

北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究^{* 1}

李晓莉 毕宝贵 李泽椿

(国家气象中心, 北京, 100081)

摘 要

利用耦合了城市冠层参数化方案的 MM5 模式对 2001 年冬季北京地区一次典型的城市边界层过程进行成功模拟的基础上, 对北京城市化作用、周边地形以及城市化进程发展对城市边界层结构的影响等问题进行了一系列的数值模拟试验。城市化作用的因子分离试验发现, 城市化的总体作用即城市下垫面结构对大气热力及动力的综合影响导致了北京冬季城市边界层结构主要特征的形成。此外, 揭示了城市结构的不同影响因子——动力因子、热力因子和热动力因子间的相互作用在北京冬季城市边界层结构形成和演变过程中的不同作用。在夜间, 城市结构的动力因子对于城市边界层主要特征如市区悬浮逆温、近地层中小的风速及较强的湍流动能等的形成起着主导作用; 在白天, 城市结构的热力因子则成为影响市区混合层强度以及湍流运动特征等边界层结构的主导因素; 热、动力因子间的相互作用对城市边界层结构的形成和演变也有着重要作用, 但其影响特征比较复杂。北京周边地形作用的敏感性试验的结果表明, 北京周边的特殊地形条件对城市边界层热力结构特征如悬浮逆温层及城市热岛等的结构及分布特征的形成也有着明显的影响, 使其具有特殊的局地化特征, 同时, 它也是北京地区近地层主要气流特征的强迫源。不同城市化程度的敏感性试验结果揭示, 随着北京城市建筑高度和密度的增加, 市区风速将减小、湍流动能将加强, 夜间城市悬浮逆温层底的高度会有所提高, 城市热岛的强度也将加强, 并可能在白天出现比较明显的城市热岛效应。

关键词: 城市边界层, 城市冠层参数化方案, 模拟试验。

1 引 言

在城市边界层的垂直结构中, 从地面到建筑顶这段距离的近地层被称为城市冠层^[1]。在该层中, 城市下垫面的结构如城市建筑结构、城市地面构成的非均匀性以及人为活动等因素不仅直接影响城市大气的动力、热力结构特征及地面净辐射收支状况, 同时, 还通过大气湍流扩散过程和局地环流的作用进一步影响到城市粗糙副层、甚至更高层的大气结构, 并由此形成了一些城市边界层结构中所特有的重要特征, 如城市热岛、市区夜间的悬浮逆温层结构、相对于农村和郊区城市近地层中较小的风速和较强的湍流动能等特征。近年来, 随着经济的快速发展, 北京城市化进程的速度不断加快, 其对北京城市边界层结构及大气环境污染的影响等问题日益受到人们的重视。对冬季北京城市边界层研究工作而

言, 过去基于观测资料的分析研究工作^[2~7], 以及利用模式而开展的数值研究^[8~9]均取得了许多有意义的结果。然而, 由于受资料、观测方法以及模式中城市下垫面作用参数化方案的不足等诸多因素的限制, 使得对北京城市大气边界层的动力、热力结构的形成及其变化规律物理机制的认识上仍然存在着一些亟待深入认识的问题, 如市区夜间经常出现的悬浮逆温层的形成机制、城市边界层中湍流运动特征的形成及演变、以及北京周边特殊地形对城市边界层结构的影响等。

城市冠层中建筑结构和人为活动对边界层大气特征的影响主要体现在动力和热力两个方面, 其中, 动力影响因子主要是建筑物对气流的拖曳及摩擦作用, 热力影响因子主要表现为街道峡谷中的建筑物结构对城市表面能量收支的影响及城市中人为热量在大气中的释放等。一些外场观测和数值研究都表

* 初稿时间: 2004 年 1 月 15 日; 修改稿日期: 2004 年 7 月 15 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”。

作者简介: 李晓莉, 女, 1972 年生, 博士, 主要从事城市边界层数值研究和中尺度集合预报研究。

明这两个因素均会对城市边界层结构的形成产生影响。此外,动力因子和热力因子之间的非线性相互作用对城市边界层结构的影响也是不能忽视的。因此,采用包括详细城市作用参数化方案的数值模式是详细地分析这些因子对北京冬季城市边界层结构影响的重要工具和前提条件。

在文献[10]中发展了一个城市冠层参数化方案并将其与 MM5 模式耦合(简称 MM5-UCP 模式),并对 BECAPEX^[11] 试验期间一个比较典型的冬季城市边界层过程热力及动力结构特征进行了成功的模拟。为此,本文将继续针对该个例,在 MM5-UCP 模式的基础上,采用一种能有效分离模式中不同因子作用的因子分离技术来研究北京城市结构的不同影响因子在冬季北京城市边界层主要特征形成及演变过程中的作用。此外,为了进一步提高对北京城市边界层结构特征形成和演变物理机制的认识,考虑到北京地理条件的特殊性,通过数值试验研究了地形条件与城市化作用在城市边界层结构特征形成中的相对作用,同时,还通过改变城市化规模的敏感性试验探究了北京城市化进程的发展对边界层结构的影响。

2 MM5 模式 UCP 方案

我们发展的 UCP 方案主要是针对中尺度模式 MM5 在应用于实际城市大气研究时(水平分辨率 1~3 km),需要体现城市冠层中详细的城市下垫面结构对大气影响作用的客观需要而发展的。在 UCP 方案中,城市被描述成具有不同高度建筑、不同水平构成成分的下垫面。相比于 MM5 模式中原有的利用粗糙度和土壤热力性质来体现城市下垫面作用的传统方案来讲,UCP 方案的主要特点:

(1) 根据城市冠层中建筑物分布和下垫面构成非均匀性的实际结构特点,利用高分辨率的城市下垫面地理信息资料,重新确定了能够体现其作用的各种城市特征参数如城市外形参数、地面动力及热力参数等。

(2) 针对城市下垫面对大气动力结构的影响,UCP 方案利用城市局地摩擦速度来体现城市冠层中随高度变化的动量通量,同时还考虑了不同高度的建筑结构对动量和湍流动能的“曳力强迫”作用。

(3) 针对城市下垫面对大气热力结构的影响,UCP 方案考虑了城市冠层中净辐射通量变化,以及以城市地面构成成分为函数、且有日变化特征的人为热量的贡献。

(4) 在对城市地面能量收支的处理中,除了考虑城市地面构成非均匀性对能量平衡的影响外,UCP 方案还考虑了城市冠层中净辐射通量以及人为热量对地面能量收支的影响。

3 城市结构作用的因子分离试验

3.1 模拟个例的选取

2001 年 2 月 27~28 日北京地区的天气条件非常有利于研究北京冬季城市边界层结构特征,另外,在文献[10]中,曾经利用这两天的边界层集中观测资料及自动气象站的资料检验了 UCP 方案 MM5-UCP 模式对北京城市边界层结构的模拟能力,结果表明,相对于 MM5 模式中原有的城市作用的参数化处理方案而言,MM5-UCP 模式能够较成功地模拟出与观测结果相符的北京冬季城市边界层的热力及动力结构特征,如城市夜间的悬浮逆温层结构、城市热岛效应及近地层的风场和湍流动能的结构特征。为此,本文继续以该个例作为研究对象,利用 MM5-UCP 模式来深入地探讨城市结构在边界层结构特征形成和演变过程中的作用。

3.2 模拟试验方案

Stein 等^[12]利用数值模式进行敏感性研究时,曾提出一种能够全面确定不同因子作用的因子分离技术,该技术可以简便、有效地分离出影响大气状态的不同因子以及各种因子之间非线性相互作用的影响。Martilli^[13]利用这种因子分离技术研究了在典型欧洲城市结构下城市对边界层气流的影响,发现了一些有意义的结果。本文也将采用这种技术来研究北京实际城市下垫面结构的动力因子、热力因子及这两个因子间非线性相互作用在城市边界层结构形成中的作用。该因子分离技术的基本原理是:

假设变量 f 依赖于 n 个因子 $\Psi_i (i=1, 2 \cdots n)$, 每个因子乘以系数 c_i , 则 f 可以表示为 $f = f(c_1, c_2 \cdots c_n)$, 通过类似于泰勒级数的展开式对 f 进行分解

$$f(c_1, c_2 \cdots c_n) = \hat{f}_0 + \sum_{i=1}^n \hat{f}_i(c_i) + \sum_{i,j=1,2}^{n-1,n} \hat{f}_{ij}(c_i, c_j) + \sum_{i,j,k=1,2,3}^{n-2,n-1,n} \hat{f}_{ijk}(c_i, c_j, c_k) + \cdots + \hat{f}_{123 \cdots n}(c_1, c_2, c_3 \cdots c_n) \quad (1)$$

式(1)中, $\hat{f}_0$ 表示 f 变量不考虑 n 个因子时的参考值, $\hat{f}_i$ 为变量 f 中单个因子 c_i 的作用, $\hat{f}_{ij}$ 是 2 个因子之间相互作用的贡献, $\hat{f}_{ijk}$ 是 3 个因子相互作用的

贡献,依此类推。系数 $c_i (i=1,2\cdots n)$ 的值取为 0 或 1,当系数 c_i 为零时,则依赖于它的因子的 $\hat{f}$ 值为零。 f_{ij} 是 $c_i=c_j=1$ 而其他系数都为零时的模拟值。为简便起见,现只考虑变量 f 依赖于 2 个因子的情况,则式(1)变为

$$f_0 \equiv f(0,0) = \hat{f}_0 \quad (2)$$

$$\hat{f}_i = \hat{f}_i + \hat{f}_0 \quad (i=1,2) \quad (3)$$

$$f_{12} = \hat{f}_{12} + \hat{f}_1 + \hat{f}_2 + \hat{f}_0 \quad (4)$$

方程(2)~(4)通过递归消元法求出因子 $\hat{f}$ 的解

$$\hat{f}_0 = f_0 \quad (5)$$

$$\hat{f}_1 = f_1 - f_0 \quad (6)$$

$$\hat{f}_2 = f_2 - f_0 \quad (7)$$

$$\hat{f}_{12} = f_{12} - (f_1 + f_2) + f_0 \quad (8)$$

因此,要分析北京城市冠层中城市下垫面结构的动力因子、热力因子及这两因子间非线性相互作用的影响,需要设计 4 个数值试验(表 1)。其中,Urb_m 试验的结果相当于式(8)中 $\hat{f}_{12}$;Urb_m 试验的结果相当于式(8)中 $\hat{f}_1$;Urb_t 试验的模拟结果相当于式(8)中 $\hat{f}_2$;Rural 试验的结果相当于式(8)中 $\hat{f}_0$ 。

表 1 试验方案

Table 1 Simulation schemes

试验	方案描述
Urban	利用 MM5-UCP 模式的模拟试验,在 UCP 方案中考虑城市结构对大气热量、动量、湍流动能及地面能量平衡方程的影响
Urb_m	在 MM5-UCP 模式的 UCP 方案中,只考虑城市结构对大气动量、湍流动能的影响
Urb_t	在 MM5-UCP 模式的 UCP 方案中,只考虑城市结构对大气热量及地面能量收支的影响
Rural	利用不包括 UCP 方案的 MM5 模式,将北京城市区域中所有的格点取为农村下垫面特征,其中农村下垫面参数的取值见表 2

表 2 Rural 试验中下垫面参数的取值

Table 2 Parameters of land use in the 'Rural' experiment

反照率 (%)	有效饱和率 (%)	比辐射率 (%)	热惯性 (cal/(cm ² K ^{1/2} s ^{1/2}))	粗糙度 (m)
21	50	92	0.05	0.10

3.3 试验结果分析

文中仅选取 2 月 28 日 02,08,14,20 时 4 个时次第 3 重区域的计算结果(1 km)来分析城市结构的不同因子在城市边界层结构形成和演变过程中的作用。

3.3.1 夜间结果分析

(1) 对温度的影响

在文献[10]中,利用 MM5-UCP 模式模拟出了

上述模拟试验采用三重嵌套区域,格距分别为 9,3,1 km,对应的水平网格点为 63×63,79×73,79×73,网格的中心点为(39.96°N,116.35°E)。垂直层次取为 31 层(1500 m 以下,模式的垂直层次取 21 层)。模拟的时间从 2 月 27 日 08 时(北京时,以下同)至 3 月 1 日 00 时。对于模式的初始条件,是以 T106 谱模式的分析场作为背景场,除了利用常规探空和每隔 3 h 的地面加密观测资料进行客观分析之外,还利用了相应时次 BECAPEX 试验的边界层廓线资料以体现北京局地大气的信息。各种城市外形参数及地面特征参数是利用北京地区 500 m 分辨率、7 种分类的城市下垫面资料和 200 m 分辨率的市区建筑高度资料来得到的。

基于上述 4 个模拟试验,本文将详细分析城市结构以下几个方面的作用:(1)由 Urban 试验模拟结果减去 Rural 试验模拟结果得出城市结构的总体作用(简称“总体作用”);(2)由公式(6)计算的城市结构的动力因子作用(简称“动力因子”);(3)由公式(7)计算的城市结构的热力因子作用(简称“热力因子”);(4)由公式(8)计算出的城市结构的动力因子与热力因子之间的非线性相互作用(简称“因子间相互作用”)。

与观测结果相吻合的 2 月 28 日 02 时市区点的温度廓线(图略),即在贴近地面大约 100 m 的层次中,温度呈混合结构,在此混合层之上到约 300 m 的高度,是逆温层结构。本文将从因子分离的角度进一步揭示市区这种特殊的温度垂直结构的形成机制。图 1a 和 b 给出了 02 时市中心点(39.92°N,116.38°E)分别在城市总体作用、动力因子、热力因子以及因子间

相互作用影响下的温度廓线。

城市结构的总体作用对边界层热力结构的影响范围主要在 360 m 以下,其主要特征是在近地面 120 m 以下对温廓有正作用,再向上到 200 m 左右的高度呈现出随高度增加的负作用,在此高度之上负作用又随高度减小,表现为悬浮逆温结构。上述影响特征与观测结果中的市区低层为混合层,120 m 高度上出现悬浮逆温层的现象基本一致,这不仅再一次验证了 MM5-UCP 模式可以成功地再现城市边界层的夜间热力结构,同时也证实了北京的城市结构在很大程度上改变了原有自然下垫面上大气边界层的热力结构,并形成了市区特殊的夜间温度结构特征——悬浮逆温层结构。进一步分析城市的不同因子及因子间相互作用在上述边界层结构特征形成中的作用(图 1b),可以发现,不同因子的作用是不同的,其中热力因子从地面到 360 m 的范围内均为正影响,这将有利于低层温度混合层的形成。动力因子影响下的温度结构与城市结构总体作用下温度结构非常相似,也是在低层正作用之上,大约 200 m 高度上出现了悬浮逆温层结构,这说明动力因子可能是市区夜间悬浮逆温层形成的主导因素,该结论不仅与 Uno 等人^[14]所发现的城市建筑产生机械动力作用对于夜间城市悬浮逆温形成有重要作用的结论相同,也将在下面对湍流动能结构影响的分析中得到进一步证实。需要指出的是,在低层 40 m 以下动力因子的正作用超过了热力因子,这可能与试验期间风速条件有关,Martilli^[13]曾通过在二维理想城市区域上的模拟试验发现,不同风速条件下同一影响因子如热力因子或动力因子对近地面几十米内温度结构的影响程度不同。此外,我们发现因子间相互作用对于低层混合层和悬浮逆温层的形成中也有一定的作用。

(2) 对大气湍流动能的影响

城市结构的总体作用使得 240 m 以下高度内大气湍流动能加强(图 1c),具体表现为在城市冠层高度 60 m 以下,湍流动能的强度是随高度而增加的,并在城市冠层顶达到最大值,然后向上逐渐减小。这种特征与 Kastner Klein 等^[15]通过风洞试验模拟得到的在城市冠层顶出现湍流动能极大值的现象基本相同,同时也表明了北京城市结构对大气湍流结构的影响特征。进一步分析城市的不同因子在该湍

流动能结构形成中的作用(图 1d),可以发现,动力因子对湍流动能结构的正贡献最明显,其作用下的城市湍流动能结构与在城市总体作用影响下的湍流动能结构非常接近;因子间相互作用对城市近地层强的湍流动能特征形成的影响也很显著,特别是在 150~200 m 的高度内,其正贡献还大于动力因子的作用,这表明因子间的相互作用有使城市边界层高度提高的作用;热力因子的作用相对小些,这可从夜间湍流动能浮力产生项较小来进行理解。综合以上分析可以看出,动力因子可能是决定夜间城市近地层中湍流动能变化特征的主要因素,同时也可能是造成观测及风洞试验所发现的城市冠层顶出现湍流动能极大值现象的主要原因。此外,从动力因子对湍流动能结构的影响也可以进一步解释其在悬浮逆温层形成过程中的重要作用,动力因子所产生的强的湍流动能对近地面层的温度起着明显的垂直混合作用,并抑制了因地面冷却而形成的强的贴地逆温,该影响一直持续到动力因子对湍流动能影响为零的高度(大约 200 m),这基本上也是悬浮逆温层底的高度。

(3) 对风速的影响

城市结构的总体作用使得大气近地层内风速减小,并在冠层顶附近出现最强的风速减小效应,这与前面分析的城市总体作用使得冠层内湍流动能增加,在冠层顶处出现湍流动能极大值的特征有着很好的对应关系。该特征与 Roth 总结的城市大气湍流主要特征之一——城市冠层顶附近有强的切变层,动能向湍流动能转化造成高湍流强度的现象基本一致,这也表明了在北京城市近地层中存在着明显的平均动能向湍流动能的转化过程。细致地分析城市的不同因子及因子间相互作用对风速的作用,可以发现,动力因子和因子间相互作用对城市低层的水平风速有减速作用,其中,动力因子的作用尤为明显,在其影响下的城市水平风速廓线的主要特征与在前面分析的在城市总体作用下的结果非常接近,这也进一步表明了动力因子是夜间城市边界层结构形成的主导因素;热力因子在低层对城市水平风速的作用恰好相反,表现为对城市水平风速有加速的作用,其中,加速作用在接近地面处最大,向上逐渐减小,这可能是因为热力因子所造成的城区和郊区的温度差异(城市暖,农村冷)所产生的温度梯

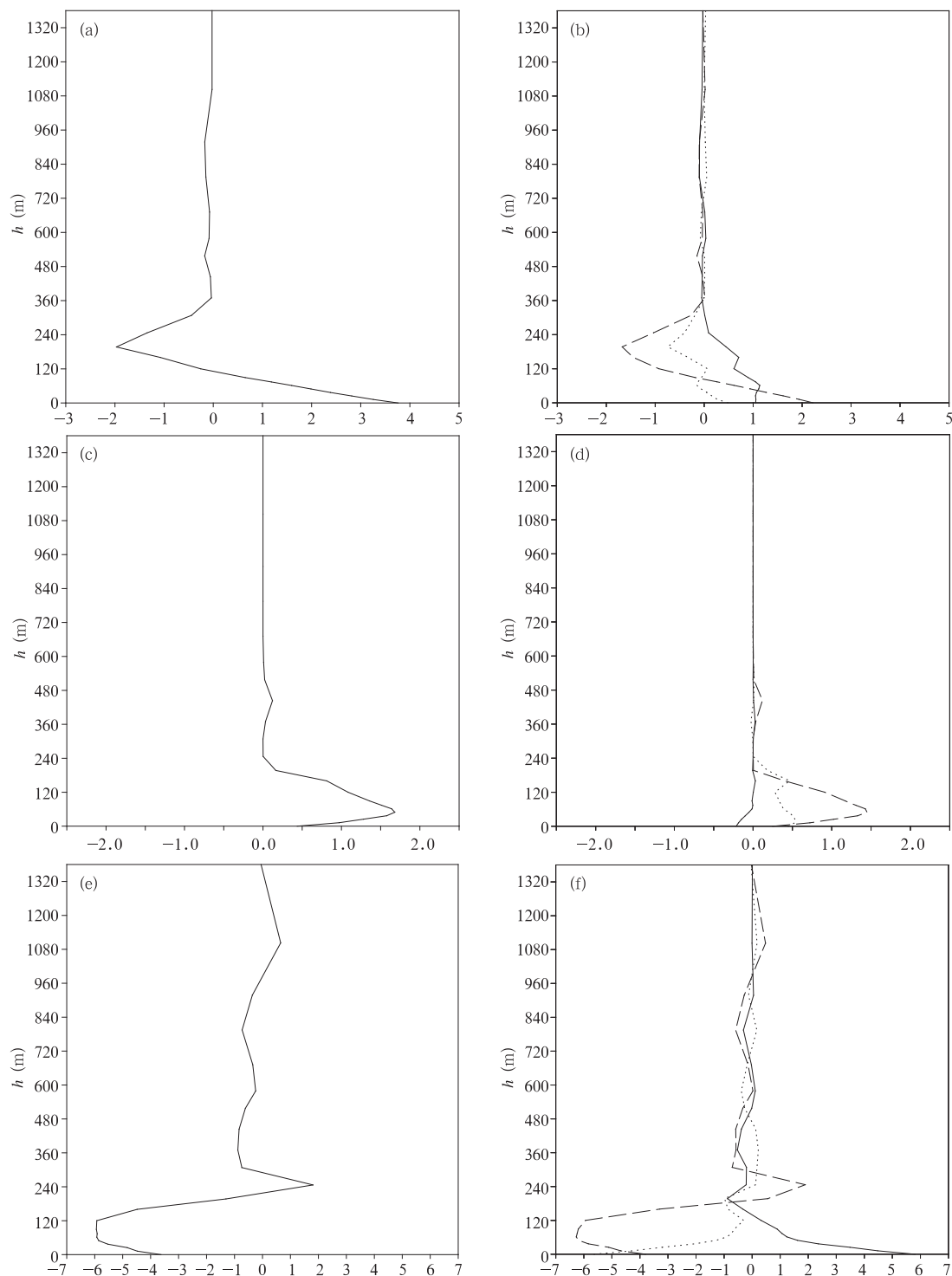


图1 2月28日02时市区点在城市结构总体作用(a,c,e)及城市结构不同因子作用(b,d,f)下的温度(a,b;单位 $^{\circ}\text{C}$)、湍流动能(c,d;单位 m^2/s^2)及水平风速廓线(e,f;单位 m/s)
(实线是热力因子,长虚线是动力因子,短虚线是因子间的相互作用)

Fig. 1 Vertical profiles of the impacts of total effect, thermal factors, mechanical factors and interactions between thermal and mechanical factors of urban infrastructure for a point at center of the urban area at 02:00BT 28 Feb (Total impacts are in (a),(c),(e) and impacts of various factors are in (b),(d),(f) for temperature,turbulent kinetic energy and horizontal wind respectively, in which solid lines are for thermal factors, long dashed lines for mechanical factors, dot lines for interaction between thermal and mechanical factors)

度,对于市区的风速有着增大作用有关。

3.3.2 白天结果分析

在 08 时,城市的总体作用(图 2a)对大气热力结构的影响与夜间相比有所加强,达到了 720 m 以上的高度。其中,正作用的影响高度为 360 m 左右,向上为负作用,负作用的悬浮逆温层结构出现在 600 m 左右高度,这比其在夜间 02 时的高度虽有所升高,但强度上却减弱。上述城市总体作用下的温度结构特征与同时次观测到的市区和郊区点温度垂直结构差异(参见文献[5]中的图 5)在边界层低层基本相同,且两者的量值也比较接近,同时,观测到

的市郊温度差异在 200 m 以上的高度也表现出一类似逆温层结构,尽管其与城市总体作用下的高度和强度值不同,但是这点可以从城市结构的总体作用的计算来进行解释,在本文中城市总体作用是由考虑城市热、动力综合作用的模拟结果减去完全没有城市作用影响的模拟结果而得出的,这与实际状态下市、郊之间的差异还有一些不同。总的看来,MM5-UCP 模式还是能够较合理的模拟出此时的城市近地层温度结构特征。

进一步分析城市不同因子对该时次温度结构的作用,可以发现,与夜间不同的是,在近地层大约

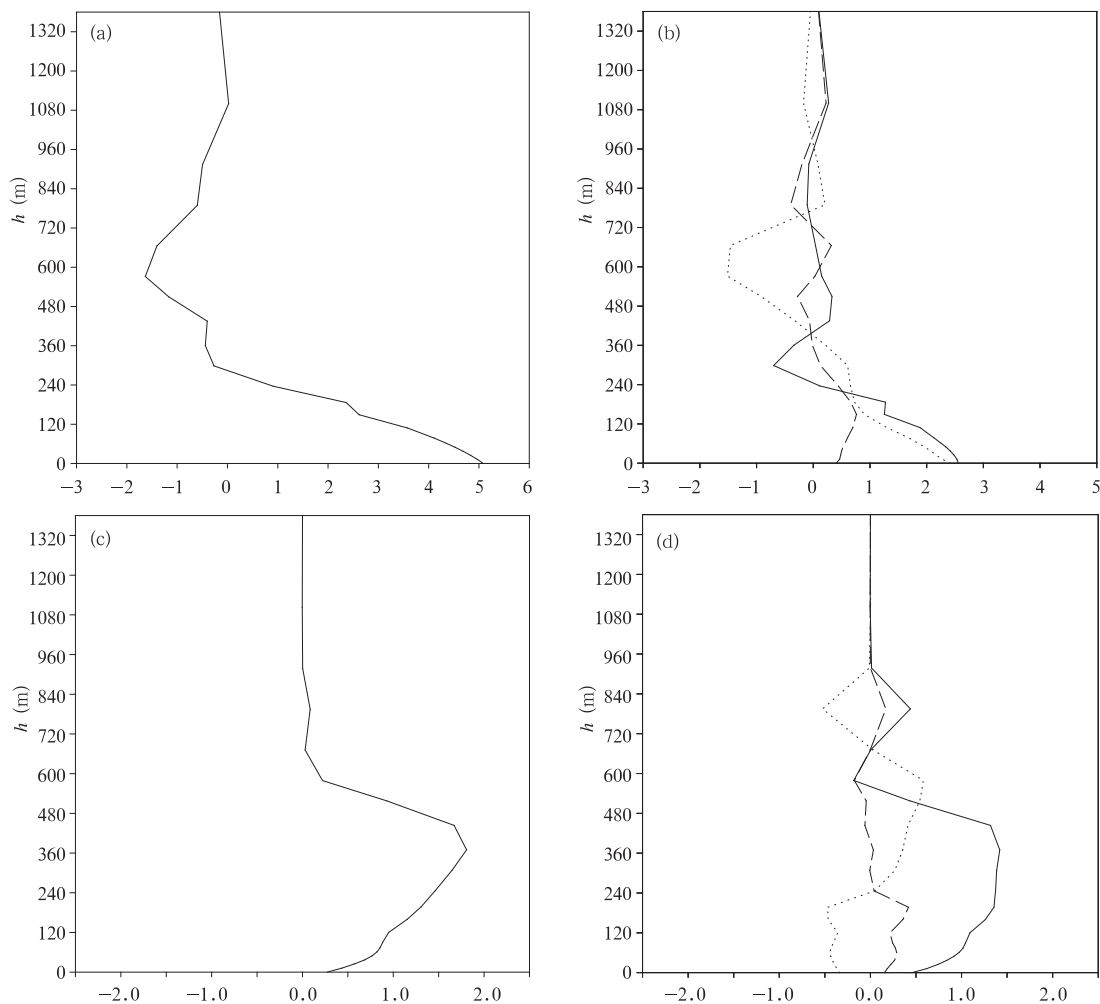


图 2 与图 1 同,但为 28 日 08 时的温度(a,b)、湍流动能(c,d)廓线

Fig. 2 Same as Fig. 1 but for temperature (a,b) and turbulent kinetic energy (c,d) profile at 8:00BT 28 Feb

240 m 以下热力因子温度的正作用最强,超过了其他两个因素的作用,这可能是由于这时城市中人为热量的释放量比夜间增大(人为热量的日变化特征是夜间弱、白天强)及城市下垫面结构的辐射热力性质使得城市表面升温较快所致。与总体作用影响下

的温度结构相比,因子间相互作用对维持市区上空逆温层结构和整个城市边界层温度结构特征有重要作用。此时,动力因子对温度影响作用相对较小,这可能与此时北京地区平均风速较小有关(观测风速大约为 0.4 m/s,模拟值为 0.8 m/s 左右),这点也

体现在其对湍流动能的影响上。

城市的总体作用在清晨对大气湍流动能的正作用比夜间有所加强,可以影响到 600 m 左右的高度(对应其对温度结构影响中的悬浮逆温层底高度)。进一步分析城市不同因子的作用,可以发现,热力因子对低层大气湍流动能的正影响作用最大,与城市总体作用的影响也最相似,这说明热力因子是此时影响近地层大气湍流特征的主要因素,这点可以从热力因子对温度结构的影响上解释,热力因子使低层大气温度增温,这就加强了湍流动能方程中浮力产生项的作用,进而影响到湍流动能的强度。因子间相互作用对此时湍流动能结构的影响特征比较复杂,在低层 240 m 以下其为弱的负作用,并有抵消热力因子和动力因子正作用的趋势,而在该高度以上又为正作用,再向上又变为负作用。

在 14 时,城市总体作用对市区温度和湍流动能的正作用影响可以达到 1000 m 左右的高度(图 3)。与清晨结果相似,热力因子的影响仍占主导地位,这很容易从白天城市结构的热力特征来理解;而因子间相互作用对温度和湍流动能结构则有明显的负作用,这就在一定程度上抵消了热力和动力因子对温度和湍流动能的加强作用。我们认为,造成该时次因子间相互作用的负作用原因之一可能是与该时次较大的水平风速有关(近地面层观测平均值约为 3.2 m/s,模拟值为 2.5 m/s),因为大风速所产生的较强的非线性温度平流不利于市区大气热量的积累。分析该时次城市对低层风速的影响可以发现,其作用结果基本上与夜间相同,主要特征也表现为城市的总体作用是使大气低层水平风速减小,其中,动力因子和因子间相互作用是决定水平风速减速效应的主要因素,而热力因子对低层水平风速的变化则是正贡献。

3.3.3 傍晚结构分析

图 4 给出了 20 时市区点分别在城市结构的总体作用及城市结构的不同因子作用下的温度、湍流动能廓线。分析发现,相比于白天,在傍晚城市总体作用对温度的正贡献已有显著减小,仅能影响到 240 m 左右的高度,再向上到 650 m 高度则为小的负贡献,其中在 480 m 以上还出现了弱的逆温层结构,这与前面分析的城市总体作用对 02 时 200 m 高度上的悬浮逆温层结构的贡献相似,只是影响高度不同,这进一步揭示了城市结构对夜间边界层热力结构形成的作用规律。

进一步比较不同因子的影响,可以发现,在低层 120 m 以下,热力因子的作用相对于白天而言,已经明显减弱,但是其量值似乎过小,这可能与城市冠层参数化方案中对城市结构的热量储存描述上存在不足有关。与总体作用的结果相比,动力因子对 480 m 以上逆温层结构的形成有着明显贡献,这点与其在夜间 02 时的作用类似,进一步说明城市结构的动力因子对夜间市区悬浮逆温层的形成有着重要作用。值得注意的是,这时因子间相互作用的贡献已由白天较强的负作用变为正作用,特别是在接近地面的几十米内,其正影响强度较大,该正作用在其对湍流动能结构的影响中也能得到体现。结合前面分析的在夜间和白天因子间相互作用对边界层结构的影响,可以进一步表明,因子间相互作用在北京城市边界层结构的形成和演变过程中确有重要作用,但其影响特征比较复杂,有时表现为加强城市结构影响的作用,有时又呈现出减弱城市结构作用的特点。这种特征可能与热力因子与动力因子的相对强弱及风速条件等因素有关,但具体原因仍需要多个代表性的个例试验来进行深入地总结和探究。

分析该时次城市总体作用下的湍流动能结构分布特征,发现其结果与深夜 02 时的情况基本相似,也是在冠层顶附近出现湍流动能的极大值,这进一步揭示了城市结构对北京夜间市区湍流动能影响的基本特征。

4 地形作用的数值试验

北京地区有着特殊的地形条件,西部和北部为海拔较高的山区,市区位于平坦的平原地区,这种独特的周边地形条件影响着北京城市的气象条件。尽管已经开展了一些关于北京地区气流特征的研究工作,但是将地形和城市化作用结合起来,分析周边地形对北京城市边界层热、动力结构特征影响的研究工作还不多见。因此,本部分工作仍就基于前文所研究的个例(2001 年 2 月 27~28 日),利用 MM5-UCP 模式,通过改变地形高度的敏感性试验来初步地研究北京地区复杂的地形条件在冬季北京城市边界层结构特征形成过程中的作用。为此,设计了以下两个模拟试验,一是表 1 中的 Urban 试验,该试验包括城市作用和真实地形状况,二是考虑城市化作用的同时,将北京周边的地形高度降低 1/2 的敏感性试验(简称“Urban_flat 试验”)。

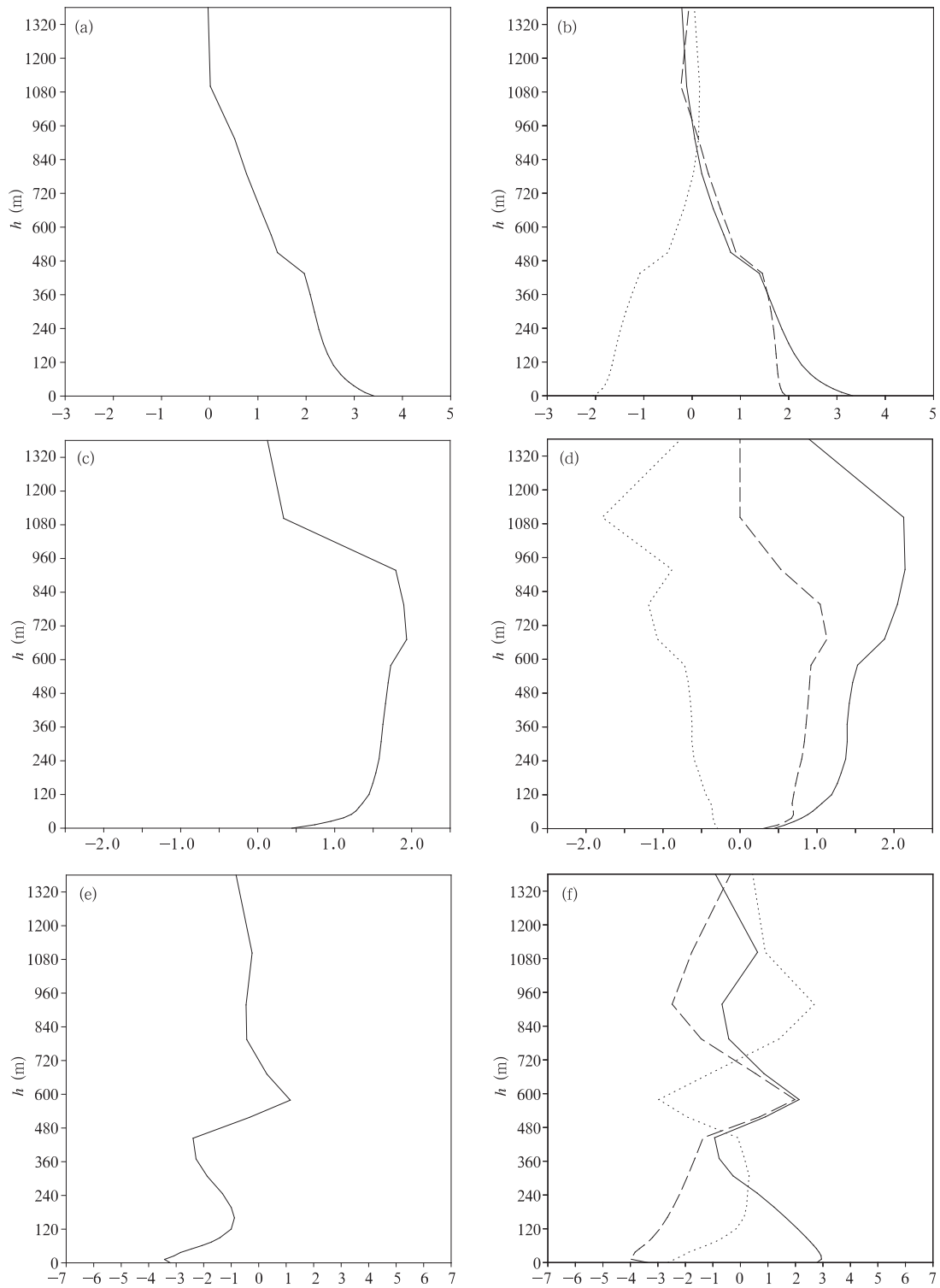


图3 与图1同,但为28日14时

Fig. 3 Same as Fig. 1 but for 14:00BT 28 Feb

4.1 温度场分析

比较近地层温度水平结构的模拟结果(图略),可以发现,两个试验计算的温度场不仅在北部和西部靠近山区的郊区有着明显的差别,在远离山区的市区及东郊、南郊也表现出不同。就市区而言,虽然

Urban_flat 试验模拟的市中心温度的量值与 Urban 试验的结果基本相同,但是其热岛分布特征以及市区高温区的范围和分布则与 Urban 试验的结果存在着较明显的差别。这说明,北京地形对市区近地层热力结构特征的形成有着一定的影响。同时,两

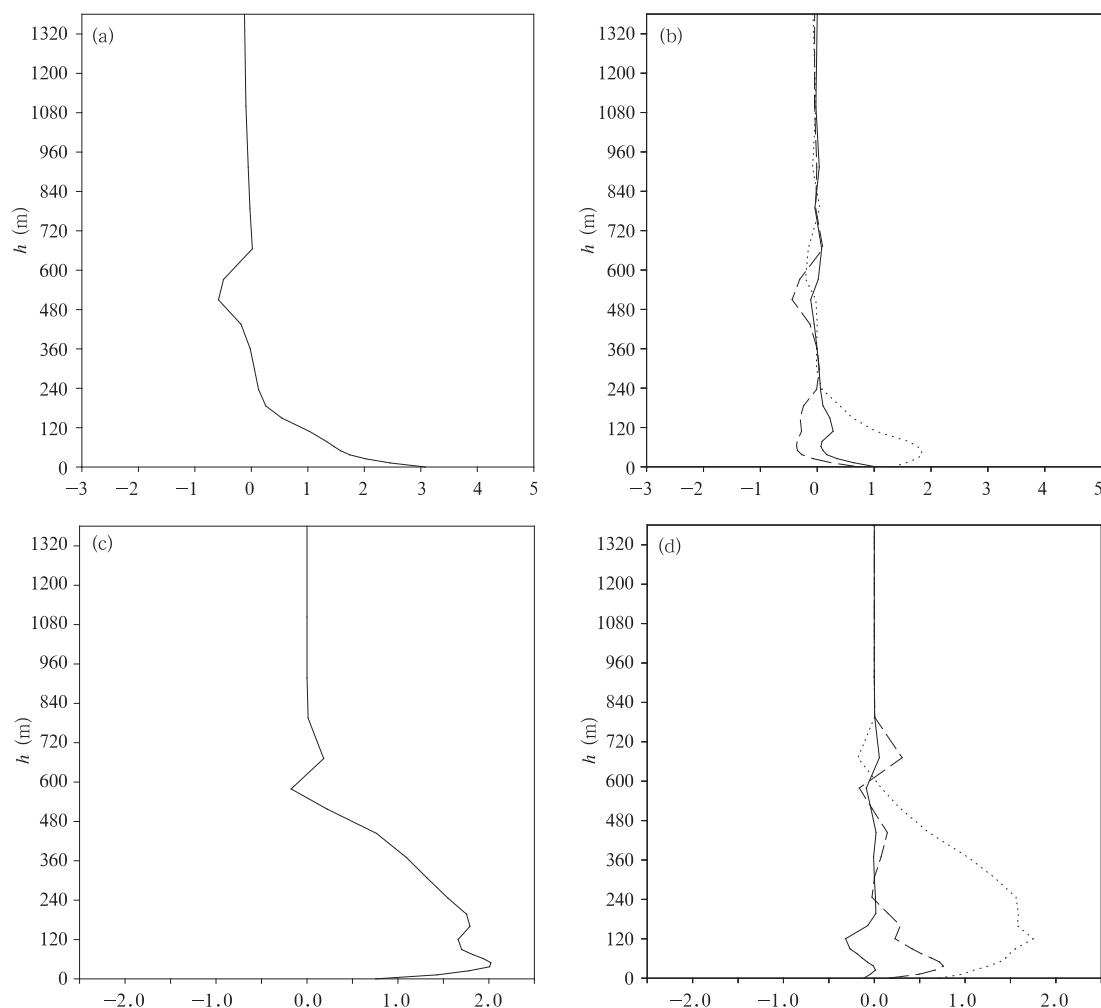


图 4 与图 2 同, 但为 28 日 20 时

Fig. 4 Same as Fig. 2 but for 20:00BT 28 Feb

个试验模拟的不同时刻的温度场垂直结构也能体现出上述特点,如在夜间 02 时,降低地形高度的 Urban_flat 试验计算出的市区上空悬浮逆温层的厚度和强度均小于 Urban 试验的结果(图略);在 08 时,两个试验的温度垂直结构差异则更为明显(图 5a 和 b),相比于 Urban 试验, Urban_flat 试验得出的市区上空的城市热羽表现出向南倾斜的特征,这可能与此时两个试验模拟出的风向不同有关(这将在风场的结果分析中介绍)。

上述模拟结果分析表明,虽然城市化作用是决定北京城市边界层热力结构特征的最重要因素,但是北京周边地形对北京市区主要的边界层热力结构特征如城市热岛、悬浮逆温层等的结构及其分布特征的形成也有着明显影响。

4.2 近地面层风场分析

通过两个试验所计算出的近地面层的水平风场结果的对比分析,将有助于我们认识在有城市化作

用的情况下,地形对近地层风场结构的影响。篇幅所限,本文只给出了 Urban_flat 试验和 Urban 试验模拟的 28 日 08 时近地面层风速结果的对比图(图 5c 和 d)。从图中可以看出,两个试验在市区西部和北部的风场特征的模拟结果有着明显的区别,在 Urban 试验中,除西北角有明显的下坡风之外,这些地区的气流为偏南气流,呈现出了北京地区经常观测到的典型的山谷风特征;而 Urban_flat 试验的结果几乎完全相反,表现为较强的偏北风(这可能在一定程度上造成了前面温度场分析中市区温度高中心向南偏移的特征)。同时,在远离山区的市区大部分地区气流特征的模拟结果上也存在着差别,如朝阳地区的气流方向和大小。此外,通过对比分析两个试验在其他时次的模拟结果也可以看出,两个试验计算出的北京城市地区风向特征的差异也非常明显。上述分析结果说明,北京地区特殊的局地地形特点不仅决定了北京地区大气近地层气流的主要方

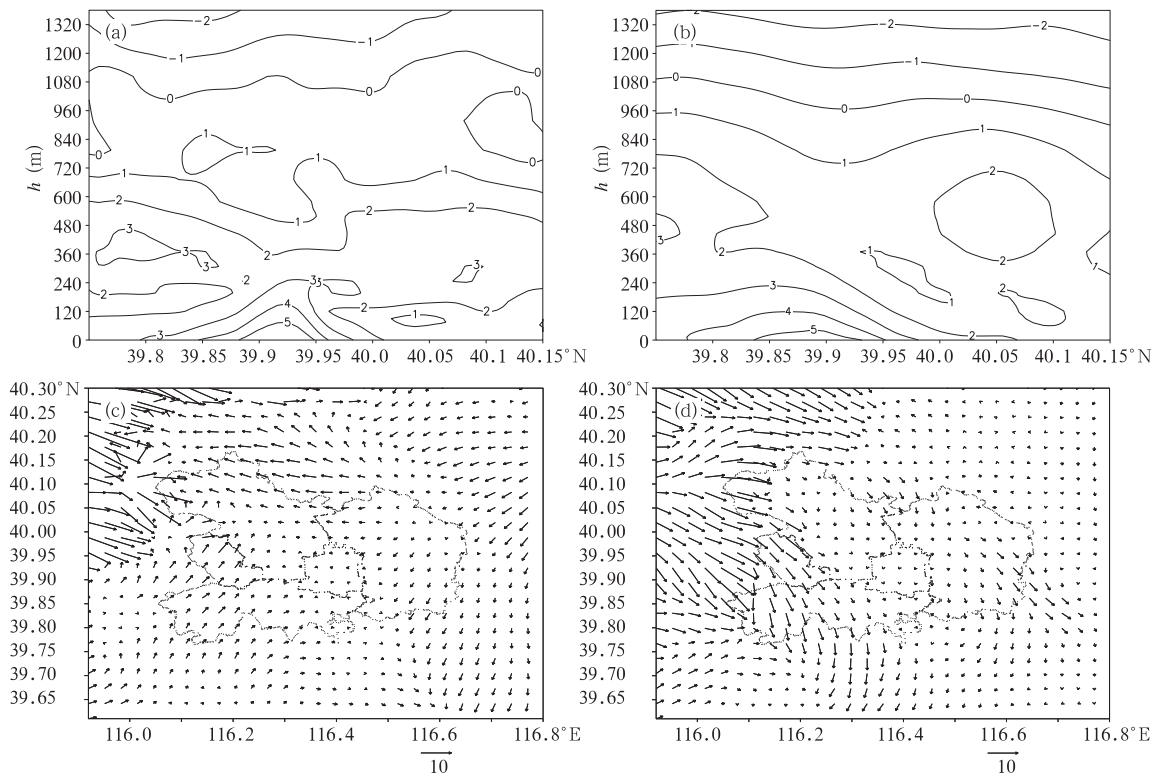


图5 Urban (a,c)与 Urban_flat(b,d)试验模拟的08时温度南北向垂直剖面(a,b;单位:℃)和近地面层风场(c,d;单位:m/s)

Fig. 5 The vertical cross-sections of temperature (a,b) and wind fields (c,d) near surface of Urban (a,c) and Urban_flat (b,d) simulation experiments at 08:00BT 28 Feb

向,同时还对市区细尺度的气流方向也有着明显的影响。

比较两个试验模拟的市区和郊区近地面层平均风速的日变化特征(图略),可以发现,与 Urban 试验结果相比,Urban_flat 试验计算出的市区和郊区的风速大小在整个分析时段中相对较均匀,这表明,北京周边地形对北京城市近地层的风速特征形成也有一定的强迫作用。

5 城市化进程发展的数值试验

近十几年来,北京城市建设面貌发生了巨大的变化,市区大量低矮的平房正变为高大林立的建筑

物群,同时,随着城区范围的不断扩大,郊区原有的农田等自然植被下垫面如今也已被沥青、水泥路面以及建筑物所代替,这种不断增强的城市化趋势,将随着北京经济的发展和城市建设规模的不断扩大仍将持续地发展。为了客观地评价和揭示这种不断发展的城市化进程对北京城市边界层结构的影响,我们仍以前述的模拟个例为基础,利用 MM5-UCP 模式,通过改变北京城市规模和建筑群密度的敏感性试验来分析城市化的不同程度对北京冬季城市边界层结构的影响。

5.1 模拟试验方案的设计

表3给出了用于研究城市化进程的3个数值模

表3 北京城市化不同程度的敏感性试验

Table 3 Sensitive experiments of different degree of urbanization in Beijing

试 验	方 案	目 的
Urban	考虑现有的北京城市化程度的影响。同表1中的 Urban 试验。	北京城市化进程发展影响的参考状态
Urban_large	在北京现有城市化程度的基础上,增加建筑物覆盖比率和城市冠层面积密度。	研究将来的北京城市化对边界层结构的影响
Urban_small	与 Urban_large 试验相反,减小城市建筑物覆盖比率和城市冠层面积密度。	研究过去的北京城市化对边界层结构的影响

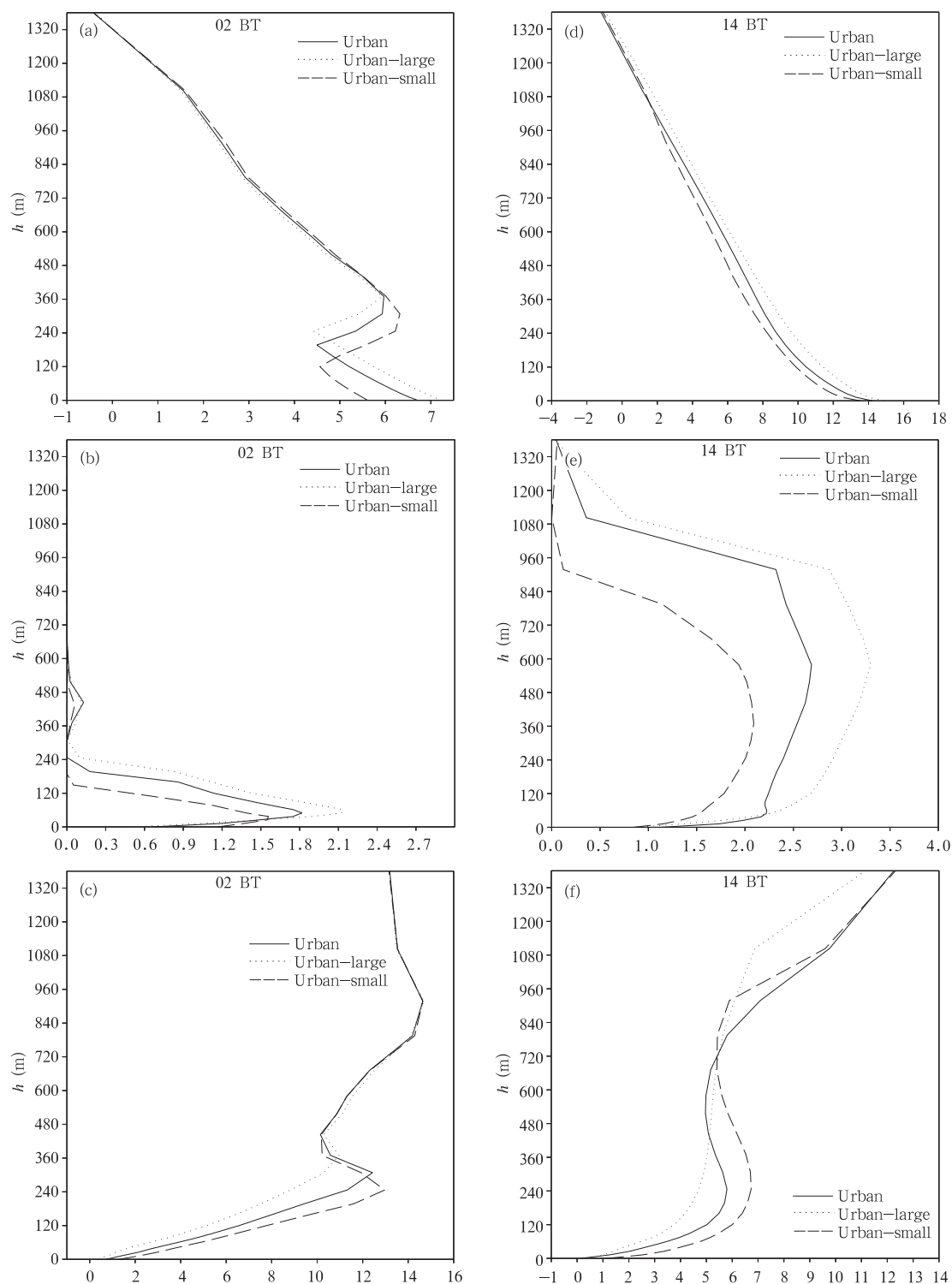


图6 不同城市化试验模拟出的02时(a,b,c)及14时(d,e,f)城市点的温度($^{\circ}\text{C}$)、湍流动能(m^2/s^2)、风速廓线(m/s)

Fig. 6 The profiles of urban grid of various urbanization simulations at 02:00BT (a,b,c) and 14:00BT (d,e,f)

(a,d. temperature ($^{\circ}\text{C}$), b, e. turbulent kinetic energy (m^2/s^2), c, f. horizontal wind (m/s); solid lines

are for Urban experiment, dot lines for Urban_large experiment, long dashed lines for Urban_small experiment)

拟试验。需要说明的是,在设计试验方案时,考虑到北京城市规划中对建筑高度限制的实际特点,我们假定 Urban_large 试验与 Urban 试验的城市冠层

高度相同。

5.2 模拟结果分析

我们将对上述3个模拟试验的02时和14时

(分别代表夜间和白天)的模拟结果进行对比分析。图 6 分别给出了 02 时和 14 时 3 个试验模拟的市中心点的温度、水平风速以及湍流动能廓线。

比较 02 时 3 个试验的温度结构可以看出,在 150 m 以下近地层中,温度是随着城市化程度的提高而上升的,升高的幅度大约在 1°C 左右,同时,市区夜间悬浮逆温层的高度也随城市化程度的加强而升高,这表明城市冠层中建筑结构的变化会对城市边界层中的温度垂直结构特征产生明显的影响。从 3 个试验模拟的 02 时近地面层温度场(图略)的结果也可看出,夜间城区的温度及城市热岛的强度也是随着城市化的发展而加强的,其上升幅度大约为 1°C 左右。这与张光智^[16]等人通过统计观测资料得出的近 10 年来北京城市热岛效应加强的结论基本一致。综合以上分析表明,在不考虑其他因素影响的条件下,北京城市化的发展将进一步加强夜间城市边界层主要热力结构,如城市热岛效应加强,悬浮逆温层的高度升高等。

比较 3 个试验模拟的夜间水平风速,可以发现,城市化程度高的 Urban_large 试验计算出城市近地层中风速最低,Urban 试验的结果次之,Urbn_small 试验计算出的风速值相对最大。这与近年来北京城市小风和静风天气的频率增加的观测结果相吻合,同时也说明,城市建筑物密度增加及其高度的加大是造成市区小风天气的主要原因。此时,3 个试验模拟得出的湍流动能结构则与风速特征相反,这预示着北京城市冠层中建筑物规模的扩大将加强夜间城市近地层、特别是城市冠层顶湍流运动的强度。

比较 3 个试验模拟的白天城市边界层结构,发现城市化进程对白天的影响与夜间基本相同,即城市化程度高的试验计算出的温度和湍流动能值大,风速则反之。其中,值得注意的是在 Urban_large 试验模拟出的近地层温度结构(图略)中出现了强度为 2°C 以上的城市热岛效应,这说明随着北京城市化程度的加强,市区温度将升高,风速会变小,在白天也可能出现强的城市热岛现象。

6 结论和讨论

文中针对北京冬季一次典型的城市边界层过程,在利用耦合了城市冠层参数化方案的 MM5 模式已经较成功地模拟了其热力和动力结构特征的基础上,利用因子分离技术,设计了一系列的数值试验

研究了北京城市结构的总体作用、热力因子、动力因子以及因子间相互作用在北京城市边界层主要热力和动力结构特征的形成及其演变过程中的作用。此外,通过数值试验研究了地形条件与城市化作用在城市边界层结构特征形成中的相对作用,还通过改变城市化规模的敏感性试验探究了北京城市化进程的发展对边界层结构的影响。多种数值试验的初步研究结果如下:

(1) 北京城市化的总体作用,即城市下垫面对大气热力及动力结构的综合影响大大地改变了其原有的大气边界层结构,形成了北京冬季主要城市边界层结构特征。在热力特征上表现为:夜间市区上空存在的悬浮逆温层及白天弱、夜间强的城市热岛效应等特征;在动力特征上表现为:城市近地层大气中的风速减小、湍流动能增强,并在夜间城市冠层顶处存在湍流动能的极大值以及城市近地层中明显的平均动能向湍流动能转化特征。

(2) 进一步发现城市结构的不同影响因子在北京冬季城市边界层结构形成和演变过程中的作用是不同的。在夜间,动力因子是决定市区上空悬浮逆温层、城市近地层小的风速及强的湍流动能并在城市冠层顶处达到极大值等主要城市边界层特征形成的主导因素;而在白天,城市结构的热力因子则是影响城市边界层结构的主导因素,并决定着大气边界层的主要结构特征,如白天市区混合层的强度以及近地层市区的温度值等特征;热、动力因子间的相互作用在城市边界层主要特征的形成和演变过程中也有着相当重要的作用,但其影响特征比较复杂,至于其机理还有待于借助更多的个例试验来进一步分析和总结。

(3) 虽然城市化作用是决定北京冬季城市边界层结构的决定因素,但是北京周边特殊的地形条件对城市边界层热力结构特征如悬浮逆温层及城市热岛等的结构及分布特征的形成也有着明显的影响,使其具有特殊的局地化特征,此外,地形作用也是北京地区近地层主要气流特征的主要强迫源。

(4) 改变城市规模和建筑密度的敏感性试验的结果表明,北京城市化进程的发展将会对城市边界层的结构产生明显的影响。主要表现为:随着城市建筑密度和高度的增加,北京市区风速将减小、湍流动能将加强,夜间城市逆温层底的高度会提高,城市热岛的强度将加强,并很可能在白天也出现比较明显的城市热岛效应。

必须指出的是,上述初步结论只是基于北京冬季城市边界层过程的一个典型的个例模拟结果,有些结论可能还需要多个个例的试验来得到验证和补充。同时,我们也认识到由于城市下垫面的结构非常复杂,使得城市边界层的研究仅从观测研究的角度就已是相当大的挑战。因此,作为以观测试验为基础的城市化作用的参数化研究工作来讲,我们发展的城市冠层参数化方案还是相当初步的,还需要通过大量的观测研究来改进和完善。

参考文献

- [1] Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities. *Quart Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 941—990
- [2] 中国地理学会. 城市气候和城市规划. 北京: 科学出版社, 1985, 175pp
The Geographical Society of China. *Urban Climate and City Planning*. Beijing: Science press, 1985, 175pp
- [3] 谢庄, 曹鸿兴. 北京最高和最低气温的非对称变化. *气象学报*, 1996, 54(4): 501—507
Xie Zhuang, Cao Hongxing. The non-symmetric variation of maximum and minimum temperature over Beijing area. *Acta Meteor Sin (in Chinese)*, 1996, 54(4): 501—507
- [4] 殷达中, 洪钟祥. 北京地区严重污染状况下的大气边界层结构与参数研究. *气候与环境研究*, 1999, 4(3): 303—307
Yin Dazhong, Hong Zhongxiang. The study of structure of atmospheric boundary layer and parameter under serious pollutant weather in Beijing area. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 1999, 4(3): 303—307
- [5] 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
Bian Linggen, Cheng Yanjie, Wang Xin, et al. Observation study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2002, 13 (suppl): 13—25
- [6] 李倩, 刘辉志, 胡非等. 大风天气下北京城市边界层阵风结构特征. *中国科学院研究生院学报*, 2004, 21(1): 40—44
Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. Characteristic of the urban boundary layer under strong wind condition in Beijing city. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese)*, 2004, 21(1): 40—44
- [7] 毕雪岩, 刘峰, 陈辉等. 北京地区大气温度垂直分布特征. *热带气象学报*, 2003, 19(增刊): 173—179
Bi Xueyan, Liu Feng, Chen Hui, et al. Vertical distribution features of atmospheric stability over Beijing area. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2003, 19 (suppl): 173—179
- [8] 徐敏, 蒋维梅, 季崇萍等. 北京地区气象环境数值模拟研究. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 62—68
Xu Min, Jiang Weimei, Ji Chongping, et al. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2002, 13(suppl): 62—68
- [9] 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛的变化周期模拟. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 61—68
Yang Yuhua, Xu Xiangde, Weng Yonghui. Simulation of daily cycle of boundary layer heat island in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2003, 14(1): 61—67
- [10] 李晓莉, 何金海, 毕宝贵等. MM5 模式中城市冠层参数化方案的设计及其数值试验. *气象学报*, 2003, 61(5): 526—539
Li Xiaoli, He Jinhai, Bi Baogui, et al. The design of urban canopy parameterization of MM5 and its numerical simulations. *Acta Meteor Sin (in Chinese)*, 2003, 61(5): 526—539
- [11] 徐祥德, 汤绪. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 8—10
Xu Xiangde, Tang Xu. *Introduction of urbanization environmental meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 8—10
- [12] Stein U, Alpert P. Factor separation in numerical simulations. *J Atmos Sci*, 1993, 50(14): 2107—2115
- [13] Martilli A. Numerical study of urban impact on the boundary layer structure: sensitivity to wind speed, urban morphology and rural soil moisture. *J Appl Meteor*, 2002, 41: 1247—1267
- [14] Uno I, Ueda H, Wakamatsu S. Numerical modeling of nocturnal urban boundary layer. *Boundary Layer Meteor*, 1989, 49(1): 77—98
- [15] 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
- [16] 张光智, 徐祥德, 王继志等. 北京及周边地区城市尺度城市热岛特征及其演变. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 43—50
Zhang Guangzhi, Xu Xiangde, Wang Jizhi, et al. A study of characteristics and evolution of urban heat island over Beijing and its surrounding area. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2002, 13 (suppl): 43—50

SIMULATION STUDY OF FORMATION MECHANISM OF WINTER URBAN BOUNDARY LAYER STRUCTURE OVER BEIJING AREA

Li Xiaoli Bi Baogui Li Zechun

(*National Meteorological Center, Beijing 100081*)

Abstract

Based on successful simulation of a typical winter urban boundary layer (UBL) process over Beijing area during the BECAPEX in 2001 by the use of MM5 coupled with urban canopy parameterization, a series of simulation experiments were conducted to investigate the effects of urban influence, terrain surrounding and different degree of urbanization on urban boundary layer structures over Beijing area. The results of factor separation experiments of urban influence indicate that the impact of total effect of urban influence is the comprehensive effect of urban infrastructure on thermal and dynamic structures of atmosphere, which lead to the formation of main UBL features over Beijing area. Meanwhile, the relative importance of thermal, mechanical factors of urban infrastructure and interaction between thermal and mechanical factors on the formation and evolution of UBL over the Beijing area were also explored. The results show that, during night, mechanical factors are responsible for main characteristic of nocturnal urban boundary layer such as elevated inversion layer over downtown area, smaller wind speed and stronger turbulent kinetic energy and its behavior with peak at the top of canopy layer. During daytime, thermal factors play dominant role on the structure of UBL, such as the intensity of mixed layer and temperature in the lower atmosphere of urban area. The interaction between mechanical and thermal factors plays important role on the formation and evolution of UBL, but its specific characteristic of mechanisms are complex. The results of terrain surrounding experiment show that terrain surrounding Beijing area not only determines the characteristic of prevailing airflow over Beijing area, but also has obvious effect on thermal structure of UBL, such as the distribution of elevated inversion and urban heat island, and makes them with special localization feature. The results of different extent urbanization experiment show that with the increase in the density and height of buildings in Beijing area, wind speed would decrease and turbulent kinetic energy increase. Meanwhile, the bottom of nocturnal elevated inversion would increase in downtown area, and the intensity of urban heat island would strengthen, and even probably is obvious in the daytime.

Key words: Urban boundary layer, Urban canopy parameterization, Simulation experiments.