

徐蓉, 苗峻峰, 谈哲敏. 2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 37 (6): 1235–1246, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12128. Xu Rong, Miao Junfeng, Tan Zhemin. 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1235–1246.

南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟

徐蓉¹ 苗峻峰¹ 谈哲敏²

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093

摘 要 本文选取 2011 年 7 月 23 日发生在南京的一次雷暴个例, 利用中尺度数值模式 WRF(Weather Research and Forecasting model), 耦合 Noah/UCM, 并采用 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 每日 4 次的全球分析场资料作为初始场及南京自动站观测数据等, 对南京地区城市下垫面特征对雷暴过程的影响进行了数值模拟。结果表明: 模拟的雷暴发生发展过程与该地区城市下垫面有着密切的联系。首先, 雷暴发生前期, 南京地区热岛效应明显。其次, 城市上空的感热通量较高, 结合城郊下垫面热力差异造成的城市热岛环流, 加强了城区的辐合上升, 为雷暴的形成提供了重要的抬升作用。城市下垫面扩张, 使其上空边界层高度相应提升, 垂直混合高度增加, 有助于对流云的发展。此外, 城市下垫面加强了大气低层的扰动位温, 为雷暴提供了不稳定的层结条件。最后, 城市地表较大的粗糙度使雷暴降水在城区低层的迎风面一侧明显增强。

关键词 城市下垫面 雷暴 数值模拟

文章编号 1006-9895(2013)06-1235-12

中图分类号 P446

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12128

Numerical Simulation of the Impact of Urban Underlying Surface Characteristics on Thunderstorm in Nanjing

XU Rong¹, MIAO Junfeng¹, and TAN Zhemin²

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Key Lab of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract To study the impacts of urban underlying surface characteristics on thunderstorms in Nanjing, a mesoscale numerical model is used to study a specific case occurring on July 23, 2011. The Weather Research and Forecasting (WRF) model, coupled with the Noah/Urban Canopy Model (UCM), used $1^\circ \times 1^\circ$ four times daily global analysis data from the National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System (NCEP FNL) and observation data from the Nanjing automatic weather stations. The simulated results suggest that the occurrence and the development process of the thunderstorm are closely related to urban underlying surface in this region. In particular, the urban heat island effect in Nanjing is evident before the thunderstorm. Moreover, the sensible heat flux over the urban region is significantly higher

收稿日期 2012-08-14, 2012-12-16 收修定稿

资助项目 公益性行业(气象)科研专项经费项目 GYHY201006004

作者简介 徐蓉, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 研究方向: 陆气相互作用和中尺度天气动力学。E-mail: xurongnuist@126.com

通讯作者 苗峻峰, E-mail: miaoj@nuist.edu.cn

than that over the surrounding regions. This, combined with the effect of the urban heat island circulation, caused surface thermal differences between urban and rural areas, which enhanced the convergence over the urban areas and provided the uplift for the formation of the thunderstorm. The expansion of the urban underlying surface is attributed to a larger boundary layer thickness and vertical mixing height, which contributed to cloud development. In addition, the perturbations in the potential temperature of the lower atmosphere were also enhanced by the urban underlying surfaces, offering unstable stratification conditions for the thunderstorm. Finally, larger roughness over the urban underlying surface caused precipitation of the thunderstorm in the windward side of the city of the low-level surface to increase significantly.

Keywords Urban underlying surface, Thunderstorm, Numerical simulation

1 引言

随着城市的发展,一个地区的人口向城市地区相对集中,城市化进程的加剧改变了下垫面的特征,Leff et al. (2004) 研究表明人为因素对地球表面土地覆盖以及土地利用类型造成了显著的改变(如:农田、牧场、都市化地区等)。城市化进程最显著的影响就是城市热岛效应,即城区气温普遍高于周围郊区,形成“高温孤岛”的现象。Manley (1958) 提出了城市热岛(Urban Heat Island, UHI)的概念,此后,各国学者对不同纬度、不同类型的城市作了城、郊气温对比观测,也发现了类似现象。城市化进程不仅影响地表及上空大气的热力属性,也使地气间的动力过程发生改变。研究也发现:城市区域的高大建筑物会影响近地层的风场结构(Huff and Changnon, 1973; Bornstein and Lin, 2000; Shepherd and Burian, 2003; Dixon and Mote, 2003)。

雷暴是在发展强烈的积雨云中产生的,伴有雷电活动和阵性降水的局地强对流天气,是严重的自然灾害之一。它的发生不仅与大气背景有关,还与局地天气气候变化相联系。当城区原本植物覆盖的自然下垫面被替代为砖石、水泥等坚硬密实、干燥不透水的建筑材料后,影响了地表的能量交换,改变边界层的大气特性,进而产生天气现象(Cotton and Pielke, 2007),这种独特性质对雷暴等强对流天气具有重要影响,众多学者对此进行了分析和探讨。Baik et al. (2001) 应用二维数值模式,证实热岛效应可以改变对流边界层结构和局地环流,从而影响对流发展。Gero and Pitman (2006) 通过运用RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 模式,发现悉尼城区土地覆盖类型的改变促使了雷暴的生成。蒙伟光等(2007a) 针对广州地区研究发现 UHI 引起局地气流辐合并引发对流发展,对流降水易于在 UHI 发展较强的时段和位置上发生。

Niyogi et al. (2011) 使用 MM5 (Mesoscale Model 5) 的试验结果表明:当城市被旱地、农田或牧场替换后,区域上的辐合、模拟的基本反射率、表面能量平衡等发生改变,因此城市下垫面特征为其上空雷暴的发展带来显著影响。

南京是长江三角洲的中心城市,近年来城市化进程迅猛发展(王桂玲等, 2007), 2010 年第六次全国人口普查显示南京常住总人口已突破 800 万。江志红和叶丽梅(2010) 研究近十年南京热岛演变发现,高速增长 GDP (Gross Domestic Product) 导致 UHI 现象日趋严重。同时南京的年平均雷暴日为 31.5 d, 属于雷灾高度脆弱区(张旭晖等, 2007; 朱飙等, 2009), 且夏季多发生局地雷暴。目前针对城市化进程加剧对强对流的影响研究主要集中在上海、北京、珠三角等地,对南京的研究较少。本文选择南京作为研究地区,运用数值模式以及观测资料综合分析城市下垫面对雷暴的影响,本研究具有一定的现实意义,也能为城市的发展规划提供理论和科学依据。

2 研究个例描述

2011 年 7 月 23 日下午南京主城区出现雷暴,降水过程发生在 13:30~16:00 (北京时,下同),给部分站点带来短时强降水。由当天的天气形势可以看出(图 1a、b), 500 hPa 西风槽位置偏西,副热带高压占据日本以南的西北太平洋到我国东部地区,588 dagpm 等高线压在江淮之间南部,南京位于高压的顶后部,副高西北侧的西南气流流向江淮地区输送暖湿空气,结合从东北地区延伸出的槽底后部弱的偏北气流相互作用,为对流性天气提供背景条件。850 hPa 关键区处于高压的西南气流控制下,无明显切变线系统。由 08:00 的探空实况(图略)可知,700 hPa 淮河以南大部分地区处于干区。

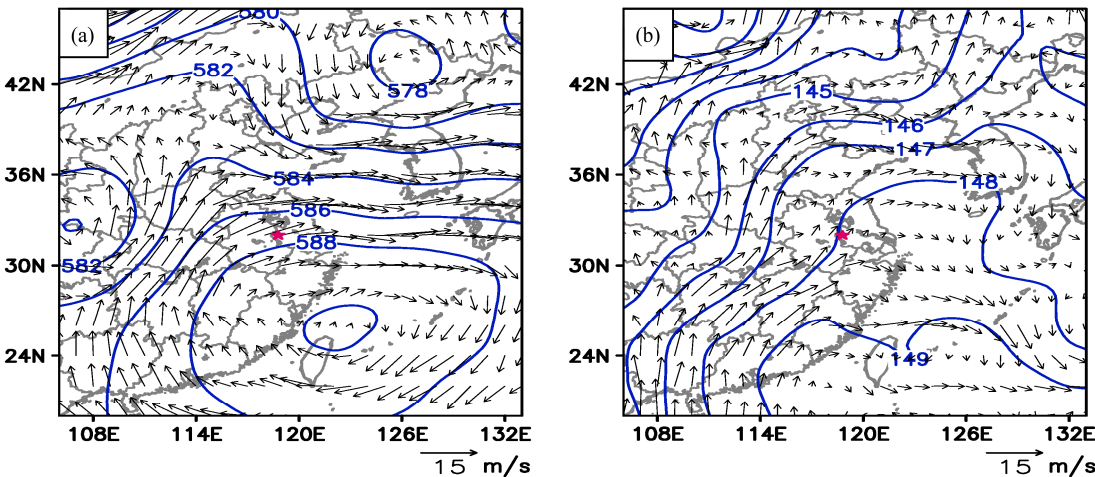


图1 NCEP FNL $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 资料 2011 年 7 月 23 日 08:00 的风场(单位: m/s)和位势高度场(单位: dagpm): (a) 500 hPa; (b) 850 hPa。★表示南京位置
Fig. 1 Winds (m/s) and geopotential height field (dagpm) at 0800 BT (Beijing Time) 23 July 2011 for NCEP FNL $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ data: (a) 500 hPa, (b) 850 hPa. ★ represents the location of Nanjing

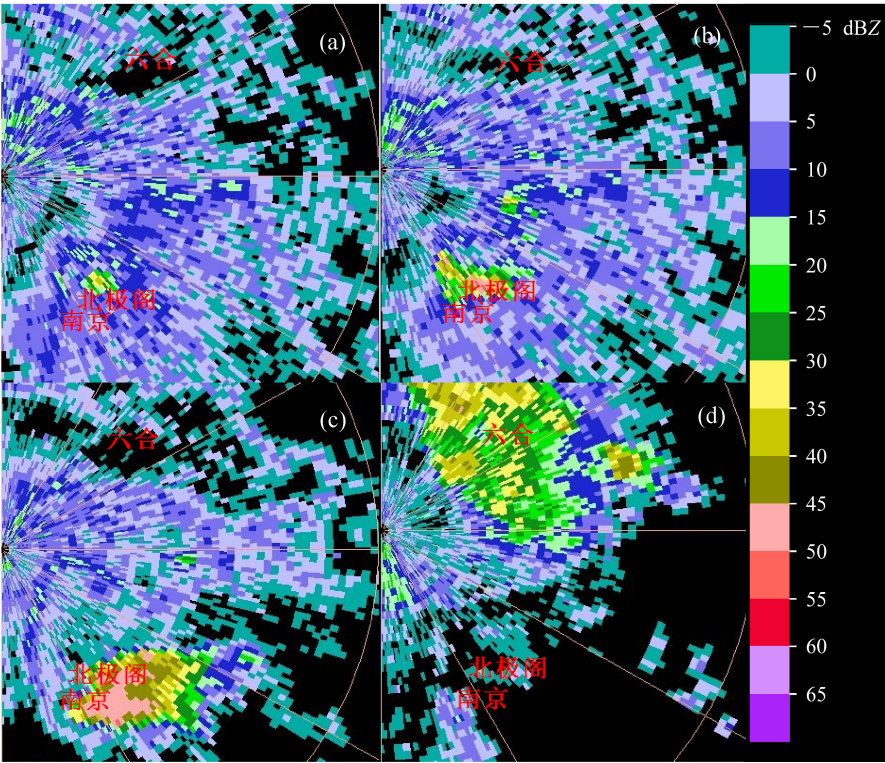


图2 南京雷达观测到的 2011 年 7 月 23 日的雷达回波(单位: dBZ): (a) 13:30; (b) 13:54; (c) 14:36; (d) 15:54
Fig. 2 Radar reflectivity (dBZ) images based on Nanjing radar observation on 23 July 2011: (a) 1330 BT; (b) 1354 BT; (c) 1436 BT; (d) 1554 BT

由当天南京的雷达图可以看到, 13:30 左右有一雷暴单体于主城区(北极阁附近)局地生成(图 2a), 随后逐渐加强(图 2b), 到 14:36 发展旺盛, 1.5° 仰角的反射率因子最高可达 50 dBZ 以上(图 2c), 该单体向东南移动扩散并渐渐削弱, 到 15:54 完全消散(图 2d), 在此期间, 主城区观测得到的逐时最大降水超过 40 mm。另外, 当天下午安徽滁州境内生成一次对流过程, 于 15:00~16:00 移经南

京长江以北的六合附近加强发展并带来降水, 随后向东北方向移出, 本文对该过程未作讨论。
综合来看, 在南京主城区上空的这次雷暴过程发生在偏弱的强迫天气系统中, 其发生发展突然、生命史短、影响范围局地, 同时带来的降水强度较大, 对流降水的形成发展都可能与城市的影响效应有关。本文选择该个例作为研究对象, 分析城市下垫面特征对这次雷暴天气的作用与影响。

3 数值模式与试验方案

3.1 模式定制

本文采用中尺度数值模式 WRF (版本 3.3) 进行数值模拟研究。Chen et al. (2011) 研究表明 WRF 能应用于城市气象的相关影响研究。模式使用四重嵌套方案, 水平格距与格点数分别为 27 km (110×110)、9 km (202×202)、3 km (190×190)、1 km (91×160), 垂直方向按照 σ 位面分为不等距 35 层, 其中 2 km 以下设置 20 层 (Miao et al., 2008, 2009)。模式的嵌套区域及最外层的地形高度分布如图 3a 所示, 最外层中心点为 (32.50°N, 118.21°E), 范围为我国中东大部地区, 提供大的背景强迫。最内层区域为南京及其周边 (图 3b), 图 3c 为其土

地利用类型分布, 其中主要类型为: 农田 (黄色), 城市及建筑用地 (红色), 水体 (蓝色)、针 (阔) 叶林 (绿色)。

模式使用 $1^\circ \times 1^\circ$ 每日 4 次的 NCEP FNL 全球分析场资料, 从 2011 年 7 月 22 日 08:00 开始积分, 积分 48 小时。试验选用的物理参数化方案如表 1 所示, 其中第 3、4 层因水平格距小于 5 km, 所以未使用积云方案。陆面方案中选取 Noah 耦合单层城市冠层模式 (Urban Canopy Model, 简称 UCM), UCM 将城市街区视为二维, 在地表能量平衡和风切变计算中考虑城市几何形状的影响 (Kusaka et al., 2001)。研究表明采用 WRF/Noah/UCM 耦合模式能较好的模拟城市大气边界层结构, 反映城市下垫面特征及城郊差异造成的 UHI 效应 (Miao et al., 2009)。

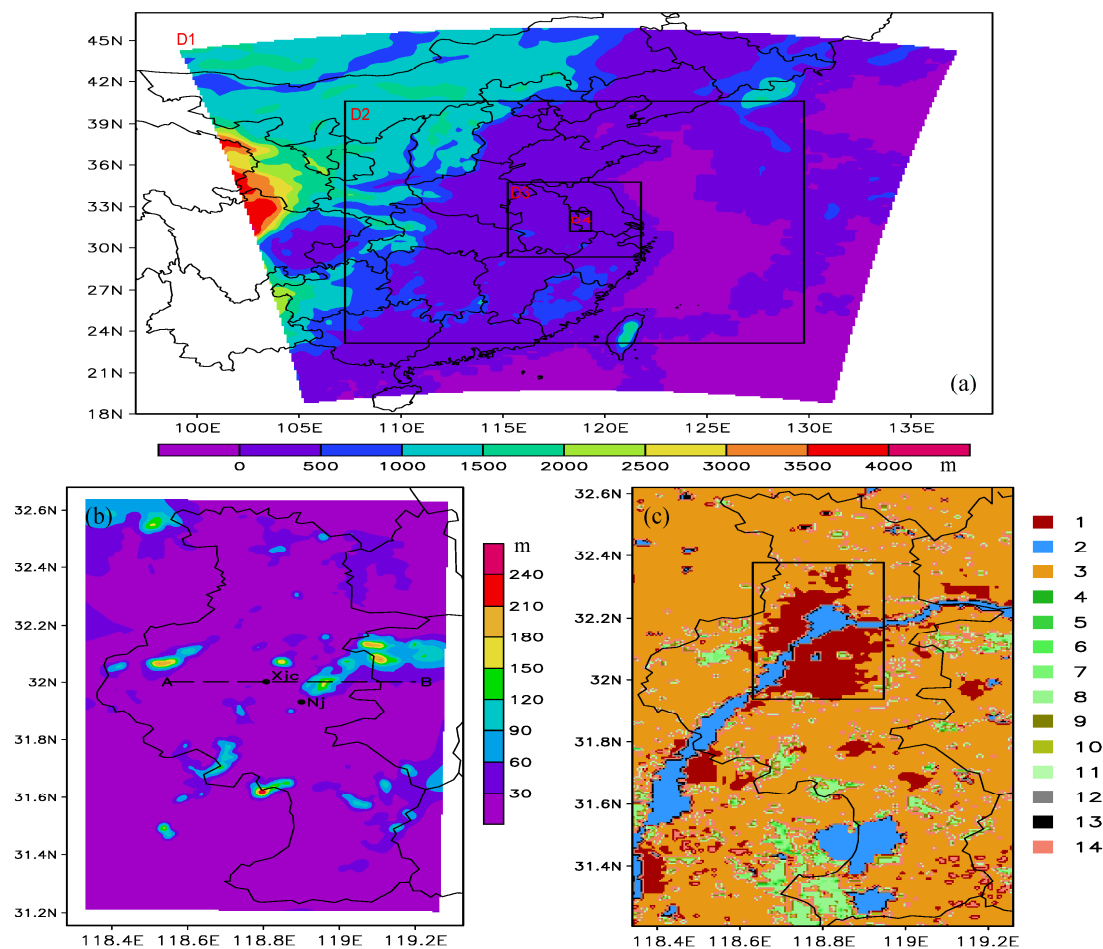


图3 模拟区域示意图: (a) 模式地形 (单位: m) 及嵌套区域, (b) D4 区域地形高度 (单位: m, Xjc 代表小校场站, Nj 代表南京站, AB 连线为文中所取剖面), (c) D4 区域土地利用类型 (1 城市, 2 水体, 3 农田, 4 常绿针叶林, 5 常绿阔叶林, 6 落叶针叶林, 7 落叶阔叶林, 8 混交林, 9 郁闭灌丛, 10 开放灌丛, 11 草原, 12 冰雪, 13 裸地, 14 其他)

Fig. 3 Modeling domain settings of the simulation: (a) Model terrain (m) and domains 1, 2, 3, and 4 (denoted by D1, D2, D3, and D4), (b) model terrain (m) in D4, Xjc, Nj represent Xiaoqiao Chang, Nanjing station respectively, solid line AB indicates the location of the vertical cross section used in this study, (c) land use category in D4 (1 Urban and Built-Up, 2 Water, 3 Croplands, 4 Evergreen Needleleaf Forest, 5 Evergreen Broadleaf Forest, 6 Deciduous Needleleaf Forest, 7 Deciduous Broadleaf Forest, 8 Mixed Forest, 9 Closed Shrublands, 10 Open Shrublands, 11 Grasslands, 12 Snow and Ice, 13 Barren or Sparsely Vegetated, 14 Others)

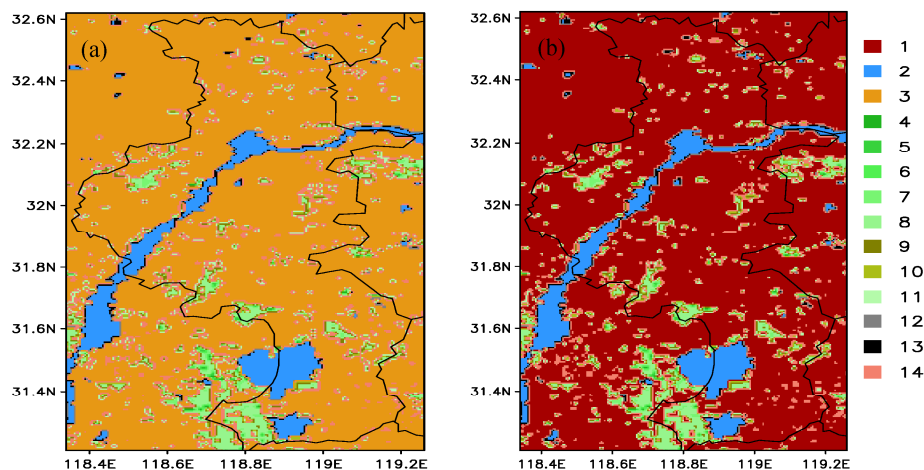


图4 敏感性试验南京地区下垫面的土地利用类型分布: (a) CROP 试验; (b) URBAN 试验 (1 城市, 2 水体, 3 农田, 4 常绿针叶林, 5 常绿阔叶林, 6 落叶针叶林, 7 落叶阔叶林, 8 混交林, 9 郁闭灌丛, 10 开放灌丛, 11 草原, 12 冰雪, 13 裸地, 14 其他)

Fig. 4 Land use category in Nanjing for the sensitivity experiments: (a) Expt CROP; (b) Expt URBAN (1 Urban and Built-Up, 2 Water, 3 Croplands, 4 Evergreen Needleleaf Forest, 5 Evergreen Broadleaf Forest, 6 Deciduous Needleleaf Forest, 7 Deciduous Broadleaf Forest, 8 Mixed Forest, 9 Closed Shrublands, 10 Open Shrublands, 11 Grasslands, 12 Snow and Ice, 13 Barren or Sparsely Vegetated, 14 Others)

表 1 模式参数设置

Table 1 Settings of the simulation experiments	
物理过程	参数化方案
短波辐射	Dudhia 方案 (Dudhia, 1989)
长波辐射	RRTM 方案 (Mlawer et al., 1997)
微物理	Lin 等的方案 (Lin et al., 1983)
积云参数化	Grell-Devenyi 方案* (Grell and Devenyi, 2002)
边界层	MYJ 方案 (Mellor and Yamada, 1982)
近地面层	Monin-Obukhov (Janjic Eta) 方案 (Monin and Obukhov, 1954)
陆面过程	Noah/UCM 方案 (Chen and Dudhia, 2001)

* D3、D4 未使用 Grell-Devenyi 积云参数化方案

3.2 试验方案设计

本文共设计了三种试验方案, 均采用相同的物理参数配置, 分别为:

(1) CNTL 试验: 控制试验。该试验采用 Boston University/NCEP 提供的 MODIS 30" 的下垫面格点数据, 能够相对准确的体现近年来南京的土地使用情况。

(2) CROP 试验: 敏感性试验 1。该试验将最内层的城市类型下垫面全部替换为最内层占土地利用率最大的类型: 农田。与控制实验对比可以反映当前城市下垫面在雷暴发生发展过程的作用, 图 4a 为其下垫面土地利用类型分布。

(3) URBAN 试验: 敏感性试验 2。该试验将最内层的农田类型下垫面全部替换为城市, 这是为了进一步考虑城市下垫面极端扩张后对雷暴的可能影响, 图 4b 为其下垫面土地利用类型分布。

4 模拟结果检验

本次雷暴过程中, 试验模拟的降水较实际提前

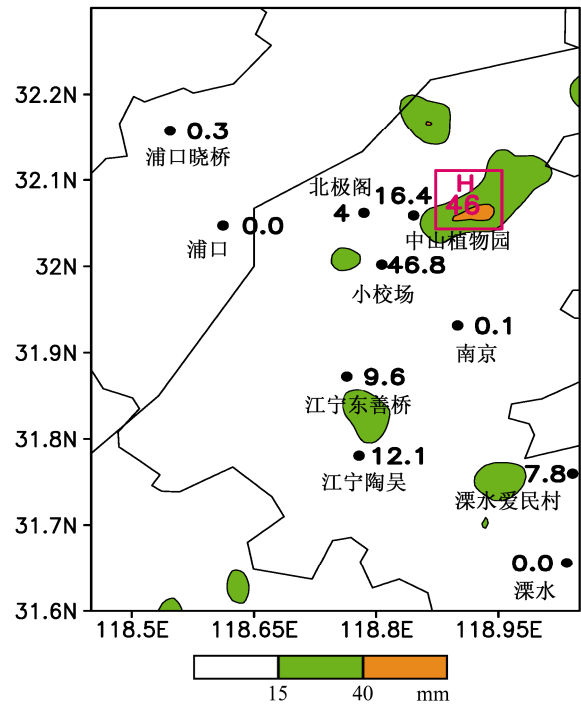


图5 2011 年 7 月 23 日 12:00~16:00 观测 (数字) 与 CNTL 试验模拟 (阴影, H 表示强降水中心) 的累计降水 (单位: mm)

Fig. 5 Accumulated precipitation (mm) between 1200 and 1600 BT on 23 July 2011 from the observation (numbers) and Expt CNTL (CONTROL) simulation (color shading, H represents the heavy rain center)

1~2 小时左右。本文选取了南京市 10 个自动站资料, 给出 2011 年 7 月 23 日 12:00~16:00 累计降水量观测值与模拟值的对比 (图 5)。由图可见, 观测站实际降水最大值达到 46.8 mm, 位于小校场自动

站(站号: M6800, 经度: 118.81°E , 纬度: 32.00°N), CNTL 试验模拟的强降水中心值为 46 mm, 在降水强度上与实际观测相近, 中心位置略偏向小校场的东北部。江宁、溧水区域也模拟出降水过程, 基本能反映出该主城区雷暴过程的强降水分布特征。

图 6a-c 分别给出 7 月 23 日, 控制试验 CNTL 的模拟结果与小校场站观测结果逐小时的温度、地面气压、相对湿度随时间变化的对比情况。由图可见, 随着雷暴系统逐渐移近, CNTL 模拟的气象要素场表现为温度骤降, 气压涌升, 以及相对湿度明显上升。在温度场上, CNTL 模拟的温度下降时间比实际晚 2 小时, 且最高温度较实际偏低了 1°C 。在气压变化上, 模拟的最低值较观测偏低 1 hPa, 上升时间比实际推迟 1 小时。相对湿度的时间变化比较贴近, 都是从 13:00 左右相对湿度迅速上升, 但没有体现出实际观测在 16:00 左右出现的峰值。模拟误差存在的原因可能与模式的参数设置相关。但

总体而言, CNTL 模拟结果与实况变化趋势大体一致, 能够贴切的反映出此次雷暴过境的特征。

5 城市下垫面对雷暴过程的影响

5.1 雷暴前期 UHI 特征

UHI 可以通过比较城市与郊区不同的站点资料粗略表示。选取小校场站为南京主城区的代表站, 选取 2008 年移至城郊的南京站(站号: 58238, 经度: 118.90°E , 纬度: 31.93°N)作为郊区站, 用实况气温差值反映热岛强度, 由图 7 可见上午 06:00~12:00 有正的热岛强度, 最高达到 1°C 。随后由于雷暴过程给小校场站造成强降水, 逐时最大降水出现在 14:00 (图 7 中三角表示), 降低城区地表温度, 使热岛强度表现为负值。图 8 给出了上午 10:00 雷暴发生前, CNTL 模拟的模式第一层(约 50 m)的温度场和风场的演变情况。可以看出, 局地雷暴发生前期, 以长江为分界, 江南的主城区以及江北的

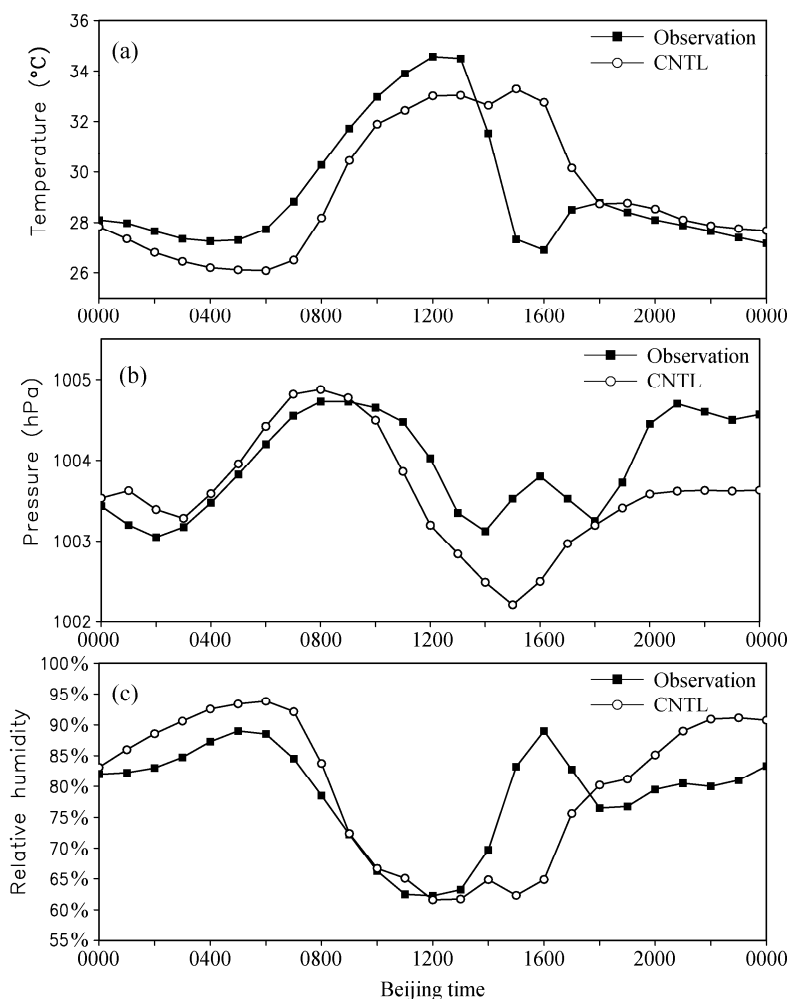


图 6 CNTL 试验模拟结果与实际观测的站点资料比较: (a) 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$); (b) 气压 (单位: hPa); (c) 相对湿度

Fig. 6 Comparisons between expt CNTL experiment and the observation (OBS): (a) Temperature ($^{\circ}\text{C}$); (b) pressure (hPa); (c) relative humidity

浦口一带表现为明显的暖中心, 尤其是主城区, 温度最高达 31°C 以上, 比邻近郊区要高 $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 左右, 主城区上空由东南风控制, 风速较小, 城市上空的热岛效应十分明显。

WRF 能模拟各气象要素场的垂直结构, 可以清晰看出雷暴前期热岛环流三维结构。图 9 为 10:00 沿图 3b 中 AB 连线 (32.00°N , $118.55^{\circ}\sim 119.21^{\circ}\text{E}$) 的位温场和风场的剖面图。由于垂直速度远小于水平风速, 在计算垂直风矢量时选取纬向风 u 与扩大

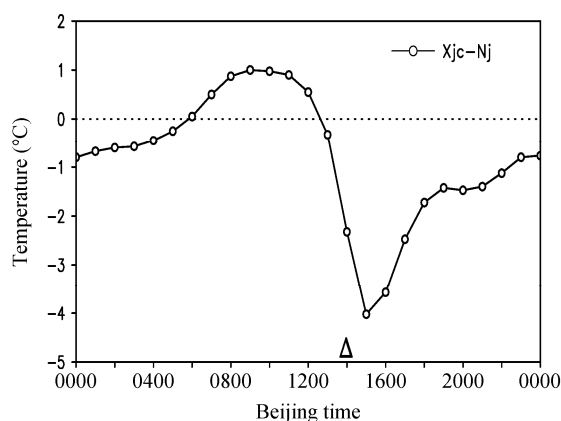


图 7 2011 年 7 月 23 日城市观测站 (小校场站, 简称 Xjc) 与郊区观测站 (南京站, 简称 Nj) 描述的热岛强度 (Δ 表示小校场站出现逐时最大降水时刻)

Fig. 7 UHI intensity depicted by surface temperature differences between urban (Xiaojiaochang, Xjc) and rural (Nanjing, Nj) sites on 23 July 2011 (Δ represents the occurrence time of hourly maximum precipitation at Xjc)

20 倍的垂直风 w 合成以便显示, 图中的红条代表城市, 蓝条代表长江, 灰条代表小山体。分析发现城市下垫面上空表现为相对的位温高值中心, 比周围约高 $0.5\sim 1\text{ K}$ 左右。位温高值区上对应有较强的上升运动, 118.85°E 附近上空垂直速度可超过 10 cm s^{-1} , 到 $1.1\sim 1.6\text{ km}$ 高度上气流向两侧辐散。流经城区东侧郊区上空 (119.20°E 附近) 出现较强的下沉气流, 中心值达 -15 cm s^{-1} , 低层则是一个由

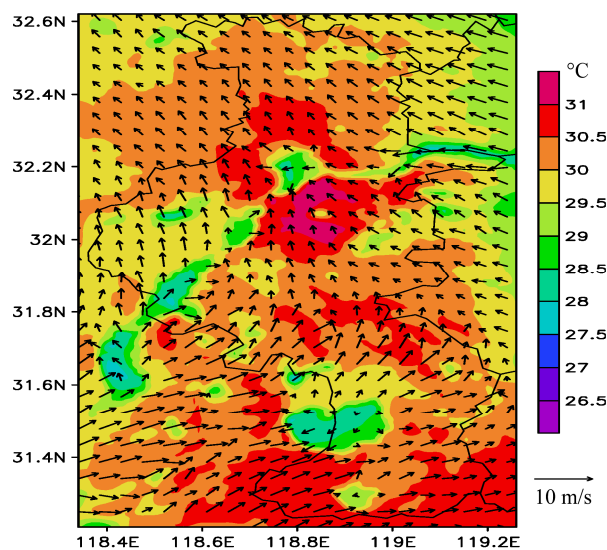


图 8 2011 年 7 月 23 日 10:00 CNTL 试验模式第一层 (约 50 m) 温度场和风场

Fig. 8 Temperature and wind fields at the first model level (about 50 m) at 1000 BT 23 July 2011 in expt CNTL

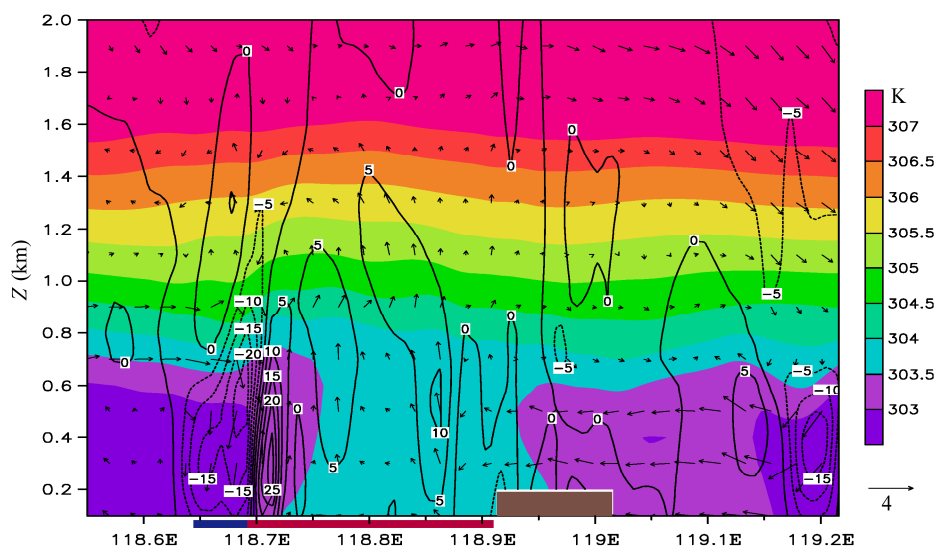


图 9 2011 年 7 月 23 日 10:00 CNTL 试验沿图 3b 中 AB 的位温场 (阴影, 单位: K), 东西向环流 (箭头矢量) 和垂直速度 w (等值线, 单位: cm s^{-1}) 垂直剖面。红条、蓝条、灰条分别为 CNTL 中城市下垫面、长江和小山体

Fig. 9 Vertical cross section (0–2 km) through line AB shown in Fig. 3b at 1000 BT 23 July 2011 depicting potential temperature (color shades, K), wind field (vector), and vertical velocity (contour, cm s^{-1}). The locations of urban areas, the Yangtze River, and the hill region in expt CNTL are outlined respectively in red, blue, and grey along the x-axis

郊区吹向城市的风。而在城区西侧(118.70°E 附近),结合长江水体造成的水陆热力差异作用,进一步加强城市上空气流的上升运动,最大速度达 25 cm s^{-1} ,对应水体上方也有较强的下沉运动。此次雷暴发生前期,由城郊下垫面热力差异导致的典型热岛环流可为雷暴的形成提供低空风场辐合和较好的组织抬升机制,因此南京地区的这次雷暴过程与 UHI 存在较强的关联。

5.2 城市下垫面对近地面 2 m 温度、地表通量、边界层高度的影响

城市特殊的下垫面特征使其上的温度、热通量等都区别于郊区。地表能够通过感热和潜热通量不断加热,来影响边界层的大气结构(万齐林, 2000),进而对强对流天气产生作用。针对最能集中体现城市下垫面的影响的区域(图 3c 中矩形区域所示,简称核心城区),分析影响效应。

5.2.1 近地面 2 m 温度

由图 10a 可以看出,三个试验均为白天高于夜晚,峰值基本出现在正午 12:00 左右,但 URBAN 试验值更高,达到 33°C 左右,比控制实验高出 1°C。在 15:00~16:00,URBAN 比 CNTL 试验低了 0.6~1°C(图 10b),与 URBAN 在该时刻模拟出了较大的降水相关。从差值序列上可见,将城市变为农田后,近地面温度明显降低,而城市极端扩张后则明显升高,体现了城市下垫面上高温的特征。

5.2.2 感热通量

感热通量能够反映大气湍流热交换的状况。图 10c、d 为感热通量时序图,将城市变为农田后,白天的感热通量明显下降,差值在 13:00 可达 85 W m^{-2} ,表明城市下垫面使白天时段的感热交换增大。URBAN 与 CROP 的差值场上也有同样的变化特点。与郊区相比,城市下垫面多由坚硬密实、热容量小的建筑材料组成,受太阳辐射加热后地表升温快,对低层大气传输热量相对较多,其感热通量较大,迫使城区上方的空气块迅速地被加热抬升,并且引发周围空气的补偿性辐合,使大气低层形成了辐合中心,且感热的输送也使得不稳定能量易于释放。

5.2.3 潜热通量

潜热通量呈现与感热通量相反的特征(图 10e、f),在白天,CROP 试验均值最高,而 URBAN 试验最低。城市表面水汽含量较少,地表蒸发、植被蒸腾作用被削弱,导致其上空潜热通量较农田下垫

面小。但应注意到,此时低层风场以偏南气流为主,利于将海上暖湿气流输送至南京,并且感热通量加强有助于水汽辐合,使区域内不稳定能量积聚,所以仍有产生对流天气的可能。

5.2.4 城市下垫面对边界层高度的影响

边界层高度(PBL height)常用于判断边界层的发展是否有利于云的形成。从变化趋势上看(图 10g),白天受太阳短波辐射加热后,地表与边界层之间热交换增强,三组试验白天边界层均比夜间高,峰值出现在 11:00~12:00。由差值序列(图 10h)可以看出,城市下垫面特征对边界层高度的影响十分显著,城区的扩张使边界层相应升高,对流高度增加,水汽交换也会相应加强。注意到 URBAN 与 CROP 的差值在 15:00~16:00 为负值,这也是由于 URBAN 试验在该时段模拟降水较强造成的。对比可见,城市下垫面更易增强垂直混合运动,当边界层高度超过抬升凝结高度时将有助于云的生成,经过一系列的云微物理过程后利于雷暴等强对流系统在其上空发展。

5.3 城市下垫面对扰动位温的影响

图 11a 为 CNTL 与 CROP 的扰动位温的差异,可以看出城市下垫面使低层扰动位温增强,城市上空出现凸出的正中心,可达到 0.6 K。从 URBAN 与 CNTL 的差值场(图 11b)可见,当极端城市化以后,热岛带来的热扰动使大气低层扰动位温普遍加大。城市下垫面处较大的扰动位温使位温的垂直递减率增强,降低大气的静力稳定度。城区上空的稳定性弱于郊区,这为对流天气的发生发展提供有利的层结条件,使底层水汽、能量能够向上垂直输送。在扰动气流相互作用下有助于对流云形成,从而促使短历时对流降水天气:雷暴的发生与发展。

5.4 城市下垫面对雨水条件的影响

为了分析城市下垫面对雷暴降水过程的动力影响,图 12a-f 给出 CNTL、URBAN 试验 13:00~15:00 分别沿着 AB 剖面的散度、东西向环流以及雨水混合比剖面图。CNTL 试验中 13 时在城区东侧雨水混合与上升运动较强,14:00 降水系统辐合中心强度可达 $-30 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,到 15:00 该区域降水减弱消失。URBAN 试验中,14:00 与 15:00 都在原城市下垫面的偏东一侧有较大的降水,15:00 在 119.10°E 附近有强烈的降水,雨水混合比达到 1 g kg^{-1} 以上,辐合强度增大到 $-40 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

两试验比较可以看出,与 CNTL 试验相比,

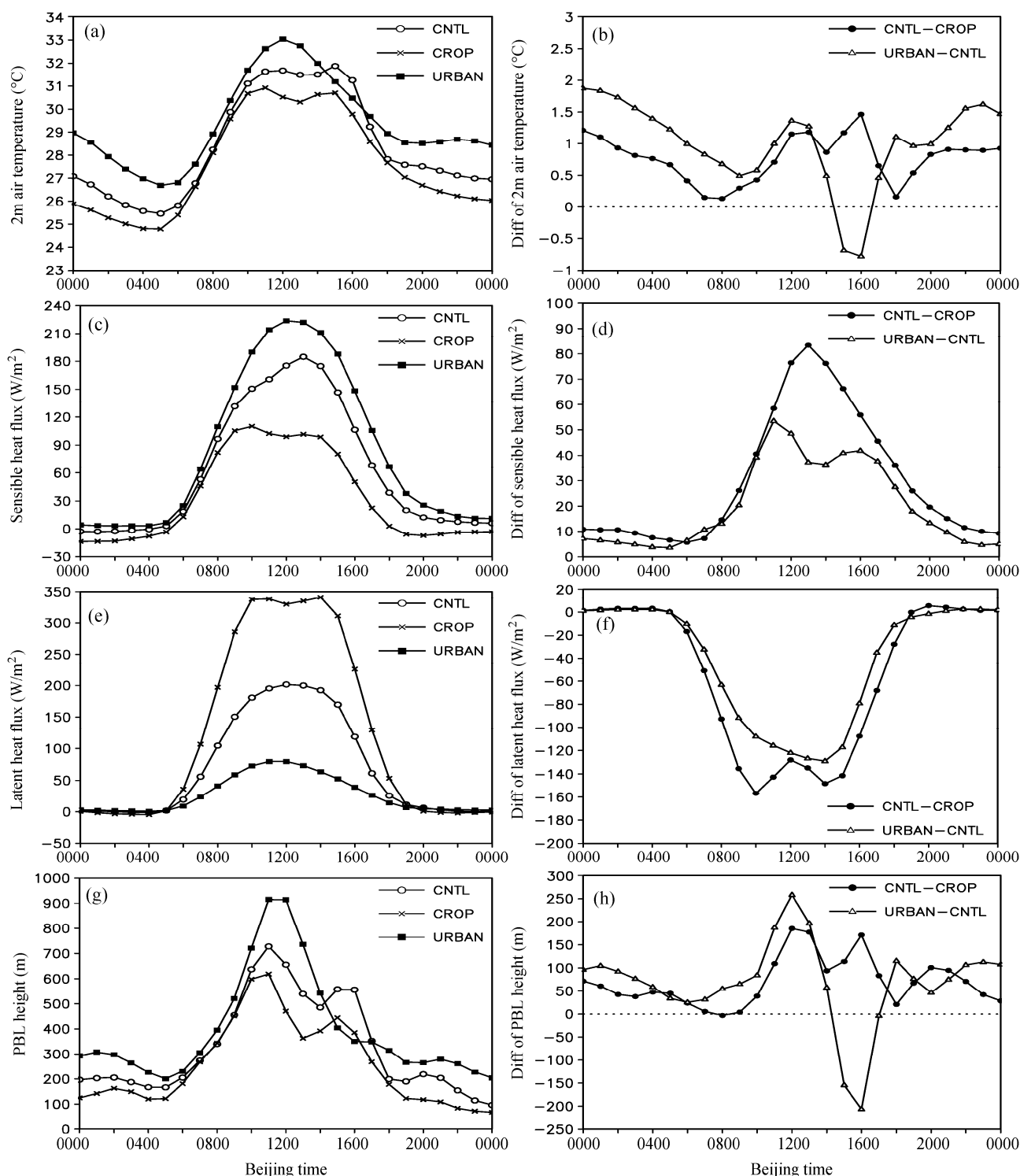


图 10 2011 年 7 月 23 日, (a) 三组试验 (CNTL、CROP、URBAN) 模拟的图 3c 中矩形区域平均的近地面 2 m 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 及 (b) 其试验差值 (CNTL-CROP, URBAN-CNTL) 的逐时变化; (c, d) 同图 (a, b), 但为地表向上感热通量 (单位: W m^{-2}); (e, f) 同图 (a, b), 但为地表向上潜热通量 (单位: W m^{-2}); (g, h) 同图 (a, b), 但为边界层高度 (单位: m)

Fig. 10 (a) Hourly area-averaged 2-m air temperature ($^{\circ}\text{C}$) in three experiments (CNTL, CROP, URBAN) for the rectangle illustrated in Fig. 3c on 23 July 2011 and (b) their differences (CNTL-CROP, URBAN-CNTL); (c, d) as in (a, b), but for surface sensible heat flux (W m^{-2}); (e, f) as in (a, b), but for surface latent heat flux (W m^{-2}); (g, h) as in (a, b), but for PBL height (m)

URBAN 试验在城市迎风侧的雨水混合比值较高, 降水较多, 并且辐合中心强度较大。蒙伟光等

(2007b) 认为当雷暴系统移经城市时, 低层的辐合增强与城市区粗糙度的增大有着直接联系。低层

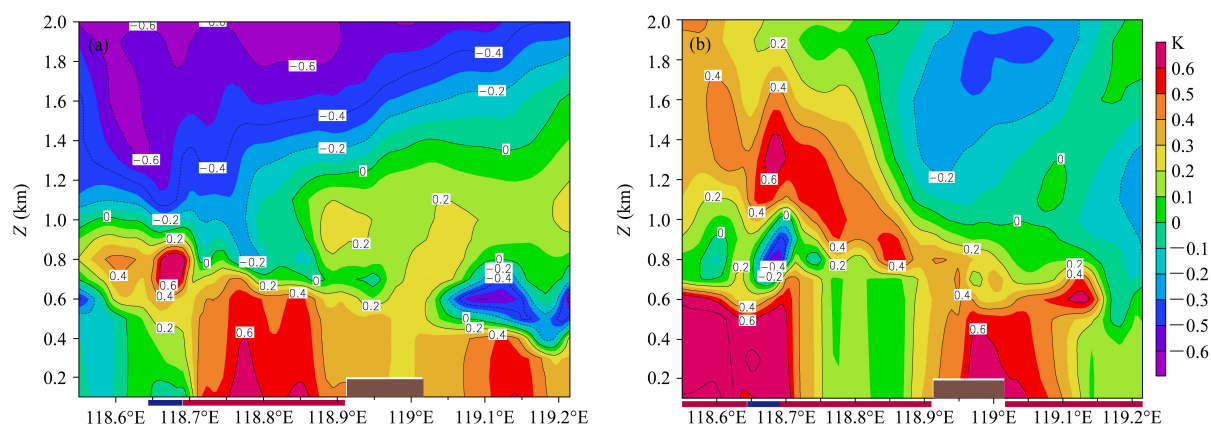


图 11 2011 年 7 月 23 日 10:00 沿图 3b 中 AB 的扰动位温差异 (单位: K) 的垂直剖面: (a) CNTL-CROP; (b) URBAN-CNTL。红条、蓝条、灰条分别为 CNTL、URBAN 中城市下垫面, 长江和小山体

Fig. 11 Cross sections (0–2 km) through line AB shown in Fig. 3b at 1000 BT 23 July 2011 depicting the differences of perturbation potential temperature (K) between two experiments: (a) CNTL-CROP; (b) URBAN-CNTL. The locations of the urban areas, the Yangtze River, and the hill region in expts CNTL, URBAN are outlined respectively in red, blue, and grey along the x -axis

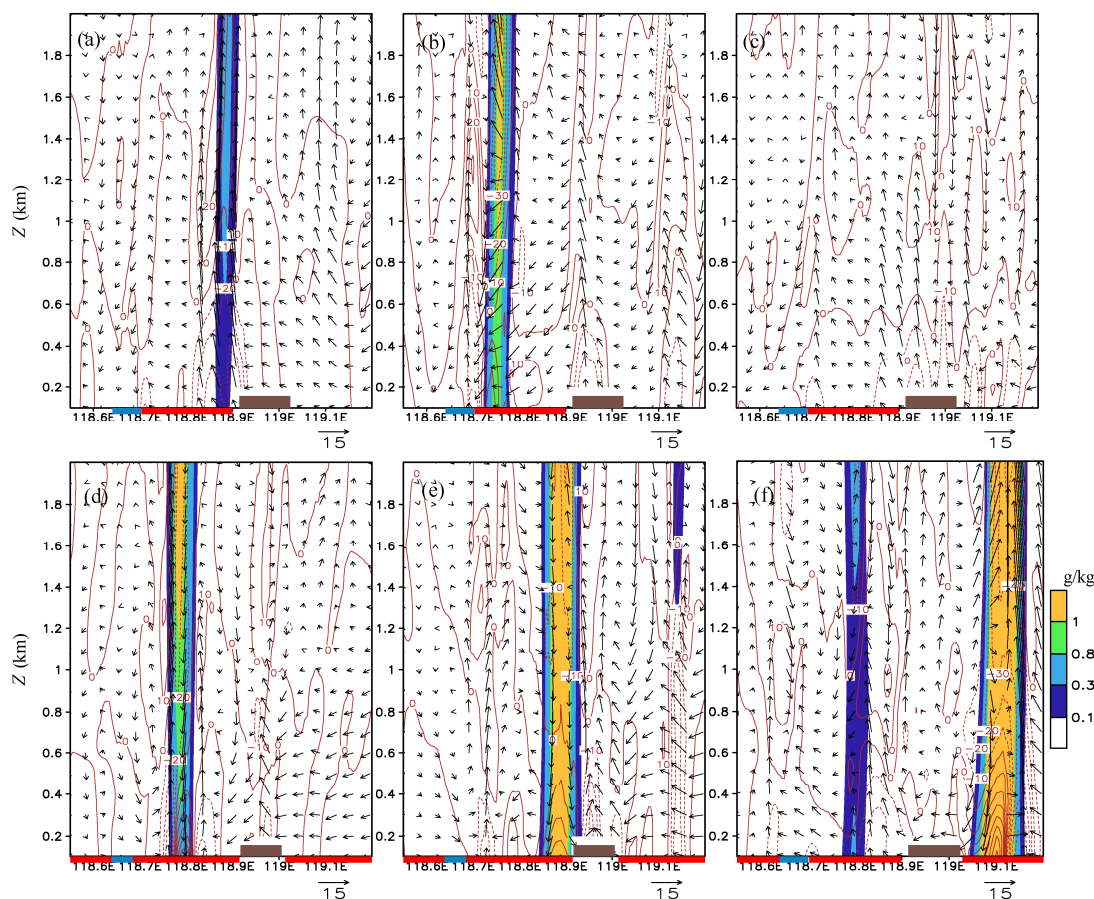


图 12 2011 年 7 月 23 日沿图 3b 中 AB 的散度 (等值线, 单位: 10^{-4} s^{-1})、东西向环流 (箭头矢量) 和雨水混合比 (阴影, 单位: g kg^{-1}) 的垂直剖面: (a) CNTL 13:00; (b) CNTL 14:00; (c) CNTL 15:00; (d) URBAN 13:00; (e) URBAN 14:00; (f) URBAN 15:00。红条、蓝条、灰条分别为 CNTL、URBAN 中城市下垫面、长江和小山体

Fig. 12 Vertical cross sections (0–2 km) through line AB shown in Fig. 3b on 23 July 2011 depicting divergence (contour, 10^{-4} s^{-1}), wind field (vector), rain water mixing ratio (color shadings) in expts (a, b, c) CNTL and (d, e, f) URBAN: (a, d) 1300 BT, (b, e) 1400 BT, (c, f) 1500 BT. The locations of the urban areas, the Yangtze River, and the hill region in expts CNTL, URBAN are outlined respectively in red, blue, and grey along the x -axis

辐合中心的增大也能够引起强的上升运动, 并引发新的单体的发展。Simpson (2006) 研究了城市表面粗糙度的作用发现: 由于城市表面粗糙度大, 增强了城市表面应力, 造成城市迎风面的辐合增加, 背风面减小, 从而造成迎风一侧的降水增多。因此, 城市群中立体的建筑物, 如高楼大厦, 使其与农田下垫面相比呈现较大的粗糙度, 低层气流通过上方时减速滞留, 影响该区域上空系统的动力结构。这种对低层风场的阻滞效应, 使湿空气在城市上方堆积, 加上雷暴系统向外流出的气流与城市下垫面上热力环流的相互作用, 造成气流在城市迎风一侧产生辐合抬升, 雨水混合比增强, 从而导致该区域的降水增多, 并使雷暴系统降水的落区与强度发生了改变。

6 总结

本文利用 WRF 耦合 Noah/UCM 模式, 对 2011 年 7 月 23 日的雷暴个例进行模拟, 分析了南京地区城市下垫面特征对其的影响。文中共设计了三组试验: CNTL 控制试验, 及 CROP、URBAN 敏感性试验, 通过将三组试验的不同物理量场进行对比、分析与讨论, 得出以下主要结论为:

(1) 南京城区上空的局地雷暴发生前期, 其热岛效应明显, 且热力环流显著, 说明 UHI 与这次雷暴过程存在较强的联系。

(2) 与草木植被不同, 城市覆盖的下垫面有着独特的热力性质。随着以城市为主的下垫面扩张后, 其上空与大气的直接热交换增强, 近地面气温明显提升, 向上传输的感热通量显著升高, 能够促使城市上空的暖空气上升, 引发周围空气的补偿性辐合, 为雷暴的发生提供了抬升机制。由于蒸发作用减弱, 潜热通量呈现与感热通量相反的特征。城市下垫面的扩张使得边界层高度相应升高, 加深对流高度, 垂直混合运动加强, 有利于城区上空对流的生成。

(3) 城郊下垫面的热力差异还会造成大气低层的扰动位温增强, 降低大气的静力稳定度, 有助于底层的水汽与能量能够向上输送, 为雷暴的发生发展提供有利的层结条件。

(4) 城市下垫面粗糙度较大, 当城市扩张后, 在其迎风一侧出现较强的辐合上升运动, 水汽垂直输送增强, 导致雷暴过程降水在城市迎风区域增多, 且强度较大。

参考文献 (References)

- Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. 2001. Dry and moist convection forced by an urban heat island [J]. *J. Appl. Meteor.*, 40: 1462–1475.
- Bornstein R, Lin Q. 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies [J]. *Atmos. Environ.*, 34: 507–516.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface—hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity [J]. *Monthly Weather Review*, 129 (4): 569–585.
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modeling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *Int. J. Climatol.*, 31: 273–288.
- Cotton W R, Pielke R A Sr. 2007. *Human Impacts on Weather and Climate* (2nd ed.) [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Dixon P G, Mote T L. 2003. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42: 1273–1284.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (1): 3077–3107.
- Gero A F, Pitman A J. 2006. The impact of land cover change on a simulated storm event in the Sydney basin [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45: 283–300.
- Grell G A, Devenyi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (14): 1693.
- Huff F A, Changnon S A Jr. 1973. Precipitation modification by major urban areas [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 54: 1220–1232.
- 江志红, 叶丽梅. 2010. 近十年南京城市热岛演变的遥感研究 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 2 (2): 148–154.
- Jiang Zhihong, Ye Limei. 2010. A study of the urban heat island changes of Nanjing in the past decade based on remote sensing [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2 (2): 148–154.
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 101: 329–358.
- Leff B, Ramankutty N, Foley J A. 2004. Geographic distribution of major crops across the world [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB1009, doi:10.1029/2003GB002108.
- Lin Y L, Farley R, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 1065–1092.
- Manley G. 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 84: 70–72.
- 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 2007a. 热带气旋背景条件下的城市效应与广州夏季雷暴 [J]. *中国科学 D 辑 (地球科学)*, 37 (12): 1660–1668.
- Meng W G, Yan J H, Hu H B. 2007a. Urban effects and summer thunderstorms in a tropical cyclone affected situation over Guangzhou city [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences) (in Chinese)*, 37 (12):

- 1660–1668.
- 蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 2007b. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响 [J]. 大气科学, 31 (2): 364–372. Meng W G, Yan J H, Hu H B. 2007b. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River Delta [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 364–372.
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid Problems [J]. Rev. Geophys. Space Phys., 20 (4): 851–875.
- Miao J F, Chen D, Wyser K, et al. 2008. Evaluation of MM5 mesoscale model at local scale for air quality applications over the Swedish west coast: Influence of PBL and LSM parameterizations [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 99 (1–2): 77–103.
- Miao J F, Wyser K, Chen D, et al. 2009. Impacts of boundary layer turbulence and land surface process parameterizations on simulated sea breeze characteristics [J]. Annales Geophysicae, 27 (6): 2303–2320.
- Miao S, Chen F, LeMone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. J. Appl. Meteor., 48: 484–501.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave [J]. Journal of Geophysical Research, 102: 16663–16682.
- Monin A S, Obukhov A M. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere [J]. Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz Inst, 24 (151): 163–187.
- Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al. 2011. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 50: 1129–1144.
- Shepherd J M, Burian S J. 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city [J]. Earth Interactions, 7: 1–17.
- Simpson M D. 2006. Role of urban land use on mesoscale circulations and precipitation [D]. Ph. D. dissertation, North Carolina State University, 294pp.
- 万齐林. 2000. 一个确定大气近地层湍流输送的计算方案 [J]. 热带气象学报, 16 (1): 63–66. Wan Qilin. 2000. A method for determining turbulent transfer in the atmospheric surface layer [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 16 (1): 63–66.
- 王桂玲, 蒋维楣, 魏鸣. 2007. 城市热岛效应的卫星遥感分析 [J]. 南京气象学院学报, 30 (3): 298–304. Wang Guiling, Jiang Weimei, Wei Ming. 2007. An assessment of urban heat island effect using remote sensing data [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 30 (3): 298–304.
- 张旭晖, 吴洪颜, 许祥, 等. 2007. 江苏省雷暴灾害脆弱性分析 [J]. 气象科学, 27 (5): 536–542. Zhang Xuhui, Wu Hongyan, Xu Xiang, et al. 2007. An analysis on thunderstorm vulnerability in Jiangsu Province [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (5): 536–542.
- 朱飙, 王振会, 李春华, 等. 2009. 江苏雷暴时空变化的气候特征分析 [J]. 气象科学, 29 (3): 849–852. Zhu Biao, Wang Zhenhui, Li Chunhua, et al. 2009. Analysis of climate spatial temporal character of thunderstorm over Jiangsu Province [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (3): 849–852.