

建筑物对大气污染物扩散影响的大涡模拟

张 宁¹ 蒋维楣^{*1, 2}

¹ 南京大学大气科学系, 南京 210093

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

摘 要 利用一个大涡模式对一个方形建筑物周围的气流场进行了模拟, 并与相应的风洞实验结果进行比较, 对比结果表明大涡模拟方法可以精细地反映建筑物周围的流场特征。在此基础上, 将拉格朗日随机游动扩散模式与大涡模式相结合, 对在受建筑物影响的气流场中的大气污染物扩散进行模拟, 模拟结果表明该方法可以很好地模拟出在建筑物影响下的气流变形所引起的各种污染物散布情况。建筑物周围的气流结构特性使得建筑物顶部污染源位置的细小变化可能造成建筑物周围污染物分布形势的很大不同, 特别是对建筑物背风侧的空腔区内地面污染物浓度有着很大的影响。当排放源高度从 $Z/H=1.05$ (H 为建筑物高度) 变化到 $Z/H=1.25$ 后, 建筑物背风侧空腔区的地面浓度迅速下降, 污染物地面浓度的高值区出现在空腔区后侧的地面; 当排放源高度由 $Z/H=1.25$ 变化至 $Z/H=1.28$ 后, 污染物基本被输送出模拟区域, 建筑物后侧区域地面污染物浓度为零; 当污染源出现在建筑物背风侧的空腔区近地面时, 污染物会在局地滞留, 形成地面污染物浓度的高值。

关键词 大涡模拟 建筑物 城市环境 大气污染物扩散 气流特征

文章编号 1006-9895(2006)02-0212-09

中图分类号 P463

文献标识码 A

A Large Eddy Simulation on the Effect of Building on Atmospheric Pollutant Dispersion

ZHANG Ning¹ and JIANG Wei-Mei^{*1, 2}

¹ *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

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

Abstract The effect of buildings on wind flow fields plays a very important role in urban meteorology and air pollutant dispersion. To understand the urban flow characteristics will help us improve the understanding and prediction in micro/local scale meteorology. Large eddy simulation is one of the most sophisticated methods. A large eddy simulation model is used to simulate the flow structure around a bluff building. TKE (Turbulent Kinetic Energy) sub-grid closure scheme is employed in the model. The numerical simulation results are compared with the wind tunnel experiment—CEDVAL (Compilation of Experimental Data for VALidation of microscale dispersion models). The results are compared both in whole and in detail. The large eddy simulation model can describe the reverse flow above the building top and the cavity structure well. The numerical simulated horizontal and vertical wind speeds are compared with the physical simulation results as well. It shows that the flow characteristics around the building can be illustrated in detail by the large eddy simulation model. Based on the flow results, a Lagrangian particle model is employed to simulate the atmospheric pollutant dispersion around the building. The large eddy simulation model can

收稿日期 2005-02-02, 2005-04-04 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40333027, 中国科学院大气物理研究所 LAPC-KF-2004-07

作者简介 张宁, 男, 1977 年出生, 博士, 主要从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: zhangning_odin@yahoo.com.cn

* 通讯作者 E-mail: wnjjiang@jlonline.com

provide detailed and reliable wind and turbulence fields, which can help the dispersion model describe the air pollutant diffusion better. A series of cases of air pollutant dispersion from a virtual source are simulated by the numerical models to understand how the source location impacts the pollutant dispersion around a bluff building. The results show that a minute change of the source location may lead to a great change of the pollutant distribution because the distortion of flow due to the effect of the building, especially for the surface pollutant concentration in the wake area. In the first three cases the source location is set above the building roof. When the point source location is set at $Z/H = 1.05$ (H is the building height), the pollutant is carried by the downwash stream of the cavity structure and the concentration is largest in these three cases. When the point source location is changed from $Z/H = 1.05$ to $Z/H = 1.25$, most of the pollutant will skip the cavity flow behind the building and the surface concentration in the wake area decreases greatly, the peak value of the surface concentration is behind the wake. When the source is moved to $Z/H = 1.28$, most of the pollutant is cleaned from the simulation domain, the surface concentration is nearly zero. When the source is in the wake behind the building, the pollutant stays in local area causing a high surface concentration. A great part of pollutant will also be carried downward due to the circulation flow behind the building and cause a great surface pollutant concentration.

Key words large eddy simulation, buildings, urban environment, atmospheric pollutant dispersion, air flow

1 引言

城市已成为各国经济和生力点的增长点,是电力、水和化石燃料的消耗中心,同时也是废弃物和污染物的产生中心。城市的污染源主要为机动车辆、工业、能源生产、生活燃煤等,它们的排放既无规律又贴近地面人类活动的主要空间,因此,对居民的影响最为明显,尤其是当建筑物周围的气流以某种方式变形后,会加重来自附近排放源的污染^[1]。

大气污染物在城市中的扩散主要受局地气流场的影响(包括平均流场和湍流场),由于建筑物的影响,城市冠层内的气流特征非常复杂。众多研究者在该领域开展了相关工作^[2~8],他们主要采用系综平均法(RANS, Renyolds Averaged Navier Stocks),系综平均法由于发展得较早,因此比较成熟,但随着研究的深入,它在应用过程中也出现了一些问题^[9],主要集中在不能很好地模拟更精细的气流结构和湍流场上。Murakami^[10]鉴于系综平均法在模拟建筑物对气流影响时出现的问题,利用风洞实验结果对大涡模拟方法和系综平均法(以 $K-\epsilon$ 湍流闭合方法为例)进行比较,发现大涡模拟方法在对建筑物墙壁附近气流结构和湍流场的模拟中比系综平均法有优势,与风洞实验结果更吻合。随着计算条件和大涡模拟方法的发展,大涡模拟技术已被逐步应用到各个领域的研究中^[11, 12]。Tutar 等^[13]将大涡模拟技术集成到计算流体力学软件中,并对两

个建筑物间的狭管效应进行了模拟。

拉格朗日随机游动粒子模式是一种物理意义清晰、同时简明易行的大气扩散模式,被广泛地应用于大气污染物扩散的模拟^[14, 15],并被证明有良好的性能。

在本文中,我们利用大涡模式和一个拉格朗日随机游动扩散模式,对方形建筑物附近的污染物扩散进行了模拟。由于大涡模式能够提供精细的平均场和湍流场,因此,本方法能够较好地模拟出由建筑物引起的气流变形对污染物扩散的影响。

2 模式简介

本文利用一个能够显式分辨建筑物动力学影响的大涡模式^[16]对建筑物影响下的气流结构进行了模拟。模式的基本方程组由连续方程、动量方程、热流量方程组成,模式中次网格闭合方案采用 Deardorff^[17]提出的 TKE (Turbulent Kinetic Energy) 闭合方案。

模式方程组如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (x_1 = X, x_2 = Y, x_3 = Z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{P}^*}{\partial x_i} - \bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = -\bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{\theta j}}{\partial x_j}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\bar{u}_j \frac{\partial e}{\partial x_j} - \overline{u_i u_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\overline{w \theta}}{\theta_0} g - 2K_m \frac{\partial^2 e}{\partial x_i^2} - \epsilon, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\varepsilon e^{3/2}}{\lambda}, \quad (5)$$

其中, $\bar{u}_i$ 为可求解速度分量 ($\bar{u}_1 = U$, $\bar{u}_2 = V$, $\bar{u}_3 = W$); $\bar{\theta}$ 为可求解位温; t 为时间, $\tau_{ij} = -2K_m S_{ij}$, $S_{ij} = (\partial \bar{u}_i / \partial x_j) + (\partial \bar{u}_j / \partial x_i)$, $\tau_{\theta j} = -K_h (\partial \bar{\theta} / \partial x_j)$, $\bar{P}_* = (\bar{P} / \rho_0) + (R_{kk} / 3)$, $K_m = C\lambda e^{1/2}$, C 和 C_ε 为系数项, e 为次网格湍流能量; ε 湍流能量耗散率。此处, 取 $C = 0.10$ 、 $C_\varepsilon = 0.19 + 0.74\lambda / \Delta$, 其中, Δ 为网格特征尺度,

$$\Delta = \left(\frac{3}{2} \Delta_x \frac{3}{2} \Delta_y \Delta_z \right)^{1/3},$$

λ 为次网格湍流长度尺度, 对不稳定和中性条件, 取 $\lambda = \Delta$; 对稳定层结, 取

$$\lambda = \min \left[\Delta, 0.76 e^{1/2} \left(\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{-1/2} \right],$$

次网格热量扩散系数 $K_h = (1 + 2\lambda / \Delta) K_m$ 。

模式采用了笛卡尔坐标系下的正交网格, 显式考虑了建筑物的影响, 即当模拟区域的网格点处于建筑物内部时, 引入一个建筑物的刚性阻力项使得该网格点上的风速为零, 同时参考 Launder 和 Spalding^[18] 的方法引入墙壁函数来处理建筑物的墙壁边界。

在此基础上, 我们将大涡模式与一个拉格朗日随机游动模式^[19]相结合对大气污染物的扩散进行模拟, 本拉格朗日扩散模式曾被用于对建筑物尾流

区污染物扩散的模拟并取得了较好的效果^[19, 20]。

3 单体建筑物周围风场的模拟

利用本文建立的模式对汉堡大学的风洞实验计划(CEDVAL^[21])中的一个个例(实验编号: A1-1)进行了相同条件下的数值模拟, 并将数值模拟结果和物理模拟实验结果进行对比, 来检验模式的模拟能力。

本次风洞试验中的建筑物模型如图 1 所示。建筑物的高度为 25 m, 宽为 30 m, 长为 20 m。实验中来流取为幂指数形式: $U = U_{\text{ref}}(Z/Z_{\text{ref}})^a$, $V = 0 \text{ m/s}$, $W = 0 \text{ m/s}$, $a = 0.20$, $U_{\text{ref}} = 6.0 \text{ m/s}$, $Z_{\text{ref}} = 100 \text{ m}$ 。数值模拟实验中模拟域大小为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 300 \text{ m}$, 网格分辨率为 2 m。数值模拟中的初始和来流边界条件与风洞试验设计相同, 侧边界采用无梯度边界, 下边界为固壁边界。模拟时间为 30 min, 本文重点分析后 20 min 的平均结果。

图 2 和图 3 分别是 CEDVAL 风洞模拟实验中单个长方形建筑物周围流场结构和本文模拟得到的数值试验结果。从整个流场的特征来看, 数值模拟结果与风洞实验结果十分吻合。在本文模拟结果中, 建筑物迎风面气流的分离以及近地面的停滞环流、在建筑物顶部的气流的回流、建筑物两侧的逆于来流方向的气流和建筑物下风方向空腔区内的双

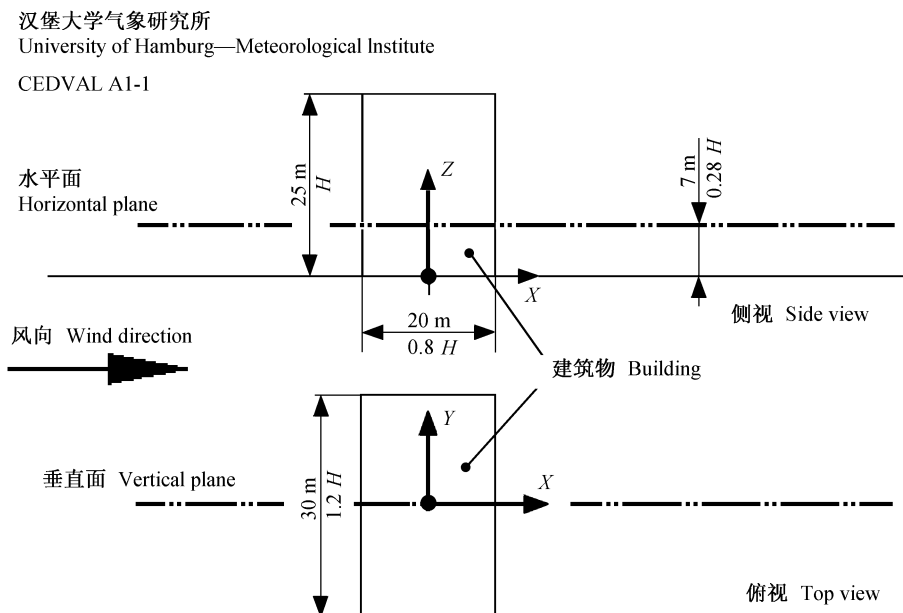


图 1 CEDVAL 风洞实验的模型示意图

Fig. 1 Model of the experiment CEDVAL (Compilation of Experimental Data for VALidation of microscale dispersion models) in wind tunnel

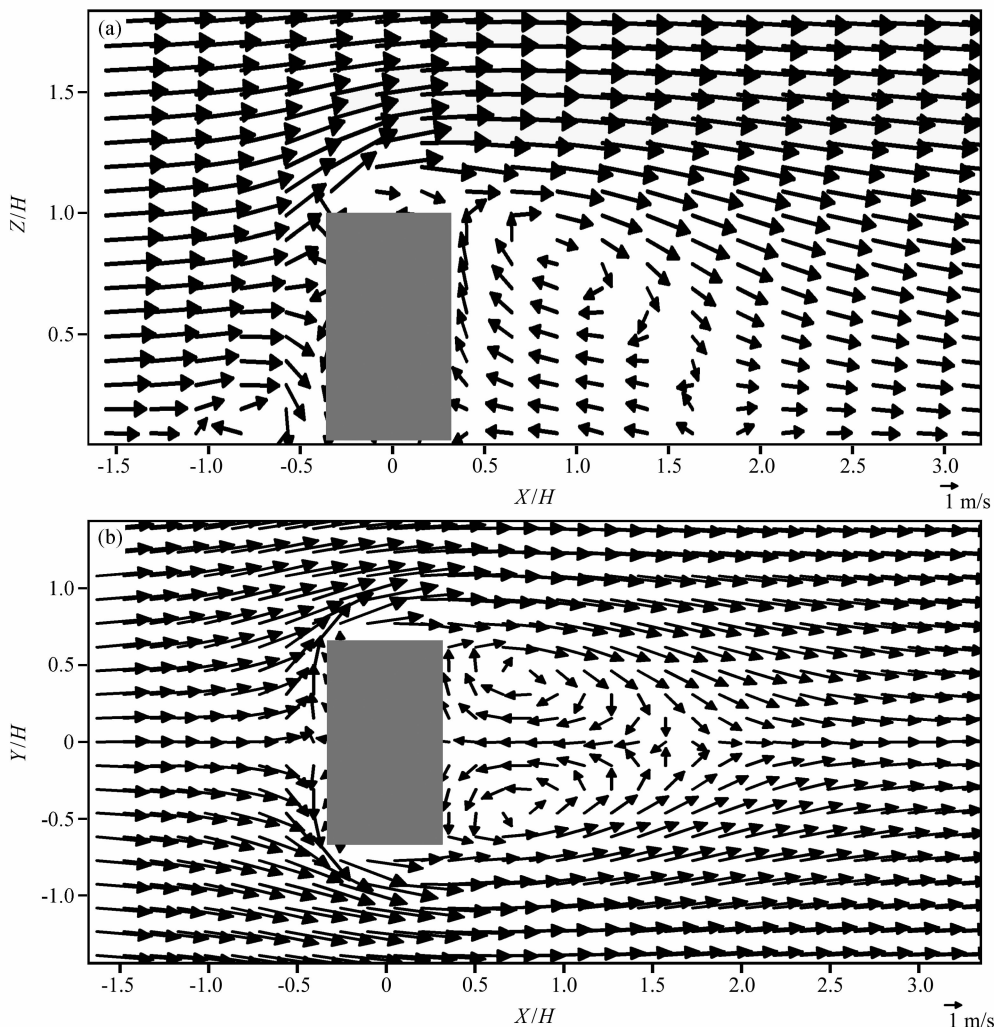


图2 单个长方形建筑物周围的流场(CEDVAL风洞实验结果): (a)侧视图($Y/H=0.0$ 所在剖面); (b)俯视图($Z/H=0.16$ 所在平面)
Fig. 2 Flow field around the cubic building (experiment CEDVAL): (a) Side view ($Y/H=0.0$); (b) top view ($Z/H=0.16$)

涡环流都有较好的体现。从气流的垂直分布图来看,数值模拟结果中,空腔区内垂直方向环流的中心比风洞实验结果略高,大约在 $Z/H=1.0$ (H 为建筑物高度)高度处,而在风洞实验的结果中,这个高度在 $Z/H=0.9$ 左右。比较两个俯视图可以发现,在建筑物下风方向($Y/H=0$ 的轴线上)的两个涡旋结构汇合的区域内,风洞实验结果的风速要略大于数值模拟结果中的风速。

在此基础上,我们比较 $Y/H=0.0$ 平面上, $X/H=-1.30$ 、 -0.82 、 -0.50 、 -0.08 、 0.24 、 0.60 、 1.08 、 1.56 、 2.04 的垂直方向上 u 和 w 分量的数值模拟结果和风洞实验结果。限于篇幅,本文主要给出了 $X/H=-0.82$ 、 $X/H=-0.08$ 和 $X/H=1.08$ 三条廓线的比较结果,分别对应于建筑物

的迎风面、建筑物顶部和建筑物后的空腔区(更详细的比较结果见文献[16])。在 $X/H=-0.82$ 处,气流已明显受到建筑物阻挡的影响(如图4a和图5a所示),在 $Z/H<1$ 的区域内风速减小,上升气流更加明显,量级达 0.1 m/s 。在 $Z/H<0.5$ 的区域,数值模拟结果与风洞实验结果有所偏差,数值模拟结果低估了 $Z/H=0.5$ 附近的水平风速 u 。在风洞实验中, $Z/H<0.5$ 的区域垂直速度有明显的振荡,而数值模拟结果则比较平滑。图4b和图5b所示是 $X/H=-0.08$ 处的 u 和 w 的垂直廓线,这条垂直廓线的底部处于建筑物内部,在建筑物的顶部贴近建筑物处有与来流方向相反的回流,同时由于建筑物的阻挡和抬升,气流有明显的上扬,体现在图4b和图5b表现为在略高于 $Z/H=1$ 的位置上

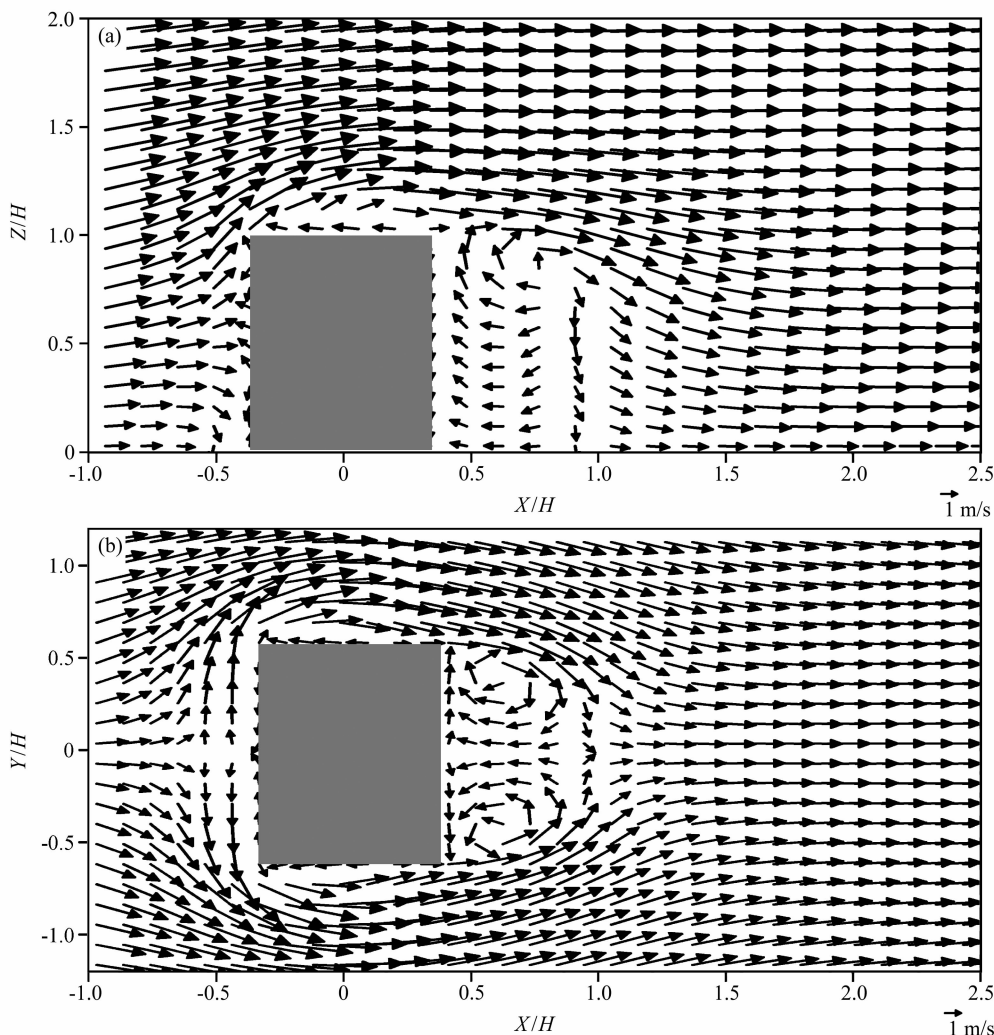


图3 同图2, 但为本文数值模拟结果

Fig. 3 Same as Fig. 2, except for the simulation results in this paper

u 为负值, 而随着高度的升高, u 分量迅速变为正值。在 $Z/H=1$ 到 $Z/H=1.3$ 的区间内 u 分量随高度强烈变化, 在 $Z/H=1.3$ 的位置上 u 达到最大值, 随后, 随高度增加 u 分量有所减小。图 5b 中, 在建筑物的顶部首先出现微弱的下沉气流, 量级大小约为 0.01 m/s , 随高度的增加, 有明显的上升气流出现, 风速垂直分量 w 在 $Z/H=1.3$ 处达到最大, 约为 0.1 m/s , 此后随高度增加迅速减小。比较数值模拟和风洞实验结果可以发现, 对 u 来说, 数值模拟结果与风洞实验结果比较一致, 对 w 来说, 数值模拟结果要略高于风洞实验结果。 $X/H=1.08$ 处于空腔区涡旋环流中心的下风向。在这个位置上 u 在低层均为负值, 即气流逆于来流的方向, 当高度高于涡旋中心后气流方向与来流方向一

致, 数值模拟结果和风洞实验结果十分一致(图 4c)。在近地面处 w 的数值模拟结果要小于风洞实验结果(图 5c)。

总体来说, 本文模拟结果基本与风洞实验结果相一致, 特别是能够很好地模拟出建筑物顶部和侧面的气流回流现象。但对建筑物背风侧的模拟仍与风洞实验结果有所差异, 特别是图 5c 中 w 的模拟结果。对于数值模拟和风洞实验结果之间的差别, 主要是由于风洞实验结果和大涡模拟结果得到的空腔区环流结构的差别所造成的。风洞实验结果的空腔区环流中心区域基本上是一个上部受压制的椭圆形, 它的长轴基本与地面平行, 而数值模拟得到的空腔区环流中心区域则呈一个较规则的椭圆结构, 并且椭圆的长轴与地面呈一定夹角, 这样就使得空

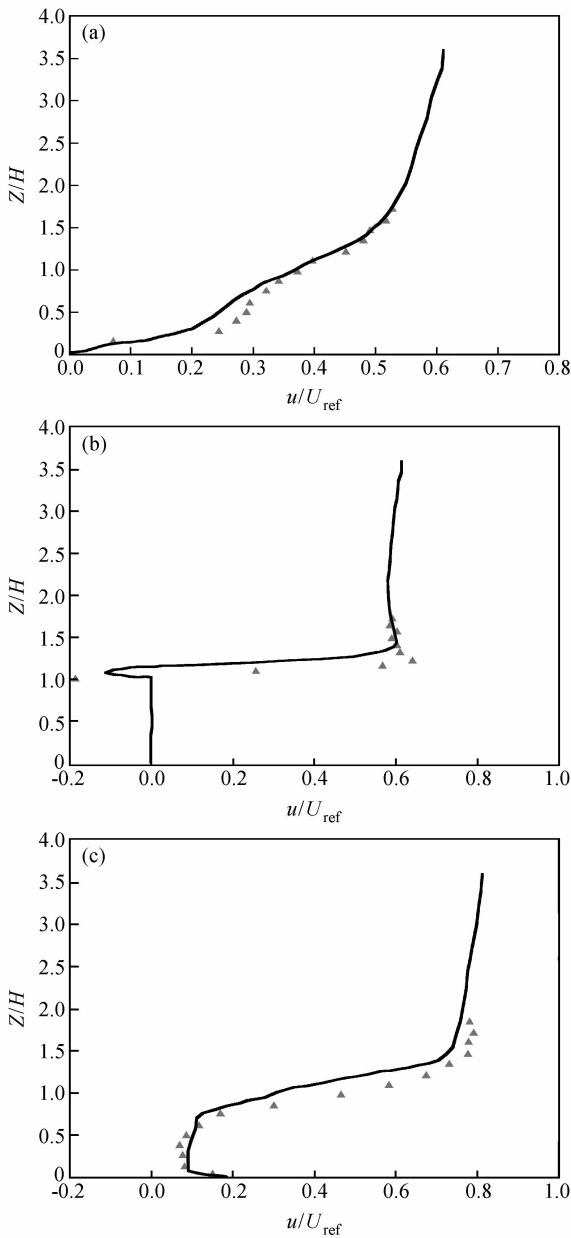


图4 本文模式模拟结果与风洞实验结果的风速水平分量 u 的比较 (实线为模拟结果; 三角为风洞实验结果): (a) $X/H = -0.82, Y/H = 0$; (b) $X/H = -0.08, Y/H = 0$; (c) $X/H = 1.08, Y/H = 0$

Fig. 4 Comparison of the results (horizontal wind speed u) between numerical modeling and experiment in wind tunnel (solid line denotes modeling result, triangle denotes experiment result): (a) $X/H = -0.82, Y/H = 0$; (b) $X/H = -0.08, Y/H = 0$; (c) $X/H = 1.08, Y/H = 0$

腔区低层的下沉气流大于风洞实验得到的结果。特别是在地面的再附着点 (reattachment point) 附近, 气流的下沉十分明显, 当下沉气流受到地面的阻挡后, 被迫转化为水平分量, 这也使得空腔区低层的

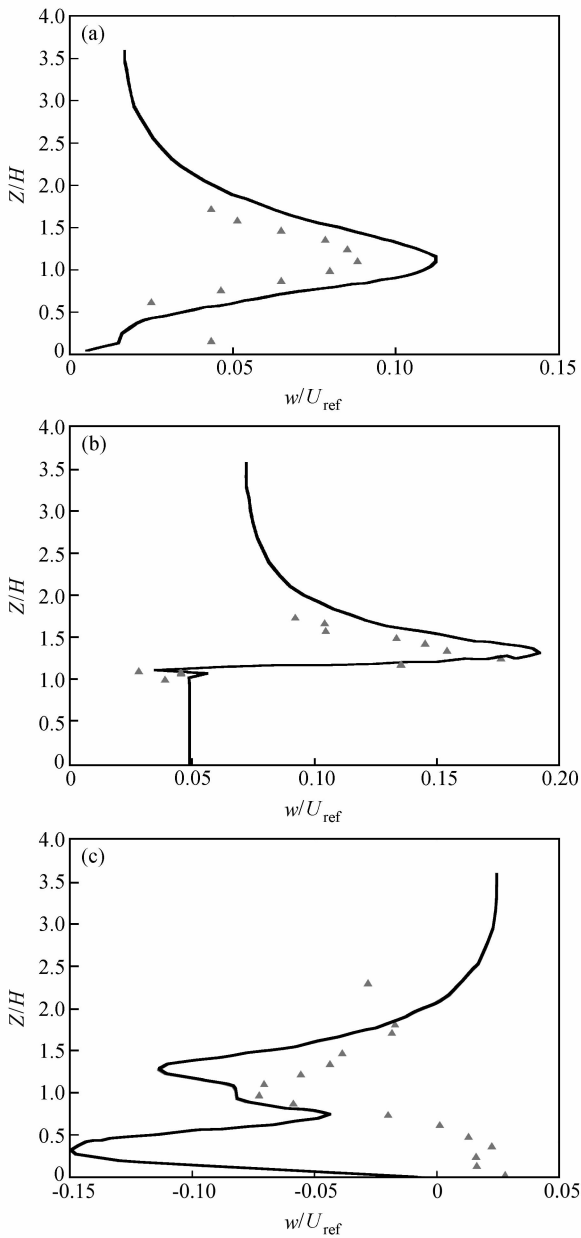


图5 同图4, 但为风速垂直分量 w 的比较
Fig. 5 Same as Fig. 4, except for vertical component w of wind speed

水平风速的模拟值偏高。

4 建筑物对污染物扩散的影响

建筑物的存在会对周围污染物的分布有明显的影[1]。

本文利用大涡模式与拉格朗日随机游动模式相结合对建筑物周围的污染物扩散进行了模拟, 假定一个源强为 200 g/s 的点源, 不考虑污染物的热力学性质引起的抬升作用, 模拟了四种不同污染物排放

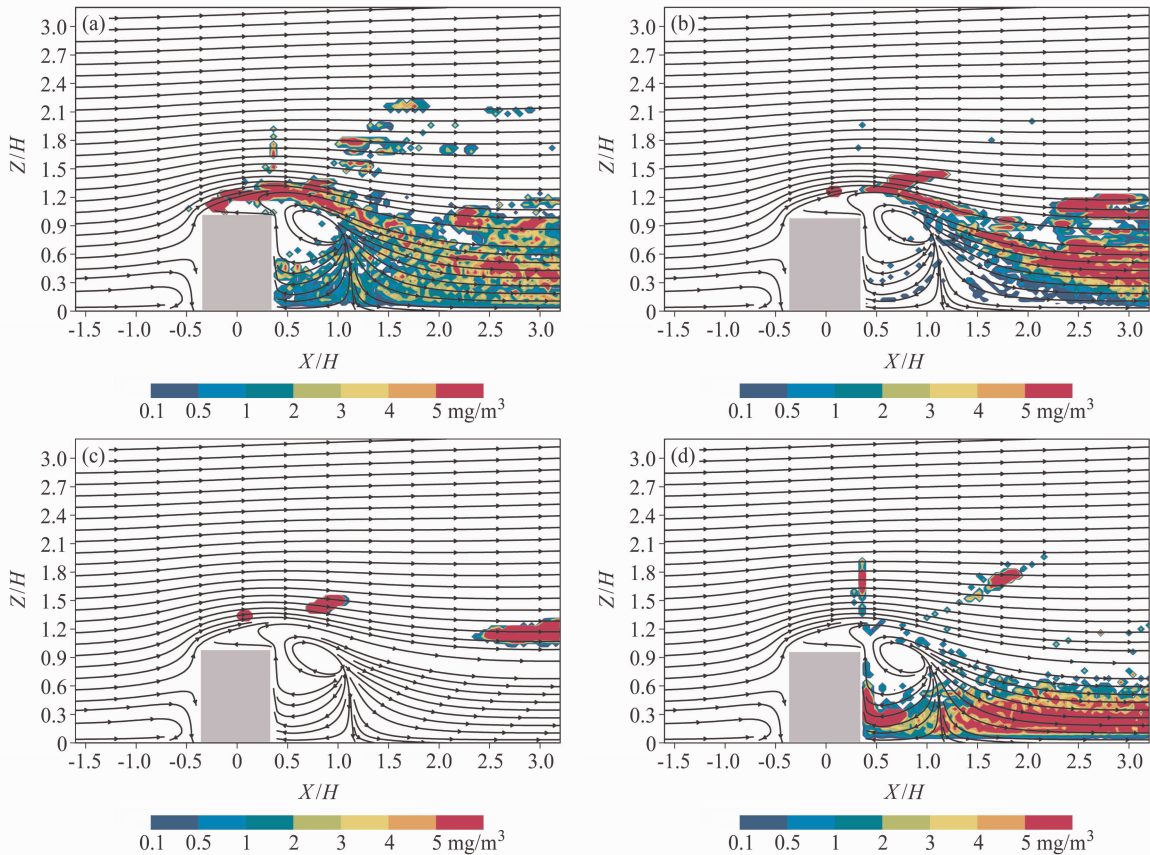


图 6 模式模拟得到的不同污染物排放源位置, 单体建筑物周围的污染物浓度分布(排放源的强度为 200 g/s, 污染物浓度单位为 mg/m^3): (a) 源位置 A; (b) 源位置 B; (c) 源位置 C; (d) 源位置 D

Fig. 6 Simulation results of pollutant concentration (units: mg/m^3) distribution around the cubic building for different positions of pollutant emission source (the emission source intensity is 200 g/s): (a) Position A; (b) position B; (c) position C; (d) position D

源位置情况下, 建筑物周围污染物的浓度分布。污染源位置分别是: (A) $X/H=0.0$, $Y/H=0.0$, $Z/H=1.05$; (B) $X/H=0.0$, $Y/H=0.0$, $Z/H=1.25$; (C) $X/H=0.0$, $Y/H=0.0$, $Z/H=1.28$; (D) $X/H=0.6$, $Y/H=0.0$, $Z/H=0.2$ 。其中源位置 A、B、C 均位于建筑物顶部上方, 源位置 D 位于建筑物背风侧的空腔区内。

图 6a 为污染物源位置 A 的污染物散布状况。在本算例中, 污染物从排放源排出后, 首先遇到的是建筑物迎风面拐角处的上升气流, 这部分上升气流的一支在建筑物的顶部下沉并形成建筑物顶部的回流, 也使得少量污染物随之又回到源排放处, 造成源排放处污染物的积累。大部分污染物随气流进入空腔区的环流, 在空腔区再附着点的上空随着下沉气流的出现, 大部分污染物随着空腔区的下沉气流着地后, 进入下风向的尾流区, 并向下风向散布。同时, 有相当一部分污染物进入了空腔区环流

结构中底部的回流气流中, 并在建筑物下风向墙壁的近地面处造成较高浓度的污染物分布。可以看到建筑物背风侧后的近地面污染物浓度均在 $1\sim$

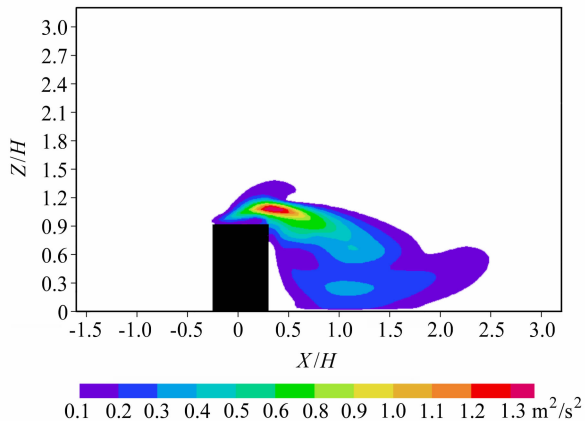


图 7 模拟所得的建筑物周围湍流能量分布(单位: m^2/s^2)

Fig. 7 Simulation results of turbulent kinetic energy distribution around the cubic building (units: m^2/s^2)

3 mg/m³, 同时, 在高于 $Z/H=1.5$ 处, 仍有部分网格点上污染物浓度较高, 污染物浓度分布不均匀, 最高浓度可达 5 mg/m³。这是由于建筑物顶部下风向的拐角处湍流运动强烈, 湍流能量的最高值就出现在该区域(图 7), 所以造成了部分污染物向上输送。

图 6b 为排放源位置 B 的污染物散布状况。在本算例中, 污染物从排放源逸出后, 仍然会进入建筑物顶部的上升气流区中, 大部分污染物随气流进入了建筑物下风向的尾流区并向下风向扩散, 只有很少的污染物进入空腔区内, 空腔区内地面污染物浓度小于 0.5 mg/m³。污染物烟流在建筑物背风侧 $Z/H=2.5$ 左右的位置触地, 此处地面浓度约为 3 mg/m³。

图 6c 为污染物源位置 C 的污染物散布状况。虽然其排放源的位置仅比源位置 B 高 0.03H, 但由于建筑物影响下区域气流结构的特殊性, 从该排放源排放出的污染物大部分都被输送出模拟区域, 它影响的区域主要是高于建筑物高度的区域。

图 6d 为污染源位置 D 的污染物散布状况。污染物从排放源释放后, 会直接受到建筑物背风侧空腔区环流结构中近地面回流的影响, 向着来流方向运动, 在建筑物墙壁附近造成污染物的堆积, 并形成高浓度区。在受到建筑物的阻挡后, 污染物随着贴近建筑物墙壁的上升气流到达建筑物顶部附近, 并随着空腔区环流结构的气流再次进入到空腔区中, 这时污染物的散布形式与图 6a 的形式相似。部分污染物会随气流向下风向移动, 同时仍然会有一部分污染物再度回到空腔区中, 于是, 在这种情况下, 建筑物背风侧墙壁的近地面处会出现大量污染物的堆积。可以看到, 本算例中在建筑物背风侧的墙角处污染物浓度均在 5 mg/m³ 以上。同时, 当污染物移动到建筑物背风侧顶部的拐角处时, 由于该处湍流活跃, 仍有部分污染物被散布到高层。

5 结论

本文利用大涡模拟技术对建筑物周围的气流结构进行了模拟, 并与风洞实验结果进行比较, 同时利用一个拉格朗日随机游动粒子扩散模式对大气污染物在建筑物周围的散布进行了模拟, 结果表明:

(1) 利用大涡模拟方法可以很好地模拟出单体建筑物周围的流场结构, 特别是建筑物顶部和建筑物侧面的气流回流现象, 能够弥补传统雷诺平均方

法的不足。

(2) 结合大涡模拟技术和大气污染物扩散模式(此处选取拉格朗日随机游动模式), 可以较好地模拟出城市中建筑物对污染物散布的影响, 能够得到与前人的观测和分析结果比较一致的趋势。

(3) 由于建筑物造成周围气流结构的特性, 使得污染物排放源位置的微小变化都可能造成建筑物周围污染物浓度分布的较大差异, 特别是对建筑物背风面空腔区的近地面污染物浓度有非常大的影响。当排放源高度从 $Z/H=1.05$ (H 为建筑物高度) 变化到 $Z/H=1.25$, 建筑物背风侧空腔区中地面浓度迅速下降, 污染物地面浓度的高值区出现在空腔区后侧的地面; 当排放源高度由 $Z/H=1.25$ 改变至 $Z/H=1.28$, 污染物基本被输送出模拟区域, 建筑物后侧区域地面污染物浓度为零; 当污染物出现在建筑物背风侧的空腔区近地面时, 污染物会在局地滞留, 此时污染物浓度最高。这一点对合理进行污染物排放设计, 尽量避免污染物堆积的发生有重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Landsberg H. Problems of desing for cities in the tropics. WMO, 1982
- [2] Hostker R. Flow around isolated structure and building clusters; a review. *ASHRAE Transcations*, 1985, **91**: 1671~1692
- [3] Baik J, Kim J. A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**: 1576~1589
- [4] Ashie Y, Ca W, Acaeda T. Buildings canopy model for the analysis of urban climate. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1999, **81**: 237~248
- [5] 蒋维楣, 苗世光, 刘红年, 等. 城市街区污染散布的数值模拟与风洞实验的比较分析. *环境科学学报*, 2003, **23**: 652~656
Jiang Weimei, Miao Shiguang, Liu Hongnian, et al. Comparison and analysis pollution modeling a city sub-domain scale model with tunnel experiment. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 2003, **23**: 652~656
- [6] 王宝民, 刘辉志, 桑建国, 等. 大风条件下城市冠层流场模拟. *大气科学*, 2003, **27**: 255~264
Wang Baomin, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. Simulation of flow field in an urban canopy layer during the strong wind. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 255~264
- [7] 苗世光, 蒋维楣, 胡非, 等. 建筑物分布对市区流场及污染物扩散影响的数值模拟. *气象科学*, 2004, **24**: 137~144

- Miao Shiguang, Jiang Weimei, Hu Fei, et al. Numerical simulation of the impact on meteorology and pollutant diffusion of urban area by building distribution. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24**: 137~144
- [8] 桑建国, 刘辉志, 王保民, 等. 街谷环流和热力结构的数值模拟. *应用气象学报*, 2004, **13**: 69~81
- Sang Jianguo, Liu Huizhi, Wang Baomin, et al. Numerical simulation of the flow field and thermal structure over a street canyon. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **13**: 69~81
- [9] Zhang Ning, Jiang Weimei, Hu Fei. Numerical method study of how buildings affect the flow characteristics of an urban canopy. *Wind and Structure*, 2004, **7**: 159~172
- [10] Murakami S. Examining the $K-\epsilon$ model by means of a wind tunnel test and large eddy simulation of the turbulence structure around a cube. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1994, **35**: 87~100
- [11] 蔡旭晖, 陈家宜. 水平非均匀对流边界层热量平衡和平流输送作用的大涡模拟. *大气科学*, 2000, **24**: 95~102
- Cai Xuhui, Chen Jiayi. Large-eddy simulations of heat budget and advection effects in heterogeneous convective boundary layers. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24**: 95~102
- [12] 蒋维楣, 苗世光. 大涡模拟与大气边界层研究——30 年回顾与展望. *自然科学进展*, 2004, **14**: 11~19
- Jiang Weimei, Miao Shiguang. Large eddy simulation and atmospheric boundary layer research——review of recent 30 years and prospect. *Advance in Natural Science* (in Chinese), 2004, **14**: 11~19
- [13] Tutar M, Oguzu G. Large eddy simulation of wind flow around parallel buildings with varying configuration. *Fluid Dynamics Research*, 2002, **31**: 289~315
- [14] Mathiasw R. Simulation of urban-scale dispersion using a Lagrangian stochastic dispersion model. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, **99**: 379~410
- [15] Kurbanmura O, Sabelfeld K. Lagrangian stochastic models for turbulent dispersion in the atmospheric boundary layer. *Boundary Layer Meteorology*, 2002, **97**: 191~218
- [16] 张宁. 建筑物对城市微尺度气象环境影响的大涡模拟. 南京大学博士学位论文, 2004
- Zhang Ning. Large eddy simulation on the buildings effect on urban micro-scale meteorological environment. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 2004
- [17] Deardorff J. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, **18**: 495~527
- [18] Launder B, Spalding D. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, **3**: 269~289
- [19] 徐敏, 王卫国, 蒋维楣. 建筑物尾流区与污染物扩散的数值模拟. *环境科学学报*, 1999, **19**: 52~56
- Xu Min, Wang Weiguo, Jiang Weimei. Numerical simulation of flow field and dispersion in wake region of building. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1999, **19**: 52~56
- [20] 王卫国, 徐敏, 蒋维楣. 建筑物附近气流特征及湍流扩散的模拟试验. *空气动力学学报*, 1999, **17**: 87~92
- Wang Weiguo, Xu Min, Jiang Weimei. The simulation experiment on the flow feature and turbulence dispersion near building. *Acta Aerodynamica Sinica* (in Chinese), 1999, **17**: 87~92
- [21] <http://www.mi.uni-hamburg.de>