环境力学专题·论文

现代城区热环境与污染物扩散的大涡模拟研究

李海锋, 王博斌, 崔桂香*, 张兆顺

清华大学航天航空学院, 北京 100084

*联系人, E-mail: cgx@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-06-18; 接受日期: 2015-08-19; 网络出版日期: 2015-08-31

国家自然科学基金(批准号: 11132005, 11490551)资助项目

摘要 本文以北京(CBD)中心商业区为例, 模拟了典型夏季晴天 CBD 小区大气流动, 考察了 CBD 小区风场、温度场和污染物扩散过程. 数值求解过滤的不可压缩流体 Navier-Stokes 方程组, 采用有限体积的离散方法, 时间方向推进采用三阶 Runge-Kutta 法, 按照 SIMPLE 算法求解不可压缩大涡模拟方程组. 为适应城市小区内复杂的湍流流动, 采用 Lagrange 动力模式封闭亚格子雷诺应力. 通过表面能量平衡关系确定建筑表面的温度分布. 结果表明壁面温度主要由太阳辐射决定, 而空气温度主要由对流换热决定. 通过研究风向和浮力对污染物浓度分布的影响, 发现污染源近场的扩散过程受建筑分布、风向和局部流场的影响显著, 冠层内羽流偏转明显; 浮力促进垂向对流, 扩大垂向羽流宽度, 但对展向羽流宽度影响不大.

关键词 现代城区, 大涡模拟, 点污染源

PACS: 62.50.+p, 47.40.-x, 43.40.Jc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00314

当前, 国内城市化的速度逐渐加快, 城市规模不断扩大, 城市人口也不断增加. 逐渐恶化的城市大气环境对人类的生存环境和人类健康造成了巨大的威胁. 为了改善城市空气质量, 提高居民生活舒适度, 应对和解决上述环境问题, 必须正确地认识城市大气流动、热环境和污染物扩散过程^[1,2]. 由于城市下垫面的多样性, 城市大气运动过程复杂, 目前还没有得到充分地认识. 近年来发展起来的环境流体力学提供了一种研究城市大气环境的理性手段^[3,4], 正越来越多地被气象学界与环境领域的专家学者所使用. 环境流体力学对城市大气环境研究的主要贡献包括:

(1) 通过实验或数值计算的手段增进对城市大气运动的认识^[5], 分析基本流动和扩散过程, 并对重要的影响因素进行参数化^[6,7]; (2) 建立各类降阶模型, 如城市冠层模型^[8], 污染物快速预测模型^[9]等, 应用于实际工程问题^[10]. 认识城市大气运动过程是发展降阶模型的基础.

实际城市的下垫面复杂, 建筑的大小、形状、高度和分布形式都存在很大的非均匀性, 影响因素众多, 且在不同城市间表现出明显差异. 模型建筑群能更好地抽象出特定因素进行研究^[11], 便于分析规律并进行参数化, 目前研究建筑群风场时大多采用模

引用格式: 李海锋, 王博斌, 崔桂香, 等. 现代城区热环境与污染物扩散的大涡模拟研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 104707

Li H F, Wang B B, Cui G X, et al. Study on thermal environment and pollutant dispersion in real urban area by Large Eddy Simulation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 104707, doi: 10.1360/SSPMA2015-00314

型建筑群作为研究对象. 模型建筑群包括二维的街区峡谷模型^[12]; 三维的长方体(包括立方体)模型^[13]和实际小区模型^[14,15]. 街区峡谷模型研究街区尺度问题, 优点是模型和研究都比较简单, 缺点是只能研究二维问题; 长方体建筑群关注小区尺度流动, 几何分布和流动过程都是三维的, 但规模和研究难度都较街区峡谷模型大; 实际小区模型更接近实际城市, 其结果不具有一般性, 但是提供了检验简单建筑群所得规律的有效工具. 实际城市中的观测实验比较困难, 获取小区冠层内外完整时空分布的数据尤其困难. 风洞和水洞实验又很难模拟真实的辐射条件. 数值模拟提供了一种灵活的研究手段, 刘玉石^[16]已经成功地用大涡模拟研究实际城市小区微环境问题.

Stewart 和 Oke^[17]根据地表粗糙度、植被分布比例、反照率等标准将城市分为 9 个“热气候区”, 包括现代城区、老城区、工业区和开阔地等. 其中现代城区主要由建筑和路面组成, 具有建筑高、建筑几何非均匀度大、地表水汽通量小的特点. 作为地标性建筑所在地和人口密集区, 现代城区的大气环境受到广泛关注, 同时现代城区也更容易成为恐怖袭击的目标.

根据热力条件的不同, 可将建筑群大气流动研究分为中性、非稳定和稳定三类. 中性条件不考虑温度和密度分层, 非稳定条件下底层空气温度比上层空气温度高, 浮力促进垂向对流, 稳定条件下恰好相反, 底层空气温度低, 浮力抑制垂向对流. 在日间, 大气受太阳辐射的影响, 处于非稳定的状态. 本文以北京国贸附近的中心商业区(CBD)为例, 研究强辐射条件下, 现代城区的动力、热力特性和污染物扩散过程. 通过比较不同外流风向的模拟结果, 讨论冠层内风向偏转的变化规律. 通过表面能量平衡关系确定建筑表面的温度分布, 使得温度边界条件更加真实, 并讨论墙面温度分布和空气温度分布与太阳辐射和对流换热之间的关系. 最后讨论污染物在复杂下垫面中的扩散过程以及浮力和风向的影响.

1 数学模型和数值方法

1.1 数学模型

城市小区尺度的大气流动属于低速大气运动, 满足不可压缩 Navier-Stocks 方程组, 地球自转引起的科氏力可以忽略, 温度场计算采用 Boussinesq 假设. 本文将污染物作为被动标量处理, 满足标量输运方程.

对 Navier-Stocks 方程组、浓度和温度输运方程进行过滤得到大涡模拟控制方程组如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \\ & + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\bar{\theta} - \bar{\theta}_0}{\bar{\theta}_0} g \delta_{i3} + \bar{f}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{cj}}{\partial x_j} + \bar{S}_c, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \kappa \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{\theta j}}{\partial x_j} + \bar{S}_\theta, \quad (4)$$

其中方程(1)–(4)分别为过滤后的连续方程、动量方程、浓度输运方程和温度输运方程. 其中 $\bar{c}$ 和 $\bar{\theta}$ 分别为可解尺度的浓度和温度, D 和 κ 分别为分子质量扩散系数和热扩散系数; $\bar{S}_c$ 和 $\bar{S}_\theta$ 分别是污染源和热源, $\bar{f}_i$ 为附加力. 在温度控制方程中, $\bar{\theta}_0$ 为参考温度, 并采用 Boussinesq 假设计算由温差引起的浮力. 在方程(2)中, $\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j}$ 为亚格子应力, 在方程(3)和(4)中, $\tau_{cj} = \bar{c} \bar{u}_j - \overline{c u_j}$ 和 $\tau_{\theta j} = \bar{\theta} \bar{u}_j - \overline{\theta u_j}$ 分别为亚格子质量通量和亚格子热通量.

大涡模拟方程中亚格子应力、亚格子质量通量和热通量都是未知量, 需要用湍流亚格子模型予以封闭. 在湍流理论中有各种亚格子模式, 本文采用在复杂工程湍流模拟中适用的涡黏和涡扩散模式分别封闭亚格子应力和亚格子通量,

$$\tau_{ij} = 2\nu_t \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij}, \quad (5)$$

$$\tau_{cj} = \frac{\nu_t}{Sc_t} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}, \quad (6)$$

$$\tau_{\theta j} = \frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}, \quad (7)$$

其中 $\nu_t = C_s^2 \Delta^2 |\bar{S}|$ 是常用的 Smagorinsky 亚网格涡黏系数, C_s 是模式系数, Δ 是网格尺度, $\bar{S}_{ij} = (\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i) / 2$ 是可解尺度速度变形率张量, 且 $|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$; Sc 为湍流施密特(Schmidt)数, Pr 为湍流普朗特(Prandtl)数. Sc 和 Pr 是标量湍流模拟中重要的参数, 本文计算取大气标量湍流模拟中常用

值 0.72. 采用 Meneveau 等人(1996)^[18]提出的沿质点轨迹平均的方法动态确定模式系数, 即 Lagrange 动力模式.

1.2 物理模型

图 1 给出了本文中所用实际城区模型的建筑群几何分布. 为使模型更接近真实, 建筑的位置、大小、高度根据北京国贸附近东大桥路和金桐东路之间的中心商业区(CBD)简化得到. 小区东西方向长 600 m, 南北方向宽 660 m, 中间有一条南北方向的马路, 东南角有一个小公园, 西南角有一块空地, 其他位置均有建筑分布. 建筑平均高度 $h=82$ m, 最高 140 m, 高度标准差为 47.8 m, 相当于 $0.58h$. 投影面积比 $\lambda_p = 0.243$, 东西方向的迎风面积比 $\lambda_{f,ew} = 0.447$, 南北方向的迎风面积比 $\lambda_{f,ns} = 0.522$. 建筑群具有平均高度高, 高度变化大, 迎风面积比大的特点, 是现代城区.

图 2(a)给出了计算域的三维示意图, 建筑平均高度为 $h=82$ m, 计算域为 $14.6h \times 15.4h \times 12.2h$. Castro 等人^[19]指出在高度为 h 的均匀建筑群流场的粗糙子层中, 流向、展向、垂向的积分尺度约为 $3h$, h , h . 本文中, 计算域三个方向的长度远大于积分尺度, 可

图 1 实际城区建筑群几何分布, 单位: m

Figure 1 Distribution of buildings in real urban area. Unit: m.

图 2 现代城区模型计算域和网格. (a) 计算域; (b) 网格

Figure 2 Computational domain and grid of real urban area. (a) Computational domain; (b) grid.

以捕捉到流动结构, 是合理的. 在重点分辨区域(图 2(a)黑框内)外面各延拓 300 m, 这相当于 $3.6h$, 大于一倍的积分长度, 保证入口湍流场得到充分调整. Wang 等人^[20]指出在随机高度建筑群数值模拟中, 计算域高度取 $8h$, 可以得到与实验相符的结论, 本文计算域高度为 $12.2h$, 是符合要求的.

图 2(b)给出了计算域的网格分布, 在垂直方向, 均高度以下有 18 个网格, 网格间距为 5 m. 水平方向, 网格间距为 3 m, CBD 小区大部分建筑都有 10 个以上的网格来分辨. 日本建筑研究所 Tominaga 等人^[21]分析了大量的数值试验结果, 提出了所谓 AIJ 标准. 该标准指出, 为了准确模拟街道内部和建筑周围的流动, 最小的网格分辨率应为建筑尺寸的 $1/10$, 约为 $0.5\text{--}5$ m. 因此文中的网格设计是合理的.

本文研究特定类型实际城区的流动和污染物扩散特性, 模拟位于充分发展湍流边界层中的现代城市小区环境. 为了保证来流风场是充分发展的湍流并节省计算量, 下垫面采用组合模型. 在计算域的中

间(图 2(a)黑框内, 几何分布如图 1)采用密网格精细分辨建筑几何形状, 建筑表面满足无滑移条件, 在这一区域之外, 采用阻力元模型来模拟建筑群对风场的阻碍作用. 阻力元模型的具体方法为: 在建筑平均高度以下, 阻力以均匀分布的体积力 f_i 的形式加到动量方程中

$$f_i = -\frac{|U|U_i}{L_c}, \quad (8)$$

其中

$$L_c = \frac{2(1-\alpha)h}{C_d\lambda_f} \quad (9)$$

是阻力特征长度, α 是冠层内建筑体积占比, 几何参数 λ_f 和 α 通过图 1 实际城区建筑群统计得到. C_d 是阻力系数, Belcher 等人^[22]根据实验结果建议 C_d 取 3.2. 组合模型被成功应用于城市小区微环境大涡模拟中^[23].

计算域东西(x轴)长 1200 m, 南北(y轴)宽 1260 m, 垂向高 1000 m, 中心区到边界的距离均为 300 m. B_1 – B_4 分别对应西面、南面、东面、北面边界, B_5 为顶部边界. 入口边界采用入流条件, 其他边界采用出口条件, 见下文详述. 比如当平均流为西风时, 西侧边界 B_1 采用入流条件, 其他采用出口条件.

初始条件:

(1) 初始速度场计算公式如下:

$$U(z) = \begin{cases} U_{\text{free}} \frac{\ln((z-d)/z_0)}{\ln((Z_m-d)/z_0)}, & \text{if } z > h, \\ U_h \frac{z}{h}, & \text{if } z \leq h, \end{cases} \quad (10)$$

其中 U_{free} 为计算域顶部速度, 其大小为 2.5 m/s, 风向根据具体算例而定. d 为零位移平面高度, z_0 为粗糙高度, 根据 Cheng 和 Castro 等人^[13]在均匀建筑群中得出的拟合公式, $d = 0.83h$, $z_0 = 0.053h$. Z_m 为计算域的高度, U_h 为建筑平均高度处的风速, 再根据 Hanna^[24]的方法计算初始脉动速度.

(2) 初始温度场计算公式如下

$$T(z) = \begin{cases} T_{\text{wall}} + (T_{\text{free}} - T_{\text{wall}}) \frac{\ln\left(\frac{(z-d)}{z_{0T}}\right)}{\ln\left(\frac{(Z_m-d)}{z_{0T}}\right)}, & \text{if } z > h, \\ T_h, & \text{if } z \leq h, \end{cases} \quad (11)$$

地表和建筑物全部给定初始温度为 T_{wall} , T_{free} 为顶部风温, z_{0T} 为热力粗糙高度, 比动力粗糙高度小很多, 这里给定 $z_{0T} = 0.1z_0$.

边界条件具体提法如下所述.

(1) 入流条件: 湍流脉动对于小区污染物扩散过程影响显著, 为了使下垫面建筑群处于充分发展的湍流边界层中, 要求入口来流为充分发展的湍流. 为此, 首先通过流向和展向采用周期边界条件计算得到统计定常湍流场, 然后选取流场中一个截面上的速度分布, 作为入流条件. 为节省计算量, 在周期计算域中, 下垫面全部采用如前所述的阻力元模型.

(2) 出口条件: 出口采用无反射条件, 即对任意物理量 ϕ , 出口法向为 $\mathbf{n}$,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{V}_n \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} = 0.$$

(3) 壁面边界条件: 建筑物表面、地面为不可滑移边界条件, 采用壁函数来确定固壁动量通量.

(4) 污染物边界条件: 入口处浓度为零, 地面和建筑表面采用零通量条件, 出口采用无反射条件.

(5) 温度边界条件: 入口处的温度根据如下的对数分布表达式确定

$$\begin{cases} \frac{\theta(z) - \Theta_{w,0}}{\Theta_f - \Theta_{w,0}} = \frac{\ln(z-d) - \ln z_{0,\theta}}{\ln(L_z-d) - \ln z_{0,\theta}}, & z > h, \\ \Theta(z) = \Theta(h); & z < h, \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\Theta_f = 308 \text{ K}$ 为顶部自由流风温, $\Theta_{w,0}$ 为入口处地表温度, 温度粗糙度 $z_{0,\theta}$ 根据 Brutsaert^[25]提出的经验公式确定, 即

$$\ln\left(\frac{z_0}{z_{0,\theta}}\right) = \kappa B_H^{-1} = 2.48 (Re_{z_0})^{0.25} - 2, \quad (13)$$

其中粗糙雷诺数 $Re_{z_0} = u_* z_0 / \nu$, 动量粗糙度 z_0 根据 Macdonald 估计^[26]:

$$\frac{z_0}{h} = \left(1 - \frac{d}{h}\right) \exp\left(-\left(0.5\beta \frac{C_D}{\kappa^2} \left(1 - \frac{d}{h}\right) \lambda_f\right)^{-0.5}\right), \quad (14)$$

其中

$$\beta = 0.55, C_D = 1.2,$$

$$d/h = 1 + A^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1), A = 4.43.$$

出口采用无反射边界条件. 地面和建筑物表面的温度根据 1.3 节的表面能量平衡方程确定.

1.3 表面能量平衡

在地面和建筑表面, 净辐射 $Rn(i)$, 感热 $H(i)$, 潜热 $LE(i)$ 和储热 $G(i)$ 平衡. 晴天条件下, 城市中地面和建筑表面的水分含量很少, 忽略潜热得到表面能量平衡关系为

$$Rn(i) - H(i) = G(i). \quad (15)$$

感热是从壁面进入到流体中的热通量, 在流场计算中可以得到, 净辐射是入射能量和出射能量之差, 通过辐射模型计算. 结合能量平衡关系式(15)即可得到进入到建筑和路面内部的储热通量.

建筑和路面内部的温度分布通过一维热传导方程求解. 将建筑和路面沿垂直壁面方向离散成 n 层 (这里 $n=20$), 对于第 i 个面的第 k 层有

$$\rho_i C_i \frac{\Delta \Theta_{ik}}{\Delta t} = \frac{1}{d} (G_{k-1,k}(i) - G_{k,k+1}(i)), \quad (16)$$

$$G_{k,k+1}(i) = \lambda \frac{\Theta_{i,k} - \Theta_{i,k+1}}{d}, \quad (17)$$

其中 d 为每一层的厚度, λ 为热导率, $G_{k,k+1}(i)$ 为第 k 层和第 $k+1$ 层间的热通量, C_i 为质量热容. 外墙面的边界条件 $G_{0,1}(i) = G(i)$ 由前述能量平衡方程计算得到, 内墙面的边界条件为定温条件.

因为建筑群内光线反射过程比较复杂, 为了简化这一反射过程, Kanda 的辐射模型基于均匀分布的建筑群. Kanda 的模型将所有表面分成东、南、西、北、地面和顶部 6 种, 利用各个面之间的角系数 $V(i, j)$, 计算各个面间的平均辐射强度. 对于均匀分布的建筑群, 角系数 $V(i, j)$ 有显式表达式, 具体计算方法可参考 Kanda 文章^[27].

Kanda 的辐射模型中关于短波和长波反射关系适用于任意建筑群. 在日间, 短波辐射是表面能量平衡中最主要的一项, 同一面上照射区和阴影区的温差显著. 为了更好地反映建筑表面温度的非均匀性, 本文对 Kanda 方法中的直射短波入射进行修正, 考虑了每个网格点不同的受照射情况. 阴影区的直射短波入射 $R_s = 0$, 受照射区的直射短波入射 $R_s = 0.8kS_0 \cos(\beta)$, 其中 β 为墙面法向量与光线夹角, $S_0 = 1353 \text{ Wm}^{-2}$, k 是到达地面的短波辐射和大气层上边界的短波辐射之比. 建筑群内部的短波和长波

反射过程涉及的能量较少, 角系数计算复杂, 这里仍沿用 Kanda 方法. 水泥的热容量和吸收率等物性参数与 Kanda 文中给出的相同.

2 场地实验验证

本文所使用的数值方法已在前期发表的文章中得到验证. Wang 等人^[20]所用的数值方法与本文相同, 文中给出了数值模拟均匀建筑群模型及随机高度建筑群模型得到的平均场和湍流统计量, 结果与 Cheng 和 Castro 等人^[13]的实验结果吻合得很好, 说明了数值方法在计算风场时的有效性, 详见 Wang 等人的文章^[20].

本文计算实际城区大气流动过程中, 首先通过表面能量平衡计算得到壁面温度, 为温度方程提供边界条件. 为此, 通过与 Kanda^[27]场地实验数据比较, 检验表面能量平衡模型的准确性. 实验于 2003 年 10 月 30 日在日本松阪(东经 $136^\circ 32'$, 北纬 $34^\circ 34'$)进行. 实验中模型建筑群由高度为 0.15 m 的水泥立方体组成, 迎风面积比和投影面积比均为 0.25. 计算域大小为 $3.6 \text{ m} \times 3.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 将图 2 中的小区替换成 8×8 个立方体, 几何形状和分布与 Kanda 实验相同. 因为缺乏实验进行时的上游来流数据, 为了和实验条件尽量接近, 用 WRF 模拟当地中尺度风场(详细方法参考刘玉石博士论文^[16]). 这里模拟当地时间 12 点时的状态, 将 11:30 和 12:30 之间的风场结果作时间平均, 得到 1.5 m 高度处的平均风速为 $(1.4 \text{ m/s}, -4.1 \text{ m/s})$. 控制周期计算域的外流为这一风速即可得到所需的入口条件. 另外 1.5 m 高度处的平均风温为 20°C , 水泥热导率 $0.5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 吸收率 0.98, 体积热容 $2.48 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}$.

图 3 在 6 个面上与实验比较了净辐射通量、感热通量、储热通量和壁面温度. 考虑到表面能量平衡关系中的各项都比较复杂, 涉及很多假设, 图 3 的结果与实验基本相符. 相对于净辐射和温度, 感热和储热与实验结果相差较多, 精确计算表面热流是很多工程领域面临的难题. 温度最高的是南侧墙面, 因为在北半球中纬度的秋季, 太阳高度角比较低, 中午时太阳光与南侧墙面法向的夹角为 38° , 而与屋顶法向的夹角为 52° , 南侧墙面受到的太阳辐射最强.

图 3 表面能量平衡模型与 Kanda 场地实验比较. (a) 净辐射; (b) 感热; (c) 储热; (d) 温度

Figure 3 Comparison between results calculated by surface energy balance model and that from experimental data of Kanda. (a) Net radiation; (b) sensible heat; (c) heat accumulation; (d) temperature.

3 CBD 小区算例的计算结果

3.1 风场

在实验验证的基础上, 研究实际城区建筑群绕流的速度、温度分布和污染物扩散过程. 为研究强非稳定条件下的流动, 选取夏季晴天中午 12 点作为辐射条件, 太阳直射北纬 20° (北京位于北纬 40°), 来流的外流风速 $U_f = 2.5 \text{ m/s}$, 外流风温为 35°C . 采用水泥的材料参数, 建筑内温度取 25°C , 土壤深层温度取 20°C . 为研究风向的影响, 分别计算了西风、南风 and 西南风三个不同来流风向的算例; 为研究浮力的影响, 西风和南风情况下还计算了中性条件的对照算例.

为研究复杂非均匀冠层中的污染物近场扩散过程以及浮力和风向对扩散过程的影响, 如图 1 所示, 在 $x = 165 \text{ m}$, $y = 180 \text{ m}$ 处放置了一个强度为 q 的近地点污染源, 污染源离地 2 m . 点源位置的南北方向

各有两栋 140 m 的高层建筑, 点源位于一个东西走向的街区峡谷中, 峡谷长 160 m , 高宽比约为 $2:1$. 图 4 给出了三个风向算例点源附近的平均速度矢量在近地面和垂直平面上的分布. 在西风和西南风算例中, 近地面空气基本都沿着街区走向自西向东流动. 在南风算例中, 两个建筑之间的狭窄通道处近地风速比较大, 建筑北侧有明显分离涡. 此外, 在南风和西南风算例中, 垂直平面上都有逆时针旋转的涡(自西向东看).

二维街区峡谷和简单三维建筑群的研究结果表明, 当外流风速与街区走向不一致时, 平行峡谷分量 $u_{\parallel}$ 形成峡谷方向的质量输运^[28](峡谷效应), 垂直峡谷分量 $u_{\perp}$ 形成漩涡混合^[29], 从而使流体呈螺旋线向下游运动. 峡谷效应使得外流风向和峡谷内风向形成夹角 α , 夹角的大小与建筑长宽比和峡谷长宽比有关, 当峡谷有明显走向时, 内外风向可以形成很大的夹角^[30,31].

图 4 点源附近近地面和垂直平面上的速度矢量. (a) 西风; (b) 南风; (c) 西南风

Figure 4 Velocity vectors on the horizontal surface above the ground and the vertical surface near the point source. (a) Outflow: west wind; (b) outflow: south wind; (c) outflow: southwest wind.

用水平面平均后的速度计算风向, 图 5 给出了西风、南风 and 西南风算例冠层内风向相对主流风向的偏转角度 α , α 反映冠层内建筑群对风向的平均偏转程度. 西风算例在冠层内约有 -5° 的偏转; 南风算例在大部分范围内没有偏转, 只在冠层底部有近 -20° 偏转; 西南风算例在冠层内约有 $+10^\circ$ 偏转, 在近地层有 $+25^\circ$ 偏转. 可见冠层内的风向总体和外流风向一致, 在不同的外流条件下冠层内风向差别明显, 但在西风 and 西南风之间, 冠层内风向夹角只有 30° , 冠层底部甚至只有 15° . 由于污染物的平均流输运和湍流扩散都依赖流场, 可以预见西风和西南风条件下冠层内的浓度分布接近. Xie^[32] 用大涡模拟计算了 DAPPLE 实验点不同风向的流场, 外流风速与街区走向夹角 40° 时, 冠层底部的风向偏转角也能达到 40° . 相比之下, 本文算例的偏转角度比较小, 这是因为在本文的

图 5 冠层内风向相对主流风向的平均偏转角度

Figure 5 Mean angular between direction of outflow and direction of velocity in the canopy.

CBD 小区中, 东西方向总迎风面积和南北方向总迎风面积的比为 0.86, 建筑的平均长宽接近.

3.2 非均匀温度场

从方程(15)的能量平衡关系可以看出, 净辐射、感热和储热共同决定建筑表面温度, 不同的辐射条件和感热通量引起建筑表面非均匀温度分布. 对于空气温度而言, 一方面建筑的感热通量是其源项, 另一方面对流和扩散也引起空气温度非均匀. 以下分别讨论壁面 and 空气的非均匀温度场.

3.2.1 壁面温度

图 6 给出了西风条件下地面上时间平均温度 Θ

图 6 (网络版彩图) 西风条件下地面平均温度分布

Figure 6 (Color online) Distribution of mean temperature on the ground under the condition of west wind.

的分布情况, 地面温度跨度可达 30°C , 显著非均匀. 在夏季晴天的中午, 外流风温 35°C 的条件下, 阴影区(图中蓝色区域)的温度约为 30°C , 而受太阳照射区域的温度普遍都在 50°C 以上, 局部区域甚至可达 60°C 以上. 虽然受照射区内也存在由感热不同引起的温度变化, 地面的温度非均匀主要由辐射引起.

图 7 给出了西风条件下南侧墙面、西侧墙面和屋顶时间平均温度 Θ 的分布情况. 除去部分阴影区, 屋顶温度高于南侧墙面和西侧墙面. 屋顶和南侧墙面受阳光直接照射, 光线与屋顶法向的夹角为 20° , 与南侧墙面法向的夹角为 70° , 前者辐射更强. 比较不同建筑可以看到, 高建筑的屋顶温度较矮建筑低, 因为高空的空气流速更大, 换热更强. 从图 7(b)的局部放大图来看, 南侧墙面的温度从地面到屋顶逐渐降

低, 也是因为空气换热效率的影响.

考虑到各壁面的时间平均温度 Θ 在面上分布不均匀, 分别统计 Θ 的面平均值 $\langle\Theta\rangle$ 和各个面上 Θ 变化的标准差, 如图 8 所示. 地面和屋顶的辐射最强, 因为地面换热差, 感热通量小, 所以温度最高, 平均温度可达 51°C , 屋顶次之, 约为 47°C . 南侧墙面的平均温度约为 43°C . 北侧墙面、东侧墙面和西侧墙面都不受阳光直射, 温度较低, 都在 40°C 以下. 北侧墙面因为受南侧墙面的反射, 温度比东、西墙面高. 比较不同风向情况, 南风较西风和西南风略高 1.5°C 左右, 西风和西南风结果接近. 如前所述, 西风和西南风条件下冠层内风向接近, 流动引起的感热通量接近, 因此温度分布接近. 对于壁面温度变化的标准差, 地面和屋顶分别能达到 10°C 和 8°C , 这主要是因为

图 7 (网络版彩图) 西风条件下墙面平均温度分布. (a) 全小区; (b) 局部放大

Figure 7 (Color online) Distribution of mean temperature on the surface of buildings under the condition of west wind. (a) The whole area of CBD; (b) partial enlarged detail.

图 8 各壁面平均温度和温度变化的标准差统计结果. (a) 温度; (b) 温度标准差

Figure 8 Averaged temperature and standard deviation of temperature on each surface of buildings. (a) Averaged temperature; (b) standard deviation of temperature.

阴影区的影响,而在没有阳光直射的东、西、北侧墙面,温度的变化约为 1°C ,这是空气换热效率不同所能引起的壁面温度变化水平.由此可见,壁面温度主要由辐射决定.

3.2.2 空气温度

进一步讨论空气温度分布.图9给出了西风条件下空气的时间平均温度和二维流线在近地($z=2\text{ m}$)和平均高度($z=80\text{ m}$)附近的水平面分布.近地面流动结构复杂,多处流线偏离主流方向,而在平均高度处流线基本与主流一致.在大的高层建筑后方都存在明显的分离区.空气温度的影响因素包括:一方面壁面热通量是其控制方程中的源项,另一方面对流和扩散引起空气内部的运输和混合.从图9的结果来看,尽管在四个墙面中南侧墙面的温度最高,大部分空气温度高的区域并不是出现在南侧墙面附近,而是背风面的分离区和被密集建筑包围的区域,这一现象在 80 m 高度处更加明显.流体被束缚在分离涡中,平均速度场的热通量减小,分离涡区也是低湍动能区,湍流脉动弱,湍流脉动引起的热通量也减小.南风 and 西南风算例给出了相似的结果.虽然不同风向下的流线和温度分布不同,高温区域却都集中在背风面的分离涡区.这说明空气温度主要由空气换热效率决定.

3.3 污染物扩散

3.3.1 浮力影响

浮力显著促进垂向对流,增强湍流脉动,这都有

助于污染物扩散到冠层外,降低冠层内污染物浓度.以下讨论浮力对点源扩散过程的影响.在各算例间,外流风速 U_f 相同,用外流风速、建筑高度和点源强度对污染物浓度进行无量纲化

$$C_* = \frac{Ch^2U_f}{q}. \quad (18)$$

对于恐怖袭击、有毒物质泄漏等问题,需要知道有毒物质的扩散范围,以确定需要疏散的区域.图10给出了西风条件下污染物浓度 $C_*=1$ 的等值面,并对中性和非稳定结果进行了比较. C_* 可以理解临界危险浓度, C_* 的等值面就是受到污染的危险范围.中性算例和非稳定算例结果差别显著.在中性条件下,污染物随风场自西向东污染了整个下游冠层区域,直到从小区内通出去.在非稳定条件下,这一危险范围只覆盖了点源下游流向 200 m ,展向 100 m 的区域,流向和展向范围都要小很多.在中性条件下,污染物主要靠冠层顶部的对流和湍流脉动扩散到外流场,不能及时扩散出去的污染物就会被风场带到下游,继续污染下游区域.在非稳定条件下,浮力促进垂向的质量和动量交换,使得污染物能更快地从冠层内扩散出去,下游污染物浓度就会降低.在一定的几何分布和源强下,冠层内污染物的浓度主要取决于传播过程中的展向羽流扩散速度和垂向通量,前者虽然也能降低浓度,但会增大污染区域,增大垂向通量是最有效的途径.实际经验也表明,晴天的空气质量好于阴天.

图11给出了西风条件下污染物浓度 C_* 在流向垂

图9 (网络版彩图)西风算例空气平均温度和二维流线在水平面上的分布. (a) $z=2\text{ m}$; (b) $z=80\text{ m}$

Figure 9 (Color online) Averaged air temperature and 2-D streamline on horizontal plane. (a) $z=2\text{ m}$; (b) $z=80\text{ m}$.

图 10 (网络版彩图)污染物浓度分布等值面比较, 风向: 西风. (a) 中性; (b) 非稳定

Figure 10 (Color online) Isosurface of pollutant concentration under different stability. (a) Neutral condition; (b) unstable condition.

图 11 (网络版彩图)垂直平面(x - z 面)污染物浓度分布比较, 平面通过点源, 图中黑线为垂向羽流中心, 风向: 西风. (a) 中性; (b) 非稳定

Figure 11 (Color online) Pollutant concentration on x - z plane where the point source locates under different stability and the black line represents vertical center of pollutant plume under the condition of west wind. (a) Neutral condition; (b) unstable condition.

直平面(x - z 面)上的分布, 并对中性和非稳定结果进行了比较, 平面通过点源. 图 12 是对应的南风条件下的结果, 此时流向垂直平面为 y - z 面. 图中黑线为垂向羽流中心 z_c 的位置.

$$z_c(x, y) = \frac{\int_0^\infty C(x, y, z) z dz}{\int_0^\infty C(x, y, z) dz}. \quad (19)$$

中性条件下, 冠层内的浓度普遍比非稳定条件下的高, 点源附近的近地面高浓度区范围更大. 在下游的第一个高建筑后方(距离点源约 180 m), 中性条件下 $C_* = 5$, 非稳定条件下 $C_* = 1$; 在第二个高建筑后方(距离点源约 260 m), 中性条件下 $C_* = 2$, 非稳定条

件下 $C_* = 0.5$. 非稳定条件下羽流在垂向的扩散范围更大, $C_* = 0.05$ 的等值线在第一个高建筑上方的高度, 中性条件下为 200 m, 非稳定条件下为 300 m; 在小区出口处的高度, 中性条件下为 260 m, 在非稳定条件下为 400 m. 垂向羽流中心沿流向逐渐上升, 除了在遇到建筑时出现抬升而不连续外, z_c 基本呈抛物线分布. 非稳定条件下的垂向羽流比中性条件高, 这与浓度分布一致.

上述现象在图 12 南风条件下的对比结果中更加明显. 点源附近南北方向的 140 m 高建筑在南风条件下形成很大的迎风阻碍, 使得流场抬升, 因此南风条件下的羽流垂向扩散范围在中性和非稳定条件下都

图 12 (网络版彩图)垂直平面(y - z 面)污染物浓度分布比较, 平面通过点源, 图中黑线为垂向羽流中心, 风向: 南风. (a) 中性; (b) 非稳定

Figure 12 (Color online) Pollutant concentration on x - z plane where the point source locates under different stability and the black line represents vertical center of pollutant plume under the condition of south wind. (a) Neutral condition; (b) unstable condition.

比西风要大. 非稳定条件下南风的浓度总体也要比西风小, 但中性条件下南风的浓度比西风大, 主要集中在两排高建筑之间的峡谷内.

为了更好地进行定量比较, 下面讨论展向和垂向的浓度分布剖面. 图 13 给出了西风条件下, 下游 3 个位置 l_{11} , l_{12} 和 l_{13} 在近地人行高度($z=2$ m)处的展向浓度分布和对应的高斯分布拟合结果, 并对中性和非稳定结果进行了比较. 如图 1 所示, l_{11} 距离点源 114 m, l_{12} 距离点源 270 m, l_{13} 距离点源 375 m. 中性和非稳定的展向分布形式相似, 而中性的浓度比非稳定高, 两者的比值随流向距离增大而增大. 因为 l_{11} - l_{13} 位于复杂冠层底部, 可以预见浓度不会完全符

合高斯分布, 比如在 l_{12} 位置 $y=130$ m 处有一个偏离高斯分布的峰值, 这是因为 l_{12} 位于 120 m 高建筑后方, $y=130$ m 对应该高建筑南侧墙面. 除了局部的偏离外, 浓度总体上和高斯分布的趋势一致, 可见高斯分布作为一种快速估计浓度分布的方法在近场浓度预测中也有一定的实用价值.

s_{11} - s_{13} 是 l_{11} - l_{13} 与西风主流风轴的交点(图 1). s_{11} - s_{13} 位置的垂向浓度分布及其双高斯拟合结果如图 14. 可以看到在 3 个位置上中性和非稳定剖面都存在交叉, 在地面以上大部分区域, 中性算例的浓度都明显大于非稳定算例, 而在 200 m 以上, 由于中性的垂向扩散能力差, 非稳定算例的浓度大于中性算例.

图 13 (网络版彩图)污染物浓度在 $z=2$ m 处的展向分布及其高斯分布拟合结果, 风向: 西风. (a) l_{11} 位置; (b) l_{12} 位置; (c) l_{13} 位置

Figure 13 (Color online) Pollutant concentration along spanwise direction at $z=2$ m and the corresponding fitting Gaussian distribution under the condition of west wind. (a) Data along l_{11} in Figure 1; (b) data along l_{12} ; (c) data along l_{13} .

图 14 (网络版彩图) 污染物浓度垂向分布及其双高斯分布拟合结果, 风向: 西风. (a) s_{11} 位置; (b) s_{12} 位置; (c) s_{13} 位置

Figure 14 (Color online) Pollutant concentration along vertical direction and the corresponding fitting Gaussian distribution under the condition of west wind. (a) Data at s_{11} in Figure 1; (b) data at s_{12} ; (c) data at s_{13} .

双高斯分布在冠层以上能比较好地预测浓度分布, 而在冠层内的表现并不好. 双高斯分布在地面以上随高度增大而增大, 但计算得到的浓度在冠层内基本随高度增大而减小. 复杂条件下冠层对垂向浓度分布的影响不只是简单的点源高度抬升和壁面镜像对称(双高斯分布反映了这两点).

3.3.2 风向影响

受下垫面几何非均匀和街区走向的影响, 不同风向下冠层内的污染物扩散过程不同. 图 15 比较了非稳定条件下三个风向算例在近地 $z=2$ m 高度处水平面上的污染物浓度分布和对应的羽流中心位置. 可以看到, 在实际小区中, 污染物的近场浓度分布是很复杂的, 这也给快速预测城市小区污染物扩散带来了很大挑战^[33]. 羽流中心是垂直风轴方向的浓度加权平均位置. 对于南风:

$$x_c(y, z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, z) x dx}{\int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, z) dx}, \quad (20)$$

对于西风:

$$y_c(x, z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, z) y dy}{\int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, z) dy}. \quad (21)$$

西南风可以通过将坐标轴旋转 45° 来计算.

首先比较西风 and 西南风的结果. 点源所在的街区峡谷东侧出口有四栋高层建筑, 高层建筑东侧是一片空地, 空地的南侧有三栋高建筑. 比较图 15(a) 和(c), 在前 200 m 的初始扩散过程中, 受峡谷效应的影响, 西风 and 西南风的近地浓度分布和羽流中心位置基本一致. 在街区的下游, 相对于西风算例, 西南风算例在小区北侧浓度更高, 小区南侧浓度更低.

图 15 (网络版彩图) $z=2$ m 高度污染物浓度分布比较, 黑线为展向羽流中心. (a) 西风; (b) 南风; (c) 西南风

Figure 15 (Color online) Pollutant concentration on horizontal planes at $z=2$ m under different outflow conditions and the black lines represent center of pollutant plume. (a) West wind; (b) south wind; (c) southwest wind.

西南风算例的羽流偏转主要出现在初始扩散阶段, 在离开峡谷后基本沿着主流方向扩散. Milliez 和 Carissimo^[34]用 RANS, Dejoan 等人^[31]用 LES 模拟了 MUST 实验^[35]. 外流风向偏离街区走向时, 峡谷效应使冠层内羽流在初始扩散阶段明显偏离风轴. 随着羽流宽度的增大, 羽流覆盖更多的建筑, 峡谷效应减弱, 羽流中心线与风轴方向趋于平行. 由此可见, 污染物扩散的峡谷效应除了受几何分布和风向影响外, 还与羽流宽度相对建筑特征尺度的大小有关. 对于本文中关心的近场扩散过程, 羽流宽度约为几倍的建筑平均高度, 峡谷效应对羽流的空间分布影响显著.

西风算例中, 初始扩散阶段主流与峡谷平行, 基本没有羽流偏转, 在离开峡谷后羽流中心线向北偏转, 这主要是因为临近的南侧区域有三栋高建筑阻碍流场, 而北侧有一片空地, 风场偏向引起羽流偏转. 由此可见, 在实际城市冠层内, 除了峡谷效应引起羽流偏转外, 几何非均匀也会引起显著的羽流偏转. 在南风算例中, 外流风向与街区峡谷垂直, 没有明显的峡谷效应, 下游的建筑分布密集, 羽流的发展方向与外流风向比较一致.

实际流动中, 外流风向并不是固定的, 外流风向的变化拓展羽流覆盖的范围, 使得场地实验得到的浓度通常比风洞实验和数值模拟得到的浓度要小. 在本文算例中考虑风向在西风和西南风之间的 45° 角范围内变化的情况, 由于西风和西南风下的羽流覆盖范围接近, 可以预见波动条件下污染物浓度和羽流覆盖范围和变化不大. 如果风向是在西南风和南风之间的 45° 角范围内变化, 由于西南风和南风下的

羽流覆盖范围差别很大, 风向变化时羽流将会覆盖整个小区范围, 浓度也会明显降低.

图 16 进一步比较了三个风向在高空 $z=120$ m 高度处水平面上的污染物浓度分布和对应的羽流中心位置. 高空的污染物浓度明显降低, 浓度的峰值区域向下游移动, 浓度分布比近地面规则. 在这个高度以上的建筑已经很少, 建筑对风场的影响仅限于建筑附近, 流动基本符合主流风向(这里没有给出 120 m 高度处的风场, 可参考图 9 中 80 m 高度处的风场). 因为浓度分布除了受 120 m 高度风场的影响外, 还受下方污染物通量的影响, 对于冠层底部羽流明显偏离风轴的西风和西南风算例, 高空的羽流偏离同样很明显, 当然偏离程度比冠层底部要小.

3.3.3 羽流宽度

进一步讨论羽流宽度的流向发展过程. 流向不同位置的羽流宽度定量刻画了羽流覆盖范围, 展向羽流宽度 σ_y 和垂向羽流宽度 σ_z 分别定义如下:

$$\sigma_y^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(y - y_c)^2 dy}{\int_{-\infty}^{\infty} C dy}, \quad (22)$$

$$\sigma_z^2 = \frac{\int_0^{\infty} C(z - z_c)^2 dz}{\int_0^{\infty} C dz}, \quad (23)$$

Davidson 等人^[36]的场地实验结果, Yee 等人^[37]的风洞和水洞实验结果都表明, 在中性条件下模型建筑群的点源扩散过程中, 羽流宽度以幂次律增长. 这些结果都是在相对简单的建筑几何条件和来流条件

图 16 (网络版彩图) $z=120$ m 高度污染物浓度分布比较, 黑线为展向羽流中心. (a) 西风; (b) 南风; (c) 西南风

Figure 16 (Color online) Pollutant concentration on horizontal planes at $z=120$ m under different outflow conditions and the black lines represent center of pollutant plume. (a) West wind; (b) south wind; (c) southwest wind.

下得到的. 本文算例的下垫面几何条件复杂, 并考虑了不同风向和稳定度. 下面通过比较, 讨论风向和浮力对羽流扩散的影响, 以及简单模型建筑群与复杂实际城区在羽流扩散过程中的差别.

表 1 选取了一系列不同几何和来流条件下的模型建筑群结果作为比较对象, 所有结果均在中性条件下得到. HCLES 是用 LES 模拟 Hilderman 和 Chong^[38]实验的结果, NILES1 和 NILES2 分别为平行和交错分布的建筑群结果, 以上三个算例均由王博斌^[39]完成. CHLES1 和 CHLES2 来自 Philips 等人^[40]的 LES 结果, 下垫面为 Cheng 和 Castro 实验^[13]中的随机高度建筑群, CHLES1 的来流为西风, CHLES2 的来流为西南风. MAEXP1 和 MAEXP2 来自 Macdonald 等人^[41]的场地实验, 迎风面积比和投影面积比均为 0.16, 其中 MAEXP2 的建筑宽高比为 2.

图 17 比较了实际城区西风中中性算例, 三个风向非稳定算例结果, 以及表 1 中 7 个模型建筑群结果的冠层内展向羽流宽度 σ_y/h 与 $(x-x_s)/h$ 的关系, x_s 为点源的流向位置. 展向羽流宽度随着与点源间距的

增大而增大. 比较西风中性算例和西风非稳定算例结果可以看到, 浮力对展向羽流宽度的影响不大. 比较不同风向结果可以看到, 西风和南风的差别不大, 而西南风算例的展向羽流宽度比西风和南风都大. 西南风条件下, 迎风面积比最大, 同时建筑群的交错度增大, “拓扑扩散”更强. 对各个模型建筑群结果进行比较可以看到, 展向羽流宽度较大的是随机高度建筑群和交错分布建筑群. 建筑越高, 建筑前方的回流越强, 相应的“拓扑扩散”也越强. 低建筑不利于“拓扑扩散”. 增大建筑高度非均匀度对羽流的展向扩展有利.

尽管实际城区的几何分布和来流条件更加复杂, 四个算例的展向羽流宽度基本都落在了模型建筑群结果范围内. 另外从图 17(b)的对数坐标结果来看, 在两倍建筑高度之后, 四个实际城区算例都表现出幂次律 $\sigma_y \sim (x-x_s)^\alpha$, 且基本与模型建筑群的幂次律一致, $\alpha \approx 0.42$.

图 18 比较了不同算例冠层内垂向羽流宽度 σ_z/h 与 $(x-x_s)/h$ 的关系. 除了在遇到建筑的位置出现不连

表 1 模型建筑群参数

Table 1 Parameters of typical building clusters

	分布	λ_p	λ_f	宽高比	风向	高度	方法	稳定度
HCLES	平行	0.25	0.25	1	西风	均匀	LES	中性
NILES1	平行	0.11	0.11	1	西风	均匀	LES	中性
NILES2	交错	0.11	0.11	1	西风	均匀	LES	中性
CHLES1	交错	0.25	0.25	1	西风	随机	LES	中性
CHLES2	交错	0.25	0.25	1	西南风	随机	LES	中性
MAEXP1	平行	0.16	0.16	1	西风	均匀	实验	中性
MAEXP2	平行	0.16	0.16	2	西风	均匀	实验	中性

图 17 (网络版彩图)展向羽流宽度比较. (a) 线性坐标; (b) 对数坐标

Figure 17 (Color online) Spanwise width of pollutant plume in different typical building clusters. (a) Linear coordinate; (b) logarithmic coordinate.

图 18 (网络版彩图)垂向羽流宽度比较. (a) 线性坐标; (b) 对数坐标

Figure 18 (Color online) Vertical width of pollutant plume in different typical building clusters. (a) Linear coordinate; (b) logarithmic coordinate.

续外, 垂向羽流宽度随着与点源间距的增大而增大. 比较西风中性 and 西风非稳定算例结果可以看到, 非稳定条件下的垂向羽流宽度更大, 浮力增强垂向对流的现象明显. 比较三个不同的风向, 西南风时的垂向羽流宽度略大于西风, 而南风的垂向羽流宽度明显大于西风和西南风. 这种差别主要是在点源下游 1.5 倍建筑平均高度范围内的初始扩散过程中出现的, 这一范围基本上就是点源所在的街区峡谷范围(图 1). 根据前文分析, 西风和西南风的近场扩散过程接近, 污染物主要沿着峡谷向下游扩散, 峡谷效应促进污染物排除, 而南风时外流与峡谷走向垂直, 污染物在峡谷内堆积, 并主要从峡谷顶部排除, 当点污染源位于高建筑围成的峡谷中时, 羽流的抬升就会非常显著.

中性条件下实际城区算例的垂向羽流宽度都落在了模型建筑群结果范围内, 和随机高度模型建筑群 LES 结果(CHLES1)相当, 这说明下垫面复杂度的增加并没有引起垂向羽流宽度的显著变化. 从图 18(b)的对数坐标结果来看, 尽管由于浮力和风向的影响, 垂向羽流宽度在各算例之间的差别很大, 但在 2 倍建筑高度之后, 四个实际城区算例发展趋势一致, 且都表现出幂次律 $\sigma_z \sim (x-x_s)^\alpha$, $\alpha \approx 0.5$. 由此可见, 幂次律是羽流宽度沿流向发展的内在规律.

4 结论

本文以北京中心商业区为例, 模拟了典型夏季晴天中午时段实际城区中的大气流动, 考察了风场、温度场和污染物扩散过程. 结果表明:

(1) 本文所用的表面能量平衡关系能比较准确地计算建筑表面的热通量和温度分布;

(2) 峡谷效应引起冠层内风向偏转, 这对污染源近场扩散有重要影响;

(3) 墙面和地面的温度主要由短波辐射决定, 夏季受太阳照射比较强的地面和屋顶温度最高; 空气温度主要由换热效率决定, 建筑背风面的分离涡区和密集建筑包围的区域内, 空气温度比较高, 迎风面附近的强对流作用可降低空气温度;

(4) 浮力抬升羽流, 使得污染物的垂向扩散范围增大, 冠层内浓度降低; 建筑分布和风向对污染物的近场扩散过程影响显著, 峡谷效应引起羽流偏转, 在本文算例中西南风时偏转最为显著; 浮力扩大垂向羽流宽度, 但对展向羽流宽度影响不大; 在复杂下垫面和不同稳定度下, 羽流宽度与发展距离的关系都表现出了很好的幂次律.

进一步的工作需要研究老城区、工业区、居民区等不同类型的实际小区流动, 探索各类小区建筑群内的流动规律、热环境和污染物扩散规律, 改进和发展现有的冠层模式.

参考文献

- 1 Britter R, Hanna S. Flow and dispersion in urban areas. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 469–496

- 2 Jiang W M, Miao S G, Zhang N, et al. Numerical simulation on urban meteorology and urban boundary layer (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2010, 25: 463–473 [蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 城市气象环境与边界层数值模拟研究. *地球科学进展*, 2010, 25: 463–473]
- 3 Fernando H J S, Zajic D, Di Sabatino S, et al. Flow, turbulence, and pollutant dispersion in urban atmospheres. *Phys Fluids*, 2010, 22: 051301
- 4 Cui G X, Zhang Z S, Xu C X, et al. Research advances in large eddy simulation of urban Atmos Environ (in Chinese). *Adv Meach*, 2013, 43: 295–328 [崔桂香, 张兆顺, 许春晓, 等. 城市大气环境的大涡模拟研究进展. *力学进展*, 2013, 43: 295–328]
- 5 Macdonald R, Griffiths R, Cheah S. Field experiments of dispersion through regular arrays of cubic structures. *Atmos Environ*, 1997, 31: 783–795
- 6 Macdonald R W. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorol*, 2000, 97: 25–45
- 7 Wang Y W, Jiang W M, Liu H N. Advancedin Research of urban effect parameterization scheme on models of atmosphere (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2008, 23: 371–381 [王咏薇, 蒋维楣, 刘红年. 大气数值模式中城市效应参数化方案研究进展. *地球科学进展*, 2008, 23: 371–381]
- 8 Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer Meteorol*, 2000, 94: 357–397
- 9 Holmes N S, Morawska L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmos Environ*, 2006, 40: 5902–5928
- 10 Masson V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theor Appl Climatol*, 2006, 84: 35–45
- 11 Fernando H J S, Zajic D, Di Sabatino S, et al. Flow, turbulence, and pollutant dispersion in urban atmospheres. *Phys Fluids*, 2010, 22: 051301
- 12 Kastner-Klein P, Fedorovich E, Rotach M W. A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2001, 89: 849–861
- 13 Cheng H, Castro I P. Near wall flow over urban-like roughness. *Boundary-Layer Meteorol*, 2002, 104: 229–259
- 14 Xie Z T, Castro I P. Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets. *Atmos Environ*, 2009, 43: 2174–2185
- 15 Miao S G, Jiang W M, Wang X Y, et al. Numerical simulation of meteorology and pollutant diffusion in urban sub-domain. *Acta Sci Circumstantiae*, 2002, 22: 478–483 [苗世光, 蒋维楣, 王晓云, 等. 城市小区气象与污染扩散数值模式建立的研究. *环境科学学报*, 2002, 22: 478–483]
- 16 刘玉石. 城市大气微环境大涡模拟研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2012
- 17 Stewart I, Oke T. Newly developed “Thermal Climate Zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In: *Proceedings of Eighth Symp on the Urban Environment*. Phoenix: Amer Meteor Soc, 2009. J8.2A
- 18 Meneveau C, Lund T S, Cabot W H. A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence. *J Fluid Mech*, 1996, 319: 353–385
- 19 Castro I P, Cheng H, Reynolds R. Turbulence over urban-type roughness: deductions from wind tunnel measurements. *Boundary-Layer Meteorol*, 2006, 118: 109–131
- 20 Wang B B, Wang Z S, Cui G X, et al. Study on the dynamic characteristics of flow over building cluster at high Reynolds number by large eddy simulation. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57: 1–16
- 21 Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, et al. AIJ guidelines for practical application of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *J Wind Eng Ind Aerod*, 2008, 96: 1749–1761
- 22 Belcher S, Jerram N, Hunt J. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. *J Fluid Mech*, 2003, 488: 369–398
- 23 Liu Y, Cui G, Wang Z, et al. Large eddy simulation of wind field and pollutant dispersion in downtown Macao. *Atmos Environ*, 2011, 45: 2849–2859
- 24 Hanna S R, Tehranian S, Carissimo B, et al. Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays. *Atmos Environ*, 2002, 36: 5067–5079
- 25 Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. Dordrecht: Reidel, 1982
- 26 MacDonald R W, Griffiths R F, Hall D J. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos Environ*, 1998, 32: 1857–1864
- 27 Kanda M, Kawai T, Kanega M, et al. A simple energy balance model for regular building arrays. *Boundary-Layer Meteorol*, 2005, 116: 423–443
- 28 Johnson G, Hunter L. Some insights into typical urban canyon airflows. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3991–3999
- 29 Hoydysh W G, Dabberdt W F. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmos Environ*, 1988, 22: 2677–2689
- 30 Dobre A, Amolf S, Smalley R, et al. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmos Environ*, 2005, 39: 4647–4657

- 31 Dejoan A, Santiago J, Martilli A, et al. Comparison between large-eddy simulation and Reynolds-averaged Navier–Stokes computations for the MUST field experiment. Part II: Effects of incident wind angle deviation on the mean flow and plume dispersion. *Boundary-layer Meteorol*, 2010, 135: 133–150
- 32 Xie Z T. Modelling street-scale flow and dispersion in realistic winds—towards coupling with mesoscale meteorological models. *Boundary-layer Meteorol*, 2011, 141: 53–75
- 33 Brown M J. Urban Dispersion-challenges for Fast Response Modeling. Los Alamos Natl Lab Rep LA-UR-04-5129, 2004
- 34 Milliez M, Carissimo B. Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area, for different meteorological conditions. *Boundary-Layer Meteorol*, 2007, 122: 321–342
- 35 Yee E, Biltoft C A. Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles. *Boundary-Layer Meteorol*, 2004, 111: 363–415
- 36 Davidson M J, Mylne K R, Jones C D, et al. Plume dispersion through large groups of obstacles—A field investigation. *Atmos Environ*, 1995, 29: 3245–3256
- 37 Yee E, Gailis R M, Hill A, et al. Comparison of wind-tunnel and water-channel simulations of plume dispersion through a large array of obstacles with a scaled field experiment. *Boundary-layer Meteorol*, 2006, 121: 389–432
- 38 Hilderan T, Chong R. A Laboratory Study of Momentum and Passive Scalar Transport and Diffusion Within and Above a Model Urban Canopy—final Report. Report Number CRDC00327, Coanda Research & Development Corporation, 2004
- 39 王博斌. 城市建筑群大气流动及污染物扩散的大涡模拟研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2014
- 40 Philips D, Rossi R, Iaccarino G. Large-eddy simulation of passive scalar dispersion in an urban-like canopy. *J Fluid Mech*, 2013, 723: 404–428
- 41 Macdonald R, Griffiths R, Hall D. A comparison of results from scaled field and wind tunnel modelling of dispersion in arrays of obstacles. *Atmos Environ*, 1998, 32: 3845–3862

Study on thermal environment and pollutant dispersion in real urban area by Large Eddy Simulation

LI HaiFeng, WANG BoBin, CUI GuiXiang* & ZHANG ZhaoShun

School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Modern urban districts are mainly composed of buildings and roads. The buildings are usually tall and various in shapes and moisture flux on the surfaces is of low level. Atmospheric Environment in modern urban districts gets wide attention because of those landmark buildings and the large population in it. In this paper, the central business district (CBD) is set as an example to study thermal environment and pollutant dispersion in urban area. Atmospheric flows in typical summer sunny days are simulated by Large Eddy Simulation (LES) and wind field, temperature field and dispersion process of point pollutant are analysed. The momentum, mass and thermal transport equations are discretized by the finite volume method with non-staggered grids and a third-order Runge-Kutta integration in time. The filtered Navier-Stokes equations are solved using SIMPLE algorithm. Lagrangian dynamic model, which is suitable for complex turbulence in urban districts, is applied to close sub-grid stress. Temperature distribution is calculated according to surface energy balance relation. The results reveal that temperature on the wall surfaces is mainly determined by solar radiation while that in air is mainly determined by convection. Near field distribution of pollutant is considerably influenced by wind direction, building distribution and partial flow field. Meanwhile buoyancy enhances vertical convection and expands vertical plume width, while has no considerable influence on spanwise plume width.

modern urban district, LES, point source

PACS: 62.50.+p, 47.40.-x, 43.40.Jc

doi: 10.1360/SSPMA2015-00314