

柯宗贤,王东海,曾智琳,等,2023. 粤港澳大湾区下垫面对“5·22”极端强降水过程影响的研究[J]. 气象,49(1):12-26. Ke Z X, Wang D H, Zeng Z L, et al, 2023. Underlying surface effect on the extreme heavy rainfall event on 22 May 2020 in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Meteor Mon, 49(1):12-26 (in Chinese).

粤港澳大湾区下垫面对“5·22”极端强降水过程影响的研究^{*}

柯宗贤^{1,2} 王东海^{1,2,3} 曾智琳^{1,2} 张春燕^{1,2} 梁钊明⁴ 张 宇⁵

1 中山大学大气科学学院/广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 珠海 519082

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

3 澳门海岸带生态环境国家野外科学观测研究站, 澳门科技大学澳门环境研究院, 澳门 999078

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

5 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088

提 要: 为探讨粤港澳大湾区城市群对局地极端强降水的影响, 采用 WRF-ARW 中尺度区域数值模式及 GSI-3DVar 同化系统, 以 ECMWF 提供的 ERA5 再分析资料作为模式初始场和边界场, 并进行多普勒雷达资料的三维变分同化, 对 2020 年 5 月 22 日发生在大湾区的极端强降水过程进行数值模拟, 研究城市对局地极端降水的影响过程与机理。结果表明: 相较于未同化任何观测资料, 加入雷达反射率和径向风资料的同化可提升降水的模拟能力, 尤其对 250 mm 以上的特大暴雨量级的模拟改善效果最为显著; 观测与对照试验共同表明, 大湾区城市群一方面作为“热源”, 通过感热和潜热过程提高了边界层大气温度, 产生明显热岛效应的同时增强了低层大气的对流不稳定性, 另一方面, 较强的摩擦耗散过程使边界层风速减弱, 更多的暖湿空气被截留在城市区域内部, 有助于形成更强的热力不稳定性与水汽辐合条件, 从而使强降水中心落在城市区域边缘靠内部一侧; 城市下垫面被替换为农田的敏感性试验进一步表明, 城市下垫面造成的摩擦耗散作用可影响 800 hPa 以下的边界层, 而缺乏城市冠层的摩擦耗散作用, 边界层更强的西南风可将暖湿不稳定空气输送至城市区域下游更远处, 并受到局地地形的强迫抬升, 引起更强的垂直上升运动, 从而造成比对照试验强度更大、落区位置更偏于城市下风方的降水中心。

关键词: 粤港澳大湾区, 城市群下垫面, 极端强降水, 数值模拟, 雷达同化

中图分类号: P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.071001

Underlying Surface Effect on the Extreme Heavy Rainfall Event on 22 May 2020 in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

KE Zongxian^{1,2} WANG Donghai^{1,2,3} ZENG Zhilin^{1,2}
ZHANG Chunyan^{1,2} LIANG Zhaoming⁴ ZHANG Yu⁵

1 School of Atmospheric Sciences/Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

3 National Observation and Research Station of Coastal Ecological Environments in Macao, Macao Environmental Research Institute, Macau University of Science and Technology, Macao SAR 999078

4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

5 College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088

^{*} 国家重点研发计划(2019YFC1510400)、广东省基础与应用基础研究重大项目(2020B0301030004)共同资助

2021 年 8 月 18 日收稿; 2022 年 8 月 14 日收修定稿

第一作者: 柯宗贤, 主要从事中尺度数值模拟和资料同化研究. E-mail: kezx@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 王东海, 主要从事中小尺度天气动力学、热带对流系统、数值天气预报、气象资料同化及分析应用研究. E-mail: wangdh7@mail.sysu.edu.cn

Abstract: In order to explore the impacts of urban agglomeration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area on localized extreme heavy rainfall, this paper conducts 3DVar assimilation of Doppler radar data to simulate an extreme heavy rainfall event that occurred in the Greater Bay Area on 22 May 2020, based on the WRF-ARW mesoscale numerical model, GSI-3DVar assimilation system and ERA5 re-analysis data provided by ECMWF. The influence process and mechanism of urban area on local extreme rainfall are studied. The results show that, compared with no assimilation of any observational data, adding the assimilation of radar reflectivity and radial wind data can improve the simulation ability of precipitation, especially for the heavy rainstorm magnitude of more than 250 mm. Observation and control experiment jointly show that the urban agglomeration in the Greater Bay Area acts as a local “heat source”, increasing the temperature of the boundary layer through sensible and latent heat, resulting in significant heat island effect, which then strengthens the convective instability within lower atmosphere. On the other hand, strong friction dissipation reduces the wind speed in boundary layer so that it catches more warm and moist air within the urban area, forming stronger thermal instability and moisture convergence, and then leading to the rainfall center located at the inner part of the edge of urban area. The sensitivity experiment (i. e., removal of urban land use) further shows that friction dissipation caused by urban underlying surface affects dynamic thermodynamic environments in boundary layer below 800 hPa, resulting in stronger southwesterly and unstable atmospheric condition over downstream of the urban area in urban removal experiment. Also, the convection is lifted by the local topography, enhancing vertical upward movement, which finally results in stronger rainfall intensity than the control experiment and the location of the rainfall area more inclined to the downstream of the urban area.

Key words: the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, urban agglomeration underlying surface, extreme heavy rainfall, numerical simulation, radar assimilation

引言

粤港澳大湾区作为世界级城市群与第四大湾区,经济发达,人口稠密,在当前国家发展大局中具有重要战略地位。然而,粤港澳大湾区地处珠江三角洲,濒临南海,受西风带系统与热带天气系统的共同影响,水汽条件充沛,是我国雨季最长、雨量最充沛、也是极端强降水多发频繁的地区之一(Luo et al, 2016; 2017; 2020)。近年来,随着经济的快速发展,城市区域不断扩张,土地利用急剧变化,形成了自然与人为改造错综复杂的下垫面。城市的土地扩张利用以及密集的经济社会活动对局地天气过程,如海陆风、城市热岛环流、局地强降水等有很大的影响,尤其是频发的强降水常常会引发城市内涝、滑坡崩塌与泥石流等次生灾害,长期以来给大湾区带来的人员伤亡和经济损失是不可估量的(Wu et al, 2019; Li et al, 2011; Hallegatte et al, 2013)。

城市化发展对于局地强降水有着不可忽视的影响。有学者认为城市强迫作用会影响局地对流系统触发的时间和地点,并有助于极端降水中心的形成

(Huang et al, 2019; Chen et al, 2007)。很多统计及个例研究也表明,城市化可以通过多种机制来使得局地降水增加,如城市化伴随的热岛效应使得边界层的大气层结不稳定性增加从而有利于激发或增强对流降水(Shepherd and Burian, 2003; Yang et al, 2012; 刘振鑫, 2014; 蒙伟光等, 2012);城市下垫面性质增加了地表粗糙程度进而导致强迫抬升作用增强(Wang et al, 2012; Thielen et al, 2000; 吴风波和汤剑平, 2011),城市地表的摩擦拖曳作用产生了风阻效应,导致低层气流从郊区向城区辐合,增加了低层辐合的量级,影响了其水平分布,使得湿空气在上空堆积,有利于强降水事件发生(Wu et al, 2021; Inamura et al, 2011; 徐蓉等, 2013);城市区域的经济社会活动和人为排放增加了气溶胶浓度,影响对流云中液态水和冰相物质含量,在上升气流的抬升过程中伴随着大量的凝结潜热释放,促进对流发展最终增强城市区域的降水(李英华等, 2020; Diem and Brown, 2003; Lacke et al, 2009)。然而,也有不少研究持有不同的结论与观点:城市下垫面的存在一方面减少了降雨云中携带的水汽,另一方面增加了城区上空的边界层高度,使得大气的对流有效位能

(CAPE)减小,进而减少城市区域的降水(Zhang et al, 2009; Matheson and Ashie, 2008; Wang et al, 2012);也有数值模拟研究发现,城市化效应造成地表感热通量增加,而潜热通量因水汽的降低而显著减小,最终使得城区累积降水总量大幅度减少(Guo et al, 2006)。城市化发展除了影响降水强度外,还会通过影响中尺度对流系统(MCS)的触发发展与生消演变,进而影响强降水的落区分布(Bornstein and Lin, 2000; Huang et al, 2019; Lin et al, 2008)。热岛效应是城市化发展带来的最直接表现,基于观测和模拟的研究发现热岛效应往往使城市及其下风方的降水增强,而在剔除城市化影响的敏感性试验表明,城市下风方的对流降雨量和累积降雨量都显著减少(Miao et al, 2011);相反,李舒文(2018)和周林帆等(2019)通过数值模拟却发现城乡交界处的边界效应导致质量堆积和局地辐合增强从而加强对流上升,对上风向的城乡交界处降水有显著增幅作用,以农田替代城市下垫面的模拟结果则发现降水落区向下风方偏移,增强了城市区域下风方的降水。

近年来多普勒天气雷达观测资料的应用成为资料同化的一个重要方向,研究表明,有效同化雷达资料能改进初始场中的云温、水汽、云量以及水物质场等信息,提高中小尺度数值预报模式中湿物理过程分析能力,对改进降水预报、缩短 spin-up 时间、提高短时临近预报的可信度具有重要意义(王晓峰等, 2017; Xiao et al, 2005)。GSI(gridpoint statistical interpolation)作为 NCEP 主推的同化系统,在业务和科研上都有着广泛的应用(文秋实和王东海, 2017),尽管目前我国关于多普勒雷达资料在 GSI 中的同化应用已经开展了一些研究(王洪等, 2015; 张少婷等, 2019),但相比国外仍有较大差距。此外,上述对城市化影响的研究工作少有借助资料同化来提升模式对于暴雨过程的模拟能力,这并不能很准确地认识城市化影响的机理。

综合前述研究可知,城市下垫面影响强降水落区与强度过程的认识依然很有限。在经济社会迅速发展、城市急剧扩张的当前,城市下垫面如何影响大气热动力、不稳定以及水汽输送过程,从而对局地极端降水的形成过程与作用机理产生影响,这些问题仍然有待研究。此外,关于多普勒雷达资料在 GSI 中的同化应用和研究在我国较少,如何有效同化高时空分辨率的观测资料来改善模式对发生在城市区域的极端灾害性天气或高影响天气的精细化预报,进而更好地认识城市化影响的机理,仍有很多科学

问题值得探讨。因此,本文以 2020 年 5 月 22 日发生在粤港澳大湾区的一次局地极端强降水过程为例,基于 GSI 进行雷达同化更新初始场的云水信息,采用同化后的分析场对该次过程开展高分辨率的数值模拟试验,以提升对城市群发生局地极端强降水区域的模拟效果。在此基础上开展敏感性试验,分析研究大湾区城市群下垫面对此次极端强降水的落区与强度的影响过程与机理。

1 资料来源及试验方案设计

文中使用的数据资料可分为:(1)ECMWF 提供的水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、垂直层数为 37 层、时间分辨率为 1 h 的 ERA5 再分析资料,主要用于大尺度环流形势分析及驱动模式的背景场;(2)SA 波段多普勒雷达基数据(包括广州、深圳、韶关、汕尾、肇庆、河源等 6 个站)用于模式资料同化;(3)地面和高空的常规与非常规观测资料,主要包括中国区域自动站地面逐小时降水资料和地面逐 5 min 观测资料,用于个例介绍和模拟结果的验证。

本文基于 WRF-ARW (Advanced Research WRF)4.1.1 版本的中尺度数值预报模式,采用水平分辨率为 3 km 和 1 km 的嵌套网格方案(图 1),垂直层数为 51 层,模式层顶气压为 50 hPa。在经过多组参数化方案交叉组合试验后选取模拟效果最好的一组:云微物理方案选用 Ferrier(new Eta)方案;长、短波辐射方案均采用 GFDL(Eta)方案;近地面方案为 Monin-Obukhov(Janjic Eta)方案;陆面过程方案采用 Noah land-surface model 方案并耦合单层城市冠层模式(slab UCM);边界层方案为 Mellor-Yamada-Janjic(Eta) TKE 方案。地表数据由 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)土地利用资料提供。模式初始场和边界场均选用 ERA5 再分析资料,侧边界条件时间间隔为 1 h。

试验首先借助 WRF-ARW 直接由 ERA5 再分析资料动力降尺度生成初始场,然后利用俄克拉何马大学的风暴分析预报中心(CAPS)开发的自动化雷达前处理程序 88D2ARPS 对雷达基数据进行质量控制,并改进输出接口使之适用于 GSI,最后将预处理好的雷达资料接入 GSI,通过三维变分方法更新模式的三维大气初始场,2020 年 5 月 21 日 08 时(北京时,下同)启动模拟,预报未来 24 h 降水。为便于叙述,该同化和预报试验下文简称为 CNTL

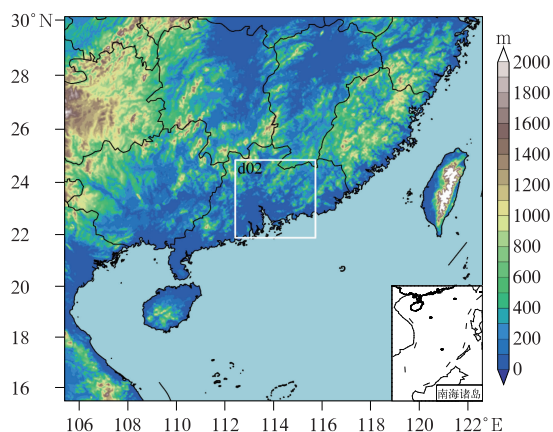


图 1 模式嵌套区域设置及地形高度(填色)

Fig. 1 Model nested domain configurations and terrain height (colored)

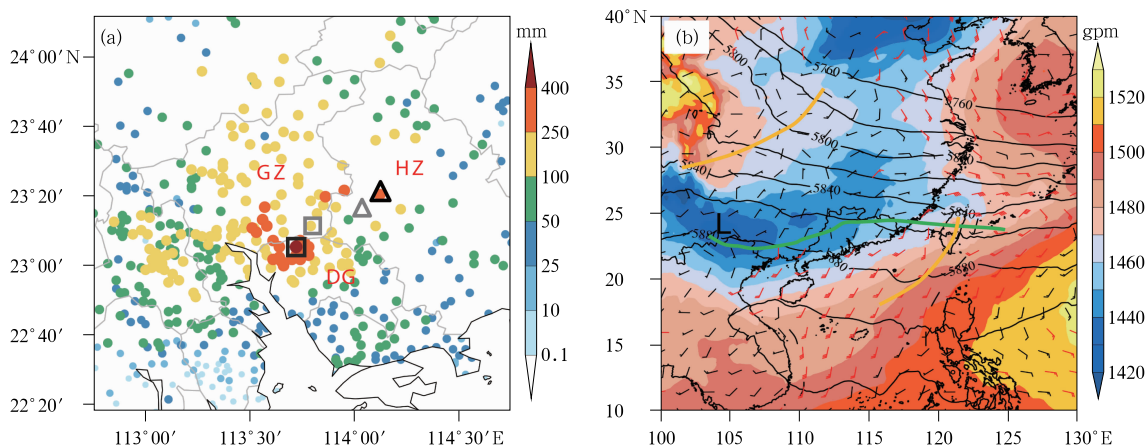


图 2 2020 年 5 月 (a) 21 日 08 时至 22 日 08 时累计 24 h 降水量分布(彩色点), (b) 21 日 19 时 500 hPa 位势高度(黑色等值线, 单位: gpm)、850 hPa 位势高度(填色)、925 hPa 水平风场(风羽)

(图 2a 中, “GZ”“DG”“HZ”分别代表广州、东莞、惠州市, 黑色方框和三角分别代表

图 4 中观测选取的东莞东城站和惠州博罗站的站点位置, 灰色方框和三角分别代表模拟选取的东城站和博罗站附近的格点位置; 图 2b 中, 红色风向标表示风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 黄线代表槽线, 绿线代表切变线, “L”代表低压中心位置)

Fig. 2 (a) Distribution of the 24 h accumulated rainfall (colored dot) from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 May,

(b) geopotential height at 500 hPa (black contour, unit: gpm) and 850 hPa (colored) superimposed with horizontal wind barbs at 925 hPa (red barb $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 19:00 BT 21 May 2020

(In Fig. 2a, GZ: Guangzhou City, DG: Dongguan City, HZ: Huizhou City; black box and triangle respectively represent the selected Dongcheng Station and Buoluo Station, while grey box and triangle respectively represent the simulated grid locations near the two stations in Fig. 4. In Fig. 2b, black “L” marks the low pressure zone, yellow line indicates a trough at 500 hPa, and green line indicates a shear line at 925 hPa)

大暴雨(24 h 降水量 $\geq 250 \text{ mm}$)主要出现在广州、东莞和惠州等地(图 2a), 最大日降水量达到了 402 mm。短时降水具有一定的极端性, 共有 36 个区域自动站的小时降水超过 100 mm, 广州黄埔区黄埔大桥小时降水达 167.8 mm, 东莞东城录得最大 3 h 雨量 351 mm, 刷新了东莞当地历史最高纪录。整体而言, 此次降水过程具有短时降水强、大暴雨范围广、累计降水量大等特点, 造成了广州、东莞

试验。为验证雷达同化的效果, 本研究开展了一组未同化雷达反射率和径向风资料的试验(以下简称 NO_RADAR 试验)。为量化分析大湾区城市群对降水的影响, 再设计一组剔除城市群下垫面的敏感性试验(以下简称 NO_URBAN 试验), 试验中模式的初始场来自于 21 日 08 时 CNTL 试验的同化分析场, 但将大湾区城市下垫面指数更换为农田, 其余设置与 CNTL 试验完全相同。

2 个例过程介绍与大尺度环流背景

2020 年 5 月 21—22 日粤港澳大湾区出现了一次暴雨到大暴雨、局地特大暴雨的降水过程, 其中特

等地严重的内涝灾害。

图 2b 为该次极端降水过程的天气尺度环流背景, 分析发现, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)位置偏西偏北, 大湾区处在副高边缘, 同时副高北侧呈现为阶梯槽、多波动的形势, 850 hPa 大湾区位于低槽的南缘, 为局地强降水的发生提供天气尺度扰动。台湾海峡—南海东北部短波槽后部低层(925 hPa)有明显的低涡切变线活动, 同时切变线南

侧有来自南海的低空偏南风急流($\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)提供大量的暖湿水汽输送。可见,此次过程有明显的天气尺度强迫作用,低涡切变线提供较好的动力抬升条件,偏南急流提供了良好的水汽输送条件,同时有利于构建不稳定层结。

3 模拟结果的对比分析

3.1 雷达同化结果对比

与观测(图 3a)对比发现,NO_RADAR 试验对 250 mm 以上特大暴雨的模拟落区偏东,形态分布狭长,且 300 mm 以上降水中心较为分散(图 3b);而 CNTL 试验在珠江口附近降水的空间分布和强度与观测较为一致(图 3c),相比未进行雷达资料同化有显著改善,对大暴雨以上($\geq 100 \text{ mm}$)的落区形态与位置体现最为明显。为客观地对比不同模拟试验的降水预报结果,采用 TS 评分以及 Bias 评分开展进一步评估(图略),结果发现同化了雷达反射率

和径向风资料的 CNTL 试验对不同量级降水的模拟效果均有提升,尤其对 250 mm 以上量级的降水模拟效果提升最为显著,这为本研究接下来的城市化敏感性试验提供了更为准确的模式初始场,进而开展城市化对极端强降水影响过程的机理研究奠定基础。

3.2 CNTL 试验模式验证

为进一步验证 CNTL 试验在更短的时间尺度、更小的空间范围内的模拟效果,图 4 选取了东莞东城站与偏东区域的惠州博罗站(图 2a 黑色方框和三角形)。比较两站观测与模拟的逐小时降水量演变(图 2a 灰色方框和三角形),分析发现:模拟的逐小时演变趋势、雨强峰值与观测非常接近,这种波动变化较观测整体提前了 3 h 左右。模拟时降水中心在空间上的小幅度位置偏差、降水时段的略微提前或者滞后通常是可以接受的(Du et al, 2020; Yin et al, 2020),这可能与模式的初始条件误差和物理参数化方案的选取有关。此外从降水峰值强度来

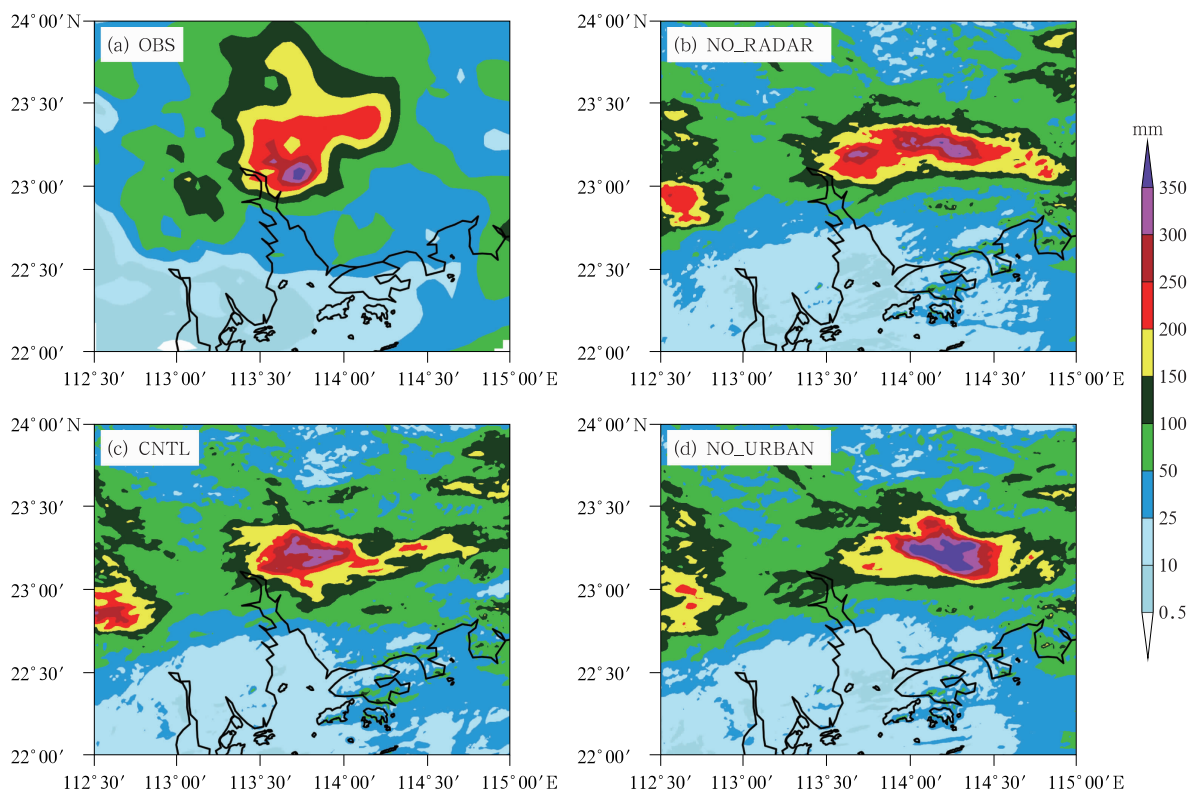


图 3 2020 年 5 月 21 日 08 时至 22 日 08 时累计 24 h 降水量分布
(a) 观测实况(OBS), (b) 未同化雷达反射率和径向风试验(NO_RADAR),
(c) 对照试验(CNTL), (d) 剔除城市群下垫面的敏感性试验(NO_URBAN)

Fig. 3 Distribution of the 24 h accumulated precipitation from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 May 2020
(a) observation (OBS), (b) experiment without assimilating radar reflectivity and radial wind data (NO_RADAR), (c) control experiment (CNTL), (d) sensitivity experiment of removing the urban agglomeration underlying surface (NO_URBAN)

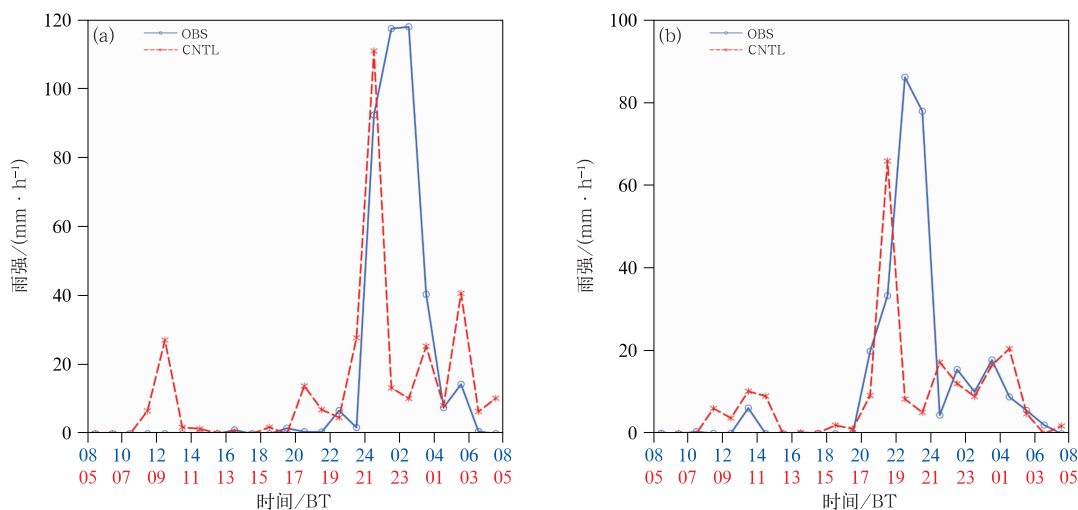


图 4 2020 年 5 月 21 日 08 时至 22 日 08 时 (a) 东莞东城站、(b) 惠州博罗站的观测实况和 CNTL 试验模拟的逐小时雨强

(观测站点和模拟格点的位置见图 2a; 横坐标中蓝色为实况时间, 红色为模拟时间)

Fig. 4 Time series of the observed and simulated hourly rainfall intensities at (a) Dongcheng Station in Dongguan City and (b) Buoluo Station in Huizhou City from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 May 2020

(See Fig. 2a for sites' locations; blue axis and red axis respectively represent the time axis of observation and simulation)

看, 模拟的东城、博罗站的最大小时雨强与观测量级也相当。

中尺度对流系统组织及演变过程会直接影响降水的落区、强度和持续时间。根据前述将模拟的逐小时雨量滞后 3 h 后与实况小时雨量对应较好, 因此对流单体演变的模拟结果也应提前了 3 h。从实况来看(图 5a₁, 5b₁, 5c₁), 造成广州、东莞的块状对流系统大致呈西北—东南走向分布, 22 日 00—02 时向南偏西方向移动并缓慢靠近珠江口, 呈现出准静止状态, 最大反射率强度为 55~60 dBz, 造成了持续数小时的强降水。 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极端短时强降水随对流系统缓慢地向南偏西方向移动, 且其中心的降水强度维持在 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上, 具有极高的降水效率。CNTL 试验(图 5a₂, 5b₂, 5c₂)尽管对周边地区零散对流回波的模拟效果一般, 但成功模拟出了造成广州、东莞强降水的对流系统, 无论是对其位置、强度、准静止特征还是移动方向等均有较好的再现效果。而对于 NO_URBAN 试验(图 5a₃, 5b₃, 5c₃), 21—23 时强对流系统却向东偏南方向移动并远离珠江口, 且小时雨强明显高于 CNTL 试验, 尤其是在 23 时, 中心降水强度达到 $110 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上。由此可见, 在去除了大湾区城市群下垫面后雷达回波以及降水的强度、空间分布等都发生了

显著变化。

总体而言, CNTL 试验不仅较好地模拟了此次过程的降水中心的强度和落区, 也成功模拟了造成局地极端强降水的对流系统的发展演变过程。下文将利用 CNTL 试验的分析场作为敏感性试验的初始场, 分析城市群下垫面对局地极端强降水的影响。

4 城市下垫面对局地极端强降水的影响

在 CNTL 试验基础上, 进行的 NO_URBAN 试验发现(图 3d), 把大湾区城市群下垫面替换为农田后, 降水落区整体向东偏移了 0.5 个经度(约为 50 km), 强降水中心分布形态亦发生改变, NO_URBAN 试验的强降水中心平均累计降水量为 214 mm, 较 CNTL 试验的中心平均累计降水量(183 mm), 增加了 17% 左右。

为何城市群下垫面的存在会造成强降水中心向西偏移(集中在城市群内)、强度减弱? 城市群下垫面是如何影响或改变对流发生发展的中尺度环境条件的呢? 以下基于 CNTL 试验与 NO_URBAN 试验的模拟结果, 重点从动力、热力、不稳定与水汽等多种角度开展分析研究。

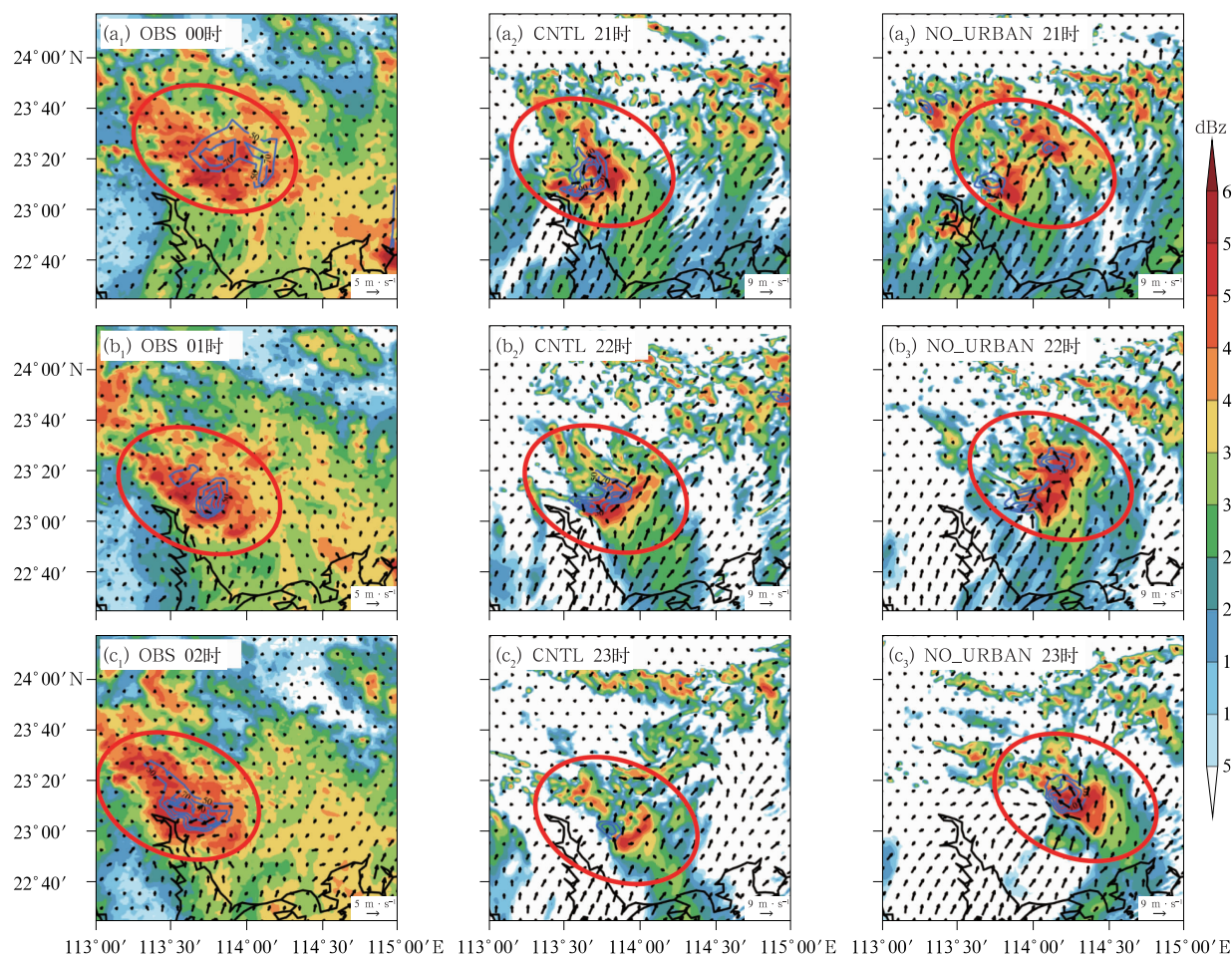


图 5 2020 年 5 月 22 日 (a₁) 00 时, (b₁) 01 时, (c₁) 02 时大湾区及周边 6 部 SA 雷达组合反射率(填色)、小时降水量(蓝色等值线, 单位: mm)、10 m 风场(风矢)观测, 及 (a₂, b₂, c₂) CNTL 和 (a₃, b₃, c₃) NO_URBAN 试验的 21 日 (a₂, a₃) 21 时, (b₂, b₃) 22 时, (c₂, c₃) 23 时模拟结果 (红圈表示主要的对流系统)

Fig. 5 Horizontal maps of the (a₁, b₁, c₁) observation, (a₂, b₂, c₂) CNTL experiment and (a₃, b₃, c₃) NO_URBAN experiment composite radar reflectivity (colored), hourly rainfall (blue contour, unit: mm) and surface ($z=10$ m) horizontal wind (vector) during the convection developing stages from 00:00 BT to 02:00 BT 22 May 2020 (The red circle indicates the major convective systems)

4.1 边界层的摩擦耗散作用

相比于农田等其他下垫面, 城市下垫面由于其冠层的存在, 对边界层气流具有更强的摩擦耗散作用 (Thielen et al, 2000; 寿亦萱和张大林, 2012; 梁钊明等, 2013)。如图 6 所示, 在对流触发前, 珠江口周边地区的近地层 (975 hPa) 盛行西南风, 有利于暖湿空气输送至广州、东莞附近。进一步对比 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验在强降水发生前的水平风场可以发现, 下垫面以农田替换掉城市后, 珠江口附近陆地上 975 hPa 西南风速有明显的增幅, 尤其体现在珠江口人字形海岸线东侧 (图 6c₁, 6c₂ 黄色方

框内)。为量化分析该区域城市下垫面摩擦耗散的动力作用影响的垂直厚度, 本文还对比了两组试验在不同高度层的风速差异 (图略), 结果发现, 城市冠层的存在分别使得 950 hPa 和 900 hPa 珠江口东侧的区域平均风速减小约 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 而到了更高层的 800 hPa, 两类试验区域平均风速的逐小时变化曲线几乎重合。因此, 粗糙的城市下垫面对城市区域近地层的风场形成摩擦耗散, 这样的动力作用可影响至 800 hPa 附近, 且越接近地面, 这种动力作用越明显。

结合区域平均垂直速度的逐小时演变还发现 (图 7a, 7b), CNTL 试验在 21 日 20—23 时这段时

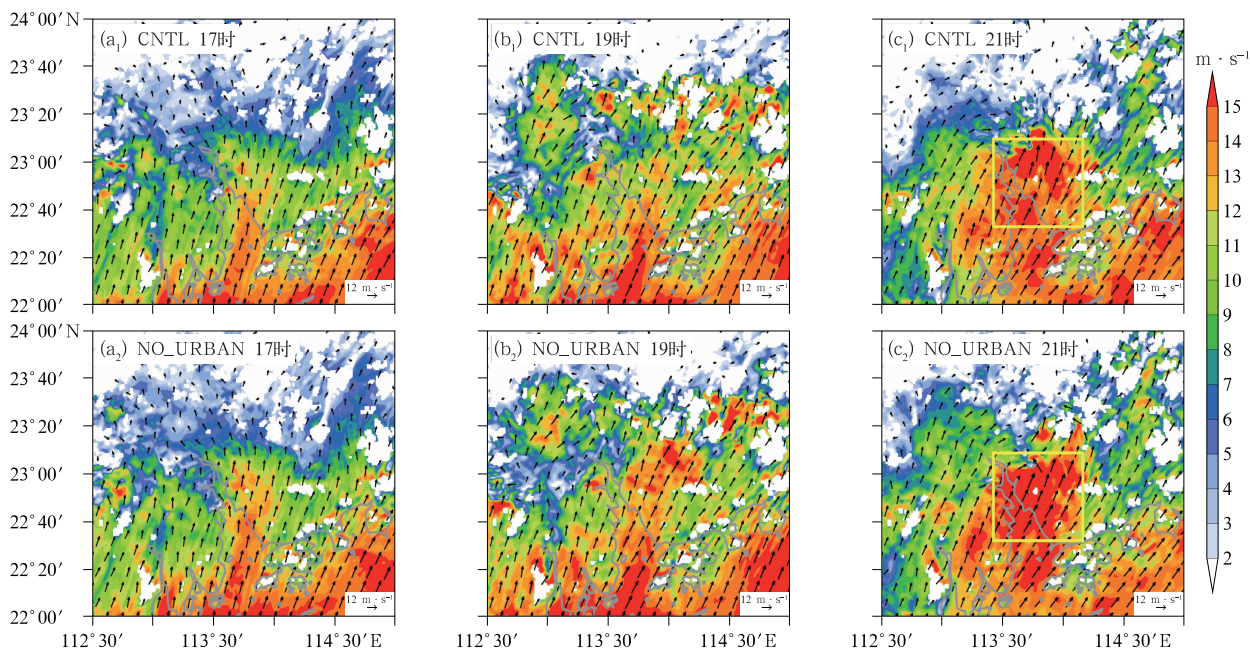


图 6 2020 年 5 月 21 日 (a₁, a₂) 17 时, (b₁, b₂) 19 时, (c₁, c₂) 21 时 (a₁, b₁, c₁) CNTL 试验和 (a₂, b₂, c₂) NO_URBAN 试验的 975 hPa 风速(填色)、风向(风矢)水平分布 (黄色方框代表图 7 和图 8 选定区域)

Fig. 6 Horizontal distribution of wind speed (colored) and direction (wind vector) at 975 hPa from the numerical simulation at (a₁, a₂) 17:00 BT, (b₁, b₂) 19:00 BT and (c₁, c₂) 21:00 BT 21 May 2020 (a₁, b₁, c₁) CNTL experiment, (a₂, b₂, c₂) NO_URBAN experiment (Yellow box represents the selected areas in Fig. 7 and Fig. 8)

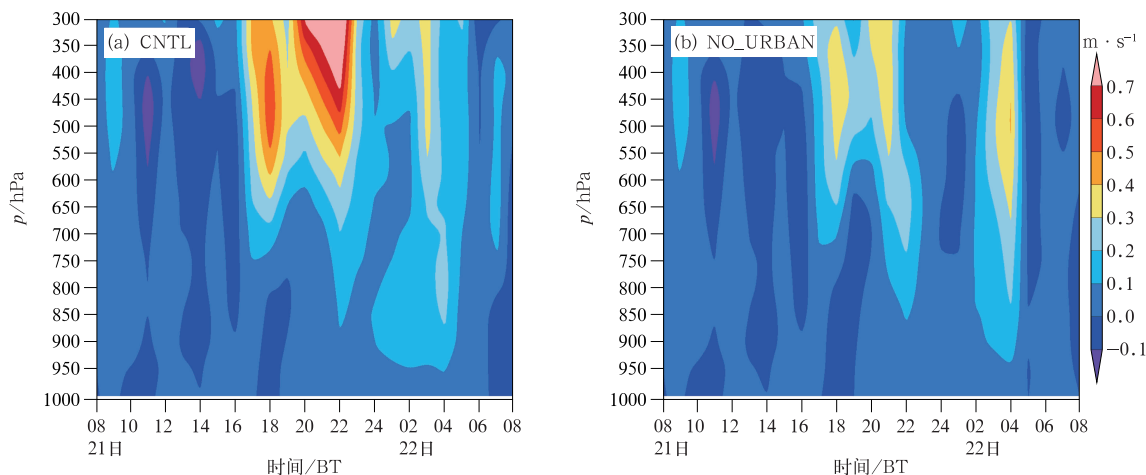


图 7 2020 年 5 月 21 日 08 时至 22 日 08 时 (a) CNTL 试验和 (b) NO_URBAN 试验选定区域平均垂直速度随时间变化 (选定区域如图 6 中黄色方框所示)

Fig. 7 Average vertical velocity of (a) CNTL experiment and (b) NO_URBAN experiment in the selected area changing with time from 08:00 BT 21 to 08:00 BT 22 May 2020 (The selected area is shown as yellow box in Fig. 6)

间内对流层中高层(600~300 hPa)的垂直速度较 NO_URBAN 试验有显著的增幅,而这正是 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验风速开始出现明显差异的时间段(图 6),表明因城市下垫面具有更强的摩擦耗散,造成了边界层更强的风速辐合,从而促使

CNTL 试验产生了比 NO_URBAN 试验更强的垂直上升运动,这也是 CNTL 试验强降水中心更偏于城市边缘靠内部一侧的原因之一。因此,若没有城市的摩擦耗散引发辐合,珠江口东侧的垂直上升速度减弱,不利于潮湿空气被抬升至自由对流高度以

上,抑制了城市区域对流发展。

4.2 城市下垫面增强边界层的热力与不稳定

陆面是影响大气环流的重要下垫面之一,陆面的感热和潜热是大气的重要源汇,其表面强的非均匀性可导致局地水分能量的不平衡,并进一步改变边界层的热动力结构,最终影响 MCS 的发生发展(Gao et al, 2021; 付超等, 2021)。诊断两组试验平均感热通量和潜热通量的日变化发现(图 8), 21 日 14 时至 22 日 04 时 CNTL 试验在城区的平均感热通量连续高于 NO_URBAN 试验,表明相较于农田下垫面,城市下垫面与大气之间发生的湍流热交换更强,热量由地表向上传输更加强烈,大气从城市下垫面汲取的热量更多,从而有利于近地面大气的增温。而潜热的释放主要与土壤中的蒸发和吸附过程有关,以往研究表明,向上的水汽通量主要来源于白天土壤水分的蒸发,总体上总蒸发大于吸附(Gao et al, 2021; Burns et al, 2018)。因此,由于强烈的蒸发过程,下垫面为农田的 NO_URBAN 试验在珠江口附近释放的潜热更多,造成地表温度较低;相比之下,城市地面蒸发、植被蒸腾作用较弱,导致在降水发生前其潜热通量远远小于农田下垫面。

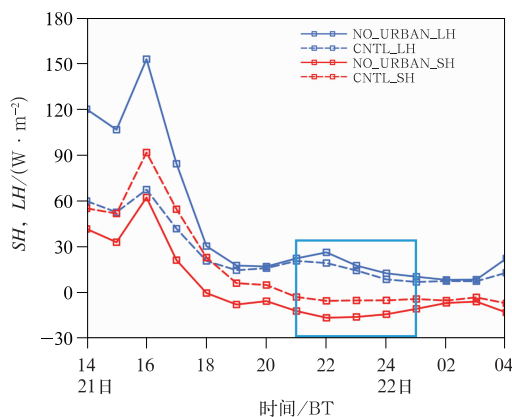


图 8 2020 年 5 月 21 日 14 时至 22 日 04 时 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验选定区域的平均感热(SH)和潜热(LH)通量(选定计算平均的区域如图 6 中黄色方框所示,蓝色方框代表强降水时段)

Fig. 8 Average sensible heat (SH) and latent heat (LH) fluxes in selected areas of CNTL experiment and NO_URBAN experiment from 14:00 BT 21 to 04:00 BT 22 May 2020 (Blue box represents heavy rainfall period, and the selected area is shown as yellow box in Fig. 6)

综上所述,在吸收相同太阳辐射的条件下,城市下垫面增温显著快于农田性质下垫面,结合上述感热和潜热通量的分析结果,在降水发生前,强降水中心附近的地面温度更高,通过感热与潜热过程增强了城市区域与周边地区(农田)的温度梯度,产生明显的热岛效应,而更强的地面热通量有利于增强大气层结的不稳定性(下文讨论),进而使得垂直运动加强,最终触发了对流发展,是该次强降水集中在城市区域的可能原因之一。

大气层结稳定度是影响中尺度对流系统发展与降水强度的关键因素之一,而城市下垫面对边界层大气稳定度与近地面暖湿的分布特征又有什么影响呢? 图 9a₁, 9b₁, 9c₁ 具体分析了强对流触发前不同时刻 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验 975 hPa 的 θ_{se} 差值($\Delta\theta_{se975}$; 差值指 CNTL 试验减 NO_URBAN 试验,下同),可以发现,城市化的影响使得城区近地面的 θ_{se} 增强,且 $\Delta\theta_{se975}$ 大值区分布与城市土地的分布较为一致,尤其是在人字形海岸线沿岸的东侧城区增幅最为显著。而在去除了城市冠层后, θ_{se} 大值区向东偏移约 0.3 个经度,变化前后分别与 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验的强降水中心较好地重合。目前业务预报中常用 850 hPa 与 500 hPa 的 θ_{se} 差值($\Delta\theta_{se850-500}$)来诊断当前大气的对流稳定度,但这并不能很好地反映城市化的影响,应当对大气边界层的 975 hPa 与 850 hPa 的 θ_{se} 差值($\Delta\theta_{se975-850}$)予以关注(付超等, 2021)。从两组试验 $\Delta\theta_{se975-850}$ 差值的时间演变分析(图 9a₂, 9b₂, 9c₂),也可发现在城市化上空尤其是珠江口东侧的 $\Delta\theta_{se975-850}$ 明显高于 NO_URBAN 试验,说明城市化确实会使得上空大气边界层具备更强的对流不稳定性,这是 CNTL 试验短时强降水持续时间长、对流性更显著的原因之一。在更改为农田下垫面后, $\Delta\theta_{se975-850}$ 大值区同样向东偏移,与近地面 θ_{se} 演变类似,考虑到其上游边界层的 θ_{se} 和 $\Delta\theta_{se975-850}$ 在剔除城市下垫面后均有显著降低,因此向东的不稳定度增加可能是由于上游的暖湿空气和不稳定能量输送至下游所致。

为进一步分析城市化的热力强迫对垂直方向上大气层结稳定度分布特征的影响,对 22.7°~23.7°N 作经向平均,诊断降水前两类试验 θ_{se} 纬向-垂直剖面可以发现,城市下垫面提高了 900 hPa 以下的 θ_{se} (图 10a, 10b 红色方框内),表明城市大气边界层内具有更好的暖湿条件,也就是说,若没有城市下垫面的作用,大气层结将呈现较稳定的状态,这可能不利

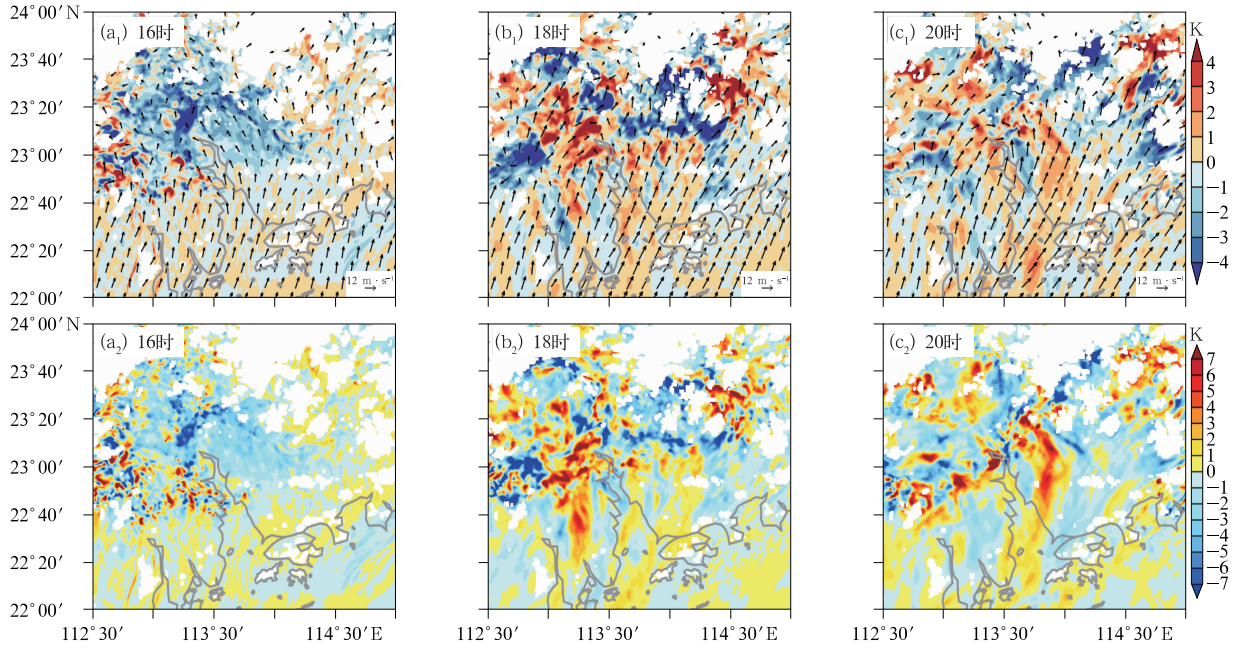


图 9 2020 年 5 月 21 日 (a₁, a₂) 16 时, (b₁, b₂) 18 时, (c₁, c₂) 20 时 (a₁, b₁, c₁) CNTL 试验和 NO_URBAN 试验的 $\Delta\theta_{se975}$ 差值(填色), CNTL 试验的水平风场(风矢), (a₂, b₂, c₂) $\Delta\theta_{se975-850}$ 差值(填色)
(白色填充部分表示地形)

Fig. 9 (a₁, b₁, c₁) $\Delta\theta_{se975}$ of CNTL and NO_URBAN experiments (colored) superimposed with horizontal wind vector of CNTL experiment, (a₂, b₂, c₂) $\Delta\theta_{se975-850}$ (colored) at (a₁, a₂) 16:00 BT, (b₁, b₂) 18:00 BT, (c₁, c₂) 20:00 BT 21 May 2020 (White shading denotes terrain)

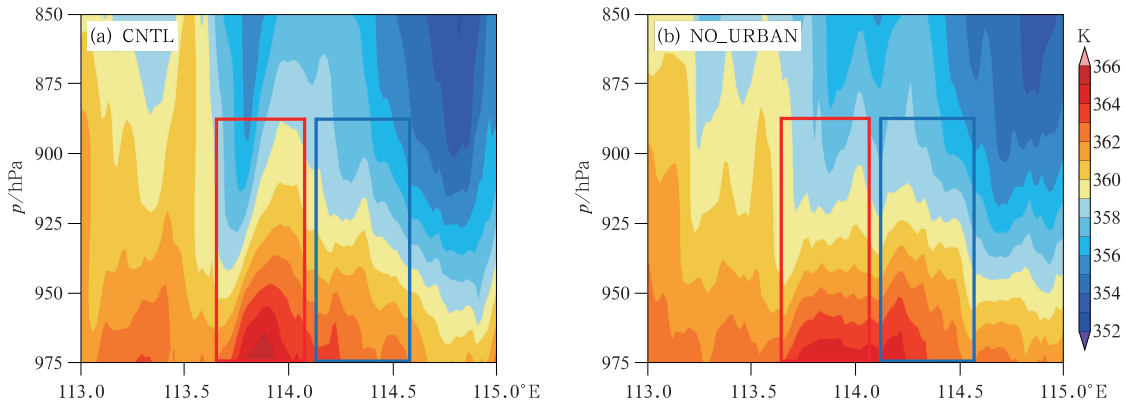


图 10 2020 年 5 月 21 日 20 时 (a) CNTL 试验和 (b) NO_URBAN 试验 22.7°~23.7°N 平均的 θ_{se} 经度-高度垂直剖面
(红框、蓝框分别表示 CNTL 试验、NO_URBAN 试验的降水中心)

Fig. 10 Longitude-height θ_{se} profiles of (a) CNTL experiment, (b) NO_URBAN experiment at 20:00 BT 21 May 2020 (The red and blue boxes respectively represent the precipitation center of CNTL experiment and NO_URBAN experiment, latitude is 22.7°–23.7°N average)

于强对流天气的发生发展;而对于城市区域东部边缘,在剔除了城市下垫面后,900 hPa 以下的 θ_{se} 则有明显的上升(图 10a, 10b 蓝色方框内),结合 4.1 小节中讨论的结果,城市下垫面对大气摩擦耗散的动力作用能显著影响至 900 hPa 附近,可进一步推断主要原因是城市下垫面改变后,近地面的暖湿西南风受到的摩擦作用降低,将更多的暖湿空气输送到

原来城市区域的东侧,形成堆积,解释了 NO_URBAN 试验中降水落区较 CNTL 试验向东偏移的原因。

4.3 城市摩擦对边界层水汽的截留与堆积

持续充沛的水汽被输送至对流系统内部有助于产生大量降水。图 11 展示了 21 日 17 时和 19 时

950 hPa 上 NO_URBAN 试验与 CNTL 试验的水汽混合比差值,分析发现在强降水发生前,城市区域下风方向水汽混合比差值为负,尤其是在 19 时,该区域 NO_URBAN 试验较 CNTL 试验的水汽混合比高 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上(图 11b),说明在缺乏城市冠层的摩擦耗散条件下,水汽无法截留在城市,反而在城市下风方区域、大湾区东北部的低矮丘陵山前位置堆积了更多湿空气,为随后该区域产生强降水提供了条件。

图 12 对比了对流初始时刻不同降水中心位置的垂直剖面图,以了解两组试验三维水凝物分布特征上的差异。可以发现,尽管两组试验在低层水汽输送量级相当,但 CNTL 试验由于城市冠层的摩擦耗散,一方面使得水汽通量大值区($>34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及低层相当位温高值区更集中在城区,进而有利于强降水中心落区更为集中,另一方面,城市群的阻挡加强了城区部分水汽的垂直输送,因而输送到下游地区的水汽减少,利于强降水过程发生在城区内(图 12a,12b);而对比图 12c 和 12d 发现,对于城市区域东部边缘(NO_URBAN 降水中心附近),可以明显看到 NO_URBAN 试验整体的近地面水汽通量更大,且由于地面摩擦减小,使得降水中心南侧 1 km 高度以下的风速整体更强,造成近地面层的水汽输送更明显,有助于强降水的产生。另外,由于强的水汽输送受到了 23.24°N 附近的低矮

地形(海拔高度约为 1 km)的抬升,该区域的垂直速度较 CNTL 试验更加显著(如图 12d 蓝色箭头所示),且垂直上升运动以及假相当位温的垂直梯度变化均要强于 CNTL 试验,使得降水强度有所增强,即局地地形增强了 NO_URBAN 试验降雨,这与 Yin et al(2020)对 2017 年广州“5·7”极端强降水事件的分析结果类似。

为进一步了解与低层水汽局地变化相关的过程,应用式(1)的水汽收支方程计算 NO_URBAN 试验强降水中心附近区域 D2 及其上风方向区域 D1(位置如图 11b 所示)的低层(950 hPa 附近)水汽来源,从而定量判别城市动力作用对局地水汽的影响(Wu et al,2021;Du et al,2020)。

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla_h q_v - w \frac{\partial q_v}{\partial z} + F_y \quad (1)$$

式中: $\partial q_v / \partial t$ 代表水汽 q_v 的局地变化,而 $-\mathbf{V} \cdot \nabla_h q_v$ 和 $-w(\partial q_v / \partial z)$ 分别为水平平流和垂直输送项, F_y 代表剩余项。需要注意的是,方程最右边的剩余项包括边界层次网格混合(垂直端流混合)的贡献、非绝热(凝结/蒸发)效应以及平衡方程的计算误差。

D1 区域位于 NO_URBAN 强降水中心的上游,对于 CNTL 试验,在对流初始时刻(CI)之前水汽基本呈现稳定的增长趋势,但并没有观测到明显且持续的低层上升气流(图 13a),剩余项也有正有

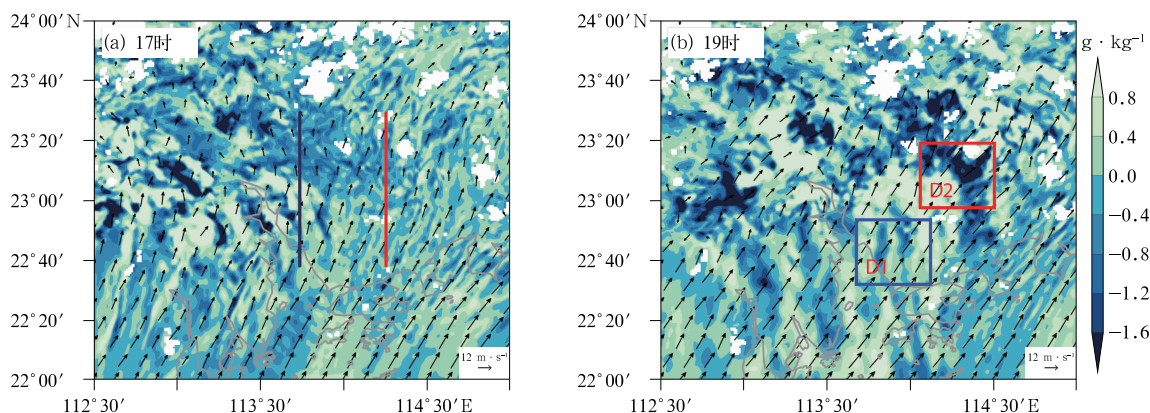


图 11 2020 年 5 月 21 日(a)17 时和(b)19 时 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验的 950 hPa 水汽混合比差值水平分布(填色)及 CNTL 试验水平风场(风矢)

(白色填充部分表示地形,图 11a 中的蓝色、红色实线代表图 12 中垂直剖线的位置,

图 11b 中的 D1 和 D2 区域用于图 13 中水汽收支分析)

Fig. 11 The difference of water vapor mixing ratio (colored) in CNTL and NO_URBAN experiments superimposed with horizontal wind vector of CNTL experiment at 950 hPa at (a) 17:00 BT; (b) 19:00 BT 21 May 2020

(White shadings denote terrain, the blue and red lines represent the cross-section in Fig. 12,

D1 and D2 in Fig. 11b are used for budget analyses of water vapor in Fig. 13)

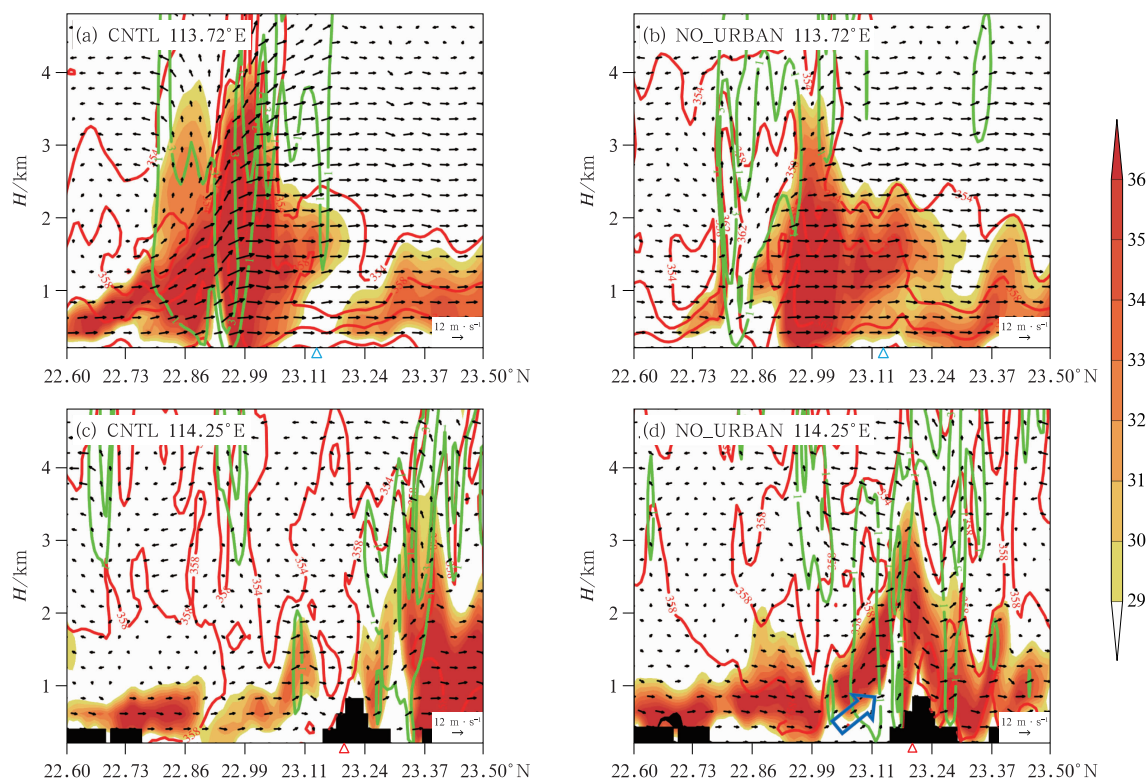


图 12 2020 年 5 月 21 日 20 时(a,c)CNTL 试验,(b,d)NO_URBAN 试验(a,b)沿 113.72°E(图 11a 蓝线,即穿过 CNTL 试验降水中心),(c,d)沿 114.25°E(图 11a 红线,即穿过 NO_URBAN 试验降水中心)的水汽通量(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、相当位温(红色等值线,单位:K)、垂直速度(绿色等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和风场(风矢,经向风与垂直速度的合成)(黑色阴影表示地形,底部的蓝色和红色三角形分别表示 CNTL 试验和 NO_URBAN 试验降水中心位置)

Fig. 12 Vertical cross-section along (a, b) 113.72°E (blue line in Fig. 11a, through the precipitation center of CNTL) and (c, d) 114.25°E (red line in Fig. 11a, through the precipitation center of NO_URBAN) of water vapor flux (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), equivalent potential temperature (red contour, unit: K), vertical velocity (green contour, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind field (vector) in (a, c) CNTL experiment and (b, d) NO_URBAN experiment at 20:00 BT 21 May 2020 (Black shading denotes terrain, the blue and red triangles at the bottom represent precipitation center locations of CNTL and NO_URBAN experiments, respectively)

负,因此垂直输送和剩余项可以忽略不计,水汽的主要来源为水平平流项,尤其是在 19 时,水平输送的正贡献达到峰值。而在去除了城市群下垫面后,不同过程整体上没有发生太大变化,但水平输送的正贡献有所减弱(如图 13b,主要体现在 18—20 时),最终使得水汽含量相比于 CNTL 试验有所减少,这可能是由于减少了城市的摩擦耗散后增强了水汽向下风方向的水平平流输送,不利于边界层水汽在 D1 区域的堆积。对于 D2 区域,根据图 11 和图 12d 分析,除了水平平流外,垂直输送也是水汽增加的主要原因。在 CI 之前(15—18 时),对于 NO_URBAN 试验,D2 区域的水平平流在水汽输送中只占短暂的

主导地位,之后对水汽的增加有负贡献。而到了 CI 发生时刻附近,即 19—21 时期间,水汽的垂直输送又占据主导地位,且稍强于 CNTL 试验(图 13c, 13d),因此明显是在强的水平输送的前提下,受到了 D2 附近的复杂地形的抬升,最终导致了 D2 区域上 950 hPa 水汽的增加,进而有助于强降水的发生。

因此,结合前述动力、热力与不稳定原因,剔除城市下垫面后,城区东部边缘地区具备了更好的热力、水汽与不稳定条件,并同时受到局地地形的抬升,加剧了局地垂直上升运动,因而产生了比 CNTL 试验量级更大的降水。

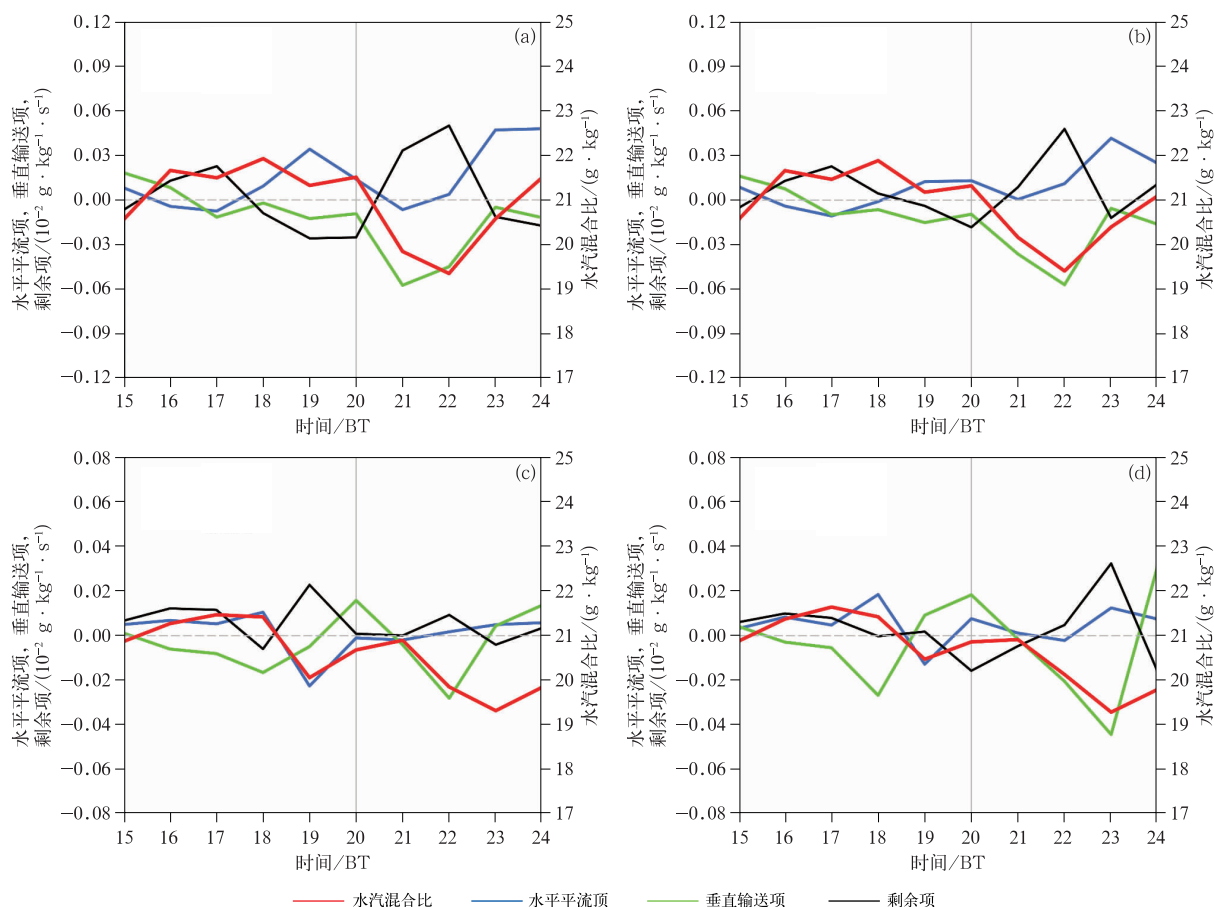


图 13 2020 年 5 月 21 日 15—24 时 (a,c)CNTL 试验, (b,d)NO_URBAN 试验在 (a,b)D1 区域, (c,d)D2 区域的 950 hPa 平均水汽混合比、水平平流项、垂直输送项、余项的时间序列

[D1 和 D2 位置如图 11b 所示, 灰色垂直实线表示 CI, 灰色水平虚线表示式(1)右边项的贡献为零]

Fig. 13 Time series of hourly water vapor mixing ratio, horizontal advection, vertical advection and the residual terms of the water vapor Eq. 1 from (a, c) CNTL experiment and (b, d) NO_URBAN experiment in the regions of the D1 (a, b) and D2 (c, d) at 950 hPa from 15:00 BT to 24:00 BT 21 May 2020

(D1 and D2 are indicated as two rectangles in Fig. 11b, solid gray vertical line indicates the time of CI, and dashed gray horizontal line indicates zero contribution from the right-hand side terms of Eq. 1)

5 结论与讨论

本文首先利用中尺度数值预报模式 WRF-ARW4.1.1 及 GSI 同化系统对粤港澳大湾区“5·22”极端强降水过程进行了多普勒雷达资料同化及高分辨率数值模拟, 结果表明经过雷达同化的试验能够在一定程度上改善强降水的模拟效果, 尤其对 250 mm 以上的特大暴雨改善最为显著。雷达同化后的 CNTL 试验能够较好地模拟此次事件的降水强度和落区以及对流系统的产生和演变, 为敏感性试验(NO_URBAN 试验)提供了较为准确的模式初始场。基于 CNTL 试验与 NO_URBAN 试验的模拟结果, 探讨并解释了大湾区热岛效应、城市下垫面

的摩擦耗散作用以及局地地形等对局地极端降水影响的可能物理机制。初步得出以下结论:

(1)大湾区城市群下垫面作为局地“热源”, 通过增加城区感热通量和降低潜热通量的方式与大气进行能量交换进而提高边界层大气温度, 一方面产生明显的热岛效应, 另一方面更强的地表热力作用提高了近地面的 θ_{se} 及 $\Delta\theta_{se975-850}$ 。此外城市下垫面还有助于边界层形成更好的暖湿条件, 同时增强低层大气的对流不稳定性。城市区域的边界层热力与不稳定的大气结构有利于对流的触发与发展。

(2)CNTL 试验与 NO_URBAN 试验协同表明, 相较于农田下垫面, 城市下垫面冠层可造成显著的大气摩擦耗散作用, 其影响高度在 800 hPa 以下的大气边界层均有表现, 且越接近地面其影响越显

著。这种摩擦耗散的动力作用直接引起了城市区域近地面西南风减弱,不仅能将更多的暖湿空气截留在城市区域内部,从动力角度还有利于垂直上升运动的产生。城市下垫面有助于大气具备更强的热力及不稳定条件,再配合城市下垫面造成的这种动力作用,使 CNTL 试验的强降水中心发生在城市区域边缘靠近内部一侧。

(3) NO_URBAN 试验中,降水落区较 CNTL 试验整体向东偏移约 50 km,强降水中心区域平均累计雨量增加了 17% 左右,这是由于缺少了城市冠层的摩擦耗散作用,原城市区域的边界层西南风显著增强,将更多的暖湿水汽与能量输送到城市下风方更远处,使得在边界层西南风的城市区域下游地区具备了比 CNTL 试验更好的对流环境与水汽辐合条件,导致降水落区产生偏移。两组试验的局地中尺度环境场条件的差异,与下垫面类型有着密切关系。此外,NO_URBAN 试验替换了城市下垫面,边界层弱的摩擦耗散作用造成了暖湿不稳定空气更多地被输送到城市区域的下游,并与大湾区边缘的地形发生相互作用,即受到小尺度低矮丘陵的强迫抬升,形成更强的垂直上升运动,最终造成了更强的降水。上述两点解释了 NO_URBAN 试验能产生具有比 CTNL 试验更强的降水、落区位置更偏向于城市区域下风方的可能原因。

本文通过两组模拟试验对比,从热动力、不稳定以及水汽输送等角度初步探讨了大湾区城市群下垫面对局地极端强降水的影响过程与机理,但对于不同天气背景和影响系统所造成的降水过程,城市下垫面的影响可能是多样化的,因此本研究的结论是否具有普适性,还需要选取更多不同类型的降水个例来进行更深入的佐证和研究。由于大湾区的迅速发展,模式自带的 MODIS 下垫面数据所覆盖的城市范围与实际相比应当有些许偏差,可能会造成城市效应的低估。此外,本文利用 GSI-3DVar 同化系统同化雷达资料时采用的是静态背景误差协方差矩阵,使得模式降水预报仍存在一定的空报和漏报,因此未来工作考虑以更高分辨率和精度的下垫面资料替换模式内部相应部分的数据,并进一步优化同化方案和算法,以提高敏感性试验的模拟效果以及分析结果的可信度。

参考文献

付超,湛芸,尹丝雨,等,2021. 鄱阳湖对降水强度减弱的物理过程的数值模拟研究[J]. 气象,47(1):24-35. Fu C, Chen Y, Yin S Y, et al, 2021. Numerical simulation of physical process of precipitation intensity weakening in Poyang Lake[J]. Meteor Mon, 47

(1):24-35(in Chinese).

- 李舒文,2018. 城市效应对华南暖区暴雨的影响[D]. 成都:成都信息工程大学. Li S W, 2018. On the influence of urbanization on warm-sector heavy rainfall over South China. Chengdu: Chengdu University of Information Technology(in Chinese).
- 李英华,刘丽丽,邱晓滨,等,2020. 天津城市环境对一次局地降水过程影响的模拟研究[J]. 气象,46(7):926-937. Li Y H, Liu L L, Qiu X B, et al, 2020. Simulation study of the impact of urban environment on a local precipitation process in Tianjin[J]. Meteor Mon, 46(7):926-937(in Chinese).
- 梁钊明,高守亭,王东海,等,2013. 城市下垫面对渤海湾海锋特征影响的一次数值试验[J]. 大气科学,37(5):1013-1024. Liang Z M, Gao S T, Wang D H, et al, 2013. A numerical study of the urban underlying surface effect on the characteristics of a sea breeze front in the Bohai Bay Region[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5):1013-1024(in Chinese).
- 刘振鑫,2014. 应用城市冠层模式与 WRF 模式耦合研究城市化效应[D]. 北京:北京大学. Liu Z X, 2014. Assessing the urbanization effects by applying an Urban Canopy Model and coupling it with Weather Research and Forecasting[D]. Beijing: Peking University(in Chinese).
- 蒙伟光,戴光丰,张艳霞,等,2012. 华南局地锋生及对流系统发展的模拟分析研究[J]. 气象学报,70(3):387-401. Meng W G, Dai G F, Zhang Y X, et al, 2012. Analysis and simulative study of the local frontogenesis and convection development over South China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):387-401(in Chinese).
- 寿亦萱,张大林,2012. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报,70(3):338-353. Shou Y X, Zhang D L, 2012. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):338-353(in Chinese).
- 王洪,王东海,万齐林,2015. 多普勒雷达资料同化在“7.21”北京特大暴雨个例中的应用[J]. 气象学报,73(4):679-696. Wang H, Wang D H, Wan Q L, 2015. Application of assimilating Doppler weather radar data in the “7.21” Beijing excessive storm[J]. Acta Meteor Sin, 73(4):679-696(in Chinese).
- 王晓峰,王平,张蕾,等,2017. 多源观测在快速更新同化系统中的敏感性试验[J]. 高原气象,36(1):148-161. Wang X F, Wang P, Zhang L, et al, 2017. Sensitivity analysis of multi-source observations in WRF-ADAS rapid refresh system[J]. Plateau Meteor, 36(1):148-161(in Chinese).
- 文秋实,王东海,2017. 基于 GSI 的华南地区对流尺度快速循环同化预报试验[J]. 气象,43(6):653-664. Wen Q S, Wang D H, 2017. Test of GSI-based rapid update cycle numerical prediction in southern China[J]. Meteor Mon, 43(6):653-664(in Chinese).
- 吴风波,汤剑平,2011. 城市化对 2008 年 8 月 25 日上海一次特大暴雨的影响[J]. 南京大学学报(自然科学版),47(1):71-81. Wu F B, Tang J P, 2011. The impact of urbanization on a heavy rainfall case in Shanghai on 25 August 2008[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 47(1):71-81(in Chinese).
- 徐蓉,苗峻峰,谈哲敏,2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 大气科学,37(6):1235-1246. Xu R, Miao J F, Tan Z M, 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing

- [J]. Chin J Atmos Sci, 37(6):1235-1246(in Chinese).
- 张少婷, 王东海, 于星, 等, 2019. 雷达和卫星资料同化在一次华南暴雨预报中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 58(5): 80-93. Zhang S T, Wang D H, Yu X, et al, 2019. Application of radar and satellite data assimilation in a rainstorm forecast in Southern China[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 58(5): 80-93 (in Chinese).
- 周林帆, 张述文, 李少英, 等, 2019. 城市下垫面对西安地区一次强降水的影响[J]. 高原气象, 38(4): 773-780. Zhou L F, Zhang S W, Li S Y, et al, 2019. Impacts of urban surface on a heavy rainfall in Xi'an[J]. Plateau Meteor, 38(4): 773-780(in Chinese).
- Bornstein R, Lin Q L, 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta; three case studies[J]. Atmos Environ, 34(3): 507-516.
- Burns S P, Swenson S C, Wieder W R, et al, 2018. A comparison of the diel cycle of modeled and measured latent heat flux during the warm season in a Colorado Subalpine Forest[J]. J Adv Model Earth Syst, 10(3): 617-651.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C, 2007. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(9): 1324-1340.
- Diem J E, Brown D P, 2003. Anthropogenic impacts on summer precipitation in Central Arizona, U. S. A.[J]. Profess Geogr, 55(3): 343-355.
- Du Y, Chen G X, Han B, et al, 2020. Convection initiation and growth at the coast of South China. Part I: effect of the marine boundary-layer jet[J]. Mon Wea Rev, 148(9): 3847-3869.
- Gao Z B, Zhu J S, Guo Y, et al, 2021. Impact of land surface processes on a record-breaking rainfall event on May 06 – 07, 2017, in Guangzhou, China[J]. J Geophys Res: Atmos, 126(5): e2020JD-032997.
- Guo X L, Fu D H, Wang J, 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City[J]. Atmos Res, 82(1/2): 112-126.
- Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, et al, 2013. Future flood losses in major coastal cities[J]. Nat Climate Change, 3(9): 802-806.
- Huang Y J, Liu Y B, Liu Y W, et al, 2019. Mechanisms for a record-breaking rainfall in the coastal metropolitan city of Guangzhou, China: observation analysis and nested very large eddy simulation with the WRF model[J]. J Geophys Res: Atmos, 124(3): 1370-1391.
- Inamura T, Izumi T, Matsuyama H, 2011. Diagnostic study of the effects of a large city on heavy rainfall as revealed by an ensemble simulation: a case study of central Tokyo, Japan[J]. J Appl Meteor Climatol, 50(3): 713-728.
- Lacke M C, Mote T L, Shepherd J M, 2009. Aerosols and associated precipitation patterns in Atlanta[J]. Atmos Environ, 43(28): 4359-4373.
- Li W B, Chen S, Chen G X, et al, 2011. Urbanization signatures in strong versus weak precipitation over the Pearl River Delta metropolitan regions of China[J]. Environ Res Lett, 6(3): 034020.
- Lin C, Chen W, Liu S, et al, 2008. Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan[J]. Atmos Environ, 42(13): 2934-2947.
- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China[J]. J Climate, 29(24): 8703-8719.
- Luo Y L, Xia R D, Chan J C L, 2020. Characteristics, physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: research progress during 2008–2019[J]. J Meteor Soc Japan, 98(1): 19-42.
- Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al, 2017. The southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(5): 999-1013.
- Matheson M A, Ashie Y, 2008. The effect of changes of urban surfaces on rainfall phenomenon as determined by a non-hydrostatic mesoscale mode[J]. J Meteor Soc Japan, 86(5): 733-751.
- Miao S G, Chen F, Li Q C, et al, 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: a case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006[J]. J Appl Meteor Climatol, 50(4): 806-825.
- Shepherd J M, Burian S J, 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city[J]. Earth Interact, 7(4): 1-17.
- Thielen J, Wobrock W, Gadian A, et al, 2000. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: a sensitivity study in 2D in the meso- γ scale[J]. Atmos Res, 54(1): 15-39.
- 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.
- Wu M W, Luo Y L, Chen F, et al, 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(8): 1799-1819.
- Wu Y L, Sun J Z, Ying Z M, et al, 2021. Effects of local-scale orography and urban heat island on the initiation of a record-breaking rainfall event[J]. J Geophys Res: Atmos, 126(16): e2021JD-034839.
- Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J Z, et al, 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case[J]. J Appl Meteor Climatol, 44(6): 768-788.
- Yang B, Zhang Y C, Qian Y, 2012. Simulation of urban climate with high-resolution WRF model: a case study in Nanjing, China[J]. Asia-Pac J Atmos Sci, 48(3): 227-241.
- Yin J F, Zhang D L, Luo Y L, et al, 2020. On the extreme rainfall event of 7 May 2017 over the coastal city of Guangzhou. Part I: impacts of urbanization and orography[J]. Mon Wea Rev, 148(3): 955-979.
- 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: Atmos, 114(D2): D02116.

(本文责编:戴洋)