

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.004

不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响

黄晓东¹, 刘文锴², 曹润祥¹, 韩宇平^{1,3}

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学校长办公室, 河南 郑州 450046; 3. 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室, 河南 郑州 450046)

摘要:为探究下垫面变化对高密度城市地区降水的影响,基于遥感技术反演郑州主城区1990—2019年的不透水面分布信息,并分析了其扩张特征;采用回归模型探讨不透水面比例与降水特征变化的相关性,识别了显著影响主城区降水的不透水面比例阈值,并采用城郊对比法多角度揭示了不透水面扩张对主城区降水的影响程度。结果表明:郑州主城区不透水面扩张趋势显著,扩张形态呈单一核心的“摊大饼”式扩张;不透水面比例与城郊降水强度比呈二次多项式函数关系,对主城区降水产生显著影响的阈值是30%;不透水面扩张导致主城区雨岛效应显著,增雨系数最高达1.39,主城区暴雨发生概率高于郊区53%,降水集中期晚于郊区约8 d,对主城区主汛期降水量变化的贡献率达44.39%;不透水面因具有高蓄热、低渗透的固有特征,对地表热力、动力条件具有显著影响,已成为城市化影响降水的主要影响因素之一。

关键词:不透水面;降水特征;雨岛效应;遥感;郑州主城区

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0022-09

Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City // HUANG Xiaodong¹, LIU Wenkai², CAO Runxiang¹, HAN Yuping^{1,3} (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. President's Office, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Resources Conservation and Intensive Utilization in the Yellow River Basin, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to explore the impact of underlying surface changes on precipitation in high-density urban areas, the distribution information of impervious surface in the main urban area of Zhengzhou City from 1990 to 2019 was estimated based on the remote sensing technology, and the expansion characteristics were analyzed. A regression model was used to explore the correlation between the proportion of impervious surface and the change of precipitation characteristics, and the threshold value of impervious surface proportion significantly affecting precipitation in the main urban area was identified. The effects of impervious surface expansion on precipitation in the main urban area were revealed from multiple angles with the method of comparison between urban and suburban areas. The results show that the impervious surface exhibited a significant expansion trend, like spreading a pie with a single core, in the main urban area of Zhengzhou City. The proportion of impervious surface had a quadratic polynomial function relationship with the ratio of precipitation intensity, and its threshold significantly affecting precipitation in the main urban area was 30%. The impervious surface expansion resulted in a significant rain island effect in the main urban area, and the maximum precipitation enhancement coefficient was 1.39. The probability of rainstorm in the main urban area was 53% higher than that in the suburbs, and the precipitation concentration period was about 8 d later than that in the suburbs. The contribution rate of impervious surface expansion to precipitation change in the main flood season was 44.39%. Impervious water surface, with characteristics of high heat storage capacity and low permeability, has a significant impact on surface thermal and dynamic conditions, and has become one of the main factors of urbanization affecting precipitation.

Key words: impervious surface; precipitation characteristics; rain island effect; remote sensing; main urban area of Zhengzhou City

基金项目:国家自然科学基金(51679089)

作者简介:黄晓东(1987—),男,讲师,博士,主要从事遥感水文研究。E-mail:huangxiaodong@ncwu.edu.cn

通信作者:韩宇平(1975—),男,教授,博士,主要从事水资源管理研究。E-mail:hanyp@ncwu.edu.cn

降水过程受大气环流背景和局地环境(下垫面变化)的共同作用^[1]。在大区域长时间尺度上,气候变化是降水变化的主要驱动因素,但在局部区域短时间尺度上,下垫面变化对降水的影响更为显著^[2]。已有研究表明,在经纬度跨度均不超过2°的内陆区域,不同监测站降水参量(降水量、雨日数)之间的相对差异被认为是局地下垫面条件的差异导致^[3-5]。不透水面作为高密度城市地区主要的地表覆被类型,是指能够阻隔地表水直接下渗到土壤中的人工地表覆盖,包括道路、广场、建筑物等类型^[6],具有阻断水分下渗、蓄热能力强、蒸散能力弱及阻碍气流传输等特点^[7-9]。受此影响,在水汽充足、凝结核丰富的条件下,城市地区容易形成对流云和对流性降水,诱导、强化暴雨等极端降水现象的发生,引发城市雨岛效应,影响城市降水的形成和分布。2021年发生在郑州地区的“7·20”极端暴雨事件造成了严重的城市内涝灾害与重大的社会影响。研究郑州等特大城市的城市化降水效应对认识城市化对降水影响的物理机制及制定相应防范措施具有重要意义。

针对城市化发展过程中下垫面变化对降水的影响已开展了不少研究,如Souma等^[10]证实了下垫面改变引发的热量传输变化会对城市降水产生影响;张建云等^[11]指出,城市不透水面的增加会改变城市水循环过程,进而改变城市的水量平衡,具有促进局部降水增加的正反馈效应。另有部分学者针对国内典型高密度城市的降水特征变化开展了案例研究,如金义蓉等^[12]研究了上海市快速城市化对局地降水的影响,结果表明,城市化对城区降水具有显著的强化作用,增加了强降水事件发生概率;陈秀洪等^[4]研究了广州市城市建设对降水特征的影响,结果表明,相比城市化缓慢期,城市化快速期的短历时降水日、降水强度、降水雨型均发生明显变化;张杰等^[13]研究了北京地区城市化对暴雨过程的影响,表明建设用地的扩张使暴雨持续时间延长。

目前城市化降水效应的相关研究在揭示下垫面变化影响降水的机制方面做了卓有成效的工作^[14-18],但在下垫面变化研究中多采用传统城市统计数据或离散型的土地利用/覆被分类结果,数据精度有限且缺乏空间分布信息,在城区降水特征变化研究中缺乏对下垫面变化与降水特征变化关系的定量探讨。本文以郑州市主城区为研究区域,基于遥感技术反演获得可定量表征城市地表覆被动态变化的连续型地表覆盖数据——不透水面比例^[19],刻画不透水面的扩张特征,探讨不透水面比例与降水特征变化的定量关系,揭示不透水面扩张对降水的影

响程度,以期为郑州市城市空间规划与极端降水事件风险管控提供参考。

1 研究区概况

郑州市是中部地区的大都会,近几十年来城市建设日新月异,城市化率从1978年的32.4%发展到2021年的79.1%,2017年被确定为国家中心城市,城市化发展进程具有典型性和代表性。主城区位于郑州市北部,北依黄河,南邻新密市与新郑市,西靠荥阳市,东接中牟县,介于34°36'N~34°59'N、113°26'E~113°52'E之间,辖区面积1016 km²,区域概况如图1所示。地形以平原为主,约占土地总面积的94.25%,其他地形包括丘陵和山地,主要分布在境内西南部。地势西南高、东北低,平均坡度3.68%,最低海拔75 m,最高海拔263 m,平均海拔112 m。气候属于暖温带亚湿润季风气候,多年平均降水量634.5 mm,汛期降水量占全年降水量的66.18%。2021年郑州市“7·20”极端暴雨事件造成重大人员伤亡及财产损失,因灾死亡失踪380人,直接经济损失409亿元,是中华人民共和国成立以来郑州市遭遇的破坏性最强、人员财产损失最大的降雨。

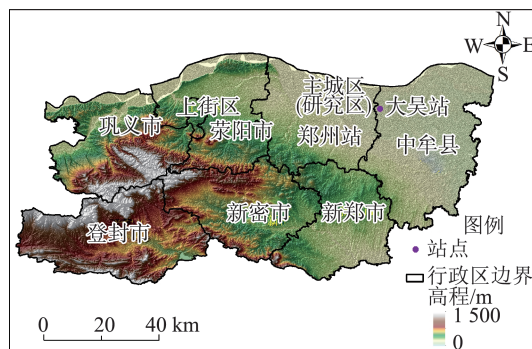


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究数据包括覆盖郑州主城区的卫星遥感影像、郑州主城区行政区边界矢量数据以及郑州市逐日降水量数据。遥感影像下载于美国地质勘探局官网(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),包括7期Landsat 30 m分辨率的卫星影像和SRTM 30 m分辨率的DEM数据。行政区边界矢量数据来源于郑州市自然资源和规划局。许多学者开展了气象、水文两类降水观测资料的比较和验证分析工作^[20-22],结果表明,气象站和水文站的降水观测资料的相关程度较高,具有较好的一致性。两类监测站降水资料的融

合应用可以一定程度上弥补单个部门站点布设不均导致的研究数据资料不全的问题。本文的降水数据包括郑州气象站 1990—2017 年逐日降水量数据(资料来源于中国气象数据网)和大吴雨量站 1990—2017 年逐日降水量数据(资料来源于河南省水文年鉴)。

2.2 研究方法

2.2.1 不透水面信息遥感反演

采用变端元线性光谱混合分解模型(dynamic endmember linear spectral mixture analysis, DELSMA)^[23]反演研究区不透水面信息。该模型针对现有不透水面反演方法在端元选取过程中存在同物异谱干扰和端元分解过剩的问题,引入影像分层技术和变端元方法,有效提高了高密度城市地区不透水面的反演精度,其表达式^[24]为

$$R_b = \sum_{i=1}^N f_i R_{bi} + e_b \quad (1)$$

$$P_{IS} = P_{IS_L} + P_{IS_A} \quad (2)$$

其中 $P_{IS_L} = f_{G_L} + f_{D_L}$ $P_{IS_A} = f_{D_A}$
式中: R_b 为影像波段 b 在像元中的反射率; f_i 为端元 i 在像元中的占比; R_{bi} 为端元 i 在波段 b 的反射率; N 是端元数量; e_b 为影像波段 b 的标准残差; P_{IS_L} 为亮色层影像中不透水面占比; f_{G_L} 、 f_{D_L} 分别为亮色层影像中高反射率地物和低反射率地物的占比; P_{IS_A} 为暗色层影像中不透水面占比; f_{D_A} 为暗色层影像中低反射率地物的占比; P_{IS} 为整幅影像的不透水面占比。

2.2.2 城郊对比法

城郊对比法常被用来分析城区降水与郊区降水的异同,探讨城市化是否对城区降水产生影响并揭示其影响程度^[25-29]。为重点突出下垫面变化的局地环境作用,选取位于市中心的郑州站(113°67'E, 34°71'N)和位于郊区的大吴站(113°51'E, 34°49'N)分别作为城区和郊区代表站,两站距离不超过 21 km,经纬度差距不超过 1°,在国家气候分区中属于同一气象分区,大气环流背景对两站降水的影响相似。两站均位于郑州市中东部黄河冲积平原区,地势平坦,局部气象条件基本一致,所以地形起伏对降水的影响基本可以忽略,在两站横向比较时可忽略地形因素的影响。城区站位于主城区中心地带,周围土地利用类型以道路、居民区、商业区等人工不透水面为主,能够较好地反映城市化条件下的降水特征;郊区站位于城郊结合处,周围土地利用类型以耕地、林地、坑塘等自然地表为主,能够较好地反映自然条件下的降水特征。因此,城郊两站具有较好的代表性,能够用来对比下垫面变化情景下的城郊

降水特征差异。为分析不透水面扩张对城区降水特征的影响,选取了城郊降水强度比、增雨系数、降水集中度/集中期、降水贡献率等指标定量分析城郊降水差异。

a. 城郊降水强度比。城郊降水强度比 R_{us} 是指城区站与郊区站年均降水强度的比值,用于反映城郊降水的差异程度^[30],其计算公式^[31]为

$$R_{us} = \frac{I_u}{I_s} \quad (3)$$

式中 I_u 、 I_s 分别为城区站和郊区站某个时间段内的年均降水强度。

b. 增雨系数。增雨系数 k 可用于表征不透水面对降水量的影响程度,从而判断城区是否存在雨岛效应,其表达式^[32]为

$$k = \frac{P_u}{P_s} \quad (4)$$

式中: P_u 为城区降水量; P_s 为郊区降水量。

c. 降水集中度和降水集中期。降水集中度 D_{PC} 和降水集中期 t_{PC} 是利用向量原理来定义时间分配特征的参数,作为衡量降水非均匀分配的重要指标,能够定量揭示区域年内降水的时空非均匀性变化特征^[33]。降水集中度与降水集中期的计算公式^[34]分别为

$$D_{PCi} = \frac{\sqrt{P_{xi}^2 + P_{yi}^2}}{P_i} \quad (5)$$

$$t_{PCi} = \tan^{-1} \frac{P_{xi}}{P_{yi}} \quad (6)$$

其中 $P_{xi} = \sum_{j=1}^{12} P_{ij} \sin \theta_j$ $P_{yi} = \sum_{j=1}^{12} P_{ij} \cos \theta_j$

式中: D_{PCi} 、 t_{PCi} 分别为第 i 年的降水集中度和降水集中期指数(无量纲); P_i 为某测站第 i 年的年内总降水量,mm; P_{xi} 、 P_{yi} 分别为某测站第 i 年逐月降水量的水平分量之和与垂直分量之和,mm; P_{ij} 为第 i 年第 j 月的降水量,mm; θ_j 为第 j 月降水量的向量角度,°。降水集中度能反映年降水总量在各月的集中程度,取值范围为 0~1。如果年降水总量均匀分布于每个月,则各月向量分量累加后为 0,即 D_{PC} 为极小值;如果年降水总量全部集中在 1 个月内,则该月合成向量与年降水总量之比为 1,即 D_{PC} 为极大值。 D_{PC} 值越接近 0,表示降水越不集中,年内分配趋于均匀; D_{PC} 值越接近 1,表示降水越集中,年内分配越不均匀。降水集中期代表合成向量的方位角,取值范围为 0°~360°^[35]。将计算得到的角度转换为年内对应的月序,即可反映一年中降水集中出现在哪个时段。

d. 降水贡献率。降水贡献率 w_{is} 用来定量分

析不透水面在城区降水变化这一过程中的贡献,计算公式^[36]为

$$w_{is} = \frac{r_u - r_s}{r_s} \tag{7}$$

式中: r_u 为城区降水量变化率; r_s 为郊区降水量变化率。

3 结果与分析

3.1 不透水面扩张特征分析

基于 Landsat 影像,采用 DELSMA 模型反演得到多时相不透水面分布结果,如图 2 所示。

不透水面比例与图斑面积乘积之和表示不透水面面积,计算结果见表 1。

表 1 1990—2019 年主城区不透水面面积及比例
Table 1 Impervious surface area and percentage in main urban area from 1990 to 2019

年份	不透水面面积/km ²	不透水面比例/%	年份	不透水面面积/km ²	不透水面比例/%
1990 年	71.29	7.01	2010 年	382.92	37.67
1995 年	115.67	11.38	2015 年	440.76	43.37
2000 年	175.63	17.28	2019 年	523.34	51.49
2005 年	289.32	28.47			

由图 2 和表 1 可知,郑州主城区不透水面扩张具有以下特点:

a. 1990—2019 年郑州主城区不透水面扩张趋势明显,不透水面总面积从 71.29 km² 增加到 523.34 km²,共增加 452.05 km²,2019 年不透水面比例是 1990 年的 7 倍以上,表明郑州主城区不透水面 1990—2019 年经历了快速扩张的过程,扩张形态呈

单一核心的“摊大饼”式发展。
b. 1990—2019 年不透水面面积年均增长量为 15.59 km²,以此为阈值,不透水面扩张过程大致经历 3 个时期:①低速增长期(1990—2000 年),年均增长量为 10.43 km²,不透水面增长相对缓慢,主要以陇海线与京广线交汇处为中心向四周扩张;②高速扩张期(2000—2010 年),年均增长量达 20.73 km²,城市大拆大建导致不透水面扩张现象明显,受城市规划、新区开发、产业转移、土地政策等多重因素影响,不透水面增长的重点、热点空间从老城区逐步向周边地区过渡,主导模式从“点+线”过渡到“面+点”;③稳定发展期(2010—2019 年),不透水面年均增长量为 15.60 km²,城市不透水面扩张的成熟期,城市建设规模与发展速度更加合理,新增不透水面主要以中低覆盖度不透水面为主。

3.2 不透水面比例与降水特征变化的相关性分析

对不透水面比例与城郊降水强度比进行回归分析能够定量揭示不透水面比例与降水特征变化的相关关系。将 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2019 年不透水面比例与对应时期内的城郊降水强度比分别进行线性、指数、对数和多项式等多种模型的回归分析,发现不透水面比例与城郊降水强度比呈正相关关系,以多项式模型的相关度最高,其相关系数为 0.829 2,且通过 0.05 显著性检验,如图 3 所示。因此,不透水面比例与降水特征变化具有显著相关性。

由图 3 可以看出,当不透水面比例小于 30% 时,城郊降水强度比变化无明显规律,受不透水面比

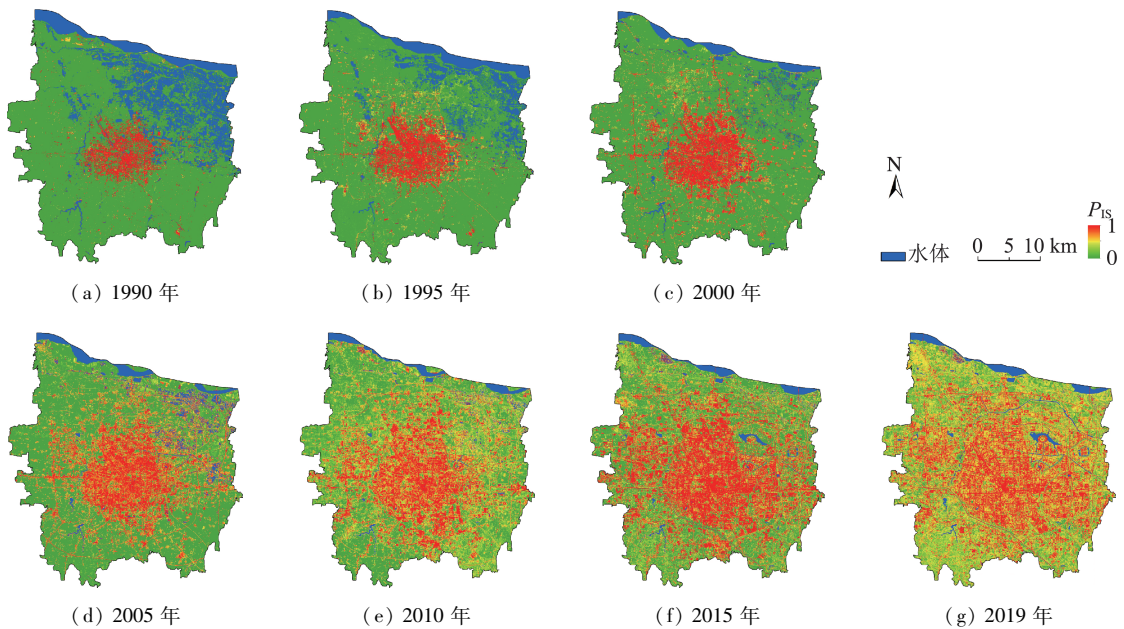


图 2 1990—2019 年主城区不透水面分布
Fig. 2 Distribution of impervious surface percentage in main urban area from 1990 to 2019

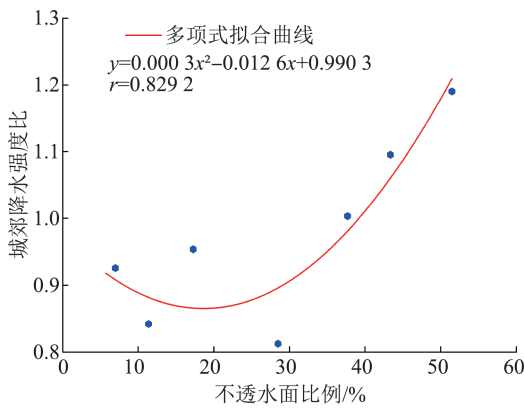


图3 不透水面比例与城郊降水强度比的回归分析
Fig.3 Regression analysis of impervious surface percentage and ratio of precipitation intensity

例影响尚不显著,但当不透水面比例超过30%后,城郊降水强度比近似线性增加趋势,受不透水面比例影响显著。这说明高不透水面比例地区的城郊降水强度比增幅明显高于低不透水面比例地区,不透水面比例的增加对城市降水增加有促进作用。不透水面扩张对降水强度的影响主要与下垫面热力性质改变引起的热力不稳定及下垫面粗糙度增大引起的低层气流辐合过程增强有关。大量的自然地表转化为不透水面导致产生对流雨的云中气流垂直速度变大,阵性强降水的发生频率提高,进而造成城区降水过程出现极端降水的频率提高,降水强度增大。

3.3 不透水面扩张对降水特征的影响程度分析

3.3.1 对降水量的影响

1990—2017年不同时期城区站和郊区站年平均降水量、汛期平均降水量、平均最大日降水量及增雨系数统计结果见表2。

由表2可以看出,整体来看,各时期城区站年平均降水量、汛期平均降水量、平均最大日降水量均大于郊区站,增雨系数呈增长趋势,城区存在雨岛效应。1990—2017年城区站的年平均降水量比郊区站多18.30%,汛期平均降水量比郊区站多20.45%。但年降水量增雨系数、汛期降水量增雨系数在不同时期的区别不是很显著,变化范围小于0.12。最大日降水量的增雨系数呈倒“V”形,中期为拐点。前期到中期,增雨系数增大0.34,中期到

后期减小0.22,但前期到后期增雨系数仍为增加趋势,增量为0.13。说明城区地表覆被的剧烈变化对最大日降水量有增加作用,且在不透水面扩张最快的中期(2001—2010年)最为明显,后期(2011—2017年)随着城市规划的调整,高密度不透水面比例下降,水体、绿地增多,城市热岛效应得到一定的减缓,热力对流性暴雨发生的频率有所减小。

3.3.2 对不同等级降水的影响

1990—2017年城区站、郊区站在不同时期各等级降水的平均雨日数计算结果见表3。

由表3可知,1990—2017年城区站观测到的小雨、中雨、大雨、暴雨雨日数比例比郊区站观测到的同等级雨日数比例分别高34%、8%、31%和53%。说明不透水面扩张引起城区不同等级降水的雨日数增加,其中对暴雨发生次数的影响最大,其次为小雨和大雨,受影响最小的为中雨。但从不同发展时期来看,不透水面扩张对不同等级降水的影响经历了不同的发展过程:

a. 小雨。城区小雨雨日数逐渐减少,郊区小雨雨日数逐渐增加,但同期仍低于城区。造成这种现象的原因可能是不同发展时期不透水面扩张形式有所不同,不透水面扩张前期呈“摊大饼”式蔓延扩展,类型主要为低层人工建筑物,降水增加主要受城市热岛效应影响,而中期和后期随着城市人工建筑物密度和高度增加,形成了独特的城市冠层结构,不仅易引起机械湍流,而且对移动滞缓的降水系统有阻碍效应,从而导致城市降水强度增大、降水时间延长等,易形成大雨或暴雨,因此小雨雨日数呈减少趋势。

b. 中雨。城区中雨雨日数呈增加趋势,郊区中雨雨日数呈减少趋势,两者比值均大于1,且呈波动增加趋势,但变化幅度不大。说明不透水面扩张对中雨雨日数有增强作用,但作用不明显。

c. 大雨。城区大雨雨日数呈先减后增的“V”形增长趋势,郊区大雨雨日数呈先增后减的倒“V”形减少趋势,两者比值整体为增加趋势,增加幅度达20%左右。自然气候背景下,郊区大雨雨日数呈减少趋势,但同期城区大雨雨日数却呈增长趋势,说明

表2 城郊站不同时期平均降水量及增雨系数

Table 2 Average precipitation and precipitation enhancement coefficient in different periods at urban and suburban stations

时期	年平均降水量/mm		k_1	汛期平均降水量/mm		k_2	平均最大日降水量/mm		k_3
	城区站	郊区站		城区站	郊区站		城区站	郊区站	
1990—2017年	636.0	537.7	1.18	419.9	348.6	1.20	80.1	69.3	1.16
前期(1990—2000年)	619.7	542.6	1.14	389.1	335.0	1.16	78.9	75.3	1.05
中期(2001—2010年)	676.1	573.9	1.18	485.2	400.8	1.21	94.4	67.8	1.39
后期(2011—2017年)	604.4	478.1	1.26	375.1	295.4	1.27	62.9	53.5	1.18

注: k_1 为年降水量增雨系数, k_2 为汛期降水量增雨系数, k_3 为日降水量增雨系数。

表3 不同时期不同等级降水平均雨日数

Table 3 Average rain days of different types of precipitation in different periods

时期	站点	雨日数/d			
		小雨	中雨	大雨	暴雨
1990—2017 年	城区站	60.29	11.05	5.03	1.82
	郊区站	44.92	10.26	3.84	1.18
前期(1990—2000 年)	城区站	61.57	10.62	4.95	1.86
	郊区站	43.14	10.43	3.67	1.24
中期(2001—2010 年)	城区站	60.70	11.70	4.70	2.10
	郊区站	43.70	10.10	4.40	1.60
后期(2011—2017 年)	城区站	55.86	11.43	5.71	1.29
	郊区站	52.00	10.00	3.57	0.43

不透水面扩张对城区大雨雨日数的增加作用远大于对郊区的抑制作用。

d. 暴雨。城区和郊区的暴雨雨日数均呈先增后减的变化趋势,但同期城区暴雨雨日数均多于郊区,各发展时期分别多 50%、31% 和 200%,可见不透水面扩张对城区暴雨雨日数的影响显著。城区暴雨雨日数的增加与不透水面扩张引起的地表能量平衡和水分平衡改变密切相关。

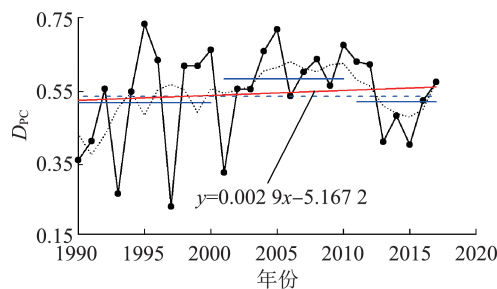
总体而言,郑州地区降水等级主要还是以小雨为主,其次为中雨,大雨和暴雨所占比例较低。但随着城市扩张,不透水面比例大幅增加,各等级降水变化趋势有所转变,体现在小雨雨日数的城郊差异开始变小,但大雨和暴雨雨日数的城郊差异显著增加。说明不透水面扩张使得城区强降水发生概率增加,其中对暴雨发生概率的影响最大。

3.3.3 对降水年内分配的影响

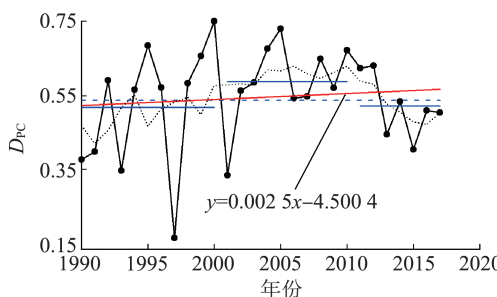
随着不透水面比例的增加,城市热岛、雨岛效应对降水影响愈发凸显,极端降水变得更加频繁,降水时空分配的非均匀性加剧。本文利用 1990—2017 年城区站和郊区站逐日降水数据,以降水集中度与集中期指数为基础,采用趋势分析和对比分析等方法,对城区及郊区年内降水非均匀性特征进行定量分析,结果如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可以看出,从整体变化趋势来看,1990—2017 年城区站降水集中度呈上升趋势,变化速率为 0.0029 a^{-1} ,略高于郊区站变化速率 0.0025 a^{-1} ,但两个区域变化均未通过 0.05 显著性检验,说明降水集中度线性趋势不明显。从年代际变化特征来看,城区站与郊区站降水集中度均为倒“V”形变化态势,不透水面扩张前期(1990—2000 年)年代均值最低,中期(2001—2010 年)年代均值明显高于多年均值,后期(2011—2017 年)年代均值低于多年均值,但略高于前期年代均值。城区站与郊区站降水集中度前期年代均值分别为 0.52 和 0.51,中期年代均

—●— 历年值 ——— 多年均值 ——— 年代均值 ——— 线性趋势 ——— 5 a 滑动平均



(a) 城区站

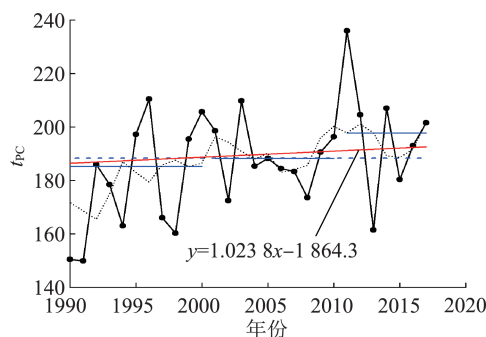


(b) 郊区站

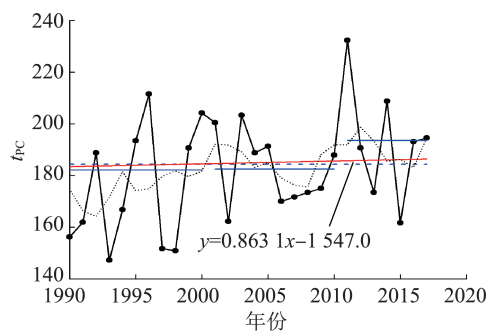
图 4 城区站和郊区站降水集中度变化趋势对比

Fig. 4 Comparison of variation trend of precipitation concentration degree at urban and suburban stations

—●— 历年值 ——— 多年均值 ——— 年代均值 ——— 线性趋势 ——— 5 a 滑动平均



(a) 城区站



(b) 郊区站

图 5 城区站和郊区站降水集中期变化趋势对比

Fig. 5 Comparison of variation trend of precipitation concentration period at urban and suburban stations

值分别为 0.58 和 0.57,后期年代均值分别为 0.53 和 0.51,倍比关系均接近 1,说明不透水面扩张对城

区的降水集中度影响不明显。

由图 5 可以看出,从整体变化趋势看,城区站与郊区站降水集中期均呈波动增长趋势,但城区站变化幅度大于郊区站,城区站降水集中期变化速率为 1.02 a^{-1} ,郊区站变化速率 0.86 a^{-1} ,但这种变化趋势并没有通过显著性检验。城区站降水集中期多年均值为 188.34° ,郊区站降水集中期多年均值为 184.33° ,参考文献[34]可知,城区站年内降水多集中在 7 月 17—18 日,郊区站年内降水多集中在 7 月 9—10 日,城区站年内降水集中期要晚于郊区站约 8 d。从年代际变化来看,城区站与郊区站降水集中期均表现为递增趋势,年代际变化趋势与整个研究期变化趋势相似,不透水面扩张的前期和中期年代均值低于多年均值,后期年代均值明显高于多年均值。以上分析说明随着时间推移,区域气候背景整体上发生一定变化,导致区域降水集中期有延迟趋势。同时,城区站降水集中时间相对郊区站有所延迟,表明不透水面扩张使城区的降水集中期产生延迟效应。

3.3.4 对降水量变化的贡献率

城区降水受气候背景和不透水面扩张等因素的影响,本文以降水量变化率为基础定量分析不透水面扩张对城区年降水量、汛期(6—9 月)降水量、主汛期(7—8 月)降水量变化的贡献率。依据 1990—2017 年城区站和郊区站逐日降水数据,经统计合并计算,可得到城区和郊区的年降水量变化率、汛期降水量变化率、主汛期降水量变化率,结果见表 4。

表 4 城区站和郊区站降水量变化率

Table 4 Rate of change in precipitation at urban and suburban stations

站点	年降水量变化率/(mm·a ⁻¹)	汛期降水量变化率/(mm·a ⁻¹)	主汛期降水量变化率/(mm·a ⁻¹)
城区站	0.252	0.797	0.849
郊区站	0.187	0.654	0.588

将表 4 的降水量变化率结果代入式(7)计算,得到不透水面扩张对城区年降水量、汛期降水量、主汛期降水量变化的贡献率分别为 34.76%、21.87% 和 44.39%。不透水面扩张对年、汛期、主汛期降水量变化的贡献率均为正值,说明城区降水增加速率比郊区降水增加速率大。不透水面扩张对主汛期降水量变化贡献率最大,说明夏季城区降水量受不透水面扩张影响最大。不透水面扩张对汛期降水量变化贡献率不足主汛期一半,这可能是因为不透水面扩张并没有明显影响城区的降水集中度,汛期的 6 月和 9 月降水量并没有因为不透水面的扩张而明显增加。不透水面扩张对年降水量变化贡献率介于汛

期和主汛期之间,说明不透水面扩张对汛期以外的其他月份的降水量也有增加作用,但没有对主汛期的影响明显。以上分析表明,虽然降水变化是多种因素综合影响的结果,但不透水面扩张这一因素在城区增雨效应中作用明显,尤其对主汛期雨量增加的影响最大。

4 结 论

a. 1990—2019 年郑州主城区不透水面扩张趋势明显,扩张形态呈单一核心的“摊大饼”式发展。以年均增长量 15.59 km^2 为阈值,可将不透水面扩张过程划分为低速增长期(1990—2000 年)、高速扩张期(2000—2010 年)、稳定发展期(2010—2019 年)3 个时期,各时期年均增长量分别为 10.43 km^2 、 20.73 km^2 和 15.60 km^2 。

b. 不透水面比例与城郊降水强度比呈二次多项式函数关系,当不透水面比例在 30% 以下时,城郊降水强度比变化无明显规律,城区降水受不透水面比例影响尚不显著,但当不透水面比例超过 30% 以后,城郊降水强度比近似线性增加趋势,城区降水受不透水面比例影响显著。

c. 城郊站不同时期的年降水、汛期降水及最大日降水的增雨系数均大于 1,说明不透水面扩张对主城区降水量影响显著,存在雨岛效应;主城区暴雨发生概率增加,暴雨雨日数比郊区多 53%;不透水面扩张对主城区降水集中度影响不明显,但对主城区的降水集中期产生延迟效应,主城区年内降水集中期要晚于郊区约 8 d;不透水面对主城区年降水量、汛期降水量、主汛期降水量变化的贡献率分别为 34.76%、21.87% 和 44.39%,对主汛期降水量增加的影响最大。

d. 不透水面因具有高蓄热、低渗透的固有特征,对地表热力、动力条件具有显著影响,已成为城市化影响降水的主要影响因素之一。因此,在考虑城市气候和地理背景的基础上,不断优化城市发展规划和布局,合理配置不透水面空间分布,可能是一种应对城市化降水效应、防控暴雨洪涝的有效措施。

参考文献:

[1] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))

[2] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-

224. (LI Lijuan, JIANG Dejuan, LI Jiuyi, et al. Advances in hydrological response to land use/land cover change [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22 (2): 211-224. (in Chinese))
- [3] 孙继松, 舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31 (2): 311-320. (SUN Jisong, SHU Wenjun. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31 (2): 311-320. (in Chinese))
- [4] 陈秀洪, 刘丙军, 陈刚. 城市化建设对降水特征的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32 (9): 1591-1601. (CHEN Xiuhong, LIU Bingjun, CHEN Gang. Effects of urbanization on precipitation characteristics [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32 (9): 1591-1601. (in Chinese))
- [5] 丁凯熙, 张利平, 宋晓猛, 等. 北京地区汛期降雨时空演变特征及城市化影响研究[J]. 地理科学进展, 2019, 38 (12): 1917-1932. (DING Kaixi, ZHANG Liping, SONG Xiaomeng, et al. Temporal and spatial features of precipitation and impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season in Beijing [J]. Progress in Geography, 2019, 38 (12): 1917-1932. (in Chinese))
- [6] ARNOLD JR C L, GIBBONS C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator [J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62 (2): 243-258.
- [7] 刘珍环, 李猷, 彭建. 城市不透水表面的水环境效应研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30 (3): 275-281. (LIU Zhenhuan, LI You, PENG Jian. Progress and perspective of the research on hydrological effects of urban impervious surface on water environment [J]. Progress in Geography, 2011, 30 (3): 275-281. (in Chinese))
- [8] 刘珍环, 曾祥坤. 深圳市不透水表面扩展对径流量的影响[J]. 水资源保护, 2013, 29 (3): 44-50. (LIU Zhenhuan, ZENG Xiangkun. Impact of impervious surface expansion on urban runoff in Shenzhen city [J]. Water Resources Protection, 2013, 29 (3): 44-50. (in Chinese))
- [9] 徐涵秋, 王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. 遥感学报, 2016, 20 (5): 1270-1289. (XU Hanchu, WANG Meiya. Remote sensing-based retrieval of ground impervious surfaces [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20 (5): 1270-1289. (in Chinese))
- [10] SOUMA K, TANAKA K, SUETSUGI T, et al. A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in Zoshigaya, Tokyo, Japan [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118 (20): 11600-11610.
- [11] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25 (4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25 (4): 594-605. (in Chinese))
- [12] 金义蓉, 胡庆芳, 王银堂, 等. 快速城市化对上海代表站降水的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45 (3): 204-210. (JIN Yirong, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Impacts of rapid urbanization on precipitation at two representative rain gauges in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45 (3): 204-210. (in Chinese))
- [13] 张杰, 史培军, 杨静, 等. 北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响: 以“7·21”暴雨为例[J]. 地理学报, 2020, 75 (1): 113-125. (ZHANG Jie, SHI Peijun, YANG Jing, et al. The impact of the urbanization process on rainfall in Beijing: a case study of 7. 21 rainstorm [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (1): 113-125. (in Chinese))
- [14] 张洁祥, 张雨凤, 李琼芳, 等. 1971—2010 年上海市降水变化特征分析[J]. 水资源保护, 2014, 30 (4): 47-52. (ZHANG Jiexiang, ZHANG Yufeng, LI Qiongfang, et al. Analysis of precipitation variation characteristics in Shanghai City over period from 1971 to 2010 [J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (4): 47-52. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 苏爱芳, 施东雷, 葛旭阳. 下垫面对郑州城市强降水的影响: 城市化及地形影响的数值模拟研究[J]. 大气科学学报, 2019, 42 (3): 434-446. (SU Aifang, SHI Donglei, GE Xuyang. Numerical simulation of the influence from urbanization and orography on a severe rainfall event in Zhengzhou [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2019, 42 (3): 434-446. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 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))
- [19] 左家旗, 王泽根, 边金虎, 等. 地表不透水面比例遥感反演研究综述[J]. 国土资源遥感, 2019, 31 (3): 20-28.

- (ZUO Jiaqi, WANG Zegen, BIAN Jinhu, et al. A review of research on remote sensing for ground impervious surface percentage retrieval [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2019, 31 (3): 20-28. (in Chinese))
- [20] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异[J]. 地理学报, 2009, 64 (9): 1083-1092. (CHU Jianting, XIA Jun, XU Chongyu, et al. Comparison and spatial-temporal variability of daily precipitation data of weather stations and rain gauges in Haihe River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64 (9): 1083-1092. (in Chinese))
- [21] 李显凤, 周自江, 李志鹏, 等. 基于江西省水文资料对中国融合降水产品的质量评估[J]. 气象, 2017, 43 (12): 1534-1546. (LI Xianfeng, ZHOU Zijiang, LI Zhipeng, et al. Quality assessment of China merged precipitation product using hydrological data in Jiangxi Province [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43 (12): 1534-1546. (in Chinese))
- [22] 黄少平, 赖亮, 刘海燕, 等. 基于格点场的江西省气象和水文降水资料对比分析[J]. 气象与减灾研究, 2020, 43 (2): 130-136. (HUANG Shaoping, LAI Liang, LIU Haiyan, et al. Comparative analysis of meteorological and hydrological precipitation data based on spatial interpolation in Jiangxi Province [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2020, 43 (2): 130-136. (in Chinese))
- [23] 黄晓东, 刘文锴, 韩宇平, 等. 一种基于 DELSMA 模型的城市不透水面提取方法[J]. 测绘科学, 2019, 44 (10): 79-86. (HUANG Xiaodong, LIU Wenkai, HAN Yuping, et al. A method of estimating urban impervious surface based on DELSMA model [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44 (10): 79-86. (in Chinese))
- [24] HUANG Xiaodong, LIU Wenkai, HAN Yuping, et al. Performance evaluation and comparison of modified spectral mixture analysis method for different images of Landsat series satellites [J]. Sustainability, 2019, 11 (22): 6227.
- [25] 殷健, 梁珊珊. 城市化对上海市区域降水的影响[J]. 水文, 2010, 30 (2): 66-72. (YIN Jian, LIANG Shanshan. Influence of urbanization on regional precipitation in Shanghai City [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30 (2): 66-72. (in Chinese))
- [26] 廖镜彪, 王雪梅, 李玉欣, 等. 城市化对广州降水的影响分析[J]. 气象科学, 2011, 31 (4): 384-390. (LIAO Jingbiao, WANG Xuemei, LI Yuxin, et al. An analysis study of the impacts of urbanization on precipitation in Guangzhou [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31 (4): 384-390. (in Chinese))
- [27] 傅春, 陈先明. 城市化对南昌市降雨变化的影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24 (4): 705-710. (FU Chun, CHEN Xianming. Influence of urbanization on patterns of rainfall in Nanchang [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24 (4): 705-710. (in Chinese))
- [28] 陈秀洪, 刘丙军, 李源, 等. 城市化建设对广州夏季降水过程的影响[J]. 水文, 2017, 37 (1): 25-32. (CHEN Xiuhong, LIU Bingjun, LI Yuan, et al. Impact of urbanization on summer precipitation process in Guangzhou [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37 (1): 25-32. (in Chinese))
- [29] 崔婷婷, 王银堂, 金义蓉, 等. 城镇化进程中苏州城市扩张过程及其对降水规律影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2017 (10): 89-93. (CUI Tingting, WANG Yintang, JIN Yirong, et al. Research on the process of urban expansion in Suzhou City and its influence on precipitation patterns [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017 (10): 89-93. (in Chinese))
- [30] 李恩冲. 中国主要城市扩张下的城市热岛和降水的时空差异研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [31] 江志红, 唐振飞. 基于 CMORPH 资料的长三角城市化对降水分布特征影响的观测研究[J]. 气象科学, 2011, 31 (4): 355-364. (JIANG Zhihong, TANG Zhenfei. Urbanization effects on precipitation over the Yangtze River Delta based on CMORPH data [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2011, 31 (4): 355-364. (in Chinese))
- [32] 陈先明. 城市化进程中南昌市降雨特征变化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [33] 董满宇, 王磊鑫, 李洁敏, 等. 1960—2017 年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55 (4): 468-475. (DONG Manyu, WANG Leixin, LI Jiemin, et al. Spatial-temporal variations in intra-annual precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Luanhe River Basin from 1960-2017 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55 (4): 468-475. (in Chinese))
- [34] ZHANG Lujun, QIAN Yongfu. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17 (2): 146-163.
- [35] 张丽娜, 张育斌, 王军德. 黄土高原降水年内分布差异对旱作果园蒸散特征的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31 (7): 2363-2372. (ZHANG Li'na, ZHANG Yubin, WANG Junde. Effects of annual distribution difference of precipitation on evapotranspiration characteristics of dry orchard in Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31 (7): 2363-2372. (in Chinese))
- [36] 王丽娟. 郑州市 50 年来的气候变化及城市化对其贡献率[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2010.

(收稿日期: 2021-09-27 编辑: 俞云利)