

城市化对北京单次极端高温过程影响的数值模拟研究

张雷¹ 任国玉^{2,3} 苗世光⁴ 张爱英⁵ 孟凡超⁶ 朱士超⁷ 任玉玉² 索南看卓³

1 中国气象局 国家气象信息中心, 北京 100081

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

3 中国地质大学环境学院大气科学系, 武汉 430074

4 北京城市气象研究院, 北京 100089

5 北京市气象服务中心, 北京 100089

6 天津市气候中心, 天津 300074

7 安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230031

摘要 城市化对高温热浪的频次和强度具有重要影响,但目前对于城市化影响高温热浪过程的机理了解还不充分。本文利用WRF模式,对2010年7月2-6日北京一次高温过程进行了模拟,分析了城市化对此次高温过程的影响机理。采用优化后的WRF模式,能够模拟出北京连续5日高温的特征和城市热岛强度的变化。城市下垫面的不透水性决定了城区2m相对湿度低于乡村,削弱了城区通过潜热调节城市气温的能力。日落后,城市感热通量下降缓慢,城区降温速率小于乡村,夜间边界层稳定、高度低,风速小,抑制了城乡之间能量的传输,形成了夜间强的城市热岛强度,相对乡村显著增幅了夜间高温。日出后城乡地面感热通量、潜热通量迅速上升,边界层稳定性下降。午后,城市下垫面分别为地表感热通量和潜热通量的高、低值中心,通过潜热调节气温的能力被削弱;边界层稳定性降低,有利于能量的垂直扩散;此时,城市热岛强度小于夜间。因此,北京城市下垫面形成了明显的城市热岛效应,加重了城区极端高温事件的强度。此外,在这次高温热浪期间,中国东部大部分地区受到大陆暖高压控制,晴空少云,西北气流越山后形成焚风效应,是北京地区高温热浪形成的环流背景。

关键词 极端高温 城市热岛 数值模拟 WRF 北京

文章编号 2019229A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19229

Numerical Simulation of Urban Effect on a Single Extreme High Temperature Event in Beijing

ZHANG Lei¹, REN Guoyu^{2,3}, MIAO Shiguang⁴, ZHANG Aiyong⁵, MENG Fanchao⁶, ZHU Shichao⁷,
REN Yuyu², and SUONAN Kanzhuo³

1 National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Department of Atmospheric Science, School of Environmental Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074

4 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

收稿日期 2019-10-15; **网络预出版日期**

作者简介 张雷,男,1980年出生,博士,从事气候变化和极端事件研究, E-mail: zhanglei3505962@126.com

通讯作者 任国玉,男,研究员,从事气候变化和极端事件研究, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发项目(2018YFA0605603)、国家自然科学基金(41575003; 41775058)

5 Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089

6 Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

7 Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

Abstract Urbanization has an important influence on the frequency and intensity of heat waves, but the mechanism of urbanization affecting the process of high temperature is not fully understood. The Weather Research and Forecasting (WRF) model is used to simulate a summer high-temperature process in Beijing from 2 to 6 July 2010. This paper reports the main results of urbanization effect on surface air temperature of urban areas in the heat wave process. It is found that the optimized WRF model is able to simulate the temporal characteristics of the 5 consecutive days of high temperature and the variation of I_{UHI} (urban heat island intensity) in Beijing. The impermeability of urban underlying surface determines that the 2m relative humidity of urban area is lower than that of rural area, which weakens the ability of urban area to regulate surface air temperature through latent heat. After sunset, the urban sensible heat flux decreases slowly, and cooling rate of urban area is less than that of rural area. At night, the structure of boundary layer is stable and the height of it is low, and the wind speed is small. In this case, the energy transmission between urban and rural areas is restrained, forming a strong urban heat island at night. After sunrise, sensible heat flux and latent heat flux of urban and rural land surface rise rapidly, and the stability of boundary layer decreases. In the afternoon, the urban underlying surface is in favor of the high and low value centers of sensible heat flux and latent heat flux respectively, with the ability to regulate temperature through latent heat weakened. It's conducive to the energy vertical transfer that the stability of the boundary layer decrease. The I_{UHI} in the afternoon is smaller than that in evening. Therefore, the obvious urban heat island effect created by the urban underlying surface in Beijing has increased the strength of the extreme high temperature event. In addition, in this process of heat wave, most of the eastern part of China is controlled by the continental warm high pressure with clear skies and few clouds, and the northwesterly flowing over the mountains forms Fohn effect, which is the circulation background of heat wave formation in Beijing.

Keywords: Extreme high temperature, Urban heat island, Numerical simulation, WRF, Beijing

1 引言

持续高温是夏季常见的灾害性天气,严重影响居民的身体健康和日常生活。近40年来,我国经济快速发展,城市人口迅速增加,城区面积不断扩大。在全球气候变暖和城市化的背景下,研究城市化对极端高温影响的机理,对城市的发展规划、宜居性及防灾减灾具有重要意义(Alexander et al., 2006; 徐祥德, 2002)。

夏季高温事件的发生及影响一直受到广泛关注(谢庄等, 1999; 孙建华等, 1999; 王迎春等, 2003)。随着城市规模的不断扩大,城市下垫面对近地面气温和地表能量平衡造成显著影响(Ren et al., 2007; 蒋维楣等, 2010; 苗世光等, 2010; 刘树华等, 2013)。在城市化对极端高温事件影响方面,从观测分析和数值模拟两个角度,已开展了大量研究工作(胡小明等, 2005; 季崇萍等, 2006; 李兴容等, 2007; 刘伟东等, 2016; 易翔等, 2016; 王咏薇等, 2018)。郑祚芳等(2006)的研究表明,1998-2002年北京城市热岛效应对夏季高温强度有明显的增幅作用。张雷等(2011)指出城市化使北京气象站夜间的最低气温明显上升,暖夜日数显著增加。Yang et al. (2013)利用高密度自动气象站观测数据,清晰展现了北京城区热岛效应时空特征,热岛强度在冬季、夜间较强,春季、白天较弱。刘勇洪和权维俊(2014)分析了卫星反演的城市

地表温度与观测的日最高气温的关系，建立了高温遥感监测指标，发现北京五环内出现高温的概率明显偏高。

在数值模拟方面，3种城市冠层方案已被耦合到WRF中尺度天气模式中（Chen et al., 2011），使城市气候模拟研究驶入了快车道。Kusaka et al. (2001)、Kusaka 和 Kimura (2004) 发展了单层城市冠层方案（UCM, Urban Canopy Model）。Martilli et al. (2002) 在冠层内垂直方向进行了分层计算处理，考虑建筑物对气流的拖曳和对湍能的影响，提出了多层城市冠层方案（BEP, Building Environment Parameterization）。Salamanca and Martilli (2010) 基于 BEP 方案增加了建筑物能量模型（BEM, Building Energy Model），考虑建筑物内外能量交换，设计了 BEP+BEM 方案。在实际应用中，WRF 模式使用 BEP+BEM 城市冠层参数化方案进行模拟，参数对模拟结果的影响较大（Loridan, et al., 2010），必须根据具体情况对参数进行调整，才能得出与实际情况相符合的模拟结果（郑玉兰等，2015）。

在城市化对极端气温模拟研究中，蒙伟光等 (2010) 利用耦合了城市冠层模型的 WRF 模式（WRF/UCM）对广州高温天气及城市热岛强度进行模拟，发现日间城区高温与低反射率引起的短波辐射吸收增加有关，城区大部分能量收入被分配为感热加热大气，夜间城区潜热通量小，向上的土壤热通量主要用于以感热形式加热大气，持续的感热加热有利于夜间热岛的维持。郑祚芳等 (2012) 在使用耦合城市冠层模型的 WRF 模式时，引入了 Landsat Thematic Mapper (TM) 卫星资料提取的京津冀区域高分辨率下垫面数据代替 USGS (United States Geological Survey) 地表分类数据，研究了城市化对北京夏季极端高温的影响，结果表明城市化可以显著改变能量平衡中各项所占的比重，使城区向上的感热通量增多，日间和夜间出现高温的频率增加。王恪非 (2018) 利用 BEP+BEM 方案的 WRF 模式，模拟研究城市化对重庆高温热浪的贡献，发现空调是否运转对白天城市大气温度的影响不明显，增加城市中建筑物屋顶反照率可以减少城市所接收的净辐射，使城市下垫面气温降低。

可见，关于城市化影响高温热浪和单次极端高温事件的基本观测事实，已经有了较好的了解；关于城市化如何影响城市气温和高温频次的数值模拟研究，也开展了一些工作。但是，对于北京这样快速发展的特大城市，城市化过程如何影响单次极端高温热浪过程的机理，目前还缺乏认识。导致研究不足的原因，主要和对现有模式的参数优化工作滞后有关。在城市化对极端高温的数值模拟研究中，需要对所用模式参数进行优化，以符合模拟城市的具体特征，但目前相关工作还需要加强。

本文利用优化后的 WRF 模拟系统，开展对单次极端高温热浪过程的高分辨率数值模拟，利用观测资料检验了北京极端高温的模拟结果，分析了 2010 年 7 月 2-6 日连续 5 天高温天气过程中气象要素场的时空特征，揭示出城市化对北京此次极端高温过程的影响机制。

2 案例简介

2010年7月2-6日，北京气象站连续5日的日最高气温超过35℃，为该气象站1951年以来连续5日平均最高

气温的最高值，图1展示了北京气象站在此期间逐时气温变化情况。其中，7月5日北京气象站最高气温达到40.6℃，成为该站1951年以来第三高温。高温期间受大陆暖高压控制，我国大部分地区天气晴好，太阳辐射充足，7月5日北京地区处于高压脊前盛行西北风。此前采用高分辨率自动站观测资料的分析表明，此次高温过程存在明显的以城区为高值中心的气温空间分布特征，城市热岛强度对城区的高温过程具有显著影响（张雷等，2015）。



图 1. 2010 年 7 月 2-6 日北京气象站的逐时气温

Fig.1 Hourly temperature at Beijing Weather Station during 2-6 Jul 2010

3 模拟试验设计

本试验采用中尺度数值天气WRF模式3.9.1.1版本，北京地区三重嵌套模拟系统（图2），水平网格距（网格数）分别为27km（97×94），9km（79×79），3km（64×70），垂直方向分为38层，模式顶为50hPa，1km以下划分13层。物理过程方案采用了BouLac边界层方案、WSM6微物理方案、Dudhia短波辐射方案、RRTM长波辐射方案、Noah陆面方案，第1重区域选用了Kain-Fritsch积云方案（表1）。使用MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 土地利用类型数据。模式初始场和边界条件采用1°×1°的NCEP/NCAR全球6h一次的FNL资料。模拟时段为世界时（UTC，Universal Time Coordinated）2010年7月1日-7日，共6个个例模拟试验（图3）。

模式系统设计参考了张亦洲等（2013）优化后的WRF/Noah/UCM模式系统。通过Noah/UCM模式对中国科学院大气物理研究所北京城区内325m铁塔一年的地表能量平衡观测离线模拟，优化了城市冠层参数，主要改进了建筑物高度、人为热强度和城市地表不透水面积占比，并对城市路面、建筑物楼顶和墙体的热容量、热传导系数、反照率以及发射率等参数进行了修改，具体参数详见文献（张亦洲等，2013）。



图 2. (a) 模式模拟区域、(b) 最内层区域的土地利用类型

Fig.2 (a) Model simulation area and (b) land use category in innermost domain



图 3. 2010 年 7 月 6 个模拟试验示意图，箭头的虚线和实线部分分别为模式 spin-up 时间和 13-36h 的预报场

Fig.3 Sketch of 6 simulations in July 2010 (UTC), the dotted line and solid line of the arrow are spin-up time and 13-36h forecast

表 1 模式主要参数

Table.1 Major parameters for model

类别	设置		
区域中心	116.25 E	40.25 N	
垂直方向层数	38		
模式顶	50hpa		
1km 以下的层数	13 层		
嵌套重数	3 重		
水平格距	27km	9km	3km
水平网格 (x,y)	97×94	79×79	64×70
微物理方案	WSM6	WSM6	WSM6
长波辐射方案	RRTM	RRTM	RRTM
短波辐射方案	Dudhia	Dudhia	Dudhia
表面层方案	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov	Monin-Obukhov
陆面方案	Noah	Noah	Noah
城市冠层方案	UCM	UCM	UCM
边界层方案	BouLac	BouLac	BouLac
积云参数化方案	Kain-Fritch	无	无

模拟检验数据使用了质控后北京市 2010 年 7 月 2-6 日 171 个自动气象站逐时气温资料(杨萍等, 2011)。计算 I_{UHI} 使用 Yang et al. (2013) 选取的参考站, 即北京六环外 8 个乡村自动气象站(图 4), 具体信息见表 2。参考站选站方法参考了 Ren and Ren (2011) 发展的遥感亮度温度方法, 采用 MODIS 陆地表面亮温数据绘制等值线, 将最外围闭合等值线以外的台站作为参考站。该方法不依赖于社会和经济等数据, 是一种相对客观的选站方法。所选参考站位于市区的不同方位, 周围环境为开阔的植被区域, 远离高大建筑物和其他人工设施的影响。51 个城市气象站均分布在六环路以内, 城区站与参考站平均海拔高度与平均差异仅为 8.9 m, 无需做高度影响订正。

城市热岛强度指由于城市热岛效应等因素引起的城乡之间气温的差异, 用 I_{UHI} 表示(张雷等, 2015)。其表达式为

$$I_{UHI} = T_u - T_r \quad (1)$$

其中, T_u 为城市站的气温, T_r 为参考站的气温。



图 4 北京地区参考站(黑色)和城市站(红色)的分布, ★北京观象台的位置

Fig. 4 The distribution of reference stations (black) and urban stations (red) in Beijing, ★location of Beijing Observatory Station

表 2. 北京地区参考站的信息

Table. 2 Information about reference weather stations in Beijing

站名	缩写	经度	纬度	与城区海拔差/m
安定	AD	116.51 E	39.62 N	-24.5
南召	NZ	116.11 E	39.61 N	-14.5
凤凰岭	FHL	116.10 E	40.11 N	24.5
永乐店	YLD	116.78 E	39.68 N	-31.5
庞各庄	PGZ	116.34 E	39.62 N	-14.5
东新城	DXC	116.45 E	40.22 N	-0.7
龙湾屯	LWT	116.85 E	40.23 N	3.5
大孙各庄	DSGZ	116.92 E	40.09 N	-13.5
平均		116.51 E	39.90 N	-8.9

4 模拟结果

4.1 气温模拟检验

图 5 是北京地区 4 个时刻 2 日-6 日平均 2m 气温的空间分布，填色底图为模拟的气温，圆点为与模拟时刻相对应的观测值。模拟的 2m 气温与观测值符合较好，能够模拟出北京平原大部分区域连续 5 日 16:00 时 (LST, Local Standard Time) 平均气温超过 37°C 的高温天气。模式能清晰地呈现出北京气温日内的变化，以及早上 5:00 和晚上 21:00 在城区出现的气温高值中心。对于高温的模拟 (图 5c)，模式未能模拟出城区少量观测值超过 40°C 的现象，主要是受限制于模式对城市更精细的物理过程描述还不够充分。北京的东南部 and 城区所在的中部为平原，西部和北部为山区，在高温模拟中北京西部和北部蓝色模拟值低于稀疏的黄色观测值，跟北京山区复杂地形有关。



图 5. 2010 年 7 月 2 日-6 日北京地区 5 日平均的 2m 气温 (单位:°C) (填色底图为模拟, 圆点填色为观测; a. 5:00, b. 10:00, c. 16:00, d. 21:00 (LST))

Fig.5 The 5 day average 2m temperature in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010 (unit:°C) (shading is numerical results, shaded circles are observations; a.5:00, b.10:00, c.16:00, d.21:00 (LST))

图 6 为模拟与观测的北京地区 4 个时刻连续 5 日平均城市热岛强度空间分布的对比。模式准确模拟出早上 5:00 和晚上 21:00 以城区为高值中心的城市热岛强度的空间分布，并把握住热岛强度在北京六环西南、西北和东北侧的局部高值区。模拟能够呈现出上午 10:00 时北京南部区域城市热岛强度高于北部和下午 16:00 时城市热岛强度北京西部高于东部的特征。模式较好地模拟出 7 月 2 日-6 日北京地区 5 日平均的城市热岛强度空间分布随时间的变化，能够准确反映城市热岛强度整体的空间分布特征。模拟的早晚城市热岛的空间范围大于观测的热岛范围，而且模拟的城区内部城市热岛强度的空间分布不够精细，需要不断提高模式

的分辨率。

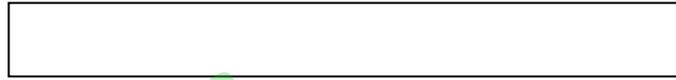


图 6. 2010 年 7 月 2 日-6 日北京地区 5 日平均的城市热岛强度 (单位:°C) (模拟: a. 5:00, b. 10:00, c. 16:00, d. 21:00; 观测: e. 5:00, f. 10:00, g. 16:00, h. 21:00 (LST))

Fig.6 The 5 day average I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010 (unit:°C) (simulated: a.5:00, b.10:00, c.16:00, d.21:00; observed: e.5:00, f.10:00, g.16:00, h.21:00 (LST))

模式模拟的北京高温过程 5 日平均城市 (图 7a) 和乡村 (图 7b) 白天气温与观测值吻合较好, 模拟的夜间气温偏高, 这种气温模拟值的正偏差在城市比乡村更明显。模拟与观测的城市热岛强度 (图 7c) 在日变化的节奏上保持一致, 夜间为稳定的强 I_{UHI} 阶段, 白天为弱 I_{UHI} 阶段, 06:00 至 09:00 是 I_{UHI} 快速衰减阶段, 而 18:00 至 21:00 是 I_{UHI} 快速上升阶段。在城市热岛强度量值的模拟上, 白天模拟的 I_{UHI} 偏弱、夜间的模拟值偏强。



图 7. 2010 年 7 月 2 日-6 日北京 (a) 城市气温、(b) 乡村气温和 (c) 城市热岛强度平均日变化

Fig.7 Average diurnal variation of (a) urban temperature, (b) rural temperature and (c) I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul, 2010

2010 年 7 月 2-6 日模拟的 2m 气温整体高于观测的气温 (表 3), 模拟的气温值在城市站和参考站较观测值分别高 1.18°C 和 0.85°C, 城市热岛强度的模拟值较观测值高 0.34°C。模拟的 51 个城市站和 8 个参考站 2m 气温的 RMSE 分别为 2.60°C 和 2.57°C, 相关系数均为 0.90。

表 3. 2010 年 7 月 2-6 日北京 2m 气温模拟效果比较

Table.3 Comparison of observed and simulated 2m temperatures in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010

	模拟	观测	BIAS(°C)	RMSE(°C)	R
城市站	33.25	32.07	1.18	2.60	0.90
参考站	31.28	30.43	0.85	2.57	0.90
I_{UHI}	1.97	1.64	0.34	1.99	0.45

注: BIAS: 与观测的偏差; RMSE: 均方根误差; R: 相关系数

2010 年 7 月 5 日 17 时北京气象站观测到此次高温过程中本站的最高气温。模式很好的模拟出 7 月 5 日 17:00 时北京平原大部分区域出现了 38.5°C 以上的高温, 但相对城区普遍超过 40°C 的观测气温值整体偏低, 模拟的 5:00 时北京城区为气温高值中心的特征能够被模式很好的呈现。北京城区个别观测站位于公园或水体附近, 受到局地小气候影响明显, 模拟值要高于观测值, 北京西部和北部山区地形复杂, 给该区域气温的精确模拟带来了困难。



图 8. 2010 年 7 月 5 日北京地区 2m 气温 (单位:°C) (填色底图为模拟, 圆点填色为观测; a. 5:00, b. 17:00 (LST))
Fig.8 The 2m temperature in Beijing on 5 July 2010 (unit:°C) (shading is numerical results, shaded circles are observations; a.5:00, b.17:00 (LST))

图 9 为模拟与观测的 7 月 5 日北京地区 5:00 时和 17:00 时 2 个时刻城市热岛强度空间分布的对比。模式很好的模拟出 7 月 5 日 5:00 时 (图 9a) 北京城区热岛强度的高值中心, 与观测的城区热岛强度的空间分布 (图 9c) 高度吻合。17:00 时模拟的城市热岛强度 (图 9b) 与观测 (图 9d) 一致地呈现出北京中西部平原地区城市热岛强度高于东部的特点。对极端高温日夜间热岛强度的模拟, 同样存在夜间模拟热岛空间范围大于观测范围和模拟的热岛强度空间分布不够精细的问题。



图 9. 2010 年 7 月 5 日北京地区的城市热岛强度 (单位:°C) (模拟: a. 5:00, b. 17:00; 观测: c. 5:00, d. 17:00 (LST))
Fig.9 The I_{UHI} in Beijing on 5 July 2010 (unit:°C) (simulated: a.5:00, b.17:00; observed: c.5:00, d.17:00 (LST))

将高温过程中模拟的 2m 气温与气象站观测的逐时气温进行对比 (图 10), 7 月 2-6 日模拟的北京城乡最高气温均超过了 35°C, 模式能够模拟出连续高温的天气特征。模拟和观测气温的最小值多出现在清晨 5:00 左右, 最高值常出现在下午 15:00 和 16:00 附近。7 月 5 日最高气温出现在 17:00 左右, 最高气温出现时间的偏离是当日天气过程影响的结果。模式能够较好的模拟出 7 月 5 日城乡气温的日变化, 模拟的城市热岛强度与观测具有较好的对应关系, 但对于 17:00 时模拟的 2m 气温较超过 40°C 的气温观测值偏低。无论是城市还是乡村, 模拟值与观测值在气温日变化的波动上具有较好的同步性, 波动的振幅上也有较高的一致性。

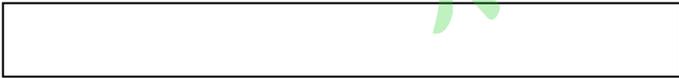


图 10. 2010 年 7 月 2 日-6 日观测和模拟的北京地区逐时 (a) 城市气温、(b) 乡村气温和 (c) 城市热岛强度
Fig.10 The simulated and observed hourly (a) urban temperature, (b) rural temperature and (c) I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010

7 月 2-6 日逐日的模拟偏差 (图 11) 具有一定的波动性。模拟的城市站气温的 BIAS 均为正值, 在极端高温出现的 7 月 5 日和随后的 6 日, 参考站气温的 BIAS 出现了负值, 模拟的城市热岛强度 BIAS 在 ±1°C 之间。



图 11. 2010 年 7 月 2 日-6 日模拟的北京城市站、参考站气温和城市热岛强度的逐日偏差 (单位:°C)
Fig.11 The daily bias (unit:°C) of simulated urban stations, reference stations temperature and I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul, 2010

WRF 模式较好地模拟出 2010 年 7 月 2-6 日此次高温过程和 7 月 5 日极端高温日的气温空间分布, 能够清晰地呈现夜间至次日凌晨以北京城区为中心气温高值区的分布特征, 模拟的白天气温与观测均吻合较好, 在城市热岛强度日变化的同步性上也有较好的表现。

4.2 城市化对极端高温影响的机制

图 12 展示了 2010 年 7 月 5 日北京地区 2 个时刻的感热通量和潜热通量，凌晨 5:00 城区中心的感热通量在零值附近，北京远郊感热通量为负值，城区与郊区潜热通量均很小，只在水体处量值较大。17:00 感热通量和潜热通量均出现高值，但此时城区感热通量和潜热通量差异明显，感热通量在城区为高值区，潜热通量在城区为低值区。

城乡下垫面性质的不同引起的城乡感热通量和潜热通量的差异是造成城乡温差的主要原因之一。日落后建筑物存储的热能不断释放，加上人为释放热，城市感热通量减少缓慢，致使城区大气降温速率远小于郊区，造成城乡夜间气温差别明显，形成夜间强的城市热岛效应；日出后太阳辐射的加热作用引起城乡地面感热通量、潜热通量迅速增加；午后城区下垫面的性质决定了感热通量和潜热通量在城区分别为高值中心和低值中心，城市通过潜热调节气温的能力被明显削弱。

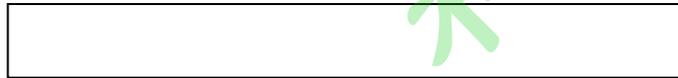


图 12 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区地表向上的感热通量和潜热通量（单位： $W \cdot m^{-2}$ ）（感热： a. 5:00, b. 17:00 (LST)；潜热： c. 5:00, d. 17:00 (LST)）

Fig. 12 The simulated upward sensible heat flux and latent heat flux in Beijing on 5 July 2010 (unit: $W \cdot m^{-2}$) (sensible heat: a.5:00, b.17:00 (LST); latent heat: c.5:00, d.17:00 (LST))

7 月 5 日北京地区 2m 相对湿度较周边乡村明显偏低（图 13a, b），均呈现以城区为低值中心的空间分布。城区大部分地面被水泥、沥青、砖石等覆盖，不透水地面远大于郊区，造成城区的相对湿度偏低，从而削弱了城市通过潜热调节气温的能力。

下午 17:00 时，北京地区 10m 风向为一致的西北风（图 13d），此时的风速大于凌晨 5:00 时（图 13c），风场的变化影响能量的水平输送。需要说明，7 月 5 日白天的风速较大，明显受到了环流背景的影响。



图 13 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区 2m 相对湿度（单位：%）（a. 5:00, b. 17:00 (LST)）、10m 风场（矢量，单位： m/s ）和 2m 气温（单位： $^{\circ}C$ ）（c. 5:00, d. 17:00 (LST)）

Fig. 13 The simulated 2m relative humidity(unit:%) (a.5:00, b.10:00 (LST)), 10m wind field (vector, unit: m/s) and 2m temperature (unit: $^{\circ}C$) (c.5:00, d.17:00 (LST)) in Beijing on 5 July 2010

凌晨 5:00 时（图 14a）边界层高度整体很低，城区边界层高度明显高于郊区，形成了以城区为中心的高值区。此时，近地面位温随高度增加而升高（图 15a），边界层为稳定结构。日出后，太阳辐射使气温特别是近地面气温迅速上升，边界高度升高，近地面层稳定性下降。下午 17:00 时，北京地区边界层高度出现高值（图 14b），大部分区域边界层高度接近 3000m，边界层以混合层结构为主。

城市下垫面通过影响边界层结构间接影响城市热环境。日落后至日出前边界层高度低，大气稳定度较好，抑制了能量的垂直扩散。日出后地面温度上升，近地面湍流运动加剧，边界层高度增高。午后大气稳定度减弱，有利于能量的垂直输送。



图 14. 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区边界层高度 (单位:m) (a. 5:00, b. 17:00 (LST))

Fig. 14 The simulated boundary layer height in Beijing on 5 July 2010 (unit: m) (a.5:00, b.17:00 (LST))



图 15. 7 月 5 日模拟的城区 (116.5° E, 40.0° N)、乡村 (116.7° E, 40.0° N) 代表格点位温 (单位:°C) 廓线 (a. 5:00, 17:00 (LST))

Fig.15 The vertical profile of simulated potential temperature (unit:°C) on 5 July 2010 at urban grid (116.5 E, 40.0 N) and rural grid (116.7 E, 40.0 N) (a.5:00, b.17:00 (LST))

5 讨论

本文利用根据北京城市特点进行优化后的 WRF/Noah/UCM 模式参数化方案,开展了高温过程的数值模拟。模式模拟的 2m 气温与气象站观测的逐时气温资料进行对比,模式能较好地模拟出北京此次连续 5 日的高温特征。无论是城区还是远郊,模拟值与观测值在气温日变化的波动上具有同步性,波动的振幅上也有较好的一致性。总体看,此模拟方案能够较好地模拟出北京地区 2m 气温及城市热岛的变化特征。

7 月 5 日气流越过北京西北山脉后沿背风坡下沉(图 16a),形成干绝热增温,即焚风效应(王宗敏等, 2012)。北京上空垂直方向空气为下沉运动(图 16a),背风坡相对湿度随高度下降快速减小,并在北京附近形成低值区,等温线延背风坡出现倾斜,北京上空气温明显高于同高度气温(图 16b)。异常暖高压脊控制,以及西北越山气流形成的焚风效应,应该是北京平原地区气温明显偏高的基本环流背景。城市热岛现象则加剧了这种区域性高温天气影响。



图 16. 2010 年 7 月 5 日 17 时沿 40° N 剖面 (a) 垂直速度 (单位:m/s)、(b) 相对湿度(单位:%)和温度(实线,单位:°C), ▲北京的位置

Fig. 16 The cross section of (a) vertical speed (unit:m/s), (b) relative humidity (unit:%) and temperature (unit:°C) along 40° N at 17:00 (LST) on 5 July 2010, ▲ the location of Beijing

WRF 模式在本文的参数化方案设置下,对于夜间气温模拟偏高,对于极端高温的模拟还有一定的差距,模拟的城市热岛强度在量值上白天偏弱、夜间偏强。出现这种偏差说明下垫面参数需要进一步优化,该模拟试验采用了单层城市冠层模式,能够较好地抓住城市冠层中主要物理过程,但未考虑一些更细致的过程。今后需要继续深入开展参数优化工作,减小模式偏差,改进模拟效果。

城市化造成了下垫面改变,通过影响地表能量平衡等物理过程,形成城市热岛、干岛等城市气候特征,影响城市极端天气气候事件发生的强度及频率。本研究有助于深入理解城市化对极端高温影响的规律,对于北京城市区域精细化天气预报、城市发展的科学规划具有一定的参考意义。

6 结论

为研究城市化对极端高温的影响, 本文利用 WRF 模式对北京单次极端高温过程进行了数值模拟研究, 得到以下结论:

(1) 该模式能够模拟出北京连续 5 日高温的天气特征, 模拟的白天 2m 气温与观测吻合较好, 夜间气温模拟值稍高于观测值, 7 月 5 日极端高温的模拟值低于观测值。模拟值与观测值在气温日变化的波动上具有高度的同步性, 波动的振幅上也有较好的一致性。模拟结果能够清晰地呈现夜间至次日凌晨以北京城区为高值区中心的城市热岛强度的空间分布特征。模拟的城市热岛强度与观测值在日变化的节奏上具有较好的一致性, 模拟的城市热岛强度在量值上, 白天偏弱、夜间偏强。

(2) WRF 模式对 7 月 5 日的模拟表明, 城乡下垫面性质的差异决定了白天地表向上的感热通量和潜热通量在城区分别为高值中心和低值中心, 高温时城市通过潜热调节近地面气温的能力被明显削弱。同时, 城市下垫面的不透水性, 造成城区 2m 相对湿度较周边乡村明显偏低, 呈现以城区为低值中心的空间分布。

(3) 日落后至日出前边界层结构稳定、高度低, 风速较小, 抑制了城乡之间能量的传输, 城市感热通量减少缓慢, 城区大气降温速率远小于郊区, 形成夜间强的城市热岛强度。日出后城乡地面感热通量、潜热通量迅速上升, 2m 气温和边界层高度升高, 边界层稳定性下降。午后, 北京大部分区域边界层高度接近 3000m, 边界层稳定度弱, 有利于能量的垂直输送, 此时城市热岛强度较小。需要说明, 7 月 5 日白天的风速较大明显受到了环流背景的影响。

上述结果表明, 在此次极端高温过程中, 北京城区高大的建筑形成了明显的城市热岛效应, 加重了城区这次极端高温事件的强度。

7 致谢

感谢北京城市气象研究院张亦洲高工, 中国气象科学研究院王寅军高工和中国气象局气象干部培训学院杨萍研究员对本文提供的大力帮助。

参考文献 (References)

1. Alexander L V, Zhang X, Pererson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D05109. doi:10.1029/2005JD006290
2. Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban modeling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *International Journal of Climatol.*, 31(2):273-288. doi:10.1002/joc.2158
3. 胡小明, 刘树华, 梁福明, 等. 2005. 北京区域近地边界层特征数值模拟[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 41(4): 514-522. doi:10.3321/j.issn:0479-8023.2005.04.003
4. 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 2006. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究 [J]. *地球物理学报*, 49(1): 69-77. Ji Chongping, Liu Weidong, Xuan Chunyi. 2006. Impact of urban growth on the heat island in Beijing [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49(1): 69-77. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.010
5. 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 2010. 城市气象环境与边界层数值模拟研究[J]. *地球科学进展*, 25(5): 463-473. Jiang Weimei, Miao Shiguang, Zhang Ning, et al. 2010. Numerical Simulation on Urban Meteorology and Urban Boundary Layer[J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 25(5): 463-473. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2010.05.0463
6. Kusaka H, Kimura F. 2004. Coupling a Single-Layer Urban Canopy Model with a Simple Atmospheric Model: Impact on Urban

- Heat Island Simulation for an Idealized Case[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(1): 67-80. doi: 10.2151/jmsj.82.67
7. Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison With Mulei-Layer and Slab Models[J]. *Boundary-Layer Meteorology* 101(3): 329–358. doi:10.1023/A:10192079
 8. 李兴荣, 胡非, 舒文军. 2007. 北京夏季强热岛分析及数值模拟研究 [J]. *气象*, 33(6): 25–31. Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun. 2007. Analysis and numerical simulation of summer strong urban heat island in Beijing [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33(6): 25–31. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2007.06.004
 9. 刘树华, 刘振鑫, 郑辉, 等. 2013. 多尺度大气边界层与陆面物理过程模式的研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 43: 1332 – 1355. Liu Shuhua, Liu Zhenxin, Zheng Hui, et al. 2013. Multi-scale atmospheric boundary-layer and land surface physics process models[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron(in Chinese)*, 43: 1332–1355. doi: 10.1360/132013-247
 10. 刘勇洪, 权维俊. 2014. 北京城市高温遥感指标初探与时空格局分析 [J]. *气候与环境研究*, 19(3): 332–342. Liu Yonghong, Quan Weijun. 2014. Research on high temperature indices of Beijing city and its spatiotemporal pattern based on satellite data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19(3): 332–342. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12190.
 11. 刘伟东, 尤焕苓, 孙丹. 2016. 1971—2010年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析[J]. *气象*, 42(5): 598-606. Liu Weidong, You Huanling, Sun Dan. 2016. Multi Time Scale Analysis of Megacities Heat Island Effect in Beijing Tianjin Hebei Region from 1971 to 2010[J]. *Meteorological Monthly(in Chinese)*, 42(5): 598-606. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.009
 12. Loridan T, Grimmond C, Grossman Clarke S, et al. 2010. Trade-offs and responsiveness of the single-layer urban canopy parametrization in WRF: An offline evaluation using the MOSCEM optimization algorithm and field observations[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(649) : 997-1019. doi: 10.1002/qj.614
 13. Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterization for mesoscale models [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2):261-304. doi: 10.1023/A:1016099921195
 14. 蒙伟光, 张艳霞, 李江南, 等. 2010. WRF/UCM在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用[J]. *热带气象学报*, 26(3):273-282. Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Li Jiangnan, et al. 2010. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou[J]. *Journal of Tropical Meteorology(in Chinese)*, 26(3): 273-282. doi: 1004-4965(2010)03-0273-10
 15. 苗世光, Chen Fei, 李青春等. 2010. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响[J]. *地球物理学报*, 53(7) : 1580-1593. Miao Shiguang, Chen Fei, Li Qingchun, et al. 2010. Month-averaged impacts of urbanization on atmospheric boundary layer structure and precipitation in summer in Beijing area[J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 53(7):1580-1593. doi:10.3969/J.ISSN.0001-5733.2010.07.009
 16. Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(5): L057711. doi: 10.1029/2006GL027927
 17. Ren Y Y, Ren G Y. 2011. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends [J]. *J. Climate*, 24(7): 3179–3189. doi: 10.1175/2010jcli3658.1
 18. Salamanca F and Martilli A. 2010. A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor Appl Climatol*, 99:345–356. doi: 10.1007/s00704-009-0143-8
 19. 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气II. 模拟试验和机理分析 [J]. *气候与环境研究*, 4(4): 334–345. Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China Part II. Simulation and analysis [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 4(4): 334–345. doi: 10.1088/0256-307X/16/9/020
 20. 王迎春, 葛国庆, 陶祖钰. 2003. 北京夏季高温闷热天气的气候特征和2008夏季奥运会 [J]. *气象*, 29(9): 23–27. Wang Yingchun, Ge Guoqing, Tao Zuyu. 2003. Climatic characteristics of estival muggy weather in Beijing related to 2008 Olympics [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 29(9): 23–27. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2003.9.005
 21. 王恪非. 2018. 城市对重庆高温热浪的贡献及冷却屋顶的缓解效应模拟研究[D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Wang Kefei. 2018. Numerical Study of Contribution of Chongqing City to High Temperature Heat Wave and Mitigation Effects of Cool

- Roof[D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology
22. 王咏薇, 王恪非, 陈磊, 等. 2018. 空调系统对城市大气温度影响的模拟研究[J]. 气象学报, 76(4): 649-662. Wang Yongwei, Wang Kefei, Chen Lei, et al. 2018. Numerical study of effect of indoor-outdoor heat exchange on urban atmospheric temperature [J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 76(4):649-662. doi:10.11676/qxxb2018.020
 23. 王宗敏, 丁一汇, 张迎新, 等. 2012. 太行山东麓焚风天气的统计特征和机理分析 II: 背风波对焚风产生和传播影响的个例分析[J]. 高原气象, 31(2):555-561.
 24. 谢庄, 崔继良, 刘海涛, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气 I. 历史状况及个例分析 [J]. 气候与环境研究, 4(4): 323-333. Xie Zhuang, Cui Jiliang, Liu Haitao, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China Part I. Statistics and synoptic case study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4(4): 323-333. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.1999.04.01
 25. 徐祥德, 汤绪, 徐大海. 2002. 城市化环境气象学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 284pp. Xu Xiangde, Tang Xu, Xu Dahai. 2002. Urbanization Environmental Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 284pp.
 26. 杨萍, 刘伟东, 仲跻芹, 等. 2011. 北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估 [J]. 应用气象学报, 22(6): 706-715. Yang Ping, Liu Weidong, Zhong Jiqin, et al. 2011. Evaluating the quality of temperature measured at automatic weather stations in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22(6): 706-715. doi: 10.11898/1001-7313.20110608
 27. Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(8): 1803-1816. doi: 10.1175/JAMC-D-12-0125.1
 28. 易翔, 曾新民, 郑益群, 等. 2016. 高分辨率 WRF 模式中土壤湿度扰动对短期高温天气模拟影响的个例研究 [J]. 大气科学, 40 (3): 604-616. Yi Xiang, Zeng Xinmin, Zheng Yiqun, et al. 2016. Impact of soil moisture perturbation on high resolution simulation of short-range high temperature weather: A WRF case study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 604-616. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15281
 29. 张雷, 任国玉, 刘江, 等. 2011. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响 [J]. 地球物理学报, 54(5): 1150-1159. Zhang Lei, Ren Guoyu, Liu Jiang, et al. 2011. Urban effect on trends of extreme temperature indices at Beijing Meteorological Station [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 54(5): 1150-1159. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.002
 30. 张雷, 任国玉, 任玉玉. 2015. 单次极端高温过程中城市热岛效应的识别 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 167-176. Zhang Lei, Ren Guoyu, Ren Yuyu. 2015. Identification of urban effect on a single extreme high temperature event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(2):167-176. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13175
 31. 张亦洲, 苗世光, 戴永久等. 2013.北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟. 地球物理学报, 56 (8): 2558-2573. Zhang Yizhou, Miao Shiguang, Dai Yongjiu, et al. 2013. Numerical simulation of characteristics of summer clear day boundary layer in Beijing and the impact of urban underlying surface on sea breeze. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese) 56 (8) : 2558-2573. doi:10.6036/cjg20130806
 32. 郑玉兰, 苗世光, 张崎, 等. 2015. 建筑物能量模式的改进及制冷系统人为热排放研究[J]. 高原气象, 34(3) : 786-796. Zheng Yulan, Miao Shiguang, Zhang Qi, et al. 2015. Improvements of Building Energy Model and Anthropogenic Heat Release from Cooling System [J]. Plateau Meteorology, 34(3): 786-796. doi:10.7522/j. issn.1000-0534.2014.00035
 33. 郑祚芳, 范水勇, 王迎春. 2006. 城市热岛效应对北京夏季高温的影响 [J]. 应用气象学报, 17(增刊): 48-53. Zheng Zuofang, Fan Shuiyong, Wang Yingchun. 2006. Effects of urban heat island on summer high temperatures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17(Suppl.): 48-53. doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.z1.007
 34. 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 2012. 城市化对北京夏季极端高温影响的数值研究[J]. 生态环境学报, 21(10):1689-1694. Zheng Zuofang, Gao Hua, Wang Zaiwen, et al.2012. Numerical simulation for the urbanization effects on a heat wave event around Beijing city [J]. Ecology and Environmental Sciences(in Chinese), 21(10): 1689-1694. doi:10.3969/j.issn.1674-5906.2012.10.010

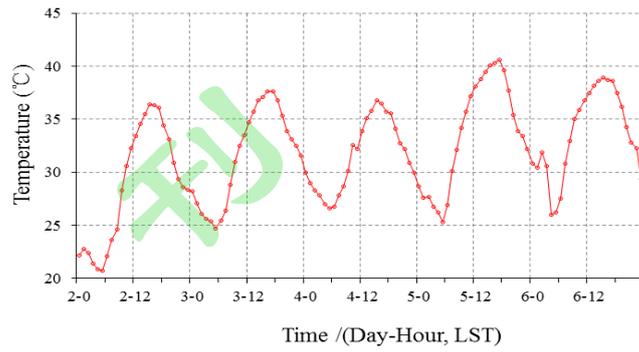


图 1. 2010 年 7 月 2-6 日北京气象站的逐时气温

Fig.1 Hourly temperature at Beijing Weather Station during 2-6 Jul 2010

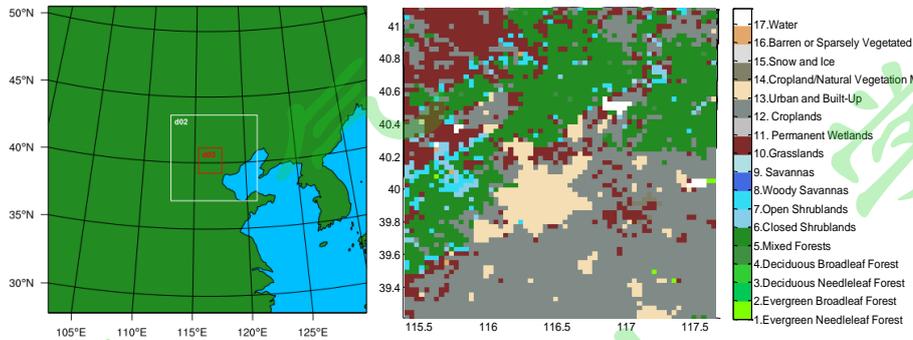


图 2. (a) 模式模拟区域、(b) 最内层区域的土地利用类型

Fig.2 (a) Model simulation area and (b) land use category in innermost domain

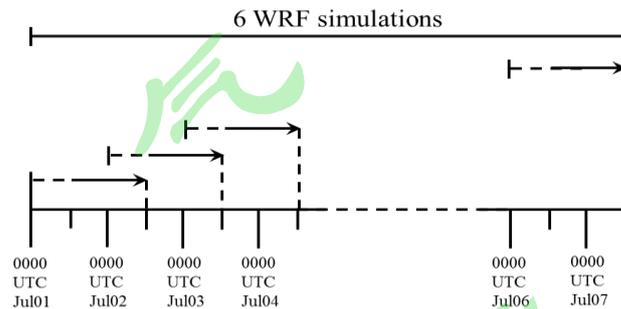


图 3. 2010 年 7 月 6 个模拟试验示意图，箭头的虚线和实线部分分别为模式 spin-up 时间和 13-36h 的预报场

Fig.3 Sketch of 6 simulations in July 2010 (UTC), the dotted line and solid line of the arrow are spin-up time and 13-36h forecast

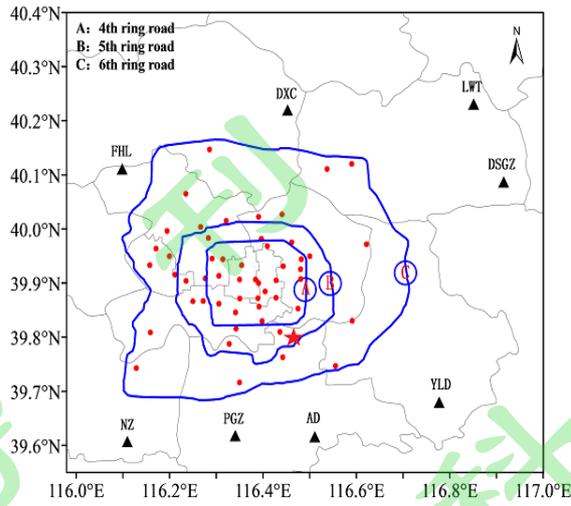


图4 北京地区参考站(黑色)和城市站(红色)的分布, ★北京气象台的位置

Fig. 4 The distribution of reference stations (black) and urban stations (red) in Beijing, ★location of Beijing Observatory Station

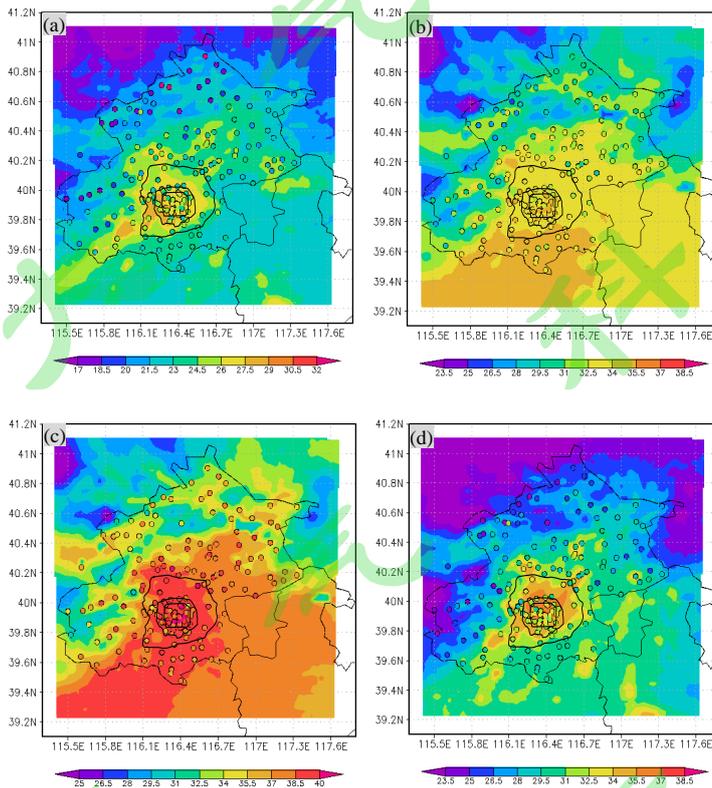


图5. 2010年7月2日-6日北京地区5日平均的2m气温(单位:°C)(填色底图为模拟,圆点填色为观测; a: 5:00, b: 10:00, c: 16:00, d: 21:00(LST))

Fig.5 The 5 day average 2m temperature in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010 (unit: °C) (shading is numerical results, shaded circles are observations; a:5:00, b:10:00, c:16:00, d:21:00 (LST))

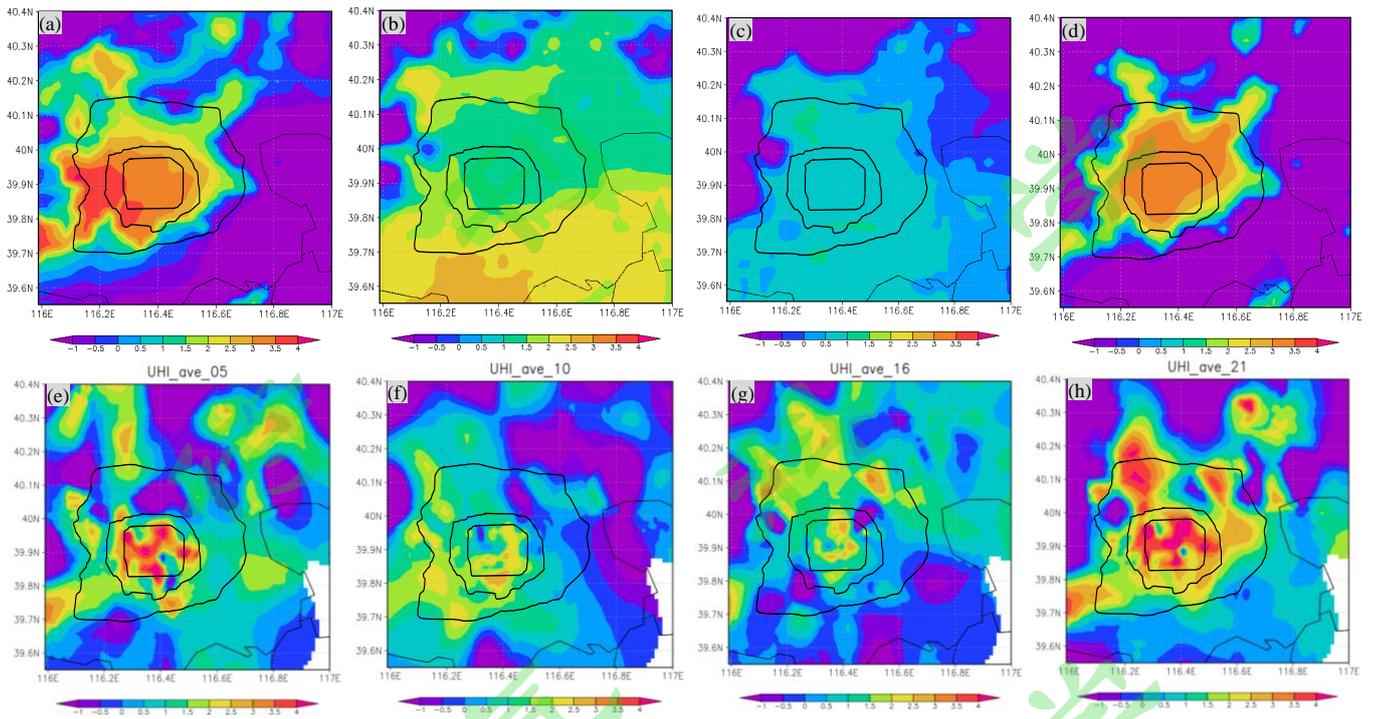


图 6. 2010 年 7 月 2 日-6 日北京地区 5 日平均的城市热岛强度 (单位:°C) (模拟: a. 5:00, b. 10:00, c. 16:00, d. 21:00; 观测: e. 5:00, f. 10:00, g. 16:00, h. 21:00 (LST))

Fig.6 The 5 day average I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010 (unit:°C) (simulated: a.5:00, b.10:00, c.16:00, d.21:00; observed: e.5:00, f.10:00, g.16:00, h.21:00 (LST))

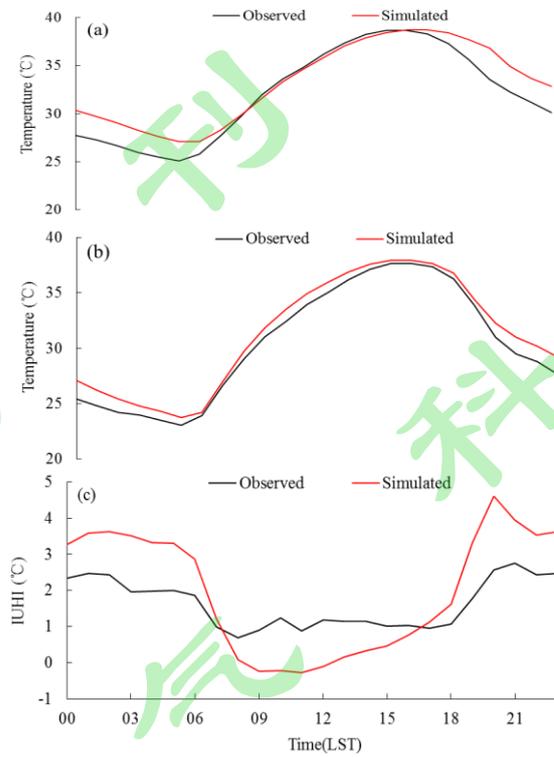


图 7. 2010 年 7 月 2 日-6 日北京 (a) 城市气温、(b) 乡村气温和 (c) 城市热岛强度平均日变化

Fig.7 Average diurnal variation of (a) urban temperature, (b) rural temperature and (c) I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul, 2010

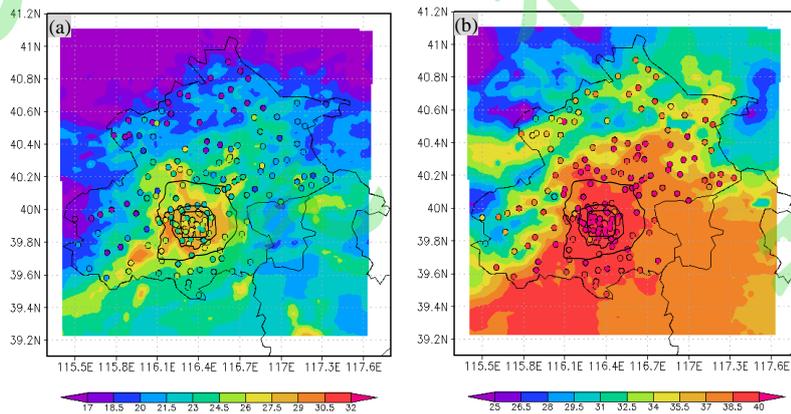


图 8. 2010 年 7 月 5 日北京地区 2m 气温 (单位:°C) (填色底图为模拟, 圆点填色为观测; a.5:00, b.17:00 (LST))

Fig.8 The 2m temperature in Beijing on 5 July 2010 (unit:°C) (shading is numerical results, shaded circles are observations; a.5:00, b.17:00 (LST))

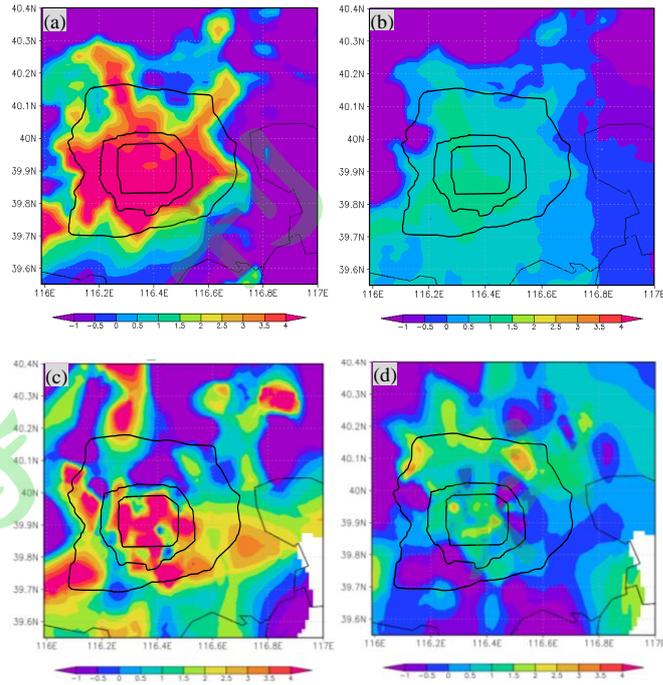


图 9. 2010 年 7 月 5 日北京地区的城市热岛强度 (单位: °C) (模拟: a. 5:00, b. 17:00; 观测: c. 5:00, d. 17:00 (LST))
 Fig.9 The I_{UHI} in Beijing on 5 July 2010 (unit: °C) (simulated: a.5:00, b.17:00; observed: c.5:00, d.17:00 (LST))

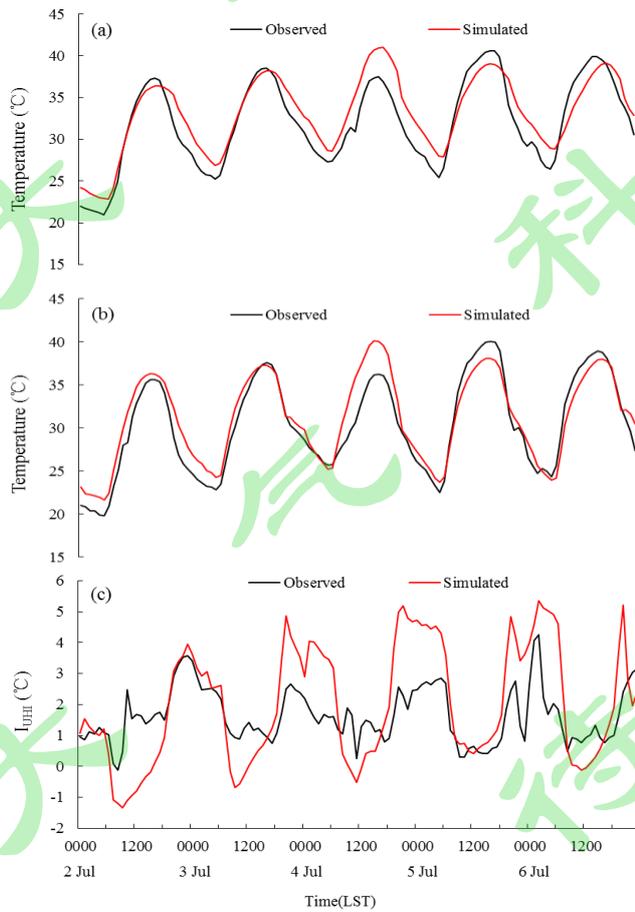


图 10. 2010 年 7 月 2 日-6 日观测和模拟的北京地区逐时 (a) 城市气温、(b) 乡村气温和 (c) 城市热岛强度
 Fig.10 The simulated and observed hourly (a) urban temperature, (b) rural temperature and (c) I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul 2010

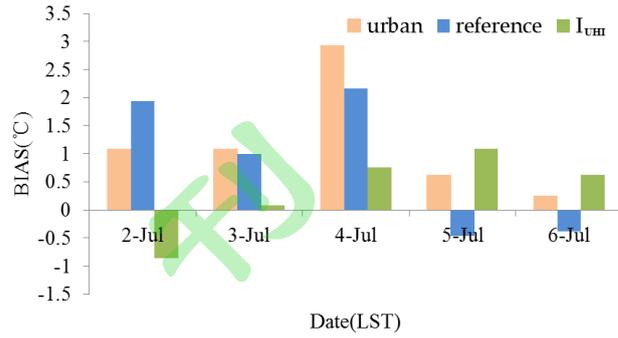


图 11. 2010 年 7 月 2 日-6 日模拟的北京城市站、参考站气温和城市热岛强度的逐日偏差 (单位: °C)

Fig.11 The daily bias (unit: °C) of simulated urban stations, reference stations temperature and I_{UHI} in Beijing from 2 Jul to 6 Jul, 2010

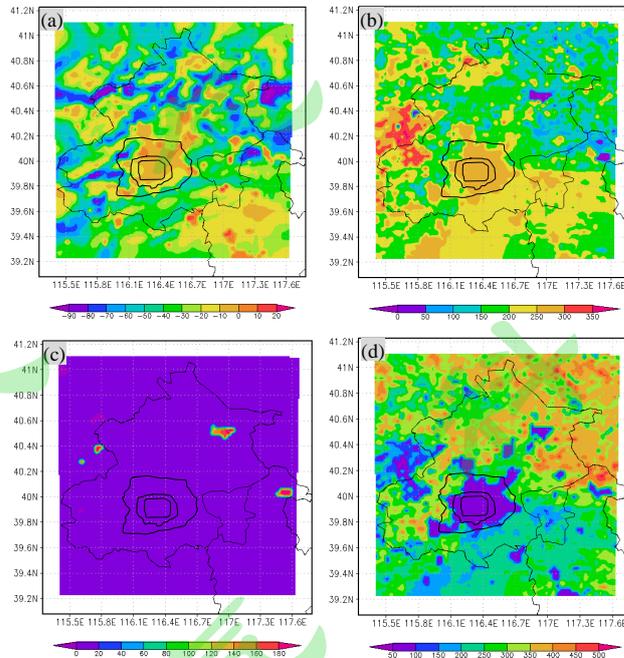


图 12 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区地表向上的感热通量和潜热通量 (单位: $W \cdot m^{-2}$) (感热: a. 5:00, b. 17:00 (LST); 潜热: c. 5:00, d. 17:00 (LST))

Fig. 12 The simulated upward sensible heat flux and latent heat flux in Beijing on 5 July 2010 (unit: $W \cdot m^{-2}$) (sensible heat: a.5:00, b.17:00 (LST); latent heat: c.5:00, d.17:00 (LST))

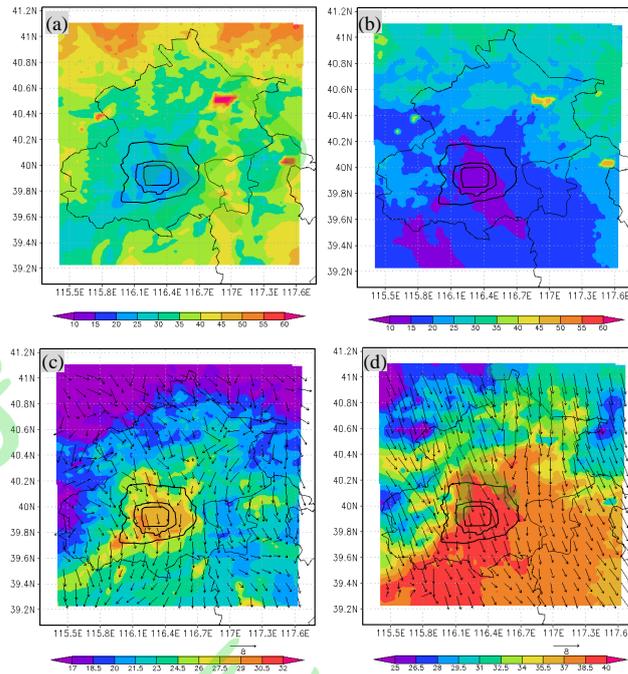


图 13 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区 2m 相对湿度 (单位:%) (a. 5:00, b. 17:00 (LST))、10m 风场 (矢量, 单位:m/s) 和 2m 气温 (单位:°C) (c. 5:00, d. 17:00 (LST))

Fig. 13 The simulated 2m relative humidity(unit:%) (a.5:00, b.10:00 (LST)), 10m wind field (vector, unit: m/s) and 2m temperature (unit:°C) (c.5:00, d.17:00 (LST)) in Beijing on 5 July 2010

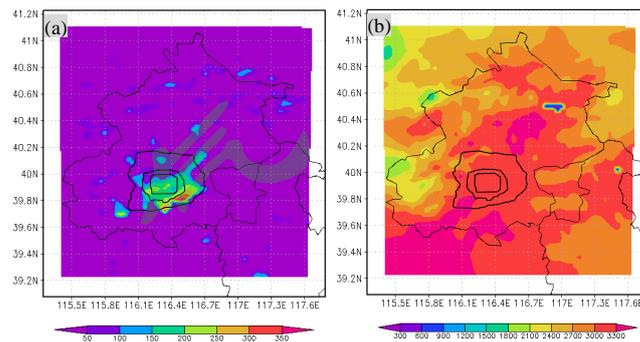


图 14. 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区边界层高度 (单位:m) (a. 5:00, b. 17:00 (LST))

Fig. 14 The simulated boundary layer height in Beijing on 5 July 2010 (unit: m) (a.5:00, b.17:00 (LST))

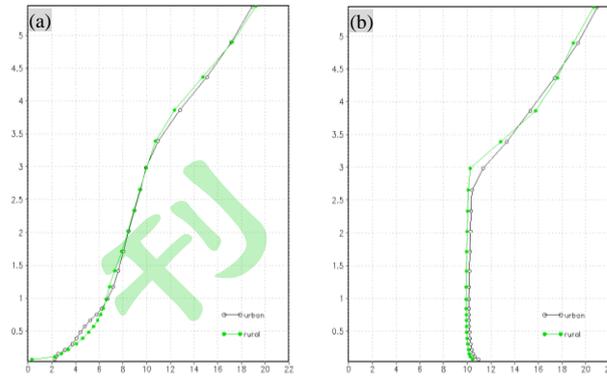


图 15. 7月5日模拟的城区 (116.5° E, 40.0° N)、乡村 (116.7° E, 40.0° N) 代表格点位温 (单位:°C) 廓线 (a. 5:00, 17:00 (LST))

Fig.15 The vertical profile of simulated potential temperature (unit:°C) on 5 July 2010 at urban grid (116.5 E, 40.0 N) and rural grid (116.7 E, 40.0 N) (a.5:00, b.17:00 (LST))

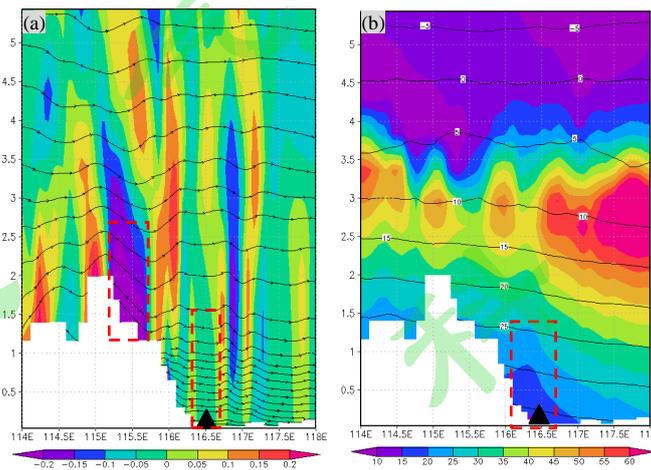


图 16. 2010年7月5日17时沿40° N剖面 (a) 垂直速度 (单位:m/s)、(b) 相对湿度(单位:%)和温度(实线, 单位:°C), ▲北京的位置

Fig. 16 The cross section of (a) vertical speed (unit:m/s), (b) relative humidity (unit:%) and temperature (unit:°C) along 40° N at 17:00 (LST) on 5 July 2010, ▲ the location of Beijing