

城市形态参数对不同城市冠层方案 热动力环境模拟的影响*

申冲¹, 刘一鸣², 陈希³, 陈晓阳⁴, 樊琦²,
王雪梅⁵, 吴晓绚¹, 蓝静¹, 吴婕⁶

1. 广州市生态与农业气象中心, 广东 广州 511430
2. 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室 / 中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082
3. 广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045
4. 粤港澳大湾区气象研究院 / 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510640
5. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室 / 暨南大学环境与气候学院, 广东 广州 511486
6. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510060

摘 要: WRF(weather research and forecasting)模式默认城市形态参数呈均质化特征,难以真实刻画城市下垫面空间异质性。为探究本地化城市形态参数对 WRF 模式不同城市冠层方案热动力环境模拟的影响,以超大城市广州为研究对象,开展敏感性试验,对比模式默认与本地化城市形态参数下,单层城市冠层(UCM)和多层城市冠层(BEP)方案对近地面气象要素的模拟差异。结果表明:1)本地化城市形态参数优化效果存在方案差异,对 UCM 方案 2 m 温度、BEP 方案 10 m 风速改善最突出,偏差改善率分别达 90.1% 和 49.8%,超 71% 站点的 2 m 温度、93% 站点的 10 m 风速模拟能力提升。2)本地化城市形态参数导致 UCM 方案和 BEP 方案模拟的地表温度升高,中心城区增幅更大;BEP 方案受街谷收窄、热量截留增强的影响对升温的作用更显著,且本地化参数对地表温度的影响高于 2 m 温度。3)建筑物高度标准差增加提升了地表粗糙度,使 2 种方案的 10 m 风速均下降 0.8 m/s 以上;城市形态参数导致 UCM 方案边界层高度增加 60~90 m, BEP 方案则降低 10~30 m,该差异与 2 m 温度及动量湍流垂直交换相关。本研究揭示了城市冠层方案对城市形态参数的响应规律,完善了 WRF 模式城市形态参数的本地化应用,可为城市精细化气候模拟提供技术支撑。

关键词: 城市冠层方案;城市形态参数;热动力环境;WRF 模式;广州

中图分类号: P40 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)05-0013-13

Impacts of urban morphology parameters on thermodynamic environmental simulations using different urban canopy schemes

Shen Chong¹, Liu Yiming², Chen Xi³, Chen Xiaoyang⁴, Fan Qi²,
Wang Xuemei⁵, Wu Xiaoxuan¹, Lan Jing¹, Wu Jie⁶

1. Guangzhou Ecological and Agricultural Meteorological Center, Guangzhou 511430, China
2. Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies / School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China

* 收稿日期: 2026-04-08

录用日期: 2026-06-08

网络首发日期: 2026-09-20

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515110103); 广州市智慧气象科技协同创新中心气象科研项目(M202505); 国家自然科学基金(42507160, 42405194)

作者简介: 申冲(1988年生), 女; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: shchong@alumni.sysu.edu.cn

通信作者: 樊琦(1977年生), 女; 研究方向: 大气数值模拟; E-mail: eesfq@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20260088

4. *GBA Academy of Meteorological Research / Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510640, China*
5. *Guangdong-Hongkong-Macao Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality / College of Environment and Climate, Jinan University, Guangzhou 511486, China*
6. *Guangzhou Urban Planning Design & Survey Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China*

Abstract: The default urban morphology parameters in the WRF (weather research and forecasting) model are spatially homogenized and cannot adequately characterize the spatial heterogeneity of real urban underlying surfaces. To investigate the impacts of localized urban morphology parameters on thermodynamic environment simulations using different urban canopy schemes in the WRF model, this study takes the megacity of Guangzhou as a case study and conducts sensitivity experiments. The simulation performances of the single-layer urban canopy (UCM) and the multi-layer building effect parameterization (BEP) schemes for near-surface meteorological elements under the default and localized parameters settings are compared. The results show that: 1) The optimization effects of the localized urban morphology parameters differ significantly between the two schemes. The most notable improvements are found in 2 m temperature for the UCM scheme and in 10 m wind speed for the BEP scheme, with bias reduction rates reaching 90.1% and 49.8%, respectively. More than 71% of stations exhibit improved performance in 2 m temperature simulations, and over 93% show enhanced capability in 10 m wind speed simulations. 2) The localized urban morphology parameters lead to increases in simulated surface skin temperature in both schemes, with a more pronounced rise in the central urban area. Specifically, the BEP scheme demonstrates a greater temperature rise due to narrowed street canyons and enhanced heat trapping. The impact of these parameters on surface skin temperature is greater than that on 2 m temperature. 3) Due to increased surface roughness induced by larger standard deviations of building height, the 10 m wind speeds in both schemes decrease by more than 0.8 m/s. These parameters cause the planetary boundary layer height to increase by 60–90 m in the UCM scheme, while it decreases by 10–30 m in the BEP scheme. These differences are closely related to changes in 2 m temperature and vertical turbulent momentum exchange. This study clarifies the response characteristics of different urban canopy schemes to urban morphology parameters, refines the localized application of these parameters in the WRF model, and provides technical support for high-resolution urban climate simulations.

Key words: urban canopy scheme; urban morphological parameter; thermodynamic environment; WRF model; Guangzhou

随着社会经济发展与城市化进程持续推进,城市土地利用与土地覆盖格局发生显著改变,自然地表不断被人工构筑物取代,城市空间形态日趋复杂,城市冠层结构呈现高度多样化特征,这一变化直接改变了近地面与大气间的动量、能量及水汽交换过程,进而对局地大气环流产生重要影响(Feddema et al., 2005; Lin et al., 2009; Mohan et al., 2015)。早期大气数值模式常将城市下垫面简化为均质平坦的表面,未考虑城市内部形态差异与非均匀特征,在很大程度上限制了城市大气环境的模拟精度与可靠性(王咏薇等, 2008)。

20世纪90年代以来,城市冠层参数化方案的研发逐渐成为城市气象数值模拟领域的研究热点,依托街谷理念构建的城市能量平衡模型(Masson, 2000)不断完善,逐步发展出单层与多层2类经典城市冠层模型(Kusaka et al., 2001; Martilli et al., 2002),实现了对城市下垫面冠层结构从概化平均到垂直分层精细刻画的提升,但这2种方案的默认城市形态参数均无空间异质性。目前,城市冠层模型与WRF模式的耦合技术已成熟,广泛应用于城市热岛效应演变(蒙伟光等, 2010; 王咏薇等, 2016; Zhou et al., 2018; Magnaye et al., 2024),以及城市化

对区域气候及城市污染影响的模拟研究(陈训来等,2007;洪莹莹等,2015;Zhu et al.,2015;Zhao et al.,2021)。然而,模式所采用的固定统一的城市形态参数难以适配不同城市的空间异质性,易造成模拟结果出现偏差(Loridan et al.,2010;Wang et al.,2011)。为此,国内外学者围绕城市冠层参数精细化开展了优化研究。已有研究依托卫星遥感影像反演、建筑矢量信息等数据源,构建了印度尼西亚雅加达(Darmanto et al.,2017)、北京(He et al.,2019)、杭州(Chen et al.,2022)等城市的高分辨率城市几何与建筑高度数据集,有效改善了模式对近地面温度、风速等关键气象要素的模拟效果,同时更好地表征了城市热岛效应。Kamath et al.(2024)发布了覆盖千余座城市的全球建筑高度数据集,但东亚地区相关城市冠层参数仍较为缺乏。上述研究均证实,城市冠层参数的准确性直接影响模式模拟性能,获取更精细、本地化的城市几何参数,对优化城市冠层方案、提升模拟精度至关重要(Loridan et al.,2013;de la Paz et al.,2016;Shen et al.,2023)。目前,研究集中于对单一城市冠层方案的模拟应用与参数优化,缺乏基于本地化精细城市形态参数对单层、多层2类典型城市冠层方案开展的定量对比评估,且尚未系统揭示城市形态参数对2类方案近地面气象模拟的差异化影响机理,相关领域均有待进一步完善。

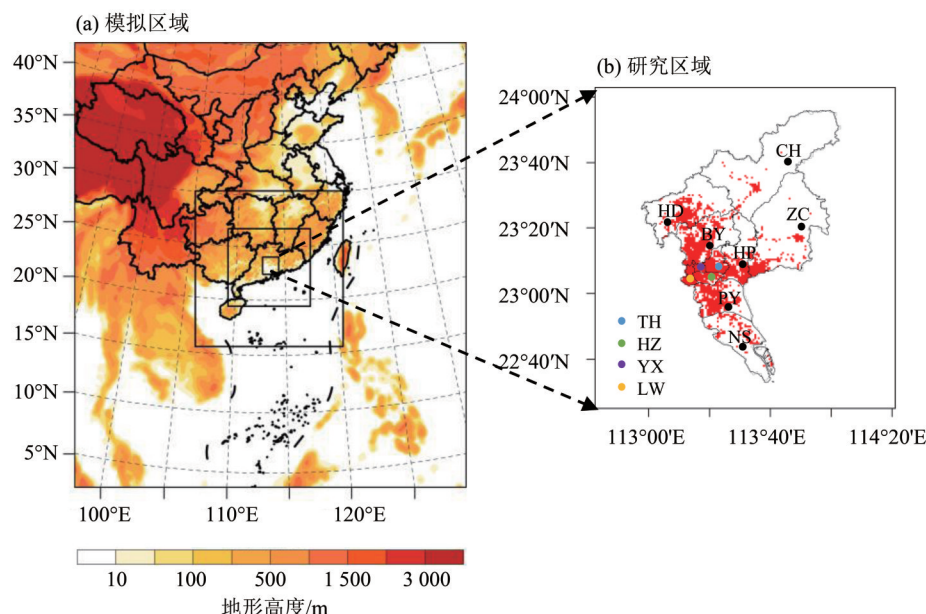
广州作为典型的超大城市,城市内部形态结构

差异明显,是开展高密度城市形态参数影响研究的理想载体。本研究以广州城市复杂的下垫面为研究对象,应用适配本地特征的高分辨率城市形态参数,弥补数值模式采用固定均质城市参数的缺陷,提升城市冠层模拟的本地化适配性;系统开展WRF(weather research and forecasting)模式单层与多层城市冠层方案的对比模拟研究,揭示本地化城市形态参数对2类方案近地面气象要素模拟效果的差异化影响规律;探究本地化城市形态参数对单层、多层城市冠层方案模拟效果的影响机制,为高密度城市微气候模拟、城市热岛治理及通风廊道规划提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 模式设置和研究范围

本研究采用WRF-ARW 3.8.1(Powers et al.,2017),模拟采用四重网格,中心点设置在广州(113.5°E,23.3°N),采用LAMBERT投影方式,垂直方向上设置30层,模式顶的气压为50 hPa。网格设置采用160×181,181×190,301×283和178×190 4重嵌套,网格距分别为27、9、3和1 km,第4层网格范围覆盖整个广州市,模拟区域如图1a所示。气象初始条件和边界条件来自1°×1°的NCEP全球再分析资料,土地利用资料采用欧空局的ESA CCI-LC 2015土地利用数据集。模拟采用的物理参数化方案包括New Goddard短波辐射方案、RRTM长波辐



(b)中红色阴影为城市土地利用类型;审图号为GS(2025)5996,底图边界无修改。

图1 WRF模拟区域和研究区域

Fig. 1 WRF model simulation domain and study area

射方案、Lin 微物理方案、Noah 陆面过程方案、BouLac 边界层参数化方案和 Kain-Fritsch 积云方案,其中积云方案只用于前两重网格。已有相关研究表明,该方案对珠江三角洲地区具备良好的模拟适用性与模拟效果(Wang et al., 2009; Shen et al., 2019; 沈傲等, 2019),能够适用于广州区域气象特征的精细化模拟需求。

广州受亚热带季风气候影响,前汛期(3—6月)极端强对流天气频发,后汛期(7—10月)易遭受台风、持续性高温天气,冬季(12月至翌年2月)则受冷空气影响明显,上述时段复杂的气象条件会干扰城市冠层参数对城市热动力环境的影响。2024年11月1—10日,广州以晴朗少云天气为主,无明显冷空气影响,温度稳定维持在20.2~24.4℃,相对湿度为58%~70%,且无降水,气象条件稳定,可有效排除极端天气过程带来的模拟干扰,是开展本研究模拟分析的理想时段。因此选择模拟时间为2024年10月29日00:00至11月11日00:00(世界时),研究时段为2024年11月1日00:00至11月10日23:00(地方时)。

研究区域为广州市(图1b),包括越秀区(YX)、海珠区(HZ)、荔湾区(LW)、天河区(TH)、白云区(BY)、黄埔区(HP)、番禺区(PY)、花都区(HD)、南沙区(NS)、从化区(CH)和增城区(ZC)。

1.2 本地化城市冠层参数

本研究主要关注单层城市冠层(UCM, single-layer urban canopy)和多层城市冠层(BEP, multi-layer building effect parameterization),并对2种城市冠层方案的模式默认参数设置和本地化参数设置进行了详细说明。

1.2.1 模式默认参数 WRF模式中若考虑城市冠层方案,则在城市土地利用类型下设置相应的城市冠层参数,主要包括建筑物的高度、占比、宽度和街道的宽度等。其中,UCM方案中默认建筑物高度、宽度和街道宽度分别为5.0、8.3和8.3 m;BEP方案中建筑物宽度和街道宽度分别为13和30 m,街道方向分别为0°和90°,建筑物高度分布包括建筑物高度及其所占比例两部分,建筑物高度分别为5、10和15 m,对应占比分别为15%、70%和15%。上述参数在城市下垫面并未体现空间差异性,无法代表真实的城市形态特征。

1.2.2 本地化参数 为在WRF模式的冠层方案中更精确地表征城市形态参数,本研究利用广州市城市规划勘测设计研究院提供的建筑信息,获取广州本地化城市形态数据集,水平分辨率为500 m,该数据集被集成至WRF预处理系统WPS,并绑定

至URB_PARAM数组中,该数组包含全部城市形态参数,主要包括平均建筑物高度、面积加权平均建筑高度、建筑物高度标准差、建筑表面面积与规划面积比、规划区域面积指数、迎风面积指数以及建筑物高度分布(Glotfelty et al., 2013)。利用该数组替换城市下垫面的默认固定值,实现逐网格独立赋值,从而真实反映广州城市形态空间异质特征。而模式中建筑物宽度和街道宽度可由规划区域面积指数、建筑表面面积与规划面积比、面积加权平均建筑高度和城市分数计算获得(Shen et al., 2023)。由本地化UCM方案、BEP方案参数与模式默认值的差异分布可知(图2、图3),相比于模式默认值,UCM方案和BEP方案的平均建筑物高度(BH)和建筑物高度标准差(SDBH)均有所增加,其中BEP方案中建筑宽度(BW)、街道宽度(SW)均降低,说明在真实城市结构下,有更窄的城市街谷和高密度的建筑物分布。

1.3 敏感性方案设置

本研究针对UCM方案和BEP方案是否更新城市形态参数(UM, urban morphology data)设置敏感性试验。Base方案为不考虑城市冠层的方案,Base_UCM方案和Base_BEP方案分别考虑UCM方案和BEP方案,Case_UCM方案和Case_BEP方案则采用广州本地化的城市冠层参数,具体设置见表1。

2 结果与分析

2.1 模式评估

将不同试验方案的模式模拟结果与逐时实际观测数据进行对比,定量计算各方案模拟值和观测值的统计评价指标,包括偏差(x_{Bias})、平均绝对误差(x_{MAE})、均方根误差(x_{RMSE})和相关系数(R)(Shen et al., 2019),所有统计指标均基于小时尺度数据计算。选取近地面常规气象要素2 m温度和10 m风速作为模拟效果评价对象;所用观测资料来源于广州市气象局,为全市范围内125个区域自动气象观测站在研究时段内的2 m温度、10 m风速实测数据。

通过对比不同试验方案模拟结果和观测结果的 R 值,发现本地化城市形态数据对各要素 R 值的影响较小,其中BEP方案模拟结果与观测值的 R 最高,2 m温度和10 m风速的 R 分别为0.90和0.42(表2)。2 m温度模拟值和观测值的 x_{Bias} 由0.72℃(Base)变为-0.37℃(Base_UCM)、-0.15℃(Case_UCM)、-0.27℃(Base_BEP)、-0.33℃(Case_BEP),可以看出考虑城市冠层方案对2 m温度降低

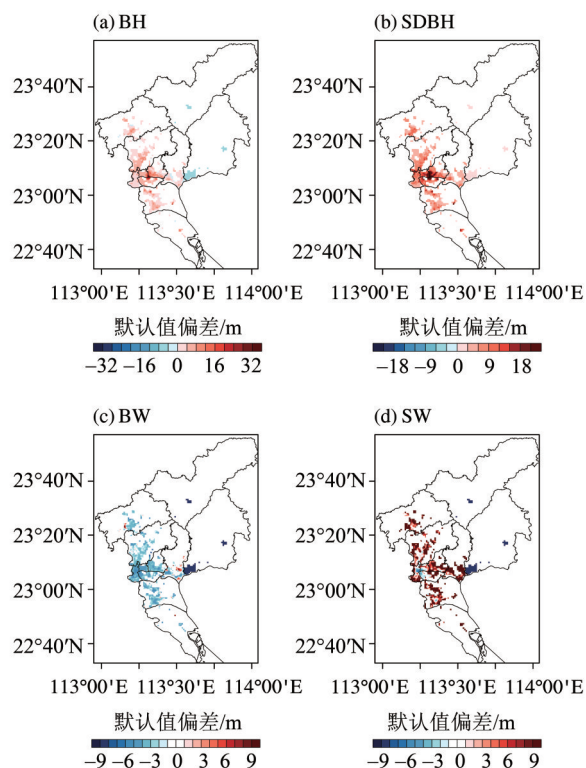


图2 本地化UCM参数和模式默认值偏差分布

Fig. 2 Deviation between localized UCM parameters and model default values

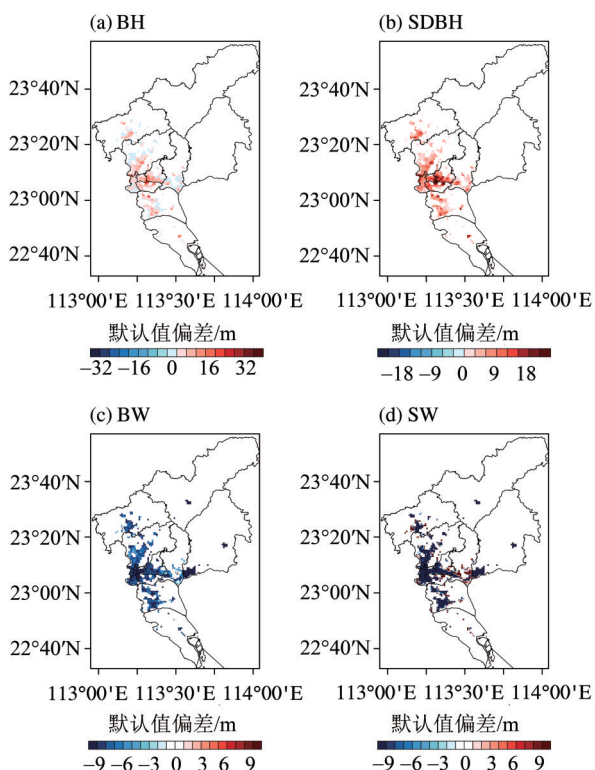


图3 本地化BEP参数和模式默认值偏差分布

Fig. 3 Deviation between localized BEP parameters and model default values

有明显影响;而采用本地化城市形态数据后,UCM方案模拟得到的2 m温度相较于模式默认参数试验有略微增加。各试验模拟的10 m风速模拟值和观测值的 x_{Bias} 由 2.27 m/s (Base) 变为 2.71 m/s (Base_UCM)、1.67 m/s (Case_UCM)、1.72 m/s (Base_BEP)、0.65 m/s (Case_BEP),本地化城市形态数据(Case_UCM和Case_BEP)导致10 m风速模拟结果有所降低,其中BEP方案对10 m风速模拟的改善效果最明显,尤其在广州中心城区(图4e)。

图5为各试验方案模拟的广州市2 m温度和10 m风速改善的站点个数占比,以及 x_{Bias} 相对于Base方案的改变率。各方案2 m温度改善的站点个数占比均在60%以上,其中考虑本地化城市形态数据的UCM方案改善站点比率最高(71.2%)。除了考虑默认参数的UCM方案外,其他方案10 m风速改善的站点个数占比均在80%以上,BEP方案则有超过93%站点的10 m风速模拟能力有所提升。从 x_{Bias} 改善效果来看,相对于Base方案,2 m温度 x_{Bias} 改变率分别为-66.8% (Base_UCM)、-90.1% (Case_UCM)、-77.3% (Base_BEP)和-69.3% (Case_BEP);10 m风速 x_{Bias} 改变率分别为14.0% (Base_UCM)、-16.7% (Case_UCM)、-18.3% (Base_BEP)和-49.8% (Case_BEP)。上述结果表明,本地化城市形态数据对UCM方案模拟2 m温度、BEP方案模拟10 m风速改善效果最为显著。

2.2 城市冠层方案和参数对气象要素日变化的影响

针对广州中心四城区(HZ、LW、TH、YX),统计所有城市格点(图1b中红色阴影)在研究时段内不同城市冠层方案和本地化城市形态数据对2 m温度、地表温度、10 m风速和边界层高度日变化的影响(图6)。同时,分析改变城市冠层方案和本地化城市形态数据对城市下垫面各气象要素日间(8:00—19:00)和夜间(20:00—7:00)的影响程度(表3)。

相较于不考虑城市冠层方案(Base),UCM方案和BEP方案对2 m温度、地表温度、10 m风速和边界层高度均有明显影响。从城市冠层方案和城市形态数据对2 m温度和地表温度的影响来看(图6a、b),UCM方案和BEP方案可使日间、夜间的2 m温度和地表温度有所降低,且呈现日变化特征。2 m温度夜间降低幅度更突出,分别为1.48 °C (UCM)和1.19 °C (BEP),不同城市冠层方案模拟的地表温度日间和夜间降幅均超过2.5 °C,尤其是BEP方案夜间地表温度降幅约4.0 °C。引入单层和多层城市冠

表 1 模拟方案设置¹⁾
Table 1 Numerical simulation setup

模拟方案	城市冠层方案	城市冠层参数	备注
Base	不考虑	—	—
Base_UCM	UCM	模式默认值	Base_UCM-Base 考虑 UCM 方案影响
Base_BEP	BEP	模式默认值	Base_BEP-Base 考虑 BEP 方案影响
Case_UCM	UCM	本地化数据	Case_UCM-Base_UCM 考虑 UCM 方案中 UM 影响
Case_BEP	BEP	本地化数据	Case_BEP-Base_BEP 考虑 BEP 方案中 UM 影响

1) “—”表示无此项。

表 2 不同方案 2 m 温度和 10 m 风速模拟值与观测值的验证变量统计平均值
Table 2 Statistical mean values of the simulated and observed 2 m temperature and 10 m wind speed under different scenarios

模拟方案	2 m 温度				10 m 风速			
	$x_{Bias}/^{\circ}C$	$x_{MAE}/^{\circ}C$	$x_{RMSE}/^{\circ}C$	R	$x_{Bias}/(m\cdot s^{-1})$	$x_{MAE}/(m\cdot s^{-1})$	$x_{RMSE}/(m\cdot s^{-1})$	R
Base	0.72	1.27	1.68	0.89	2.27	2.35	2.66	0.31
Base_UCM	-0.37	1.51	1.86	0.89	2.71	2.79	3.18	0.33
Case_UCM	-0.15	1.46	1.82	0.89	1.67	1.86	2.18	0.33
Base_BEP	-0.27	1.34	1.67	0.90	1.72	1.86	2.14	0.42
Case_BEP	-0.33	1.30	1.61	0.90	0.65	1.17	1.40	0.38

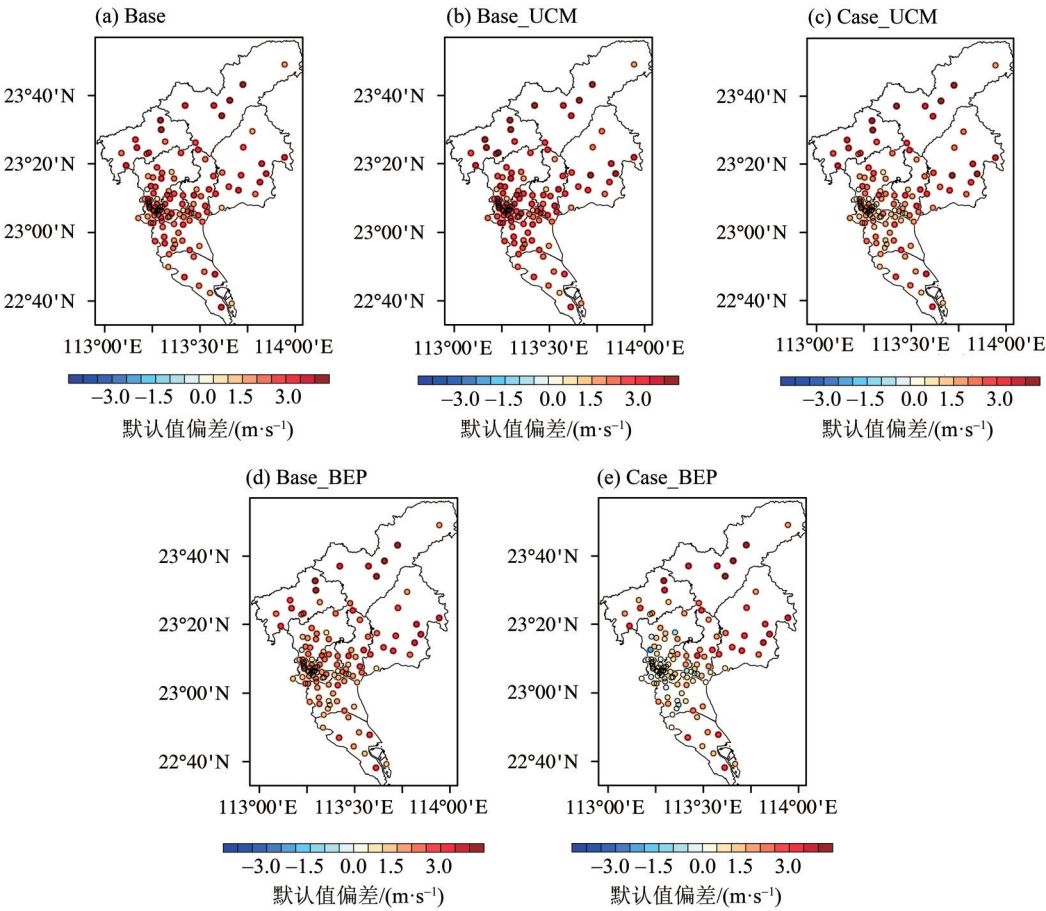


图 4 不同方案 10 m 风速模拟值与观测值偏差分布比较
Fig. 4 Comparison of deviations between simulated and observed 10 m wind speed for different scenarios

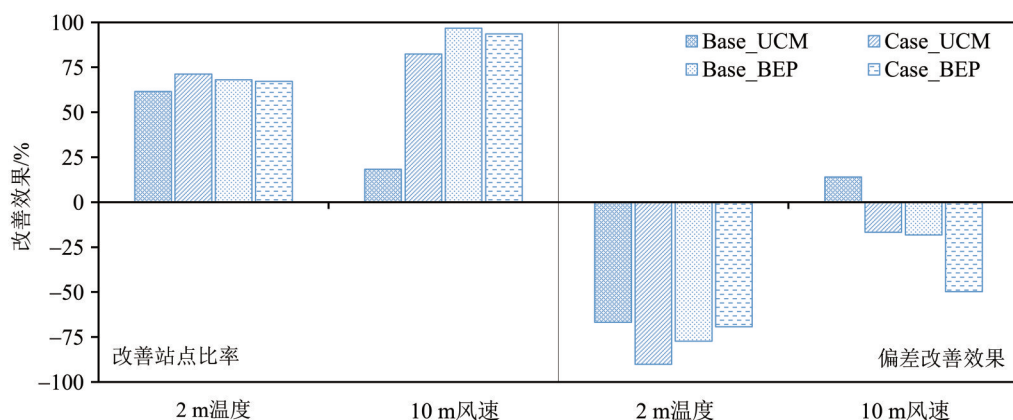


图5 各方案模拟结果的改善效果评估

Fig. 5 Evaluation of improvements in simulation results for each scenario

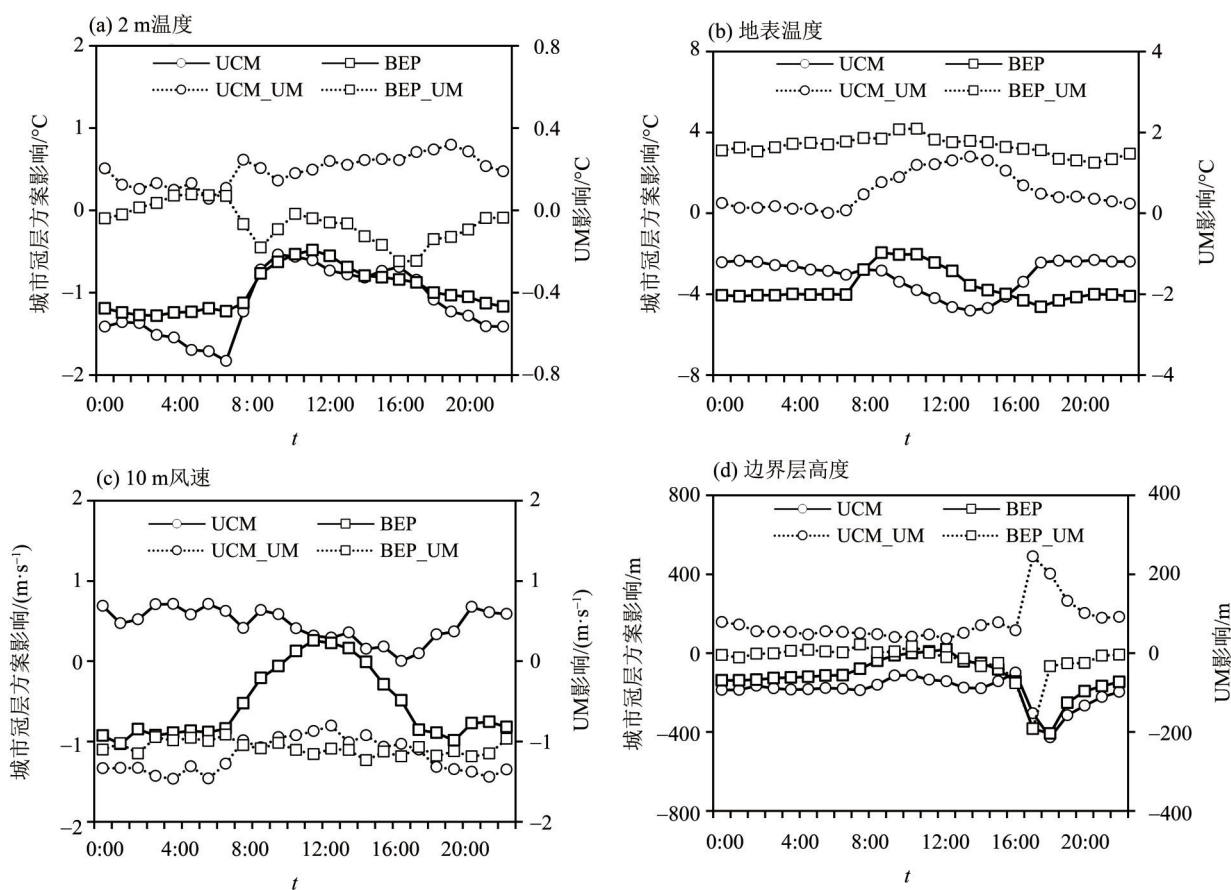


图6 城市冠层方案和UM对广州中心城区城市格点气象要素日变化的影响

Fig. 6 Impacts of different urban canopy schemes and UM on the diurnal variations of meteorological variables at urban grid points in the central area of Guangzhou

层方案后,建筑物对街谷产生遮蔽效应是温度降低的主要原因。考虑本地化城市形态数据对UCM方案和BEP方案模拟的2 m温度和地表温度存在略微差异,日间影响均大于夜间,其中UCM方案中2 m温度和地表温度在日间分别增加0.23和0.93 °C,夜间增幅则低于0.2 °C;BEP方案中2 m温度在日间降低0.12 °C,地表温度在日间和夜间分别增加1.76和

1.56 °C(表3),温度变化受能量及辐射平衡的影响。

不同城市冠层方案对10 m风速的影响存在差异,UCM方案中日平均10 m风速增加0.46 m/s, BEP方案考虑不同高度建筑物分布,地表粗糙度增大,导致日平均10 m风速降低0.55 m/s;考虑本地化城市形态数据后,UCM方案和BEP方案模拟的10 m风速日间和夜间影响程度相近,日间分别降低

表3 城市冠层方案和UM对广州中心城区城市格点气象要素日间和夜间影响的统计平均值

Table 3 Statistical mean values of the impacts of different urban canopy schemes and UM on meteorological variables at urban grid points in the central area of Guangzhou during daytime and nighttime

方案	2 m 温度/°C		地表温度/°C		10 m 风速/(m·s ⁻¹)		边界层高度/m	
	日间	夜间	日间	夜间	日间	夜间	日间	夜间
UCM	-0.78	-1.48	-3.62	-2.54	0.31	0.60	-181.6	-203.7
BEP	-0.76	-1.19	-3.22	-4.04	-0.21	-0.88	-101.1	-146.9
UCM_UM	0.23	0.16	0.93	0.19	-1.01	-1.37	80.6	73.6
BEP_UM	-0.12	0.00	1.76	1.56	-1.12	-1.04	-28.2	-5.1

1.01 m/s(UCM)和 1.12 m/s(BEP),夜间分别降低 1.37 m/s(UCM)和 1.04 m/s(BEP)。在边界层高度方面,UCM 方案、BEP 方案日间和夜间边界层高度均有所降低,UCM 方案(日间:181.6 m;夜间:203.7 m)影响略大于 BEP 方案(日间:101.1 m;夜间:146.9 m),与 2 m 温度降低有很好的对应关系。本地化城市形态数据对 UCM 方案和 BEP 方案模拟边界层高度的影响存在略微差异,UCM 方案中边界层高度在日间和夜间分别增加 80.6 和 73.6 m,其中 18:00—21:00 增加最为明显,达到 100 m 以上;而 BEP 方案中边界层高度影响较小,除 17:00—18:00,其他时刻本地化城市形态数据对边界层高度的影响均低于 35 m。

2.3 城市形态参数对气象要素空间分布的影响

引入高分辨率UM后,UCM方案和BEP方案模拟的地表温度在日间和夜间均呈上升趋势,且中心城区升温最为明显(图7)。UCM方案日间和夜间地表温度增幅分别约为1.0和0.6℃;BEP方案日间地表温度增幅超1.6℃,夜间增幅超1.4℃。由图2和图3可知,相较于模式默认参数,UCM方案更新UM后,街道宽度增加6m以上,建筑物宽度降低约2~4m,建筑物的遮蔽作用随之减弱,到达城市冠层底部的短波辐射有所增强,进而造成日间地表温度增加;而BEP方案更新UM后,街道宽度和建筑物宽度均减小6m以上,建筑物密度增大,城市冠层对热量的截留作用更加明显,造成BEP方案日间地表温度增加。

地表温度变化受地表能量分配过程影响,基于地表能量平衡方程进一步开展通量分析。研究时段内降水、降雪影响可忽略,城市地表能量平衡关系可表达为净辐射通量全部转化为土壤热通量、感热通量与潜热通量(Xie et al., 2012)。通量分配差异是2种方案地表升温幅度产生分化的原因。由高分辨率UM对广州城市下垫面日间土壤热通量的影响可知(图8a、e),日间热量从地面传递到土壤,土壤热通量为负(蓝色阴影),表示土壤热通量增加;

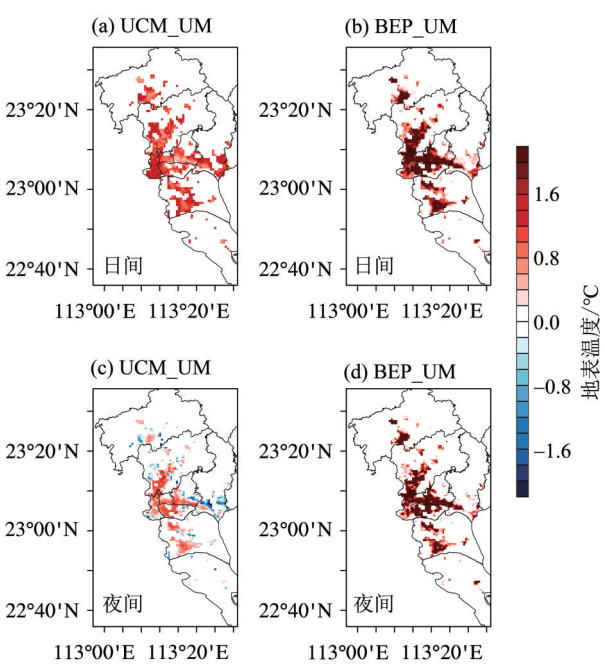


图7 高分辨率UM对广州城市下垫面地表温度的影响

Fig. 7 Impact of high-resolution UM on land surface skin temperature over the urban underlying surface in Guangzhou

高分辨率的UM使BEP方案中城区街谷变窄,日间土壤储热增加18 W/m²以上,土壤储热能力更强,夜间土壤热量反向释放至地表,促使夜间地表温度升高(图7d),而UCM方案日间土壤热通量仅增加3~9 W/m²,储热能力偏弱,夜间热量释放有限,因此夜间升温幅度低于BEP方案(图7c)。从净辐射通量与感热通量差异来看,2种方案特征不同。引入高分辨率UM后,UCM方案净辐射通量增加(图8d),地表可利用热力总量提升,同时日间感热通量上升20~35 W/m²(图8b),地气输送热量过程增强。BEP方案净辐射通量有所减小(图8h),且日间感热通量降低25~50 W/m²(图8f),地表向大气的热量输送受到抑制,热量滞留于近地表层,最终形成升温效应。此外,2种方案潜热通量增幅均低于8 W/m²,蒸发散热贡献较弱,对地表温度调控作用有限。

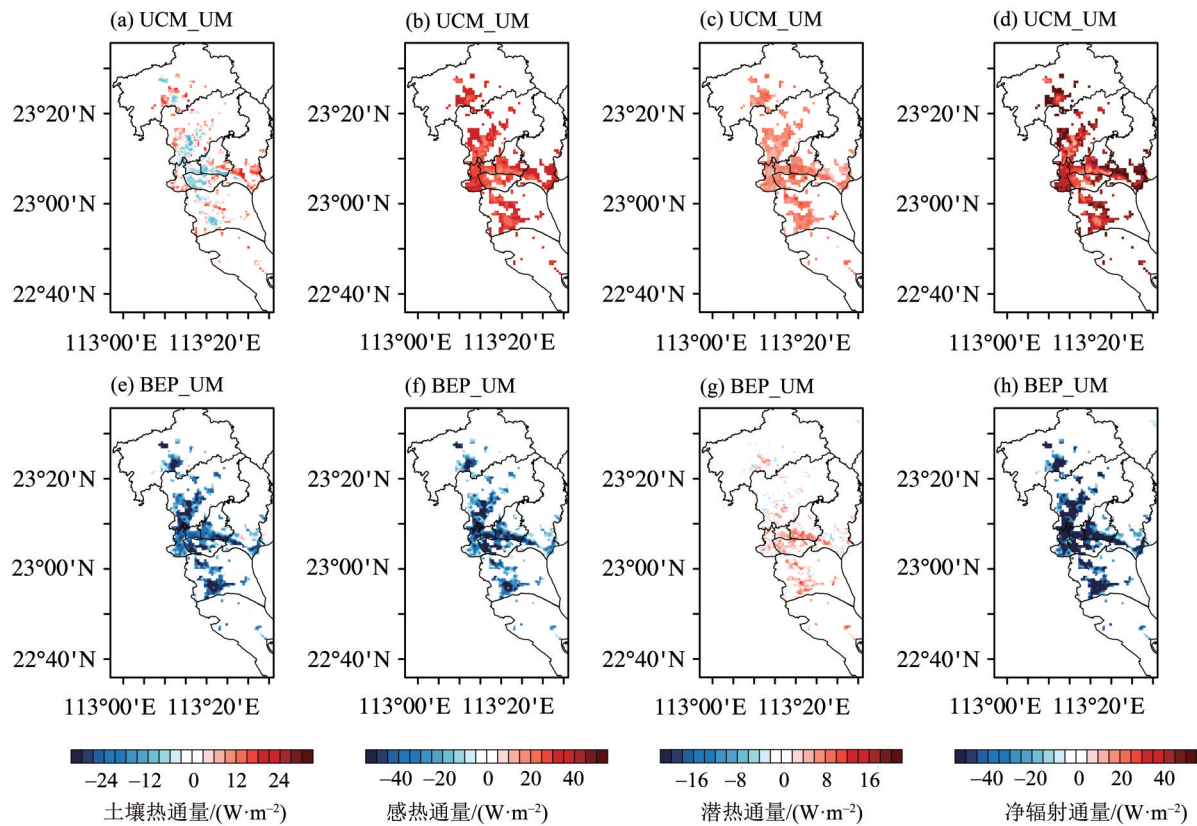


图8 高分辨率UM对广州城市下垫面日间地表能量通量的影响

Fig. 8 Impact of high-resolution UM on daytime surface energy fluxes over the urban underlying surface in Guangzhou

高分辨率UM对UCM方案和BEP方案模拟2 m温度的影响小于地表温度(图9), UCM方案中心城区2 m温度日间、夜间增幅分别超过0.2和0.4℃, BEP方案日间2 m温度小幅下降0.1~0.2℃, 夜间2 m温度变化不明显。2 m温度主要受地表温度和近地面热量湍流交换系数的共同影响, 高分辨率UM造成UCM方案和BEP方案模拟的日间和夜间地表温度增加(图7), 结合中心城区近地面热量湍流交换系数(图10)做进一步分析可知, UCM方案引入高分辨率UM后, 日间和夜间低层热量湍流交换系数分别最大增加约30和15 m^2/s , 利于地面和大气之间的热量传递, 使2 m温度在日间和夜间均有所增加; BEP方案中, 高分辨率UM会减小日间和夜间近地层热量湍流交换系数, 地面和大气之间的热量传递减弱, 且日间减小程度大于夜间, 因此2 m温度在日间降低更明显, 夜间则变化相对微弱。该变化规律与感热通量变化特征有良好的对应关系, UCM方案感热通量上升, 地气热量输送过程增强, 而BEP方案感热通量降低, 地表向大气的热量输送受抑制。

高分辨率UM导致UCM方案和BEP方案模拟的10 m风速降低0.8 m/s 以上, 2个方案的影响程度基本相当(图11a、b)。究其原因, 高分辨率UM更精

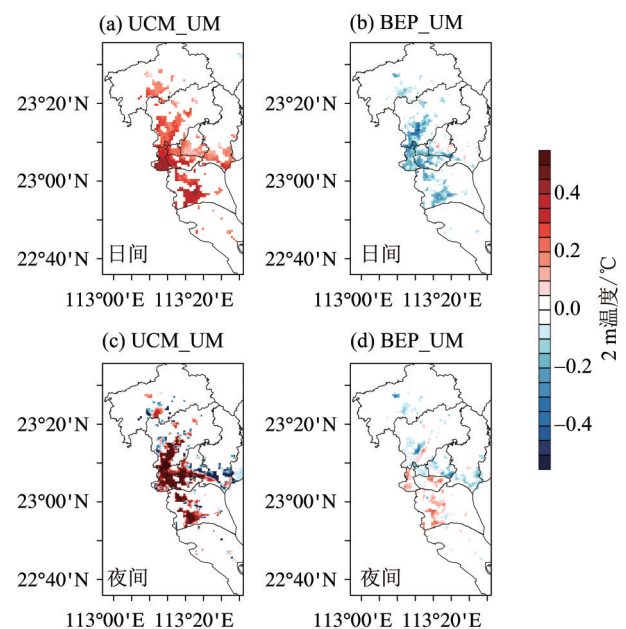


图9 高分辨率UM对广州城市下垫面2 m温度的影响

Fig. 9 Impact of high-resolution UM on 2 m temperature over the urban underlying surface in Guangzhou

细地刻画了中心城区建筑空间分布, 使中心城区建筑物高度标准差增加6~18 m(图2b、图3b), 城市地表非均匀性增强, 地表粗糙度相应增大, 进而增强

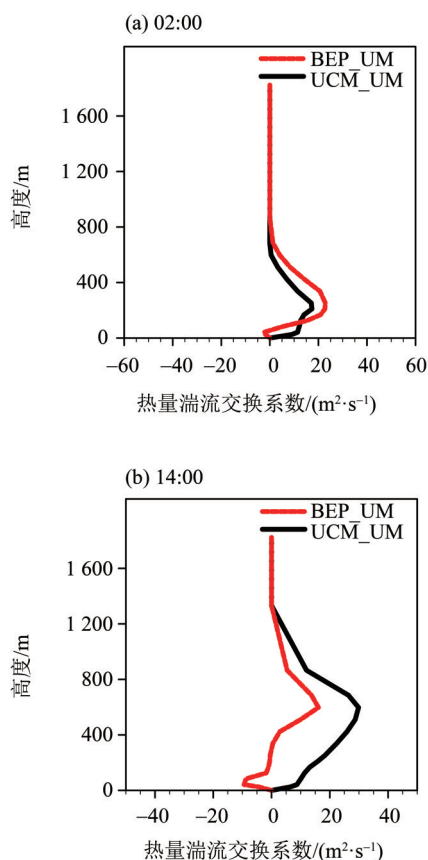


图 10 高分辨率UM对广州中心城区热量湍流交换系数垂直分布的影响

Fig. 10 Impact of high-resolution UM on vertical profiles of turbulent heat exchange coefficient over central area of Guangzhou

了近地面气流的拖曳效应。在此影响下,UCM方案和BEP方案模拟的摩擦速度均增加0.1~0.3 m/s(图11c、d),造成近地面风速减小。高分辨率UM不仅改变风速的水平空间分布,对水平风速的垂直分布也有一定影响,高分辨率UM对过23.12°N的水平风速垂直分布的影响剖面经过中心城区荔湾、越秀、天河和黄埔区(图12a、b)。结果表明,UM对城市冠层内风速垂直分布有明显影响,随着高度增加,风速受影响程度下降,UM对风速影响较明显的高度低于400 m。相较于UCM方案,BEP方案对城市形态异质性的表征更精细,因此高分辨率UM对BEP方案200 m以下水平风速垂直分布的影响更细致。

高分辨率UM对2种方案边界层高度的影响存在差异(图13)。UCM方案边界层高度抬升60~90 m, BEP方案边界层高度则下降10~30 m。从热力角度分析,高分辨率UM对边界层高度分布的影响与2 m温度有很好的对应关系,UCM方案模拟的2 m温度

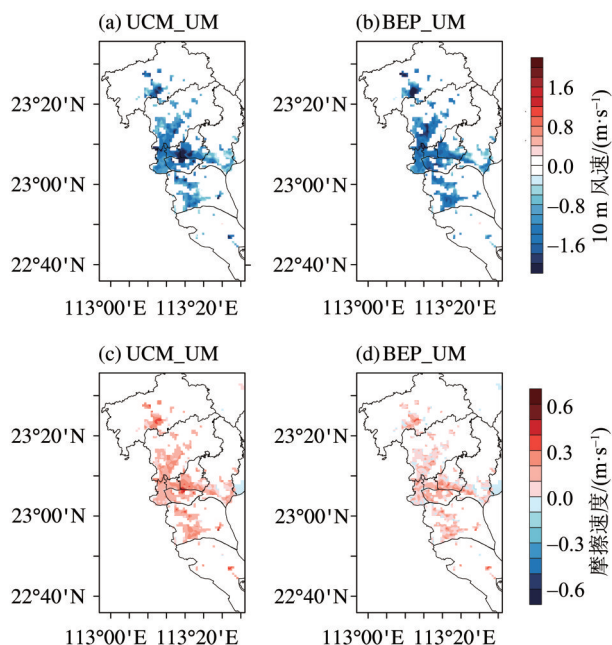


图 11 高分辨率UM对广州城市下垫面10 m风速和摩擦速度的影响

Fig. 11 Impacts of high-resolution UM on 10 m wind speed and friction velocity over the urban underlying surface in Guangzhou

增加,对应边界层高度抬升;BEP方案模拟的2 m温度略有下降,对应边界层高度降低。边界层高度变化的原因也和动量湍流运动密切相关,UCM方案中动量湍流垂直交换系数有所增大,湍流运动增强,促使边界层抬升;BEP方案低层动量湍流垂直交换系数有所减小,湍流运动减弱,进而抑制边界层的抬升(图12c、d)。

本研究表明,UCM方案与BEP方案是WRF模式中2种典型的的城市冠层参数化方案,二者的物理结构、参数设置与模拟响应存在显著差异。UCM方案为单层城市冠层方案,仅表征街谷平均几何特征,不考虑垂直分层,参数需求少;BEP方案为多层城市冠层方案,考虑垂直分层结构,物理表述更接近真实城市结构,参数需求量更大、对下垫面异质性更敏感。引入本地化城市冠层参数后,UCM方案对2 m温度的偏差改善率达90.1%,71.2%的站点模拟效果提升,显著优于BEP方案(69.3%、67.2%);BEP方案对10 m风速的偏差改善率为49.8%,93.6%的站点模拟能力提升,优化效果强于UCM方案(16.7%、82.4%)。2种方案在近地面温度、风速及边界层高度空间分布的模拟差异,源于单层与多层冠层在辐射遮蔽、热量截留、湍流垂直交换等物理机制上的不同。本地化城市冠层参数使2种方案模

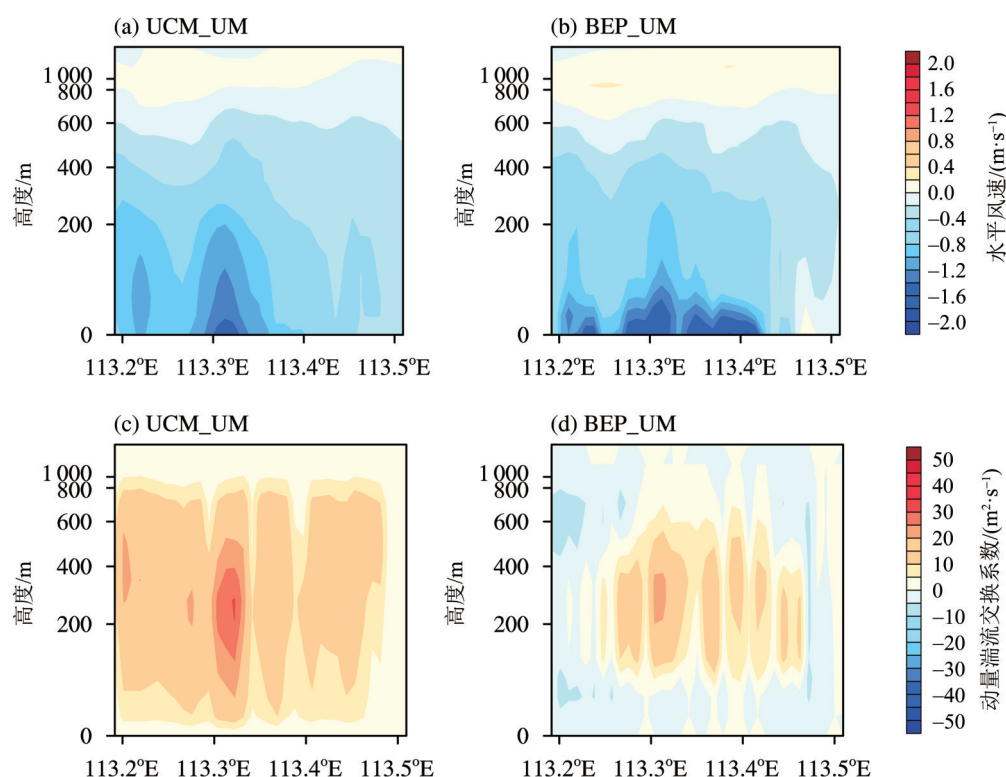


图12 高分辨率UM对水平风速和动量湍流交换系数垂直分布的影响(过23.12°N剖面)

Fig. 12 Impacts of high-resolution UM on vertical profiles of horizontal wind speed and turbulent momentum exchange coefficient (along the cross-section at 23.12°N)

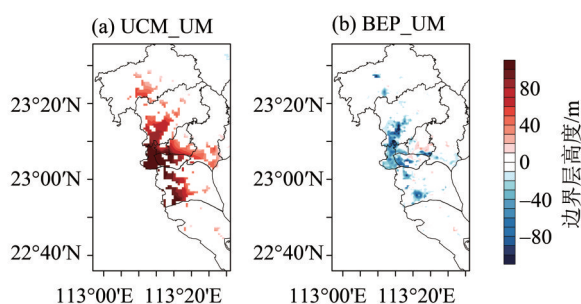


图13 高分辨率UM对广州城市下垫面边界层高度的影响

Fig. 13 Impact of high-resolution UM on boundary layer height over the urban underlying surface in Guangzhou

拟的地表温度均呈上升趋势,BEP方案因街谷更窄、建筑密度更高,热量截留与土壤储热效应更强,升温幅度高于UCM方案。受建筑物高度标准差增大、地表粗糙度提升的影响,2种方案10 m风速均出现明显下降,但BEP方案对城市形态空间差异更敏感,对水平风速垂直分布的模拟更细致。UCM方案模拟的边界层高度随气温升高而抬升,BEP方案则因低层动量湍流交换减弱,边界层高度小幅下降。

引入本地化城市形态参数可有效弥补WRF模式默认城市冠层参数空间均一化的不足,更精准地

刻画广州高密度城市下垫面的真实特征,显著提升近地面气象要素模拟准确性,但本研究仍存在一定不确定性。本研究采用的城市形态参数为单期静态数据,且参数在网格尺度上的平均化处理会平滑局部极值;模拟过程未考虑广州本地化的人为热,对城市能量平衡的刻画存在欠缺。上述不确定性存在小幅低估中心城区温度和风速的可能性,但不会改变本地化参数对2种城市冠层方案模拟结果的优化趋势与核心结论。未来可构建动态更新的高分辨率城市形态数据集和人为热排放参数,进一步完善城市冠层参数化方案,为城市通风廊道规划、热岛效应缓解、低空飞行及城市微气候优化提供更精准的气象模拟支撑。

3 结论

本研究以超大城市广州为对象,将本地化、非均一城市形态参数嵌入WRF模式,系统评估其对单层和多层城市冠层方案模拟结果的改善作用,揭示不同城市冠层方案下本地化参数对关键气象要素的影响规律,主要得到以下结论:

1)引入城市冠层方案可改善广州城市热动力

环境模拟偏差,相较于无城市冠层情景,UCM 方案和 BEP 方案均能降低 2 m 温度的模拟偏差。嵌入本地化城市形态参数可进一步优化关键气象要素模拟效果,但优化效果存在方案差异,2 m 温度模拟中 UCM 方案优势突出,BEP 方案则更适配 10 m 风速模拟。

2)不同城市冠层方案对近地面气象要素的模拟差异源于冠层物理结构的不同。UCM 方案和 BEP 方案均能降低 2 m 温度、地表温度和边界层高度,UCM 方案因建筑遮蔽效应,温度和边界层高度下降幅度更明显。2 种方案对 10 m 风速的影响则相反,UCM 方案提升 10 m 风速,BEP 方案因细化不同

高度建筑特征,使得风速降低。

3)本地化城市形态参数通过改变建筑与街谷的几何形态影响城市热动力分布。本地化参数使 2 种方案中心城区地表温度均有升高,BEP 方案因街谷收缩、建筑密度提升,热量截留和储热更强,升温幅度高于 UCM 方案;建筑物高度标准差增大提升地表摩擦,使得 2 种方案 10 m 风速降幅超 0.8 m/s,且风速垂直影响集中在 400 m 以下。本地化参数对边界层高度的影响存在方案差异,UCM 方案的边界层高度随近地面增温而抬升,BEP 方案则因低层动量湍流交换减弱而小幅下降。

参考文献:

- 陈训来,冯业荣,王安宇,等,2007.珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J].中山大学学报(自然科学版), (4): 103-107.
- 洪莹莹,刘一鸣,张舒婷,等,2015.珠三角城市化对大气边界层特征影响的数值模拟[J].中山大学学报(自然科学版), 54(1): 116-123,129.
- 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.
- 沈傲,田春艳,刘一鸣,等,2019.海陆风环流中海盐气溶胶对大气影响的模拟[J].中国环境科学, 39(4): 1427-1435.
- 王咏薇,蒋维楣,刘红年,2008.大气数值模式中城市效应参数化方案研究进展[J].地球科学进展, 23(4): 371-381.
- 王咏薇,任侠,翟雪飞,等,2016.南京复杂下垫面条件下的三维城市热环境模拟[J].大气科学学报, 39(4): 525-535.
- Chen F, Yu B, Wu M, et al, 2022. Improved urban finescale forecasting during a heat wave by using high-resolution urban canopy parameters[J]. Front Clim, 3: 771441.
- Darmanto N S, Varquez A C G, Kanda M, 2017. Urban roughness parameters estimation from globally available datasets for mesoscale modeling in megacities[J]. Urban Clim, 21: 243-261.
- de la Paz D, Borge R, Martilli A, 2016. Assessment of a high resolution annual WRF-BEP/CMAQ simulation for the urban area of Madrid (Spain)[J]. Atmos Environ, 144: 282-296.
- Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al, 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates[J]. Science, 310(5754): 1674-1678.
- Glotfelty T, Tewari M, Sampson K, et al, 2013. NUDAPT 44 documentation [R/OL]. (2013-04-25) [2026-02-13]. https://ral.ucar.edu/sites/default/files/public/product-tool/NUDAPT_44_Documentation.pdf.
- He X, Li Y, Wang X, et al, 2019. High-resolution dataset of urban canopy parameters for Beijing and its application to the integrated WRF/Urban modelling system[J]. J Clean Prod, 208: 373-383.
- Kamath H G, Singh M, Malviya N, et al, 2024. GLOBal Building heights for Urban Studies (UT-GLOBUS) for city- and street- scale urban simulations: Development and first applications[J]. Sci Data, 11: 886.
- 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.
- Lin W, Zhang L, Du D, et al, 2009. Quantification of land use/land cover changes in Pearl River Delta and its impact on regional climate in summer using numerical modeling[J]. Reg Environ Change, 9(2): 75-82.
- 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]. QJR Meteorol Soc, 136(649): 997-1019.
- Loridan T, Lindberg F, Jorba O, et al, 2013. High resolution simulation of the variability of surface energy balance fluxes across central London with urban zones for energy partitioning[J]. Bound Layer Meteor, 147(3): 493-523.
- Magnaye A M T, Kusaka H, 2024. Potential effect of urbaniza-

- tion on extreme heat events in Metro Manila Philippines using WRF-UCM[J]. *Sustain Cities Soc*, 110: 105584.
- Martilli A, Clappier A, Rotach M W, 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models [J]. *Bound Layer Meteor*, 104(2): 261–304.
- Masson V, 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. *Bound Layer Meteor*, 94(3): 357–397.
- Mohan M, Kandya A, 2015. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: A case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data[J]. *Sci Total Environ*, 506/507: 453–465.
- Powers J G, Klemp J B, Skamarock W C, et al, 2017. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 98(8): 1717–1737.
- Shen C, Chen X, Dai W, et al, 2019. Impacts of high-resolution urban canopy parameters within the WRF model on dynamical and thermal fields over Guangzhou, China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 58(5): 1155–1176.
- Shen C, Liu Y, Dai W, et al, 2023. The influence of refined urban morphological parameters on dynamical and thermal fields in a single-layer urban canopy model[J]. *Atmosphere*, 14(4): 719.
- Wang X, Chen F, Wu Z, et al, 2009. Impacts of weather conditions modified by urban expansion on surface ozone: Comparison between the Pearl River Delta and Yangtze River Delta regions[J]. *Adv Atmos Sci*, 26(5): 962–972.
- Wang Z H, Bou-Zeid E, Au S K, et al, 2011. Analyzing the sensitivity of WRF's single-layer urban canopy model to parameter uncertainty using advanced Monte Carlo simulation[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50(9): 1795–1814.
- Xie B, Fung J C H, Chan A, et al, 2012. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model[J]. *J Geophys Res*, 117(D12): 2011JD017080.
- Zhao Y, Zhong L, Ma Y, et al, 2021. WRF/UCM simulations of the impacts of urban expansion and future climate change on atmospheric thermal environment in a Chinese megacity [J]. *Clim Change*, 169(3): 38.
- Zhou X, Chen H, 2018. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon[J]. *Sci Total Environ*, 635: 1467–1476.
- Zhu B, Kang H, Zhu T, et al, 2015. Impact of Shanghai urban land surface forcing on downstream city ozone chemistry[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(9): 4340–4351.

(责任编辑 江 睿)