

太湖平原高度城镇化下降雨特征时空变化研究*

于志慧¹, 刘鹏飞¹, 何玉秀¹, 许有鹏^{1**}, 任晓东², 朱立国³, 徐兴³

(1: 南京大学, 南京 210023)

(2: 江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 苏州 215011)

(3: 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 无锡 214000)

摘要: 随着人类活动和气候变化影响的加剧, 降雨特征变化引发的洪水问题日益突出, 探讨其时空演变特征对保障高度城镇化地区洪涝安全有较大理论和实际意义. 本研究以高度城镇化的太湖平原地区为例, 选取降雨强度、降雨历时、降雨集中程度和降雨峰值程度为降雨类型特征指标, 以高分辨率短历时加权集合降水资料 MSWEP (multi-source weighted-ensemble precipitation) 为基础探讨了快速城市化发展下 (1979—2016 年) 不同降雨历时—强度—类型的时空演变规律及其演变机制. 研究结果表明: ①研究区的降雨频次呈现出强度小、历时短、雨量集中于中期和高峰型降雨发生的频次高的特征; 同时历时较短、集中于前期和后期的降雨频次趋于增加, 而历时较长、集中于中期且中峰型降雨的频次趋于减少. ②城镇化对降雨雨型的影响分析发现, 高城镇化水平地区较低城镇化水平地区的降雨量更大, 其中降雨强度大于 25 mm/d 的大雨和暴雨事件更易发生; 并且更倾向于发生前期型和高峰型的极端分布降雨. 随着城镇化发展研究区更易于遭受因降雨量过于集中而导致的雨涝灾害.

关键词: MSWEP 降水资料; 降雨雨型; 城镇化; 太湖平原地区

Temporal and spatial variation of rainfall characteristics under high urbanization in the Lake Taihu Plain*

Yu Zhihui¹, Liu Pengfei¹, He Yuxiu¹, Xu Youpeng^{1**}, Ren Xiaodong², Zhu Ligu³ & Xu Xing³

(1: *Nanjing University, Nanjing 210023, P.R. China*)

(2: *The Suzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou 215011, P.R. China*)

(3: *The Wuxi Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Wuxi 214000, P.R. China*)

Abstract: Under the intensification of human activities and the impact of climate change, the flood problem caused by the change of rainfall characteristics is becoming increasingly prominent. This article takes the highly urbanized regions of the Lake Taihu Basin as an example. According to multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP) precipitation data, the rainfall intensity, rainfall duration, rainfall concentration degree and rainfall peak degree are selected. The rainfall data from 1979 to 2016 are divided into events to analyze the evolution characteristics of different rainfall duration-intensity-type and its mechanism in the research area. The results are as follows: ① The rainfall frequency in the core regions of Lake Taihu under elevated urbanization shows that rain with low rainfall intensity, short rainfall duration, concentrated in mid-term and with higher peaks occurs more commonly. The number of short duration rainfalls, early- and late-term rainfalls show an upward trend, and the number of long and extra-long duration rainfalls, medium-term rainfalls, and moderate peak rainfalls show a downward trend. ② Based on the analysis of the impact of urbanization on rainfall patterns, the rainfall in areas with high urbanization levels is larger than that in the areas with low urbanization levels. It is more likely to occur heavy rainfall events with rainfall intensity greater than 25 mm/d in high urbanization level areas. Compared with the low urbanization level area rainfall, the high urbanization level area rainfall is more inclined to occur the extreme distribution rainfall such as early and high peak rainfall. Suffering a flood event caused by excessive concentration of rain-

* 2022-01-10 收稿; 2022-03-03 收修改稿.

国家自然科学基金-长江水科学研究联合基金项目 (U2240203) 和江苏省水利科技项目 (2021010) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: xuy305@163.com.

fall is more possible with the development of urbanization in the study area.

Keywords: MSWEP precipitation data; rainfall characteristics; urbanization; Lake Taihu Plain region

降雨过程是水循环过程中的关键环节,其时空演变对区域社会经济发展以及环境安全防控具有重要的影响.快速城镇化背景下短历时强降雨的频繁发生常常伴随城市洪涝灾害的发生,严重影响了区域的水安全环境^[1-3].为此,探讨高度城镇化地区降雨雨型的时空演变特征可以为区域防洪排涝设计提供理论支撑^[4-6].

暴雨雨型作为降雨特征中较为重要的参数特征^[7-8],是洪水过程必不可少的影响因素之一^[9].在雨量一致的情况下,不同暴雨雨型所对应的洪水响应过程并不一致,对区域洪涝基础设施的规划影响也是不同的,因而针对暴雨雨型的研究必不可少^[10].殷水清等研究发现我国降雨整体表现出短历时强降雨特征,且主要以前峰集中型降雨为主^[11].黄国如等^[12]针对珠三角地区暴雨雨型的研究发现城镇化高地区单峰型和前期型降雨发生频率明显增加.朱秀迪等^[13]研究发现北京市的暴雨雨型呈现出以午后型为主的特征.传统模式下降雨雨型划分多集中于已有标准设计降雨类型,操作较为繁琐,使得其应用过程存在阻碍.随着特征提取等算法的深入,阎晓冉等^[14]基于聚类方法,引入峰型系数和峰现时间,模拟区域代表性无量纲洪水过程线类型,一定程度改善了传统降雨类型分类应用繁琐和可视化不强的问题,采用聚类分析方法能较好地对区域降雨特征曲线进行分类. Gao 等^[15]也在降雨模式分类优化的基础上,基于 Coupla 函数模拟了区域降雨时间格局,比较了不同雨型的特点.

城镇化在推动社会发展和经济进步的同时,其诱发的城市“热岛效应”、下垫面改变(包括城市冠层的变化)及气溶胶排放等也改变了降雨事件的强度、频率及其时空分布特征^[16-20].太湖平原地区作为我国极端灾害事件多发地,地区极端降雨不断增加^[21],降水结构趋于复杂^[22],这与地区城镇化发展有着密切的关系^[23-24].由于城镇化程度和地形等因素的差异,降雨对城镇化的响应存在较大区域差异.以往研究多集中在极端降雨的时间变化关系,针对太湖平原地区单个降雨场次下降雨强度一类型的频次演变规律研究较少.因此分析太湖平原地区降雨的时空分布特征,定量探讨各指标多年演变过程,评估城镇化对降雨影响的区域差异,将对快速城市化地区防洪减灾具有较大指导意义.

1 研究区概况

本文选择太湖流域腹部平原水网地区(武澄锡虞区和阳澄淀泖水利片区)作为研究区.研究区地处湿润性亚热带季风气候,区域内多年平均降雨时间为 122.4 天,多年平均降雨量为 1177 mm,降雨存在年内分配不均的特点.城镇化使自然地表变成以不透水面为主要特征的城镇用地,其空间分布上表现出苏州、无锡、常州等几个重要城市的不透水面率较高(图 1a).随着城镇化的快速发展,区域内河湖水系衰减、不透水面大幅增加,从 1980s 不足 5%增加到现在的近 36%(图 1b),区域地表水文过程发生显著变化.同时,受气候变化影响,区域极端降雨事件增多,致使区内洪涝灾害频发,严重影响了区域内正常生产生活以及区域社会发展.因此,将该区域作为研究区具有一定的典型性和代表性.

2 数据与方法

2.1 数据资料

本文主要收集了太湖平原地区 13 个典型雨量站 1979—2016 年逐日降雨数据(图 1a).选取了欧盟联合研究中心(EU/JRC)发布的时空分辨率分别为 3 h 和 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的太湖流域 MSWEP 降水资料数据(1979—2016 年),数据获取自 <http://www.gloh2o.org/>,该数据自发布以来一直受到国内外学者的关注,并先后在伊朗^[25]、印度^[26]、中国^[27]和澳大利亚^[28]等国家开展了精度评估,结果均表明 MSWEP 精度较高、监测能力较强,适用于绝大多数区域.同时,经过区域 13 个典型站点对比检验,该数据与区域观测值的平均相关性系数为 0.78,标准偏差为 -0.18,对汛期降水量的平均低估程度低于 20%,在研究区具有较强表征能力^[29],能够刻画其多种特征的降水要素.1979—2016 年逐年 30 m 分辨率不透水面数据集(global artificial impervious area, GAIA)^[30]获取自 <http://data.ess.tsinghua.edu.cn>.

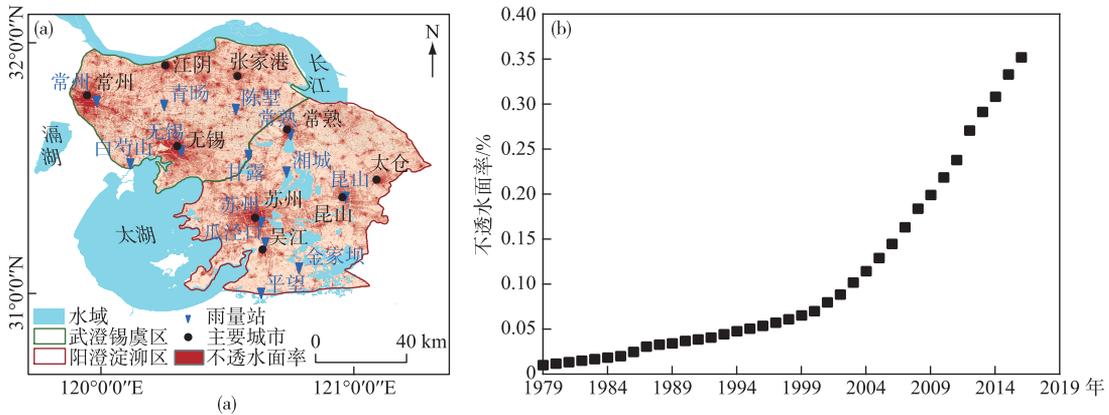


图 1 研究区概况 (a) 和不透水面率时间演变特征 (b)

Fig.1 Overview of study area (a) and temporal characteristics of impervious rate (b)

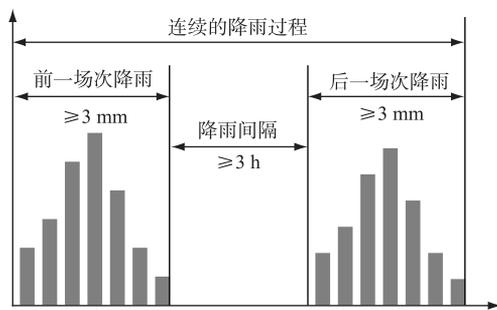


图 2 降雨场次划分示意图

Fig.2 Diagram of rainfall event division

2.2 研究方法

2.2.1 雨型特征分析 目前,对降雨事件的划分尚未有统一的标准. 有研究表明,场次降雨的间隔时间若小于 60 min 会对降雨的特征指标产生较大影响,不利于降雨特征参数的统计^[31-32],场次降雨的间隔时间设定于 1~6 h 能较好地回避对降雨特征参数的影响. 综合考虑研究区资料尺度以及降雨汇流历时,选取 3 h 作为场次降雨的最小间隔,并限定了场次累计降雨量大于 3 mm 为一次降水事件^[10],具体情况如图 2 所示.

由于降雨过程具有随机性,为了便于描述降雨状态,本研究采取统一的降雨特征分析指标,识别并定量描述城镇化过程下降雨的演变特征,从降雨历时、强度、类型三方面揭示雨型演变的时空变化特征,具体指标的计算公式见表 1.

表 1 降雨特征分析指标

Tab.1 Rainfall characteristic indicators

指标	计算公式	表达式含义
降雨历时	$T = T_{start} - T_{end}$	T_{start} 为降雨开始时刻, T_{end} 为降雨结束时刻, T 表明一次降雨过程从降雨开始至降雨结束所经历的时间, T 值越大,表明降雨历时越长.
降雨强度	$P_{ave} = P_{sum}/T$	P_{sum} 为场次降雨总雨量,降雨强度指单位时段内的降雨量, P_{ave} 值越大,表明降雨强度越大.
降雨集中程度	$P_t = \left(\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \times i) \right) / (P_{sum} \times n)$	P_i 为第 i 个小时降雨量. P_t 指标表示降雨量分布的时间重心, P_t 值越大,表明降雨主要集中于降雨历时的后期 ^[33] .
降雨峰值程度	$P_{up} = P_{sum2} / P_{sum}$	P_{sum2} 为场次降雨中,每小时雨量大于平均降雨强度的雨量总和,即判断 $P_i > P_{ave}$,对所有 $> P_{ave}$ 的 P_i 求和得到 P_{sum2} ^[33] . P_{up} 表示雨型的高矮程度, P_{up} 值越大,表明降雨峰值越高.

2.2.2 降雨类型划分及降雨特征趋势分析 为进一步探讨太湖平原地区降雨变化,按照降雨强度,将降雨过程分为 4 个等级:小雨(24 h 降雨量小于 10 mm)、中雨(24 h 降雨量为 [10, 25) mm)、大雨(24 h 降雨量为 [25, 50) mm) 和暴雨(24 h 降雨量大于等于 50 mm);按照降雨历时长短将降雨过程划分为短历时(<6 h)、

中长历时([6,12) h),长历时([12,24) h)和特长历时(≥ 24 h);按照降雨量的集中程度,将降雨过程分为前期型((0,1/3))、中期型([1/3,2/3))、后期型([2/3,1));按照降雨量的峰值程度,将降雨过程分为低峰型((0,1/3))、中峰型([1/3,2/3))、高峰型([2/3,1))。

M-K(Mann-Kendall)趋势检验法这种非参数检验方法由世界气象组织推荐,是由Mann^[34]和Kendall^[35]最早提出的.M-K趋势检验法的特点是不需要样本序列服从某一特定的分布规律,且分析结果不受少数异常特征值的干扰.该方法已被广泛用于分析降雨-水位的趋势检验.因此,本研究应用M-K趋势检验法分析降雨特征时间序列趋势.

2.2.3 城镇化对降雨雨型的影响分析 本文将不透水面率作为城镇化率的表征指标,利用GIS空间叠加方法,将30 m分辨率的不透水面数据集生成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率的地表不透水面率,探讨空间尺度上每个格网内的不透水面率与其降雨历时、强度、集中程度和峰值程度等降雨类型的关系,从而定量揭示城镇化对降雨特征演变规律的影响.

3 结果与讨论

3.1 降雨雨强和历时及其频次变化特征

不同强度降水的发生频次不同,表现出小雨和中雨发生频次较高的特征.小雨、中雨、大雨、暴雨年平均降雨频次分别为65.52、19.76、9.20和2.27次.随着时间的变化,不同雨强的降雨频次均呈现上升的趋势,如图3a所示,雨强大的降雨表现出频次上升缓慢的特征,小雨、中雨、大雨和暴雨降雨频次上升的线性趋势线倾向率分别为0.312、0.104、0.042和0.024,其中小雨表现为显著上升趋势.

降雨历时表现出降雨历时长降雨发生的频次低,短历时、中长历时、长历时和特长历时降雨的年平均降雨场次分别为32.32、31.03、24.76和8.65次.如图3b所示,随着时间的变化,短历时降雨和中长历时降雨的降雨次数呈现上升的趋势,且短历时降雨上升的速率大于中长历时降雨上升的速率,分别为0.559和0.089,其中短历时降雨呈显著上升趋势,这可能与太湖腹部高度城镇化地区在1980s以来的快速城镇化存在密切联系,由于城市规模不断扩大,城市热岛效应促使城市大气层结变得不稳定,有利于产生热力对流,极容易形成对流云和对流性降雨^[9].加之城市化工厂和家庭排放的大量粒状废气,可较长时间地扩散或停留在空气中,极易吸收水汽成为凝结核,从而起到增雨作用^[36].而长历时降雨和特长历时降雨的降雨次数呈现下降的趋势,且特长历时降雨下降的速率小于长历时降雨下降的速率,分别为-0.051和-0.114.

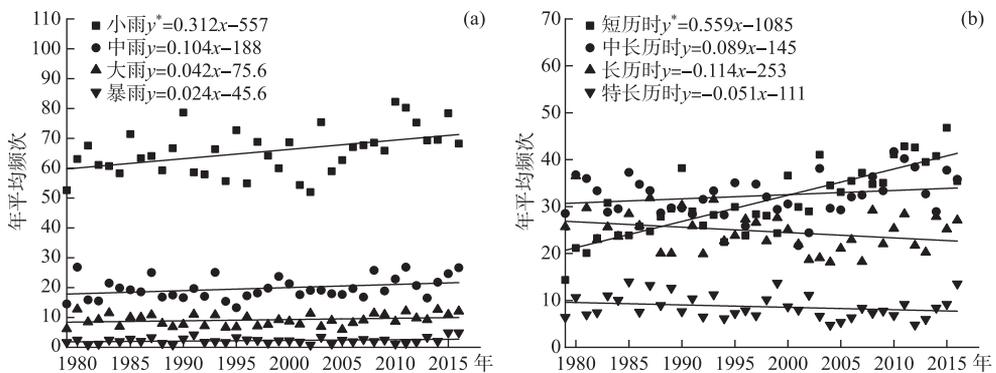


图3 不同强度(a)、历时(b)降雨频次的变化趋势(图中*表示通过了95%的显著性检验,下同)

Fig.3 Variation trend of rainfall frequency with different intensity (a) and duration (b)

3.2 降雨雨型及其频次变化特征

不同降雨类型的降雨所发生的频次表现为:中期型(38.96)>后期型(25.83)>前期型(1.95).中期型降雨发生的次数呈下降趋势,下降速率为-0.112,前期型降雨和后期型降雨呈上升趋势,上升速率表现为后期型降雨大于前期型降雨,上升速率分别为0.032和0.004,可见降雨更加趋向于极端分布(图4a).不同峰值

特征降雨发生的次数表现出:高峰型(37.04)>中峰型(11.19)>低峰型(3.82). 峰值特征的变化趋势均通过了95%置信度检验,低峰降雨发生的次数呈显著上升趋势,上升速率为0.027(图4b). 高峰型降雨和中峰型降雨呈显著下降趋势,下降速率表现为高峰降雨大于中峰降雨,下降速率为-0.147和-0.022,降雨趋向于中低峰降雨. 而高峰型降雨占据了绝对主导优势,表明研究区在一定程度上易于遭受因降雨量过于集中而导致的洪涝灾害,相关部门应更加注重泄洪工作.

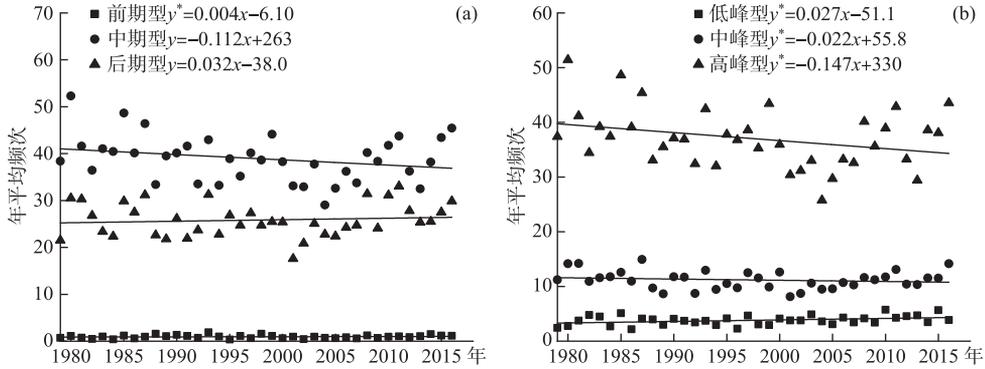


图4 不同集中程度(a)和峰值程度(b)降雨频次的变化趋势

Fig.4 Variation trend of rainfall frequency with different rainfall concentration degree (a) and peak degree (b)

3.3 城镇化对降雨雨型变化特征的影响

3.3.1 城镇化对降雨强度和历时及其频次的影响 降雨历时与最大3h降雨量的空间分布较为相似,整体呈现由西北向东南递减趋势(图5a,b). 城镇化对降雨历时和最大3h降雨量的影响表现为正相关关系,增加速率分别为0.287和0.394(图5c),其中最大3h量降雨的响应趋势表现为显著上升趋势. 这是由于随着城镇化水平的提高,不透水面取代原有植被区域,导致地表粗糙度增加,减缓水平风速,改变气团运动路径,产生城市绕流,强化气流辐合,促进对流运动^[37],从而导致高城镇化水平地区短历时降雨强度增大.

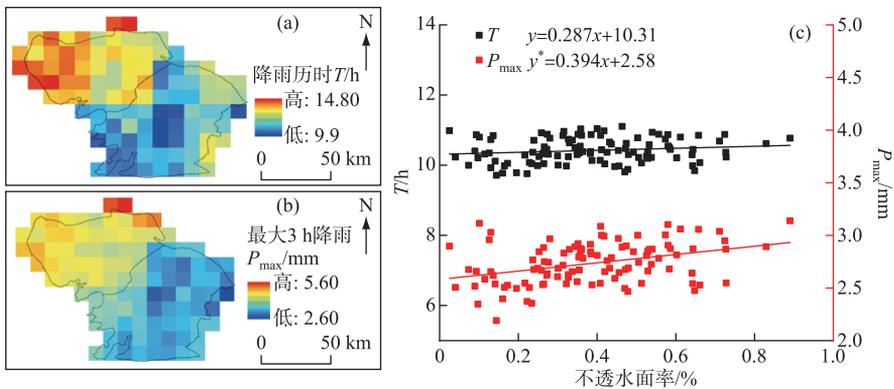


图5 降雨历时(a)和最大3h降雨(b)的空间分布及其对城镇化(不透水面率)的响应(c)

Fig.5 Spatial distribution of rainfall duration (a) and maximum 3 h rainfall (b) and its response to urbanization (c)

从不同强度降雨频次的空间分布(图6a)来看,小雨的空间差异较为显著,整体呈现由西北向东南递增的趋势,而其它雨强降雨事件的空间差异则不明显. 小雨和中雨所发生的频次表现出城镇化高的地区发生的频次低于城镇化低的地区,且呈现显著下降趋势,其中小雨和中雨响应程度分别为-4.511和-2.179(图6b). 大雨和暴雨所发生的频次表现出城镇化高地区发生的频次高于城镇化低的地区,响应程度表现为大雨

响应程度大于暴雨响应程度,响应关系分别为0.538和0.474,其中暴雨的响应程度呈显著上升趋势(图6b)。丁凯熙等^[38]在北京地区的研究结果也较为相似,即城区相较郊区降雨量更大,且大雨及以上等级的降雨事件更易发生。短历时和中长历时降雨的空间分布较为相似,整体呈现由西北向东南递增的趋势(图6c)。同时短历时、中长历时和特长历时降雨对城镇化呈现负响应关系,其中短历时和中长历时的响应程度较为显著,响应关系分别为-4.408和-1.783(图6d)。长历时降雨对城镇化呈现正响应关系,响应关系为0.619。

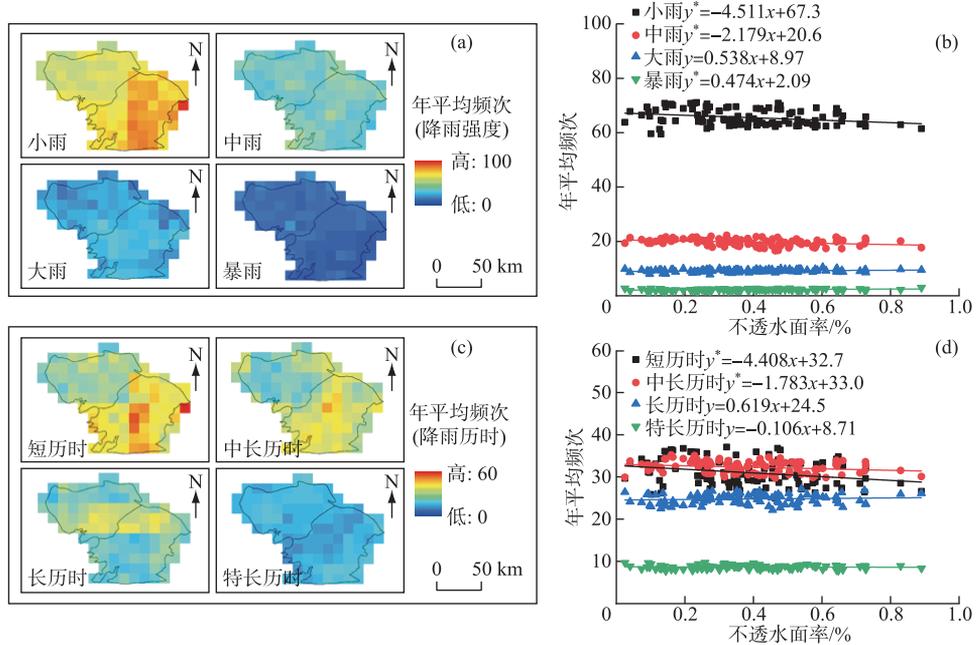


图6 降雨强度(a)、降雨历时(c)频次的空间分布及其对城镇化(不透水面率)的响应(b,d)

Fig.6 Spatial distribution of rainfall intensity (a) and duration frequency (c) and its response to urbanization (b,d)

3.3.2 城镇化对雨型及其频次的影响 如图7a和7b所示,降雨集中程度的空间分布整体呈现由西北向东南递增的趋势,而降雨峰值程度的分布与之相反。从数值来看,研究区降雨集中程度为0.72~0.81,主要表现为后期型降雨;降雨峰值程度为0.38~0.59,整体呈现出中峰型降雨的情况。降雨集中程度对不透水面率的响应呈显著下降趋势,响应关系为-0.11,表现为高城镇化水平地区低于低城镇化水平地区,常州、无锡、苏州等城区的降雨集中程度低于周围郊区,即降雨更趋向于前期型,该类型降雨雨量集中、雨峰靠前,致使城区发生暴雨内涝事件的可能性增加;降雨峰值程度对不透水面率的响应关系为0.029,呈显著上升趋势,表现为高城镇化水平地区高于低城镇化水平地区,高值区主要集中于常州、无锡等城区,即降雨更趋向于高峰型(图7c)。

不同类型降雨所发生的频次空间分布如图8所示。前期型和后期型降雨所发生的频次表现为高城镇化水平的地区高于低城镇化水平的地区,响应程度分别为0.346和0.111,表现为后期型降雨大于前期型降雨(图9a);中期型降雨表现出高城镇化水平地区发生的频次低于低城镇化水平的地区,响应关系为-1.505。结合前述分析可知,高城镇化水平地区相较于低城镇化水平地区的降雨更倾向于前期型降雨,且更易发生前期和后期型降雨。如图8和图9b所示,高峰降雨在城镇化高的地区发生的频次高于城镇化低的地区,且响应关系为2.364;低峰和中峰降雨表现出城镇化高地区发生的频次低于城镇化低的地区,且中峰降雨呈现显著下降趋势,响应关系为-2.312。由此可知,城镇化对高峰型等极端降雨类型的加持作用进一步加剧城市地区的洪涝风险。

由上述结果可以看出,城镇化对前期、后期型和高峰型等极端降雨的影响呈现不同程度的驱动作用。主

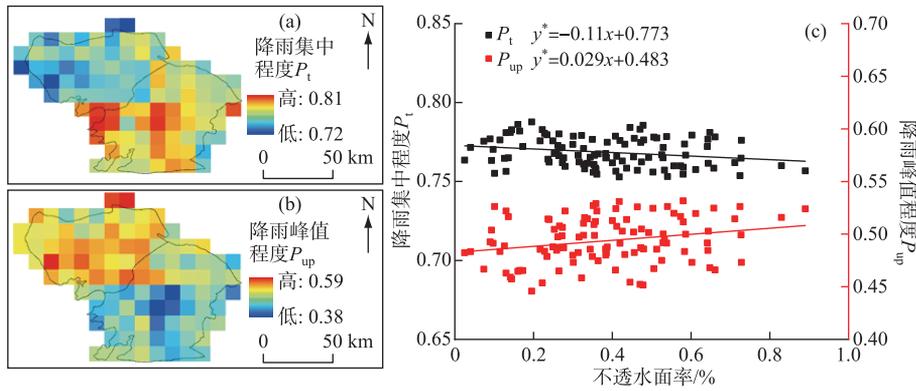


图7 降雨集中程度(a)和降雨峰值程度(b)的空间分布及其对城镇化(不透水面率)的响应(c)
Fig.7 Spatial distribution of rainfall concentration degree (a) and rainfall peak degree (b) and its response to urbanization (c)

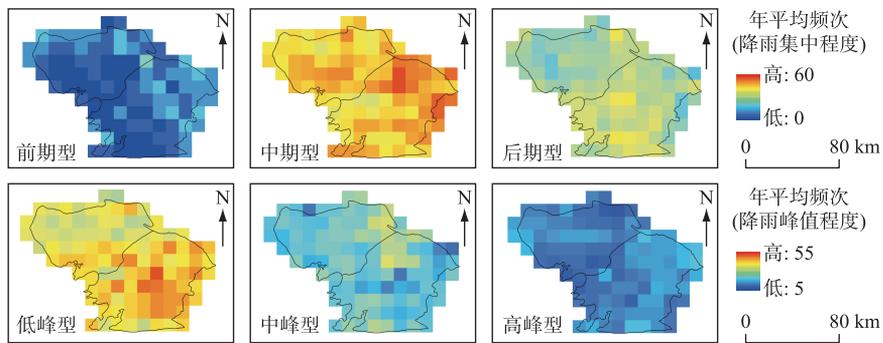


图8 降雨集中程度和降雨峰值程度频次空间分布
Fig.8 Spatial distribution of rainfall concentration degree and peak degree frequency

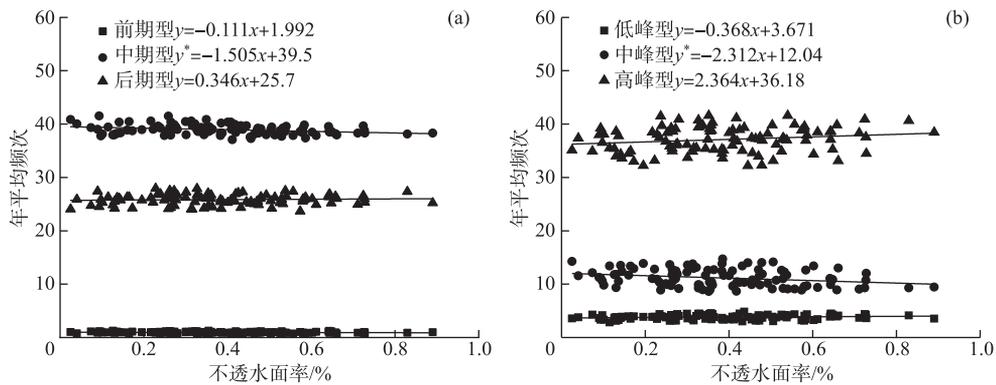


图9 城镇化(不透水面率)对降雨集中程度(a)和峰值程度(b)频次的影响
Fig.9 Influence of urbanization on rainfall concentration degree (a) and rainfall peak degree (b) frequency

要是由于在城镇化进程中,大量不透水面(道路、房屋、广场等)取代了自然表面(农田、植被、水域等),导致城镇下垫面的热量传输发生变化,同时城市热岛效应促进对流,增强了大气的的不稳定度,进而对局地极端降

雨产生影响. 长三角和珠三角的相关研究结论也与本研究成果较为吻合^[12,23]. 前期研究也表明太湖平原地区不同程度的城镇化均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^[39]. 高度城镇化地区相比其他地区,其降雨量变得更加集中,极端降雨事件增多,降雨强度增大,发生洪涝事件的风险增加.

因此,太湖平原水网地区的城市防洪减灾应注重以下问题:1)城市化进程中应努力保持现状水系,并注重优化骨干河网结构,从而增强城市的洪涝蓄滞与消纳能力;2)增加城市的“绿色”建筑设计,即在降水的截留收集、调蓄排水等功能方面进行绿色屋顶、地下储水设施等方面的全新设计改造,降低原有建筑物地带的径流系数,缓解洪涝压力;3)统筹城市圩坑防洪工程的建设与调度,在优化现有城市、区域防洪除涝工程调度方式的基础上,尽快实施区域性河流整治工程的建设.

4 结论与展望

针对城镇化背景下降雨特征变化及其引发的洪涝灾害日益突出等问题. 本研究基于短历时长序列降雨资料,探讨了太湖平原地区降雨雨型组合结构的变化特征,并探寻了城镇化对暴雨雨型时空变化的影响. 主要结论如下:

1)太湖平原地区降雨强度小、降雨历时短的降雨发生的频次较高. 不同雨强的降雨频次均呈现上升趋势;短历时和中长历时的降雨次数也呈现上升的趋势,且短历时上升的速率更大.

2)对于不同降雨雨型事件,中期型降雨发生的次数较多,但整体呈下降趋势,前期和后期型降雨呈上升趋势;高峰型降雨发生的次数较多,中期型降雨呈下降趋势. 太湖平原地区降雨雨型更加趋向于极端分布.

3)从城镇化对降雨雨型的影响来看,城镇化高的地区相较城镇化低的地区降雨量更大,更易发生具有量级大、前期型、后期型和高峰型等特征的极端降雨事件,进一步加剧了城市地区的洪涝风险.

本文基于MSWEP降雨资料对城镇化与降雨关系进行了分析和探讨,对快速城市化地区防洪减灾具有较大的指导意义. 然而考虑到数据资料的局限性,本研究尚未对短历时(3 h内)暴雨的变化过程以及不同季节降雨事件的变化特征展开分析和讨论,后续研究将搜集具有更高时间分辨率(5 min或10 min)的降雨资料开展进一步分析. 同时,本研究主要针对的是城镇化发展水平较快的平原地区,但由于降雨过程的复杂性以及地形等下垫面特征异质性的影响,研究结论也存在一定局限性,对于更大空间尺度及不同下垫面特征区域的研究还有待进一步探索.

5 参考文献

- [1] Zhang JY, Song XM, Wang GQ *et al.* Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(4): 594-605. [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. *水科学进展*, 2014, **25**(4): 594-605.]
- [2] Areu-Rangel O, Cea L, Bonasia R *et al.* Impact of urban growth and changes in land use on river flood hazard in Villahermosa, Tabasco (Mexico). *Water*, 2019, **11**(2): 304. DOI: 10.3390/w11020304.
- [3] Fu XS, Yang XQ, Sun XG. Spatial and diurnal variations of summer hourly rainfall over three super city clusters in Eastern China and their possible link to the urbanization. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(10): 5445-5462. DOI: 10.1029/2019jd030474.
- [4] Song XM, Zhang JY, Liu JF *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in Beijing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(5): 525-535. [宋晓猛, 张建云, 刘九夫等. 北京地区降水结构时空演变特征. *水利学报*, 2015, **46**(5): 525-535.]
- [5] Hang GR, Chen YS. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under the background of high urbanization. *Water Resources Protection*, 2021: 1-13. [黄国如, 陈易偲. 高度城镇化背景下珠三角地区降雨结构时空演变特征分析. *水资源保护*, 2021: 1-13.]
- [6] 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.]

- [7] Yang X, Wang YQ, Liu ZH. Comparison of two different satellite precipitation data in Sichuan from may to August in 2013. *Plateau Meteorology*, 2016, **35**(4): 1039-1049. [杨星, 王永前, 刘志红. 四川省 2013 年夏季卫星降雨数据的对比研究. 高原气象, 2016, **35**(4): 1039-1049.]
- [8] Sun ZL, Bao ZX, Shu ZK *et al.* Pattern characteristics of short duration rainstorms in Nanjing City over recent 25 years. *Journal of China Hydrology*, 2019, **39**(5): 78-83. [孙周亮, 鲍振鑫, 舒章康等. 南京市近 25 年短历时暴雨雨型特性. 水文, 2019, **39**(5): 78-83.]
- [9] Zhang JY, Wang YT, He RM *et al.* Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China. *Advances in Water Science*, 2016, **27**(4): 485-491. [张建云, 王银堂, 贺瑞敏等. 中国城市洪涝问题及成因分析. 水科学进展, 2016, **27**(4): 485-491.]
- [10] Chai YY, Sun X. Analysis of rainstorm pattern and change trend in Shenzhen River Basin. *Technical Supervision in Water Resources*, 2018, **26**(6): 140-142. [柴苑苑, 孙翔. 深圳市流域暴雨雨型及变化趋势分析. 水利技术监督, 2018, **26**(6): 140-142.]
- [11] Yin SQ, Wang Y, Xie Y *et al.* Characteristics of intra-storm temporal pattern over China. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(5): 617-624. [殷水清, 王杨, 谢云等. 中国降雨过程时程分型特征. 水科学进展, 2014, **25**(5): 617-624.]
- [12] 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, 陈易德, 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.]
- [13] Zhu XD, Zhang Q, Sun P. Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related causes. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(11): 2086-2104. DOI: 10.11821/dlx201811004. [朱秀迪, 张强, 孙鹏. 北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因. 地理学报, 2018, **73**(11): 2086-2104.]
- [14] Yan XR, Wang LP, Zhang YK *et al.* Study on stochastic flood simulation method considering peak shape and its frequency. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2019, **38**(12): 61-72. [阎晓冉, 王丽萍, 张验科等. 考虑峰型及其频率的洪水随机模拟方法研究. 水力发电学报, 2019, **38**(12): 61-72.]
- [15] Gao C, Xu YP, Zhu Q *et al.* Stochastic generation of daily rainfall events: A single-site rainfall model with Copula-based joint simulation of rainfall characteristics and classification and simulation of rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 2018, **564**: 41-58. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.073.
- [16] Kong F, Shi PJ, Fang J *et al.* Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change. *Journal of Catastrophology*, 2017, **32**(2): 165-174. [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. 灾害学, 2017, **32**(2): 165-174.]
- [17] Murray V, Ebi KL. IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX). *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2012, **66**(9): 759-760. DOI: 10.1136/jech-2012-201045.
- [18] Gu XH, Zhang Q, Kong DD. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(5): 718-730. DOI: 10.11821/dlx201605002. [顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应. 地理学报, 2016, **71**(5): 718-730.]
- [19] He BR, Zhai PM. Changes in persistent and non-persistent extreme precipitation in China from 1961 to 2016. *Advances in Climate Change Research*, 2018, **9**(3): 177-184. DOI: 10.1016/j.accre.2018.08.002.
- [20] 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.
- [21] Han LF. On the impact of urbanization on the precipitation and runoff based on the feedback between land surface and atmosphere [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2017. [韩龙飞. 基于陆—气反馈的长三角城市化对降雨—径流的影响研究 [学位论文]. 南京: 南京大学, 2017.]
- [22] Hu J, Liu Y, Sang YF. Precipitation complexity and its spatial difference in the Taihu Lake Basin, China. *Entropy: Basel, Switzerland*, 2019, **21**(1): 48. DOI: 10.3390/e21010048.
- [23] 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.
- [24] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(3): 277-290. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52**(3): 277-290.]
- [25] Alijanian M, Rakhshandehroo GR, Mishra AK *et al.* Evaluation of satellite rainfall climatology using CMORPH, PERSIANN-CDR, PERSIANN, TRMM, MSWEP over Iran. *International Journal of Climatology*, 2017, **37**(14): 4896-4914. DOI: 10.1002/joc.5131.
- [26] Nair A, Indu J. Performance assessment of multi-source weighted-ensemble precipitation (MSWEP) product over India. *Climate*, 2017, **5**(1): 2. DOI: 10.3390/cli5010002.
- [27] Deng Y, Jiang WG, Wang XY *et al.* Accuracy assessment of MSWEP over mainland China. *Advances in Water Science*, 2018, **29**(4): 455-464. [邓越, 蒋卫国, 王晓雅等. MSWEP 降水产品在中國大陸区域的精度评估. 水科学进展, 2018, **29**(4): 455-464.]
- [28] Awange JL, Hu KX, Khaki M. The newly merged satellite remotely sensed, gauge and reanalysis-based Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation: Evaluation over Australia and Africa (1981-2016). *Science of the Total Environment*, 2019, **670**: 448-465. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.148.
- [29] 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.]
- [30] Gong P, Li XC, Wang J *et al.* Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **236**: 111510. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111510.
- [31] Adams BJ, Fraser HG, Howard CDD *et al.* Meteorological data analysis for drainage system design. *Journal of Environmental Engineering*, 1986, **112**(5): 827-848. DOI: 10.1061/(asce)0733-9372(1986)112:5(827).
- [32] Rasheed A, Egodawatta P, Goonetilleke A *et al.* A novel approach for delineation of homogeneous rainfall regions for water sensitive urban design—a case study in southeast Queensland. *Water*, 2019, **11**(3): 570. DOI: 10.3390/w11030570.
- [33] Cheng D, Chen ZH. Evolution characteristics of rainstorm hyetograph in Yichang of Hubei Province. *Journal of Arid Meteorology*, 2017, **35**(2): 225-231. [成丹, 陈正洪. 湖北宜昌市区暴雨雨型的演变特征. 干旱气象, 2017, **35**(2): 225-231.]
- [34] Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, **13**(3): 245. DOI: 10.2307/1907187.
- [35] Kendall MG. Rank correlation methods. *British Journal of Psychology*, 1990, **25**(1): 86-91. DOI: 10.1111/j.2044-8295.1934.tb00727.x.
- [36] 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.
- [37] 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.]
- [38] Ding KX, Zhang LP, Song XM *et al.* Temporal and spatial features of precipitation and impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season in Beijing. *Progress in Geography*, 2019, **38**(12): 1917-1932. [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. 地理科学进展, 2019, **38**(12): 1917-1932.]
- [39] He YX, Xu YP, Li ZY *et al.* The impacts and its contribution rate of urbanization on extreme precipitation, 1976–2015: A case study in the Lake Taihu Plain region. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 262-271. DOI: 10.18307/2022.0121. [何玉秀, 许有鹏, 李子怡等. 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. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 262-271.]