

城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响 ——一个案例分析^{*}

江晓燕 张朝林 高 华 苗世光

中国气象局北京城市气象研究所, 北京, 100089

摘 要

随着城市的不断发展, 城区地表反照率等下垫面物理特征和属性会发生明显的变化, 进而会对城市热岛等大气环境形成影响。文中使用中国气象科学研究院开发的新一代数值天气预报模式 (GRAPES), 针对 2004 年 10 月北京一次重空气污染事件中的典型城市热岛过程, 分别设计了两种数值试验方案: (1) 对照试验, 使用模式缺省的城区下垫面反照率参数, 取值 0.18; (2) 敏感性试验, 参考同期中国科学院大气物理研究所铁塔 280 m 高度下垫面反照率观测事实, 将北京区域城市类型下垫面反照率减小至 0.15。通过对比两种试验方案在 1 km 水平分辨率下的 24 h 模拟结果, 研究了城市下垫面反照率变化对北京地区城市热岛过程的影响。结果表明: (1) GRAPES 模式可成功模拟此次热岛过程中城区和郊区近地面温度的日变化趋势; (2) 城市下垫面反照率的变化对城市热岛的发展非常重要, 城市反照率下降 0.03 会使城市热岛强度增强 0.8 °C 左右, 结果也更接近实况。这说明随着城市发展引起的地表反照率减小有利于城市热岛强度增加; (3) 通过分析地表的长波辐射发现, 在城市区域较小反照率情形下, 城区的长波辐射始终比郊区大, 有利于热岛的形成; 同时也有利于城区近地层的风场辐合增加, 对此次污染过程的发展是有利的。

关键词: 城市热岛, 地表反照率, 陆面过程, 辐射通量。

1 引 言

城市是人口高度密集、经济高度发展、能量消耗最多、地表面变化最大和空气污染最重的特殊地区。据联合国 1999 年的报告, 到 2025 年, 全球将有 80% 的人口居住在城市。随着城市的不断发展, 与城市相关的交通、住房、农业、污染等问题越来越显著。城市发展成为人类破坏自然环境的一个很重要的方式。在城市对自然环境造成影响的因素中, 城市下垫面特征变化的影响不容忽视。由于城市地表对于辐射的吸收、发射、反射, 能量的转化, 空气污染物和降水的截获, 风速等都有影响。因此, 研究城市下垫面特征变化对气象环境的影响不可缺少。在城市, 自然的地表被人为地表所替代, 使得其具有低反

照率、高粗糙度, 对地表热通量产生很大的影响, 使得城区的近地面温度比郊区的温度高出 2—10 °C, 产生城市热岛效应。许多观测事实表明, 随着城市的发展, 城区比其他地区具有相对低的反照率。这主要是一方面由于城区绿地面积比郊区小, 街道、房屋等建筑物的反照率比植被小, 另一方面由于城市建筑物密度大, 形成一个立体下垫面, 在太阳照射下, 墙壁、屋顶、路面形成较为复杂的反射面, 太阳辐射经过多次反射, 使得在受射面上吸收的次数增多, 因此被反射的能量就减少了。这就意味着城市地表对于太阳辐射的吸收增多, 有利于热岛的形成。Sailor^[1]在分析城市反照率的增加对城市热岛的影响时发现, 如果反照率增加 0.14 将有助于降低夏季的高温 1.5 °C。Taha、Civerolo、Nowak 等^[2-5]研究

^{*} 初稿时间: 2005 年 12 月 1 日; 修改稿日期: 2006 年 5 月 23 日。

资助课题: 国家科技攻关计划 (2004BA607B0(3))、科技部社会公益类项目 (2005DIB3J098)、国家自然科学基金项目 (40505002) 和北京市自然科学基金项目 (8051002)。

通讯作者: 张朝林, 主要从事数值预报模式开发应用和地基 GPS 气象研究。E-mail: clzhang@ium.cn, c_lzhang@yahoo.com

发现,城市下垫面对于近地面温度和空气污染有很重要的影响,如果增加城市植被覆盖和减少城区温度有助于减少空气污染。

近 50 年以来,北京的城市建设和人口发展迅速。林学椿等^[6-7]统计发现北京地区热岛强度的增温率是自然因素(郊区)增温率的 8 倍,近 40 年热岛强度的增温率为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$,热岛强度的增温率与城市发展指数的变化颇为一致,两者之间的相关系数都超过了 0.1% 信度。城市热岛效应的加重,一方面使得夏季高温越来越多,另一方面有利于城市空气污染的发展,因此有必要研究城市热岛对空气污染的影响。本文主要使用数值模式来分析城市发展造成的反照率变化对一次污染过程中城市热岛现象的影响,主要使用中国气象科学研究院开发的新一代三维非静力数值模式 GRAPES 模式 2.5 版进行 1 km 分辨率的模拟。通过对照试验和敏感性试验分析城市下垫面反照率变化对城市热岛和空气污染的影响。

2 个例描述

本文所选的个例是 2004 年 10 月一次局地重污染过程中的城市热岛现象。2004 年 10 月上旬,北京地区出现了一次连续的污染天气。从 10 月 4 日开始,北京地区空气质量逐渐变差,到了 10 月 8 日,空气污染达到最严重。本文所选的个例发生在重污染事件的前期 10 月 6 日 00 时—7 日 00 时(非特别说明,文中使用的时间是世界时,下同)。

2.1 北京城区反照率特征

2004 年 10 月 16—30 日,在中国科学院大气物理研究所铁塔开展的 280 m 高度正午前后(11—13 时,北京时间)太阳直射期观测的反照率资料,可较好代表同期北京城市下垫面的反照率特征,分析表明其 11—13 时的平均值为 0.15。以 2004 年 10 月 20 日观测为例,进一步分析反照率的日变化(图 1)可见,在正午前后的观测值也约为 0.15,与平均状况是一致的。以上在北京城区观测到的反照率结果比目前数值模式对城市类型下垫面使用的缺省值 0.18 低。表明近年来,由于北京城市建筑物密度与高度迅速增大,形成一个非常复杂的立体下垫面,从而可能在太阳照射下,墙壁、屋顶、路面形成较为复杂的反射面,太阳辐射经过多次反射,使得在受射面上吸收的次数增多,被反射的能量减少,进而会影响

城区下垫面的反照率,出现较一般城市观测率偏低的情况。Brest^[8]通过卫星遥感资料分析得到的 10 月份的城市下垫面反照率观测分析与研究成果表明,城区比其他地区具有相对低的反照率。从另一方面同样反映了城市发展会造成相关下垫面反照率下降的这一现象。

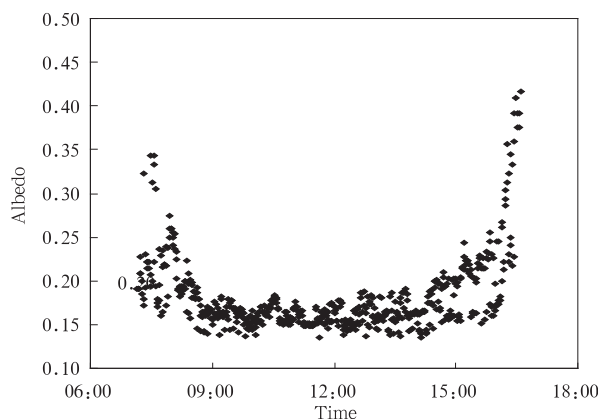


图 1 2004 年 10 月 20 日(北京时间)大气物理研究所铁塔 280 m 高度观测的城区反照率日变化

Fig. 1 The diurnal variation of urban albedo observed at the 280 m height of the iron tower of Institute of Atmospheric Physics on 20 October 2004 (LST, Beijing)

2.2 城市热岛现象

城市热岛强度是以热岛中心气温减去同时间同高度附近郊区的气温差值来表示的。在这里,我们主要使用自动气象站资料来分析。图 2 为所选自动气象站分布图,其中城区站为青年湖、东直门、大学生体育馆、四元桥、十八里店、丽泽桥、公主坟、紫竹院、古观象台 9 个自动气象站,郊区站为门头沟、房山、顺义、怀柔 4 个自动气象站,有的郊区站由于站点海拔高度与城区站相差太多,故没有使用。

图 3 是这些自动站观测数据经过初步质量控制,剔除了其中的奇异值后得到的城市热岛强度时间演变曲线。这里定义城市热岛强度

$$I_{\text{UHI}} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{u(i)}}{n} - \frac{\sum_{j=1}^m T_{r(j)}}{m}$$

其中 n, m 分布代表城区站和郊区站的站点个数, T_u 、 T_r 分别指城区站和郊区站的近地面温度。从图上可以看出,从 10 月 6 日 09 时开始,北京地区城市热岛强度开始明显加强,且一直持续到第 2 天 02 时左右。其中这一阶段最高热岛强度达 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相应的 PM_{10}

观测值在 10 月 6 日晚上有一个高点,与热岛强度在晚上达到最大一致,说明在这次污染过程中城市热岛强度的增加使得空气污染现象加重,同时能见度也降低(图略)。

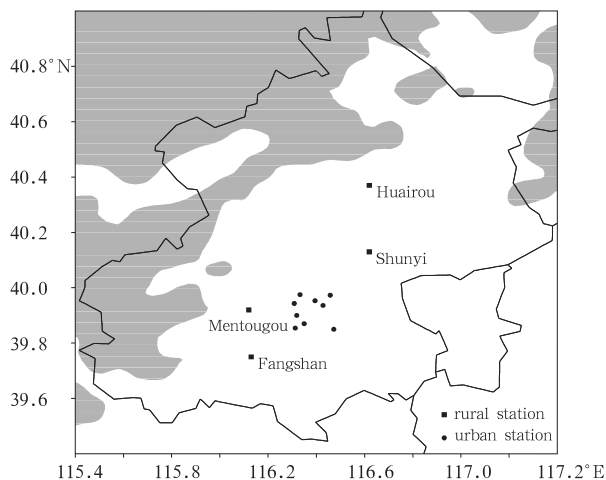


图 2 所选自动气象站的分布(阴影为地形)

Fig. 2 Locations of auto-weather stations used for the UHI calculation (shadowed areas denote mountainous areas, black squares rural stations, and black dots urban stations)

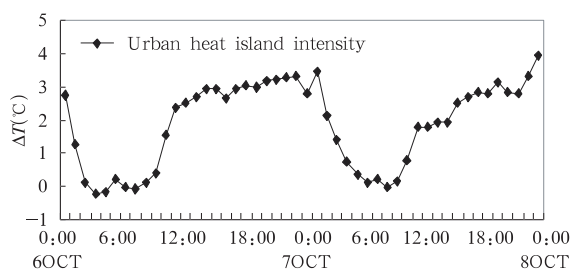


图 3 2004 年 10 月 6 日 00 时—8 日 00 时城市热岛强度演变曲线

Fig. 3 The diurnal variation of the observed intensity of UHI in Beijing during the period from 00:00 UTC 6 to 00:00 UTC 8 October 2004

另外,从当时 10 月 6 日 12 时北京地区近地面观测的水平温度场、风场和气压场(图 4)看,北京地区夜间城区风速比较小,存在弱辐合,气压也相对郊区偏低。一般情况,当有城市热岛存在时,城区的近地面暖空气上升使得城区的气压相对较低,城区出现气流的辐合,从而使得污染物容易滞留在城区,城区的空气污染状况加重。当时的实况也表明城区存在严重的空气污染现象。由此可见,在这次污染事件过程中伴随了城市热岛现象,城市热岛对于污染

的发展具有一定的影响。而城市热岛的形成又与城市下垫面反照率变化有关。因此,下面主要使用数值模式来分析城市下垫面反照率变化对该次热岛过程及空气污染的可能影响。

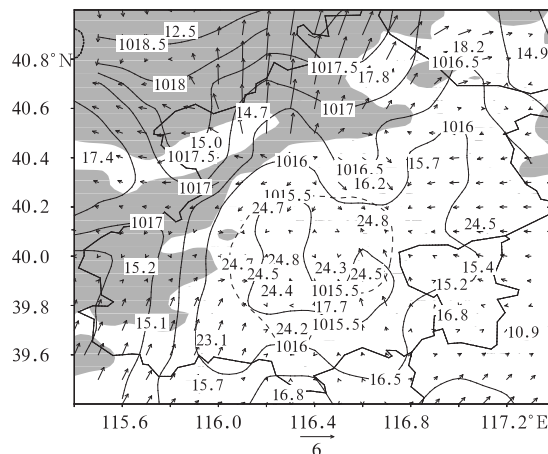


图 4 2004 年 10 月 6 日 12 时北京地区近地面温度(°C)、地面气压(hPa)和风场

Fig. 4 Observed fields of surface pressure (solid-line, units; hPa), temperature (dash-line, units; °C) at the 2 m height above ground level (AGL), and wind (vector, units; m/s) at the 10 m height AGL in the Beijing region at 12:00 UTC 6 October 2004

3 模式系统及试验方案简介

从前面的分析看,这次过程伴随了城市热岛现象,在城区出现相对高的温度和相对低的气压,当时的风速也比较小,有弱辐合。为了了解城市下垫面的反照率变化对该次热岛过程的影响,本文利用中国气象科学研究院开发的新一代数值预报模式 GRAPES 模式来分析^[9-10]。该模式主要用于业务预报和科学研究,是一个完全可压非静力模式,包括一个资料同化系统,适合尺度从几百米到几千公里的研究。当数值模式用来研究局地城市的天气现象时,尺度相对较小。本文的模式水平网格分辨率 1 km,中心为(40°N, 116.4°E)。垂直方向采用 31 层地形坐标,顶层气压为 50 hPa。微物理过程都使用简单冰相过程;行星边界层物理过程使用 MRF 方案;长波辐射方案为 RRTM 方案;短波辐射过程选择了 Dudhia 过程;选择了 Monin-Obukhov 边界层过程。陆面过程选择了包含 5 层土壤模式的热扩散过程。为了提高模拟效果,模拟试验先通过

MM5 中尺度数值模式的前处理模块 REGRID 读取 6 h 一次的分辨率为 1° 的 AVN 资料,然后使用其 LITTLE_R 融入常规观测资料,形成 GRAPES 模式的初始背景场。模式的积分时间为 2004 年 10 月 6 日 00 时—7 日 00 时,积分 24 h。

为了分析城区反照率变化对城市热岛和污染的影响,文中设计了两种试验方案:(1)对照试验;使用模式给定的城区下垫面的热力参数,其中反照率为 0.18。(2)反照率的敏感性试验;结合同期中国科学院大气物理研究所铁塔 280 m 高度观测的城区反照率事实和 Brest^[8]研究成果,考虑到城市发展对下垫面的可能影响,将北京区域城市类型下垫面反照率减小至 0.15,其他热力参数与对照试验一致。从而来分析城区下垫面参数中反照率因子对于城区温度和风场的影响。

4 模拟结果分析

4.1 近地面温度

为了分析城市下垫面反照率变化对近地面温度

场模拟的影响,使用对照试验和敏感性试验的模拟结果分析实况与模拟的城区与郊区站点温度的时间演变曲线(图 5),以海淀站代表城区站,怀柔站代表郊区站。从图 5a 上可以发现,这两种试验能较好地模拟城区近地面温度的日变化趋势。其中,一天中温度在 06—07 时达到最高,晚上比较低,与实况比较吻合。但是,从图上可以看出,当城区下垫面反照率减小后,模拟的城区近地面温度与实况更接近,特别是在白天 07—10 时,模拟的城区温度比对照试验偏高,更接近实况。而从晚上 12 时开始,敏感性试验模拟的温度比对照试验偏低,与实况基本一致。图 5b 为郊区站点温度的实况与模拟,从图上可以看出城区下垫面使用低的反照率能使得模拟结果与实况更接近,特别是晚上当城市热岛比较明显时敏感性试验模拟的结果与实况比较一致。总的来说,敏感性试验的模拟结果要好于对照试验,特别是晚上对于近地面温度的模拟。但是值得注意的是,最初几个小时的模拟结果两种方案的模拟都偏高,可能是由于模式对于温度场的适应需要一定的时间所致。

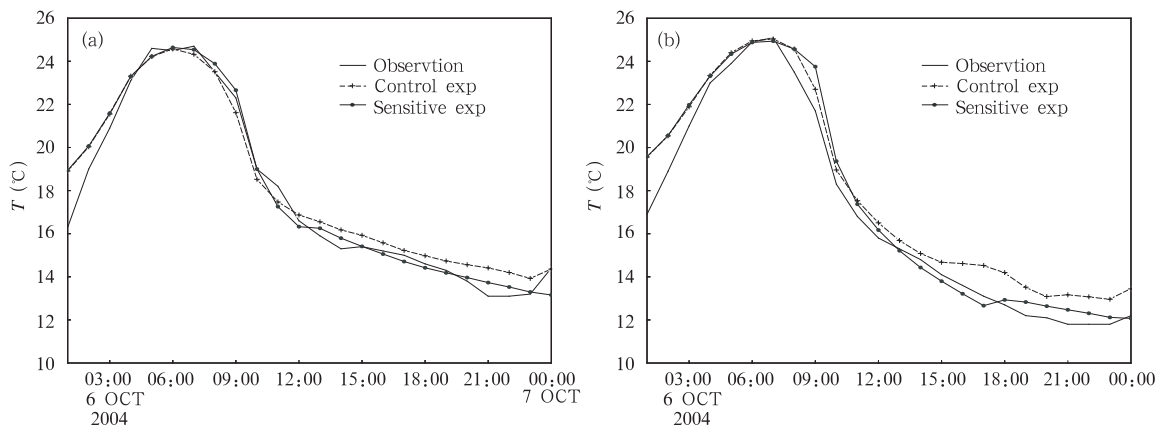


图 5 实况与模拟的城区(海淀)(a)与郊区(怀柔)(b)的温度演变时间序列

Fig. 5 Observed and simulated hourly atmospheric temperature variations for urban Haidian station (a), and rural Huairou station (b)

4.2 城市热岛强度

模拟城市热岛强度的日变化,对比这两种方案的模拟结果与实况(图 6),实况的城市热岛强度与前面的一致,是由城区 9 个自动气象站的平均温度减去 4 个郊区自动气象站的平均温度所得。模式模拟的热岛强度则由相应的城区和郊区站点的模拟温度相减得到。从模拟的城市热岛强度的时间演变看,两种试验方案对于城市热岛强度的模拟一开始

比较一致,特别是 01—08 时,与实况一样,城市热岛强度不强。从 09 时开始,两种方案模拟的城市热岛强度也开始增加,与实况的变化趋势一致,但是强度稍弱,其中减小了城区反照率的模拟结果更接近实际。从整个分布看,可能是由于模式的滞后性使得模拟的结果比实况晚 2 h。从 14 时开始,减小反照率后模拟的热岛强度比对照试验高 0.8°C ,更接近实际。这可能是由于反照率减小后增加了城区与郊

区的温差,从而使得城市热岛强度增强。由此可见,城市地表反照率的减小有利于城市热岛的发展。从这里的分析可知,当热岛强度比较明显时,如果减小反照率 0.03,则会使得热岛强度增加近 0.8°C 。

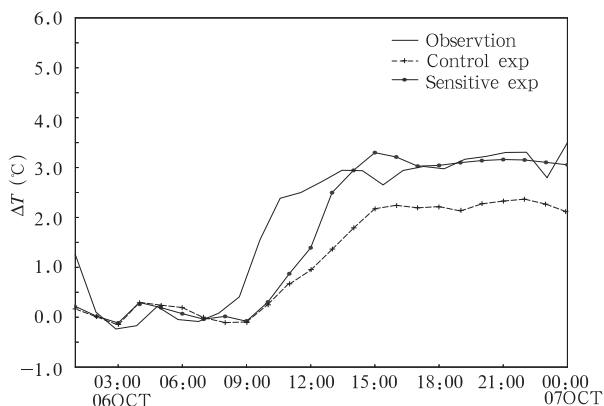


图 6 实况与模拟的 2004 年 10 月 6 日 01 时—7 日 00 时城区热岛演变序列

Fig. 6 Hourly variations of UHI intensity during the period from 01:00 UTC 6 to 00:00 UTC 7 October 2004

4.3 辐射通量

城市下垫面反照率变化对温度场的影响往往还表现在辐射通量的变化上,这里主要分析地表的长波辐射通量。地表的长波辐射可以定义为: $Q_L = \epsilon \sigma T^4$,其中 ϵ 为地面相对发射率, σ 斯蒂芬-波尔兹曼常数, T 为下垫面温度。城郊各种性质的下垫面相对发射率虽有不同,但差异不大,因此地面长波辐射主要受地面温度影响。而地面温度一方面对近地面温度产生影响,另一方面又直接受下垫面反照率的影响,因此通过分析对照试验和敏感性试验模拟得到的城郊地面长波辐射差的日变化(图 7),可以了解反照率对于热力场的影响。从图 7 可知,两种试验方案在最初的 11 h 模拟的城郊地面长波辐射之差比较一致,值都很小,这与前面模拟的热岛强度在一开始都很小比较吻合。从 12 时开始,敏感性试验模拟的城郊地面长波辐射差值始终大于对照试验,相应的这个时候其模拟的城市热岛强度也是大于对照试验的。这说明城区反照率的减小会减少反射的太阳辐射,从而增加了地表吸收的太阳辐射。而这些辐射在晚上没有太阳辐射时会向大气传输,从而增大了城郊地表长波辐射通量差,使得城市热岛强度增加。而当热岛强度加强时有利于污染的发展,

由此可见,当城市下垫面的反照率减小时,会增加城市和郊区地表长波辐射差,进而加强城市热岛强度。

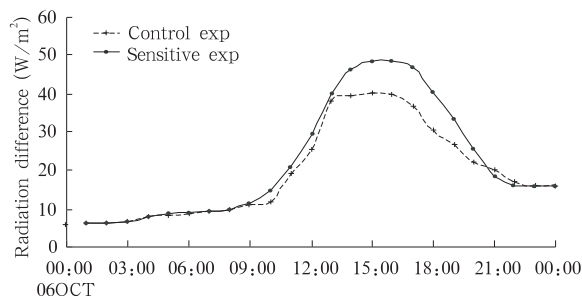


图 7 2004 年 10 月 6 日城市和郊区地面的长波辐射之差

Fig. 7 Hourly differences in surface long-wave radiation fluxes between urban and rural areas on 6 October 2004

4.4 近地面风场

受城市地表特征影响的是近地面风场,从实况和模拟的 2004 年 10 月 7 日 00 时近地面风场(图 8)可以看出,敏感性试验(图 8b)模拟的气流在城区(虚线)出现了大风速的辐合区,较对照试验(图 8a)的明显。这一模拟结果与实况图 8a 虚线所示的城区风场比较一致,城区确实有辐合存在。李晓莉等^[11]曾在数值模式里增加了城市冠层参数化方案后发现城区的风速出现明显辐合,本文的模拟结果证实了这一点。这可能是由于反照率的减小增加了城市热岛强度,也即增加了城郊的温度梯度,从而使得近郊的较冷空气更容易向城区辐合,增加了城区气流的辐合。而这种城区的辐合,对于空气污染物的扩散是很不利的。会造成空气污染物在城区滞留,降低城区的空气质量。可见,城市化通过改变下垫面反照率一方面会改变城郊温差,加强城市热岛现象,另一方面则由于热力场的变化也改变了风场,使得城区出现明显的辐合有利于污染的发展。

5 结论和讨论

通过前面的分析发现,北京地区 2004 年 10 月的这次污染事件与城市热岛有一定的关系。当有城市热岛存在时,城区的暖空气上升使得城区的气压相对较低,城区出现气流的辐合,从而使得污染物容易滞留在城区,加强了城区的空气污染状况。另外,通过数值模拟发现,中国气象科学研究院开发的新

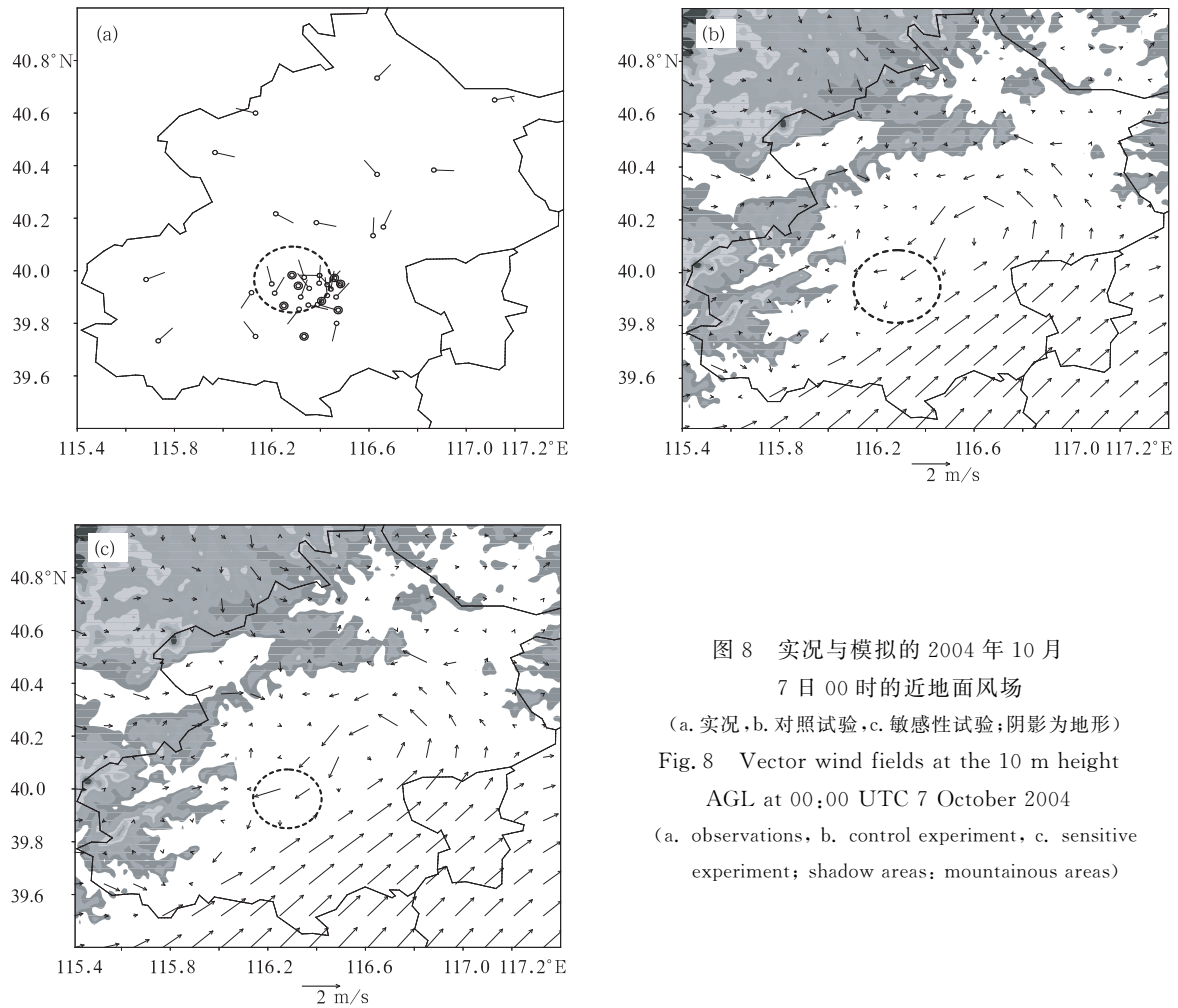


图 8 实况与模拟的 2004 年 10 月
7 日 00 时的近地面风场

(a. 实况, b. 对照试验, c. 敏感性试验; 阴影为地形)

Fig. 8 Vector wind fields at the 10 m height
AGL at 00:00 UTC 7 October 2004

(a. observations, b. control experiment, c. sensitive
experiment; shadow areas: mountainous areas)

一代数值天气预报模式 GRAPES 能较好地应用在城市地区,且具有较高的分辨率。模拟结果表明,城市下垫面反照率的变化对城市热岛的发展非常重要,减小城市反照率 0.03 会使得城市热岛强度增强 0.8°C 左右,城区的辐合加重,有利于空气污染的发展。同时城市下垫面反照率的减小会使得夜间城郊地表长波辐射通量增大,从而使得城市热岛强度加强。但是由于城市热岛的形成是由多种因素共同作用导致的,本文只是着重探讨了典型城区反照率变化对城市热岛的影响,今后有必要进一步分析反照率日变化、季节变化等其他影响因子的作用;同时,在 GRAPES 模式的未来发展中,有必要通过考虑污染-辐射的相互影响来进一步深入这一方面的工作。

致谢:中国气象局培训中心王强教授和中国气象局北京城市气象研究所刘伟东博士提供了文中使用的北京城区反照率观测资料,并对相关分析作了宝贵指导,特此致谢。

参考文献

- [1] Sailor D J. Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. *J Appl Meteor*, 1995, 34: 1694-1704
- [2] Taha H. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the south coast air basin. *Atmos Environ*, 1996, 30: 3423-3430
- [3] Taha H, Konopacki S, Akbari H. Impacts of lowered urban air temperatures on precursor emission and ozone air quality. *J Air Waste Management Association*, 1998, 48: 860-865
- [4] Civerolo K L, Sistla G, Rao S T, et al. The effects of land cover in meteorological modeling: Implications for assessment of future air quality scenarios. *Atmos Environ*, 2000, 34: 1615-1621
- [5] Nowak D, Civerolo K, Rao S T, et al. The impact of urban trees on ozone in the northeastern United States. *Atmos Environ*, 1999, 34: 1601-1613

- [6] 林学椿,于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. 地球物理学报, 2005, 48(1): 39-45
- [7] 林学椿,于淑秋,唐国利. 北京城市化进程与热岛强度关系的研究. 自然科学进展, 2005, 15(7): 882-886
- [8] Brest C L. Seasonal albedo of an urban/rural landscape from satellite observations, Proc. of the workshop on saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling summer heat islands, Berkeley, C A, Feb, 1989: 238-255
- [9] 张华,薛纪善,庄世宇等. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. 气象学报, 2004, 62(1): 31-41
- [10] Chen D, Xue J. GRAPES-Chinese new generation of numerical prediction model system: Project and progress (2001-2003) // GRAPES Newsletter No. 1. Beijing: Center for Numerical Prediction Research, Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2005: 30-48
- [11] 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模拟试验. 气象学报, 2003, 61(5): 526-539

IMPACTS OF URBAN ALBEDO CHANGE ON URBAN HEAT ISLAND IN BEIJING ——A CASE STUDY

Jiang Xiaoyan Zhang Chaolin Gao Hua Miao Shiguang

Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract

With the rapid development and expansion of city, the physical characteristics (such as surface albedo and so on) and property of the urban underlying surface are undergoing substantially changes, which significantly impact the atmosphere and environment, for example urban heat island (UHI) effect. By utilizing the new-generation numerical GRAPES-meso model developed by Chinese Academy of Meteorological Science, two 24 hours numerical experiment schemes were designed and performed to investigate the impact of urban albedo change on a typical UHI event over the Beijing metropolitan area during a serious air pollution process on 6–8, October 2004. The control experiment was numerically integrated with the default model albedo value of 0.18 for the urban land use, but the sensitive experiment was conducted with a smaller urban albedo value of 0.15, which is based on the actual value observed at the 280 m high iron tower of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science. After comparing the results of the two numerical experiments with 1-km fine horizontal resolution, the following major conclusions are summarized: Either in urban area or rural area, the diurnal variation of near-surface atmospheric temperature is successfully simulated for the selected UHI event (6–8 October 2004) by the GRAPES-meso model. The change in urban albedo has significant impact on the evolution of UHI, and a reduction of 0.03 in urban albedo would increase the intensity of UHI by about 0.8 °C, thus yielding a more reasonable intensity of UHI relative to the actually observed value. This indicates that the reduction in urban albedo resulted from urban expansion is favorable to the enhancement of UHI. In addition, under the condition of a reduced albedo for urban land use, the long wave radiation flux is larger in urban center than that in the surrounding suburban areas, which further contributes to the development of UHI. Moreover, the simulated near-surface wind fields also suggest that the decrease in urban albedo could increase the wind convergence in the urban area, thus favorable to the enhancement of the air pollution process over the urban area of Beijing.

Key words: Urban heat island, Surface albedo, Land surface process, Radiation flux.