

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.024

1960—2019年成都地区极端降水时空演变特征分析

商守卫¹,王磊之¹,王银堂¹,邓鹏鑫²,盖永伟³,揭仕青⁴

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 3. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029; 4. 抚河水文水资源监测中心, 江西 抚州 344000)

摘要:基于成都市域及周边21个国家级地面气象观测站逐日降水观测资料,通过构建极端降水指标体系,采用去趋势预置白处理(TFPW-MK)方法、经验正交函数分解法(EOF)等,从时程变化和空间变化角度解析1960—2019年成都地区极端降水时空演变特征。结果表明:成都地区极端降水呈下降趋势,尤以湿日降水量、强降水量两个指标下降趋势最为显著,这一特征与我国西南、南方城镇化地区极端降水变化特征有显著区别;成都地区不同极端降水指标具有相似的分布模态,呈“南北型”“东西型”“辐射型”3种分布形式,“南北型”模态是主要分布态势,极端降水由20世纪60年代以北部为中心逐渐在2000年后转移至南部和东南部,“东西型”和“辐射型”模态则反映了地形和城镇化对该地区极端降水的影响;城镇化进程对成都地区极端降水具有一定的增雨效应,2005年为增雨效应突变点,2005年后城区发生极端降水的概率和等级均超过郊区,增加了城区洪涝风险概率。

关键词:极端降水;趋势性;时空演变;经验正交函数;成都地区

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0195-10

Analysis of spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area from 1960 to 2019 // SHANG Shouwei¹, WANG Leizhi¹, WANG Yintang¹, DENG Pengxin², GAI Yongwei³, JIE Shiqing⁴ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Bureau of Hydrology, Yangtze Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. Water Resources Serving Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 4. Fuhe Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Fuzhou 344000, China)

Abstract: Based on daily precipitation data from 21 national ground meteorological observation stations in and around Chengdu City from 1960 to 2019, through constructing an extreme precipitation index system, the trend free pre-whitening Mann-Kendall (TFPW-MK) method and empirical orthogonal function (EOF) method were used to analyze spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Chengdu area in the past 60 years from the perspective of time-history and spatial changes. Results indicate that extreme precipitation in Chengdu area showed a decreasing trend, especially demonstrated by indexes of wet-day precipitation and heavy precipitation. This feature is significantly different from extreme precipitation variation in urbanization areas in southwestern and southern China. Different extreme precipitation indexes have similar distribution modes in Chengdu area, including the modes of north-south type, west-east type, and radiation type. The north-south type is the main distribution mode, and the center of extreme precipitation gradually shifted from northern parts of Chengdu area in the 1960s to the south and southeast after 2000. The distribution modes of west-east type and radiation type reflect the impact of topography and urbanization on extreme precipitation in this area. The urbanization process has a certain precipitation enhancement effect in Chengdu area, the year 2005 was the abrupt change point of the precipitation enhancement effect, and after 2005, the probability and level of extreme precipitation in urban areas were higher than those in suburban areas, increasing the risk of urban flooding.

Key words: extreme precipitation; trend; spatial and temporal evolution; empirical orthogonal function; Chengdu area

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC0408903)

作者简介:商守卫(1997—),男,博士研究生,主要从事防洪除涝、水文模型研究。E-mail: ssw971216@163.com

通信作者:王磊之(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事防洪除涝、城市水文、水资源规划管理研究。E-mail: wanglz@nhri.cn

在气候变化及人类活动双重影响下,区域水文循环过程发生了显著变化^[1-2],极端水文气象事件频发^[3],尤以极端降水影响最大。极端降水的突发性较强^[4],对区域经济社会发展的威胁较大,因此成为当前研究的一项重要课题^[5]。针对全球、流域及区域尺度的极端降水事件已开展了诸多研究,如 Donat 等^[6]研究发现全球极端降水呈显著增加趋势,Feng 等^[7]指出全球 30 个流域极端降水强度呈集约化趋势,Mondal 等^[8]认为极端降水事件的增加进一步加剧了南亚地区城市洪涝风险,Hu 等^[9]发现长江流域的强降水量和频率增加趋势显著,且未来强降水变化频率持续增强。此外,众多学者在极端降水物理成因、气候模式评估、数值模拟等方面开展了系统深入的研究^[10-12]。

近年来,随着我国进入快速城镇化发展阶段,相应的针对城镇化地区极端降水的研究逐渐增多,研究对象以典型城市群和高度城镇化地区为主,如长江三角洲、粤港澳大湾区、京津冀、长株潭城市群等。Zhang 等^[13]发现中国东南城镇化地区极端降水事件频率和强度呈显著增加趋势;Han 等^[14]探讨了长江三角洲城市群的极端降水变化特征,认为该地区重点城市洪涝发生频率呈上升趋势;Li 等^[15]对粤港澳大湾区的极端降水特征进行分析,认为该区域极端降水增加显著。同时,国内众多学者通过城郊雨量站点对比分析发现我国长三角、珠三角、京津冀等高度城镇化地区雨岛效应显著^[16-18]。

以往针对极端降水的研究多集中于我国中东部地区,对西南地区的研究多以省级行政区域开展。成都市作为我国西南中心城市,人口、财富高度集中,其所在四川盆地周围山脉云集,环流封闭独立,气候变化与其他地区存在非同步性^[19],具有自身的特点与规律,导致地形特征对极端降水的影响十分复杂,洪涝灾害频繁发生,社会经济损失巨大,加之成都地区降水和其他区域存在显著差异,因此亟须对该地区极端降水演变特征开展系统研究和评估,以揭示极端降水时空变化规律,为提升该地区及其他地区防洪除涝效益和水资源管理水平提供重要借鉴,也为研究类似气候封闭区的极端降水演变规律提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

成都地区地处四川盆地西部、成都平原腹地(102°54'E~104°53'E、30°05'N~31°26'N),是四川省经济文化中心,GDP 占四川省近 40%,常住人口超 2 000 万,是我国 7 座超大城市之一,也是长江经

济带上游、成渝经济圈的核心区域。该地区地势西高东低,西部为岷山山脉,平均海拔 1 000~3 000 m,东部为四川盆地盆底平原,山地、平原、丘陵俱全,平均海拔为 750 m,地形高差显著(图 1),导致其水、热等气候要素空间分布不均,降水特征复杂。成都地区属典型中亚热带湿润季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均降水量 944.4 mm,降水时空分布极为不均,汛期高度集中,其中夏季降水约占全年的 58.7%,汛期占 81.0%,汛期集中降水给成都地区带来颇为严重的洪涝灾害,如 2013 年的“7·7”洪水,2020 年的“8·16”洪水,其中“8·16”洪水期间,成都市降水量超 700 mm,造成直接经济损失超 37 亿元。

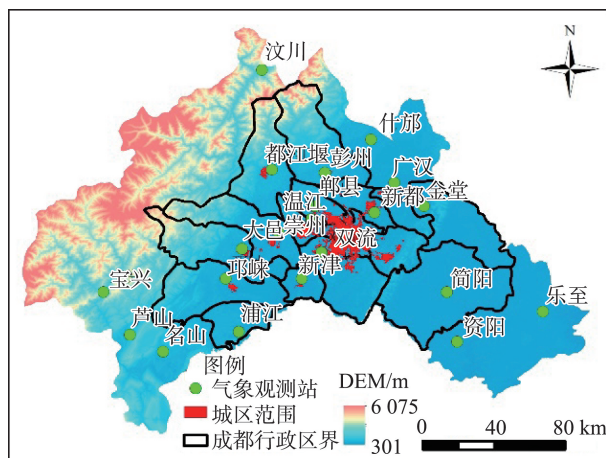


图 1 成都地区概况和气象观测站分布

Fig.1 Overview of Chengdu area and distribution of meteorological stations

1.2 数据来源

采用成都市域及周边 21 个国家级地面气象观测站 1960—2019 年的逐日降水资料(数据来自国家气象科学数据中心 <http://data.cma.cn/>),气象站点分布见图 1,相关资料经过严格的质量控制,具有一致性、可靠性和代表性,成都地区面平均降水量采用泰森多边形法计算。

2 研究方法

2.1 指标选取

极端降水属极端事件的一种,指某降水事件的降水量大于观测值的某一阈值,且对人类活动造成重大影响的事件。目前国际上定义极端降水主要有 5 种方法^[20]:最大值法、绝对临界值法、标准差法、百分位阈值法、隶属度法。在国内,极端降水隶属暴雨的一种,通常指 24 h 连续降水量超过 50 mm 的降水。

针对极端降水具有多种诊断方法,其中应用最

为广泛的属世界气象组织在 1998—2001 年气候变化监测会议中提出的基于日降水极端气候指数^[21-22]的诊断方法,这些指标成为日后极端气候变化研究的统一标准并广泛应用于极端气候研究。本文选取其中 6 个指标作为成都地区的极端降水统计指标,包括湿日总降水量 (PRCPTOT)、降水强度 (SDII)、日最大降水量 (RX1day)、五日最大降水量 (RX5day)、强降水量 (R95p)、极强降水量 (R99p),所选极端降水指标计算方法包括最大值法,绝对临界值法和百分位阈值法。为描述并分析城镇化对极端降水事件的影响,进一步采用极端降水频数和极端降水贡献率 2 个指标,计算方法参考文献[23]。

2.2 趋势检验

采用去趋势预置留白 (trend free pre-whitening Mann-Kendall, TFPW-MK) 检验法对成都地区极端降水指标系列进行趋势检验,该方法可有效克服 Mann-Kendall (M-K) 检验法因自相关性导致分析结果不精确的缺陷^[24]。TFPW-MK 检验法的具体计算步骤如下:

假定原始数据序列 X_t 中的趋势项 T_t 呈线性变化,去掉序列 X_t 的趋势项,得到序列 Y_t :

$$Y_t = X_t - T_t = X_t - \beta t \tag{1}$$

式中: β 为 Sen's 斜率; t 为时间。

计算序列 Y_t 的一阶自相关系数 r_1 ,并对 r_1 进行显著性检验。若 r_1 未通过显著性检验,认为序列 Y_t 是独立的,原始序列 X_t 可直接利用 M-K 检验法进行检验,反之,则需要采取 TFPW-MK 检验法去除序列中的自相关项,构建独立的序列 Y_t' :

$$Y_t' = Y_t - r_1 Y_{t-1} \tag{2}$$

最后将趋势项 T_t 与独立序列 Y_t' 合并得到新序列 Y_t'' ,并利用新序列 Y_t'' 进行 M-K 检验。

2.3 空间模态分析

采用经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 分解方法分析成都地区极端降水的空间变化特征。EOF 方法是空间分布模态分析常用方法,是一种分析矩阵数据的结构特征、提取主要数据特征量的方法,广泛应用于气象和气候研究中。EOF 方法将原多个变量的信息最大限度地集中到少数独立变量的主成分上,主成分的特征值累积方差贡献率越大,表明该主成分占原变量的信息越大,在一定程度上可以反映要素场的空间分布特征。其基本原理^[25]是将时间尺度为 n 的 m 个空间场 $X_{m \times n}$ 分解成时间权重矩阵 $w_{m \times n}$ 和空间特征向量 $V_{m \times m}$ 的乘积,并对分解出的 EOF 进行显著性检验。

依据 North 准则,在 95% 显著性水平下的第 i 个特征根误差为

$$e_i = \lambda_i \sqrt{2/N} \tag{3}$$

式中: λ_i 为第 i 个特征值; N 为样本的有效自由度,本文取值为 60。当相邻特征值满足 $\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq e_i$ 时,则认为两个特征值对应的经验正交函数值是有价值的信号。

3 结果与分析

3.1 极端降水时程变化特征

图 2 给出了成都地区 1960—2019 年各站点极端降水指标变化趋势检验结果。由图 2 可知,成都地区各项极端降水指标基本呈下降趋势,这与甘露等^[19]对四川省的研究结论一致,其中 PRCPTOT、R95p 指标的下降趋势更加显著,相应的显著下降站点数占比较高。PRCPTOT 指标显著下降的站点数占总数的 52.4%,主要位于成都市区西部山前平原

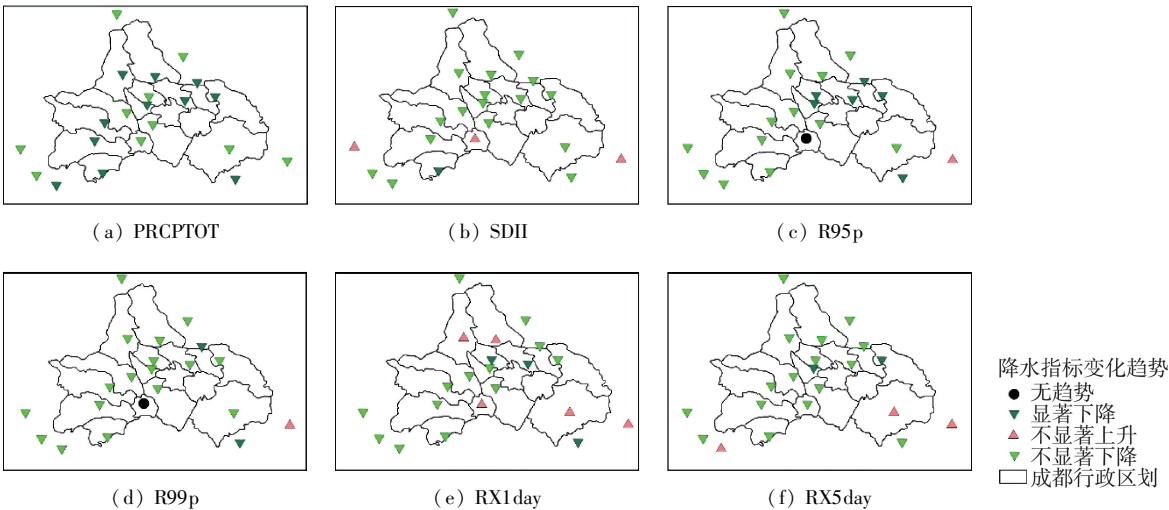


图 2 各站点极端降水指标变化趋势检验结果

Fig. 2 Test results of variation trend of extreme precipitation indexes at each station

及东北;R95p 指标显著下降的站点主要位于成都市区东北;其他指标,如 SDII、R99p、RX1day、RX5day 均呈下降趋势,但整体不显著。

为进一步解析成都地区面平均极端降水指标的时程变化情况,表 1 给出了 1960—2019 年成都地区面平均极端降水指标趋势检验特征要素统计值。由表 1 可见,PRCPTOT 的倾向率、TFPW-MK 统计量 z 值、Sen's 斜率(β) 计算结果分别为 -1.629 mm/a 、 -2.02 、 -2.20 ,R95p 相应计算结果分别为 -1.428 mm/a 、 -1.71 、 -1.69 ,下降趋势显著,其余指标下降趋势不显著。图 3 和图 4 给出了成都地区面平均极端降水指标年际变化过程及 TFPW-MK 趋势检验结果。由图 3 可见,成都地区各面平均极端降水指标与前

表 1 成都地区面平均极端降水指标趋势检验特征要素统计值

Table 1 Statistical values of characteristic elements in trend test of areal average extreme precipitation indexes in Chengdu area				
极端降水指标	倾向率 mm/a	TFPW-MK 统计量 z 值	β	变化趋势
PRCPTOT	-1.629	-2.02	-2.20	↓ *
SDII	-0.008	-1.06	-0.01	↓
R95p	-1.428	-1.71	-1.69	↓ *
R99p	-1.044	-1.51	-1.08	↓
RX1day	-0.143	-1.21	-0.13	↓
RX5day	-0.318	-1.29	-0.25	↓

注:显著性水平取 0.1, ↓ 表示下降趋势, * 表示趋势显著
前述站点变化规律基本一致,呈下降趋势,但是存在明显震荡周期。由图 4 可见,各指标在研究期内 UF

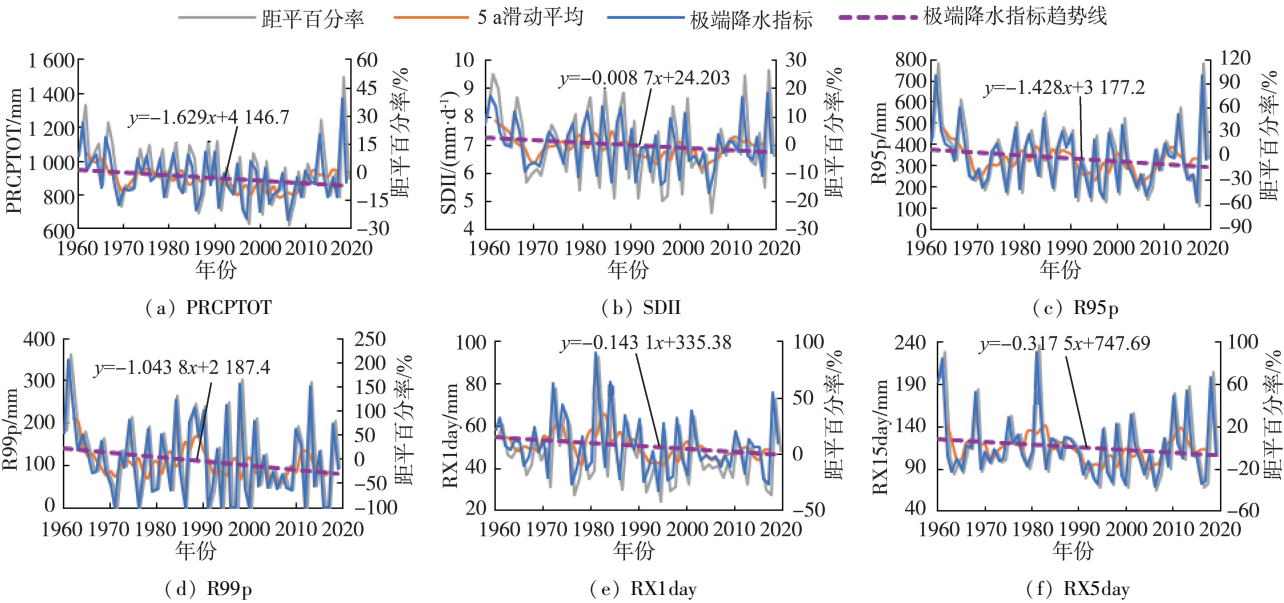


图 3 面平均极端降水指标年际变化

Fig. 3 Interannual variations of areal average extreme precipitation indexes

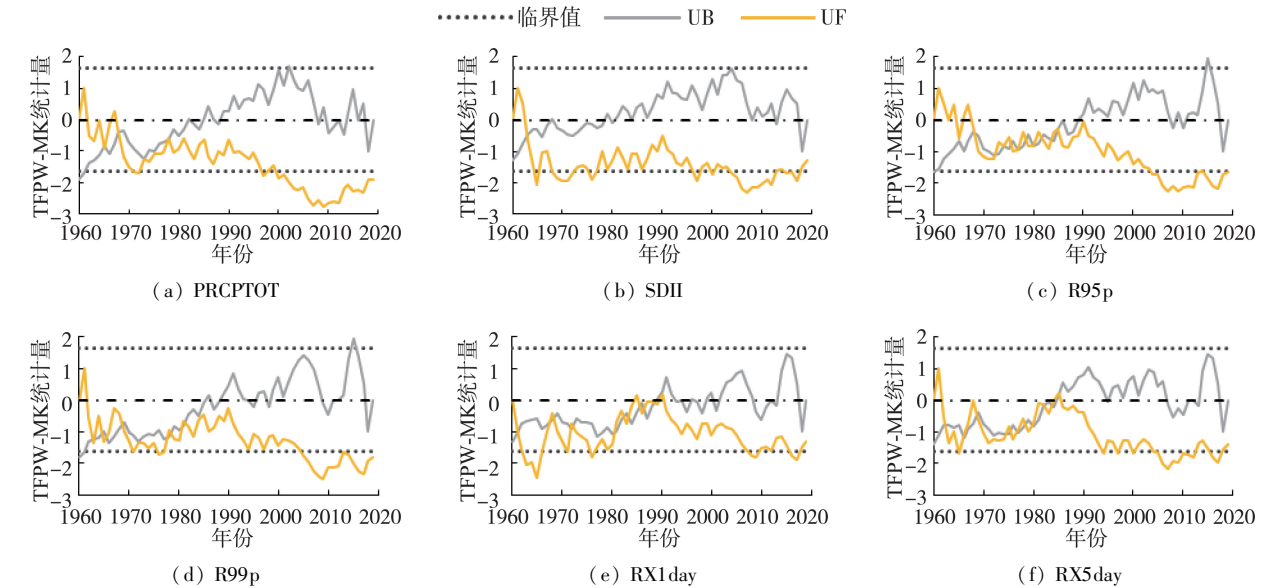


图 4 面平均极端降水指标 TFPW-MK 趋势检验结果

Fig. 4 TFPW-MK trend test results of areal average extreme precipitation indexes

值均小于0,且在2005年前后超出置信区间,表明2005年之后极端降水指标下降趋势较显著。

3.2 极端降水空间变化特征

考虑到不同极端降水指标的物理意义,采用EOF方法对成都地区RX5day和R99p指标进行分解,前5个主成分的特征值累积方差贡献见表2。由表2可见,两个极端降水指标对应的降水量场收敛较快,RX5day、R99p的前3个主成分的特征值累积方差贡献率分别占61.9%和56.7%,均通过了North准则显著性检验,因此前3个主成分的分布模态可表征成都地区极端降水变量场的变率分布结构。

图5和图6给出了不同极端降水指标 EOF 分解前3个主成分的空间分布模态和时间系数。由图5可见,RX5day和R99p对应降水量在前2个主模态

表2 两种极端降水指标前5个主成分特征值
累积方差贡献率

Table 2 Cumulative variance contribution rates of eigenvalues of the first five principal components of two extreme precipitation indexes

极端降水指标	模态	特征值	累积方差贡献率/%	$\lambda_i - \lambda_{i+1}$	e_i
RX5day	1	24 573.7	39.4	16 243.9	4 486.5
	2	8 329.8	52.8	2 617.1	1 520.8
	3	5 712.7	61.9	1 507.1	1 043.0
	4	4 205.6	68.7	1 119.1	767.8
	5	3 086.5	73.6	336.5	563.5
R99p	1	84 387.1	35.4	54 979.6	15 406.9
	2	29 407.5	47.7	7 928.7	5 369.1
	3	21 478.8	56.7	4 448.8	3 921.5
	4	17 029.9	63.8	1 339.7	3 109.2
	5	15 690.2	70.4	4 042.1	2 864.6

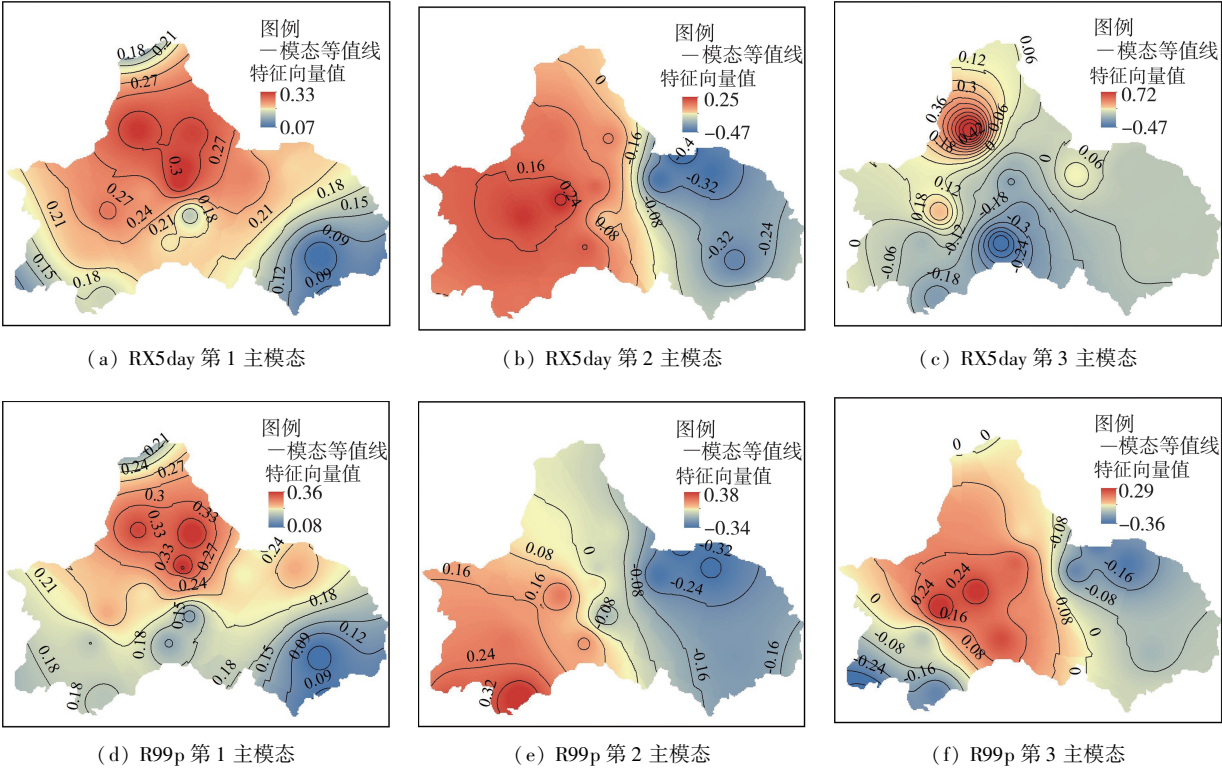


图5 RX5day和R99p前3个主成分空间分布模态

Fig. 5 Spatial distribution modes of the first three principal components of RX5day and R99p

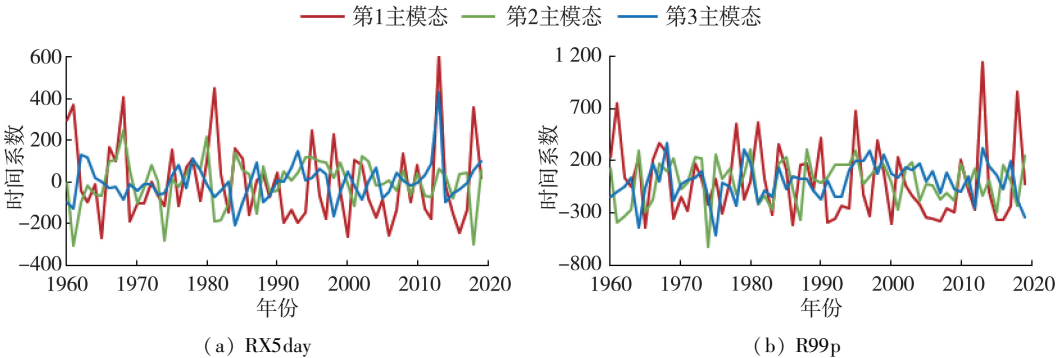


图6 RX5day和R99p前3个主成分分布模态的时间系数

Fig. 6 Time coefficients of the first three principal component distribution modes of RX5day and R99p

上具有相似的分布特征,时间系数的变化趋势也具有较高的一致性。受气象条件和地形的影响,两个指标的极端降水大致呈3类分布形式。

RX5day 和 R99p 的第1主模态特征值的方差贡献率分别为39.4%和35.4%,远高于其他模态,可认为是成都地区极端降水场最主要的空间分布态势,呈现“南北型”的分布特征。第1主模态整体以成都地区北部都江堰、郫都、彭州为中心,且各站点特征向量值均大于0,表明1960—2019年成都地区极端降水变化具有较高一致性。由图6可见,RX5day 和 R99p 的第1主模态1960—1969年时间系数多为正,说明北部都江堰、郫都、彭州地区为成都地区主要降水中心;1970—2000年时间系数呈现正负交替,表明成都地区在此期间内旱涝交替发生;2000年后时间系数以负值为主,表明这段时期上述区域降水较少,极端降水中心转移至南部和东南部的新津、简阳地区。

RX5day 和 R99p 的第2主模态特征值的方差贡献率分别为13.4%和12.3%,该分布大致以彭州、郫都、温江、双流、新津为界。特征向量值向东为负值区,向西为正值区;正值中心出现在西南蒲江、邛崃地区,负值中心出现在简阳地区,呈现出“东西型”反向分布特征,表明成都地区西涝东旱或者西旱东涝的空间分布。两个指标极端降水的特征向量值从东向西依次增大,反映出成都地区极端降水量变化也是从东向西依次递增,也反映出成都地区极端降水受地形影响的分布态势。第2主模态历年的时间系数表明,该模态下东西部降水丰枯变化交替进行,且具有一定的周期特征。

RX5day 和 R99p 的第3主模态特征值的方差贡献率分别为9.2%和9.0%,两个指标的模态分布差异较大。RX5day 第3主模态主要以都江堰为中心,但其时间系数整体远小于第1和第2主模态,且变化幅度不大,表明RX5day 第3主模态的分布态势并不显著。R99p 第3主模态主要以彭州、温江、新津为中心,呈“辐射型”分布,表明在该区域形成明显的“雨岛或干岛”特征。姚豫奇等^[26-27]通过采用不同时期土地利用数据耦合单层城市冠层WRF(weather research and forecasting)模型发现,成都地区城镇化上风区降水量减少,下风区降水量呈现增加趋势,降水中心主要以成都地区城区西部温江、双流、新津为主,这与R99p 第3主模态具有一定的相似性。因此,R99p 第3主模态进一步反映出成都地区城镇化对极端降水空间分布差异的影响。1985年后R99p 第3主模态的时间系数多为正,且逐渐超过第2主模态的时间系数,表明以大邑、新津、温

江、双流为中心的极端降水呈增加趋势,雨岛效应明显,且成都地区强降水量有转向第3主模态分布的态势。

3.3 城郊极端降水演变差异

以成都地区社会经济数据及下垫面数据对各气象观测站进行城、郊站点划分^[28],筛选出双流、温江站分别作为城区站和郊区站。截至2015年,双流站周围人工建筑面积占比为84.4%,海拔高度为494.6m;温江站周围人工建筑面积占比为37.6%,海拔高度为547.7m。从城、郊气象观测站极端降水指标长系列对比、不同发展阶段对比两个角度,分析了城郊极端降水指标演变的差异。

3.3.1 城、郊站点长系列极端降水指标对比

图7给出了成都地区城、郊气象观测站极端降水指标变化过程。由图7可见,1960—2019年双流、温江站的多年平均PRCPTOT分别为876.3mm、893.5mm,SDII分别为9.9mm/d、10.0mm/d,R95p分别为380.9mm、408.7mm,R99p分别为135.6mm、151.6mm,可见城区站极端降水指标的降水量和降水强度明显小于郊区站。由图7(c)(d)可见,城、郊站的R95p和R99p均呈下降趋势,但城区站下降速率明显小于郊区站,1960—2005年两站R99p的差距不断缩小,2005年双流站的R99p开始超过温江站,此后,R95p和R99p的城郊差异分别以1.990mm/a、0.784mm/a速率增加。双流站和温江站的RX1day多年平均值分别为90.7mm、98.5mm,双流站和温江站的RX5day多年平均值分别为152.8mm、170.3mm,温江站的RX1day和RX5day大于双流站。由图7(e)(f)可见,1960—2019年双流站RX1day和RX5day的变化速率明显小于温江站,但在2005年前后,双流站的RX1day和RX5day超过温江站,且在2005年之后,两站的差异分别以0.378mm/a、0.651mm/a的速率呈增加趋势。结合极端降水时程变化分析发现,成都地区极端降水量整体呈现显著下降趋势,由图7(a)(e)可见,双流站的PRCPTOT和RX1day不减反增,综合表明,在成都地区极端降水量呈现总体下降的气候背景下,城镇化进程对极端降水具有一定的增雨效应。

为进一步确定成都地区极端降水城郊差异突变年份,通过计算成都地区极端降水严重度指数(extreme precipitation severity index,EPSI)^[29]进一步分析极端降水的城郊差异特征。由图8(a)可见,成都地区极端降水的城郊差异呈现增长的态势,且在2005年之后城镇化效应凸显,极端降水EPSI城郊差异值多为正值,表明成都地区城镇化对极端降水的影响进一步加深。图8(b)为成都地区极端降水

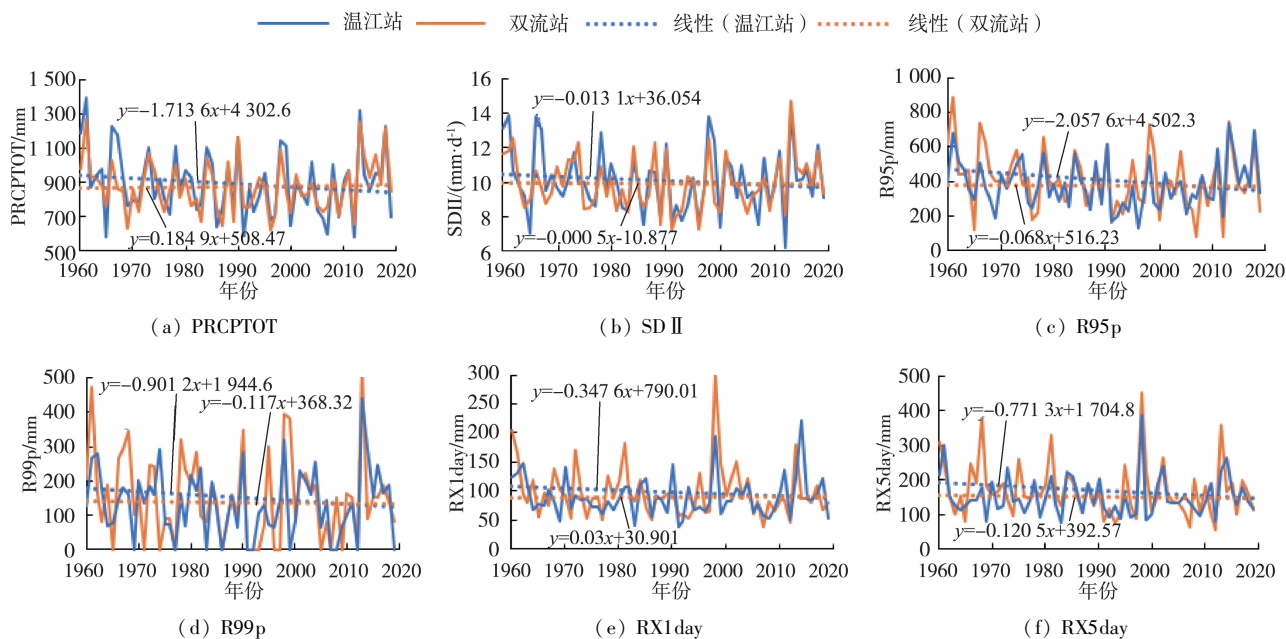
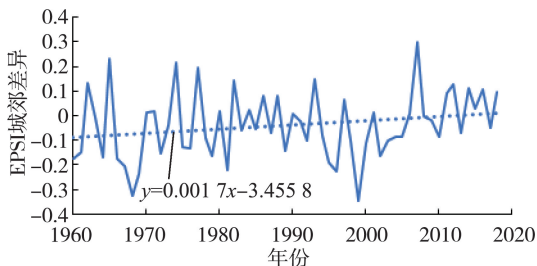


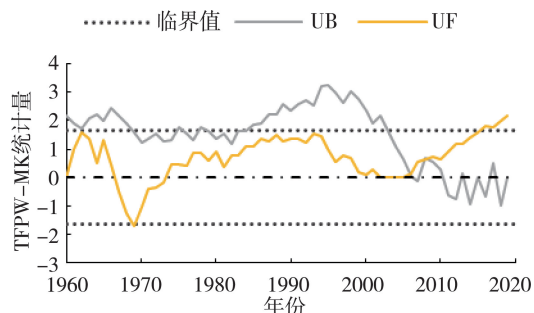
图7 城、郊气象观测站极端降水指标变化过程

Fig. 7 Variation processes of extreme precipitation indexes at urban and suburban meteorological stations

城郊差异的 TFPW-MK 趋势检验与突变分析结果。由图 8(b) 可见, 1960—1973 年极端降水城郊差异呈现减弱的趋势, 1974 年之后呈现增强的趋势, 表明成都地区的城镇化效应在 1974 年之后开始显现, 并在 2015 年后显著增强。成都地区极端降水城郊差异的突变发生在 2005 年, 这与成都地区城镇化发展阶段较为吻合^[29]。综上, 城镇化进程对成都地区极端降水具有一定的增雨效应, 且 2005 年是城镇化增雨效应的突变点。



(a) EPSI 城郊差异



(b) TFPW-MK 趋势检验

图8 极端降水 EPSI 城郊差异及 TFPW-MK 趋势检验结果

Fig. 8 Urban and suburban differences of EPSI of extreme

precipitation and TFPW-MK trend test results

3.3.2 城、郊站点不同阶段极端降水指标对比

以 2005 年作为分界, 研究成都地区不同城镇化阶段极端降水变化情况。表 3 给出了成都地区不同阶段城、郊站点除 SDII 外极端降水指标对比情况。在极端降水发生频次方面, 1960—2004 年双流站极端降水频次低于温江站, 而在 2005 年后, 双流站的极端降水发生频次大于温江站, 其中尤以 R95p 最为显著。在极端降水量和极端降水贡献率方面, 城、郊站点亦表现出相同的趋势, 即 2005 年后, 双流站的多年平均极端降水量和极端降水贡献率都比温江站大, 其中极端降水量以 RX1day 最为显著, 贡献率以 R95p 最为显著。上述分析表明, 在此期间对于不同极端降水指标而言, 城镇化对城区极端降水发生频次、极端降水量以及贡献率均具有增大作用。

为了进一步分析城镇化对极端暴雨事件的影响, 进一步利用 R95p 和 R99p 两个指标进行分析, 对于强降水事件, 城区站点比郊区站点增加约 14.7%, 而对于极强降水事件几乎没有增加。城镇化对极端降水量增加效应也较为显著, 在 95% 和 99% 阈值条件下城区站点比郊区站点分别增加约 12.3% 和 6.0%; 在极端降水贡献率方面, 城区站点比郊区站点分别增加约 11.5% 和 6.5%。总体而言, 过去 60 年间, 成都地区郊区更容易发生极端降水, 郊区站点极端降水发生频次、极端降水量以及贡献率均高于城区站点, 但在 2005 年后, 城区的增雨效应显著, 城区发生极端降水的概率和等级超过郊区, 使得城区更加容易暴露于洪涝风险之中。

表3 不同阶段城、郊气象观测站极端降水指标对比

Table 3 Comparison of extreme precipitation indexes between urban and suburban meteorological stations in different stages

指标	时间段	极端降水频次		频次 比值	极端降水量/mm		降水量 比值	极端降水贡献率		贡献率 比值
		双流站	温江站		双流站	温江站		双流站	温江站	
PRCPTOT	1960—2004 年	88.267	88.933	0.993	865.4	899.4	0.962			
	2005—2019 年	88.800	87.533	1.015	909.2	875.5	1.038			
	1960—2019 年	88.400	88.533	0.998	876.3	893.5	0.980			
R95p	1960—2004 年	7.489	8.022	0.934	369.4	421.7	0.876	0.406	0.440	0.922
	2005—2019 年	8.333	7.267	1.147	415.3	369.9	1.123	0.431	0.386	1.115
	1960—2019 年	7.700	7.833	0.983	380.9	408.7	0.932	0.412	0.427	0.966
R99p	1960—2004 年	1.600	1.622	0.990	136.5	160.4	0.851	0.147	0.158	0.927
	2005—2019 年	1.467	1.467	1.000	132.9	125.3	1.060	0.130	0.122	1.065
	1960—2019 年	1.567	1.583	0.989	135.6	151.7	0.894	0.143	0.149	0.955
RX1day	1960—2004 年	89.7	103.7	0.865	0.103	0.113	0.905			
	2005—2019 年	93.4	82.6	1.131	1.001	0.094	1.076			
	1960—2019 年	90.7	98.5	0.921	0.102	0.109	0.942			
RX5day	1960—2004 年	153.5	177.3	0.866	0.174	0.195	0.896			
	2005—2019 年	150.5	149.3	1.008	0.165	0.165	1.001			
	1960—2019 年	152.8	170.3	0.897	0.172	0.188	0.919			

3.4 成都地区极端降水特征与其他地区对比

对比本文研究成果与其他地区关于极端降水的研究成果,可发现两个比较明显的差异:① 成都地区极端降水呈下降趋势,这与我国南方其他城镇化地区极端降水变化具有明显的差异^[30-31],甚至与西南城镇化地区也有所不同^[32],究其原因,成都地处四川盆地中部,地形起伏较大,大气环流相对封闭,导致成都地区气候变化与其他区域存在非同步性^[19];② 成都地区郊区站点的降水量明显高于城区站点,这与所选择的郊区站点温江站位于城市下风向有一定的关系^[33],但这并不妨碍城镇化对成都地区极端降水具有增强效应的结论。温江站不同极端降水指标下降趋势明显大于双流站,表明城镇化缓解了成都地区降水的下降趋势,这与众多学者针对城镇化效应研究的结论相一致^[34-36]。

4 结 论

a. 成都地区极端降水整体呈现下降趋势,且在2005年后趋势显著,其中湿日降水量、强降水量两个指标呈显著下降趋势,下降显著的站点主要集中在成都市区西部山前平原和东北,这一特征与我国南方及西南城镇化地区的极端降水变化特征具有显著差异。

b. 成都地区不同极端降水指标具有相似的分布模态,呈“南北型”“东西型”“辐射型”3种分布。其中第1主模态是主要分布态势,反映了成都地区降水由20世纪60年代以北部都江堰、郫都、彭州为中心,逐渐在2000年后转移至南部和东南部新津、简阳地区;第2和第3主模态反映了地形和城镇化对极端降水的影响。

c. 城镇化对成都地区极端降水空间分布产生显著影响,对城区极端降水发生频次、极端降水量以及贡献率具有增大作用。2005年是成都地区城镇化增雨效应的突变点,2005年后城区极端降水逐步超过郊区,城镇化对极端降水影响进一步加大,城区和郊区发生极端降水的概率和等级差异增大,使得城区更容易暴露于极端洪涝的风险之中。

参考文献:

[1] HE Yi, QIU Haijun, SONG Jinxi, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,51:101729.

[2] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(7):779-790. (in Chinese))

[3] 张菁,张珂,王晟,等. 陕甘宁三河源区1971—2017年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):288-294. (ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(3):288-294. (in Chinese))

[4] PFAHL S, O' GORMAN P A, FISCHER E M. Understanding the regional pattern of projected future

- changes in extreme precipitation [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 423-427.
- [5] 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))
- [6] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(5): 508-513.
- [7] FENG Xin, WANG Zhaoli, WU Xushu, et al. Changes in extreme precipitation across 30 global river basins [J]. *Water*, 2020, 12(6): 1527.
- [8] MONDAL S K, WANG Yanjun, ZHAI Jianqing, et al. Projected urban exposure to extreme precipitation over South Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153664.
- [9] HU Mulan, DONG Manyu, TIAN Xiangyou, et al. Trends in different grades of precipitation over the Yangtze River Basin from 1960 to 2017 [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(3): 413.
- [10] 郑江禹, 张强, 史培军, 等. 珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 283-291. (ZHENG Jiangyu, ZHANG Qiang, SHI Peijun, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation regimes and related driving factors in the Pearl River Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 283-291. (in Chinese))
- [11] 刘家宏, 骆卓然, 张永祥, 等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 100-105. (LIU Jiahong, LUO Zhuoran, ZHANG Yongxiang, et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 100-105. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] ZHANG Dalin. Rapid urbanization and more extreme rainfall events [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(7): 516-518.
- [14] HAN Longfei, XU Youpeng, PAN Guangbo, et al. Changing properties of precipitation extremes in the urban areas, Yangtze River Delta, China, during 1957-2013[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(1): 437-454.
- [15] LI Yanni, WANG Weiwen, CHANG Ming, et al. Impacts of urbanization on extreme precipitation in the Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area[J]. *Urban Climate*, 2021, 38: 100904.
- [16] 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))
- [17] 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))
- [18] 郑祥芳, 王在文, 高华. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响[J]. *气象*, 2013, 39(12): 1635-1641. (ZHENG Zuofang, WANG Zaiwen, GAO Hua. Characteristics of extreme precipitation events in summer and its effect on urbanization in Beijing area [J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(12): 1635-1641. (in Chinese))
- [19] 甘露, 刘睿, 冀琴, 等. 四川省极端降水事件时空演变特征[J]. *山地学报*, 2021, 39(1): 10-24. (GAN Lu, LIU Rui, JI Qin, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of extreme precipitation in Sichuan Province, China [J]. *Mountain Research*, 2021, 39(1): 10-24. (in Chinese))
- [20] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. *灾害学*, 2017, 32(2): 165-174. (KONG Feng, SHI Peijun, FANG Jian, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change [J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 165-174. (in Chinese))
- [21] ZHANG Xuebin, ALEXANDER L, HEGERL G C, et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data [J]. *WIREs Climate Change*, 2011, 2(6): 851-870.
- [22] 陈晓晨, 徐影, 姚遥. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估[J]. *大气科学*, 2015, 39(6): 1123-

1135. (CHEN Xiaochen, XU Ying, YAO Yao. Changes in climate extremes over China in a 2° C, 3° C, and 4° C warmer world [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(6): 1123-1135. (in Chinese))
- [23] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲, 等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 161-173. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 161-173. (in Chinese))
- [24] STORCH H, NAVARRA A. Analysis of climate variability: applications of statistical techniques [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995: 205-220.
- [25] 魏伊宁, 李勋贵, 李芳. 黄河上游径流丰枯空间分布特征及其影响因素[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 103-113. (WEI Yining, LI Xungui, LI Fang. Spatial distribution characteristics and influencing factors of wet and dry of runoff in upper reaches of the Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 103-113. (in Chinese))
- [26] 姚豫奇, 张宇, 曾钰婷, 等. 成都地区城市化对气候影响的模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(3): 240-252. (YAO Yuqi, ZHANG Yu, ZENG Yuting, et al. Simulation study of urbanization impact on climate in Chengdu [J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(3): 240-252. (in Chinese))
- [27] 赵旋, 吴遥, 冯勇, 等. 成都城市化发展对局地气候的影响[J]. 高原山地气象研究, 2021, 41(4): 100-107. (ZHAO Xuan, WU Yao, FENG Yong, et al. Influence of Chengdu urban development on local climate [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2021, 41(4): 100-107. (in Chinese))
- [28] 何玉秀, 许有鹏, 李子贻, 等. 城镇化对极端降水的影响及其贡献率研究: 以太湖平原地区为例[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 262-271. (HE Yuxiu, XU Youpeng, LI Ziyi, et al. The impacts and its contribution rate of urbanization on extreme precipitation: a case study in the Lake Taihu Plain region [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 262-271. (in Chinese))
- [29] 胥向阳, 伍世代, 叶尚钰. 成都近三十年城市建成区演变特征及驱动力分析[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 290-298. (XU Xiangyang, WU Shidai, YE Shangyu. Evolution characteristics of urban built-up areas in Chengdu and its driving forces in recent 30 years [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2021, 42(3): 290-298. (in Chinese))
- [30] 杜海波. 全球气候变化背景下东北地区极端气候事件研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [31] 许钦, 叶鸣, 蔡晶, 等. 1956—2018 年太湖流域降水统计特征及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 127-132. (XU Qin, YE Ming, CAI Jing, et al. Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 127-132. (in Chinese))
- [32] 付铁文, 徐宗学, 陈浩, 等. 粤港澳大湾区 1961—2014 年降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 56-65. (FU Tiewen, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on spatiotemporal evolution characteristics of precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1961 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 56-65. (in Chinese))
- [33] 江洁, 周天军, 张文霞. 近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 707-724. (JIANG Jie, ZHOU Tianjun, ZHANG Wenxia. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the main river basins of China in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3): 707-724. (in Chinese))
- [34] SHEM W, SHEPHERD M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: two numerical model case studies [J]. Atmospheric Research, 2009, 92(2): 172-189.
- [35] 彭莉莉, 罗伯良, 孙佳庆. 长株潭城市化进程中极端降水变化特征[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 191-196. (PENG Lili, LUO Boliang, SUN Jiaqing. Variation of extreme precipitation during the urbanization of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. Torrential Rain and Disasters, 2015, 34(2): 191-196. (in Chinese))
- [36] 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))

(收稿日期: 2022-05-09 编辑: 施业)

