氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

多层城市冠层模型参数优化及对京津冀城市群的高温模拟

王玉洁 向洋 陆波

Parameter Optimization of Multi-layer Urban Canopy Model and Simulation of Extreme High Temperature in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

WANG Yujie XIANG Yang LU Bo

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20161

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

城市街区形态及冷却屋顶对冠层内辐射热通量的影响

A Preliminary Analysis of the Influence of Block Morphology and Cool Roof on the Radiation Heat Flux in Urban Canopy

气候与环境研究. 2018, 23(5): 563 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17076

基于均一化观测序列的京津冀地区气候变化格局分析

Analysis of Climate Change in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Homogenized Observations

气候与环境研究. 2018, 23(5): 524 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17054

京津冀地区夏季降水冰云和非降水冰云云特征对比分析

--

气候与环境研究. 2020, 25(1): 77 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18091

上海市土地利用资料优化方案对WRF模式模拟高温过程的影响

Influence of Land Use Data Optimization Schemes on WRF Model Simulations of High Temperature Processes in Shanghai

气候与环境研究. 2020, 25(4): 443 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20013

基于KZ滤波的京津冀2013～2018年大气污染治理效果分析

Effectiveness of Air Pollution Control Efforts in BeijingTianjinHebei Region during 20132018 Based on the KolmogorovZurbenko Filter

气候与环境研究. 2020, 25(5): 499 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19094

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王玉洁, 向洋, 陆波. 2021. 多层城市冠层模型参数优化及对京津冀城市群的高温模拟 [J]. 气候与环境研究, 26(6): 663−677. WANG Yujie, XIANG Yang, LU Bo. 2021. Parameter Optimization of Multi-layer Urban Canopy Model and Simulation of Extreme High Temperature in Beijing−Tianjin−Hebei Urban Agglomeration [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (6): 663−677. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20161

多层城市冠层模型参数优化及对京津冀城市群的高温模拟

王玉洁[1, 2] 向洋[3] 陆波[3]

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044
2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
3 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 针对京津冀高温模拟，综合运用卫星和地面气象观测数据、参数敏感性试验等技术方法，确定了耦合了多层城市冠层模型的中尺度数值模式（WRF/BEP/BEM）的地表反照率、比辐射率和人为热等参数的本地化配置。数值对比试验表明，参照试验中优化地表反照率、比辐射率和人为热（通过本地优化 BEM 输入参数来实现）等参数后，模式对京津冀高温模拟的效果均有显著提高，65% 及以上的城市站点，参照试验比敏感性试验模拟误差降低 0.5℃ 以上。经参数优化的 WRF/BEP/BEM，较好地模拟了 2010 年以来京津冀地区 5 次极端高温过程，模拟结果与观测的标准差分别为 1.4°C、0.8°C、0.9°C、1.0°C 和 0.7°C，分别较 ERA5 与观测的标准差减小 26.3%、61.9%、40.0%、41.2% 和 36.3%。参数本地优化的 WRF/BEP/BEM，可进一步应用于京津冀极端高温的相关研究，特别是城市化对极端高温作用机理的研究。

关键词 多层城市冠层模型 参数优化 京津冀 极端高温
文章编号 1006-9585(2021)06-0663-15 **中图分类号** P435 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20161

Parameter Optimization of Multi-layer Urban Canopy Model and Simulation of Extreme High Temperature in Beijing−Tianjin−Hebei Urban Agglomeration

WANG Yujie[1, 2], XIANG Yang[3], and LU Bo[3]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster*, *Ministry of Education/International Joint Research Laboratory on Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *School of Atmospheric Sciences*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
3 *National Climate Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract Numerical simulation is an effective method to study the urban climate effect, and the parameters are very important for simulation. Using satellite and surface meteorological observations, parameter sensitivity tests of the simulation of extremely high temperatures in the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration are conducted, and

收稿日期 2020-12-22；**网络预出版日期** 2021-06-29
作者简介 王玉洁，女，1971 年出生，博士，主要从事气候变化及气象灾害研究。E-mail: wang-yujie@163.com
通讯作者 向洋，E-mail: xiangy_0418@163.com
资助项目 国家自然科学基金 42075023
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42075023)

localized parameter configurations such as surface albedo, surface emissivity, and anthropogenic heat for the model (WRF/BEP/BEM) in the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration are determined. It is shown that the locally optimized surface albedo, surface emissivity, and anthropogenic heat have a significant effect on the simulation results of extremely high temperatures in Beijing–Tianjin–Hebei. By localizing these parameters, surface maximum temperature simulation errors are reduced by more than 0.5°C in more than 65% of urban sites. Since 2010, five extreme high-temperature processes have been successfully simulated in the Beijing–Tianjin–Hebei region with the optimized WRF/BEP/BEM. Standard deviations of the extremely high temperature simulated in the model from the observation are about 1.4°C, 0.8°C, 0.9°C, 1.0°C, and 0.7°C, which are decreased by 26.3%, 61.9%, 40.0%, 41.2%, and 36.3%, respectively, compared with the standard deviations of ERA5. After optimization, the model simulation error is obviously reduced, and it can be further applied to the study of the Beijing–Tianjin–Hebei urbanization mechanism under extremely high temperatures.

Keywords Multilayer urban canopy model, Parameter optimization, Beijing−Tianjin−Hebei, Extreme high temperature

1 引言

近年来，城市化造成的下垫面改变和人为热排放等因素产生的城市热岛效应，使得城市高温热胁迫显著放大（Chen et al., 2011; Sun et al., 2014; Zhao et al., 2014; Oleson et al., 2015; Perkins, 2015），在全球气候变化背景下，未来城市极端高温风险将加剧（Yin et al., 2013; Sun et al., 2014）。研究城市极端高温相关作用机理，为应对极端高温风险提供科学支撑、对经济社会可持续发展具有重要意义（Bai et al., 2018; 翟盘茂等，2019）。

单纯利用观测数据很难深入分析城市化气候效应，特别是很难进行相关机理研究（杨续超等，2015），因此，数值模式成为量化和解释城市化影响、探寻极端高温物理机制等研究的重要手段。目前，WRF 耦合的单层城市冠层模块（Urban Canopy Model, UCM）（Kusaka and Kimura, 2004）被广泛应用于城市高温热浪模拟（Grossman-Clarke et al., 2010; Chen et al., 2011; Li and Bou-Zeid, 2013; 崔耀平等, 2015; Chen and Frauenfeld, 2016）。但 UCM 对城市建筑高度参差不齐、垂直方向建筑密度非均匀等特征未能描述，对不同层次上城市湍流的影响未予以区分，未考虑人为热的动态变化。物理过程更加复杂的多层城市冠层模块（Building Environment Parameterization, BEP），显式求解三维城市表面对温度、动量及湍流的影响，弥补了 UCM 的部分不足（Martilli, 2002; Dupont et al., 2004），然而其对人为热，尤其是建筑排热的处理仍然比较简单（Zhang et al., 2009; Wang et al., 2012）。近年来，建筑能量模型（Building Energy Model, BEM）被引入到多层城市冠层模块（BEP/BEM）中（Salamanca et al., 2010）。与 UCM 中给定人为热加热典型值和加热廓线来表征人为热不同，BEM 通过建筑物内外热交换来动态计算人为热，也即是说 BEM 能够刻画人为热的时间、空间变化规律。过去的研究结果显示，耦合了建筑能量模型的多层城市冠层模型（BEP/BEM）可显著改善模式对城市表面热通量的模拟（Salamanca et al., 2010; Chen et al., 2011）。物理过程更加完善的 BEP/BEM，对精确模拟城市极端高温等相关研究具有很大的应用潜力。然而，BEP/BEM 较复杂的耦合过程不可避免地引入了更多的参数和更大的自由度，其默认参数设置多是基于特定城市形态或者理想试验得来的，因此，在针对不同地区城市进行相关数值试验前，对 BEP/BEM 中一些默认参数进行本地优化就显得尤为必要（杨旺明等, 2014; 杨续超等, 2015）。

京津冀城市群是我国三大超级城市群之一，京津冀协调发展是国家重大战略。近年来研究表明，京津冀极端高温事件频发，尤其是极端高温强度增强趋势城区明显大于郊区（赵俊虎等, 2011; 王君等, 2013; 杨萍等, 2013）。在全球变暖背景下，京津冀城市化对极端高温的贡献和作用机理，目前并不十分清楚。为此，本文拟通过参数敏感性试验，开展关于耦合了多层城市冠层模型的中尺度数值模式（以下简称 WRF/BEP/BEM）对京津冀高温模拟的参数优化研究，为进一步开展京津冀城市群极端高温相关的机理研究提供支撑。

2 资料和方法

2.1 观测资料和城乡站点选取

京津冀地区位于华北北部（36.07°N～42.65°N，113.46°E～119.79°E），包括北京、天津等特大城

市以及河北省，区域面积 21.6×10^4 km^2，人口 1.1 亿，东临渤海，西接太行，北靠燕山，“两山一海”间以平原为主（以下称平原地区），地理位置十分特殊，属温带季风气候。

本文使用的资料包括：来自中国气象局国家信息中心地面要素数据集（Yang and Li, 2014）的京津冀地区 174 站经质量控制后的均一化地面 2 m 高度逐小时气温资料，美国国家环境预测中心气候预测系统 6 h 一次再分析资料（Climate Forecast System Version2，CFSRv2，https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/[2020-06-10]），欧洲中期天气预报中心第五代全球大气逐小时再分析资料（the fifth generation of atmospheric reanalyses of the global climate, ERA5, https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview[2020-06-10]），最优插值海表温度产品（Optimum Interpolation Sea Surface Temperatur, OISST, https://www.ncdc.noaa.Gov/oisst[2020-05-15]）以及中国科学院资源环境科学数据中心研发的中国土地利用变化遥感监测数据集（徐新良等, 2018）。

城乡站点分类根据 2015 年土地利用城市建筑物分类数据（图 1 灰色区域所示，水平分辨率为 1 km×1 km），将站点经纬度坐标对应的 1 km×1 km 像元是城市地表的站点定义为城市站，共计 110 站（图 1 红色实心圆所示），将站点经纬度坐标对应的 1 km×1 km 像元为非城市地表的站点定义为乡村站，共 64 站（图 1 蓝色空心圆所示），区分城、乡站点的主要目的，是为了将模式模拟中调用了城市冠层模型的网格中的站点挑选出来，以便更准确地评估城市冠层模型对城市气候的刻画能力。

利用国家气候中心整理的土地利用规划、道路、遥感影像、人口、行政区划等数据进一步将城市分为低密度居民区、高密度居民区和商业区 3 种土地利用类型。商业用地和居住用地主要依据土地利用规划来区分，县、乡镇居住区统一归为低密度居民区，地级以上城市平均人口密度不超过 8500 人/km^2，其对应的居民区为低密度居民区，大于 8500 人/km^2 为高密度居民区。

将京津冀地区内所有站点空间平均后超过 35°C 的日最高气温定义为极端高温。连续两日及以上日最高气温超过 35°C 定义为一次极端高温事件。根据极端高温事件定义，依次挑选出京津冀地区近 10 年来五次典型的极端高温事件，分别为 2010 年 7 月 3～6 日、2015 年 7 月 11～13 日、2018 年 6 月 27～30 日、2017 年 7 月 10～14 日及 2018 年 8 月 1～4 日 5 次极端高温过程。其中，2010 年 7 月 6 日区域平均日最高气温达 38.74°C，为近 10 年最高；2015 年 7 月 13 日区域平均日最高气温达 37.98°C，为近 10 年次高，近 5 年最高；2017 年 7 月 10～14 日的极端高温事件为近 10 年来持续时间最长的一次高温过程（图 2）。利用以上 5 次极端高温事件对参数本地优化后的 WRF/BEP/BEM 的高温模拟能力进行独立样本检验。选取京津冀气温较常年同期明显偏高的 2015 年 6 月 1～10 日进行参数敏感性试验。选取 12:00（北京时间，下同）至 16:00 作为高温时段。

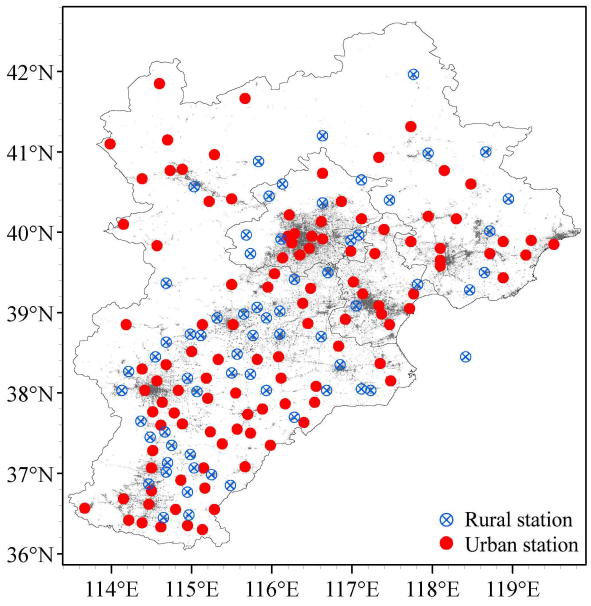

图 1　京津冀地区气象站点分布（灰色表示城市区域）

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in Beijing–Tianjin–Hebei (gray denotes urban area)

2.2　模式嵌套及物理过程

本研究运用 WRF（ARW4.0）/BEP/BEM，采用三重嵌套，D01、D02、D03 水平网格分辨率分别为 9 km、3 km 和 1 km，模式最内层嵌套区域（D03）网格数为 840（纬向）×660（经向），包含整个京津冀地区（图 3），垂直分层 38 层，其中 200 m 内 10 层。D02 和 D03 模拟区域不采用积云对流参数化方案。采用的物理过程主要有 RRTM 长短波辐射方案、MYJ（Mellor-Yamada-Janjic）行星边界层方案、Noah 陆面过程模式（耦合 BEP/BEM），模式其他物理过程参数化方案见表 1。

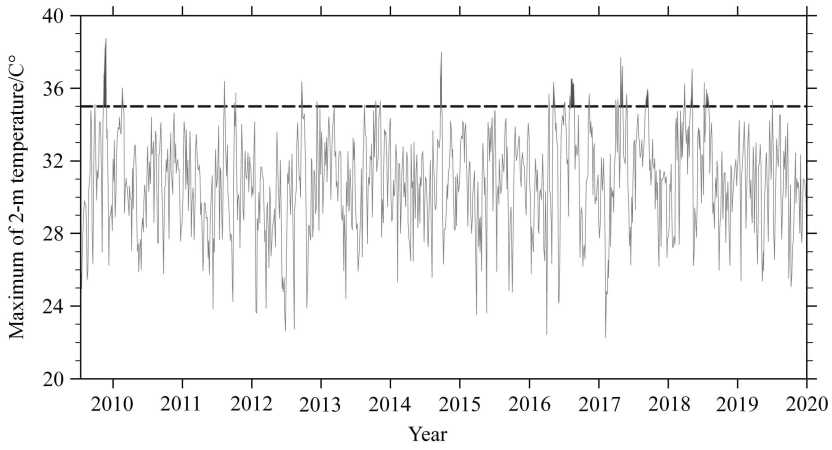

图 2　2010～2019 年夏季（JJA）京津冀地区站点平均地表 2 m 高度日最高气温时间变化（虚线表示 35°C）

Fig. 2　Time series of the regional average summer (JJA) daily maximum of 2-m temperature in Beijing–Tianjin–Hebei from 2010 to 2019 (dashed line indicates 35°C)

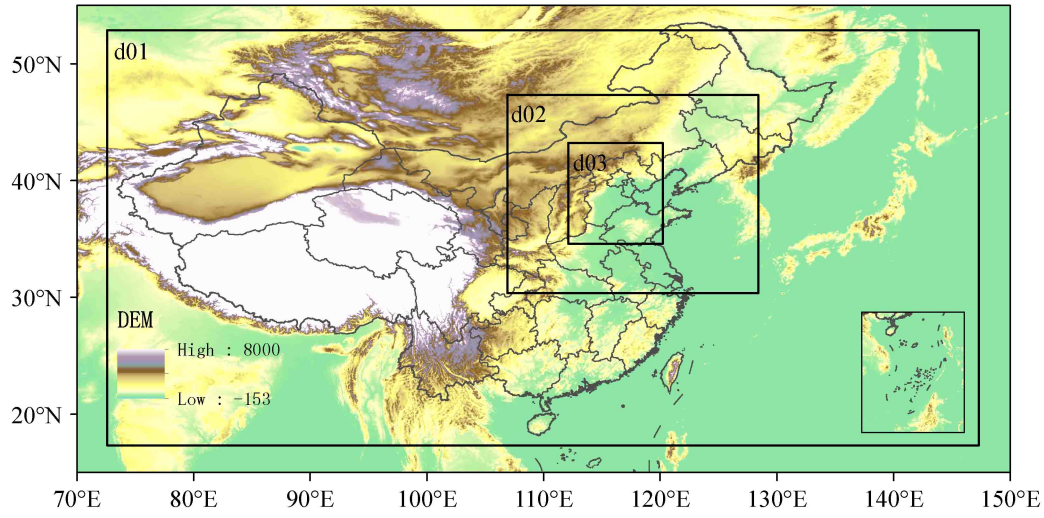

图 3　模式模拟嵌套区域范围示意图（填色表示高度，单位：m）

Fig. 3　Schematic illustration of simulation domains (color fillings represent elevations, units: m)

表 1　WRF 物理参数化方案

Table 1　Physical parameterization schemes in WRF

物理过程	参数化方案
微物理方案	Thompson graupel scheme
积云对流方案	Tiedtke scheme
地表方案	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme
陆面过程	unified Noah land-surface model
行星边界层过程	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme
长波辐射	rrtmg scheme
短波辐射	rrtmg scheme

2.3　模式驱动场

模式初边值误差影响模式模拟精度。在数值试验前，甄选出精度较高的再分析资料来驱动区域模式十分必要。为此，首先比较了 CFSRv2 和 ERA5 对京津冀 2015 年 6～7 月地表气温的刻画情况。表 2 分别为 CFSRv2 和 ERA5 地表 2 m 气温与实际观测的对比，从表中可以发现 CFSRv2 误差较 ERA5 大，其中，14:00 CFSRv2 气温较实际观测偏高 2°C 以上，02:00 则偏低约 1.7°C，ERA5 再分析资料虽较实际观测略偏低，但误差明显小于 CFSRv2，更接近实际观测。因此，本文数值试验均采用 ERA5 作为驱动场。

3　参数优化及敏感性试验

3.1　参数选取及本地优化

地表反照率、比辐射率是表征不同区域、不同下垫面辐射特性的重要参量，是影响地表辐射收支

表 2　2015 年 6 月 1 日至 7 月 31 日研究区域内站点再分析 2 m 气温平均值与观测对比

Table 2　Comparison of reanalyzed and observed 2-m temperature averaged from 1 Jun to 31 Jul 2015

	气温/°C		
时刻	ERA5	CFSRv2	观测
08:00	23.65	24.26	23.77
14:00	29.39	31.50	29.78
20:00	25.91	24.19	25.99
02:00	21.84	20.17	21.91

的关键参数；城市人为热排放受地理位置、城市规模、人口密度、建筑形态、建筑材料等因素影响，且地表感热通量和地表气温对人为热十分敏感（何晓凤等, 2007），特别是京津冀地区，人为热加热在地气系统能量平衡中起着重要作用（郑玉兰等, 2015, 2017; 王咏薇等, 2018）。此外，城市表面热力性质（热容、热传导系数）对城市表面温度和储热产生重要影响，并且影响建筑能量模型（BEM）对建筑排热的估算。以下从观测资料和已有研究，来分析、选取多层城市冠层模型中地表反照率、比辐射率、人为热、城市地表热力性质等重要参数的取值，并结合参数敏感性试验来对每一项参数取值的合理进行验证。

以往的研究中，地表反照率取值差异显著。单层城市冠层模型地表反照率默认值多为 0.20。绝大部分卫星反演产品也多显示京津冀地区地表反照率约为 0.15（冯智明等, 2018; 徐震宇等, 2020）。江晓燕等（2007）在运用 GRAPES 研究北京城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响中，依据 2004 年 10 月中国科学院大气物理所铁塔 280 m 高度正午前后测得的观测数据，将地表反照率设为 0.15。崔耀平等（2012）综合 Oke（1987）与周淑贞和束炯（1994）的研究成果，认为北京道路、房屋的反照率分别取值为 0.125、0.224 较合理。王成刚等（2008）认为卫星反演明显低估了城市地表反照率，他们通过架设在高楼屋顶的试验装置测得南京高楼屋顶水泥地表夏季平均反照率为 0.34。由于中国科学院大气物理所铁塔（280 m）和卫星反演数据均是短波辐射经城市街谷（又称街渠，指城市街道及两侧建筑形成的类似“峡谷”形状的两边高、中间低的城市空间形态）多次反射后的结果（一般称为有效反照率），并不能代表城市地表真实的反照率，而王成刚等（2008）的观测结果是在高楼屋顶测得的，较好地避免了短波反射等因素对观测结果的影响，可作为真实城市地表反照率的参考。根据 WRF/BEP/BEM 所描述的城市冠层物理过程可知，地表反照率取值需更接近真实表面反照率，这里，城市表面分为屋顶、墙面和道路，以往研究大多将屋顶、墙面和道路反照率用一个值来表示。综上所述，本文在王成刚等（2008）研究的基础上，同时考虑了反照率随纬度的变化，将京津冀城市屋顶、墙面、道路反照率分别调整为 0.36、0.36、0.36。

地表比辐射率有 0.01 的变化，估算的地表温度就会产生 0.2°C 的误差（李超等, 2009）。翟俊等（2013）基于 EOS-MODIS 卫星地表比辐射率产品（MOD11A2），分析了 2000～2011 年中国地表比辐射率的时空分布特征，发现全国地表比辐射率取值区为 0.96～0.98。而卫星反演产品 MOD11C3 结果多介于 0.95～0.98 之间（王新生等, 2012）。国内学者的研究中，通常多将城镇（建筑表面）的比辐射率设置为 0.97（郑国强等, 2010; 肖瑶等, 2012; 柳菲和李平, 2016）。基于卫星反演产品和已有研究成果，本文将屋顶、墙面、道路比辐射率由模式默认的 0.90、0.90、0.95 分别调整为 0.95、0.95、0.97。

在 UCM 中人为热只有日循环。Salamanca et al.（2010）将 BEM 引入到 BEP 中，为显示动态求解建筑物排热（重要的人为热）提供了可能。BEM 通常需要输入建筑形态参数、气象因素、窗墙比、建材热力性质参数（热容和热传导系数）、设备功率和设备加热廓线、空调设备运行时段、室内人员密度等来显示求解建筑排热并估算人为热。郑玉兰等（2015）研究发现建筑形态参数、建筑热力性质参数和空调目标温湿度等都对 BEM 动态计算建筑物排热产生显著影响。本研究对以往研究中较少涉及的设备加热廓线和设备峰值进行了优化，其中，低密度住宅区、高密度住宅区和商业区的设备峰值由默认值 16 W/m^2、20 W/m^2、36 W/m^2 分别调整为 10 W/m^2、15 W/m^2、25 W/m^2。

此外，本文基于已有研究，还对屋顶、墙面、道路建筑材料的热容和热传导系数进行了本地化处理（陈德鹏等, 2007; Ikeda and Kusaka, 2010; 彭友君和彭博, 2016）；根据京津冀楼层数（10～15 层居多）等形态参数及街道布局，调整了建筑形态参数中的建筑物高度（30～45 m）和街道宽度（10～15 m）。

总之，对 BEP/BEM 参数选取和优化的思路是，首先根据城市冠层模型控制方程组和参数敏感性测试，筛选出对模式模拟结果有显著影响的重要参数，将其中有观测事实的参数（如反照率）根据观测事实优先确定下来，对于缺乏观测的参数（如 BEM 中设备峰值等）通过参数敏感性试验，根据不同参数条件模式模拟的气象要素（如地表气温）与观测值之间的离散程度，来最终确定最优参数取值。参数敏感性试验详情见 3.2 节，最终筛选出的参数及本地化取值详细信息见表 3。

3.2 试验设计

相较于模式默认参数设置，本地化参数设置（见表 3）是否合理，需要通过参数敏感性试验，并结合观测资料来进一步验证参数调整的合理性。由于多层城市冠层模型（BEP/BEM）参数较多，限于篇幅，这里仅给出反照率、比辐射率和城市人为热的敏感性试验测试结果。数值试验包括 1 组参照试验（exp0）和 3 组敏感性试验。表 3 中本地化参数作为 exp_0 中对应参数的取值；第一组敏感性试验（exp1）将屋顶、墙面、道路地表反照率调整为 0.1、0.1、0.1（部分已有研究取值范围接近 0.1，如江晓燕等, 2007; 崔耀平等, 2012），其余参数与 exp0 相同；第二组敏感性试验（exp2）将屋顶、墙面、道路表面比辐射率设为模式默认值 0.9、0.9、0.95，其余参数与 exp0 相同；第三组敏感性试验（exp3）将设备加热峰值设为模式默认取值 16 W/m^2、20 W/m^2、36 W/m^2，设备加热廓线取值见表 4，其余参数与 exp0 相同。选取京津冀温度较常年同期明显偏高的 2015 年 6 月 1～10 日进行数值试验，并对 12:00 至 16:00 结果进行分析（详细试验设计见表 4）。

3.3 本地化参数模拟结果评估

首先，分别计算 exp0、exp1、exp2、exp3 模

表 3 研究区域内站点本地化多层城市冠层模型主要参数

Table 3 Detailed parameters of localized multi-layer urban canopy model

	取值		
参数	商业区	高密度住宅区	低密度住宅区
建筑高度/m	30/35/40	30/35/40	25/30/35
不同建筑高度占比	10%/60%/30%	20%/60%/20%	20%/60%/20%
街道宽度/m	15	15	10
城市表面占比	0.8	0.7	0.2
屋顶比辐射率	0.95	0.95	0.95
墙面比辐射率	0.95	0.95	0.95
路面比辐射率	0.97	0.97	0.97
屋顶反照率	0.36	0.36	0.36
墙面反照率	0.36	0.36	0.36
路面反照率	0.36	0.36	0.36
设备峰值/W m^{-2}	25	15	10
屋顶体积热容/J m^{-3} K^{-1}	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
墙面体积热容/J m^{-3} K^{-1}	9.0×10^{-6}	9.0×10^{-6}	9.0×10^{-6}
路面体积热容/J m^{-3} K^{-1}	4.0×10^{-6}	4.0×10^{-6}	4.0×10^{-6}
屋顶热传导系数/J m^{-1} s^{-1} K^{-1}	1.5	1.5	1.5
墙面热传导系数/J m^{-1} s^{-1} K^{-1}	0.5	0.5	0.5
路面热传导系数/J m^{-1} s^{-1} K^{-1}	4	4	4
空调目标温度/K	299	299	299
空调目标湿度/kg kg^{-1}	0.01	0.01	0.01
空调能效比	5	5	5
设备加热廓线	0.12、0.11、0.08、0.07、0.06、0.10、0.15、0.55、0.75、0.70、0.72、0.70、0.69、0.70、0.76、0.79、0.85、0.95、0.80、0.77、0.73、0.25、0.22、0.15	0.12、0.11、0.08、0.07、0.06、0.10、0.15、0.55、0.75、0.70、0.72、0.70、0.69、0.70、0.76、0.79、0.85、0.95、0.80、0.77、0.73、0.25、0.22、0.15	0.12、0.11、0.08、0.07、0.06、0.10、0.15、0.55、0.75、0.70、0.72、0.70、0.69、0.70、0.76、0.79、0.85、0.95、0.80、0.77、0.73、0.25、0.22、0.15

表 4　参数敏感性试验设计方案

Table 4　Design schemes of parameter sensitivity tests

	参照试验（exp0）	敏感试验1（exp1）	敏感试验2（exp2）	敏感试验3（exp3）
	屋顶/墙面/路面	屋顶/墙面/路面	屋顶/墙面/路面	屋顶/墙面/路面
反照率	0.36/0.36/0.36	0.1/0.1/0.1	0.36/0.36/0.36	0.36/0.36/0.36
比辐射率	0.95/0.95/0.97	0.95/0.95/0.97	0.90/0.90/0.95	0.95/0.95/0.97
设备加热廓线	0.12、0.11、0.08、0.07、0.06、 0.10、0.15、0.55、0.75、0.70、 0.72、0.70、0.69、0.70、0.76、 0.79、0.85、0.95、0.80、0.77、 0.73、0.25、0.22、0.15	0.12、0.11、0.08、0.07、0.06、 0.10、0.15、0.55、0.75、0.70、 0.72、0.70、0.69、0.70、0.76、 0.79、0.85、0.95、0.80、0.77、 0.73、0.25、0.22、0.15	0.12、0.11、0.08、0.07、0.06、 0.10、0.15、0.55、0.75、0.70、 0.72、0.70、0.69、0.70、0.76、 0.79、0.85、0.95、0.80、0.77、 0.73、0.25、0.22、0.15	0.25、0.25、0.25、0.25、0.25、 0.25、0.25、0.5、1.0、1.0、1.0、 1.0、1.0、1.0、1.0、1.0、1.0、 1.0、 0.5、0.25、0.25、0.25、0.25、 0.25
设备峰值	10/15/ 25	10/15/25	10/15/25	16/20/36

拟的高温时段地表 2 m 气温（用 T_{expi} 表示，i=0，1，2，3）相对于实际观测（用 T_o 表示）的绝对误差为

$$ERR_i=|T_{expi}-T_o|,(i=0,1,2,3) \quad (1)$$

其中，表示 exp$i$ 模拟值距观测值的平均偏离幅度，当模拟值越逼近观测，其绝对误差数值越小。再分别比较 3 组敏感性试验的绝对误差和参照试验绝对误差的差异，即

$$ABS_ERR=ERR_j-ERR_0,\ (j=1,\ 2,\ 3) \quad (2)$$

当 ABS_ERR>0 时，表示敏感性试验模拟值偏离观测的幅度较参照试验的偏离幅度大，则参照试验中参数调整更合理；当 ABS_ERR<0时，表示敏感性试验模拟值偏离观测的幅度较参照试验的偏离幅度小，则参照试验中参数调整不合理。

3.3.1　地表反照率

图 4a 实心圆点表示 exp1 模拟的地表 2 m 气温（12:00 至 16:00）与该时段实际观测的绝对误差（ERR1），与 exp0 模拟的地表 2 m 气温与实际观测的绝对误差（ERR_0）二者之间的差异（ERR_1-ERR_0）。从图中可以看出，当地表反照率由 exp0 的 0.36 降低为 exp1 的 0.1，绝大部分站点 $ERR_1-ERR_0>0$°C（图 4a 暖色实心圆表示），即绝大部分站点 exp1 模拟的地表气温更加偏离实际观测，其中，约 80% 的站点 $ERR_1-ERR_0>0.5$°C，约 40% 的站点 $ERR_1-ERR_0>1$°C（表 5）；ERR_1 与 ERR_0 差异最大的站点主要分布在北京、石家庄及河北南部等大中城市（图 4a）。将反照率设置为模式默认的 0.2 时，绝大部分站点模拟的地表气温与观测的偏离幅度仍然大于参照试验与观测的偏离幅度。当反照率设置 0.3（接近实测值）时，模拟的地表气温与观测的偏离幅度接近参照试验与观测的偏离幅度（图略）。由此可见，模式模拟结果对反照率较敏感，当地表反照率为 0.36 时，参数取值更合理。

3.3.2　地表比辐射率

图 4b 为 exp_2 模拟地表 2 m 气温与实际观测的绝对误差（ERR_2），与 exp_0 模拟的地表 2 m 气温（12:00 至 16:00）与实际观测的绝对误差（ERR_0）的差异（ERR_2-ERR_0）。如图 4b 所示，绝大部分站点处 $ERR_2-ERR_0>0$°C（暖色实心圆），其中 75% 的城市站点 $ERR_2-ERR_0>0.5$°C（表 5），主要分布在石家庄及河北南部城市区域，而河北西部和北部山区二者差异较小。可见，参照试验地表比辐射率的取值较模式默认值更合理。

3.3.3　人为热

图 4c 为 exp3 模拟的地表 2 m 气温与观测的绝对误差，与参照试验模拟值与观测的绝对误差之间的差异。暖色实心圆表示绝大部分站点 $ERR_3-ERR_0>0$°C，其中 65% 的城市站点 $ERR_3-ERR_0>0.5$°C（表 5），尤以北京、石家庄最显著。模式默认的设备峰值和加热廓线存在夸大的可能。

以上选取的参数敏感性试验表明，对京津冀高温模拟而言，WRF/BEP/BEM 的参数本地优化（参照试验）是合理的。重要参数的本地优化，使得城市表面能量收支及人为热估算更加准确，是参照试验模拟结果与观测更加接近的重要原因。一方面，参数本地优化使 BEP/BEM 计算城市表面获得的能量更加准确。由于地表反照率和比辐射率是表征城市表面吸收长、短波或发射长波辐射能力的关键参数，基于观测事实和已有研究对这些参数进行本地

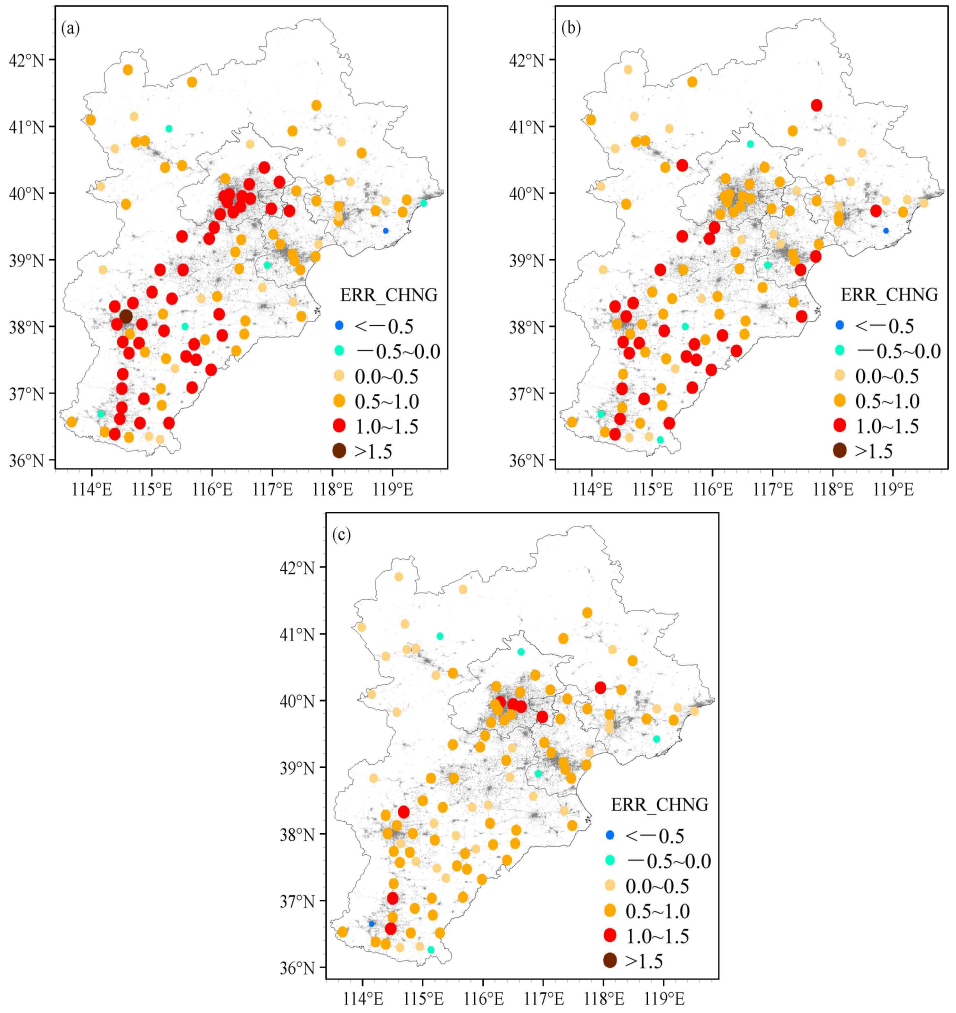

图 4　2015 年 6 月 1～10 日不同参数敏感性试验和参照试验模拟的地表 2 m 气温与观测之间的绝对误差差异的空间分布（单位：℃）：（a）敏感性试验 1（exp1）与参照试验（exp0）绝对误差的差异；（b）敏感性试验 2（exp2）与参照试验（exp0）绝对误差的差异；（c）敏感性试验 3（exp3）与参照试验（exp0）绝对误差的差异。灰色阴影区域表示城市下垫面，下同

Fig. 4　Spatial distributions of absolute error differences between the observed 2-m surface and simulated temperature by different sensitive tests and the reference test from 1−10 Jun 2015 (°C): (a) Difference in the absolute error between sensitivity test 1 (exp1) and reference test (exp0); (b) difference in the absolute error between sensitivity test 2 (exp2) and reference test (exp0); (c) difference between the absolute error of sensitivity test 3 (exp3) and reference test (exp0). Gray shaded area represents the underlying surface of cities, the same below

表 5　不同敏感性试验与参照试验绝对误差差异的不同等级占比

Table 5　Proportion of different grades of absolute error difference between different sensitivity tests and reference test

	不同等级站数与总站数的比值			
	ERR<0	0≤ERR≤0.5	0.5<ERR≤1	ERR>1
ERR_1-ERR_0	5%	15%	40%	40%
ERR_2-ERR_0	5%	20%	49%	26%
ERR_3-ERR_0	5%	30%	57%	8%

优化后，参照试验克服了模式默认值导致城市表面反射太阳短波辐射偏少（吸收太阳短波辐射偏多）的缺点，使得进入城市表面的根本能量来源更加准确。另一方面，参数本地优化使 BEP/BEM 计算城市表面的能量支出更加准确。城市表面热力性质参数（热容和热传导系数）是影响城市表面储热、表面温度及城市表面与相邻大气之间热量交换的重要参数。与实测事实相比，模式默认的热力性质参数

取值偏小，导致白天城市表面快速升温，城市表面向相邻大气的感热输送明显偏大，最终导致模式模拟的地表气温与观测相比明显偏高。参照试验热力性质参数（热容和热传导系数）本地优化后，模拟的地表气温与观测的偏离幅度明显减小，提高了模式对高温的模拟能力。此外，对反照率、建筑物高度、城市表面热力性质参数的本地优化还有助于BEM 更好地估算城市人为热。

4　本地化 WRF/BEP/BEM 对京津冀高温过程模拟的个例检验

上一节通过参数敏感性试验分别对单一参数取值合理性进行了验证。本部分进一步通过个例分析，对本地化的 WRF/BEP/BEM 整体模拟能力进行评估（以下简称“本地化 WRF/BEP/BEM”）。选取京津冀地区近 10 年来五次极端高温过程作为模拟对象，分别简称 EVENT100706、EVENT150713、EVENT180627、EVENT170711 和 EVENT180803，并将本地优化 WRF/BEP/BEM 对 5 次极端高温的模拟（12:00 至 16:00）与同期 ERA5 再分析资料进行比较，将对城市物理过程进行不同复杂程度处理的两种模拟结果分别与观测进行比较，有助于评估本地优化的城市冠层模块（BEP/BEM）在改进城市气候模拟中的作用。

首先将本地化 WRF/BEP/BEM 模拟的 EVENT 100706 高温时段地表 2 m 气温与同期 ERA5 再分析资料结果分别空间插值到京津冀区域 110 个城市观测站点位置上，两者与实测之差分别见图 5a 和图 5b。从图 5a 可看出，本地化 WRF/BEP/BEM 较好地模拟出了 EVENT100706。整体看，本地化 WRF/BEP/BEM 低估了河北南部气温，北京略偏低；65% 的站点模拟值与观测值的绝对误差小于 1.5°C，其中 48% 的站点模拟值与观测值的绝对误差小于 1°C，23% 的站点绝对误差小于 0.5°C（表 6）。

从图 5b 可看出，ERA5 明显低估了京津冀地区西部和北部山区的极端高温，高估了平原地区（“两山一海”之间的平原地带）的极端高温，尤其是显著高估了北京、石家庄等大城市的极端高温。45% 的站点 ERA5 与观测值的绝对误差超过 2°C（其中 3% 的站点介于−5～−2°C，42% 的站点介于 2～5°C）；31% 和 18% 的站点绝对误差分别小于 1°C 和 0.5°C。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟 EVENT100706 的平均误差为−0.2°C，标准差为 1.4°C；ERA5 再分析得到的 EVENT100706 的平均误差为 1.5°C，标准差为 1.9°C（表 6）。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟的高温的标准差较 ERA5 减小 26.3%。

图 6a、图 6b 分别为本地化 WRF/BEP/BEM 对 EVENT150713 的模拟结果和同期 ERA5 再分析资料与实际观测之差的空间分布。从图 6a 可看出，本地化 WRF/BEP/BEM 较好地模拟出了此次过程，北部山区较实际观测略偏低，平原地区略偏高；80% 的站点本地化 WRF/ BEP/BEM 模拟值与观测

表 6　研究区域内五次极端高温过程不同温度误差等级站数与总站数之比

Table 6　Ratio of the number of stations at different temperature error levels to the total number of stations for five extreme high temperature events

		不同温度误差等级的站数与总站数的比值											
		−5～−2°C	−2～−1.5°C	−1.5～−1°C	−1～−0.5°C	−0.5～0°C	0～0.5°C	0.5～1°C	1～1.5°C	1.5～2°C	2～5°C	平均误差/°C	标准差/°C
2010年7月3～6日	MDL−Obs	12%	5%	10%	15%	10%	13%	10%	7%	4%	14%	−0.2	1.4
	ERA5−Obs	3%	3%	4%	5%	8%	10%	8%	10%	7%	42%	1.5	1.9
2015年7月11～13日	MDL−Obs	0	1%	0	3%	5%	21%	27%	24%	11%	8%	0.9	0.8
	ERA5−Obs	10%	2%	1%	6%	5%	2%	12%	11%	9%	42%	1.3	2.1
2018年6月27～30日	MDL−Obs	0	0	5%	12%	27%	21%	15%	10%	2%	8%	0.3	0.9
	ERA5−Obs	15%	5%	3%	7%	16%	20%	14%	11%	6%	3%	−0.2	1.5
2017年7月10～14日	MDL−Obs	0	1%	6%	8%	15%	20%	22%	12%	10%	6%	0.5	1
	ERA5−Obs	14%	4%	9%	8%	12%	15%	8%	9%	6%	15%	−0.1	1.7
2018年8月1～4日	MDL−Obs	1%	2%	3%	10%	23%	33%	22%	5%	1%	0	0.1	0.7
	ERA5−Obs	6%	6%	10%	13%	15%	21%	16%	7%	6%	0	−0.2	1.1

值的绝对误差小于 1.5°C，其中 55% 的站点模拟值与观测值的绝对误差小于 1°C，26% 的站点绝对误差小于 0.5°C（表 6）。从图 6b 可看出，ERA5 也低估了京津冀地区西部和北部山区的极端高温，高估了平原地区的极端高温，且高估程度比本地化 WRF/BEP/BEM 模拟结果更加明显。52% 的站点 ERA5 与观测值的绝对误差超过 2°C（其中 10% 介于－5～－2°C，42% 介于 2～5°C）；25% 和 7% 的站点绝对误差分别小于 1°C 和 0.5°C。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟 EVENT150713 的平均误差为 0.9°C，标准差为 0.8°C；ERA5 再分析得到的 EVENT150713 的平均误差为 1.3°C，标准差为 2.1°C（表 6）。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟的高温的标准差较 ERA5 减小 61.9%。

图 7a、图 7b 分别为本地化 WRF/BEP/BEM 对 EVENT180627 的模拟结果和同期 ERA5 再分析

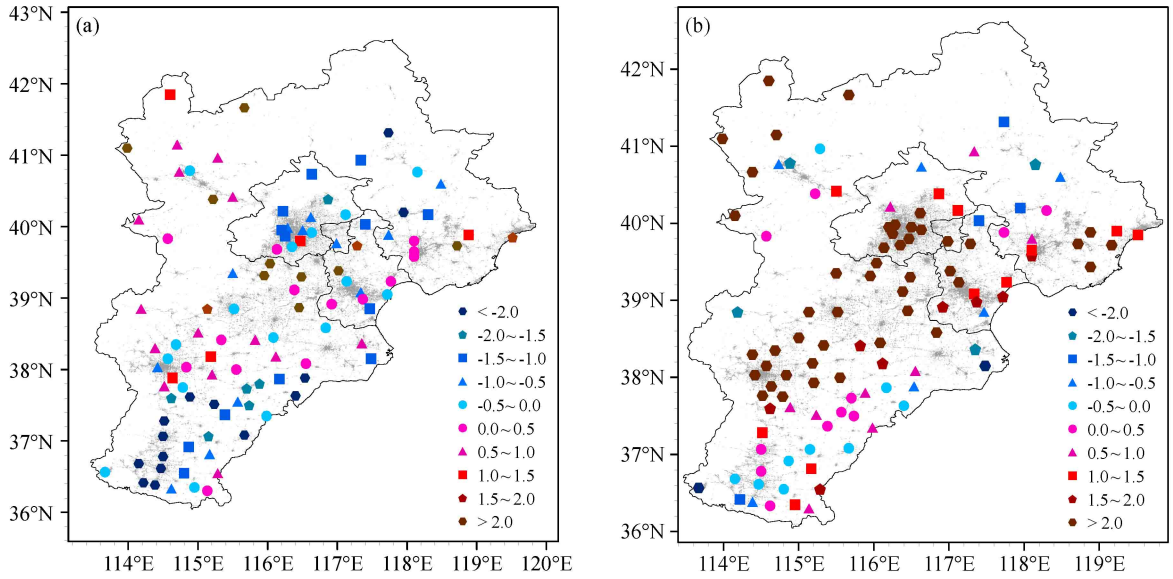

图 5　2010 年 7 月 3～6 日（a）模式模拟的极端高温、（b）ERA5 再分析资料极端高温与实际观测之差的空间分布（单位：°C）

Fig. 5　Spatial distributions of the differences of (a) the simulated extreme high temperature and (b) observed extreme high temperature from ERA5 reanalyses data from 3−6 Jul 2010 (°C)

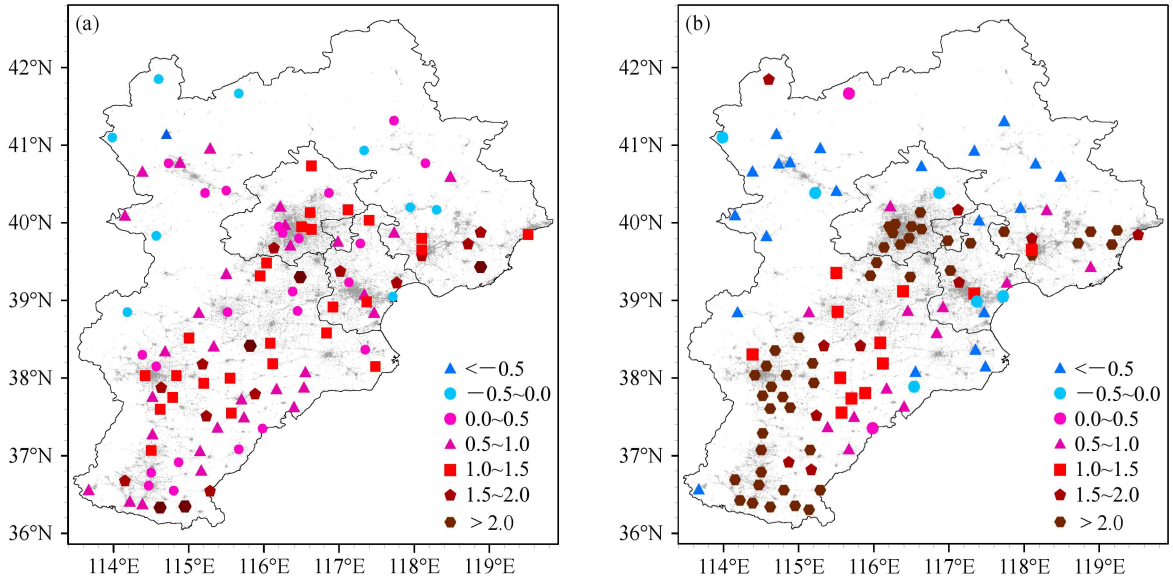

图 6　同图 5，但为 2015 年 7 月 11～13 日

Fig. 6　Same as Fig. 5, but for 11−13 Jul 2015

资料与实际观测之差的空间分布。从图 7a 可看出，除本地化 WRF/BEP/BEM 较明显高估了华北南部气温外，其余地区模式模拟与实际观测比较接近。90% 的站点本地化 WRF/ BEP/BEM 模拟值与观测值的绝对误差小于 1.5°C，其中 75% 的站点模拟值与观测值的绝对误差小于 1°C，49% 的站点绝对误差小于 0.5°C（表 6）。从图 7b 可看出，ERA5 同样低估了京津冀地区西部和北部山区的极端高温，高估了北京的极端高温，其余地区与观测接近。71% 的站点 ERA5 与观测值的绝对误差小于 1.5°C，其中 57% 和 36% 的站点绝对误差分别小于 1°C 和 0.5°C。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟 EVENT180627 的平均误差为 0.3°C，标准差为 0.9°C；ERA5 再分析得到的平均误差为−0.2°C，标准差为 1.5°C（表 6）。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟的高温的标准差较 ERA5 减小 40.0%。

本地化 WRF/BEP/BEM 对 EVENT170711 的模拟结果和同期 ERA5 再分析资料与实际观测之差的空间分布见图 8。从图 8a 可看出，本地化 WRF/BEP/BEM 高估了北京南部、保定、天津西北部的气温，其余地区模式模拟与实际观测比较接近。83% 的站点本地化 WRF/ BEP/BEM 模拟值与观测值的绝对误差小于 1.5°C，其中 65% 的站点模拟值与观测值的绝对误差小于 1°C，35% 的站点绝对误差小于 0.5°C（表 6）。从图 8b 可看出，ERA5 低估了京津冀地区西部和北部山区的极端高温，高估华北南部的极端高温，其余地区与观测接近。61% 的站点 ERA5 与观测值的绝对误差小于 1.5°C，其中 43% 和 27% 的站点绝对误差分别小于 1°C 和 0.5°C。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟 EVENT170711 的平均误差为 0.5°C，标准差为 1.0°C；ERA5 再分析得到的平均误差为−0.1°C，标准差为 1.7°C（表 6）。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟的高温的标准差较 ERA5 减小 41.2%。

图 9 为本地化 WRF/BEP/BEM 对 EVENT180803 的模拟结果和同期 ERA5 再分析资料与实际观测之差的空间分布。从图 9a 可看出，本地化 WRF/BEP/BEM 较好地模拟出此次极端高温过程。96% 的站点本地化 WRF/ BEP/BEM 模拟值与观测值的绝对误差小于 1.5°C，其中 88% 的站点模拟值与观测值的绝对误差小于 1°C，56% 的站点绝对误差小于 0.5°C（表 6）。从图 9b 可看出，ERA5 除较明显低估了京津冀地区西部和北部山区的极端高温外，其余地区与观测接近。82% 的站点 ERA5 与观测值的绝对误差小于 1.5°C，65% 和 36% 的站点绝对误差分别小于 1°C 和 0.5°C。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟 EVENT180803 的平均误差为 0.1°C，标准差为 0.7°C；ERA5 再分析得到的平均误差为−0.2°C，标准差为 1.1°C（表 6）。本地化 WRF/BEP/BEM 模拟的高温的标准差较 ERA5 减小 36.3%。

5　结论与讨论

数值模式对城市极端高温刻画能力不足是当前

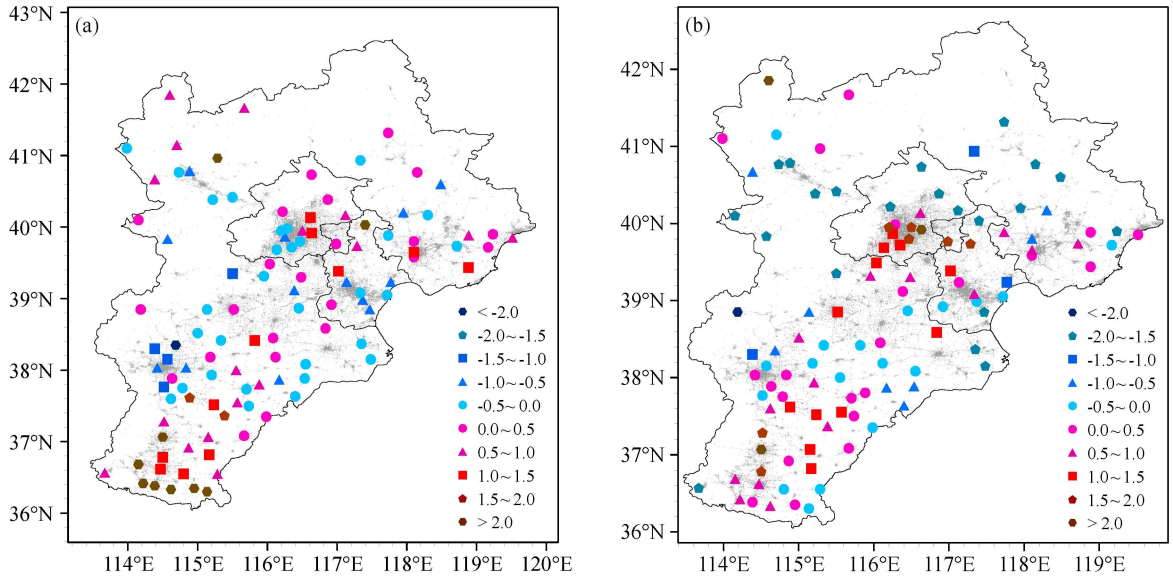

图 7　同图 5，但为 2018 年 6 月 27～30 日

Fig. 7　Same as Fig. 5, but for 27–30 Jun 2018

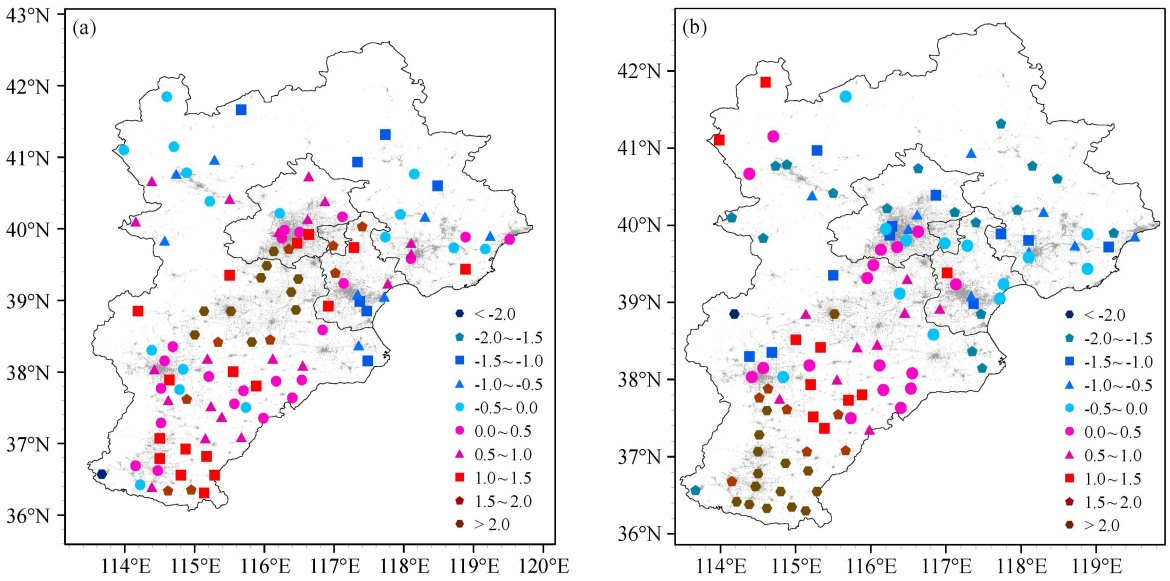

图 8 同图 5，但为 2017 年 7 月 10～14 日

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for 10−14 Jul 2017

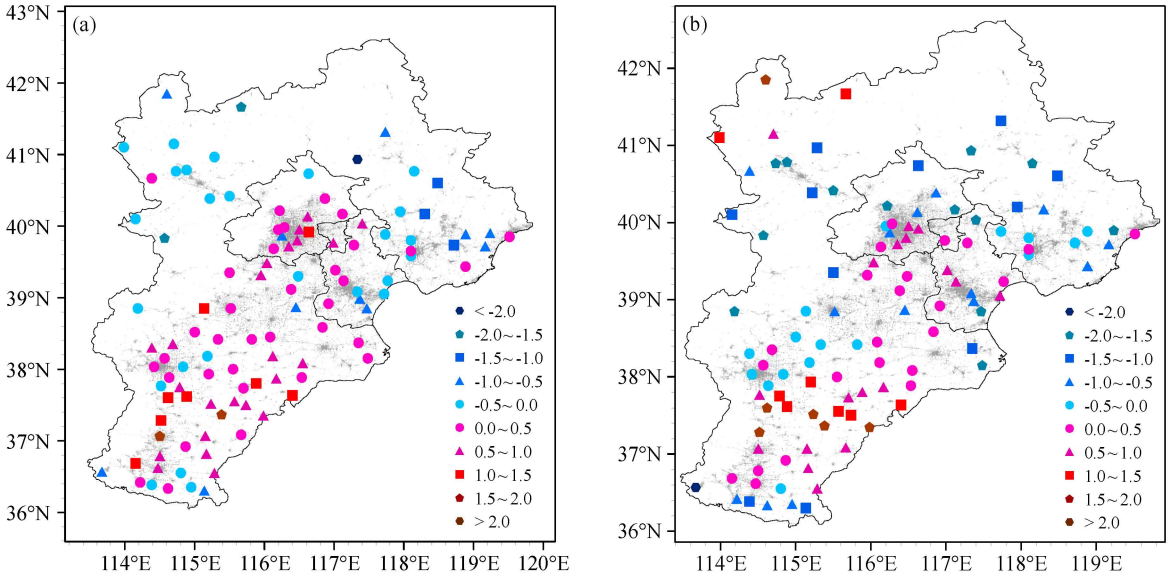

图 9 同图 5，但为 2018 年 8 月 1～4 日

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for 1−4 Aug 2018

数值模拟面临的难点问题。城市冠层模型参数取值是影响模式模拟能力的重要因素之一。本文根据已有观测事实和研究成果，对多层城市冠层模式 WRF/BEP/BEM 中地表反照率、地表比辐射率、人为热（通过本地优化 BEM 输入参数来实现）等重要参数进行了适合于京津冀城市模拟的本地优化，并开展了相关参数敏感性试验；通过对京津冀高温个例的模拟，检验了参数优化后的 WRF/BEP/BEM 对京津冀城市高温的模拟能力，主要结论如下：

（1）基于已有观测和研究，在模型 WRF/BEP/BEM 中设置不同城市冠层参数，通过大量参数敏感性试验，最终确定了一套适用于京津冀城市模拟的参数设置。在这些参数配置下，WRF/BEP/BEM 对京津冀极端高温模拟的误差较小。

（2）本地化 WRF/BEP/BEM 较好地模拟了 2010 年以来京津冀地区 EVENT100706、EVENT150713、EVENT180627、EVENT170711 和 EVENT180803 五次极端高温过程，模拟结果与观测的平均误差分别为−0.2°C、0.9°C、0.3°C、0.5°C 和 0.1°C，标准差分别为 1.4°C、0.8°C、0.9°C、1.0°C 和 0.7°C。

五次高温模拟的标准差（与观测的平均偏离幅度）分别较 ERA5 减小 26.3%、61.9%、40.0%、41.2% 和 36.3%。

基于适用京津冀大城市的地表反照率、比辐射率、设备峰值、建筑物高度、街道宽度、建筑材料的热容和热传导系数等参数，对京津冀大中城市的高温模拟具有很好的应用前景，对进一步开展京津冀城市化对极端高温的机理研究具有重要意义。但对小城市（县级市、乡镇），特别是山区（河北北部）模拟能力的改进相对有限，小城市水平尺度小，平流作用对城市气候模拟结果的影响较强，以及城市冠层模型无法区分不同规模城市的人口密度、空调制冷时段等的差异，是导致模拟能力改进有限的重要原因，需要进一步优化完善。此外，城市冠层模型参数众多，尤其是建筑能量模型（BEM）中空调能效比、新风系数、窗墙比等参数精确取值，还有待于进一步研究。

致　谢　感谢国家气候中心孙朝阳博士在土地覆被/利用数据及分析方面给予的大力支持和帮助!

参考文献（References）

Bai X M, Dawson R J, Ürge-Vorsatz D, et al. 2018. Six research priorities for cities and climate change [J]. Nature, 555(7694): 23−25. doi:10.1038/d41586-018-02409-z

陈德鹏, 钱春香, 王辉, 等. 2007. 水泥基材料比热容测定及计算方法的研究 [J]. 建筑材料学报, 10(2): 127−131.　Chen D P, Qian C X, Wang H, et al. 2007. Research on determination and calculation method of specific heat capacity of cement-based materials [J]. Journal of Building Materials (in Chinese), 10(2): 127−131. doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2007.02.001

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

Chen L, Frauenfeld O W. 2016. Impacts of urbanization on future climate in China [J]. Climate Dyn., 47(1): 345−357. doi:10.1007/s00382-015-2840-6

崔耀平, 刘纪远, 胡云锋, 等. 2012. 城市不同下垫面辐射平衡的模拟分析 [J]. 科学通报, 57(9): 1046−1054.　Cui Y P, Liu J Y, Hu Y F, et al. 2012. Modeling the radiation balance of different urban underlying surfaces [J]. Chinese Science Bulletin, 57(9): 1046−1054. doi:10.1007/s11434-011-4933-x

崔耀平, 刘纪远, 张学珍, 等. 2015. 京津唐城市群土地利用变化的区域增温效应模拟 [J]. 生态学报, 35(4): 993−1003.　Cui Y P, Liu J Y, Zhang X Z, et al. 2015. Modeling urban sprawl effects on regional warming in Beijing−Tianjing−Tangshan urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 35(4): 993−1003. doi:10.5846/stxb201305191114

Dupont S, Otte T L, Ching J K S. 2004. Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model [J]. Bound. -Layer Meteor., 113(1): 111−158. doi:10.1023/B:BOUN.0000037327.19159.ac

冯智明, 闻建光, 肖青, 等. 2018. MODIS V006 和 V005 全球反照率产品精度对比分析 [J]. 遥感学报, 22(1): 97−109.　Feng Z M, Wen J G, Xiao Q, et al. 2018. Comparison of global albedo products of MODIS V006 and V005 based on FLUXNET [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 22(1): 97−109. doi:10.11834/jrs.20186427

Grossman-Clarke S, Zehnder J A, Loridan T, et al. 2010. Contribution of land use changes to near-surface air temperatures during recent summer extreme heat events in the Phoenix Metropolitan Area [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 49(8): 1649−1664. doi:10.1175/2010JAMC2362.1

何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 2007. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 50(1): 74−82.　He X F, Jiang W M, Chen Y, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50(1): 74−82. doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.01.010

Ikeda R, Kusaka H. 2010. Proposing the simplification of the multilayer urban canopy model: Intercomparison study of four models [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 49(5): 902−919. doi:10.1175/2009JAMC2336.1

江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——个例分析 [J]. 气象学报, 65(2): 301−307.　Jiang X Y, Zhang C L, Gao H, et al. 2007. Impacts of urban albedo change on urban heat island in Beijing —A case study [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(2): 301−307. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.02.016

Kusaka H, Kimura F. 2004. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model [J]. J. Appl. Meteor., 43(12): 1899−1910. doi:10.1175/JAM2169.1

李超, 刘厚通, 迟如利, 等. 2009. 草地下垫面地表温度与近地面气温的对比研究 [J]. 光学技术, 35(4): 635−639.　Li C, Liu H T, Chi R L, et al. 2009. Comparative study of grass land surface temperature and near-surface air temperature [J]. Optical Technique (in Chinese), 35(4): 635−639. doi:10.3321/j.issn:1002-1582.2009.04.028

Li D, Bou-Zeid E. 2013. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: The impact in cities is larger than the sum of its parts [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52(9): 2051−2064. doi:10.1175/JAMC-D-13-02.1

柳菲, 李平. 2016. 基于归一化植被指数反演地表比辐射率方法的对比研究 [J]. 城市勘测, 2: 64−68, 73.　Liu F, Li P. 2016. Comparative analysis of land surface emissivity retrieval methods based on normalized differential vegetation index [J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying (in Chinese), (2): 64–68, 2: 64−68, 73. doi:10.3969/j.issn.1672-8262.2016.02.019

Martilli A. 2002. Numerical study of urban impact on boundary layer

structure: Sensitivity to wind speed, urban morphology, and rural soil moisture [J]. J. Appl. Meteor., 41(12): 1247−1266. doi:10.1175/1520-0450(2002)041<1247:NSOUIO>2.0.CO;2

Oke T R. 1987. Boundary Layer Climates [M]. 2nd ed. London: Routledge, 227−261. doi:10.4324/9780203407219

Oleson K W, Monaghan A, Wilhelmi O, et al. 2015. Interactions between urbanization, heat stress, and climate change [J]. Climatic Change, 129(3): 525−541. doi:10.1007/s10584-013-0936-8

彭友君, 彭博. 2016. 岩土热物理指标的分析计算 [J]. 地下空间与工程学报, 12(1): 38−43. Peng Y J, Peng B. 2016. Analysis and calculation of soil thermal physical indicators [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering (in Chinese), 12(1): 38−43.

Perkins S E. 2015. A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale [J]. Atmos. Res. , 164 –165: 242 –267. doi:10.1016/j.atmosres.2015.05.014

Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations —Part Ⅰ. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model [J]. Theor. Appl. Climatol., 99(3): 331−344. doi:10.1007/s00704-009-0142-9

Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China [J]. Nature Climate Change, 4(12): 1082−1085. doi:10.1038/nclimate2410

王成刚, 孙鉴泞, 蒋维楣. 2008. 南京地区不同季节水泥下垫面辐射特征的对比分析 [J]. 太阳能学报, 29(7): 856−861. Wang C G, Sun J N, Jiang W M. 2008. Comparison of urban radiation properties of a cement surface in different seasons in Nanjing [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 29(7): 856−861.

Wang J, Feng J M, Yan Z W, et al. 2012. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. J. Geophys. Res. : Atmos., 117(D21): D21103. doi:10.1029/2012JD018226

王君, 严中伟, 李珍, 等. 2013. 近 30 年城市化对北京极端温度的影响 [J]. 科学通报, 58(33): 3464–3470. Wang J, Yan Z W, Li Z, et al. 2013. Impact of urbanization on changes in temperature extremes in Beijing during 1978 –2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 58(36): 4679−4686.

王新生, 徐静, 柳菲, 等. 2012. 近 10 年我国地表比辐射率的时空变化 [J]. 地理学报, 67(1): 93−100. Wang X S, Xu J, Liu F, et al. 2012. Spatial−temporal changes of land surface emissivity in China from 2001 to 2010 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67(1): 93−100. doi:10.11821/xb201201010

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 Y W, Wang K F, Chen L, 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

肖瑶, 王艳慧, 赵文慧, 等. 2012. 地表发射率不同的估算方法对地表温度的影响 [J]. 地理空间信息, 10(1): 48−51. Xiao Y, Wang Y H, Zhao W H, et al. 2012. Impacts on the land surface temperature for different methods of land surface emissivity estimation [J]. Geospatial Information (in Chinese), 10(1): 48−51. doi:10.3969/j.issn.1672-4623.2012.01.017

徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 2018. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集 (CNLUCC) [M]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 201−210. Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, et al. 2018. China's multi-period land use land cover remote sensing monitoring dataset (CNLUCC)[M]. Data Registration and Publishing System of the Resource and Environmental Science Data Center of the Chinese Academy of Sciences, 201−210. doi:10.12078/2018070201-

徐震宇, 邱新法, 李爽爽, 等. 2020. 基于 MODIS 的中国地表反照率特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 34(1): 99−105. Xu Z Y, Qiu X F, Li S S, et al. 2020. Analysis of surface albedo over China based on MODIS [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 34(1): 99−105. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2020.014

杨萍, 刘伟东, 侯威. 2013. 北京地区城郊极端温度事件的变化趋势及差异分析 [J]. 气候与环境研究, 18(1): 80−86. Yang P, Liu W D, Hou W. 2013. Trends and difference analyses of temperature extremes in rural and urban areas in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(1): 80−86. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11081

Yang S, Li Q X. 2014. Improvement in homogeneity analysis method and update of China precipitation data [J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 10(4): 276−281. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.04.008

杨旺明, 蒋冲, 喻小勇, 等. 2014. 气候变化背景下人为热估算和效应研究 [J]. 地理科学进展, 33(8): 1029−1038. Yang W M, Jiang C, Yu X Y, et al. 2014. Review of research on anthropogenic heat under climate change [J]. Progress in Geography (in Chinese), 33(8): 1029−1038. doi:10.11820/dlkxjz.2014.08.003

杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 2015. 城市化对极端高温事件影响研究进展 [J]. 地理科学进展, 34(10): 1219−1228. Yang X C, Chen B D, Hu K J. 2015. A review of impacts of urbanization on extreme heat events [J]. Progress in Geography (in Chinese), 34(10): 1219−1228. doi:10.18306/dlkxjz.2015.10.002

Yin Z E, Yin J, Zhang X W. 2013. Multi-scenario-based hazard analysis of high temperature extremes experienced in China during 1951 –2010 [J]. J. Geograph. Sci., 23(3): 436−446. doi:10.1007/s11442-013-1020-z

翟俊, 刘纪远, 刘荣高, 等. 2013. 2000~2011 年中国地表比辐射率时空格局及影响因素分析 [J]. 资源科学, 35(10): 2094−2103. Zhai J, Liu J Y, Liu R G, et al. 2013. Spatial –temporal patterns and important factors driving and surface emissivity in China, 2000–2011 [J]. Resources Science (in Chinese), 35(10): 2094−2103.

翟盘茂, 袁宇锋, 余荣, 等. 2019. 气候变化和城市可持续发展 [J]. 科学通报, 64(19): 1995−2001. Zhai P M, Yuan Y F, Yu R, et al. 2019. Climate change and sustainable development for cities [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 64(19): 1995−2001. doi:10.1360/N972018-00911

Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area [J]. J. Geophys. Res., 114(D2): D02116. doi:10.

1029/2008JD010328

赵俊虎, 封国林, 张世轩, 等. 2011. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系 [J]. 物理学报, 60(9): 842−850. Zhao J H, Feng G L, Zhang S X, et al. 2011. Seasonal changes in China during recent 48 years and their relationship with temperature extremes [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60(9): 842−850.

Zhao L, Lee X H, Smith R B, et al. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J]. Nature, 511(7508): 216−219. doi:10.1038/nature13462

郑国强, 鲁敏, 张涛, 等. 2010. 地表比辐射率求算对济南市地表温度反演结果的影响 [J]. 山东建筑大学学报, 25(5): 519−523. Zheng G Q, Lu M, Zhang T, et al. 2010. The impact of difference of land surface emissivity on the land surface temperature retrieval of Jinan city [J]. Journal of Shandong Jianzhu University (in Chinese), 25(5): 519−523. doi:10.3969/j.issn.1673-7644.2010.05.012

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 Y L, Miao S G, Zhang Q, 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

郑玉兰, 苗世光, 包云轩, 等. 2017. 建筑物制冷系统人为热排放与气象环境的相互作用 [J]. 高原气象, 36(2): 562−574. Zheng Y L, Miao S G, Bao Y X, et al. 2017. Interaction of anthropogenic heat emission from building cooling system and meteorological environment [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(2): 562−574. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00005

周淑贞, 束炯. 1994. 城市气候学 [M]. 北京: 气象出版社, 55−70. Zhou S Z, Shu J. 1994. Urban Climatology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 55−70.