

MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验^{*}

李 晓 莉

(南京气象学院, 南京, 210044; 国家气象中心, 北京, 100081)

何 金 海

(南京气象学院, 南京, 210044)

毕 宝 贵 李 泽 椿

(国家气象中心, 北京, 100081)

王 欣

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

文中在综合国外一些较先进的中尺度模式城市作用参数化方案的基础上, 从城市下垫面结构对城市边界层大气作用的物理机制及实际应用两方面出发, 对城市下垫面结构和人为活动等对边界层结构的影响及中尺度模式中城市化作用的合理体现等问题进行了较全面的考虑, 改进和设计出能够较全面、细致地描述城市结构对大气边界层动力、热力结构的影响, 且适合中尺度模式结构特点的城市冠层参数化方案(UCP), 并实现了其与 MM5 模式的耦合。进行了耦合后的 UCP 方案及采用原城市作用方案的 MM5 模式对 BECAPEX 试验期间北京地区气象条件多重嵌套细尺度进行了模拟试验, 并与观测结果对比, 结果表明: 相比于 MM5 模式中原有表示城市作用的参数化方案来讲, 设计的 UCP 方案在很大程度上提高了 MM5 模式对城市边界层热力和动力结构的模拟能力。

关键词: MM5 模式, 城市边界层, 城市冠层参数化方案。

1 引 言

城市下垫面的非均匀性和由大量建筑群引起的高粗糙性特征使得城市大气边界层结构与传统均匀下、平坦下垫面之上的大气边界层结构有着很大的差别, 并形成了城市地区特殊的大气边界层结构。在城市近地层中, 从地面到建筑顶被称为城市冠层, 在该层次中, 城市下垫面结构和人为活动直接影响了城市大气的热、动力过程^[1], 因此, 深入研究城市冠层中城市结构对大气热力及动力结构特征的影响不仅是认识城市大气边界层结构特征及变化规律的重要基础, 同时, 也是城市大气数值模式研究和改进工作中所需要考虑的重要物理过程。

长期以来, 利用数值模式研究城市结构对城市大气环境的影响一直受到人们的重视^[2~8], 除一些

专门为城市地区研究而发展起来城市边界层模式外, 一些中尺度模式因具备多重嵌套结构能力、比较完整的边界层参数化方案及相应比较精确的下垫面地形资料系统, 比较适合从城市大气环境的多尺度特征及实际城市地理状况研究的角度来进行实际城市气象条件的研究, 也成为城市大气模拟研究工作的有利工具^[4~8], 其中, MM5 中尺度模式就是目前比较先进的中尺度气象模式, 该模式的物理过程包括了较完备的边界层参数化方案, 其多重区域嵌套的最小水平分辨率可达 1 km 左右, 从这些方面来看, MM5 模式已基本上满足了实际城市大气研究所需的要求。

国内外利用中尺度模式对城市大气环境开展了大量的研究工作, 取得了不少成果, 但是在对城市下垫面作用的参数化处理方法却基本相同, 主要还是

^{*} 初稿时间: 2003 年 3 月 3 日; 修改稿时间: 2003 年 8 月 6 日。

资助课题: 《国家重点基础研究发展规划》项目“首都北京及周边地区大气、水、土壤污染机理与调控原理”资助。

利用建立在平坦、均匀地面上的传统 Monin-Obukhov 近地层相似理论和能量收支理论,即通过区别于其他下垫面的动力及热力特征参数来体现城市下垫面对低层大气动力、热力结构及地面能量平衡的影响。这种处理方法对城市下垫面的描述能力过于简单,且未能详细地考虑城市下垫面结构的非均匀性和城市建筑对城市低层大气的动力、热力特征及地面能量平衡的影响,因此,在很大程度上限制了中尺度模式对城市大气环境的模拟能力。可以说,中尺度气象模式在处理城市下垫面-大气之间相互作用上的不足^[9]已经成为影响其对城市大气数值研究水平的关键因素。

最近,已有一些国外学者在提高中尺度模式对城市下垫面的描述能力上进行了一些研究工作。Brown^[10]在植被冠层数值研究工作的基础上,基于静力 HOTMAC 模式发展出一个城市冠层参数化方案;Masson^[11]提出了一个比较复杂的能够预报城市路面、墙面和屋顶温度的城市能量收支参数化方案;Martilli^[12]在非静力 FVM(Finite Volume Model)模式基础上,发展了包括类似于 Masson 的城市热力作用,且考虑了城市结构动力作用的城市湍流参数化方案。以上这些都是目前能够较好地描述城市作用的参数化方案,并且各有特点。但是,上述方案的发展和构造均有一定程度的针对性,在对城市下垫面特征的描述上主要还是基于理想的城市结构,其中有些方案还需要比较详细的城市下垫面结构特征如街道走向、建筑物宽度等,这也进一步影响了上述方案在实际城市大气环境研究中的应用。所以,在目前数值模式研究工作中,如何在模式中全面、细致地描述城市化作用对大气边界层动力、热力结构的影响并建立合理的参数化方案,不仅是提高数值模式对城市大气环境的模拟及预测水平所亟待解决的关键问题和技术难点,同时也是近年来国际上城市大气环境研究中所面临的前沿科学问题之一。

本文的研究基于 MM5 模式,立足于实际城市大气环境研究的客观需要及条件,以 Brown 发展的城市冠层参数化方案为基础,并综合了其它中尺度模式城市作用参数化方案,改进和设计出一个既适合中尺度模式结构特点、又能够较全面、合理地体现城市对大气影响的城市冠层参数化方案(Urban Canopy Parameterization,简称 UCP 方案),并实现其与多重嵌套结构 MM5 模式的耦合连接(简称 MM5-UCP 模式)。利用 BECAPEX^[13]试验中北京

城市边界层观测资料及自动气象站资料检验了 UCP 方案的合理性以及 MM5-UCP 模式的性能。

2 UCP 方案的设计

文中设计的 UCP 方案主要以下几个方面考虑了城市结构的作用:UCP 方案中的格点结构;UCP 方案中大气控制方程及其相关物理过程的处理;城市冠层中地面的能量收支状况的处理方案以及 UCP 方案中相关参数的确定。

2.1 UCP 方案的格点结构

UCP 方案主要考虑的是城市冠层中城市下垫面结构对大气的的影响,因此,在方案的格点构造上要能够体现出其影响作用。城市冠层中建筑结构是通过垂直层次划分来体现,在不同垂直层次上,模式能分辨出的建筑结构是不同的,这与格点上城市建筑高度的分布特征有关,图 1 给出了 UCP 方案中格点垂直结构示意图。

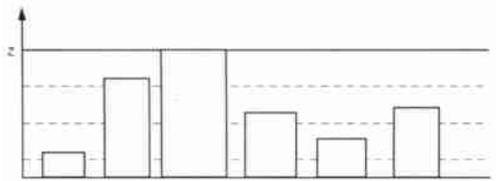


图 1 UCP 方案中格点的垂直结构示意
(在 z 方向上,虚线代表模式的垂直层,实现线表示城市冠层顶;矩形表示模式格点上的建筑分布,格点上所有建筑在地面上的总覆盖和定义为 f_{urban})

此外,为了考虑城市下垫面的非均匀性,更真实地反映出实际城市的地面结构,文中对城市地面覆盖结构的非均匀性进行了更为合理地描述:在方案格点的水平结构中,允许网格区域包括 n 种不同下垫面成分,其中, $f_i (i = 1, n)$ 表示网格区域中第 i 类下垫面类型 L_a 的面积权重,对于 UCP 方案来说,格点区域上地面建筑平面面积比率(即图 1 中的 f_{urban})是一个非常重要的参数。

2.2 UCP 方案的大气控制方程及参数化处理方案

从研究城市对大气热力及动力结构的影响出发,我们主要考虑了城市冠层中大气的水平动量、热量及湍流动能这 3 个方程的变化。为了简便,文中假设城市冠层在水平方向是均匀的,这样就可以使用 Raupach^[14]和 Brown^[10]等在研究植被及城市冠层时所采用的一维(垂直方向)扩散方程来表示城市冠层中的大气热力和动力方程。

2.2.1 水平方向的动量方程及相关参数化处理

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho u' w'}}{\partial z} + F_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho v' w'}}{\partial z} + F_v \quad (2)$$

式中,右端的第一项表示城市冠层内湍流雷诺应力 $\overline{u' w'}$ 及 $\overline{v' w'}$ 的扩散项;第二项表示城市建筑结构对气流的粘性拖曳作用。下面就分别介绍城市冠层中雷诺应力和建筑结构拖曳作用的参数化处理。

(1) 城市冠层中雷诺应力的参数化处理

在传统的湍流扩散理论中,近地层被认为是常值通量层,通常是采用 Monin-Obukhov 近地层相似理论来描述其湍流特征,但是,城市下垫面的复杂特征使得城市大气的最低层的几十到几百米中的气流和湍流结构与理想的均匀地面之上的气流特征有着很大的不同。不少外场实验^[15~17]也发现,城市冠层和粗糙副层中湍流通量,特别是雷诺应力不再是随高度不变的常数。因此,传统的近地层常值通量理论在城市近地层中是不完全适用的,为此,我们对近地层相似理论进行了修改,即采用随高度变化的局地摩擦速度来表示城市近地层中的湍流应力,其物理含义类似于传统近地层参数化方案中地面对大气动量的摩擦损耗作用,但差别在于这种损耗作用是随高度而变化的:

$$[-\overline{u' w'}(z)] = u_{*l}^2(z) u_z / V_z \quad (3)$$

$$[-\overline{v' w'}(z)] = u_{*l}^2(z) v_z / V_z \quad (4)$$

式中, $u_{*l}^2(z)$ 是城市冠层中的局地摩擦速度, u_z , v_z , V_z 分别代表 z 高度处的风速风量和全风速。其中,对于 $u_{*l}^2(z)$ 的计算,我们采用了 Haan^[18] 根据多个城市外场观测结果总结出的、且适用于城市近地层的局地摩擦速度公式:

$$\left[\frac{u_{*l}^2(z)}{u_*^R} \right]^b = \sin\left(\frac{\pi}{2} Z\right)^a \quad (Z \leq 1) \quad (5)$$

式中, u_*^R 是粗糙副层上部的摩擦速度,在此定义为参考摩擦速度; $Z = z'/z_*'$ 是无量纲高度,其中, $z' = z - z_d$, $z_*' = z_* - z_d$, z_* 是粗糙副层的高度(为平均建筑高度的3倍), z_d 是零位移平面, a 和 b 是经验参数(分别取为 1.28 和 3.0)。参考摩擦速度 u_*^R 的计算满足 Monin-Obukhov 相似理论:

$$u_*^R = \frac{kV}{\ln(z_*'/z_0) - \Psi_m(z_*'/L)} \quad (6)$$

式中, z_0 是地面动力学粗糙度, Ψ_m 为动量稳定度函数, k 为冯卡门常数, L 是 Monin-Obukhov 长度。

必须指出的是,这里城市地面的动力参数粗糙度 z_0 及零平面位移 z_d (在 MM5 模式原近地层方案中未用到这个量) 取值已不再是原来模式中所指定的统一值,而是采用能够较详细地体现实际城市下垫面结构特征的方法来确定的,这将在后面进行专门介绍。

(2) 城市冠层中建筑结构拖曳力作用的参数化处理

对于 UCP 方案平均运动方程(1)与(2)中由城市建筑结构作用所产生的曳力项 F_u , F_v 的参数化处理, Brown^[10], Martilli^[12] 及 Uno^[19] 等人曾将植被冠层研究中通常使用的“曳力强迫”方法引入到城市建筑对大气动力作用的数值研究工作中,并取得了较好的效果。因此,我们也采用类似的方法来确定 UCP 方案中平均动量方程中的曳力强迫项 F_u 和 F_v , 其物理含义可以理解为单位体积中建筑结构对平均气流的强迫阻力,如果假设城市结构为气流可以穿透的多空介质,则其表达式如下:

$$F_u = -0.5 f_{\text{urban}} C_D A(z) u V^{1/2}$$

$$F_v = -0.5 f_{\text{urban}} C_D A(z) v V^{1/2} \quad (7)$$

式中, f_{urban} 代表格点上地面建筑平面面积覆盖比率, C_d 是城市冠层的拖曳系数, $A(z)$ 是随高度变化的城市冠层面积密度。

2.2.2 热量方程及相关参数化处理

UCP 方案中的热量方程采用如下形式:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho w' \theta'}}{\partial z} + F_\theta \quad (8)$$

式中,第一项表示城市冠层中湍流热量通量的扩散项;第二项 F_θ 表示城市冠层中建筑结构对太阳辐射通量的衰减作用及人为热量的贡献。

(1) 湍流热量通量的参数化处理

在方程(8)中,城市冠层中随高度变化的湍流热量通量 $\overline{w' \theta'}$ (z) 的计算及其处理方法与前面动量方程中雷诺应力的计算方法类似:

$$-\overline{w' \theta'}(z) = u_{*l}^2(z) k \Delta\theta / [\ln(z_*'/z_0) - \Psi_h(z_*'/L)] \quad (9)$$

式中, $u_{*l}^2(z)$ 是城市局地摩擦速度, $\Delta\theta$ 为位温的垂直差, Ψ_h 是热力稳定度函数。

(2) 城市建筑结构及人为热量作用的参数化处理

对于方程(8)中右端第二项 F_θ 的计算,我们分别考虑了由于城市建筑结构对太阳辐射通量的衰减作用以及人为热量的贡献,具体表示如下:

$$F_{\theta} = \left(1 + \frac{1}{B}\right)^{-1} \frac{f_{\text{urban}}}{\rho_p} \frac{\partial R_{\text{NC}}}{\partial z} + \chi \frac{f_{\text{urban}}}{\rho_p} \frac{Q_{\text{F}}}{\Delta z} \quad (10)$$

式中, R_{NC} 是格点中城市建筑造成的净辐射通量项, B 是鲍恩比, Q_{F} 代表城市冠层中的人为热量通量, χ 是人为热量释放到大气中的比例系数(人为热量除了一部分用来加热大气之外,还有一部分是向下传输到地面)。

对于城市冠层中净辐射通量 R_{NC} 的计算,采用与 Yamada^[20]在植被冠层研究所使用相类似的计算方法,来计算城市冠层中的净辐射通量 R_{NC} :

$$R_{\text{NC}} = R_{\text{Nh}} \exp\{-kL(z)\} \quad (11)$$

式中, R_{Nh} 是城市冠层顶的净辐射通量, k 是衰减系数, $L(z)$ 是城市冠层建筑面积指数。城市冠层顶的净辐射通量 R_{Nh} 可以由下式计算:

$$R_{\text{Nh}} = (1 - a_{\text{can}})S + \Delta R_{\text{lcan}} \quad (12)$$

式中, a_{can} 为城市冠层的反照率, S 是太阳辐射, ΔR_{lcan} 是城市冠层顶净长波辐射通量。

建筑面积密度指数 $L(z)$ 是由城市冠层面积密度 $A(z)$ 来确定:

$$L(z) = \int_z^{h_c} A(z) dz \quad (13)$$

其中, h_c 代表冠层高度。

下面讨论一下人为热量的确定,城市中人为热量对城市地面的能量平衡以及城市大气的热平衡有着重要的作用,由于人为热量与城市地区能量消耗、人口密度等因素有关,其大小在城市中的不同区域是不相同的,并且有着明显的日变化特征。因此,在模式中如何体现出人为热量的变化特征是提高模式对城市低层大气热力特征以及地面能量平衡描述的关键因子。文中人为热量的计算采用如下公式:

$$Q_{\text{F}} = Q_{\text{F,max}} P(t) \quad (14)$$

式中, Q_{F} 表示随时间变化的人为热量, $Q_{\text{F,max}}$ 是格点上的最大人为热量通量, $P(t)$ 是描述人为热量日变化的函数。我们将最大人为热量通量 $Q_{\text{F,max}}$ 看作是城市地面利用状况的函数,即根据格点上城市地面的构成成分差异来分别确定 $Q_{\text{F,max}}$ 的取值,以体现出城市中人为热量释放的非均匀性。对于 $P(t)$ 的计算,采用 Tahara^[21]提出的傅氏函数形式:

$$P(t) = \gamma + \sum_{n=1}^3 \lambda_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{24}\right) + \phi_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{24}\right) \quad (15)$$

其中, $\gamma = 0.557$, $\lambda_1 = -0.227$, $\lambda_2 = -0.006$, $\lambda_3 = -0.084$, $\phi_1 = -0.384$, $\phi_2 = -0.016$, $\phi_3 = -0.012$ 。

2.2.3 湍流动能方程及相关参数化处理

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\overline{\rho w' E}) - \overline{u' w'} \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{v' w'} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{g}{\theta} \overline{w' \theta'} - \frac{E}{T_0} + F_E \quad (16)$$

式中,右边项分别代表湍流动能的湍流输送项、切变项、浮力项、耗散项及由于城市建筑作用而产生的湍流动能尾流产生项。

(1) 湍流通量的参数化处理

对于输送项中的动量通量 $\overline{u' w'}$, $\overline{v' w'}$ 及切变项中热量通量 $\overline{w' \theta'}$ 的计算,我们采用了与前面动量和热量方程中相同的处理方案。

(2) 城市建筑对湍流动能尾流产生作用 F_E 的参数化处理

这里采用在前面动量方程参数化处理中使用过的“曳力强迫”方法,来表示城市建筑对湍流动能的尾流产生作用:

$$F_E = 0.5 f_{\text{urban}} C_D A(z) [|u|^3 + |v|^3] \quad (17)$$

(3) 湍流长度尺度 l 的修改

采用 Martilli 城市参数化方案中的做法,考虑城市建筑对城市冠层中的湍流长度尺度 l 的影响:

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_{\text{old}}} + \frac{1}{l_b} \quad (18)$$

在式(18)中, l_{old} 是传统的长度尺度,其计算方法采用了 Blackadar 的长度尺度公式: $l^{-1} = (kz)^{-1} + \lambda^{-1}$ 。 l_b 表示城市建筑所产生的耗散长度尺度,具体计算如下:

$$\frac{1}{l_b} = \sum_{z=z_a}^{z_h} \gamma(z) \frac{1}{z} \quad (19)$$

式中, z_a 是模式最低层, z_h 表示冠层的高度, $\gamma(z)$ 表示 UCP 方案垂直结构所分辨出的建筑高度分布特征。这样处理的物理机制主要是考虑到在一个格点内,可能有着不同高度的建筑,而不同高度的城市建筑产生涡旋的大小是不同的,其中,低层涡旋不仅受到较低建筑的影响,也可能“感受”到较高建筑的作用,但在高层中,只有较高建筑所产生的涡旋才具有影响作用。

2.3 城市地面能量收支的确定

在 MM5 模式原近地层参数化方案中,对地面能量收支的处理主要还是利用传统平坦地面上地面能量收支方案^[22],这种方法在处理城市下垫面时,

只是将城市看作具有较大粗糙度、较小反照率及有效饱和率的平坦地面,并没有体现出城市下垫面结构的非均匀性,也没有考虑城市结构及人为活动所产生的热量对地面能量收支的影响。而事实上,城市建筑物对地面太阳短波辐射的吸收有着直接的影响,而且城市中人为热量的释放也会改变地面能量收支状况。因此,在模式中考虑这些因素对城市地面能量收支的影响对于改进模式的城市地面中能量平衡的描述,提高模式的模拟能力是很必要的。

我们从中尺度实际结构的特点出发,充分地考虑城市建筑及人为热量对城市地面能量收支的影响,确定了城市冠层中地面的能量平衡方程:

$$R_{NG} + (1 - \alpha) Q_F = H_G + LE_G + G_s \quad (20)$$

其中, R_{NG} 是城市冠层内的地面净辐射通量, α 是人为热量释放到大气中的比例系数, $(1 - \alpha) Q_F$ 是人为热量向地面的释放量, H_G , LE_G , G_s 分别是地面的感热、潜热及土壤热通量。其中,城市冠层中地面净辐射通量 R_{NG} 的计算式为:

$$R_{NG} = (1 - f_{urban}) R_g + f_{urban} R_{N_h} \exp\{-kL(0)\} \quad (21)$$

其中,第一项为格点中非城市部分地面的净辐射通量,第二项为城市格点中城市部分冠层顶的净辐射通量对地面辐射量的贡献。

方程(20)中感热、潜热通量 H_G 和 LE_G 的计算,采用文献^[22]的方法来计算。对于UCP方案中地面温度方程的预报,我们在一维热传导方程的基础上,引入城市冠层中地面的能量平衡方程,其计算式为:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (23)$$

方程(23)在地面上边界上满足如下条件:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_g = G_s \quad (24)$$

$$G_s = R_{NG} + (1 - \alpha) Q_F - H_G - LE_G$$

2.4 城市冠层参数化方案中参数的确定

Brown曾在简单、理想化的城市结构形态下给定各种城市冠层外形参数,但就实际城市大气环境的研究工作而言,必须确定出符合实际城市结构特点的各种城市外形参数。下面分别介绍UCP方案中城市外形参数和城市地面特征参数的物理含义以及确定方法:

2.4.1 城市外形参数

城市外形参数包括格点上地面建筑平面面积覆盖比率 f_{urban} 、城市冠层面积密度 $A(z)$ 、以及曳力系数 C_D :

格点上地面建筑平面面积覆盖比率 f_{urban} 定义为格点区域中地面建筑平面面积 A_p 与格点面积 A_T 的比值,即 $f_{urban} = A_p / A_T$,其物理含义可以理解为城市的建筑密度。

城市冠层面积密度 $A(z)$ 是用来描述空气体积被建筑所占有的情况,其定义为:

$$A(z) = \frac{\frac{1}{\Delta z} \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z}^{z+\frac{1}{2}\Delta z} A_p(z') dz'}{A_T \Delta z} \quad (25)$$

其中, $A_p(z')$ 是高度 z' 处的建筑平面面积, Δz 是高度增量。由于 A_T 不是高度的函数,因此可以将其代入积分符号内,从而得到:

$$A(z) = \frac{\frac{1}{\Delta z} \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z}^{z+\frac{1}{2}\Delta z} \frac{A_p(z')}{A_T} dz'}{\Delta z} \quad (26)$$

由于 z 高度上的建筑平面面积部分 $f_{urban}(z') = A_p(z') / A_T$,并假设建筑平面面积在高度增加量 Δz 内是不变的,则上式可以进一步简化为:

$$A(z) \cong \frac{f_{urban}(z)}{\Delta z} \quad (27)$$

曳力系数 C_D 与建筑的数量、空间分布、高度、外形以及气流与建筑的角度有关。一般认为,城市建筑产生的曳力作用要比植被冠层大,但由于目前对实际城市冠层中城市建筑状况的分析研究工作还不多,因此,我们根据 Raupach^[23]的风洞试验研究结果,将其取为常数值 0.4。

2.4.2 城市地面特征参数

不同城市的地面结构是各不相同的,即使是同一城市,其地面特征结构也表现出多样性及非均匀性等特点。但是,这种城市地面结构特点在MM5模式原近地层方案处理中并没有体现出来,其只是用单个的“城市”土地利用分类来表示所有城市下垫面,并据此来给定城市地面的热、动力特征参数,显然这种处理方法对于模式进行实际城市大气条件的研究是不合适的。因此,必须根据实际城市的下垫面状况来重新确定模式中城市格点上的热、动力参数,以体现城市下垫面结构的非均匀性特征。

城市地面空气动力粗糙度 z_0 与零平面位移 z_d 是描述城市下垫面空气动力学特征的重要参数, Grimmond等^[24]曾根据北美几个城市外形资料,对

计算城市地区的 z_d 和 z_0 的一些方法进行了评估和验证。在此, 我们根据实际可能获得的地理信息资料, 采用由城市平均建筑高度来确定 z_0 与 z_d 的方法:

$$\begin{aligned} z_d &= f_d \overline{Z_H} \\ z_0 &= f_0 \overline{Z_H} \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $\overline{Z_H}$ 是平均建筑高度, f_d 和 f_0 是经验系数, 其近似取值分别为 0.6 和 0.1。

在前文 UCP 方案中格点水平结构中, 我们通过不同地面覆盖分类考虑了城市下垫面的不均匀性, 但由于各种地面覆盖成分的热力性质各不相同, 为了避免对这些热力参数进行复杂的处理, 我们采用一个简单有效的方法, 即根据不同地表类型一面积权重平均的方法, 来计算模式中城市格点的热力特征参数:

$$\overline{A} = \sum_{i=1}^n f_i A_i \quad (29)$$

式中, \overline{A} 是格点上面积权重平均的热力参数值, $i=1, n$ 代表是城市下垫面构成的分类, f_i 是不同下垫面所占的面积比率, A_i 为不同下垫面成分的热力特征参数。在 UCP 方案中, 所需计算的热力参数为反射率、比辐射率、有效饱和率及热惯性。

3 UCP 方案与 MM5 模式的耦合过程

我们设计的 UCP 方案主要是描述城市冠层内的城市结构对大气动力、热力动力结构及地面能量平衡的作用, 因此, UCP 方案与 MM5 模式的耦合连接是通过模式中的边界层模块和计算地面温度的模块来实现的。在本研究中, 我们采用 1.5 阶闭合的 Gaynor-Seaman 边界层方案(简称 G-S 方案)和 SLAB 多层土壤结构的地面能量方案。此外, 在 UCP 方案与 MM5 模式的耦合过程中, 就 UCP 方案本身来讲, 它还包括一个预处理部分 PREURBAN, 其主要功能是处理高分辨率的城市下垫面资料, 得出多重嵌套区域(不同分辨率)中 UCP 方案所需的输入参数。下面简单介绍一下耦合过程的具体处理方案。

3.1 修改 MM5 模式的内存分配模块

修改 MM5 模式中主模式部分的内存(MEMORY)分布, 加入多重嵌套运行时城市冠层参数化方案所需要变量的指针地址和相应说明, 这也是进行 UCP 方案与多重嵌套结构的 MM5 模式耦合连接的先决条件。

3.2 修改 MM5 模式的输入、输出模块

修改 MM5 模式的输入、输出(I/O) 模块, 包括嵌套结构, 读入 UCP 方案在多重嵌套区域不同分辨率条件下城市建筑平面面积覆盖比率、根据城市土地利用状况所确定的人为热量及城市地面的热、动力特征参数等参数。

3.3 修改 MM5 模式物理过程中的边界层/地面模块

确定城市地区在 MM5 模式多重嵌套区域中的位置, 并根据多重嵌套耦合的要求, 分别修改 G-S 边界层方案与 SLAB 方案的模块, 从而实现 UCP 方案与边界层热量、动量、湍流动能及地面能量平衡过程的耦合。

4 模拟试验方案设计

为了检验发展 UCP 方案的合理性以及耦合 UCP 方案的 MM5 模式(简称为“MM5-UCP 模式”) 对城市边界层结构的模拟能力, 我们设计进行以下两个模拟试验, 一是利用 MM5-UCP 模式的模拟试验(简称为“urban 试验”); 另一个是在相同条件下, 采用原有城市作用方案(简称“传统的方案”)MM5 模式的模拟试验(简称为“trad 试验”)。通过对两个试验的模拟结果以及观测资料的对比分析来检验 MM5-UCP 模式的性能。

4.1 模拟个例的选取

本文以北京城市边界层结构作为数值模拟试验对象。这主要是基于以下两个考虑: 一是研究和发 展合理的城市冠层参数化方案是建立和完善北京地区高分辨率城市气象模式的重要内容, 二是北京地区在城市大气环境的研究上已经做了大量的工作, 其获得的相关信息资料和研究成果为 UCP 方案应用于实际城市的研究及检验 MM5-UCP 耦合模式对城市边界层结构模拟能力提供了必要的前提条件, 如北京城市地理信息遥感数据处理的研究工作可以提供 UCP 方案所需的高分辨率、多种分类的北京下垫面地理信息资料; 北京 2001 年冬季开展的 BECAPEX 试验获得了较详细的北京城市边界层的廓线资料, 此外, 北京地区已经建立的、具有较高分辨率的自动气象站网还能提供逐小时的近地面气象场资料。以上这些资料均为我们能够从较全面的角度来检验和对比 MM5-UCP 耦合模式的性能提供了可能。

通过对 BECAPEX 试验资料的比较分析, 2 月 27~28 日北京地区的天气受高压控制, 天气晴朗,

风力变化不大,天气形式非常有利于研究北京城市边界层局地结构特征,因此,选取这两天作为模拟研究的对象。卞林根等^[25]也曾对这两天北京城、郊的温度和风场廓线观测结果进行了分析研究,发现了一些能代表冬季北京城市边界层热力和动力结构特征及其变化规律的结果。

4.2 模拟范围的确定及初始条件

我们采用三重嵌套区域来模拟北京地区的气象条件,嵌套区域的结构详见图2,表1给出了计算区

域及积分步长,为了研究城市边界层的结构特征,在1500 m以下,模式的垂直层次取了21层,其中,在100 m以下取了9层以分辨城市建筑结构的作用。

模拟的时间是从2月27日08时(北京时,以下同)至3月1日00时。模式的初始条件是以国家气象中心T106谱模式的分析场作为背景场,将常规探空资料、BECAPEX试验所获得的边界层廓线资料及每隔3小时的地面加密资料相结合,通过对背景场的客观分析而得到的。

表1 模拟计算区域

	格点数	水平区域大小 (km)	水平格距 (km)	垂直层数	积分步长 (s)
区域1	63 × 63	558 × 558	9	31	27
区域2	79 × 73	234 × 216	3	31	9
区域3	79 × 73	78 × 72	1	31	3

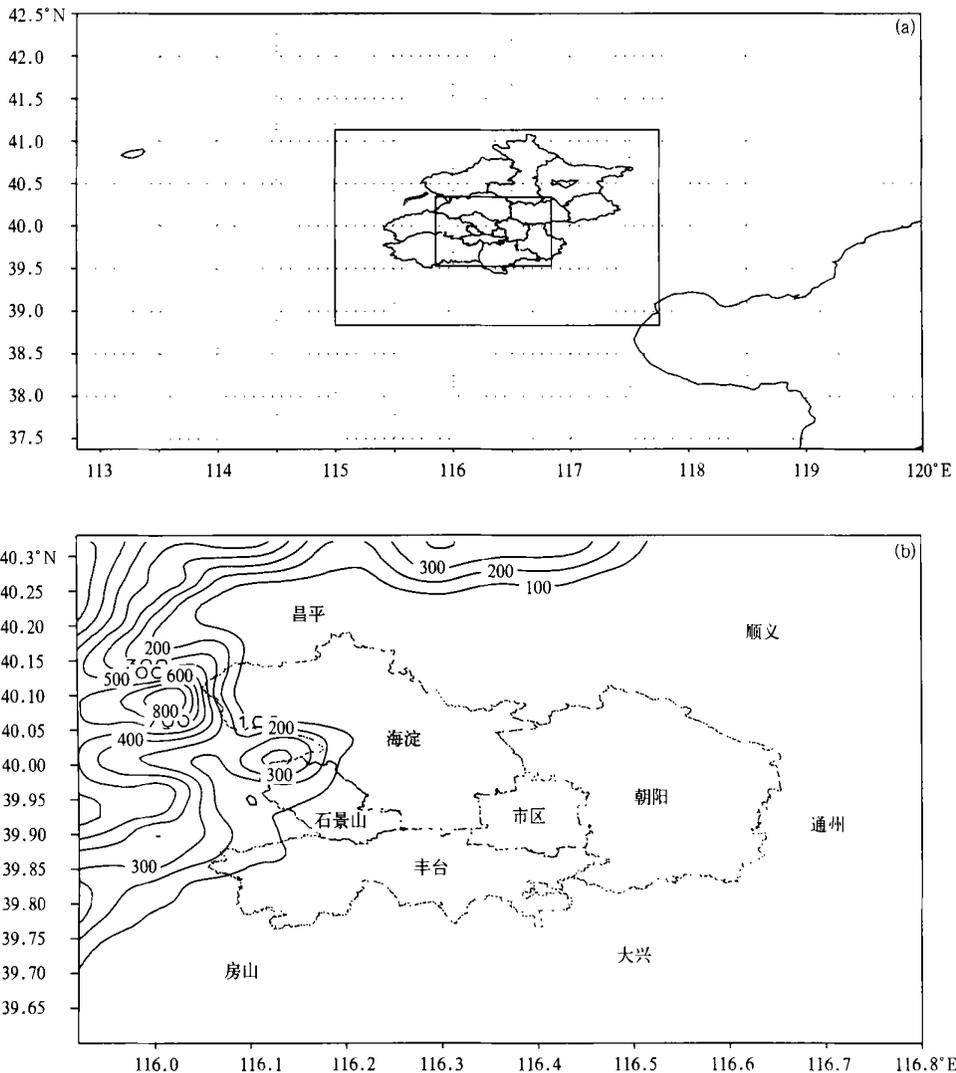


图2 北京地区模拟试验的三重网格嵌套区域结构(a)和第3重区域的地形高度及范围(b)
(地形等高线单位:m)

4.3 UCP 方案中北京地区地面特征参数的确定

4.3.1 城市地面特征参数的确定

我们首先利用由先进的地理信息资料处理技术所获得的北京地区 500 m 网格分辨率、7 种分类的地面覆盖资料(包括树木、草地、农业用地、水面、裸土、建筑物覆盖及交通覆盖等)及建筑物平均高度资

料,然后经过面积权重平均来得到模拟方案中不同水平分辨率格距下的北京地区下垫面覆盖状况和建筑平均高度。在此基础上,根据格点上不同覆盖成分的构成比率及其对应的热力参数(见表 2)经过面积权重平均,来得到 UCP 方案中城市格点上的城市地面热力特征参数。

表 2 不同地面类型的地面热力特征参数

地表状况	反照率 (百分比)	比辐射率 (百分比)	有效饱和率 (百分比)	热惯性 ($J/(cm^2 \cdot K \cdot s^{1/2})$)
树木	0.18	0.95	0.50	0.25
草地	0.20	0.90	0.30	0.21
农业用地	0.18	0.90	0.40	0.21
水面	0.08	0.99	1.00	0.04
裸土	0.30	0.85	0.10	0.13
建筑覆盖	0.10	0.83	0.10	0.13
道路	0.10	0.83	0.10	0.13

此外,我们利用建筑平均高度资料来计算北京地区格点上的地面动力参数粗糙度和零平面位移,这样,计算出的粗糙度和零平面位移的变化范围与高志球等^[26]根据超声风速、温度资料估算粗糙度和零平面位移的取值范围基本相同,这也进一步说明,UCP 方案中对城市地面动力参数的确定方法是合理的。

4.3.2 城市外形参数 f_{urban} 和 $A(z)$ 的确定

城市地面建筑面积覆盖比率 f_{urban} 是利用 500 m 分辨率的北京城市下垫面资料中的建筑覆盖比率经过面积权重平均获得;对于城市冠层面积密度 $A(z)$,则需要结合北京市区 $200 \times 200m$ 网格的建筑高度分布资料来确定,即根据地面建筑物覆盖比率的定义及建筑平面面积密度的计算公式,确定出不同高度上的城市冠层面积密度。

4.3.3 人为热量通量的确定

前面已经讨论过,UCP 方案中城市人为热量的非均匀性特征是用城市地面使用状况来体现的。为此,我们根据北京地区高分辨下垫面资料中的建筑物、交通路面及草地的覆盖比例将北京城市地面使用状况进一步划分为高建筑密度城市区、中建筑密度城市区、低建筑密度城市区、郊区和农村,并参照日本东京的实际人为热量的变化特征^[8],具体确定了北京城市格点上最大人为热量取值:高建筑密度区为 $80 W/m^2$,中建筑密度区为 $60 W/m^2$,低建筑密度区为 $30 W/m^2$,郊区为 $10 W/m^2$,农村为 $5 W/m^2$ 。这样,利用公式(14)和(15)就可以计算出

北京城市格点上随时间变化的人为热量。

5 模拟结果与观测结果的比较分析

5.1 温度场的比较

5.1.1 温度垂直结构的比较

我们选取 28 日 02 时和 14 时两个时次来分别代表白天和晚上,进行观测结果和模拟结果的对比。图 3 给出了 urban 试验和 trad 试验对市区点(建国门)温度廓线模拟结果及观测资料的比较。

对于夜间市区温度廓线,就观测结果而言,市区点在大约在 120 m 以下的高度存在着混合结构,从 120 m 以上到 300 m 左右存在着悬浮逆温层;从模拟试验的结果来看,urban 试验模拟出的温度廓线分布特征与观测结果基本吻合,也表现为在 150m 以下为不稳定的混合层,在混合层上面也存在厚度大约为 150m 左右的逆温层,并且低层大气温度的大小与观测结果非常接近,这表明 urban 试验较好地模拟出了夜间市区温度的垂直变化特征。而在 trad 试验模拟出市区低层 150 m 以内的温度廓线与观测结果则有着明显的不同,其表现出稳定的贴地逆温结构,而且在低层几十米内,其模拟的温度值比观测结果低大约 $2^\circ C$ 左右。

从白天市区的温度廓线也可以看出,urban 试验的模拟结果与观测结果比较接近,特别表现在接近地面的层次,而 trad 试验模拟出温度值则比观测结果明显偏低。

为了更清楚地认识 urban 试验和 trad 试验对城

市边界层温度垂直结构的模拟情况,图5给出这两个试验在28日02时模拟出经过116.4°E的温度南北向垂直剖面,可以看出,urban试验不仅模拟出前文提到的观测资料中出现的城区悬浮逆温结构,并且还能再现出城区和郊区的温度垂直结构差异,主要表现为:北边郊区低层为一厚度为360 m左右的

稳定贴地逆温层;在200 m以下的高度城区与郊区之间存在着随高度递减的城市热岛效应,240~400 m左右的高度存在着“温度交叉效应”等特征。在trad试验中,上述城区与郊区的温度结构差异则没有被反映出来,其模拟出城市和郊区均为稳定的近地逆温层,且也未出现城市热岛效应。

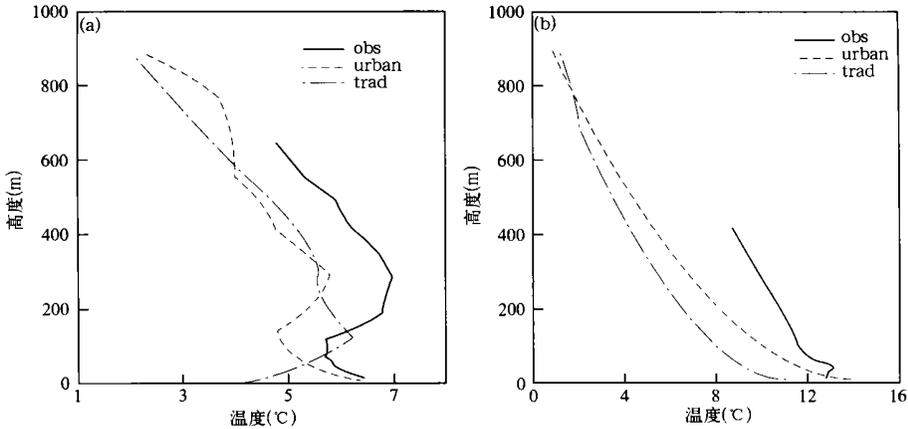


图3 市区点不同时间温度廓线、模拟结果与观测结果的比较
(a. 28日02时, b. 28日14时)

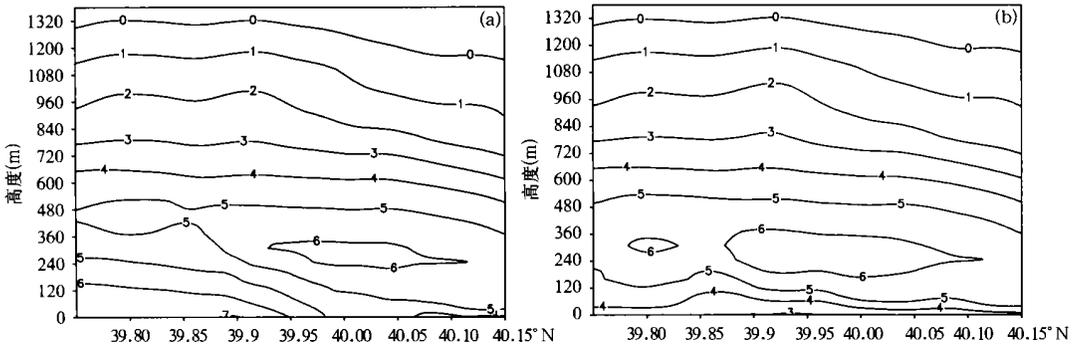


图4 urban试验和trad试验模拟出的28日02时温度垂直结构
(a. urban试验, b. trad试验)

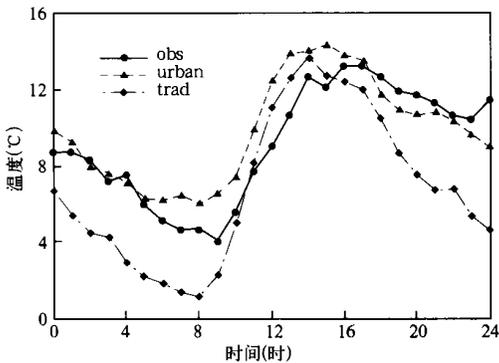


图5 28日00~24时天安门自动气象站温度模拟结果与观测值的日变化特征比较

5.1.2 近地层温度的比较

图5给出了28日00~24时两个试验所模拟出的市区点(天安门)近地面层温度日变化特征与观测结果的对比分析,可以看出,urban试验在28日夜间00时至清晨08时及午后14时至夜间24时这两个时间段所模拟的市区温度变化与观测结果十分接近;而trad试验在这两个时间段的模拟结果则明显比观测结果偏低,其中,在夜间尤为明显,最高偏差可低6.8℃。

图6给出了28日00~24时两个模拟试验所计算出的北京城市热岛的日变化特征与自动气象站

观测结果的对比分析。可以看出,在观测结果中,北京市区和郊区存在着明显的城市热岛效应,并有着夜间和清晨强(其基本强度在 2.5 °C 以上,最高达到 3.1 °C)、白天弱,以及从下午开始城市热岛明显加强的日循环演变日变化特征;在模拟试验中,urban 试验模拟出的城市热岛强度及其变化特征,虽然在量值上存在着一些小偏差,但总的来说,其模拟结果与观测值比较接近,大体上可以体现出与观测结果相近的日变化特征,如夜间热岛强度最大、白天热岛强度较低,且出现小波动变化以及从下午 16 时开始城市热岛强度逐渐加强等特征;而 trad 试验模拟出的城市热岛日变化特征与观测结果几乎相反,并且其模拟出的城市热岛强度,特别是夜间的热岛强度基本上是小的负值,这与观测结果相差很大。这表明,相对与 MM5 模式中原有表示城市作用的方案而言,UCP 方案可以明显地提高 MM5 模式对城市热岛及其变化特征的模拟能力。

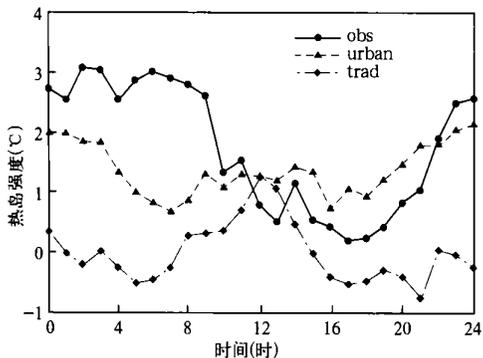


图 6 28 日 00~24 时城市热岛日变化特征的模拟结果与观测结果比较

5.2 风场的比较

图 7 给出了市区点(方庄)在 28 日 04 时水平风速廓线的模拟结果与观测结果的比较。与观测结果相比,在低层 200 m 内的高度内(大约在城市粗糙副层的范围内),urban 试验模拟出的风速廓线与观测结果比较接近;而 trad 试验的模拟结果则比观测结果和 urban 试验的模拟结果均大。这表明,在 MM5 模式中采用能够实际体现建筑结构对大气动力结构影响的 UCP 方案是可以提高模式对城市低层大气动量结构的模拟能力。

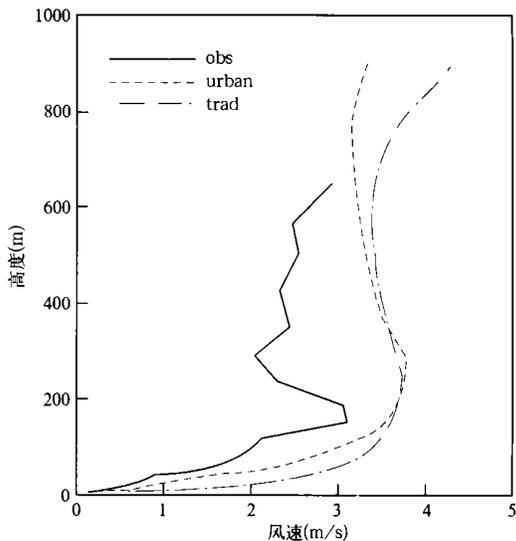


图 7 28 日 04 时市区点(方庄)水平风速廓线的模拟结果与观测值的比较

图 8 给出了 urban 试验及 trad 试验模拟得到的 28 日 14 时近地面层(大约 5 m 高度上)的水平风

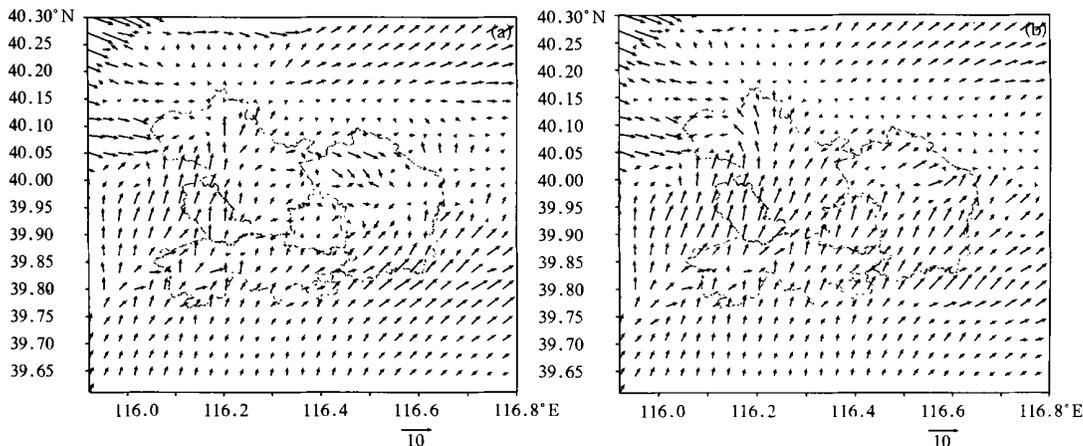


图 8 模拟的 28 日 14 时近地层风场水平分布 (a. urban 试验, b. trad 试验)

场。可以看出, urban 试验中的气流在通过市区时有明显的减速现象, 该特征在其它时段如 02, 08, 20 时(图略)上也有同样的现象, 并在处于下风方向的朝阳地区还出现了风场的辐合; 相比而言, 只用粗糙度来体现城市动力摩擦作用的 trad 试验, 其模拟结果则没有体现出风速在市区减速及风场辐合特征。这也进一步说明, MM5-UCP 模式是可以较成功地模拟出由于城市结构对边界层低层风场所产生的影响。

5.3 湍流动能的模拟结果比较

城市建筑结构和下垫面特征对城市大气湍流特征的影响可以通过湍流动能的强度来表示。图 9 给出了 urban 试验和 trad 试验在 28 日 02 时与 14 时经过 116.4°E 湍流动能南北向垂直结构的模拟结果。可以看出, 在夜间 02 时, urban 试验中的北京市区上空存在着明显的湍流动能的大值区, 其变化特征是在城市冠层内湍流动能随高度增加, 在城市冠层顶大约 60 m 作用的高度达到最大值。该特征虽然没有得到北京地区的实际湍流动能观测资料来进行验证, 但与 Kastner 等^[27]利用风洞试验所得到的结果以及 Uno^[19]对夜间城市边界层数值模拟工

作中所发现的在城市冠层顶出现湍流动能极大值的结论基本相同。因此, 可以认为这种模拟结果是合理的、能够反映北京城市夜间大气湍流的特征。此外, urban 试验还模拟出了市区与郊区、农村湍流动能的结构差异, 即市区的湍流动能大于郊区和农村, 其中, 郊区和农村的湍流动能均表现为在低层较大、随高度呈递减趋势的变化特征。而 trad 试验则没有出现市区城市冠层顶上存在湍流动能的极大值特征, 并且湍流动能的值也非常小。

在正午 14 时, 由于城市下垫面结构的热力作用很强, 因此, urban 试验和 trad 试验模拟出的市区上空湍流动能的垂直结构形式大致相同, 其影响范围也比较接近, 但是, 在湍流动能的强度上, urban 试验要大于 trad 试验。我们认为 urban 试验的模拟结果是比较合理的, 也是符合实际的, 因为, 从前文对城市温度的模拟结果可以发现, trad 试验相比于观测和 urban 试验来说, 对城市温度的模拟结果总的趋势是过低, 这就使得决定湍流动能的重要因素之一—浮力项的量值偏小, 加之没有考虑城市建筑对湍流动能的影响, 所以, 这就可能造成 trad 试验模拟的城市边界层湍流动能值较低。

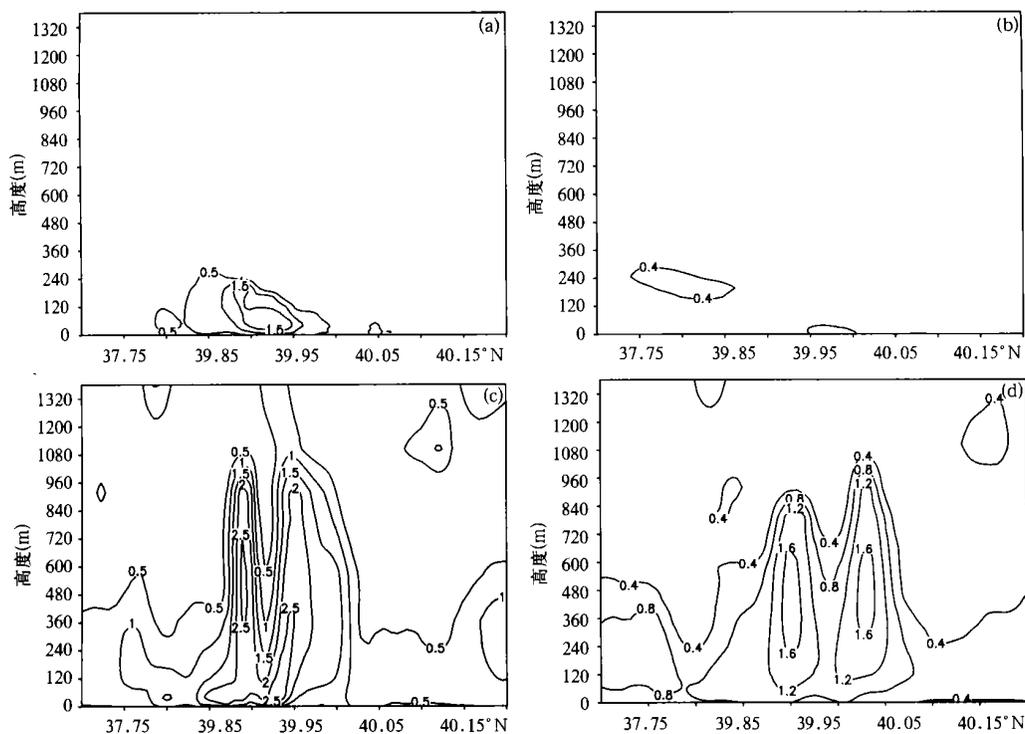


图9 urban 试验和 trad 试验模拟湍流动能南北向垂直剖面
(a, c 分别为 28 日 02 和 14 时 urban 试验; b, d 分别表示 28 日 02 和 14 时 trad 试验)

6 小结和讨论

本文从实际城市冠层结构对城市大气影响的物理机制出发, 结合 MM5 模式的中尺度构造特点改进和设计出既能够较全面、细致地描述城市化作用对大气边界层动力、热力结构的影响, 又适合中尺度模式结构特点的城市冠层参数化方案。该方案主要从以下几个方面考虑了城市的作用:

(1) 根据实际城市下垫面的接过特点, 确定能够体现其作用的各种城市特征参数, 以全面、合理地体现城市对大气的影响;

(2) 根据城市冠层中湍流动量通量的变化特征, 修改了传统的近地层常值通量相似理论, 同时, 还考虑了城市冠层中建筑结构对大气动量和湍流动能的“曳力强迫”作用。在计算城市湍流动能时, 还考虑了城市建筑对长度尺度的影响;

(3) 考虑了城市冠层中非常值通量的湍流热量通量的影响、城市冠层中净辐射通量的垂直变化及随时间变化的人为热量通量等因素对大气热力结构的影响;

(4) 针对中尺度模式结构特点, 充分地考虑了城

市建筑及人为热量对城市地面能量收支平衡的影响。

模拟试验的对比分析也表明: MM5-UCP 模式不仅成功地模拟出了与观测结果相符合的北京城市边界层热力结构特征, 如城市热岛效应及其日变化特征、市区夜间出现的悬浮逆温结构以及市区和郊区的温度垂直结构差异等特征, 同时, 也成功地模拟出了城市近地层风场和湍流动能的城市边界层动力结构特征, 而采用原城市作用方案的 MM5 模式则基本上不能够模拟出上述城市边界层结构特征。这表明, 本文设计的 UCP 方案是合理、有效的, 并在很大程度上提高了 MM5 模式对城市边界层结构的模拟能力。

需要指出的是, 由于缺乏城市能量状况的观测资料, 没有进行 UCP 方案对城市能量模拟结果的对比和验证分析, 这项工作有待于将来通过这类详细的观测试验资料来进行验证和完善。

致谢: 衷心感谢美国 New Mexico 州 Los Alamos National Laboratory 的 Brown 先生提供他的城市冠层参数化方案的介绍, 法国 Ecole Centrale de Nantes 的 Dupont 博士为城市冠层参数化方案与 MM5 模式的耦合所提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126(564): 941~ 990
- 2 Bomstein R D. Two-dimensional URBMET urban boundary layer model. *J Appl Meteor*, 1975, 14(8): 1459~ 1477
- 3 Yoshikado H. Numerical study of daytime urban effect and its interaction with sea breeze. *J Appl Meteor*, 1992, 31(10): 1146~ 1164
- 4 Hjelmfelt M R. Numerical simulation of effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion: simulation of urban vs non-urban effects. *J Appl Meteor* 1982, 21(9): 1339~ 1257
- 5 Seaman N L, Ludwig F L, et al. Numerical studies of urban planetary boundary-layer structure under realistic synoptic conditions. *J Appl Meteor*, 1989, 28(8): 760~ 781
- 6 Khan S M, Simpson R W. Effect of a heat island on the Meteorology of a complex urban airshed. *Boundary-Layer Meteor*, 2001, 100(4): 487~ 506
- 7 Troude F, Dupont E, Carissimo B. Mesoscale meteorological simulation in Paris: Comparisons with observation during the experiment ECLAP. *Boundary-Layer Meteor*, 2001, 99(1): 21~ 51
- 8 Kanda M, Inoue Y. Numerical study on cloud lines over an urban street in the Tokyo. *Boundary-Layer Meteor*, 2001, 98(2): 251~ 273
- 9 Baklanov A, Rasmussen A, Fay B. Possibilities and shortcomings of NWP models to provide meteorological data for UAP forecasting. *Proceedings of Urban Air Quality Conference*, Louraki Greece. 2001
- 10 Brown M J, Williams M D. An urban canopy parameterization for mesoscale meteorological models. *Proceedings of the AMS Conference on 2nd Urban Environment Symposium 2-7 november, Albuquerque, NM, Amer Meteor Soc*, 1998, 144~ 147
- 11 Masson Valery. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteor*, 2000, 94(2): 357~ 397
- 12 Martilli A, Clappier A, Rotach M W. A urban surface exchange parameterization for mesoscale models. *Boundary-Layer Meteor*, 2002, 104(2): 261~ 304
- 13 徐祥德. 城市化环境带污染模型动力学问题. *应用气象学报*, 2002. 13(特刊): 1~ 12
- 14 Raupach M R, Shaw R H. Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Boundary-Layer Meteor*, 1982, 22(1): 79~ 90
- 15 Rotach M W. Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds stress. *Boundary-Layer Meteor*, 1993, 65(1): 1~ 28

- 16 Feigenwinter C, Vogt R, Parlou E. Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy. *Theor Appl climat*, 1999, 62(1): 51~ 63
- 17 Rafailidis S. . Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town . *Boundary- Layer Meteor*, 1997, 85(2): 255~ 271
- 18 Haan Peter De, Rotach Mathias W, Werfeli Maja. Modification of an operational dispersion model for urban applications. *J Appl Meteor*, 2001, 40(5): 864~ 879
- 19 Uno I, Ueda H. Numerical modeling of nocturnal urban boundary layer. *Boundary- Layer Meteor*, 1989, 49(1): 77~ 98
- 20 Yamada T. A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *J Meteorol Soc, Japan*. 1982, 60(1): 439~ 454
- 21 Taha Haider. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage : a bulk- parameterization approach. *J Appl Meteor*, 1999 , 38(3): 466~ 473
- 22 Zhang Dalin , Anthes Richard A. A high- resolution model of planetary boundary Layer- Sensitivity tests and comparisons with SESAME- 79 data, *J Appl Meteor*, 1982, 21(4): 1594~ 1609
- 23 Raupach M R. Drag and drag partition on rough surfaces. *Boundary- Layer Meteor*, 1992, 60(3): 375~ 395
- 24 Grimmond C S B, Oke T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form . *J Appl Meteor*, 1999, 38(9): 1262~ 1292
- 25 卞林根, 程彦杰, 王欣等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 13~ 25
- 26 高志球, 卞林根, 逮昌贵等. 城市下垫面空气动力学参数的估算. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 26~ 33
- 27 Kastner Klein , Rotach M W. Parameterization of wind and turbulent shear stress profiles in the urban roughness layer, *Third Int. Conf. On Urban Air Quality*, 2001, Loutraki, Greece.

THE DESIGN OF URBAN CANOPY PARAMETERIZATION OF MM5 AND ITS NUMERICAL SIMULATIONS

Li Xiaoli He Jinhai

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Bi Baogui Li Zechun

(*National Meteorological Center, Beijing 100081*)

Wang Xin

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Based on some advanced urban parameterizations for mesoscale model, a urban canopy parameterization (for abbreviation UCP) is developed, in which the effect of urban infrastructure and anthropogenic activity on UBL and rational representation of urbanization in mesoscale model are considered. UCP takes into account following processes of urban: (1) according to the characteristic of real urban underlying surface, all kinds of urban surface parameter in UCP are presented to embody comprehensively the effect of urban on atmosphere; (2) in dynamical effect of urban on atmosphere, traditional surface layer similarity theory is modified to consider characteristic of non-constant turbulent momentum flux in urban canopy, and also consider drag force of building on momentum and turbulent kinetic energy (TKE), meanwhile the effect of urban building on turbulent length scale is taken into account in TKE calculation; (3) in thermal effect of urban on atmosphere, the effect of non-constant turbulent heat flux in urban canopy is not only considered, but vertical change of net radiation flux and anthropogenic heat flux versus time are considered; (4) in urban surface energy budget, the effect of urban canopy on surface radiation balance and anthropogenic heat flux are involved based on characteristic of mesoscale model.

The UCP is implemented in MM5 by modifying memory module, I/O module including nest structure, Geyno-Seaman PBL scheme and SLAB surface scheme. With requirement and foundation of atmospheric study in Beijing area, MM5 coupled UCP (for abbreviation MM5-UCP) is validated and compared with IOP observation and automatic meteorological station data to verify its capability to simulate urban atmosphere. The results illustrate that UCP versus traditional urban parameterization in MM5, it can make MM5 reproduce main characteristic of winter UBL in Beijing, which include urban heat island and its diurnal evolution, nocturnal elevated inversion in downtown area, and some dynamic structure such as TKE peak at the top of urban canopy, lower wind speed in urban surface layer and so on. Consequently, MM5-UCP can be used to study furtherly the characteristic and formation of UBL in Beijing area.

Key words: MM5 model, Urban boundary layer, Urban canopy parameterization.