

张雷, 任国玉, 苗世光, 等. 2020. 城市化对北京单次极端高温过程影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 44(5): 1093–1108. ZHANG Lei, REN Guoyu, MIAO Shiguang, et al. 2020. Numerical Simulation of the Effect of Urbanization on a Single Extreme-High-Temperature Event in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1093–1108. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19229

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 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 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(北京时)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 2 m 高度处相对湿度低于乡村, 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, 造成夜间城市气温明显高于乡村。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天气背景。

关键词 极端高温 城市热岛 数值模拟 WRF (Weather Research and Forecasting) 北京

文章编号 1006-9895(2020)05-1093-16

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19229

Numerical Simulation of the Effect of Urbanization on a Single Extreme-High-Temperature Event in Beijing

ZHANG Lei¹, REN Guoyu^{2,3}, MIAO Shiguang⁴, ZHANG Aiying⁵, 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

收稿日期 2019-10-15; 网络预出版日期 2020-05-12

作者简介 张雷, 男, 1980 年出生, 博士、高级工程师, 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, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2018YFA0605603, 国家自然科学基金项目 41575003、41775058

Funded by National Key Research and Development Plan of China (Grant 2018YFA0605603), National Nature Science Foundation of China (Grants 41575003, 41775058)

430074

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

5 Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089

6 Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

7 Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

Abstract Urbanization has a significant influence on the frequency and intensity of heat waves, but the mechanism of the effect of urbanization on the high-temperature process is not fully understood. In this study, the authors used the Weather Research and Forecasting (WRF) model to simulate a summer high-temperature process on 2–6 July 2010 in Beijing. This paper reports the main results obtained regarding the urbanization effect on the surface air temperature of urban areas during the heat-wave process. The optimized WRF model was able to simulate the temporal characteristics of the five consecutive days of high temperature and the variation in the urban-heat-island intensity (I_{UHI}) in Beijing. The impermeability of the underlying urban surface lowers the 2-m relative humidity of urban areas with respect to that of rural areas, which weakens the ability of urban areas to regulate the surface air temperature via latent heat. After sunset, the urban-sensible-heat flux decreases slowly, and the cooling rate in urban areas is slower than that in rural areas. At night, the structure of the boundary layer is stable, and its height is low, as is the wind speed. In this case, the energy transmitted between urban and rural areas is constrained, and the strong urban heat island is formed, resulting in the temperature in urban area is significantly higher than that in rural area at night. After sunrise, both the sensible and latent heat fluxes of urban and rural land surfaces increase rapidly, and the stability of the boundary layer decreases. In the afternoon, the underlying urban surface favors high and low value centers in the sensible and latent heat fluxes, respectively, with a weakened ability to regulate temperature via latent heat. This is conducive to vertical exchange of energy, which decreases the stability of the boundary layer. The I_{UHI} is lower in the afternoon than in the evening. Therefore, the obvious urban-heat-island effect created by the underlying urban surface in Beijing increases the strength of extreme-high-temperature events. Furthermore, in this heat-wave process, most of the eastern part of China is controlled by continental warm high pressure with clear skies and few clouds, and the northwesterly winds flowing over the Taihang Mountains generate a Fohn effect, which is the synoptic situations of the heat-wave formation in Beijing.

Keywords Extreme high temperature, Urban heat island, Numerical simulation, WRF (Weather Research and Forecasting), 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。在全球气候变暖和中国城市化进程加快的背景下,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(徐祥德等, 2002; Alexander et al., 2006)。

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; 李兴荣等, 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的时空特征,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 and 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 (北京时, 以下除特别说明外均为北京时) 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°C, 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

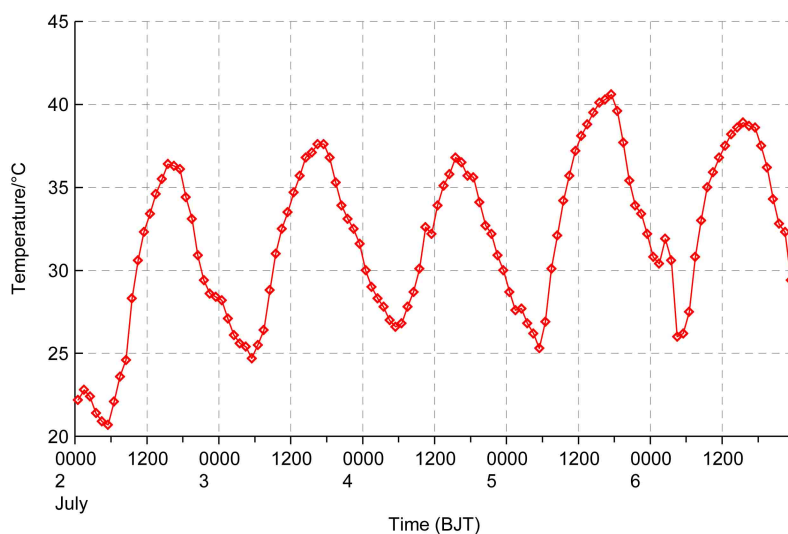


图 1 2010 年 7 月 2~6 日北京气象站的逐时气温, BJT 表示北京时间

Fig. 1 Hourly temperatures at the Beijing Weather Station during 2~6 July 2010, BJT indicates Beijing time

北京气象站最高气温达到 40.6℃，成为该站 1951 年以来第三高温日。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，城市热岛效应对城区的高温过程具有显著影响（张雷等, 2015）。

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 27 km（97×94）、9 km（79×79）、3 km（64×70），垂直方向分为 38 层，模式顶为 50 hPa，1 km 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 6 h 一次的 FNL 资料。模拟时段为 2010 年 7 月 1~7 日（协调世界时），共 6 个个例模拟试验（图 3）。

模式系统方案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 325 m 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）。

模拟检验数据使用了质量控制后北京市 2010 年 7 月 2~6 日 171 个自动气象站逐时气温资料（杨萍等, 2011）。计算城市热岛强度 I_{UHI} （urban-heat-island intensity）使用了 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条件，是一种相对客观的选站

表 1 模式主要参数
Table 1 Major model parameters

类别	设置		
区域中心	(40.25°N, 116.25°E)	(40.25°N, 116.25°E)	(40.25°N, 116.25°E)
垂直方向层数	38	38	38
模式顶	50 hPa	50 hPa	50 hPa
1 km 以下的层数	13 层	13 层	13 层
嵌套重数	3 重	3 重	3 重
水平网格距	27 km	9 km	3 km
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-Fritsch	无	无

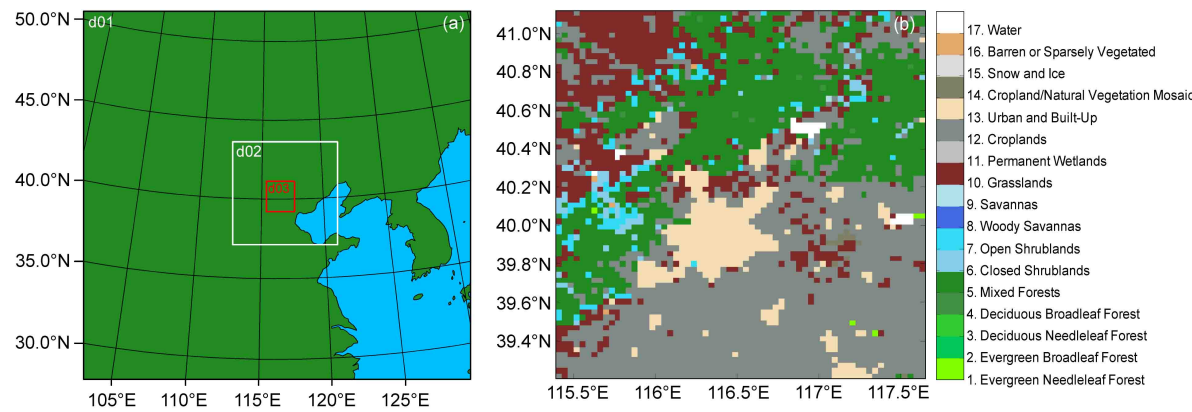


图 2 (a) 模式模拟区域、(b) 最内层区域的土地利用类型
Fig. 2 (a) Model simulation area and (b) land use categories in innermost domain

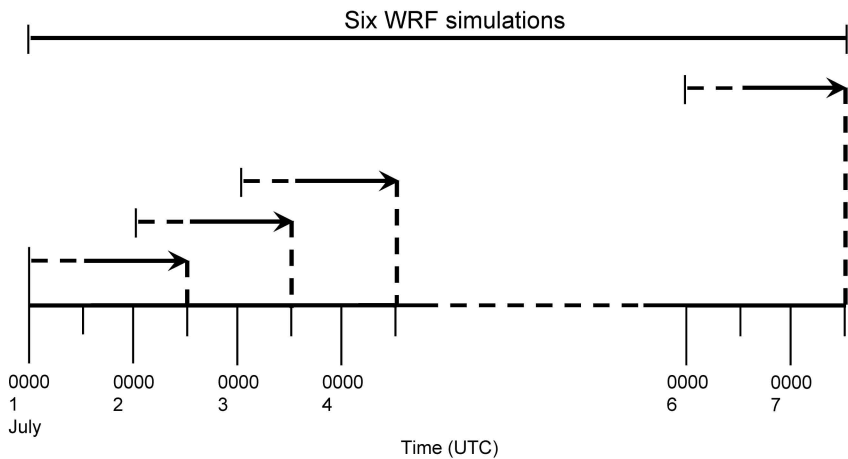


图 3 2010 年 7 月 6 个模拟试验示意图，箭头的虚线和实线部分分别为模式 spin-up 时间和 13~36 h 的预报场
Fig. 3 Diagram of six simulations in July 2010, the dashed and solid lines on arrows are the spin-up time and 13~36-h forecasts, respectively

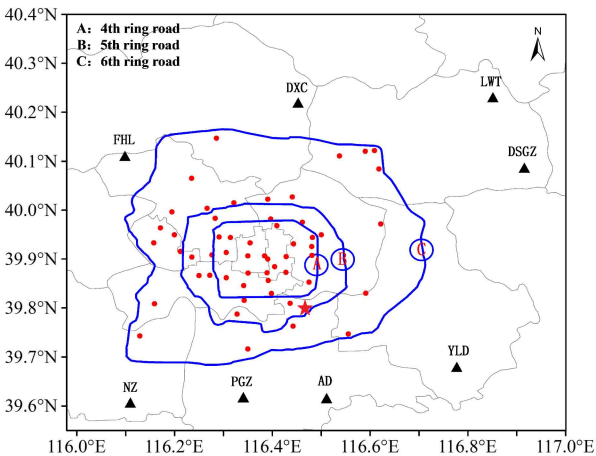


图 4 北京地区参考站（黑色三角）和城市站（红色圆点）的分布，红色星表示北京观象台的位置
Fig. 4 Distribution of reference stations (black triangles) and urban stations (red dots) in Beijing, red star indicates the location of the Beijing Observatory Station

表 2 北京地区参考站的信息

Table 2 Information of the 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

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（张雷等, 2015）。其表达式为

$$I_{\text{UHI}} = T_{\text{u}} - T_{\text{r}}, \tag{1}$$

其中， T_{u} 为城市站的气温， T_{r} 为参考站的气温。

4 模拟结果

4.1 气温模拟检验

图 5 是 2010 年 7 月 2~6 日平均的北京地区 4 个时刻 2 m 高度处气温的空间分布，彩色阴影为模拟的气温，填色圆点为与模拟时刻相对应的观测值。模拟的 2 m 高度处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 平均气温超过 37℃ 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 05:00 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℃ 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。北京的东南部和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 6 为 2010 年 7 月 2~6 日平均的北京地区 4 个时刻城市热岛强度模拟值和观测值的空间分布。

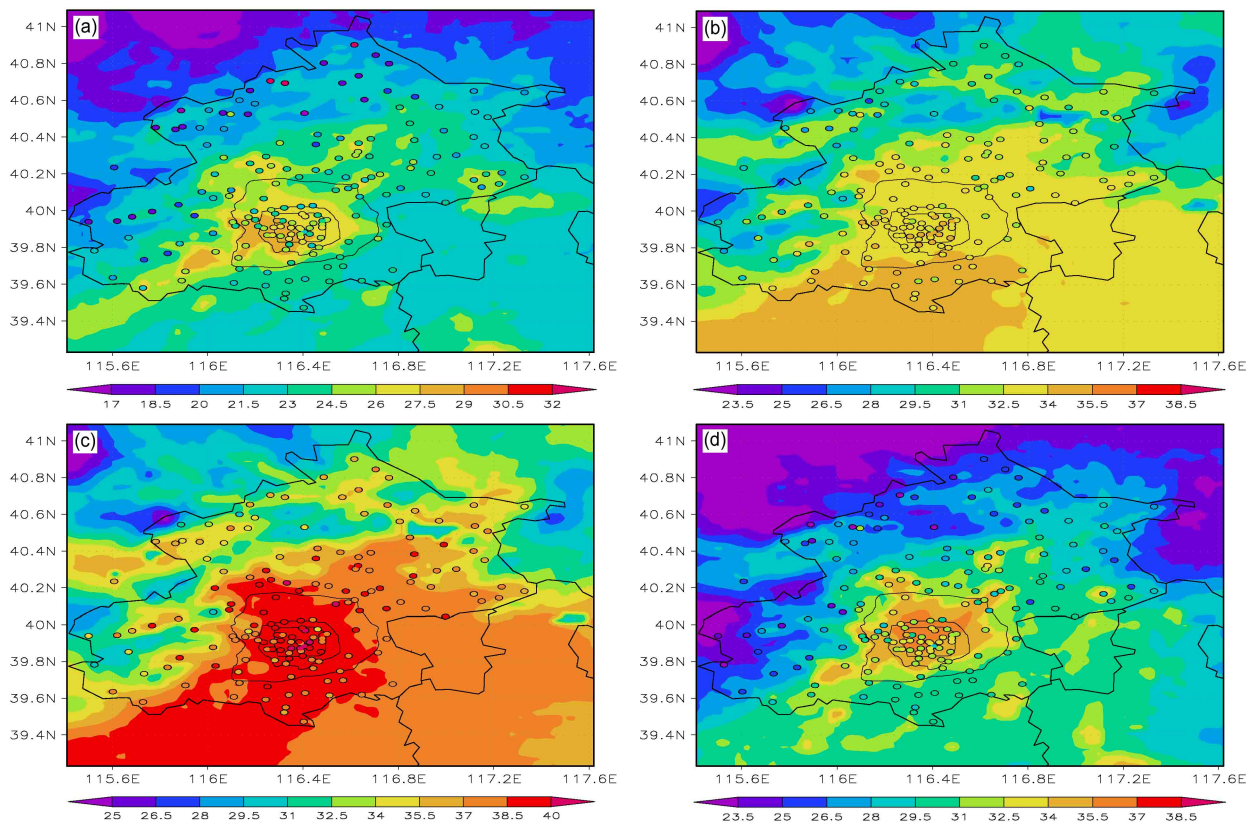


图5 2010年7月2~6日平均的北京地区2 m高度处气温(单位: °C): (a) 05:00; (b) 10:00; (c) 16:00; (d) 21:00。彩色阴影为模拟值, 填色圆圈为观测值

Fig. 5 Temperature (units: °C) at 2-m height averaged for 2–6 July 2010 in Beijing: (a) 0500 BJT; (b) 1000 BJT; (c) 1600 BJT; (d) 2100 BJT. The shadings indicate the numerical results, shaded circles indicate observations

模式准确模拟出早上 05:00 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。模拟结果能够呈现出上午 10:00 时北京南部区域城市热岛强度高于北部和下午 16:00 时城市热岛强度西部高于东部的特征。模式较好地模拟出 7 月 2~6 日平均的北京地区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。

2010 年 7 月 2~6 日平均的北京城市 (图 7a) 和乡村 (图 7b) 白天气温的模拟值与观测值吻合较好, 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。

2010 年 7 月 2~6 日平均的 2 m 高度处气温模拟值整体高于观测值 (表 3)。在城市站和参考站气温模拟值较观测值分别高 1.18°C 和 0.85°C。城市热岛强度的模拟值较观测值高 0.33°C。模拟的 51 个城市站和 8 个参考站 2 m 高度处气温的 RMSE (Root Mean Square Error) 分别为 2.60°C 和 2.57°C,

表 3 2010 年 7 月 2~6 日平均的北京地区 2 m 高度处气温模拟与观测的比较

Table 3 Comparison of simulated and observed temperatures at 2-m height averaged on 2–6 July 2010 in Beijing

	模拟/°C	观测/°C	BIAS/°C	RMSE/°C	R
城市站气温	33.25	32.07	1.18	2.60	0.90
参考站气温	31.28	30.43	0.85	2.57	0.90
I_{UHI}	1.97	1.64	0.33	1.99	0.45

注: BIAS 是模拟与观测的偏差; RMSE 表示均方根误差; R 是相关系数。

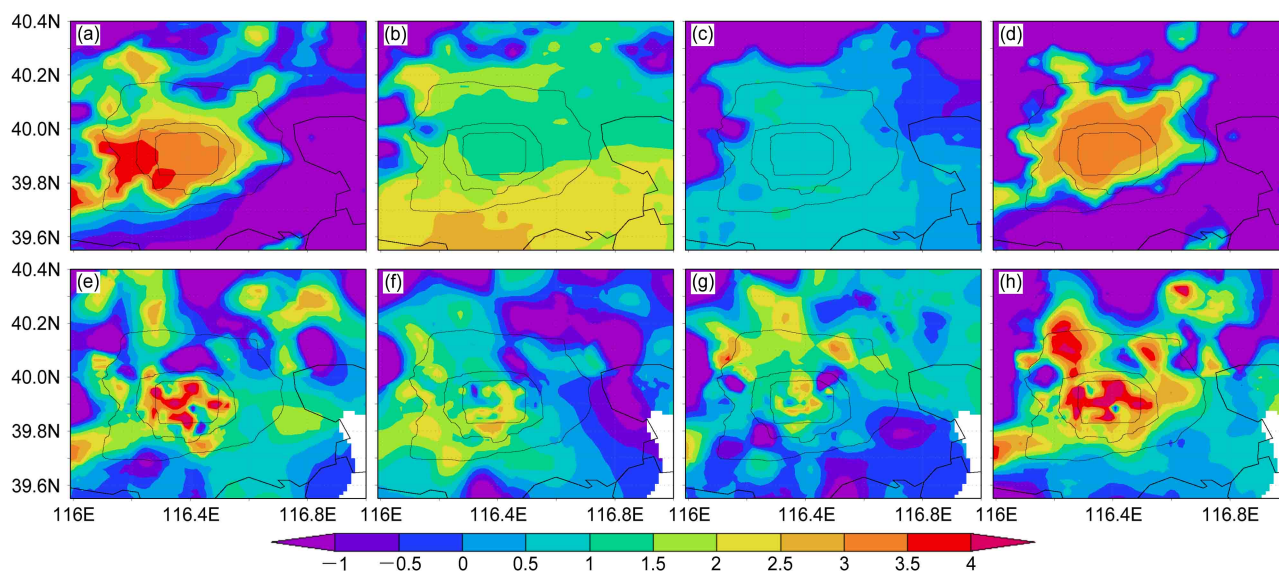


图6 2010年7月2~6日平均的北京地区模拟的(上)、观测的(下)城市热岛强度(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a、e) 5:00; (b、f) 10:00; (c、g) 16:00; (d、h) 21:00

Fig. 6 Simulated (upper) and observed (lower) I_{UHI} (units: $^{\circ}\text{C}$, urban-heat-island intensity) averaged for 2–6 July 2010 in Beijing: (a, d) 0500 BJT; (b, f) 1000 BJT; (c, g) 1600 BJT; (d, h) 2100 BJT

相关系数均为 0.90。

2010年7月5日17:00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(图8),但相对城区普遍超过 40°C 的气温观测值整体偏低,05:00时北京城区为高值中心的气温空间分布特征能够被模式很好地呈现。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9为模拟与观测的7月5日北京地区05:00和17:00城市热岛强度空间分布的对比。模式很好地模拟出7月5日05:00(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。对极端高温夜间热岛强度地模拟,同样存在模拟的夜间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。

将高温过程中模拟的2 m高度处气温与气象站观测的逐时气温(图10)进行对比,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05:00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。模式能够较好地模拟出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2 m高度处气温较超过 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。

7月2~6日逐日的模拟偏差Bias(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 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 之间。

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高值中心的气温分布特征,模拟的白天气温与观测吻合较好,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05:00

和 17:00 的感热通量和潜热通量。凌晨 05:00, 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。

7 月 5 日北京城区 2 m 高度处的相对湿度较周边乡村明显偏低 (图 13a、b), 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

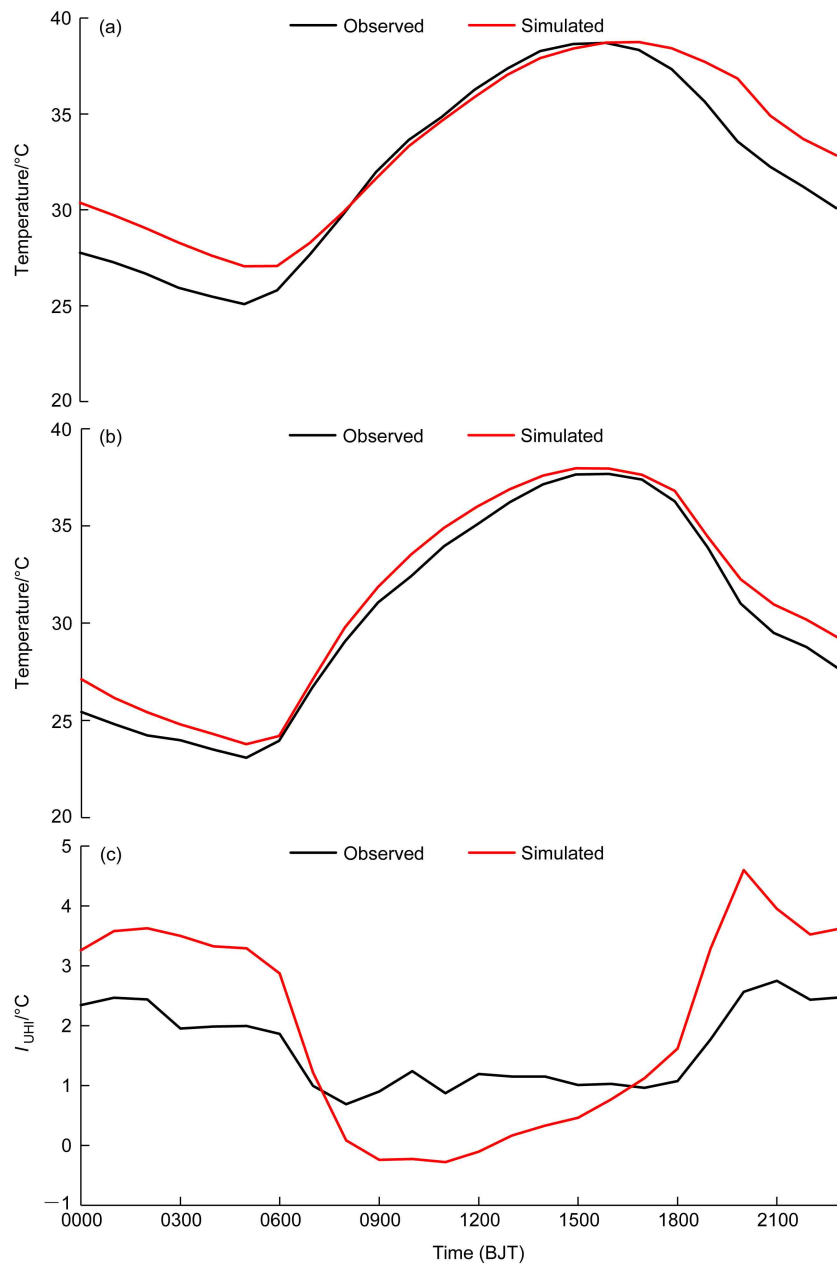


图 7 2010 年 7 月 2~6 日平均的北京 (a) 城市气温、(b) 乡村气温和 (c) 城市热岛强度的日变化

Fig. 7 Diurnal variations of (a) urban temperature, (b) rural temperature, and (c) I_{UHI} averaged for 2–6 July 2010 in Beijing

相对湿度偏低，从而消弱了城市通过潜热调节气温的能力。

下午 17:00 时，北京地区 10 m 高度处风向为一致的西北风（图 13d），此时的风速大于凌晨 05:00（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。

凌晨 05:00（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 3000 m，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

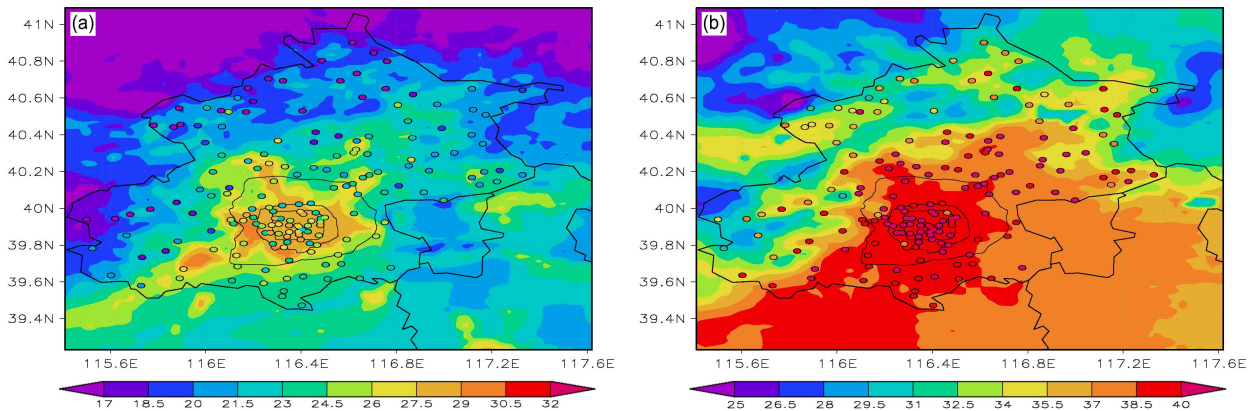


图 8 2010 年 7 月 5 日 (a) 05:00、(b) 17:00 北京地区 2 m 高度处气温 (单位: °C)，彩色阴影为模拟值，填色圆圈为观测值

Fig. 8 Temperature (units: °C) at 2-m height in Beijing at (a) 0500 BJT, (b) 1700 BJT on 5 July 2010, the shadings indicate the numerical results, shaded circles indicate observations

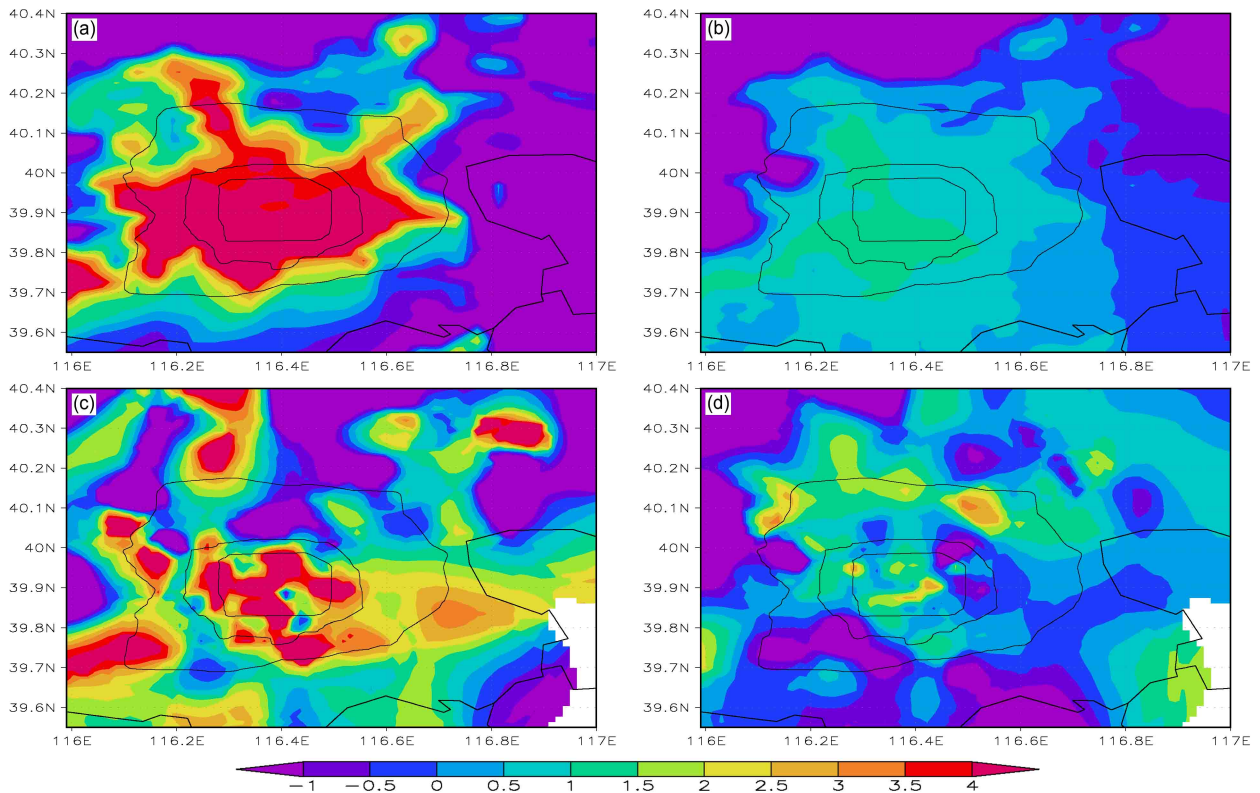


图 9 2010 年 7 月 5 日北京地区 (a、b) 模拟的、(c、d) 观测的城市热岛强度 (单位: °C): (a、c) 05:00; (b、d) 17:00

Fig. 9 (a, b) Simulated, (c, d) observed I_{UHI} (units: °C) in Beijing on 5 July 2010: (a, c) 0500 BJT; (b, d) 1700 BJT

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。

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 2 m 高度处的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。总体上, 此模拟方案能够较好地模拟出北京地区 2 m 高度处的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

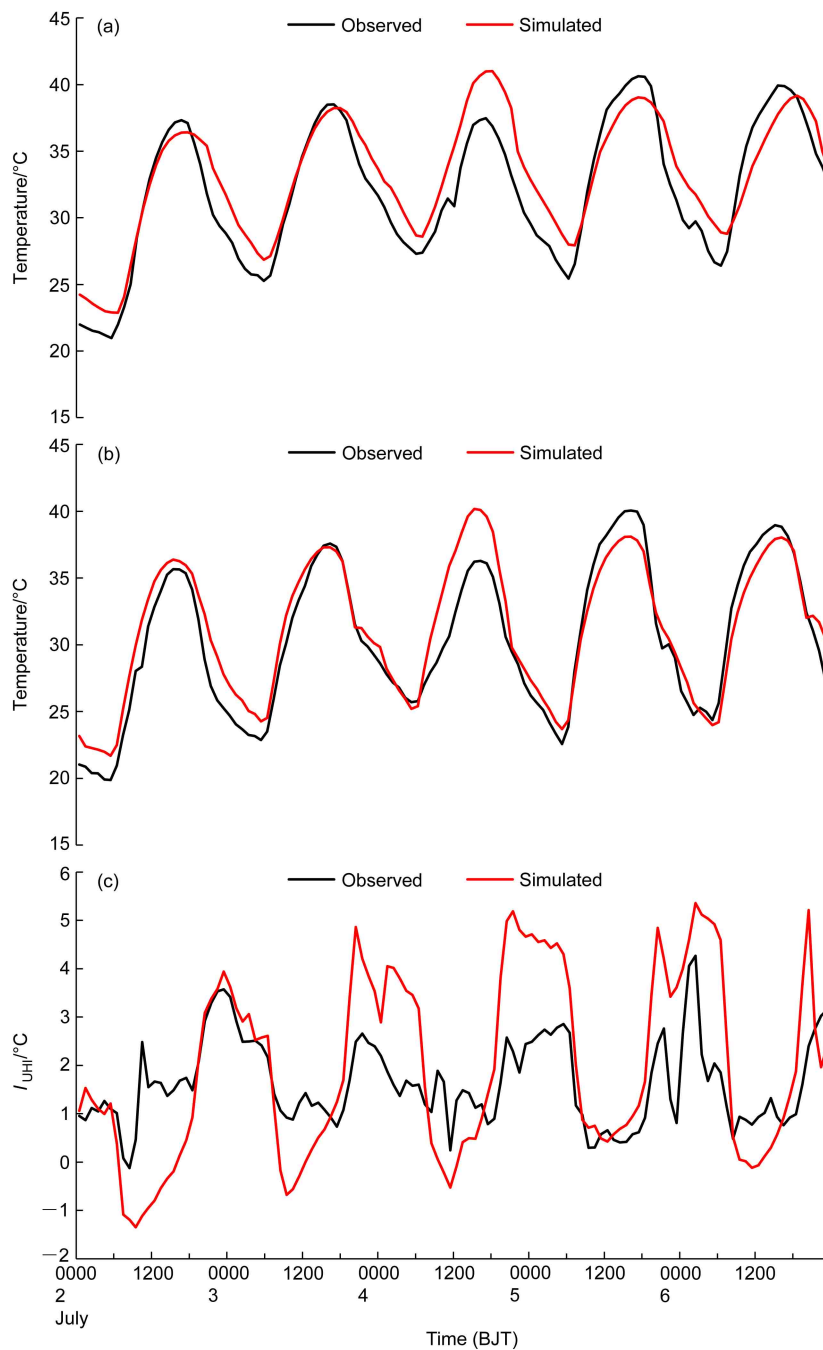


图 10 2010 年 7 月 2~6 日观测的和模拟的北京地区逐时 (a) 城市气温、(b) 乡村气温、(c) 城市热岛强度

Fig. 10 Simulated and observed hourly (a) urban temperatures, (b) rural temperatures, and (c) I_{UHI} in Beijing during 2–6 July 2010

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)。受暖高压脊控制和西北越山气流形成的焚风效应影响, 是此次北京平原地区极端高温发生的天气背景。城市热岛效应则加剧了这种区域性高温天气。

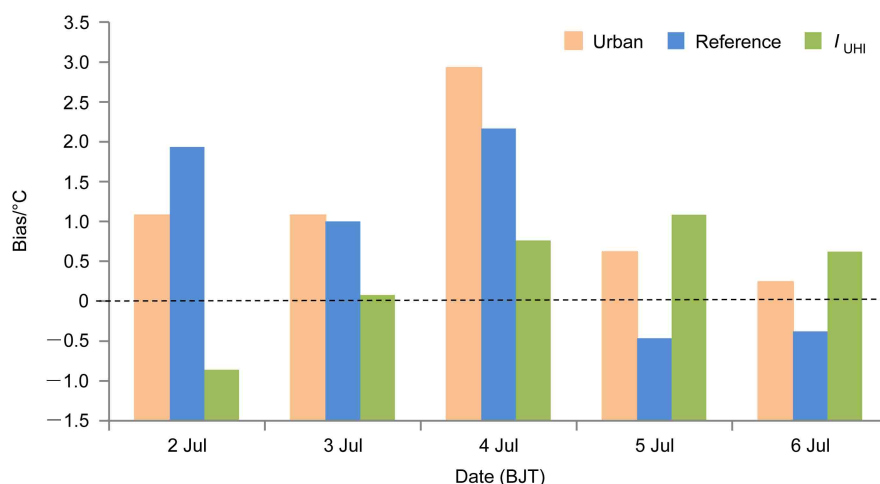


图 11 2010 年 7 月 2~6 日模拟的北京城市站、参考站气温和城市热岛强度的逐日偏差 (单位: °C)

Fig. 11 Daily biases (units: °C) of simulated temperatures at urban stations, reference stations, and I_{UHI} in Beijing during 2-6 July 2010

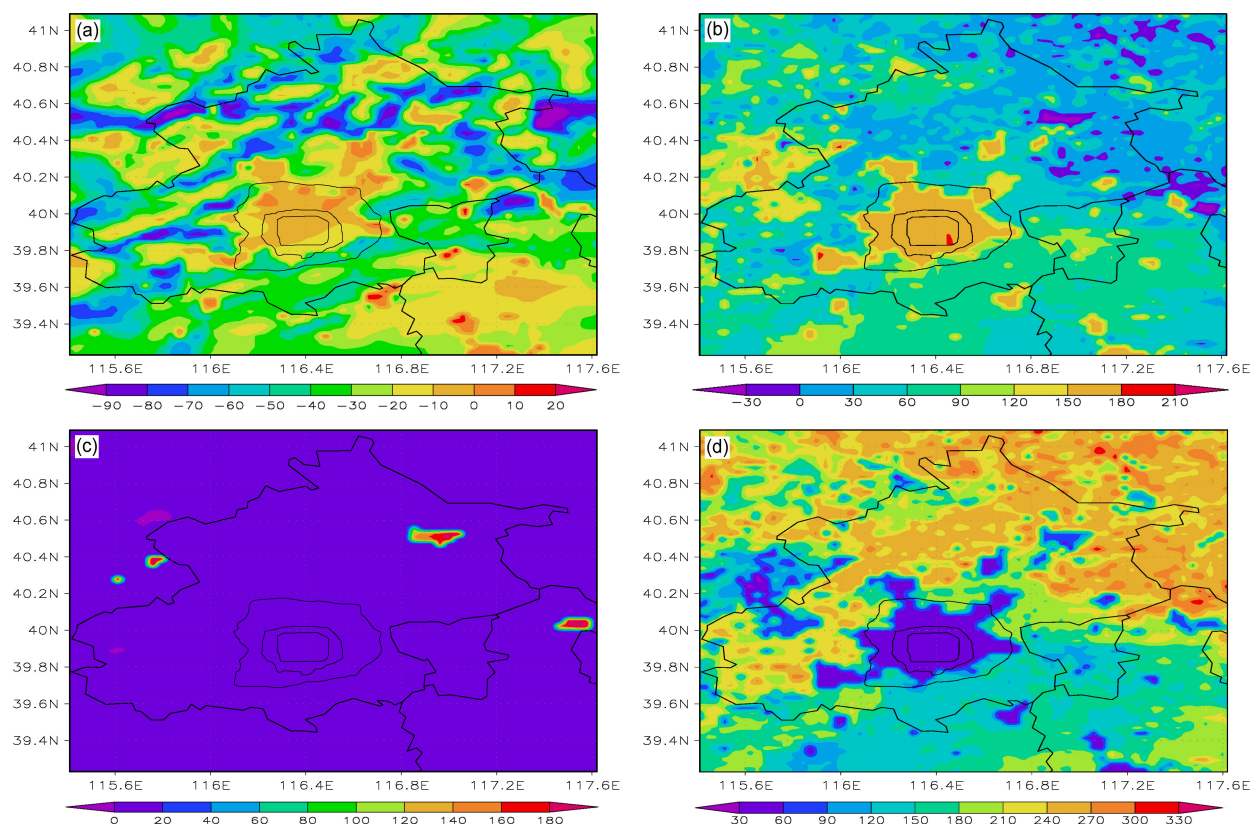


图 12 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区地表向上的 (a、b) 感热通量和 (c、d) 潜热通量 (单位: $W m^{-2}$): (a、c) 05:00; (b、d) 17:00

Fig. 12 Simulated upward (a, b) sensible and (c, d) latent heat fluxes (units: $W m^{-2}$) for surface of Beijing area on 5 July 2010: (a, c) 0500 BJT; (b, d) 1700 BJT

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

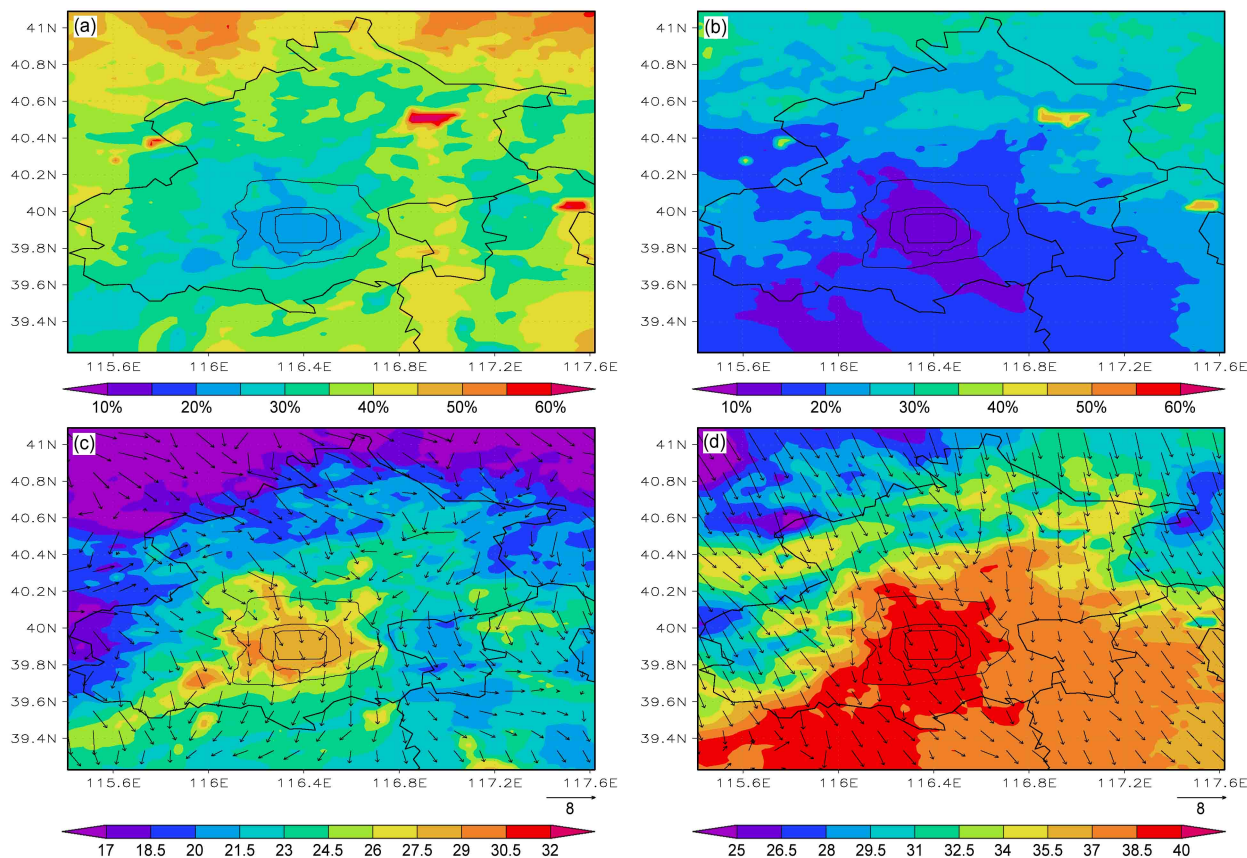


图 13 2010 年 7 月 5 日模拟的北京地区 (a、b) 2 m 高度处的相对湿度, (c、d) 10 m 高度处风场 (箭头, 单位: m s^{-1})、2 m 高度处温度 (彩色阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$): (a、c) 05:00; (b、d) 17:00

Fig. 13 Simulated (a, b) relative humidity at 2-m height, (c, d) wind (arrows, units: m s^{-1}) at 10-m height and temperature (color shadings, units: $^{\circ}\text{C}$) at 2-m height in Beijing on 5 July 2010: (a, c) 0500 BJT; (b, d) 1700 BJT

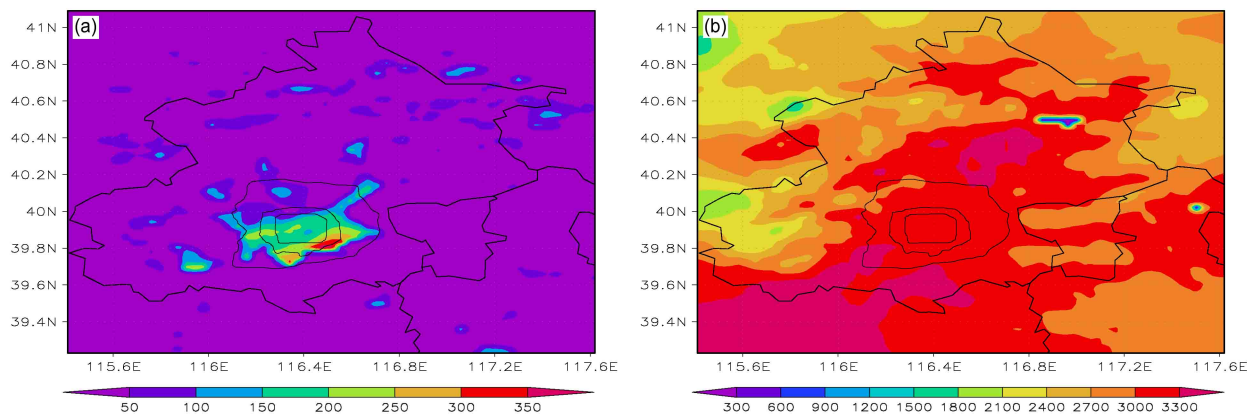


图 14 2010 年 7 月 5 日模拟的 (a) 05:00、(b) 17:00 北京地区边界层高度 (单位: m)

Fig. 14 Simulated boundary layer heights (units: m) in Beijing at (a) 0500 BJT, (b) 1700 BJT on 5 July 2010

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。

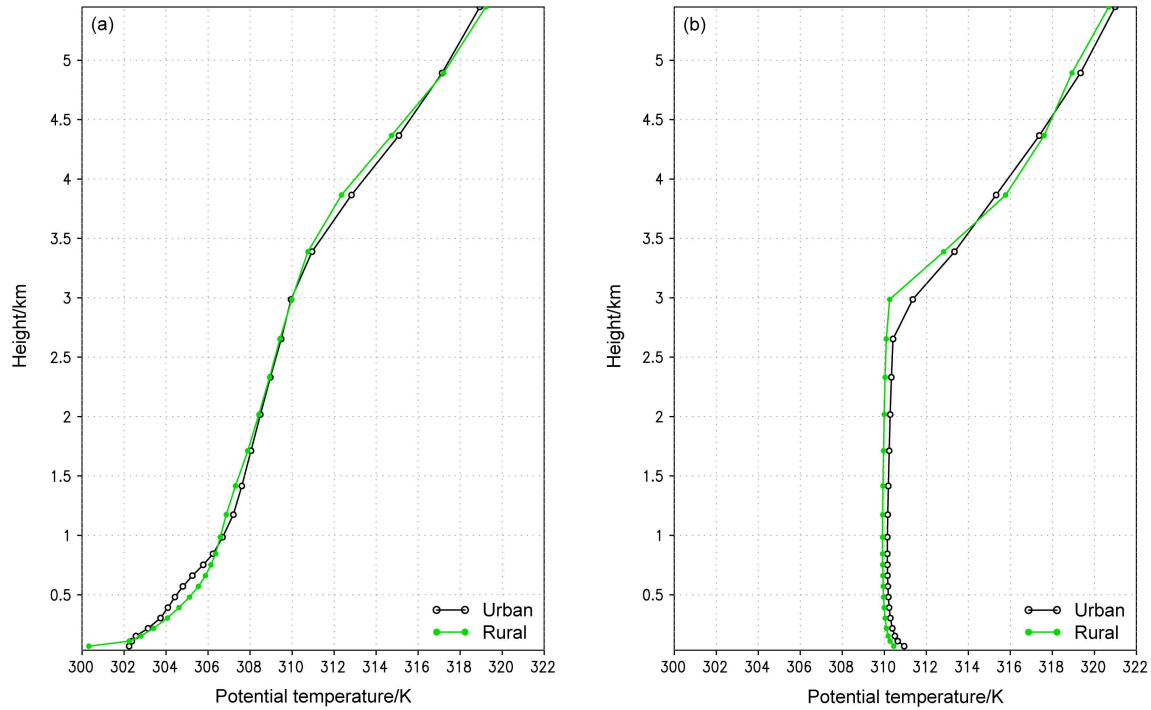


图 15 2010 年 7 月 5 日模拟的 (a) 05:00、(b) 17:00 城区 (40.0°N, 116.5°E)、乡村 (40.0°N, 116.7°E) 代表格点位温 (单位: K) 廓线
Fig. 15 Profiles of simulated potential temperature (units: K) at urban grid point (40.0°N, 116.5°E) and rural grid (40.0°N, 116.7°E) at (a) 0500 BJT, (b) 1700 BJT on 5 July 2010

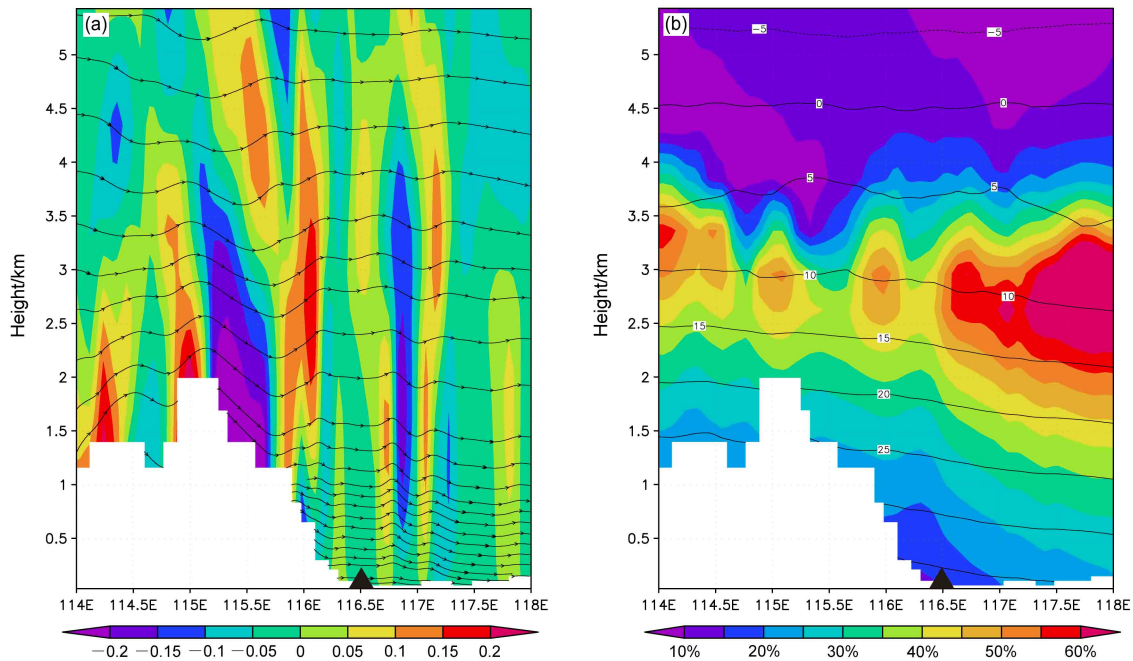


图 16 2010 年 7 月 5 日 17 时沿 40°N 的 (a) 垂直速度 (彩色阴影, 单位: m s^{-1})、流线 (带箭头的实线); (b) 相对湿度 (彩色阴影, 单位: %), 和温度 (实线, 单位: °C) 的垂直剖面。黑色三角形为北京的位置
Fig. 16 Vertical cross sections of (a) vertical speed (color shadings, units: m s^{-1}), streamlines (the solid lines with arrows); (b) relative humidity (color shadings, units: %), and temperature (solid lines, units: °C) along 40°N at 1700 BJT on 5 July 2010. The black triangles indicate the location of Beijing

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 2 m 高度处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, 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 2 m 高度处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, 2 m 高度处气温和边界层高度升高, 边界层稳定性下降。午后, 北京地区边界层高度处于高值, 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。

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钧副研究员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)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005JD006290
- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. 2011. The integrated WRF/urban

- modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *Int. J. Climatol.*, 31(2): 273–288. doi:10.1002/joc.2158
- 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. Hu Xiaoming, Liu Shuhua, Liang Fuming, et al. 2005. Numerical simulation of features of surface boundary layer over Beijing area [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 41(4): 514–522. doi:10.3321/j.issn:0479-8023.2005.04.003
- 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 J. Geophys. (in Chinese)*, 49(1): 69–77. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.010
- 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 2010. 城市气象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
- 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]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82(1): 67–80. doi:10.2151/jmsj.82.67
- 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(3): 329–358. doi:10.1023/A:1019207923078
- 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
- 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
- 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(10): 1332–1355. Liu Shuhua, Liu Zhenxin, Zheng Hui, et al. 2013. Multi-scale atmospheric boundary layer and land surface physics process models [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica (in Chinese)*, 43(10): 1332–1355. doi:10.1360/132013-247
- 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

- Loridan T, Grimmond C S B, 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
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W. 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 104(2): 261–304. doi:10.1023/A:1016099921195
- 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:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.03.003
- 苗世光, Chen F, 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 F, Li Qingchun, et al. 2010. Month-averaged impacts of urbanization on atmospheric boundary layer structure and precipitation in summer in Beijing area [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 53(7): 1580–1593. doi:10.3969/J.ISSN.0001-5733.2010.07.009
- 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(13): 3179–3189. doi:10.1175/2010jcli3658.1
- 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): L05711. doi:10.1029/2006GL027927
- Salamanca F, 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 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 99(3): 345–356. doi:10.1007/s00704-009-0143-8
- 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气. II. 模拟实验和机理分析 [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:10.3878/j.issn.1006-9585.1999.04.02
- 王格非. 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.
- 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, 33.
- 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, 33. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2003.09.005
- 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.
- Wang Zongmin, Ding Yihui, Zhang Yingxin, et al. 2012. Feature and mechanism of the foehn weather on east slope Taihang Mountains. II: Case analysis of the effects of lee wave on foehn occurring and moving [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31(2): 555–561.
- 王咏薇, 王格非, 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 Meteor. Sinica (in Chinese)*, 76(4): 649–662. doi:10.11676/qxxb.2018.020
- 谢庄, 崔继良, 刘海涛, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气. I. 历史概况及个例分析 [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
- 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. Introduction of Urbanization Environmental Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 284pp.
- 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:10.3969/j.issn.1001-7313.2011.06.008
- 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
- 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
- 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 J. Geophys. (in Chinese)*, 54(5): 1150–1159. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.05.002
- 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

- 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 [J]. [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 [J]. [Chinese J. Geophys. \(in Chinese\)](#), 56(8): 2558–2573. doi:10.6038/cjg20130806
- 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(S1): 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(S1): 48–53. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.z1.007
- 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
- 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 \(in Chinese\)](#), 34(3): 786–796. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00035