0577-6619/2010/68(1)-0137-46 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

城市建筑物动力冠层方案的引入及应用研究*

周荣卫[1,2] 蒋维楣[1] 何晓凤[1,2]
ZHOU Rongwei[1,2] JIANG Weimei[1] HE Xiaofeng[1,2]

1. 南京大学大气科学系，南京，210093
2. 中国气象局国家气候中心，北京，100081
1. *Department of Atmospheric Science*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210093, *China*
2. *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081, *China*
2007-08-13 收稿，2008-04-03 改回.

Zhou Rongwei, Jiang Weimei, He Xiaofeng. 2010. Study on the incorporation and application of the aerodynamical urban canopy scheme. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(1): 137－146

Abstract An aerodynamical urban canopy scheme is incorporated into the fine town boundary layer model. The scheme contains drag effect of urban buildings on flow and effect of building morphology on urban turbulent activity and momentum transfer. The incorporated model is evaluated by simulation results of two different building aerodynamical scheme in southeast region of Beijing area, which are building drag scheme and aerodynamical urban canopy scheme. The conclusions are drawn by the comparisons between the simulation results of the wind speed and the observations of the automatic weather stations in the urban areas: the simulated results of incorporated model are more in reasonable agreement with the observations than that of building drag scheme, and the diurnal trend of that is more agreement with observations. The model incorporated with the aerodynamical urban canopy scheme is better to simulate the wind field on the urban areas.

The conclusions are drawn by the comparisons between the simulation results of the building drag scheme and the aerodynamical urban canopy scheme in a real town: the simulated wind speed with the aerodynamical canopy scheme on the town areas is always lower than that on the surrounding rural areas, but that with the other scheme is not so. The simulated results describe the dynamical effect of the buildings on the turbulent activity, and the simulated turbulent kinetic energy distribution is consistent with the real distribution.

The effect of the building height variation in the town on the wind field and turbulence is also simulated, and the results are as followings: the increase of the building height results in the decrease of the horizontal wind speed on the town areas, and the wind speed at the bottom of the higher building is larger than that of the lower building. The turbulent kinetic energy on the town areas ascends, that in the bottom of the high building is lower and ascends with the height in the canopy layer. The vertical diffusion coefficient increases as the building height ascends. The pollution concentration on the town areas with higher buildings is lower on the emission level, and that is lower on the surface and is higher on the upper level of the downstream rural areas.
Key words urban building, aerodynamical canopy scheme, building morphology, turbulent diffusion

摘　要　文中将建筑物动力冠层方案引入到城市边界层精细模式中，该方案描叙了城市地区建筑物对气流的拖曳作用以及建筑物形态对城市地区湍流活动动量输送的影响。采用建筑物拖曳法和建筑物动力冠层方案两种不同建筑物动力学处理方法对北京地区东南部进行模拟，通过城市地区水平风速的模拟结果与自动气象站实测资料对比发现模拟结果与实测相当吻合，建筑物动力冠层方案的引入能够更好地实施对城市地区的水平风速分布的数值模拟。

分别采用建筑物拖曳法与建筑物动力冠层方案对一个实际小规模城市进行模拟试验，分析表明引入建筑物动力冠层方

* 资助课题：国家自然科学基金重点项目(40333027)，国家自然科学基金项目(40775014)。
作者简介：周荣卫，主要从事城市边界层、气候资源评估研究。Email: zhourongwei@yahoo.com.cn; zhourw@cma.gov.cn

案可以模拟出小规模城市地区水平风速偏低的现象;还可以模拟出城市地区建筑物动力作用对湍流活动的影响;对湍流动能模拟结果表明比较符合实际分布情形。

采用建筑物动力冠层方案对小规模城市地区建筑物高度变化对城市地区的流场及湍流活动的影响进行模拟分析,结果表明:城市地区建筑物高度增加,风速变小,但是高大建筑物底部风速略高于低矮建筑物底部;城市地区大气湍能增加,高大建筑物底部湍能较小,冠层高度内湍能随高度增加而增加;同时城市地区的垂直扩散系数也随建筑物高度增加而增加;城市地区污染物排放高度处污染物浓度较低,下游乡村地区地面污染物浓度较低,但高空污染物浓度却较高。

关键词 城市建筑物,动力冠层方案,建筑物形态,湍流扩散

中图法分类号 P404

1 引 言

城市中建筑物的动力效应主要表现为建筑物增加了城市地表的非均一性,增加城市地表的粗糙度,改变城市地表与上部大气间的湍流动量交换。城市地区流场和污染扩散的数值模拟中最关键的问题就是如何处理城市下垫面非均一条件下气流的流动。城市范围内随机分布的不同形态的建筑物,对气流的作用不同,与相连大气间的湍流交换也不同。城市地区的湍流混合和交换是模拟城市污染扩散问题的关键,同时城市地区下垫面的作用还会影响到中尺度天气过程(Craig,et al,2002)。城市范围内污染物的混合和扩散主要受到街渠尺度、小区尺度、城市尺度或更大尺度过程的影响(Britter,et al,2003)。城市空气质量预报建立在准确模拟这些尺度上城市动力效应的基础上,需要通过有效的途径来模拟城市冠层内及冠层之上的平均风速和湍流场(Coceal,et al,2004)。

在数值模式中加入城市建筑物的动力效应一般采用3种方法:

(1) 一般中尺度数值预报模式(如MM5、ARPS等)中以较大的动力学粗糙度来表示城市地区地表对湍流动量交换的影响,忽略了建筑物特征不同的影响,同时这种方法还不能体现城市冠层内的混合和交换过程。

(2) Uno等(1989)在动量及湍能方程中引入了建筑物拖曳影响项来研究城市地区夜间热岛现象,Urano等(1999)引入了Uno对建筑物拖曳力的参数化方案来研究城市地区的热力环境,陈燕等(2006)运用该参数化方法研究城市建筑物对边界层结构影响的数值模拟。

$$F_{bu} = -\frac{1}{2}\eta C_d A(z) u (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$F_{bv} = -\frac{1}{2}\eta C_d A(z) v (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$$P_{bE} = \frac{1}{2}\eta C_d A(z)(|u|^3 + |v|^3)$$

$$P_{b\varepsilon} = \frac{3}{2}\frac{\varepsilon}{E} P_{bE}$$

F_{bu}、F_{bv}、P_{bE}和$P_{b\varepsilon}$分别为建筑物对于速度分量u、v的拖曳力项以及对于湍能及其耗散率的影响项。$A(z)$为网格内建筑物的迎风面积和网格内空气体积之比即城市建筑表面积指数,η是每个网格内建筑面积比例,模式将拖曳系数C_d取为0.4。

(3) Coceal等(2004)采用Finnigan(2000)计算植被冠层内气流场的方法来计算城市冠层内的平均风速,这种方法避免了传统模式中地表采用的对数风廓线法,同时可以模拟城市建筑物冠层内的平均风速。Miao等(2006)在城市尺度边界层模式中引入Coceal等(2004)的方法研究了北京地区建筑物对风场的影响。

城市建筑物的热力效应同样改变了城市地区气流场及边界层结构(周荣卫等,2008;李晓莉等,2005),本文主要通过在城市边界层精细模式中引入城市建筑物动力冠层方案来研究城市建筑物的动力效应,建筑物动力冠层方案是根据Coceal等(2004)以及Miao等(2006)建立的,该方案考虑建筑物拖曳力以及对湍流应力的影响,采用混合长来代表不同形态特征建筑物对湍流活动的影响。运用动力冠层方案模拟的城市地区风速与传统建筑物拖曳法以及实际观测资料进行对比,在验证了动力冠层方案模拟性能的基础上,研究城市建筑物形态特征变化对城市地区风速、湍流活动以及污染扩散的影响。

2 城市建筑物动力冠层方案介绍

本文的城市建筑物动力冠层方案参照Coceal

等(2004)的方法建立。本方案不仅包括建筑物对气流的拖曳作用,还考虑了建筑物形态对湍流活动动量输送的影响,并根据建筑物形态特征来确定表征城市地区湍流活动能力的混合长度。

城市建筑物动力冠层方案中预报量经过时间和空间平均后包括3个部分,如水平风速

$$u = U + \tilde{u} + u'$$

其中,$U = \langle \bar{u} \rangle$为时间和空间平均速度,即平均速度。$\tilde{u} = \bar{u} - U$ 为单体粗糙元周围流场时间平均的空间变化,$u' = u - U - \tilde{u}$ 为湍流扰动,"$-$"代表时间平均,"$\langle\ \rangle$"代表空间平均。

根据 Raupach 等(1982)以及 Finnigan(2000)得出时间和空间平均后的动量方程,通过动量方程求解平均风速 $U_i(x,y,z)$

$$\frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_j}\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle - \frac{\partial}{\partial x_j}\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle - D_i$$

其中,空间平均雷诺应力项$\langle \overline{u'_i u'_j} \rangle$代表了湍流速度扰动形成的动量输送的时空平均,频散应力项$\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle$代表了风的空间偏差形成动量输送的空间平均,冠层粗糙元拖曳项 D_i 来源于单个粗糙元局地拖曳的空间平均。有足够的实验表明接近冠层顶部频散应力相对于雷诺应力可以忽略不计(Finnigan, 1985;Cheng, et al,2002),在冠层底部频散应力相对较大,但是底部所有应力均很小(Bohm, et al, 2000)。因此,在冠层结构内拖曳项起重要作用,频散应力项可以忽略。

冠层拖曳力可以表示为

$$D_i = \frac{1}{2}\frac{c_\mathrm{d}(z)\lambda_\mathrm{f}}{h(1-\beta)} \mid U \mid U_i = \frac{\mid U \mid U_i}{L_\mathrm{c}}$$

其中,h 为建筑物平均高度,$c_\mathrm{d}(z)$为拖曳系数,$(1-\beta)$为冠层内空气所占部分,λ_f 为建筑物结构参数,冠层拖曳长度尺度 L_c 为

$$L_\mathrm{c} = \frac{2h}{c_\mathrm{d}(z)}\frac{(1-\beta)}{\lambda_\mathrm{f}}$$

拖曳系数 $c_\mathrm{d}(z)$与建筑物形态有关,根据 Cheng 等(2002)风洞结果,Coceal 等(2004)建议高度平均的拖曳系数$\overline{c_\mathrm{d}} \approx 2$,因此

$$L_\mathrm{c} \approx \frac{1-\beta}{\lambda_\mathrm{f}} h$$

建筑物平均高度 h 范围内 L_c 不随高度变化,为常数。

在建筑物动力冠层方案中采用湍能-混合长闭合方案,用混合长 l 来表征城市建筑物下垫面不同的动力学特征。

城市冠层之上的混合长 $l_\mathrm{m} = \kappa(z-d)$。

冠层内混合长为$\frac{1}{l_\mathrm{m}} = \frac{1}{\kappa z} + \frac{1}{l_\mathrm{c}}$

其中,冠层顶的混合长为 $\kappa(h-d)$,l_m 为城市地区混合长,l_c 为冠层结构对城市地区混合长的影响项,κ 为常数,$\kappa = 0.4$,z 为高度,d 为零平面位移高度。因此

$$\frac{1}{\kappa h} + \frac{1}{l_\mathrm{c}} = \frac{1}{\kappa(h-d)}$$

3 模拟结果检验

将建筑物动力冠层方案引入城市边界层精细模式中(周幂等,2001),该模式是一个城市边界层的预报模式,可实施 100 m 精细网格的高分辨城市边界层模拟。它是一个地形跟随坐标系下的三维非静力模式,模式基本方程包括动量方程、热量方程、水汽方程和连续方程,模式中采用动力冠层方案以及湍能-混合长闭合方案。

本文检验算例选取北京部分市区作为模拟域,利用其中多个自动气象站的观测资料进行比对,检验模式性能。算例模拟区域见图1,范围为 12 km ×18 km,中心经纬度为(39.8446°N,116.4330°E),模式水平网格距为 200 m,图1为模拟区域下垫面的类型分布。模拟算例取夏季 2004 年 8 月 5 日 08 时—6 日 08 时(北京时,下同)24 h,初始条件采用初始时刻地面观测资料和探空资料,对比资料为该区域内自动气象站的观测结果。通过地面观测资料和探空资料插值得到初始廓线,此廓线作为全场均一的初始条件,通过城市边界层精细模式的诊断计算得到在一定地形和稳定度条件下的气象场分布,运用诊断得到的气象场作为预报模式的初始场进行预报计算。图2为建筑物高度和密度分布。为了对比城市建筑物动力冠层方案与建筑物拖曳力方案对城市地区风速计算能力的不同,设计了两种方案:

方案1采用建筑物拖曳法(Uno, et al,1989;陈燕等,2006);

方案2采用本文的城市建筑物动力冠层的方案。

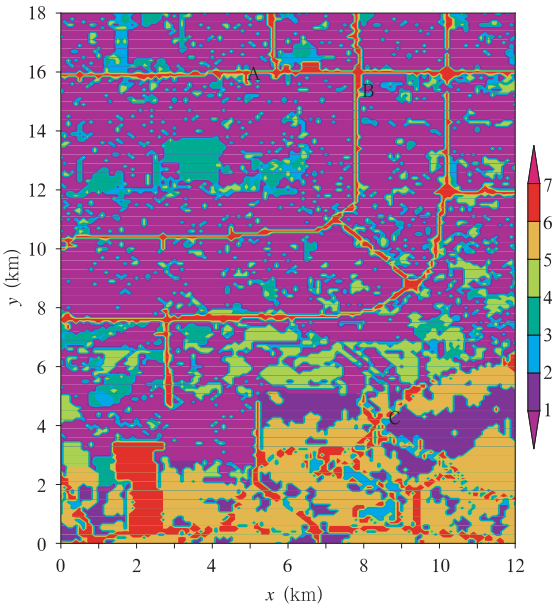

图 1 模拟区域下垫面土地利用类型

(1:城市、2:小规模城市、3:水面、4:树木、5:草地、6:农作物、7:道路和机场;A:古观象台、B:白家庄站、C:南郊观象台)

Fig. 1 Land use type of simulation area

(1: urban, 2: town, 3: water, 4: tree, 5: grassland, 6: crop, 7: road and airdrome; A: Guguanxiangtai, B: Baijiazhuang, C: Nanjiaoguanxiangtai)

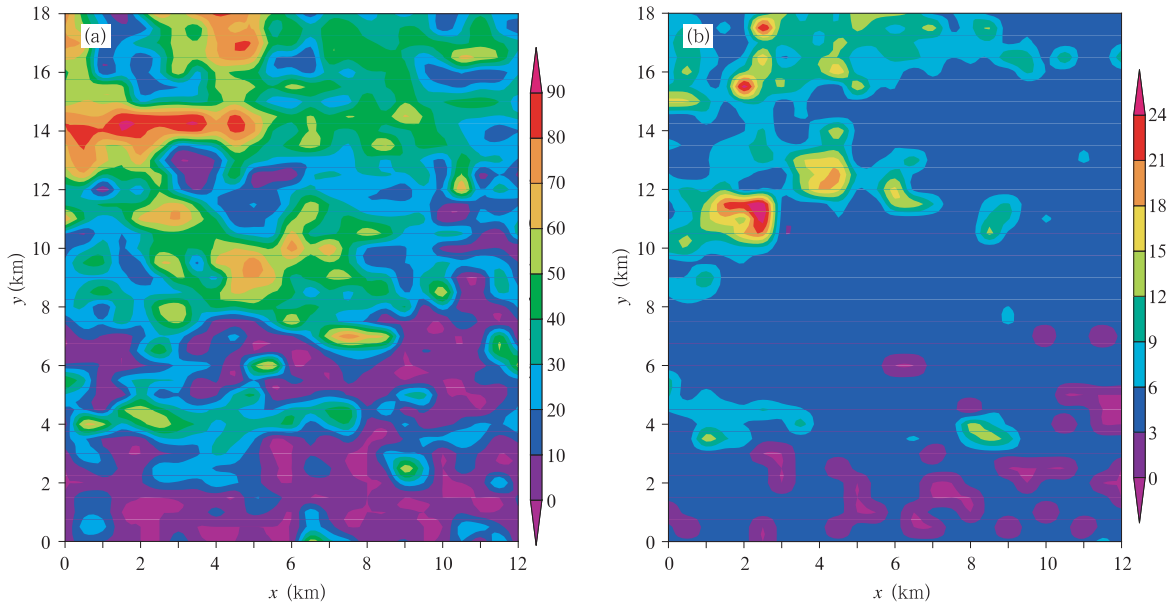

图 2 模拟区域内建筑物的平均密度和平均高度

(a. 建筑物平均密度,b. 建筑物平均高度;单位:m)

Fig. 2 Building data of simulation area

(a. mean building density; b. mean building height, units: m)

对比模拟区域内白家庄站、古观象台站和南郊观象台站不同方案地面风速模拟结果与实测资料(图 3)可以看出,采用建筑物拖曳法的模拟结果明显高于实际观测结果,而采用建筑物动力冠层方案使得城市地面风速模拟值降低,更接近实际观测结果,尤其是对于夜间城市地面风速的模拟。传统的建筑物拖曳法中仅考虑了建筑物拖曳作用对动量以及湍流的影响,而在建筑物动力冠层方案中不仅考虑了城市建筑物的拖曳作用,同时还考虑由于建筑物形态不同造成城市地面湍流混合长不同,采用湍流混合长来表现城市地区建筑物的动力学作用,由湍流混合长闭合方案体现不同稳定度条件下建筑物对动量输送及湍流活动的影响。因此,建筑物动力冠层方案能够更好的模拟城市地区的风速。

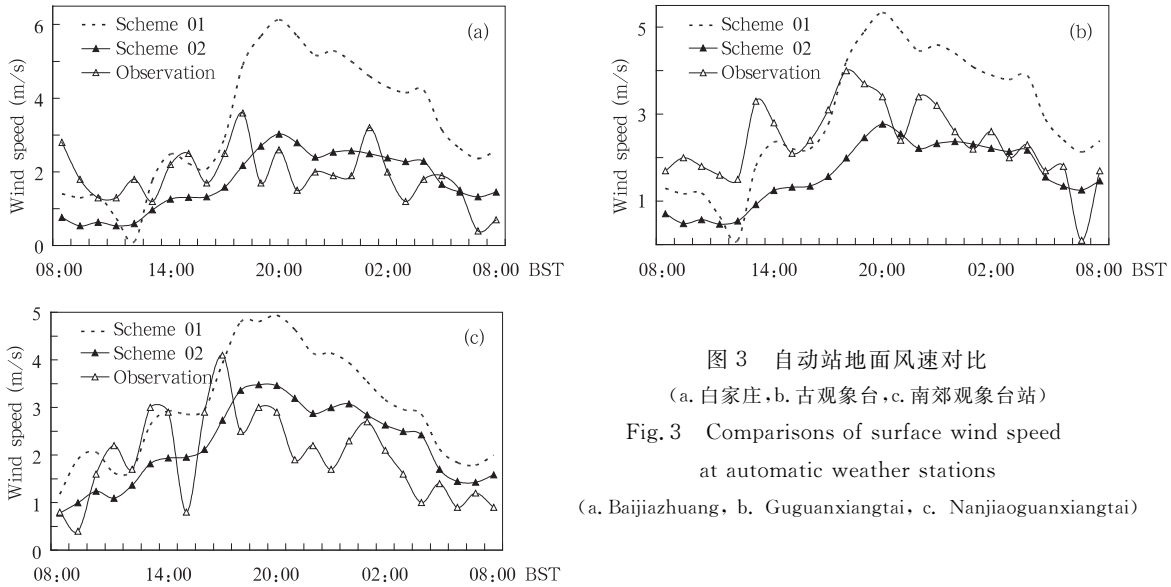

图 3 自动站地面风速对比

(a. 白家庄,b. 古观象台,c. 南郊观象台站)

Fig. 3 Comparisons of surface wind speed at automatic weather stations

(a. Baijiazhuang, b. Guguanxiangtai, c. Nanjiaoguanxiangtai)

4 小规模城市建筑物影响的数值模拟

现在城市范围内建筑物高度越来越高,建筑物增高会对城市范围内的气流及污染物的扩散造成一定的影响,本文针对实际小规模城市范围内建筑物高度增加,采用数值模拟的方法来研究建筑物高度变化对城市地区气流场、边界层结构和污染物扩散的影响。图 4 为北京郊区一个实际小规模城市的下垫面分布图,模拟区域范围为 8 km×6.5 km,其中城市分布地区约为 2.5 km×2.5 km,水平分辨率为 200 m。模拟时间为夏季 2004 年 08 月 05 日 08 时—06 日 08 时。

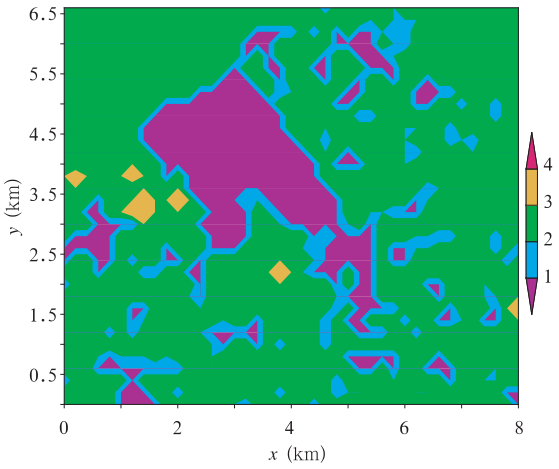

图 4 小规模城市下垫面分布

(1:小规模城市,2:水面,3:草地,4:裸土)

Fig. 4 Land use type of a town

(1: town, 2: water, 3: grassland, 4: soil)

4.1 不同建筑物处理方案的模拟结果对比

为了对比建筑物动力冠层方案对小规模城市地区风速及湍流活动模拟结果的改进,对小规模城市地区分别采用两种建筑物方案进行计算:建筑物拖曳法(算例 S01)、城市建筑物动力冠层方案(算例 S02)。

对比算例 S01 和 S02 模拟城市地区地表 14 时和 02 时水平风速(图 5)可以看出,采用建筑物拖曳法的算例 S01 根本模拟不出小规模城市地区水平风速偏低的现象,而建筑物动力冠层方案却可以模拟出小规模城市地区建筑物作用使得城市地区水平风速低于附近乡村地区。建筑物动力冠层方案不仅考虑建筑物对气流的拖曳作用,同时还考虑了建筑物形态对城市地区湍流活动的作用,以及建筑物存在对城市地表动量交换的影响,仅考虑小规模城市地区建筑物的拖曳作用并不能体现出该地区水平风速在建筑物的拖曳和湍流扰动下偏低的情形。14 时小规模城市地区水平风速为 2.46 m/s,附近乡村地区为 2.67 m/s;夜间 02 时城市地区风速为 3.5 m/s,乡村地区为 4.3 m/s,夜间建筑物动力效应对水平风速影响更大,城乡间水平风速差异夜间比白天明显。小规模城市地区地面风速低于附近乡村地区,但是城乡间地面风速差并不是很大。

图 6 为建筑物拖曳法和建筑物动力冠层方案模拟地表大气湍能之差(S02 - S01),建筑物拖曳法模拟城市地区地表大气湍能要低于动力冠层方案的模拟结果,建筑物拖曳法仅考虑建筑物对气流的扰动

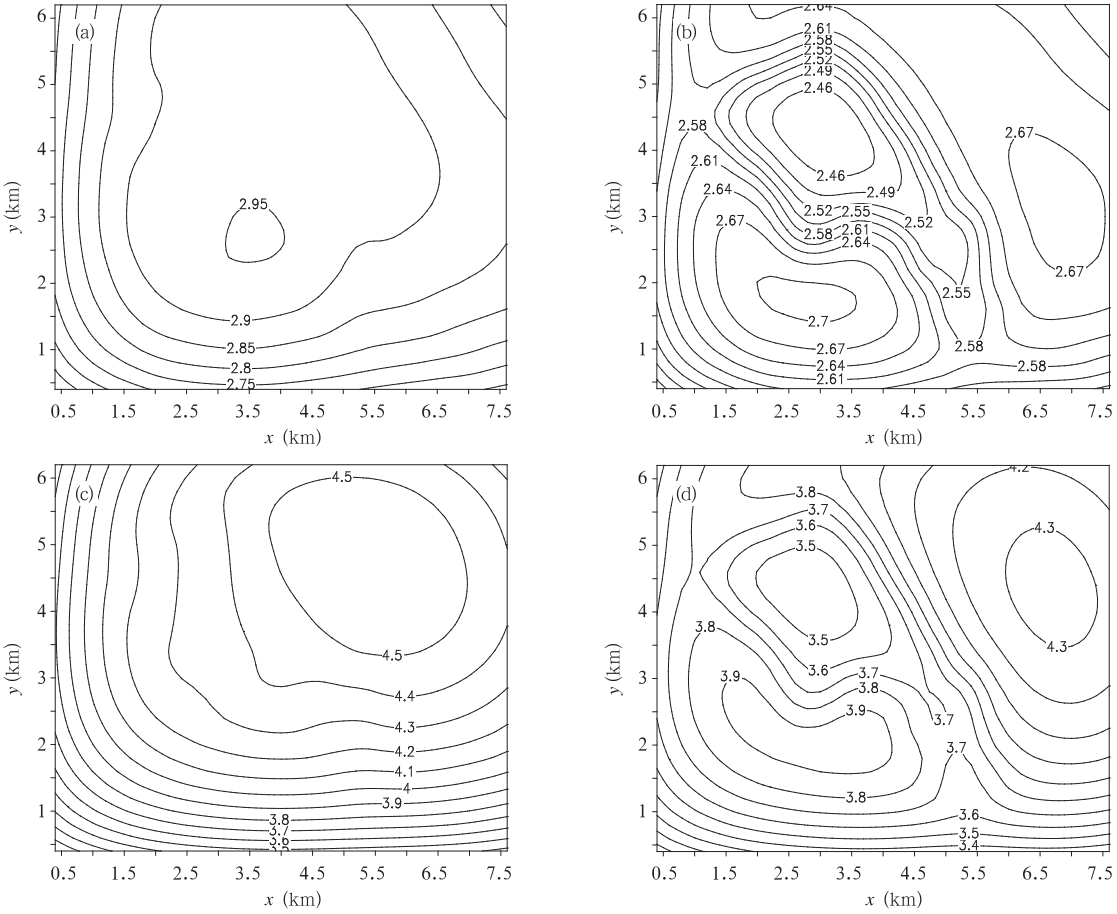

图 5 算例 S01 和 S02 不同时次地面水平风速(单位:m/s)模拟对比

(a. S01 14 时,b. S02 14 时,c. S01 02 时,d. S02 02 时)

Fig. 5 Comparisons of surface wind speed (units: m/s) of case S01 and S02 at different times

(a. S01 14:00 BST, b. S02 14:00 BST, c. S01 02:00 BST, d. S02 02:00 BST)

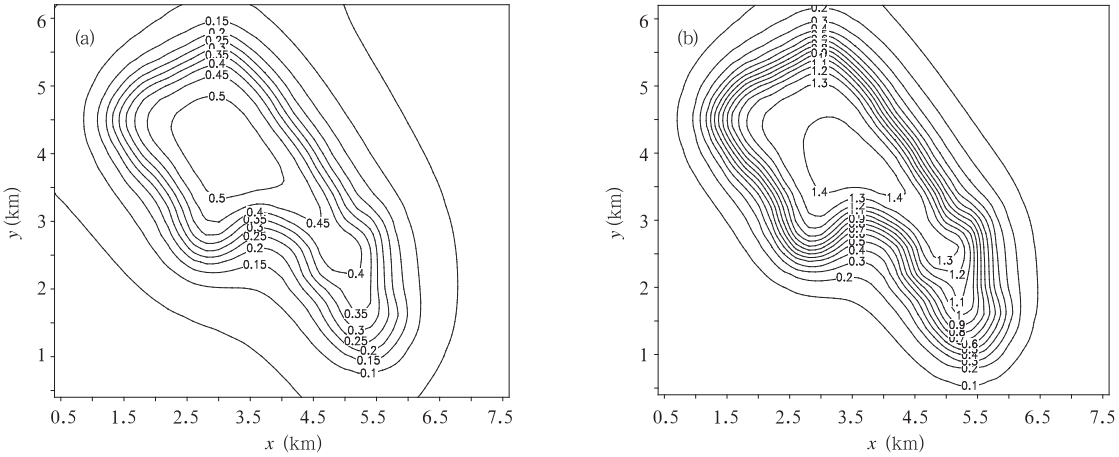

图 6 算例 S01 和 S02 不同时次地面大气湍能之差(S02 - S01)

(单位:m^2/s^2;a. 14 时,b. 02 时)

Fig. 6 Surface turbulence difference between case S01 and S02 at different times (S02 - S01)

(units: m^2/s^2)(a. 14:00 BST, b. 02:00 BST)

形成的机械湍流部分,没有考虑建筑物形态动力效应对机械湍流的影响,白天湍流活动受热力影响较大,小规模城市地区仅考虑建筑物拖曳作用时地表大气湍能模拟值偏低 0.5 m^2/s^2;夜间机械湍流占主导部分,建筑物动力冠层方案主要描叙的是建筑物动力作用的影响,同时模拟时段内夜间水平风速较大,因而采用建筑物动力冠层方案以后小规模城市地区夜间地表大气湍能模拟结果偏差较大,城市地区湍能偏大 1.4 m^2/s^2,传统的建筑物拖曳法几乎没有模拟出小规模城市地区夜间湍流活动。

为了研究城市范围建筑物分布对城市污染物输送扩散的影响,在模式中加入了污染物浓度扩散方程(周荣卫等,2004)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot (\boldsymbol{v}C) + \nabla \cdot (K_e \nabla C) + E$$

这里 C 是污染物浓度,$\boldsymbol{v}$ 是格点上三维风速矢量,K_e 是用于次网格湍流参数化的扩散系数,E 是源排放项,模拟过程中忽略了由于云过程和干沉降造成的污染物浓度变化。在模拟区域城市范围内地面以上第 1 层(10 m 高度处)平均分布源强为40 $\mu g/m^3$ 的污染源。通过算例 S01(建筑物拖曳法)和 S02(城市建筑物动力冠层方案)对城市地区建筑物不同处理方案研究不同方案模拟城市地区风场对污染扩散的影响。

图 7 为算例 S01 与 S02 模拟地表(10 m)和建筑物高度之上(25 m)处污染物浓度之差。14 时算例 S01 模拟污染物基本集中在城市地表扩散不出去,地面浓度较高,浓度相差最高达 60 mg/m^3,而建筑物高度之上算例 S02 模拟污染物浓度较高,最多比 S01 高 50 $\mu g/m^3$ 左右。02 时算例 S01 模拟污染物基本集中在城市地区排放高度上,在下游方向算例S02浓度较高,多达100 $\mu g/m^3$,S01模拟污染物基

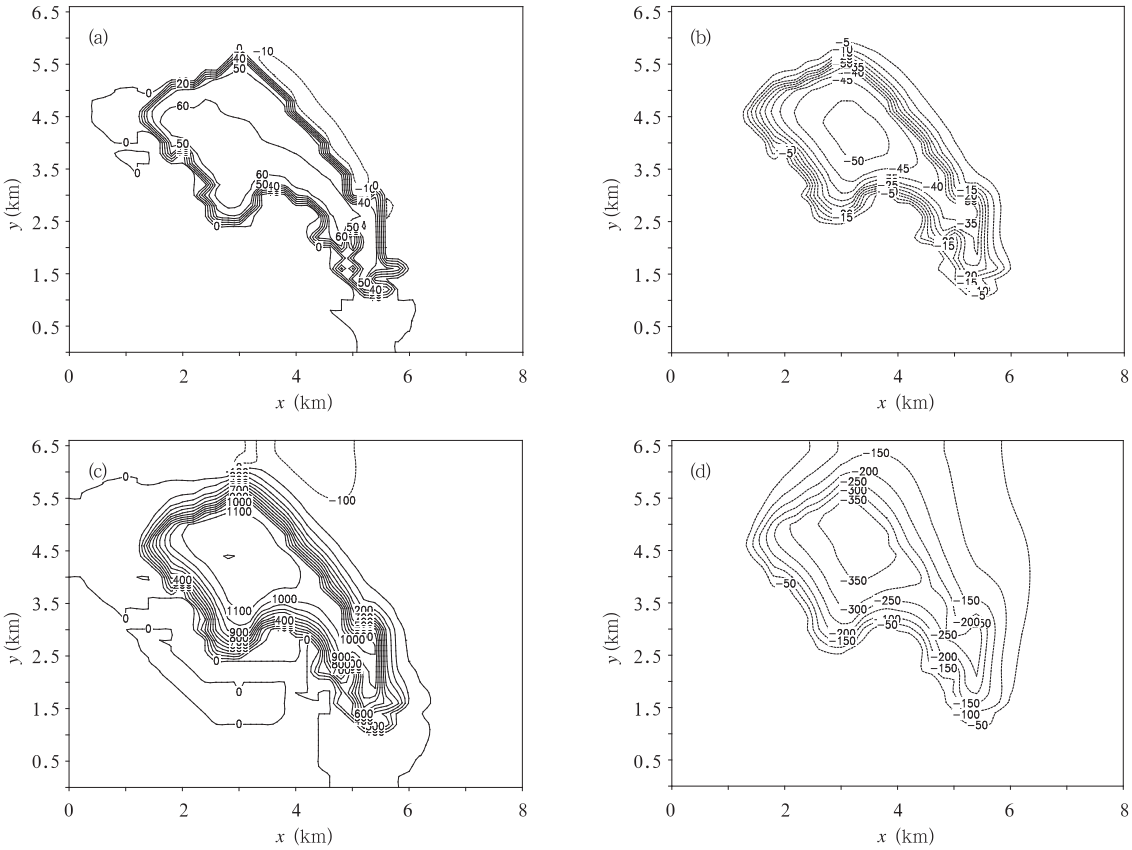

图 7 算例 S01 和 S02 不同高度污染物浓度的差值(S01 - S02)

(单位:$\mu g/m^3$;a. 14 时 10 m,b. 14 时 25 m,c. 02 时 10 m,d. 02 时 25 m)

Fig. 7 Pollutant concentration difference between case S01 and S02 at different height (S01 - S02)

(a. 14:00 BST 10 m, b. 14:00 BST 25 m, c. 02:00 BST 10 m, d. 02:00 25 m; units: $\mu g/m^3$)

本扩散不上去,因此建筑物高度之上 S02 模拟浓度较高,城市区域中心达 350 $\mu g/m^3$,下游方向也为 50 $\mu g/m^3$左右。

4.2 建筑物高度改变对城市风场及湍流活动影响的模拟分析

城市范围内越来越多高大建筑物,建筑物对气流的拖曳作用以及对湍流活动和污染扩散的影响尤显突出,采用建筑物动力冠层方案来研究小规模城市范围内建筑物高度变化对城市风速及湍流活动的影响。设计两个算例,其建筑物密度保持不变为40%,高度分别为 20 和 60 m,记为 H_{20}、H_{60}。

从 14 时和 02 时建筑高度变化对城市地区水平风廓线的影响(图 8)可见,建筑物高度越高,建筑物对气流的拖曳和扰动就越强烈,城市地区的平均风速就越低,60 m 高度建筑物城市地区水平风速要低于 20 m 高度建筑物城市地区。但是图中 60 m 高度建筑物高度底部水平风速却略大于 20 m 高度建筑物底部,根据 Coceal 等(2005)理论分析和数值模拟得出:不同高度建筑物底部风速之比约等于建筑物顶部风速之比,高大建筑物顶部与上部大气间动量交换较多,顶部风速较大,因此,高大建筑物底部风速略大于低矮建筑物底部。同时,由夜间 02 时 60 m高度建筑物城市地区水平风廓线发现,在冠层建筑物高度内和冠层高度之上,风廓线变化存在明显的拐点,这与MacDonald(2000)中观测事实相吻合。

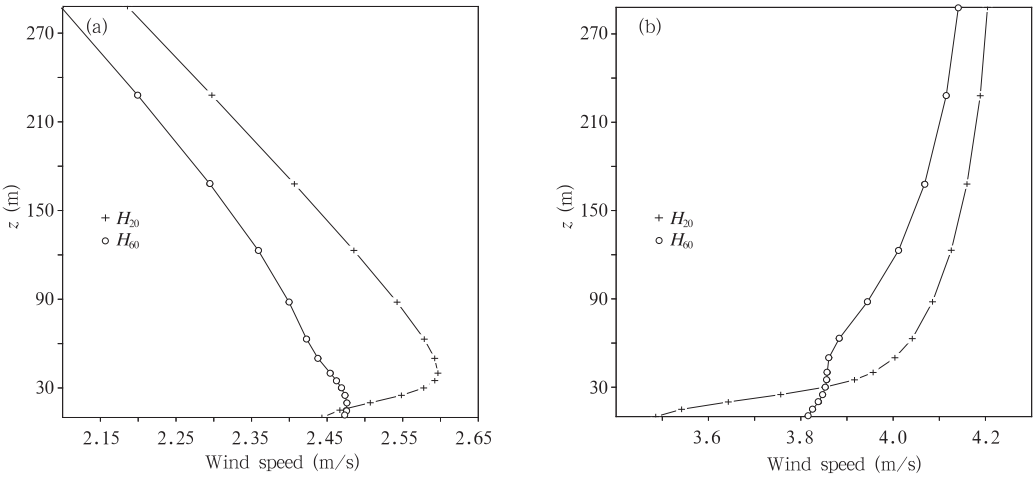

图 8 建筑物高度变化对城市地区水平风廓线的影响(a. 14 时,b. 02 时)

Fig. 8 Effect of building height variation on profile of urban wind speed at (a) 14:00 BST, (b) 02:00 BST

从不同建筑物高度城市地区 14 时的湍能和垂直扩散系数的廓线(图 9)可见,建筑物高度增加,建筑物对气流的扰动作用增强,城市地区湍流活动增强,城市地区大气湍能增加,60 m 高度建筑物城市地区湍能要大于 20 m 高度建筑物的城市地区,但是高大建筑物底部的湍能略低,且在建筑物高度范围内湍能随高度增加而增加,到建筑物高度附近处达到最大值。同时,城市地区建筑物高度增加,湍流活动增强,城市地区的垂直扩散系数增加,如图所示,60 m 高度建筑物城市地区垂直扩散系数要大于 20 m 建筑物城市地区,高大建筑物城市地区湍流垂直扩散能力增强。

图 10 为城市和下游风向乡村地区污染物浓度廓线,城市地区在 25 m 高度以下污染物浓度随着建筑物高度增加而降低,附近乡村地区地面附近污染物浓度随着建筑物增高而降低,而一定高度之上乡村地区污染物浓度随着建筑物高度增加而增加。

建筑物高度增加,加强了城市地区湍流扩散能力,垂直扩散系数增大,污染物向上扩散高度较高,城市地区近地面污染物浓度较低,冠层之上污染物浓度较高。附近乡村地区,近地面污染物浓度较低,一定高度之上污染物浓度随建筑物高度增加而增加。建筑物高度增加使得城市地区污染物扩散高度增加,下游乡村地区地面浓度降低,高空浓度增加。

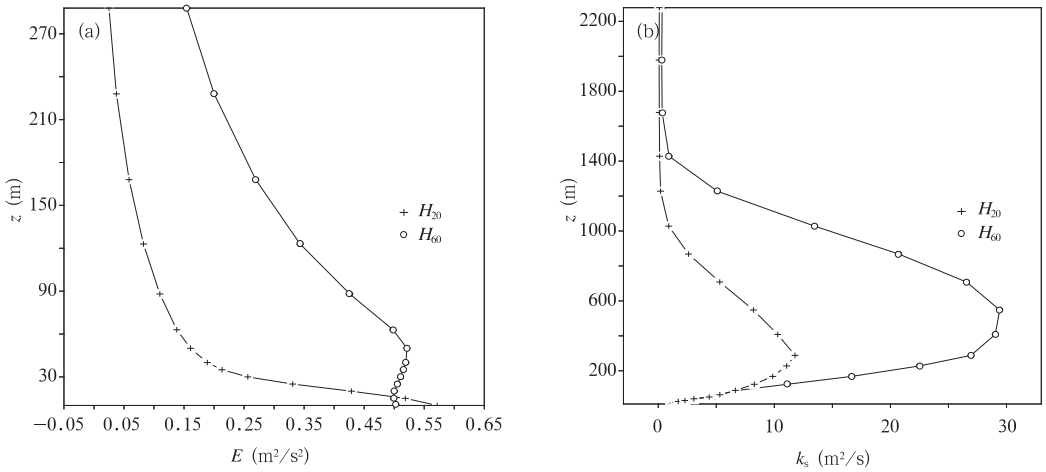

图 9　14 时建筑物高度不同时的湍能及垂直扩散系数廓线(a. 湍能, b. 垂直扩散系数)

Fig. 9　Effect of building height variation on profile of (a) turbulent kinetic energy and (b) vertical turbulent diffusion coefficient at 14:00 BST

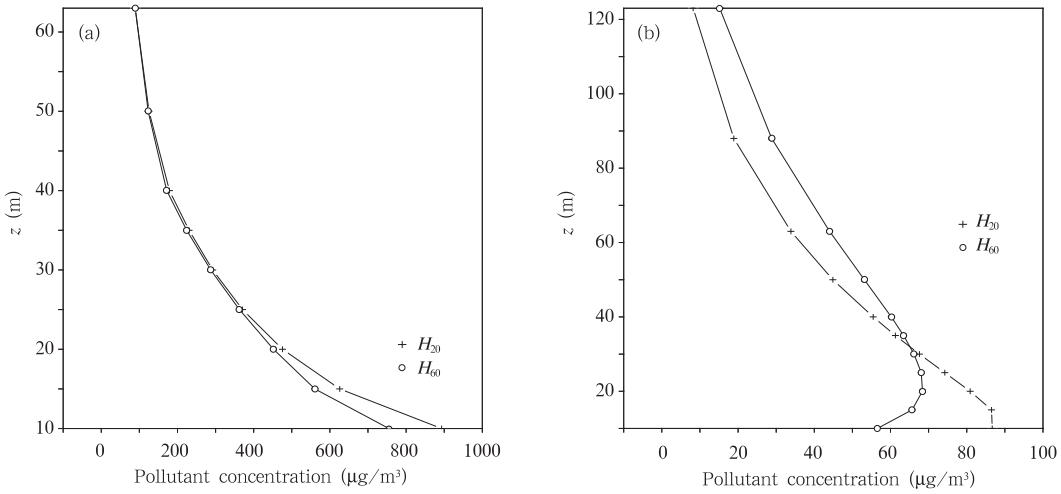

图 10　城市和乡村地区污染物浓度廓线(a. 城市, b. 乡村)

Fig. 10　Profiles of pollutant concentration on (a) urban area and (b) rural area

5　结论与讨论

本文将城市建筑物动力冠层方案引入到城市边界层精细模式中进行了模拟验证,该方案描叙了城市地区建筑物对气流的拖曳作用以及建筑物形态对城市地区湍流活动动量输送的影响。采用建筑物拖曳法和建筑物动力冠层方案两种不同建筑物动力学处理方法对北京市区东南部进行模拟,通过水平风速模拟结果与自动气象站实测资料对比发现,建筑物动力冠层方案能够更好的模拟城市地区的水平风速,模拟结果与实测更为接近。

采用建筑物拖曳法和建筑物动力冠层方案分别对一个实际小规模城市进行数值试验,模拟结果分析表明:传统的建筑物拖曳法没有考虑建筑物形态对湍流动量输送的影响,模拟不出小规模城市地区水平风速偏低的现象,大气湍能模拟结果偏低,尤其是模拟不出小规模城市地区夜间机械湍流活动的作用。由于建筑物拖曳法忽略了城市地区建筑物对湍流活动的影响,模拟的湍流垂直交换能力较弱,城市地区污染物基本聚集在排放源高度,输送不出去;采用建筑物动力冠层方案之后,模拟的城市地区垂直扩散能力较强,污染物被较多的扩散到冠层高度之上以及城市下游地区,没有产生聚集在城市地区污染物排放高度处的现象。

采用建筑物动力冠层方案研究小规模城市地区建筑物高度变化对流场和湍流活动的影响,城市地区建筑物高度增加,风速变小,但是高大建筑物底部风速略高于低矮建筑物底部;建筑物高度增加湍流活动增强,城市地区大气湍能增加,高大建筑物底部湍能较小,冠层高度内湍能随高度增加而增加,在建筑物高度附近达到最大值;同时城市地区的垂直扩散系数也随建筑物高度增加而增加;因而,高大建筑物城市地区污染物排放高度处污染物浓度较低,下游乡村地区地面污染物浓度较低,但高空污染物浓度却较高。

本文所采用的建筑物动力冠层方案主要考虑的是城市地区建筑物动力效应对城市地区流场和湍流活动的作用,但是城市地区冠层建筑物的热力效应对城市地区流场和热力湍流的活动的影响却没有考虑在内,因而在以后的研究工作中进一步加入考虑城市冠层建筑物热力效应的作用,综合考虑建筑物热力和动力因子对城市地区流场及污染扩散的影响。

参考文献

陈燕,蒋维楣. 2006. 城市建筑物对边界层结构影响的数值实验研究. 高原气象,25(5):824-833

李晓莉,毕宝贵,李泽椿. 2005. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究. 气象学报,63(6):889-902

周幂,蒋维楣,徐敏等. 2001. 一个区域 PBL 模式建立与应用研究. 南京大学学报(自然科学),37(3):395-400

周荣卫,蒋维楣,何晓凤等. 2008. 应用城市冠层模式研究建筑物形态对城市边界层的影响. 气象学报,66(4):489-499

周荣卫,刘红年,蒋维楣. 2004. 中国地区沙尘气溶胶输送过程的数值模拟. 气象科学,24(1):16-25

Bohm M, Finnigan J J, Raupach M R. 2000. Dispersion flux in canopy flows: Just how important are they? // Proceedings of 24th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, 14 - 18 August 2000, Davis, CA, USA. American Meteorological Society, 45 Beacon Street, Boston MA02108-3693, USA, 106-107

Britter R E, Hanna S R. 2003. Flow and dispersion in urban areas. Ann Rev Fluid Mech, 35: 469-496

Cheng H, Castro I P. 2002. Near wall flow over urban-like roughness. Bound-Layer Meteor, 104: 229-259

Coceal O, Belcher S E. 2004. A canopy model of mean winds through urban areas. Quart J Roy Meteor Soc, 130: 1349-1372

Coceal O, Belcher S E. 2005. Mean winds through an inhomogeneous urban canopy. Bound-Layer Meteor, 115: 47-68

Craig K J, Bornstein R D. 2002. Urbanization of numerical mesoscale models // Abstracts from Workshop on Urban Boundary Layer Parameterizations. 24 - 25 May 2001, Zurich, Switzerland. COST Action 715, 17-30

Finnigan J J. 1985. Turbulent transport in flexible plant canopies // Hutchinson B A, Hicks B B. The Forest Atmosphere Interaction. Reidel, Dordrecht, 443-480

Finnigan J J. 2000. Turbulence in plant canopies. Annu Rev Fluid Mech, 32: 519-572

Macdonald R W. 2000. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. Boundary-Layer Meteor, 97: 25-45

Miao Shiguang, Li Pingyang, Wang Xiaoyun. 2006. Building morphological characteristics and its effect on the wind in Beijing // Sixth International Conference on Urban Climate Preprints, Gøteborg: Gøteborg University, 897pp

Raupach M R, Shaw R H. 1982. Averaging procedures for flow within vegetation canopies. Boundary-Layer Meteor, 22: 79-90

Uno I, Ueda H, Wakamatsu S. 1989. Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer. Bound-Layer Meteor, 49: 77-98

Urano A, Ichoinose T, Hanaki K. 1999. Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity. J Wind Engin Industrial Aerodynamics, 81: 197-210