

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.013

城市化对河南省极端降水空间分布的影响

刘家宏^{1,2}, 骆卓然^{1,2}, 张永祥², 周晋军², 邵薇薇¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要:针对城市化对极端降水空间分布的影响问题,利用城市冠层模型结合 WRF (weather research and forecasting) 中尺度天气预报模式对河南省 2021 年“7·20”特大暴雨进行数值模拟,并结合国家级地面观测站实测降水数据对该模型的模拟精度进行了验证。结果表明,考虑城市冠层影响的耦合模型能更好地模拟出区域极端降水的强度和落区,与实测降水的空间分布更为接近,耦合模拟得到的平均降水量比未考虑城市冠层影响的模拟结果高 12.1 mm;人工耗水改变了区域的水热耦合平衡,促进了城市区域对流性降水的形成。

关键词:城市化;极端降水;城市冠层模型;WRF 模式;绝对湿度;河南省

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0100-06

Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province// LIU Jiahong^{1,2}, LUO Zhuoran^{1,2}, ZHANG Yongxiang², ZHOU Jinjun², SHAO Weiwei¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100038, China; 2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the influence of urbanization on the spatial distribution of extreme precipitation, the urban canopy model combined with WRF (weather research and forecasting) mesoscale weather forecast model was used to simulate the “7·20” torrential rain in Henan Province in 2021. Combined with the measured precipitation data of national ground observation stations, the simulation accuracy of the model was verified. The results show that the coupling model considering the influence of urban canopy can better simulate the intensity and falling area of regional extreme precipitation, which is closer to the spatial distribution of measured precipitation. The average precipitation obtained by the coupling simulation is 12.1 mm higher than that without considering the influence of urban canopy. Artificial water consumption changes the regional water heat coupling balance and promotes the formation of convective precipitation in urban areas.

Key words: urbanization; extreme precipitation; urban canopy model; WRF model; absolute humidity; Henan Province

极端降水是诸多极端天气气候事件中,对人们生活影响最为直接和显著的危害之一^[1]。近年来由于受到全球气候变化和人类活动的影响,全球降水分布不均性明显增加,区域性极端降水呈现显著增多的态势^[2-3]。城市热岛现象、下垫面条件改变等因素都会对水汽蒸发、空气对流产生明显影响,从而影响到降水强度、频率和落区^[4-5]。城市化会使对流层气象活动增加,引起局部区域降水量增多,城市暴雨内涝问题愈发明显,对人民的生命、财产等构成了严重威胁^[6-10]。

国内外专家对城市地区降水进行了大量的模拟研究,但早期研究主要集中于城乡降水观测资料的对比分析。Chen 等^[11]基于 CMORPH 数据评估了珠江三角洲地区城市化对降水的影响,发现与周围农村地区相比,城区短历时暴雨频率显著增加,发生在下午时段的极端降水明显高于农村地区;Song 等^[12]利用 1950—2012 年的降水观测数据,对北京地区降水的时间趋势和空间分布进行分析,发现降水量显著减少,由于城市化的影响,城区的降水量略大于郊区。现阶段,数值模拟已被广泛应用于城市

基金项目:国家自然科学基金(51739011,51979285);流域水循环模拟与调控国家重点实验室自由探索项目(SK2022TS11);国家重点研发计划(2018YFC1508203)

作者简介:刘家宏(1977—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事城市水文水资源研究。E-mail: liujh@iwhr.com

化降水研究中^[13-14]。Thielen 等^[15]采用 γ 尺度数值模型分析了城市化对对流性降水影响的程度,发现城市表面潜热通量和粗糙度的增加会引起城市降水量的增加;侯爱中等^[16]采用单层城市冠层模型与 WRF(weather research and forecasting) 天气预报模式耦合来模拟北京市极端降水,发现城区的降水有增多的趋势。与有限的降水观测数据集相比,数值模拟可以提供具有更丰富空间分布信息,更有助于揭示降水的空间分布,并且从气象学入手,基于城市冠层模型的中尺度气象模拟,对城市的布局、形态进行量化研究,目前还是比较新的研究思路^[17]。

本研究基于城市冠层模型耦合 WRF 中尺度天气预报模式对河南省 2021 年“7·20”特大暴雨进行模拟,并对此次暴雨的特征、空间分布和成因进行系统分析,结合国家级地面观测站数据对 WRF 模式的模拟性能进行验证,通过对比有无城市冠层模型时降水空间分布的差异,探讨城市化对极端降水的影响,以期能够加深对城市化与极端降水内在关系的理解,在一定程度上提高应对极端降水事件的能力。

1 研究区概况与数据资料

1.1 研究区概况

河南省地处北纬 $31^{\circ}23' \sim 36^{\circ}22'$,东经 $110^{\circ}21' \sim 116^{\circ}39'$ 之间,全省总面积 16.7 万 km^2 ,2020 年常住人口为 9 937 万人,是全国重要的综合交通枢纽。如图 1 所示,河南省地势西高东低,北、西、南三面由太行山、伏牛山、桐柏山、大别山沿省界呈半环形分布,气候具有四季分明、雨热同期、复杂多样和气象灾害频繁的特点^[18]。

2021 年 7 月 17—22 日,河南省遭遇极端强降雨事件,强降雨中心主要分布在河南省西北部和中南部地区,郑州、焦作、新乡、洛阳、许昌、平顶山等多个城市出现特大暴雨,造成重大人员伤亡和财产损失。郑州市是本次特大暴雨过程中降水量最大、受灾最严重的地区之一,7 月 20 日 16—17 时的 1 h 内,郑州市降水量更是高达 201.9 mm ,创历史之最。

1.2 数据资料

模式运行所需的地形数据采用 MODIS_30s 下垫面数据(https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html);气象驱动数据采用国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)提供的再分析资料(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>),选择了其中时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的再分析数据。相比 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 和 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的再分析数据,该数据集精度更高,模拟结果更为可靠。

为了验证模型模拟的准确性,采用中国气象数据网的中国地面气象站逐小时观测资料对模拟结果进行验证(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。将位于地级市、市辖区、县级市(城镇化率较高的地区)的气象站点作为城市站点,位于县、自治县、乡镇(城镇化率较低的地区)的气象站点作为郊区站点。位于河南省内的国家级地面观测站共有 116 个,其中城区站共 35 个,郊区站共 81 个(图 1)。

2 模型设置

WRF 模式是目前比较先进、灵活的中尺度天气预报模式,具有易携带高效且可并行运算的特性。应用场景包括:理想化模拟、参数化研究、数据同化研究、预报研究、区域气候研究以及耦合模式应用等领域。WRF 模式主要由前处理、主程序、后处理 3 部分构成,模式包含了最新发展的一些物理过程参数化方案,如微物理、积云对流、辐射、陆面以及边界层等过程的参数化方案。

为了获取高分辨率的计算结果,模式采用三层嵌套方案来提升区域的分辨率^[19],如图 2 所示,D01、D02、D03 各层空间分辨率分别为 27 km 、 9 km 、 3 km ,对应的网格数分别为 160×160 、 184×184 、 229×220 ,根据河南省的经纬度范围确定模拟区域的中心点坐标为 $33^{\circ}53'N$, $113^{\circ}30'E$,垂直分层为 34 层,顶层气压设置为 50 hPa ,考虑城市冠层模型的稳定性及与 WRF 模式的耦合情况,本研究选用单层城市冠层模型^[20]。为了确保模式运行的稳定,积分时间步长设置为 135 s (最外层区域空间分辨率的 5 倍)。由于 WRF 模式中不同的参数化方案组合在

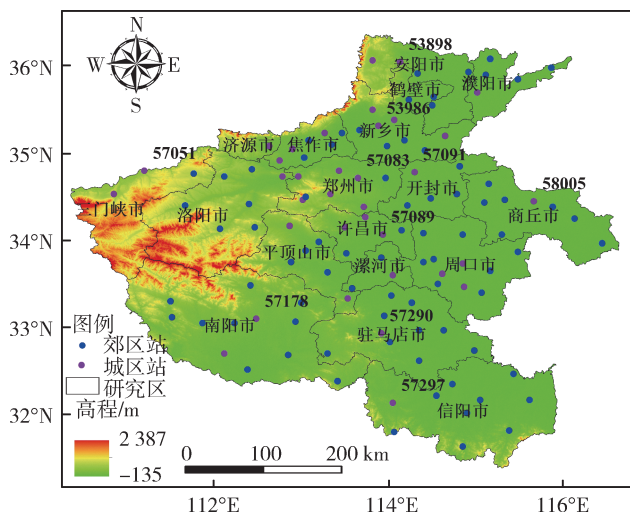


图 1 河南省地面高程及国家级地面观测站的位置分布

Fig.1 Ground elevation and location distribution of national ground observation stations in Henan Province

不同地区的适用性存在较大差异,因此,首先在模拟前对应用最广的几种参数化方案进行测试,对模型物理参数化方案进行区域适用性评估,并且根据前人的研究对河南省的物理过程参数化方案进行设置和调整^[18],选取其中最优的参数化方案组合,微物理过程采用 Thompson 方案,长波辐射采用 RRTM 方案,短波辐射采用 Dudhia 方案,陆面过程采用 Noah 方案,行星边界层采用 YSU 方案,城市冠层采用 UCM 方案,模式第一层积云过程采用 KF 方案,由于模式第二层和第三层的空间分辨率均小于 10 km,因此未选用积云过程参数化方案^[21-22]。设置的具体参数来源于 Wang 等^[23]以及全球城市与建筑物特征数据集,其他参数主要采用 UCM 的默认设置。模型共设置了 2 组模拟对照试验:不考虑城市冠层模型(记为 NON)和考虑城市冠层模型(记为 UCM),城市冠层模型对城市的建筑物高度、密度、几何形状、建筑材料、街道宽度和走向、绿化面积等因素做了细致的刻画^[24]。

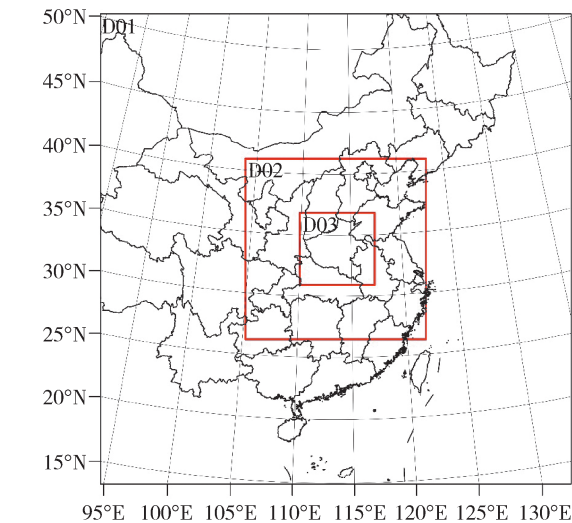


图2 模拟区域的三层嵌套示意图
Fig. 2 Schematic diagram of three-layer nesting of simulation area

3 结果与分析

3.1 观测结果

本研究选取的模拟时段为 2021 年 7 月 18—20 日,其中 18 日为预热期,19—20 日为用于分析的时段。为了进一步分析观测降水量的空间分布情况,采用地统计学中常用的克里金插值法来对 116 个站点进行插值计算,克里金插值算法是利用数据点间的空间相关性,可以自动识别采样点的空间分布,消除采样点分布不均匀带来的误差,可信度较高。插值得到的降水量空间分布如图 3 所示,可以看出郑州市为模拟时段降水量最高的地区,两天的累积降

水量超过 500 mm,东部和南部降水量较少,累积降水量小于 50 mm,西部地区累积降水量小于 100 mm。所有观测站点平均降水量为 152.1 mm。对照图 1 城区站点在河南省的分布,发现城区站点多分布在郑州市周围,可以看出城区的降水量明显高于郊区。本次河南省极端降水的原因,主要是受 1 000 km 外的台风“烟花”和副热带高压气流的影响,大量的水汽通过偏东风源源不断从海上输送到陆地,再加上河南省太行山区、伏牛山区特殊地形对偏东气流起到抬升辐合效应,从而导致了如此强劲的降水。

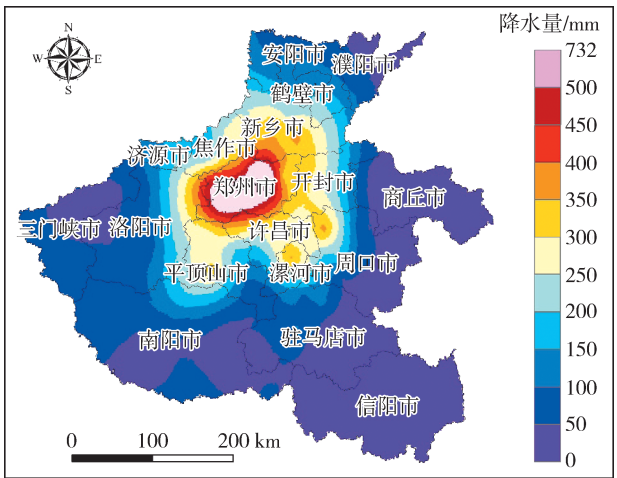
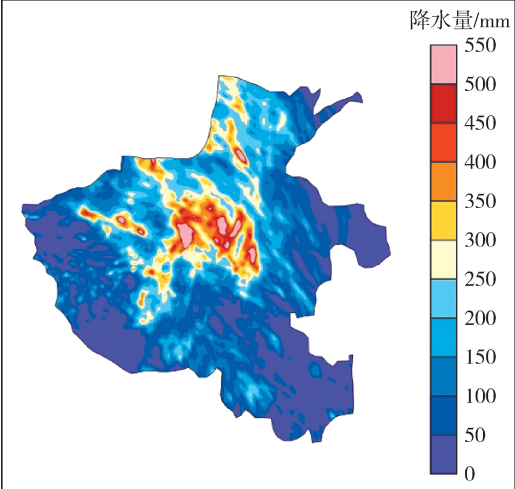


图3 河南省地面观测站累积降水量观测值
Fig. 3 Observed values of cumulative precipitation at ground observation stations in Henan Province

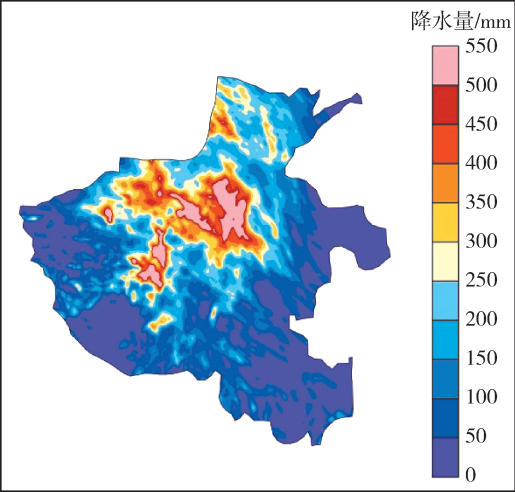
3.2 模拟结果

由于模拟是针对 2021 年 7 月 19—20 日的 48 h 累积降水量,具有时间属性,而且本文主要考虑对比城市化前后(有无城市冠层)对极端降水的影响,因此没有详细分析逐小时的降水序列特征。引起城市降水量变化除城市化因素外,还有地形和区域气候变化的因素。因此,本研究模型模拟均采用相同的地形数据和气象资料来剥离其他的影响因素,进而分析城市化对极端降水的影响。由图 4 可以看出,两个方案均能够较好地模拟出河南省降水强度和落区,模型能够用于河南省极端降水的模拟。河南省为典型的农业大省,两个方案模拟的主要差别分布在郑州市附近。由于考虑了城市冠层物理过程,UCM 方案更好地模拟出了强降水中心,范围相比 NON 方案更大一些,而且在东南部的低值区域,UCM 方案的模拟精度也会更高一些。UCM 方案模拟的平均降水量为 144 mm,相比 NON 方案模拟的平均降水量 131.9 mm,高出了 12.1 mm。城市化对降水起到了增强作用,其原因可能是以下两个方面:①城市阻碍效应。城市冠层对空气具有摩擦和阻碍作用,其粗糙度高于郊区,当其与地表产生的热量和

水汽量相遇时,容易形成上升的热气流;此外,建筑物的阻挡容易降低降水云团的移动速度,增加降水系统在城市上空的停留时间,导致城市降水量的增加。②城市热岛效应。城市拥有自然侧植被的蒸散发量以及城市人工用水产生的蒸发量,为降水对流系统提供了充足的水汽,再加上城市热岛效应使得城市产生了高温区,促进了陆-气的水汽交换,对于降水的形成起到促进作用。



(a) NON 方案



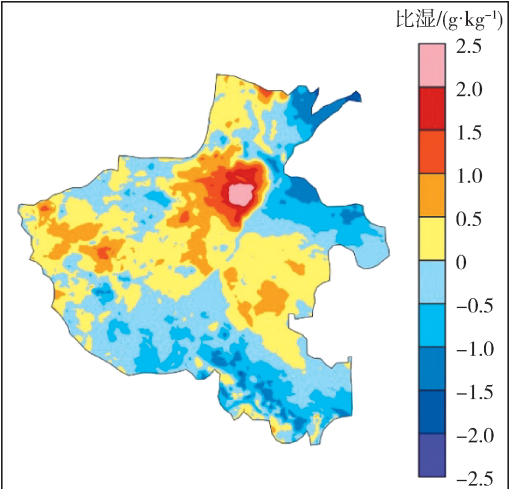
(b) UCM 方案

图 4 两个方案的模拟结果

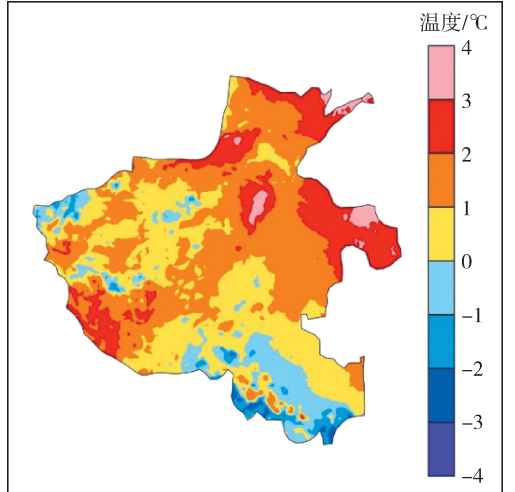
Fig. 4 Simulation results of two schemes

图 5 为模拟时段 UCM 方案和 NON 方案距离地面 2 m 处平均比湿和温度的差值。由图 5 可见, UCM 方案模拟的比湿大约比 NON 方案高 1 g/kg,说明城市化增加了河南省近地面的空气湿度,值得注意的是,增加最多的是郑州市附近(城市下垫面)。郑州市人口密集,人工耗水随城市化进程大大增加,促进了陆-气的水汽交换,为降水对流系统提供了部分水汽来源。此外,城市化降低了城市植被覆盖度和自然蒸散发量的同时,空气含水率更高,说明人工耗水增加的蒸发量高于由于城市化导致的自然蒸散

的减少量。UCM 方案模拟的温度比 NON 方案模拟的温度高约 1.5℃,表明城市冠层物理过程增加了城市地表的温度,水汽垂直输送的速率加快,导致对流性降水增加。气温的升高也将增强大气的保水能力,从而增加暴雨的频率。这些影响相互关联,共同影响城市地区的降水特征,突显了城市降水机制的复杂性和区域差异。总的来说,城市化使河南省城区的空气湿度和气温均升高,城市化效应显著。



(a) 比湿差值



(b) 温度差值

图 5 模拟时段 UCM 与 NON 方案距地面 2 m 处空气比湿与温度的差值

Fig. 5 Difference between air specific humidity and temperature at 2 m from the ground between UCM and NON schemes during simulation period

进一步选取了位于河南省城市地区共 10 个国家级地面观测站 1960—1969 年(城市化缓慢时期)和 2010—2019 年(城市化加快时期)水汽压和温度的逐月气象观测资料,并结合城市人工耗水过程,探讨城市化对河南省城市地区水汽量和温度的变化规律的影响,进而探讨城市化对降水的影响^[25]。需要说明的是,位于河南省的气象站共有 15 个,其中

10 个城区站、5 个郊区站,由于本研究主要是针对城市化对极端降水空间分布的影响,因此主要对位于城区的 10 个站点进行分析,站点编号为 53898、53986、57051、57083、57089、57091、57178、57290、57297 和 58005。

绝对湿度是单位体积空气中水蒸气的质量,反映了空气中的实际水汽含量,既包括由于天然降水所引起的植被蒸散发,也包括建筑物内人工用水及道路洒水等人类活动引起的水分蒸发^[26]。绝对湿度的计算公式为

$$\rho_{\text{vap}} = \frac{m_{\text{vap}}}{V} = \frac{p_{\text{vap}}}{R_{\text{vap}} T} \quad (1)$$

式中: ρ_{vap} 为绝对湿度, g/m^3 ; m_{vap} 为空气中溶解水的质量, g ; V 为空气体积, m^3 ; p_{vap} 为水汽压, Pa ; R_{vap} 为水蒸气的气体常数,为 $461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为温度, K 。

对河南省城市化前后绝对湿度的变化进行分析,结果如图 6 所示,可以看出,各地区城市的水汽量基本持平,所有 10 个站点 1960—1969 年绝对湿度的平均值为 $9.8 \text{ g}/\text{m}^3$,2010—2019 年绝对湿度的平均值为 $9.7 \text{ g}/\text{m}^3$,说明了大规模城市化以来,虽然建筑物和硬化地面大面积覆盖了城市地区使得城区自然蒸发量减少,但人工耗水活动产生的蒸发量增加,例如建筑物内用水、道路洒水、人工灌溉等,弥补了减少的自然蒸发量。有研究表明,当城市化达到一定程度以后,综合耗水强度会超过原自然状态的蒸散发强度^[27]。图 7 为不同站点城市化前后温度的变化,可以看出除 57089 站点的温度基本持平外,其他站点的温度都有了显著的提升。所有 10 个观测站 1960—1969 年温度的平均值为 13.0°C ,2010—2019 年温度的平均值为 13.9°C 。城市化使得城区温度增加,由于人工耗水的作用,使得城市化过程中水汽量基本与过去持平,弥补了因植被覆盖率减小的自然侧蒸发量。Zhou 等^[28]提出城市耗水计算模型,发现 2000—2015 年厦门市城市水耗散强度呈增加趋势,并且建筑物所占的耗水比例最大;Luo 等^[25]

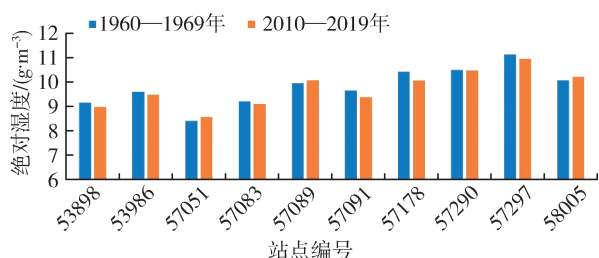


图 6 不同站点城市化前后绝对湿度的变化

Fig. 6 Change in absolute humidity of different stations before and after urbanization

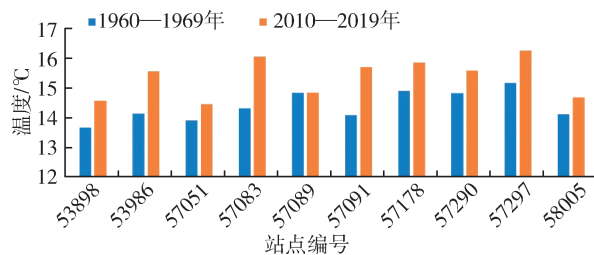


图 7 不同站点城市化前后温度的变化

Fig. 7 Change in temperature of different stations before and after urbanization

利用全国 613 个观测站研究表明,城市化使得全国大多数城市绝对湿度增加,人工耗水增加的蒸发量大于自然植被减少的蒸散发量,与本研究模拟结果一致。

4 结 论

a. 加入城市冠层模型能更好地模拟出河南省 2021 年“7·20”暴雨的空间分布情况,同时对本次暴雨的降水量高值区和降水量低值区的模拟相比于未考虑城市冠层的方案模拟结果有所改善,城市化增强了极端降水的强度。

b. 由于人工耗水作用,弥补了城市化区域天然植被减少带来蒸发减少效应,使得空气的绝对湿度在城市化过程中保持相对稳定,而温度的增加促进了城区上空对流性降水的发展。

参考文献:

- [1] 王丹青,许有鹏,王思远,等. 城镇化背景下平原河网区暴雨洪水重现期变化分析:以太湖流域武澄锡虞区为例[J]. 水利水运工程学报,2019(5):27-35. (WANG Danqing, XU Youpeng, WANG Siyuan, et al. Change in return period of storm flood in plain river network area under urbanization: taking Wuchengxiyu region of Taihu Lake basin as a case study [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5):27-35. (in Chinese))
- [2] 高涛,谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展,2014,29(5):577-589. (GAO Tao, XIE Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5):577-589. (in Chinese))
- [3] 刘家宏,王浩,高学睿,等. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报,2014,59(36):3581-3590. (LIU Jiahong, WANG Hao, GAO Xuerui, et al. Review on urban hydrology[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(36):3581-3590. (in Chinese))
- [4] SHEPHERD J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. Earth Interactions, 2005, 9(12):1-27.
- [5] ZHANG N, ZHU L, ZHU Y. Urban heat island and

- boundary layer structures under hot weather synoptic conditions: a case study of Suzhou City, China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(4): 855.
- [6] 王辉, 吴文俊, 王广, 等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 61-68. (WANG Hui, WU Wenjun, WANG Guang, et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 61-68. (in Chinese))
- [7] 姚成, 李致家, 张珂, 等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine scale flood forecasting for small and medium sized rivers based on Grid Xin'anjiang model [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(1): 19-25. (in Chinese))
- [8] 俞彦, 张行南, 张鹏, 等. 基于SCS模型和新安江模型的雨量预警指标综合动态阈值对比[J]. *水资源保护*, 2020, 36(3): 28-33. (YU Yan, ZHANG Xingnan, ZHANG Peng, et al. Comparison of comprehensive dynamic threshold of rainfall warning indicators based on SCS model and Xinanjiang model [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(3): 28-33. (in Chinese))
- [9] 曹永强, 李玲慧, 邵薇薇, 等. 珠海市香洲城区降水变化特征及成因分析[J]. *水资源保护*, 2021, 37(5): 9-15. (CAO Yongqiang, LI Linghui, SHAO Weiwei, et al. Analysis on characteristics and causes of precipitation change in Xiangzhou urban area, Zhuhai City [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(5): 9-15. (in Chinese))
- [10] 黄国如, 赵晓莺, 麦叶鹏. 低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 29-36. (HUANG Guoru, ZHAO Xiaoying, MAI Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 29-36. (in Chinese))
- [11] CHEN S, LI W, DU Y, et al. Urbanization effect on precipitation over the Pearl River Delta based on CMORPH data [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 6(1): 16-22.
- [12] SONG X M, ZHANG J Y, AGHAKOUCHAK A, et al. Rapid urbanization and changes in spatiotemporal characteristics of precipitation in Beijing metropolitan area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(19): 11250-11271.
- [13] KUSAKA H, KIMURA F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(12): 1899-1910.
- [14] 易路. 陆面水文模型TOPX的改进及其与区域气候模式WRF的耦合研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [15] THIELEN J, WOBROCK W, GADIAN A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: a sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale [J]. *Atmospheric Research*, 2000, 54(1): 15-39.
- [16] 侯爱中, 倪广恒, 丛振涛, 等. 耦合城市冠层模型对暴雨模拟精度的影响[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(6): 31-33. (HOU Aizhong, NI Guangheng, CONG Zhentao, et al. Impacts of coupling urban canopy model on storm simulation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(6): 31-33. (in Chinese))
- [17] 胡庆芳, 张建云, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 138-150. (HU Qingfang, ZHANG Jianyun, WANG Yintang, et al. A review of urbanization impact on precipitation [J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 138-150. (in Chinese))
- [18] 董俊玲, 刘超, 苏爱芳. 郑州地区城市化对一次暴雨过程影响的模拟研究[J]. *干旱气象*, 2019, 37(6): 922-932. (DONG Junling, LIU Chao, SU Aifang. Impact of urbanization on a torrential rain Process in Zhengzhou Region [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2019, 37(6): 922-932. (in Chinese))
- [19] VAHMANI P, HOGUE T S. Urban irrigation effects on WRF-UCM summertime forecast skill over the Los Angeles metropolitan area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(19): 9869-9881.
- [20] 于赢东. 强人类活动区降水演变规律剖析及影响因子识别[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [21] 孙挺. 城市复杂下垫面水热通量研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [22] 刘振鑫. 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, 2014.
- [23] WANG Z H, BOU-ZEID E, SMITH J A. A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139: 1643-1657.
- [24] GRIMMOND C S B, OKE T R. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(7): 792-810.
- [25] LUO Z, LIU J, ZHANG Y, et al. Spatiotemporal characteristics of urban dry/wet islands in China following rapid urbanization [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 601: 126618.
- [26] 刘家宏, 周晋军, 邵薇薇. 城市高耗水现象及其机理分析[J]. *水资源保护*, 2018, 34(3): 17-21. (LIU Jiahong, ZHOU Jinjun, SHAO Weiwei. Analysis of urban high water dissipation phenomenon and its mechanism [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(3): 17-21. (in Chinese))
- [27] 周晋军. 城市耗水机制及计算模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [28] ZHOU J, LIU J, YAN D, et al. Dissipation of water in the urban area, mechanism and modelling with the consideration of anthropogenic impacts: a case study in Xiamen [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 356-365.

(收稿日期: 2021-09-03 编辑: 王芳)