

北京区域近地边界层特征数值模拟¹⁾

胡小明 刘树华²⁾ 梁福明 王建华 刘和平

(北京大学物理学院大气科学系,暴雨与旱涝灾害实验室,大气边界层物理和大气环境研究组,
北京,100871; ²⁾ lshuhua@pku.edu.cn)

李 炬 王迎春

(中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089)

摘 要 用非静力平衡的中尺度模式 MM5. V3 模拟了北京地区 2000 年夏季 7 月 10 日—11 日的风速和温度场等边界层特征。模式所采用的水平分辨率为 1 km,以天安门为中心,选取东西 80 km 南北 100 km 的区域进行模拟。模拟结果表明城郊之间存在明显夏季热岛效应,市区和郊区的温差最大可达 6~8℃;边界层风场受西北特殊地形的影响,白天盛行由南往北的上坡风,夜间转为由北向南的下坡风。并用气象观测站实测资料对模拟结果进行了验证,验证表明模拟是准确的。模拟结果有助于了解北京地区区域气候的形成、污染物扩散及制定相关城市规划。

关键词 MM5 中尺度模式;城市热岛;风场;温度场;北京区域

中图分类号 P 404

0 引 言

研究城市边界层的基本任务是研究发生在城市及其周围地区边界层大气中各种物理过程的演变规律,探索在特定的地形条件下风、温度、湿度等大气要素的时空变化状况等。长期以来许多学者通过不同的方法对城市边界层的特征进行了大量的观测和理论研究。James L McElroy^[1] 用一个稳定状态的剖面数值模式模拟了美国俄亥俄州哥伦布的城市夜间大气边界层的热力结构,将人为热考虑为净辐射通量的 15%~40% (3月)。周明煜等^[2] 曾用观测资料对北京地区热岛和热岛环流特征做了初步分析。Seaman 等^[3] 改进了 PSU/NCAR 中尺度气象模式,利用双向嵌套网格和实测的初边条件模拟了 St Louis, Missouri 城市行星边界层的温度、边界层厚度、比湿和风场等特征以及城市的地表面水汽通量、辐射过程和不同的地表粗糙度等对城市化的影响。模拟表明位于城市下风向的热岛中心风速相对较小,而城市化导致的地表蒸发的减少是城市湍流边界层维持和发展的最重要因素。孙旭东等^[4] 结合西安市估算出的人为能源消耗进行数值模拟,并评估了由于城市能源消耗总量的增加对未来城市热岛的影响。王卫国、蒋维楣等^[5] 建立了一个非静力的三维细网格边界层模式,对青岛地区复杂下垫面条件下的边界层结构和湍流特征作了数值模拟,模式采用了能量闭合方案以提高空间分辨率和模式

1) 国家自然科学基金(40275004)和国家自然科学基金与香港资助局(4001161948)联合资助项目

收稿日期:2003-12-19;修回日期:2004-03-04

精度,模拟以实测资料为初始输入,对青岛地区风和湍流场作了较细致的模拟分析。佟华、桑建国等^[6]用北京大学的三维复杂地形中尺度数值模式模拟了北京海淀地区大气边界层的风、温场结构以及污染物浓度分布,进而模拟了由于汽车尾气的排放而转化成气溶胶的浓度分布。杨玉华、徐祥德、翁永辉等^[7]用 MM5 模拟了北京冬季的热岛,加入具有周期性日变化的人为热,与将人为热源考虑为常数相比,模拟效果得到了改善。蔡旭晖、郭昱、刘辉志^[8]等用风场诊断方法对北京地区低层大气的背景流场情况进行分析,获取当地流场时空演变的总体形式。结果表明,该地区大气流场总体分为秋冬型和春夏型,秋冬型更多受强天气系统的影响,春夏型则更多表现出局地中尺度热力环流特征。

北京位于华北平原北端,城区范围地势平坦,但其周围地形极为复杂,北有燕山,西部毗邻太行山,作为上述山系余脉的军都山和西山山地与市区产生较大高差。因此北京地区的气象环境特征受其周围地形的影响较大。北京所受到的区域地形作用以及它的城市效应,对北京地区大气边界层和区域环境场将产生相关影响,这种影响将关系到北京城市居住环境、空气质量、建筑规划合理性的评价,及高温灾害的预防等。

本文采用非静力平衡的中尺度模式 MM5.V3 对北京 2000-07-10 至 2000-07-11 的风场及温度场等近地边界层特征进行数值模拟,这两天北京天气不受大尺度天气系统的影响,模拟结果对了解北京区域夏季不受大尺度系统影响情况下的近地边界层日变化特征、污染物的扩散机制、及其城市规划都具有重要意义。

1 模式简介及参数处理

MM5.V3 是一个由 PSU 和 NCAR 发展起来的有限区域中尺度大气模拟系统,它是在 MM4 基础上进一步研制出来的,MM5 与 MM4 最重要的区别在于 MM4 是静力平衡的,而 MM5 增加了非静力平衡方案。MM5 对物理过程描述得更为精细,有多种云物理和边界层等物理过程及四维同化功能,而且它具有多重嵌套网格功能。现在 MM5 已广泛的应用于大气边界层及区域气候理论和实时研究,其中包括对季风、台风和气旋的数值模拟,也可以用来研究中尺度对流系统、锋、山谷风、城市热岛等中和中系统。我国一些大学和科研单位先后从美国引进了该模式,并将模式移植到我国当时具有的中小型机甚至微机上运行,用于模拟研究我国重要天气过程的热力动力学结构和机理。

本文的数值模拟模式采用水平格距为 1 km。所取的中心点为天安门(39°54'27"N, 116°23'17"E),格点数为 100(南北)×80(东西),模拟区域的范围及地形见图 1 所示,图中根据各自的经纬度标出了几个地面气象

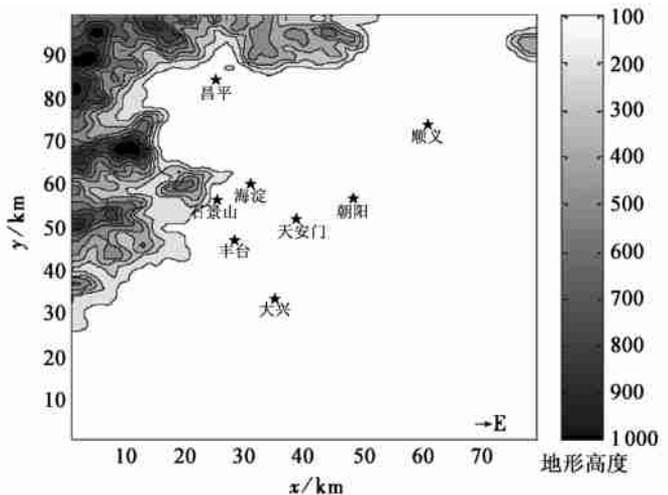
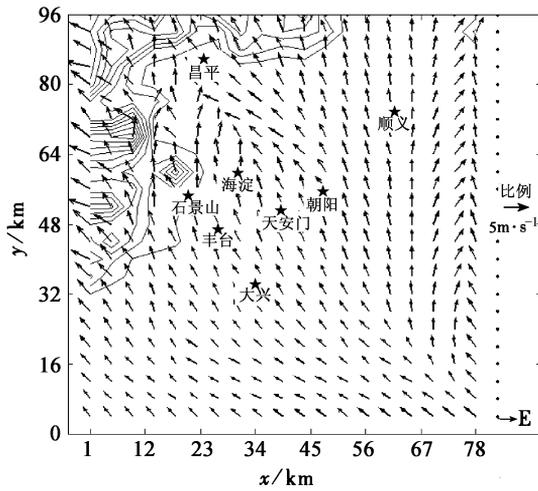
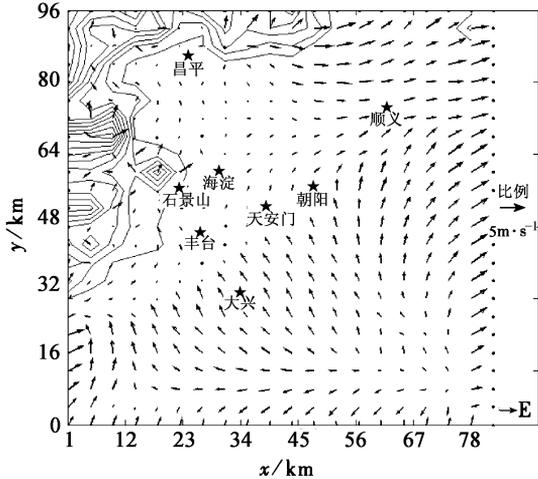


图 1 模拟区域的地形

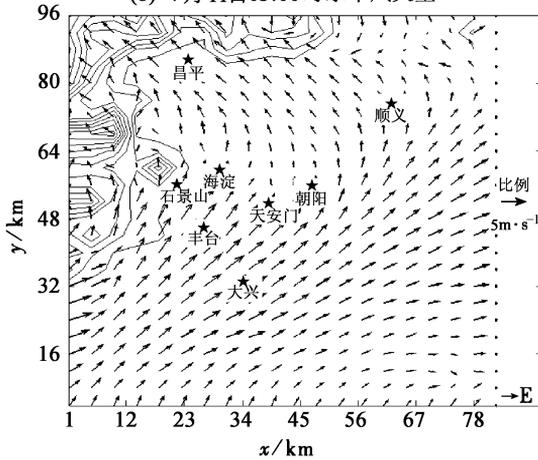
Fig. 1 The terrain of the simulation area



(a) 7月10日17:00时水平风矢量



(b) 7月11日03:00时水平风矢量



(c) 7月11日14:00时水平风矢量

图 2 7月10日—11日水平风矢量变化

Fig. 2 Wind fields from 10 July to 11 July

观测站的位置。模式在垂直方向取了 23 层 (坐标),采用上疏下密的划分方法,其划分的比例为: $= 1.00, 0.995, 0.99, 0.985, 0.98, 0.97, 0.96, 0.93, 0.89, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65, 0.60, 0.55, 0.50, 0.45, 0.40, 0.35, 0.30, 0.20, 0.10, 0.00$ 。($= \frac{P - P_{top}}{P_{bottom} - P_{top}}$, 其中 P_{bottom} 为地面气压, P_{top} 为模式顶气压)。边界层方案为 Eta M-Y 行星边界层方案;湿物理过程为显式的 schultz 方案;辐射过程选取云辐射方案。模式所选取的积分时间段为 2000-07-10 14:00 (北京时,下同)至 2000-07-11 14:00,共积分 24 h,以代表没有大天气系统影响的典型的北京夏季天气。积分步长为 5 s。

2 输入资料

模式所用地形及地表情况资料是美国地质调查局(USGS)的 30×30 的格点资料。背景场初始资料为 2000-07-10 14:00—2000-07-11 14:00 的美国国家环境预报中心(NCEP) $1^\circ \times 1^\circ$ 的格点资料。

3 数值试验结果及与实测资料比较

比较所用到的实测资料为北京城区及周边 14 个常规地面气象站 2000 年 7 月份全月数据顺序文件“D 文件”提供。这 14 个站点包括昌平县气象站(54499),海淀区气象站(54399),石景山区气象站(54513),门头沟区气象站(54505),房山区气象站(54596),丰台区气象站(54514),大兴县气象站(54594),北京市气象局观象台(54511),通州气象站(54431),朝阳区气象站(54433),顺义县气象站(54398),延庆县气象站(54406),怀柔县气象站(54419),平谷县气象站(54424)。

图 2 为模拟的 2000-07-10—2000-07-11 水平风矢量(距地面 18 m 高度)变化,按照时间顺序排列,图 2(a)为 7 月 10 日 17:00 时水平

风矢量,(b)为7月11日03:00时水平风矢量,(c)为7月11日14:00时水平面风矢量图,可以看出(a)、(c)代表的白天有明显的顺着山涧吹向西北山区的上坡风,这是由于白天山坡南侧接受到较强的太阳辐射,从而引起的南坡的暖空气向山上抬升形成的。而(b)代表的夜间在北部山区的南部出现比较明显的偏北风,这是由于夜间山区迅速降温,山区的冷空气往低处下泻造成的下坡风。这是典型的由于区域地理环境形成的区域风场特征。而此时在海淀、石景山这一带,由于北面过来的下坡风跟城区南部的南风在这里汇合,这里形成一个气流辐合区,风速较小。图2模拟结果与北京长期性的实际情况相符合(北京在没有大尺度天气系统影响时白天盛行南风,夜间风向则由南转北)。另外从图(c)可看出,在天安门北面城市中心形成一个气流辐合区,辐合区内水平风速略有减小,这是由于偏南风的水平风场和城区的热岛效应以及西北面的上坡风共同影响形成的。

为了清楚起见,下面给出相应的垂直剖面风矢量图。

图3为模拟的过天安门的南北轴线上垂直剖面风矢量图,可以看出天安门北面一点,也就是城市中心靠下风向一侧水平风速减小,而且有微弱的上升气流,这与水平风场看到的情况正好吻合。

图4是根据“D文件”提供的7月10日17:00时,7月11日03:00时,05:00时,14:00时的实测风场资料作图,它们与图2在时间上的对应关系为(图4(a)—图2(a),图4(b)—图2(b),图4(d)—图2(c))。对比结果显示图2的模拟情况跟图4的实测资料吻合较好。图4(a)7月10日17:00时几个站点偏东风向对

应图2(a)模拟的东南风,到7月11日03:00时在北部山区的南面开始出现下坡风,跟白天还没有撤退的南风在北部地区交汇。所以北部地区出现静风。这一点图4(b)03:00时的实测情况正好吻合图2(b)的模拟结果。图4(b)中昌平,石景山,门头沟,房山看不到风速,而此时海淀已出现风速的转向。图4(c)中05:00时,下坡风就比较显著了,石景山,门头沟,海淀,气象局观象台都出现西北风。到图4(d)7月11日14:00时区域风场都转成西南风向,这与图2(c)模拟图是吻合的。

为了从区域热力条件来说明以上区域动力风矢量场形成的机制,下面给出相应的模拟区域的近地面层的温度场特征。

图5为模拟的北京区域近地面空气的等温线图,可看出不管夜间还是白天,城市中心偏北位置的气温都比周围气温高,表明存在较明显的夏季城市热岛效应,热岛效应的中心偏离城市中心是由于水平风场原因造成的,因城市热岛中心一般都在城市中心的下风向区域。在图5(a)中,02:00时城市的高温区偏向海淀附近,这跟图2(b)中夜间的气流辐合区吻合较好,辐合区跟高温区的这种配置与前人的观测研究结果一致^[9]。另外西北面山区复杂的地形造成那里气温分布也很复杂,必将造成那里复杂的局地大气环流。

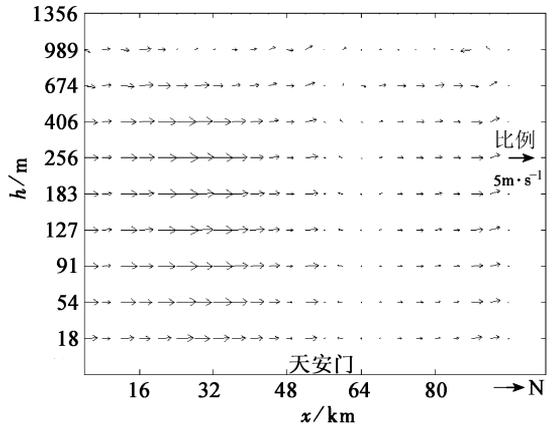


图3 7月11日14:00垂直剖面风矢量图

Fig. 3 The wind vectorgraph in the vertical section of 11 July

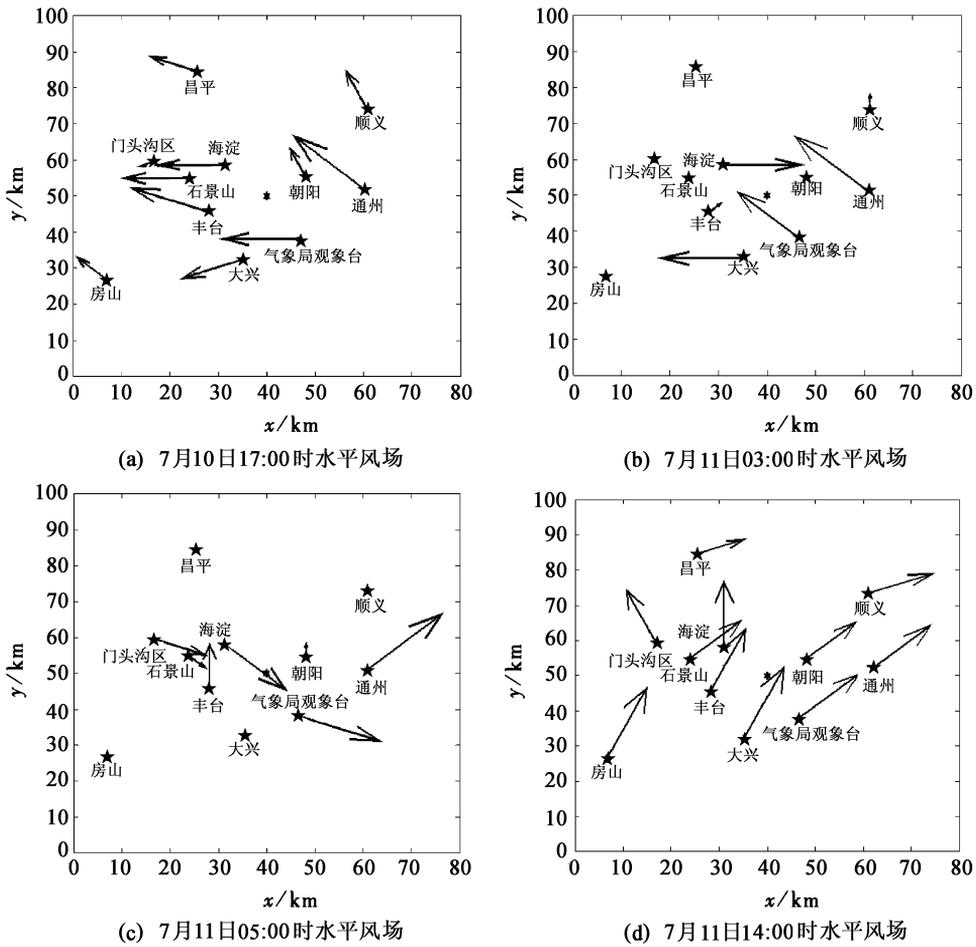


图 4 7月10日17:00和7月11日03:00时,05:00时,14:00时的实测风场

Fig. 4 Observed wind fields from 10 July to 11 July

图 6 是根据“D 文件”提供的 7 月 11 日 02:00 时,14:00 时的实测温度资料作图,画等温线前对各台站之间地区的温度值进行了 cubic 内插(由于缺乏河北的测站资料跟现有北京资料合并,造成所绘图片中气象局观象台东南部少部分地区的空白)。从图 6 可以看出,各台站实测的温度场跟图 5 模拟出的温度场比较吻合。图 6(a)中,海淀附近地区位于一个高温中心,与图 5(a)中相似。图 6(b)中,天安门北部的广大地区处于一个相对的高温中心,与图 5(b)相似。说明模拟的温度场比较吻合实际。另外,为了确切证明城市的热岛效应及其日变化特征,下面给出了北京区域南北轴线(通过天安门)上的地表温度日变化特征。

图 7 为模拟的北京区域南北轴线(过天安门)上的地表温度日变化特征。从图中可以明显看出无论白天夜间,北京城市夏季热岛效应是明显的,市区和郊区的日变化温差最大可达 6~8,模拟结果与徐敏等^[10]模拟结果一致,其温差最大值出现在午后,7 月 11 日 14 时热岛中心出现在天安门偏北 10 km 左右的地方(图 7 中横轴的中点代表天安门),温度达到 45.35,而此时热岛的上风向温度最低出现在天安门偏南 20 km 左右的地方,气温只有 37.35。图中还

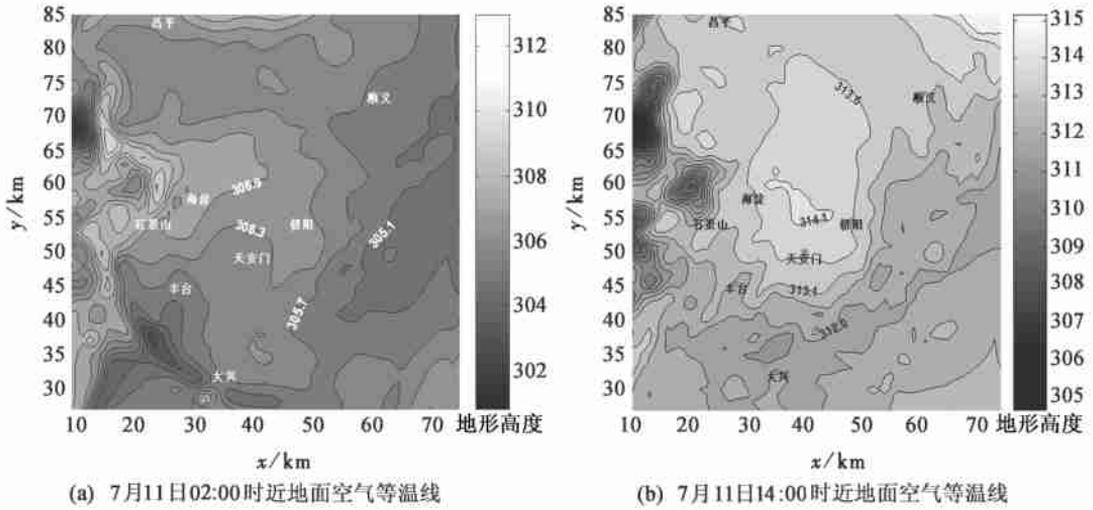


图 5 夜间、白天近地面(18 m)空气温度的水平分布

Fig. 5 Horizontal structure of air temperature fields (18 m)

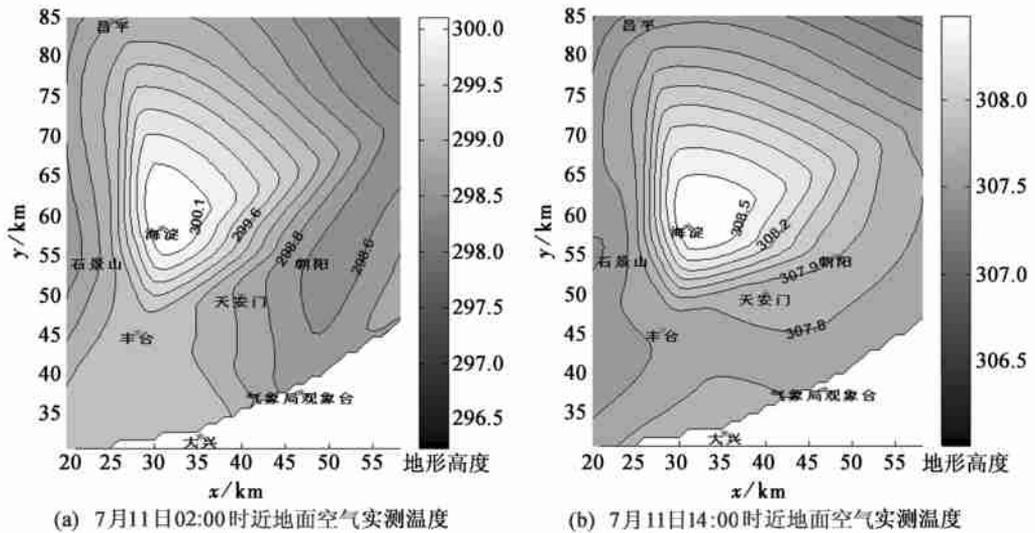


图 6 台站实测空气温度的水平分布

Fig. 6 Observed horizontal temperature fields

可看出下风向的温度比上风向温度高,也就是下风向的城市北面比上风向的城南温度高。

为了了解由于区域地理特征和城市热岛效应对区域城市大气边界层的影响,下面给出了北京城市中心及偏北 15 km 处的温度廓线发展的日变化特征。

图 8 为模拟的北京市中心及市中心偏北 15 km 处温度廓线图,图 8(a),(b)两图均可看出随着夜间地面辐射降温,近地面空气温度逐渐降低,但市中心 7 月 10 日 23:00 时,11 日 03:00 时,50 m 高度以下的逆温并不像市中心偏北 15 km 处逆温那么强。这主要由于城市热岛作用在城市中心夜间近地面层存在剩余混合层,使得那里的湍流活动还比较旺盛所形成的。城市

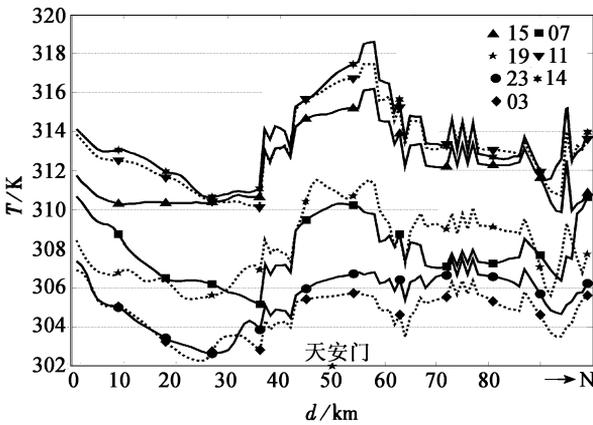


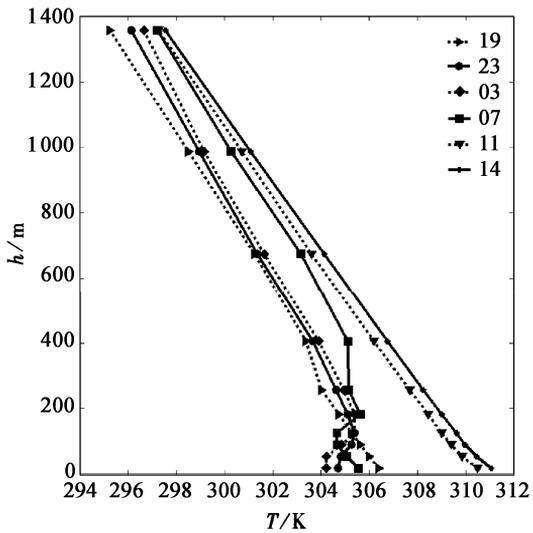
图 7 南北轴线上的地面温度发展

Fig. 7 Diurnal change of surface temperature along the south-north axis of Beijing

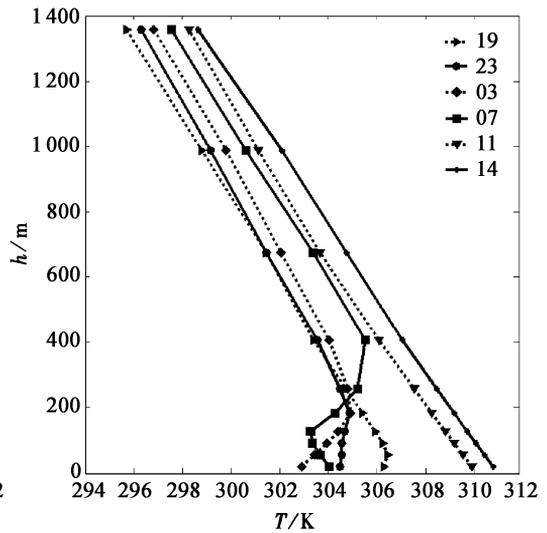
中心偏北 15 km 处 23:00 时和 03:00 时的逆层厚度明显比城市中心强。

为了解模拟区域的地表动力过程,下面给出了模拟的夜间、白天摩擦速度的水平分布特征。图 9 为模拟的夜间、白天摩擦速度的水平分布,明显可以看出城市中心(尤其是天安门到其南部 8 km 距离这一带)的摩擦速度相对其周围地区偏大,这充分说明了区域地表热力特征的差异,在这些区域的垂直方向湍流动量交换强,湍流活动也比较旺盛。

为了解城市区域的近地层空气湿度的日变化特征,下面给出了北京市中



(a) 市中心温度廓线发展



(b) 市中心偏北 15 km 处温度廓线发展

图 8 市中心及市中心偏北 15 km 处温度廓线发展

Fig. 8 Temperature profile from 1900LST 10 July to 1400LST 11 July

心 18 m 高度相对湿度的日变化特征。

图 10 为模拟的北京市中心(天安门) 18 m 高度处相对湿度的日变化,可看出夜间相对湿度大,但是总体小于大气所 1986 年 9 月份的观测资料^[11],大气所 1986 年 9 月份观测显示夜间低空最大相对湿度可以达到 80%~90%,这可能是由于大气所观测塔附近土壤持水量比市中心的土壤持水量高造成的。

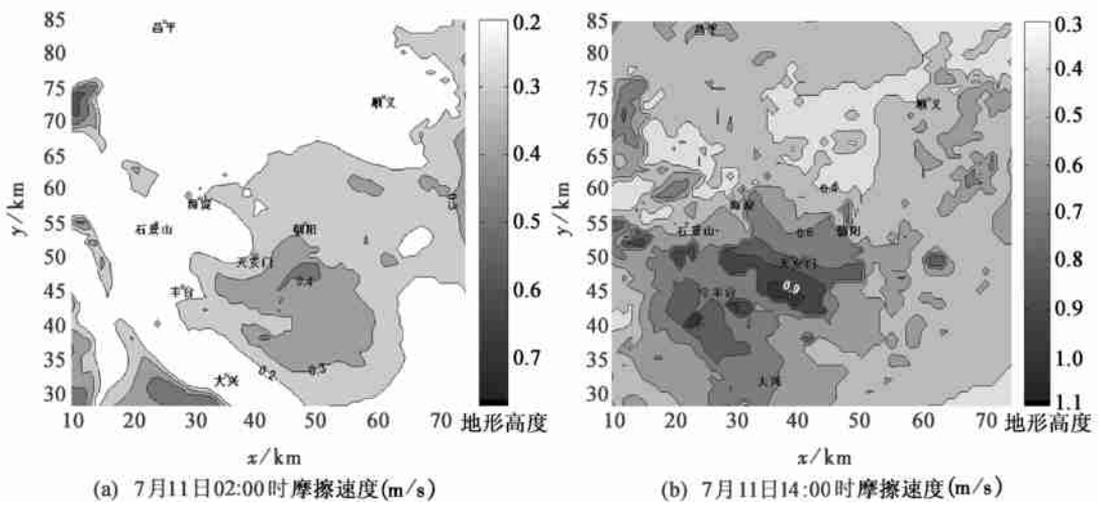


图 9 夜间、白天摩擦速度的水平分布
 Fig.9 Horizontal structure of friction velocity

4 结 论

通过对 2000 年 7 月 10—11 日的北京区域风场,温度场和摩擦速度等物理量的数值模拟和诊断分析,得到如下结论:MM5. V3 模式对受复杂地形影响的风场及城市热岛等物理过程都具有较强的模拟能力。本文对北京区域的模拟结果表明北京城郊之间存在较明显的夏季热岛效应,市区和郊区的温差最大可达 6~8 ;其边界层风场受西北区域特殊地形的动力和热力作用影响,白天盛行由南往北的上坡风,夜间转为由北向南的下坡风,城市热岛效应对此动力热力作用有一定的削弱作用。

本文所模拟的北京区域的风场,温度场和摩擦速度等物理量特征对了解北京区域夏季不受大尺度系统影响情况下的近地边界层日变化特征、污染物的扩散机制、及其城市规划都具有重要意义。另外,模拟结果也有助于对相关研究中的观测场数据进行验证。由于北京地区秋冬季节的大气流动形态跟春夏季节有很大差别,秋冬季节更多受强天气系统的影响,而并不是像春夏季节主要表现为局地中尺度热力环流特征,关于北京地区秋冬季节风场及温度场等特征的模拟将在另文发表。

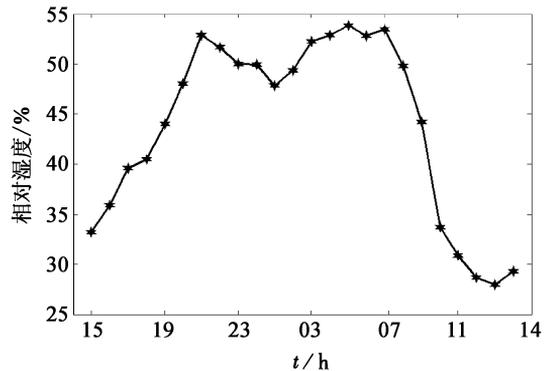


图 10 北京市中心 18 m 高度相对湿度日变化
 Fig.10 Diurnal change of relative humidity of the centre of Beijing

参 考 文 献

1 James L M. A Numerical Study of the Nocturnal Heat Island over a Medium-Sized Mid-Latitude City (Columbus, Ohio). Bound Layer Meteor, 1973, 27 :442-453

- 2 周明煜,曲绍厚,李玉英,等.北京地区热岛和热岛环流特征.环境科学,1980,5(16):12—17
- 3 Seaman NL. Numerical Studies of Urban Planetary Boundary-Layer Structure under Realistic Synoptic Conditions. J Appl Meteor,1989,28(8):760-781
- 4 孙旭东,孙孟伦,李兆元.西安市城市边界层热岛的数值模拟.地理研究,1994,13(2):49—54
- 5 王卫国,蒋维楣.复杂下垫面地域边界层结构的三维细网格数值模拟.热带气象学报,1996,12(3):212—217
- 6 佟华,桑建国.北京海淀地区大气边界层的数值模拟研究.应用气象学报,2002,13(特刊):51—60
- 7 杨玉华,徐祥德,翁永辉.北京城市边界层热岛的日变化周期模拟.应用气象学报,2003,14(1):61—68
- 8 蔡旭晖,郭显,刘辉志,等.北京地区低层大气流动模态研究.北京大学学报(自然科学版),2002,38(3):387—392
- 9 Carstang M, Tyson P D, Emmit G D. The Structure of Heat Island. Rev Geophys Space Phys, 1975, 13: 139-165
- 10 徐敏,蒋维楣,季崇萍,等.北京地区气象环境数值模拟试验.应用气象学报,2002,13(特刊):61—68
- 11 中国科学院北京气象塔观测资料集:第一集.北京:中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,1993.7—166

Numerical Simulation of Features of Surface Boundary-Layer over Beijing Area

HU Xiaoming LIU Shuhua LIANG Fuming WANG Jianhua LIU Heping

(Group of Atmospheric Boundary Layer Physics and Environment, Ministry Laboratory of Storm, Drought and flood Damages, Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871)

LI Ju WANG Yingchun

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorology Administration, Beijing, 100089)

Abstract The non-hydrostatic mesoscale model MM5. V3 is used to simulate the wind field, temperature field etc. of the atmospheric boundary layer over Beijing Area with the mesh resolution of 1 km. The simulation results show that the numerical model can successfully simulate the heat island effect and the wind field and temperature field, which are affected by the complicated topography and urban heat island. The results show that: (1) The surface temperature in the central Beijing is 6.8 °C higher than that in the suburbs. (2) Due to the unique topography the wind of Beijing area during the day time is southern anabatic wind and is northern katabatic wind in the night.

Key words mesoscale model MM5; urban heat island; wind field; temperature field; Beijing area