况计算值和观测值比较接近,而小风情况则不理想,尤其是不稳定情况,其原因可能有两方面,一是我们选取的入流风速边条件不准确,二是因为忽略了城市冠层内的热力作用。

需要说明的是,图 2c 为夜间小风稳定的情况,观测资料拟合的风廓线和观测点值偏离比较大,说明简单的幂指数风廓线形式并不适合这种情况;而数值模拟结果在高度大于 50 m 处和观测值很接近,这也从侧面反应了城市冠层内流场的复杂性<sup>[9]</sup>。

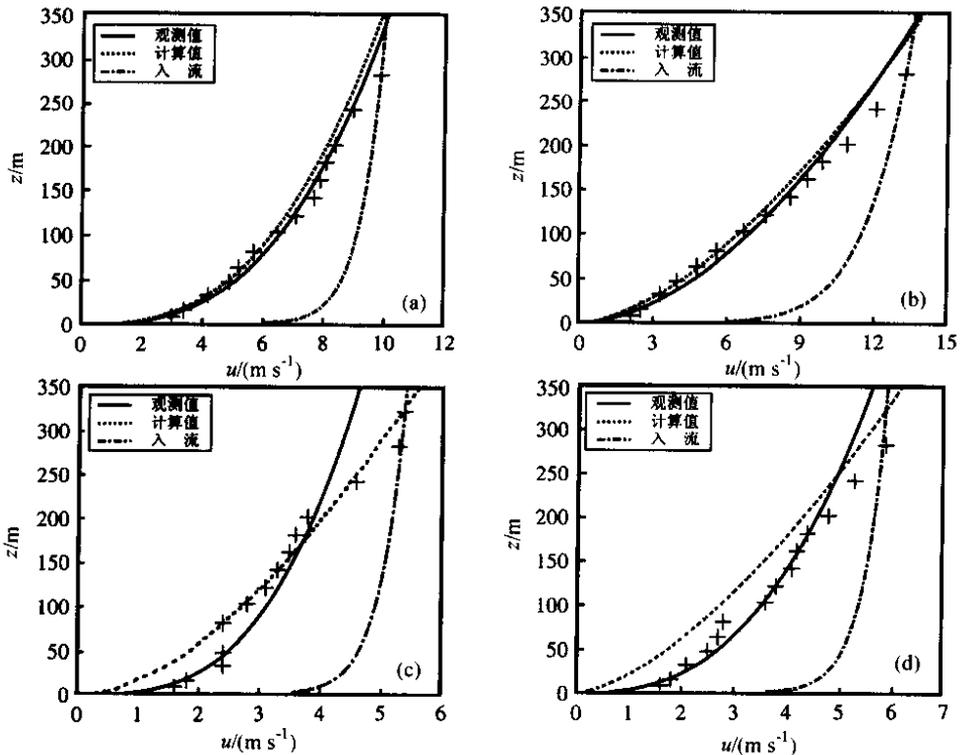


图 2 入流、气象塔观测及数值模拟风廓线

虚线：数值模拟廓线；实线：观测廓线；点划线：入流廓线；+：观测值

(a) 例 1：1999-11-07, 09:29；(b) 例 2：1999-11-07, 20:29；

(c) 例 3：1999-11-13, 19:29；(d) 例 4：1999-11-17, 09:59

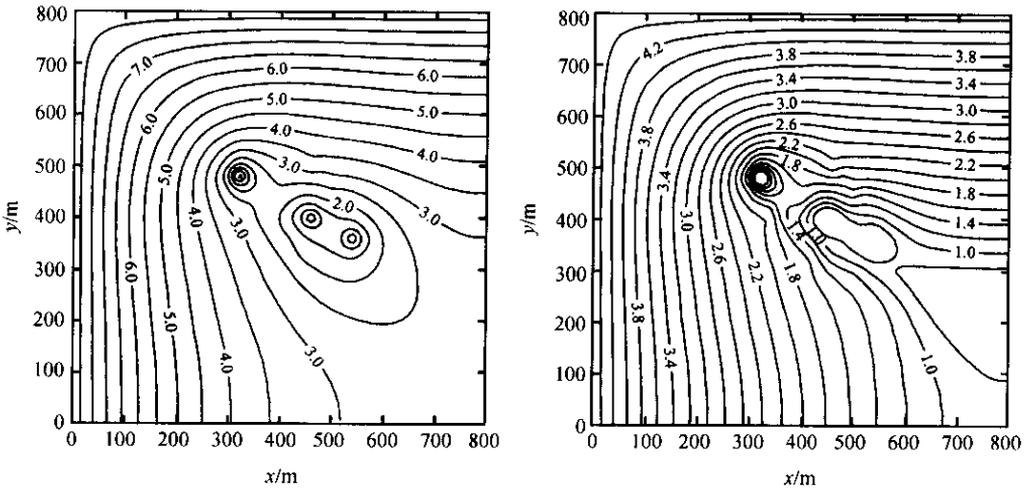
表2 水平风速廓线参数表

项目	入流	实测拟合	计算拟合	平均相对误差/%
例1	$7.58(z/10)^{0.08}$	$2.9(z/10)^{0.347}$	$2.74(z/10)^{0.363}$	-4.03
例2	$8.34(z/10)^{0.14}$	$1.95(z/10)^{0.552}$	$1.99(z/10)^{0.544}$	-0.69
例3	$4.09(z/10)^{0.08}$	$1.5(z/10)^{0.319}$	$1.72(z/10)^{0.577}$	-12.27
例4	$4.47(z/10)^{0.08}$	$1.49(z/10)^{0.376}$	$0.61(z/10)^{0.653}$	-23.84

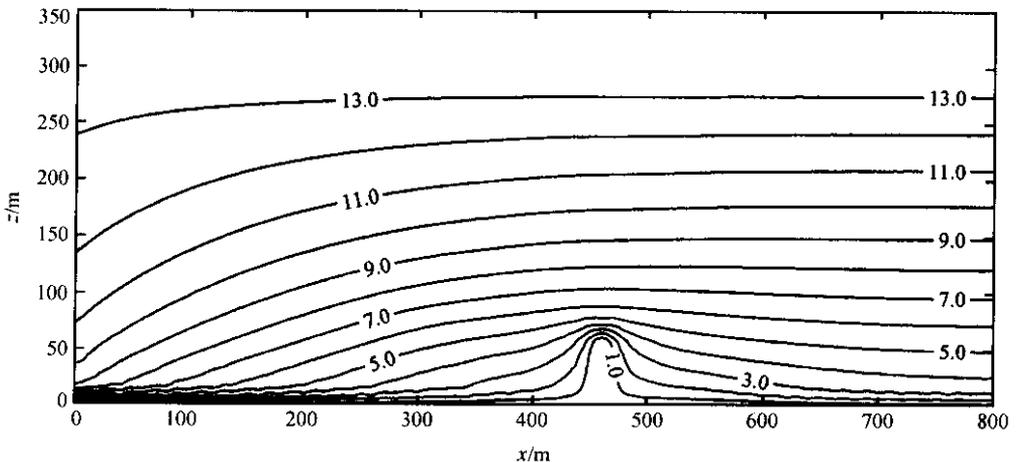
## 6.2 流场特点

小区 10 m 高水平流场 (图 3a、b) 反应了一个共同特点, 小区的最小风速出现在建筑密度最大的地方, 由于建筑群的阻力作用致使下风向的风速在小区尺度内很难恢复。三个风速低值区分别对应了三个有效空气体积比等于零的网格。

图 4 给出  $y = 400$  m 垂直剖面的水平风速等值线, 发现该小区 (最高建筑约 75 m)

图3 10 m 高处水平风速分布 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ )

(a) 例 2: 1999-11-07, 20:29; (b) 例 4: 1999-11-17, 09:59

图4 例 2 (1999-11-07, 20:29) 的水平风速分布 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ,  $y = 400$  m 垂直剖面)

对风速的影响高度能够达到 100 m 左右。

$y = 400$  m 垂直剖面的垂直运动速度分布见图 5，由于小区建筑分布的复杂，导致垂直运动的分布也是比较复杂的，但基本上在密集建筑的上风向存在上升气流，而在其下风向有下沉气流，量级约  $2 \text{ m s}^{-1}$ 。小区内两个高密度建筑中心位于 (400 m, 400 m) 附近，从图 5 中可以明显看出气流在建筑物前后的上升和下沉。Hunter<sup>[10]</sup>曾经对不同街谷高宽比的流场进行过数值模拟，对背风涡旋形成机制采用气压差给予解释，即气流受建筑物的阻挡产生质量辐合，在建筑物的上部形成了一个气压增加区域，而在街谷内，建筑物背风处的空气辐散产生了一个相对低气压区域，因此气流从屋顶以上的高压区流向低压区，当气流下沉时，由下风向建筑物的迎风面向下折射，这样在上风向建筑物的背风处仍有一个低压区，从而使气流以与屋顶以上盛行气流相反的方向穿越街谷底部，遇到墙面时，沿墙面向上折射，质量的守恒导致向上的垂直运动以补偿另一面的下沉气流，如此形成了街谷内的涡旋。Nicholson<sup>[11]</sup>对此也给出了类似的解释。虽然本小区的建筑物分布远比二维街谷复杂，但是高大建筑物之间形成的“空隙”与街谷还是有类似之处的。

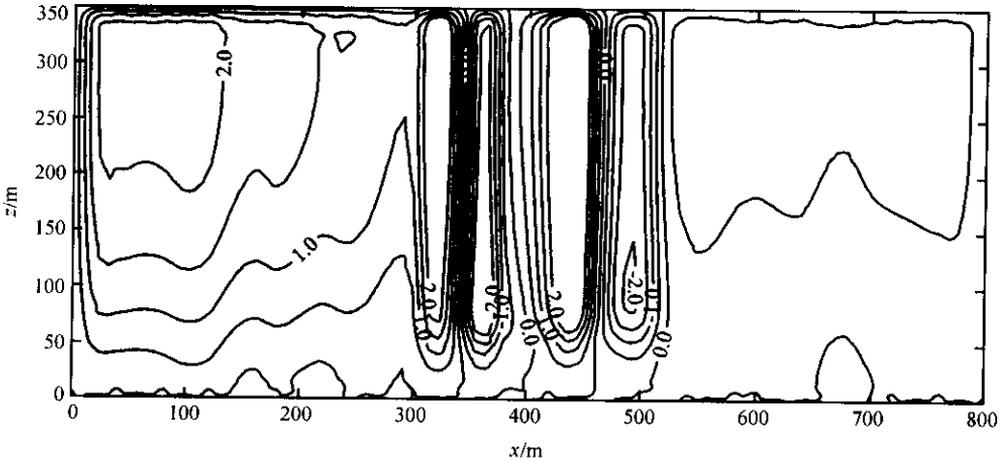


图 5 例 2 (1999-11-07, 20:29) 的垂直速度分布 (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ,  $y = 400$  m 垂直剖面)

### 6.3 垂直湍流量扩散系数 $K_m$ 分布

图 6 给出了  $y = 400$  m 垂直剖面的  $K_m$  分布，结果表明：在冠层内，低层的  $K_m$  较上层为大，确切地说，由于风速剪切较大，在密集建筑群附近出现了高  $K_m$  区；另外，大风情况的  $K_m$  比小风时要大，这与斯塔尔<sup>[12]</sup>的表述是一致的。这说明  $k - \epsilon$  方法计算的  $K_m$  是比较合理的。

### 6.4 湍流动能水平分布

10 m 高处湍流动能分布见图 7，对照小区建筑物分布图可以看出，湍流动能在建筑群的迎风面有较大的量值，约  $2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ，而在背风面其值较小。Murakami<sup>[13]</sup>曾对风洞实验和几种湍流闭合方法 ( $k - \epsilon$  方法、代数二阶动量模式、大涡模式) 的模拟结果进行了比较，结果说明它们都达到了相当高的精度，区别只是在模拟物面应力、风压等方面。另外， $k - \epsilon$  方法可能高估了建筑物前角的湍流动能，其原因是该方法基于各

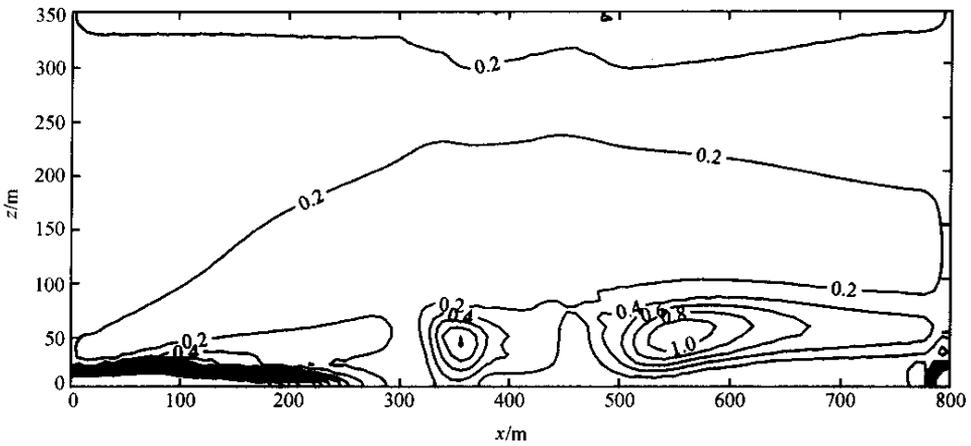


图6 例2(1999-11-07, 20:29)的垂直湍流动量扩散系数分布(单位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $y = 400 \text{ m}$  垂直剖面)

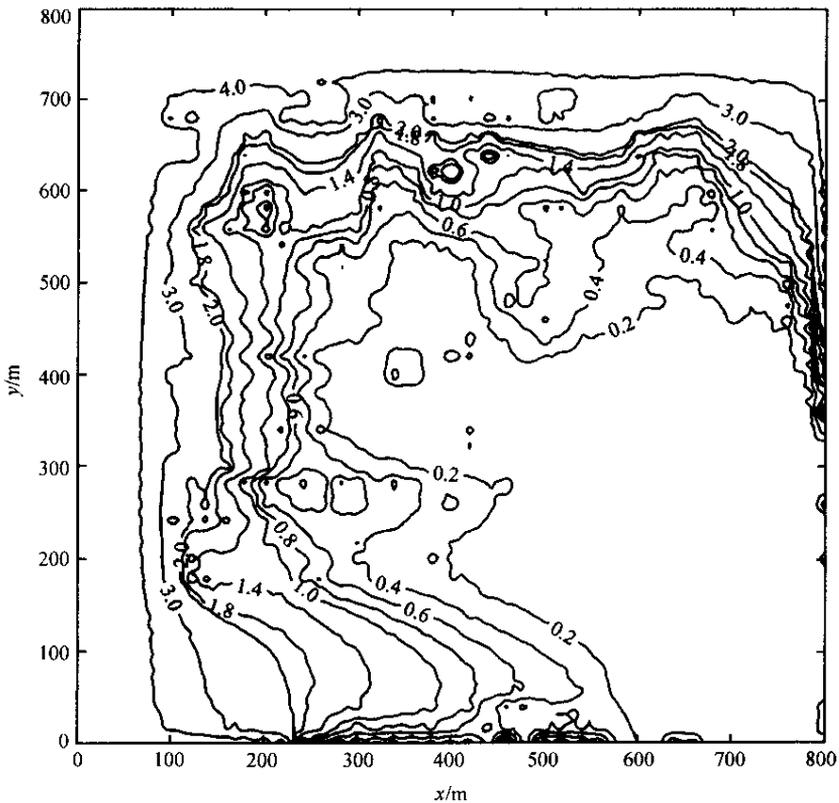


图7 例2(1999-11-07, 20:29)的10 m高处湍流动能分布(单位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ )

向同性粘理论假设。事实上,在如此复杂的建筑物分布中,湍流动能的分布当然也是很复杂的,遗憾的是目前并没有相关的观测资料加以验证并修正数值模式。

## 7 小结

采用城市冠层流场模式较好的模拟了尺度为  $10^2 \sim 10^3$  m 小区两种大风情况下的流场，模式计算和观测风廓线平均相对误差分别为  $-4.03\%$ 、 $-0.69\%$ ，垂直运动速度、垂直湍流扩散系数以及湍流动能的分布也基本合理。因而，作为大风情况下的一种近似，本模式具有一定意义，并可以为规划设计提供合理建议。当然，由于初始条件和湍流闭合参数的选择有一定的人为因素，另外忽略了与动力过程相关联的热力过程，从而导致对小风的模拟不尽理想，这正是需要进一步完善之处。

## 参 考 文 献

- 1 Oke, T. R., *Boundary Layer Climate*, Methuan & Co. LTD. London, 1987, 274.
- 2 周淑贞、余碧霞, 上海城市对风速的影响, 华东师范大学学报(自然科学版), 1998, No. 3, 30~41.
- 3 Hoyano, et al., Analysis of the influence of urban form and materials on sensible heat flux - case study of Japan's largest housing development "Tama New Town", *Atmos. Environ.*, 1999, **33**, 3931~3939.
- 4 Hargreaves, D. M., and C. J. Baker, Gaussian puff model of an urban street canyon, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 1997, **71**, 927~939.
- 5 Huang, H., Y. Akutsu, M. Arai, et al., A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis, *Atmos. Environ.*, 2000, **34**(5), 689~698.
- 6 Xia, J. Y., and D. Y. C. Leung, Pollution dispersion in urban street canopies, *Atmos. Environ.*, 2001, **35**(11), 2033~2043.
- 7 桑建国、温市耕, 大气扩散的数值计算, 北京: 气象出版社, 1992, 109.
- 8 洪钟祥, 北京气象塔的观测系统, 北京: 科学出版社, 1983, 1~8.
- 9 周淑贞、束炯, 城市气候学, 北京: 气象出版社, 1994, 404~405.
- 10 Hunter, L. J., et al., Modelling air flow regimes in urban canyons, *Urban climate, planning and building*, Proceedings of the fourth international conference on "Urban Climate, planning and building", Held at Kyoto, Japan November, 1989, 6~11.
- 11 Nicholson, S. E., A pollution model for street-level air, *Atmos. Environ.*, 1975, **9**, 19~31.
- 12 R. B. 斯塔尔编, 徐静琦、杨殿荣译, 边界层气象学导论, 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991, 107.
- 13 Murakami, S., Comparison of various turbulence models applied to a bluff body, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 1993, **46**, 21~36.

## Simulation of Flow Field in an Urban Canopy Layer during the Strong Wind

Wang Baomin<sup>1)</sup>, Liu Huizhi<sup>2)</sup>, Sang Jianguo<sup>2)</sup>, Wang Xiaoyun<sup>3)</sup>, Zhang Qing<sup>3)</sup>, and Li Ju<sup>3)</sup>

1) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2) (*State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

3) (*Beijing Meteorology Bureau, Beijing 100081*)

**Abstract** A numerical model of flow field in urban canopy layer based on  $k - \epsilon$  closure method is developed, in which a porous medium is used to present the buildings in the urban area and the form drag is used to represent the drag to the flow by the buildings. The results obtained from the model have been compared with the data observed from the Beijing 325 m Meteorological Tower. It shows that during the strong wind, the wind velocity profile obtained from the model accords well with that observed from the tower. Thus this model can be used to simulate flow field in an urban canopy layer during strong wind.

**Key words** : urban canopy layer ; effective air volume ratio ; form drag