J. Lake Sci.(湖泊科学), 2022, **34**(1): 262-271
DOI 10.18307/2022.0121
© 2022 by *Journal of Lake Sciences*

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*

何玉秀,许有鹏,李子贻,王　强**,陆　苗,高　斌
(南京大学地理与海洋科学学院,南京 210023)

摘　要: 城镇化背景下极端降水事件频发,洪涝灾害问题日益突出,探讨城镇化对极端降水的影响已成为热点与难点问题. 本文以长江下游太湖平原地区为例,基于区内 40 个雨量站长序列的逐日资料(1976－2015 年),结合城镇化下土地利用/覆被和社会经济等数据,对比分析了不同城镇化阶段极端降水相关指标的时空变化规律,并定量评估不同城镇化水平对极端降水影响的贡献率. 结果表明:(1)从极端降水时空变化特征来看,极端降水频率和极端降水强度总体呈上升趋势,且高城镇化水平地区的极端降水量级指标多呈现显著上升趋势.(2)整体上,城市地区城镇化对表征极端降水量级和日数的指标有显著强化作用,对大部分指标的贡献率都在 11% 以上,最高可达 53%;而城郊地区城镇化对极端降水日数指标产生一定抑制作用. 城镇化使得城市地区极端降水变化较农村地区更加剧烈,城郊地区降水更加集中,洪涝风险增大.
关键词: 极端降水;贡献率;城镇化;太湖平原地区

The impacts and its contribution rate of urbanization on extreme precipitation, 1976－2015: A case study in the Lake Taihu Plain region*

He Yiuxiu, Xu Youpeng, Li Ziyi, Wang Qiang**, Lu Miao & Gao Bin
(*School of Geography and Ocean Science*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023, *P.R.China*)

Abstract: The rapid development of urbanization and other human activities are closely related to the frequency and intensity of extreme precipitation. It is of great significance to explore the impact of urbanization on extreme precipitation. Taking the Lake Taihu Plain region as an instance, based on the daily rainfall data of 40 stations during 1976－2015 as well as land utility and cover change and socio-economic data in the region, this paper revealed the temporal and spatial variations of extreme precipitation indices in different urbanization stages, and quantitatively assessed the contribution rate of urbanization. The results indicated that: (1) Except for consecutive dry days and consecutive wet days, the extreme precipitation indices exhibited upward trends. Moreover, most stations with significant increase in magnitude indices were located in highly urbanized areas. (2) On the whole, the urbanization effect in urban stations promoted the intensity and frequency of precipitation with the contribution rate above 11% positively; while the urbanization effect in urban and suburban stations showed different effects on the frequency and duration of extreme precipitation. In summary, the variations of extreme precipitation in urban areas are much more intense than in rural areas, resulting in more concentrated precipitation in suburban areas and increased flood risk.
Keywords: Extreme precipitation; contribution rate; urbanization; Lake Taihu Plain region

随着社会经济快速发展,我国城镇化率从 1949 年的 10.64% 提高到 2019 年的 60.60%,城镇化进程的快速推进等人类活动与极端降水频率和强度变化存在一定关联[1-3]. 伴随着快速城镇化进程,极端降水事件频发,洪涝灾害问题日益凸显,使城市社会经济和生态系统等方面的健康发展遭受胁迫[4]. 因此,探讨城镇化

* 2021-03-23 收稿;2021-05-12 收修改稿.
国家重点研发计划项目(2018YFC1508201)、国家自然科学基金项目(42101020)和江苏省水利科技项目(2021010,2019028)联合资助.
** 通信作者;E-mail:wqianghy@nju.edu.cn.

对极端降水的影响并定量评估其贡献率已成为地理、水文、气象等学科研究的热点与难点问题.

针对城镇化对极端降水事件的影响研究,国内外学者开展了许多有益探索. 针对大型城市群地区城镇化对极端降水的影响,国内外学者通过对比分析城乡站点极端降水变化情况,计算城镇化对气象指标的贡献率来检测城镇化带来的气象水文效应[5-7],发现高度城镇化地区较周边地区年极端降雨量和极端降水强度显著增加,极端降水的区域性和局地性明显[8-12]. 太湖流域是我国经济最为发达、城镇化水平最高、发展最为迅速的地区之一,该地区的城镇化对降雨的影响也得到了较大关注,相关研究主要通过多维度、多种手段进行分析. 研究结果表明,在时间尺度上,随着城镇化速度的加快,太湖流域多种极端降水指数均呈增加趋势,表明城镇化存在增雨效应[13-14];在空间尺度上,太湖流域相关研究发现西部山地对于降水有强化作用,而流域东部平原降水受城镇化影响更为明显[15-17],且城镇化程度越高,降水越复杂[18].

目前已有的针对城镇化对降雨的影响研究多局限于定性分析,而定量评估较少. 并且目前的研究方法也存在一定局限性. 首先,目前对不同程度城镇化级别的界定并不明确,对城镇化水平进行分类多采用近年来的土地利用和人口经济等数据,难以反映城镇化过程中农村站点向城市站点的转变,容易夸大或低估城镇化的影响. 采用时变数据对站点进行动态分类能更加精确地反映不同城镇化水平对极端降水的贡献. 其次,由于极端降水影响因素较为复杂,同时受到了地形、天气系统等因素影响,目前尚难以定量厘清不同城镇化水平对极端降水变化影响的贡献率. 缩小研究区域范围,锁定相似的地形特征、环流季风类型,有助于识别城镇化因素引起的局地极端气候变化.

因此,本研究以地形起伏较小、暴雨洪涝频发、高度城镇化的太湖平原地区为例,基于平原区长时间序列实测降水资料,结合城镇化下土地利用、人口、经济两期数据识别动态城镇化因素,定量揭示不同城镇化背景下城镇化对极端降水影响的贡献率,研究结果将为太湖平原及类似快速城镇化地区防洪减灾提供一定科学参考.

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

太湖流域位于中国东部长江下游三角洲地区,总面积达 36895 km^2,整个流域地形以平原为主(平原地区约占总面积的 2/3). 气候属夏季高温多雨、冬季温和少雨的亚热带季风气候. 春夏之交常有“梅雨”天气,全年 60% 的降雨量集中于 5—9 月,多年平均降雨量达 1189 mm,冬季多偏北风,寒冷干燥. 依据流域地形地貌特点以及河网水系布局,整个流域被划分为 8 个水利片区.

为尽量平衡非城镇化因素对极端降水产生的影响,从而对非城镇化因素进行有效剥离,本文选取位于太湖平原地区的阳澄淀泖区、武澄锡虞区和杭嘉湖区 3 个水利片区进行研究(图 1). 太湖平原地区经济发达,人口密集,对暴雨洪水灾害异常敏感,极端暴雨洪水事件的频繁发生给区域居民生命财产安全带来严重威胁[19-20],在此开展城镇化对极端降水的影响研究将对构建区域洪涝风险防范体系有重要参考价值.

1.2 数据来源

研究数据主要包括降雨数据、下垫面土地利用/覆被数据和社会经济数据. 降雨数据为太湖平原地区 40 个雨量站点 1976—2015 年的逐日数据;土地利用/覆被数据包括 1995 和 2015 年两期,空间分辨率为 1 km;社会经济数据分别包括格点化的国内生产总值(GDP)密度数据和人口密度数据. 土地利用/覆被和社会经济数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/Default.aspx),太湖平原地区典型城市(常州、无锡、苏州、嘉兴、湖州和杭州)的人口经济数据来源于各市统计年鉴.

1.3 研究方法

1.3.1 站点划分 DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise)[21]是一种非参数的基于密度的聚类方法,用参数邻域半径(Eps)和邻域点数(MinPts)来描述邻域样本分布紧密程度. 其中,Eps 描述了某一样本的邻域距离阈值,MinPts 表示 Eps 邻域内所包含的样本个数. MinPts 的值一般取 4,Eps 则需依据样本数据进行粗略的估计. DBSCAN 的实现过程为:通过检查数据集内任一数据点 Eps 范围内所包含数据点个数来判断是否建立数据簇,在该数据点 Eps 范围内的数据点个数不小于 MinPts 时建立数据簇,再搜索此数据簇密度可达的数据点进行合并,即从该点密度可达的所有数据点形成一个聚类,而不属于任何

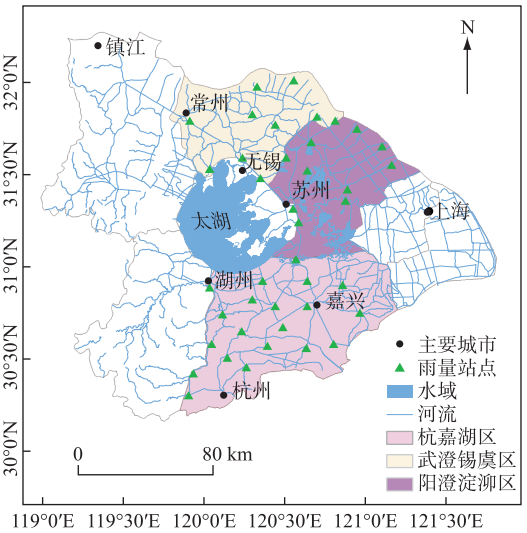

图 1 研究区域和雨量站点分布

Fig.1 Study area and the distributions of rainfall stations

簇的数据点标记为噪声点. 根据研究数据属性值的相似性聚类得到的分类结果更具层次性,能最大程度体现各类别之间的差异性. 本文利用 DBSCAN 聚类算法对各类站点的建设用地占比、人口密度和 GDP 密度数据进行聚类,从而得到不同的簇,不同的簇则代表不同城镇化级别.

1.3.2 极端降水指数及其变化趋势　依据太湖平原地区气候特征,并考虑到资料序列长短以及时间连续性,统一选取各雨量站点 1976－2015 年的逐日降水数据开展分析. 本文选取了反映极端降水日数和极端降水量级的两类极端降水指数,极端降水日数指标从日数上表征极端降水事件的频率和持续时间,而极端降水量级指标表征极端降水事件的强度,具体信息如表 1 所示. 各极端降水指数均使用 RClimDex 算法[22]来计算. 非参数 Mann-Kendall(M-K)统计检验和 Sen's 斜率估计是气候水文资料趋势检验中常用的方法,用来检验降水的长期变化趋势(上升或者下降趋势). 并且 M-K 检验不需要时间序列存在正态性或者线性关系[23-25],具有较强的适用性. 本文采用非参数 M-K 检验法和 Sen's 斜率等方法,分析太湖平原地区 1976－2015 年极端降水指数的时空变化趋势.

表 1 极端降水指数定义

Tab.1 Definition of the extreme precipitation indices

类型	指数缩写	指数名称	指数定义	指数单位
极端降水日数指标	CDD	连续无雨日数	日降水量<1 mm 的最长连续日数	d
	CWD	连续有雨日数	日降水量≥1 mm 的最长连续日数	d
	R1 mm	有雨日数	每年日降水量≥1 mm 的总日数	d
	R10 mm	强降水日数	每年日降水量≥10 mm 的总日数	d
	R20 mm	非常强降水日数	每年日降水量≥20 mm 的总日数	d
极端降水量级指标	R95p	强降水量	>95% 分位值强降水之和	mm
	R99p	极端强降水量	>99% 分位值强降水之和	mm
	Rx1day	1 日最大降水量	每年内最大的日降水量	mm
	Rx5day	5 日最大降水量	每年内连续五日的最大降水量	mm
	PRCPTOT	年总降水量	≥1 mm 降水日累计量	mm
	SDII	降水强度	年降水量与降水日数的比值	mm/d

1.3.3 城镇化影响贡献率 城镇化对极端降水的影响主要是由不同城镇化水平站点所处环境差异引起的. 数据序列差异的计算公式为[7]:

$$\Delta D_{ji} = D_j - D_i,\ j = 2,3,\ i = 1,2,\ i < j \tag{1}$$

式中,D_j表示 j 级别城镇化水平站点的极端降水数据系列,D_i表示比 j 级别低的 i 级别城镇化水平站点极端降水数据系列(1、2、3 分别表示农村站、城郊站和城市站). 通过计算不同数据序列差异,有助于剔除其存在的共同变异性,但保留了不同城镇化级别站点数据序列间存在的真实差异. 城镇化效应则通过不同城镇化水平站点数据序列差异的变化趋势 b_{ji}来表示, b_{ji}代表 ΔD_{ji}的 Sen's 斜率. $b_{ji}>0$ 表示城镇化对极端降水事件产生正效应;$b_{ji}=0$ 表示城镇化对极端降水事件无影响;$b_{ji}<0$ 表示城镇化对极端降水事件产生负效应. 城镇化影响贡献率 R 定义为城镇化效应 b_{ji}与变化率 b_j(j 级别站点极端降水 Sen's 斜率)绝对值之比[6]:

$$R_{ji} = \frac{b_{ji}}{|b_j|} \times 100\% \tag{2}$$

式中,R_{31}、R_{21}分别表示城市站和城郊站城镇化对农村站极端降水影响贡献率. 一般来说,R_{ji}的值为<1. $R_{ji}=\pm 100\%$ 表示极端降水事件的变化完全是由城镇化引起的;$R_{ji}>100\%$或 $R_{ji}<-100\%$则表示存在未知的人文或自然因素(如气候变化等)对极端降水产生的影响,这种情况认为 $R_{ji}=\pm 100\%$.

2 研究结果

2.1 不同城镇化级别站点划分结果

太湖平原地区地形差异小,但区内城镇化率变化较快,前期研究表明该区域极端暴雨频率和强度有增加趋势,对区域洪涝灾害产生了较大影响,且其中城镇化因素作用明显. 因此有必要按不同时间尺度对站点城镇化级别进行动态划分,继而进一步探讨城镇化对极端降水的影响程度及其贡献率. 图 2 显示了研究区内 3 个水利片区中的典型城市 1976－2015 年逐年人口城镇化率和 GDP 变化情况. 自 1996 年开始,太湖平原地区经济逐步转入快速平稳发展阶段. 1976－1995 年人口城镇化率增长速率约为 0.57;1996 年以后,随着城市社会经济快速发展,该区域非农业人口比重不断上升,1996－2015 年人口城镇化率增长速率增至 1.64. 从 GDP 来看,前一时期 GDP 增速为 142.44 亿元/a,后一时期增速达 2196.8 亿元/a,后一时期 GDP 增速约为前一时期的 15.4 倍,两个时期 GDP 增速差异显著. 且该区域人口城镇化率和 GDP 前后两个时期数据的均值差异均达 0.01 显著性水平. 基于此,本文以 1996 年为分界点,1976－1995 年和 1996－2015 年分别代表太湖平原地区城镇化发展起步期和城镇化发展快速期.

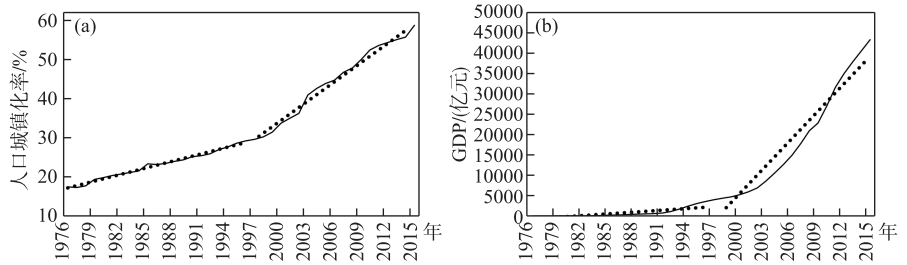

图 2 1976－2015 年太湖平原典型城市人口城镇化率(a)和 GDP(b)情况
(实线表示实际值,虚线表示线性趋势)

Fig.2 Population urbanization rate (a) and GDP (b) of typical cities in the Lake Taihu Plain from 1976 to 2015 (the solid line is the actual value and the dotted line is the linear trend)

为研究不同程度城镇化对极端降水的影响,首先,基于 5 km 缓冲区(半径)[7],分别计算缓冲区内建设用地百分比、人口密度均值、GDP 密度均值来表征不同时期该雨量站点的城镇化程度;再利用 DBSCAN 聚类算法依据建设用地占比将 40 个站点分为城市站、城郊站和农村站,结果如图 3 所示. 在城镇化发展起步期,人口城镇化率较低,经济增速较缓,此阶段高度发达的城市站点较少,城市站点仅苏州、无锡、常州 3 个站

点,城郊站点有 11 个,其余 26 个站点均为农村站点. 到了城镇化发展快速期,各地飞速发展,此时被划分为城市站的站点增加到 7 个,城郊站点增加至 23 个,农村站点减少至 10 个.

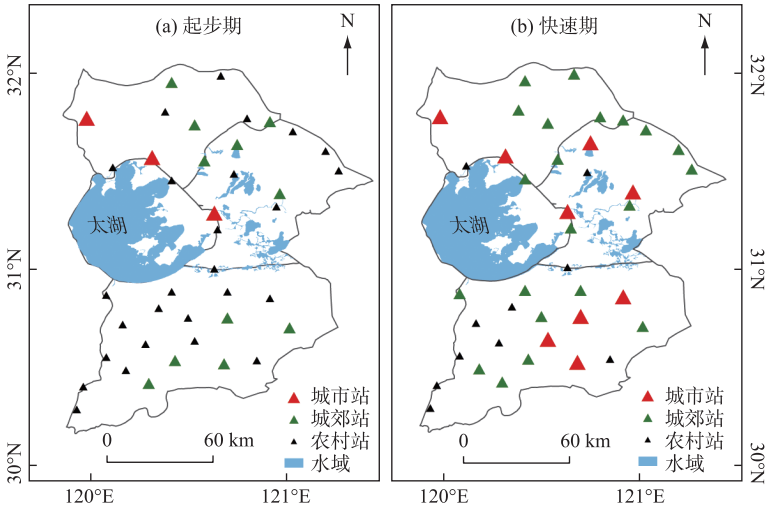

图 3 不同时期不同城镇化级别站点的空间分布

Fig.3 Spatial distributions of stations at different urbanization levels in different periods

2.2 极端降水指数变化特征

本文从不同时空维度分析了各城镇化级别站点极端降水指数变化特征. 从城镇化发展起步期和快速期对比来看(图 4),除连续无雨日数(CDD)外,城镇化发展快速期各级别站点极端降水指数均值基本高于起步期,即极端降水阈值有所增大. 从城镇化程度对比分析来看,对于表征极端降水日数的指标和年总降水量,在起步期与快速期,总体都呈现出农村站大于城市站和郊区站的态势;对于其他表征极端降水量级的指标,则是在起步期城市站较大,而快速期城郊站较大.

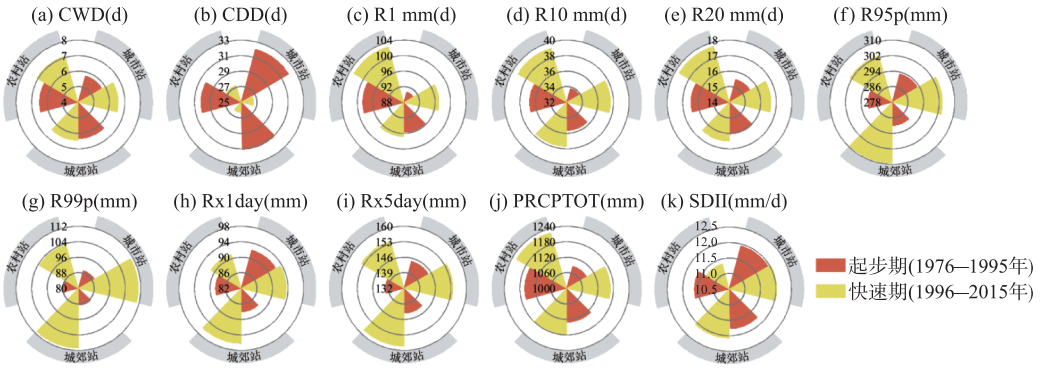

图 4 不同时期各级别站点极端降水指数均值

Fig.4 Mean values of the extreme precipitation indices at different urbanization levels in different periods

图 5 反映了太湖平原地区 1976－2015 年极端降水指数的变化趋势及其空间差异. 从结果来看,对于连续有雨日数(CWD),在平原各地均无明显变化趋势;各站点 CDD 则普遍呈减少趋势,且显著减少的站点主要分布在南北两侧. 表明连续性的干旱在减少,而连续性的降水无大变化. 总的来说,太湖平原与干燥相关的极端事件持续时间有所缩短,南北两侧地区尤其明显. 其次,对于其他极端降水日数指标,有雨日数(R1 mm)倾向于在研究区北部和中部呈增加趋势,在南部则呈减少趋势;部分位于北部站点的强降水日数(R10

mm)呈显著增加趋势;非常强降水日数(R20 mm)则总体呈现不显著增加趋势. 总体来看,太湖平原地区极端降水事件的频率微弱加强,其中强降雨日数最为明显. 对于极端降水量级指标(图 5f~k),强降水量(R95p)、极端强降水量(R99p)、1 日最大降水量(Rx1day)、5 日最大降水量(Rx5day)、年总降水量(PRCPTOT)、降水强度(SDII)整体呈增加趋势,且呈显著增加的站点多位于北部和东南部地区. 研究结果表明,无论是从不同时期极端降水均值变化,还是从极端降水时空变化来看,在不同城镇化时期以及不同空间格局上极端降水的变化特征有一定差异. 随着城镇化发展,太湖平原极端降水事件总体呈现一定上升趋势,具体表现在极端降水频率和强度的增加,而连续无雨日数的减少,结合不同城镇化程度地区对比分析来看,城镇化对极端降水演变趋势发挥一定作用.

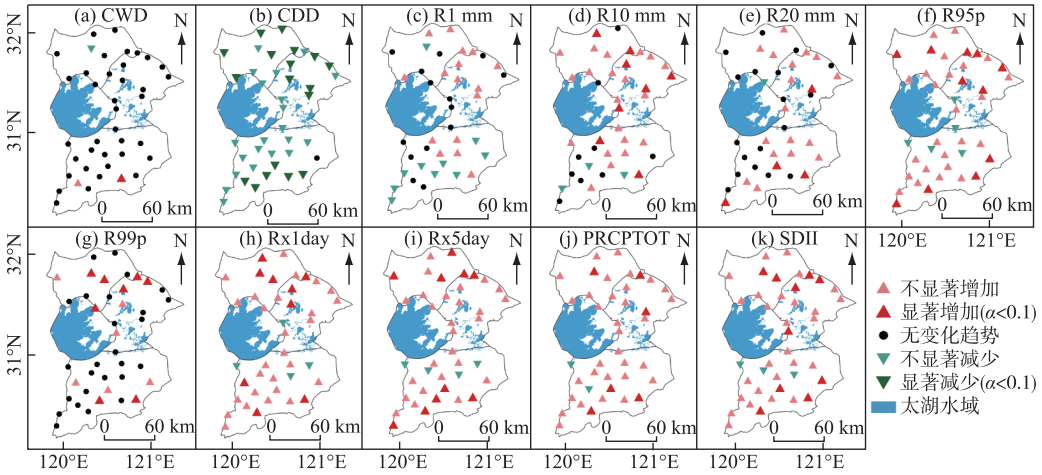

图 5 1976－2015 年极端降水指数的变化趋势

Fig.5 Variation trend of the extreme precipitation indices from 1976 to 2015

2.3 城镇化效应分析

基于太湖平原极端降水指数时空差异,进一步对各级别站点极端降水指数变化趋势进行分析并定量评估了城镇化对其影响贡献率,结果如图 6 所示. 其中城市站数据由 1976－1995 年和 1996－2015 年两部分城市站数据组成,城郊站和农村站亦是如此. 首先对表征极端降水日数的指标,除 CDD 外,各级别站点都呈上升趋势;且城市站变化速率大于农村站,但城郊站变化速率与城市站和农村站关系不明确. 城镇化效应在城市地区多表现为增强作用,城镇化贡献率达 11%以上,说明近年来城市地区极端降水频率和连续性降水的显著增加有 10%以上是由城镇化进程的不断推进(城镇人口比例稳步上升、城市规模持续扩张、城市污染排放增多等)造成的,并且城镇化进一步减少了连续无雨日数的持续时间;在城郊站则多表现为抑制作用,且对各指数的抑制程度差异较大,由此可知城镇化级别不同,对极端降水频率和持续时间可能产生截然不同的效应. 其次对极端降水量级指标而言,总体呈上升趋势,城市站、城郊站和农村站变化速率之间有明显差异,具体表现为城市站和城郊站变化速率均大于农村站. 结果表明,城市站和城郊站城镇化都倾向于对极端降水量级指标产生促进作用,且正向贡献率都在 17%以上.

城镇化对极端降水的影响从城郊地区对比来看,城市地区城镇化促进作用更明显. 城郊地区城镇化影响则表现得更为复杂,其中对 CWD、R1 mm、R20 mm 的弱化程度达 60%以上,值得注意的是其对 PRCPTOT 也有微弱抑制作用,而对其他极端降水量级指标强化程度在 20%左右,但强化程度不及城市站城镇化效应. 城市地区城镇化对 R1 mm 和 R10 mm 的促进作用比对 R20 mm 要更为强势,同时进一步增加极端降水量,容易导致城市地区降水更为频繁,小雨大灾隐患增大. 而城郊地区城镇化抑制极端降水日数,减缓极端降水日数的增速,却对极端降水量产生明显促进作用,致使城郊地区降水更加集中,洪涝风险增大.

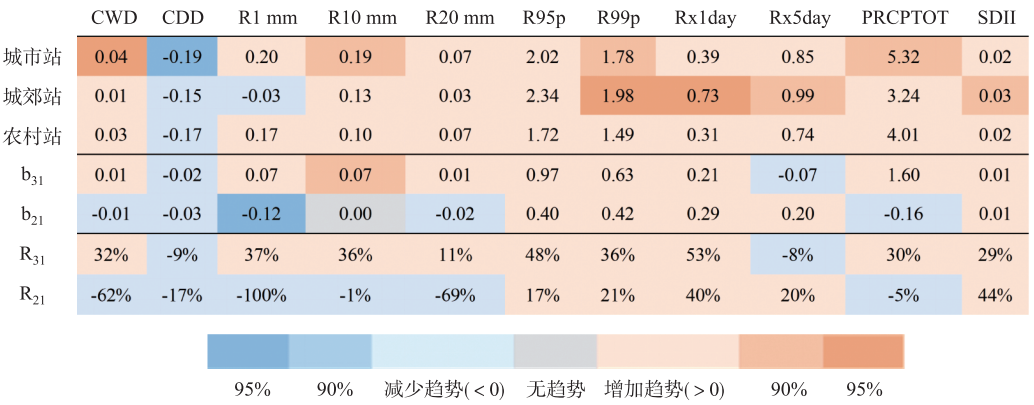

图 6 不同级别站点极端降水指数 Sen's 斜率和极端降水受城镇化影响贡献率(下标 1、2、3 分别代表农村站、城郊站和城市站,b_{ji}代表城镇化效应,R_{ji}代表城镇化影响贡献率)

Fig.6 Sen's slope of extreme precipitation indices at different urbanization levels and the contribution rate of urbanization to extreme precipitation(subscripts 1, 2 and 3 represent rural stations, suburban stations and urban stations, respectively, b_{ji} represents the effect of urbanization, R_{ji} represents the contribution rate of urbanization)

3 结论与讨论

3.1 城镇化发展对极端降水影响特征

季风环流等气象要素、地形要素、人类活动都对极端降水产生不同程度的影响. 随着城镇化的迅猛推进,人类活动领域不断扩大、强度与日俱增,逐渐改变着城市的降水结构[26]. 整个太湖平原地区,地形地势相似,处于同一天气模式控制下,受相同的环流因子影响[27],城镇化发展对其区域下垫面和局地气候产生了深远影响[28]. 城镇化主要通过改变土地覆被和增加人为热排放调节陆气相互作用机制,从而对区域水文产生影响[2,29].

城镇化对区域尺度极端降水产生的剧烈影响与城镇化过程中土地利用类型的大幅转变密切相关[30]. 2000－2010 年长三角地区城镇用地迅速扩张,此阶段扩张速率达 298.19 km^2/a[31]. 太湖平原地区城镇用地的扩张以苏州、无锡、常州等中心城市的集聚为主导作用[32],一方面不透水面代替大量绿色植被,深化城市下垫面与自然下垫面的热力学属性差异,加剧了地表温度异常的变化,同时城市热岛效应促进对流,增强大气不稳定度;另一方面城市建筑密集度激增,加强城市冠层粗糙度,从动力学条件对城市降水系统产生影响,均导致强降水事件多发生于城市和城郊地区[33-35]. 但研究区域、时段、范围、数据资料来源的差异使城镇化效应呈现多元化状态[8,36-38],上述差异反映了下垫面、气候态、海陆因素等的不同,表明城镇化对极端降水的影响是与其他因素相叠加而生效的. 城镇化效应在与不同强度其他因素的堆叠下对城区极端降水呈现出不同程度的驱动或抑制作用. 如就整个京津唐地区而言[7],城镇化对极端降水的作用并不显著,而单就北京而言[10,36],城镇化对极端降水频次和强度产生较大影响. 本研究通过长序列实测降雨资料得出太湖平原地区不同程度的城镇化都对极端降水强度产生一定正向促进作用,城市站和城郊站城镇化对极端降水的贡献率分别达 40% 和 30% 左右,这一结果与长三角和珠三角相关研究结论较为吻合[8,11]. 另外城市居民生产生活排放大量的污染物凝结核,凝结核在大气中形成气溶胶,从物理和化学两方面对城市降水产生不确定影响. 如 Lin 等[38]的研究得出长三角地区城镇化倾向于对极端降水产生抑制作用. 在本研究则体现为城郊地区城镇化对极端降水日数有不同程度的弱化作用.

上述分析可看出,在精细区分不同城镇化背景后,太湖平原地区城镇化效应对极端降水强度产生的显著促进作用与大型城市群地区较为一致,且城镇化水平越高,城镇化效应产生的促进作用越明显. 城镇化发展历程中有多种因素共同作用于极端降水,其具体作用机制因不同下垫面特征而存在一定差异,还需深入

了解. 本文仅从城乡站点极端降水序列差异入手研究城镇化效应,对区域内部土地利用类型转变、建筑群分布、工业污染物排放等影响因子的城镇化效应未区分开来讨论,各因子贡献率的精细化评估值得进一步探索.

3.2 结论

针对城镇化背景下极端降水事件频发及其引发的洪涝灾害日益突出等问题,本研究以我国经济最为发达但遭受洪涝灾害较为严重的太湖平原地区为例,分析了不同城镇化程度地区极端降水的时空变化特征,定量分析了城镇化对极端降水的贡献率. 得到以下主要结论:

1)从不同时期各类站点均值变化来看:极端降水量级指标(R95p、R99p、Rx1day、Rx5day、SDII 等)在高城镇化级别站点均值更大,但极端降雨日数指标(CWD、R1 mm、R10 mm、R20 mm 等)规律相反;同时,各极端降水指数在城镇化发展快速期较起步期有所增大.

2)从时空变化趋势来看:对表征极端降水量级的指标,绝大部分站点都呈增加趋势,且呈显著增加趋势站点多集中在平原北部和东南部较高城镇化水平地区;极端降水日数指标 CWD 无变化趋势,连续无雨日数 CDD 则在大多数站点呈显著下降趋势,R1 mm、R10 mm 和 R20 mm 总体呈上升趋势.

3)从城镇化对极端降水影响贡献率来看:城市站和城郊站城镇化对极端降水量级指标(R95p、R99p、Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、SDII)总体表现为增强作用,其中城市站城镇化效应更加突出,正向城镇化贡献率在 11% 以上,最高可达 53%;城镇化进一步弱化连续无雨日数的持续时间,而对连续有雨日数的持续时间以及极端降水频率则是在城市站体现为促进作用,而在城郊站体现为不同程度的抑制作用.

综上,研究结果表明,城镇化导致城市地区极端降水变化比农村地区更剧烈,且其对极端降水强度的强化作用更为显著,而对城郊地区极端降水频率产生较强抑制作用. 城镇化致使太湖平原地区城市降雨量增多,城郊地区降水更加集中,洪涝风险增大.

4 参考文献

[1] Jiang XL, Luo YL, Zhang DL *et al*. Urbanization enhanced summertime extreme hourly precipitation over the Yangtze River Delta. *Journal of Climate*, 2020, **33**(13): 5809-5826. DOI: 10.1175/jcli-d-19-0884.1.

[2] Yang L, Smith J, Niyogi D. Urban impacts on extreme monsoon rainfall and flooding in complex terrain. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(11): 5918-5927. DOI: 10.1029/2019GL083363.

[3] Zhang W, Villarini G, Vecchi GA *et al*. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston. *Nature*, 2018, **563**(7731): 384-388. DOI: 10.1038/s41586-018-0676-z.

[4] Tang GQ, Zeng ZY, Ma MH *et al*. Can near-real-time satellite precipitation products capture rainstorms and guide flood warning for the 2016 summer in South China?. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, **14**(8): 1208-1212. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2702137.

[5] Kong F, Wang YF, Fang J *et al*. Spatial pattern of summer extreme precipitation and its response to urbanization in China (1961-2010). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(5): 996-1010. [孔锋, 王一飞, 方建等. 中国夏季极端降水空间格局及其对城市化的响应(1961－2010). 长江流域资源与环境, 2018, **27**(5): 996-1010.]

[6] Wu ZX, Zhang Q, Song CQ *et al*. Impacts of urbanization on spatio-temporal variations of temperature over the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(11): 2342-2357. [吴子璇, 张强, 宋长青等. 珠三角城市化对气温时空差异性影响. 地理学报, 2019, **74**(11): 2342-2357.]

[7] Zhao N, Jiao YM, Ma T *et al*. Estimating the effect of urbanization on extreme climate events in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 1005-1015. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.374.

[8] Huang GR, Chen YS, Yao ZJ. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization. *Advances in Water Science*, 2021, **32**(2): 161-170. [黄国如, 陈易偲, 姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征. 水科学进展, 2021, **32**(2): 161-170.]

[9] Yan M, Chan JCL, Zhao K. Impacts of urbanization on the precipitation characteristics in Guangdong Province, China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, **37**(7): 696-706. DOI: 10.1007/s00376-020-9218-3.

[10] Song XM, Zhang JY, Kong FZ *et al*. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing. *Advances in Water Science*, 2017, **28**(2): 161-173. [宋晓猛, 张建云, 孔凡哲等. 北京地区降水极值时空演变特征. 水科学

进展, 2017, **28**(2): 161-173.]

[11] Lu M, Xu YP, Shan N *et al*. Effect of urbanisation on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region. *Science of the Total Environment*, 2019, **673**: 64-73. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.413.

[12] Liang P, Ding YH. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916-2014. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(3): 321-334. DOI: 10.1007/s00376-016-6120-0.

[13] Cui TT, Wang YT, Hu QF. Study on the precipitation evolution in Taihu Lake Basin in the process of urbanization. *Jiangsu Water Resources*, 2019, (8): 1-6.[崔婷婷, 王银堂, 胡庆芳. 城镇化进程中太湖流域降水演变规律研究. 江苏水利, 2019, (8): 1-6.]

[14] Yang MN, Xu YP, Pan GB *et al*. Impacts of urbanization on precipitation in Taihu Lake Basin, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, **19**(4): 739-746. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0000852.

[15] Zhao J, Hu QF, Wang LC *et al*. Analysis of precipitation characteristics in Taihu Lake Basin based on MSWEP. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(2): 27-33, 40.[赵静, 胡庆芳, 王腊春等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析. 水资源保护, 2020, **36**(2): 27-33, 40.]

[16] Zhao J, Yang L, Li LJ *et al*. Analysis of the lake-effect on precipitation in the Taihu Lake Basin based on the GWR merged precipitation. *Water*, 2020, **12**(1): 180. DOI: 10.3390/w12010180.

[17] Li LJ, Hu QF, Wang YT *et al*. Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1289-1298. DOI: 10.18307/2019.0519.[李伶杰, 胡庆芳, 王银堂等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1289-1298.]

[18] Hu J, Liu Y, Sang YF. Precipitation complexity and its spatial difference in the Taihu Lake Basin, China. *Entropy*, 2019, **21**(1): 48. DOI: 10.3390/e21010048.

[19] Hu CS, Xu YP, Han LF *et al*. Long-term trends in daily precipitation over the Yangtze River Delta region during 1960-2012, Eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, **125**(1/2): 131-147. DOI: 10.1007/s00704-015-1493-z.

[20] Wang YF, Xu YP, Lei CG *et al*. Spatio-temporal characteristics of precipitation and dryness/wetness in Yangtze River Delta, Eastern China, during 1960-2012. *Atmospheric Research*, 2016, **172/173**: 196-205. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.01.008.

[21] Ester M, Kriegel HP, Sander J *et al*. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Proc of International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Palo Alto, CA: AAAI Press, 1996: 226-231.

[22] Zhang XB, Yang F. RClimDex (1.0), User manual. Canada: ClimDex Research Branch Environment, 2004.

[23] Sen PK. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, **63**(324): 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.

[24] Tabari H, Somee BS, Zadeh MR. Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. *Atmospheric Research*, 2011, **100**(1): 132-140. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.01.005.

[25] Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, **13**(3): 245. DOI: 10.2307/1907187.

[26] Luo XY, Chen MX. Research progress on the impact of urbanization on climate change. *Advances in Earth Science*, 2019, **34**(9): 984-997.[罗鑫玥, 陈明星. 城镇化对气候变化影响的研究进展. 地球科学进展, 2019, **34**(9): 984-997.]

[27] Yang L, Zhao JH, Feng GL. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over Eastern China monsoon region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, **42**(1): 81-95.[杨柳, 赵俊虎, 封国林. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异. 大气科学, 2018, **42**(1): 81-95.]

[28] Han LF, Xu YP, Pan GB *et al*. Changing properties of precipitation extremes in the urban areas, Yangtze River Delta, China, during 1957-2013. *Natural Hazards*, 2015, **79**(1): 437-454. DOI: 10.1007/s11069-015-1850-3.

[29] Zhong S, Qian Y, Zhao C *et al*. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(20): 10903-10914. DOI: 10.1002/2015JD023753.

[30] Gu XH, Zhang Q, Li JF *et al*. Impact of urbanization on nonstationarity of annual and seasonal precipitation extremes in China. *Journal of Hydrology*, 2019, **575**: 638-655. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.070.

[31] Zhang S, Fang CL, Kuang WH *et al*. Comparison of changes in urban land use/cover and efficiency of megaregions in China from 1980 to 2015. *Remote Sensing*, 2019, **11**(15): 1834. DOI: 10.3390/rs11151834.

[32] Chen W, Yan DS, Sun W. Analyzing the patterns and processes of new urbanization development in the Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2015, **34**(3): 397-406. DOI: 10.11821/dlyj201503001. [陈雯, 闫东升, 孙伟. 长江三角洲新型城镇化发展问题与态势的判断. 地理研究, 2015, **34**(3): 397-406.]

[33] Hu QF, Zhang JY, Wang YT *et al*. A review of urbanization impact on precipitation. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(1): 138-150. [胡庆芳, 张建云, 王银堂等. 城市化对降水影响的研究综述. 水科学进展, 2018, **29**(1): 138-150.]

[34] Ma HY, Li T, Jiang ZH *et al*. Unexpected large-scale atmospheric response to urbanization in East China. *Climate Dynamics*, 2019, **52**(7/8): 4293-4303. DOI: 10.1007/s00382-018-4380-3.

[35] Wu MW, Luo YL, Chen F *et al*. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, **58**(8): 1799-1819. DOI: 10.1175/JAMC-D-18-0284.1.

[36] Jiao YM, Zhao N, Yue TX *et al*. The effect of urbanization on extreme climate events in Beijing. *Geographical Research*, 2020, **39**(2): 461-472. [焦毅蒙, 赵娜, 岳天祥等. 城市化对北京市极端气候的影响研究. 地理研究, 2020, **39**(2): 461-472.]

[37] Gu XH, Zhang Q, Singh VP *et al*. Potential contributions of climate change and urbanization to precipitation trends across China at national, regional and local scales. *International Journal of Climatology*, 2019, **39**(6): 2998-3012. DOI: 10.1002/joc.5997.

[38] Lin LJ, Gao T, Luo M *et al*. Contribution of urbanization to the changes in extreme climate events in urban agglomerations across China. *Science of the Total Environment*, 2020, **744**: 140264. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140264.