

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.013

城市化背景下长三角核心城市群汛期降水 时空演变特征分析

朱凯莉¹, 赖成光^{1,2,3}, 王兆礼^{1,2,3}, 曾照洋¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 人工智能与数字经济广东省实验室(广州), 广东 广州 510330; 3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:为揭示城市化背景下长三角核心城市群汛期降水的时空演变规律,基于1978—2021年长三角核心城市群42个雨量站的小时降水数据,探究了汛期降水时空变化特征以及城市化对汛期降水的影响规律。结果表明:在空间分布上,汛期极端降水阈值呈现从北向南逐渐减小的趋势;在时间尺度上,研究区汛期降水总体呈显著增加趋势,后汛期降水变化在整个汛期降水变化中占主导地位;城区降水的增速基本高于郊区,苏浙沪城区和郊区汛期总降水量的增长率均呈现递减趋势;城市化对上海城郊降水差异的影响更为显著,对不同降水指标的城郊差异影响程度表现为后汛期极端降水量最大、汛期极端降水量次之、汛期总降水量最小。

关键词:汛期降水;时空演变特征;城市化;长三角核心城市群

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0095-09

Temporal and spatial evolution characteristics analysis of flood season precipitation in core city group of the Yangtze River delta under background of urbanization//ZHU Kaili¹, LAI Chengguang^{1,2,3}, WANG Zhaoli^{1,2,3}, ZENG Zhaoyang¹ (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510330, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to reveal the temporal and spatial evolution law of precipitation during flood season in the core city group of the Yangtze River delta under the background of urbanization, based on the hourly precipitation data of 42 rainfall stations in the study area from 1978 to 2021, the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the flood season and the impact law of urbanization on precipitation were explored. The results show that, in terms of spatial distribution, the threshold value of extreme precipitation in the flood season gradually decreases from north to south; in terms of time scale, the precipitation in the study area in the flood season generally shows a significant increase trend, and the precipitation changes in the post-flood season dominate the precipitation changes in the entire flood season; the increase rate of precipitation in urban areas is basically higher than that in suburban areas, and the growth rate of total precipitation during the flood season in urban areas and suburban areas of Jiangsu, Zhejiang, and Shanghai shows a decreasing trend; Urbanization has a more significant impact on the rainfall variation between urban and suburban areas in Shanghai. The impact degree on the difference between urban and suburban areas of different precipitation indicators is the largest for the extreme precipitation in the post-flood season, followed by the extreme precipitation in the flood season, and the smallest for total precipitation in the flood season.

Key words: precipitation in flood season; spatial and temporal evolution characteristics; urbanization; core city group of the Yangtze River delta

气候变化对水文过程的影响一直是水文气象等
领域的前沿热点研究课题^[1-2],以全球变暖为主要

特征的气候变化可能会加剧全球水文过程的时空变
化^[3-4],其中十分重要的体现是降水频率和强度的

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508200);国家自然科学基金项目(51879107,52209019)

作者简介:朱凯莉(1998—),女,硕士研究生,主要从事城市化水文效应研究。E-mail:1350018776@qq.com

通信作者:曾照洋(1994—),男,助理研究员,博士,主要从事城市洪涝模拟研究。E-mail:zyzeng86@scut.edu.cn

变化^[5]。降水空间分布的不均匀会导致洪涝、干旱等极端水文气象事件的频发,对人民的生命财产安全造成巨大的威胁^[6]。此外,城市化引起的降水变化越来越受到研究者的关注,人口、建筑物的愈加密集以及各种废气的排放会影响城市下垫面和大气热力学特性,大气致雨的凝结核状况也会因此改变,从而对大气降水产生直接的影响^[7-9]。基于以上背景,探究长三角等超级城市群汛期降水变化规律和驱动机制对理解由暴雨导致的城市内涝成因机理及制定相应的防洪措施具有重要意义^[10]。

从全球范围来看,降水对气候变化的响应具有明显的地域特征,例如:美国东北部地区的强降水事件更多发生在暖季,且在1996年极端降水量突然增大^[11];1977—2015年日本西部因热带气旋频率增大和锋面雨带增强导致异常强降水事件持续增多^[12];1950年以来澳大利亚西南部的平均降水量持续减少^[13];1901—2015年印度绝大多数地区的年、季降水呈显著下降的趋势^[14];1973—2011年降水数据表明,青藏高原地区在这段时间的降水极值变化并不显著^[15]。现有关降水与城市化关系的研究主要是基于雨量站观测资料或者数值模型模拟结果进行城区和郊区对比分析,前者的优势在于可以去除大气系统变异性的影响,而后者的优势在于有较高的机理解释性,但劣势在于个例分析结果的代表性十分有限^[16]。Shepherd等^[17]发现美国和沙特阿拉伯部分地区城市发展后期比城市发展前期的平均降水量高了12%~14%。北京地区降水极值的空间分布受地形特征和城市化发展等因素的影响呈现出从东向西递减的趋势,且形成了局部区域高值中心^[18],其夏季降水的减少与城市化进程显著相关^[19]。长江三角洲地区在1957—2013年降水呈现增加趋势^[20],20世纪80年代以后城市化发展迅速,上海地区呈现出明显的雨岛特征,极端降水在市中心的增加幅度相比郊区更加明显^[21]。Kaufmann等^[22]通过1988—1996年的月降水数据发现珠三角地区的降水有所减少,随后Seto等^[23]进一步指出这种减少主要发生在冬季;此外也有研究发现珠三角高度城镇化地区极端降水量上升趋势显著,但是相邻地区则无明显变化^[24]。

以往城市化对降水影响的相关研究集中于年尺度,但是越来越多研究表明城市化对汛期降水以及城郊降水差异的影响更加显著,尤其是以长三角为典型的中国经济快速发展的区域。另外,由于条件限制,很多研究存在降水数据时间分辨率不高以及对比城郊差异时特征雨量站数目过少等问题。本文基于长三角核心城市群区域内42个雨量站1978—

2021年汛期的实测小时降水数据,探讨城市化背景下该区域的汛期降水时空分布特征,以为汛期城市雨洪治理和水资源管理等工作提供参考。

1 研究区概况与研究数据

本文选取的研究区域如图1所示,包括上海市和江苏省的南京市、苏州市、无锡市、常州市、镇江市以及浙江省的湖州市、嘉兴市和杭州市,属于长江三角洲地区,位于118.37°E~122.02°E、29.18°N~32.62°N之间,面积约为61022 km²。研究区属于亚热带季风气候,气候温和湿润,四季分明,年平均气温15.5℃左右,年平均降水量1000 mm左右,6—7月属于梅雨季节^[25]。

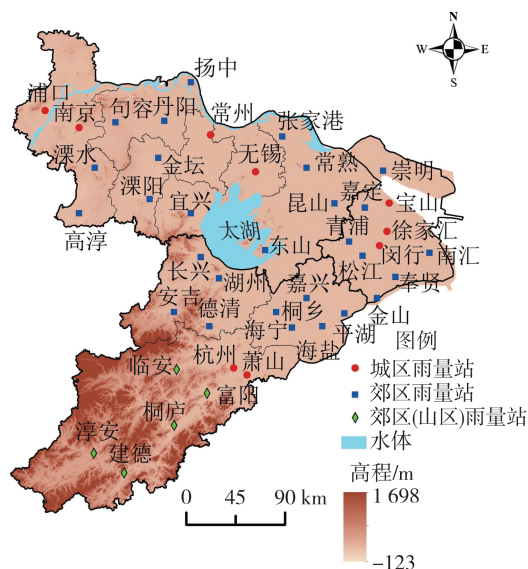


图1 研究区范围和雨量站分布

Fig.1 Study area and rainfall station distribution

综合考虑资料序列的长度以及数据的缺失情况,选择研究区内42个雨量站1978—2021年汛期(4—10月)的小时降水数据探究长三角核心城市群汛期降水的时空演变特征,雨量站分布如图1所示。所选数据的缺失值均在1%之内,缺失值采用前面2个数据进行插值补充。土地利用数据采用武汉大学杨杰等制作的CLCD数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo.4417810>),分辨率为30 m,时间跨度为1985—2020年^[26]。GDP数据和人口数据分别来自中国科学院地理科学与资源研究所(<https://www.resdc.cn/>)中国GDP空间分布公里网格数据集(1 km×1 km)和中国人口空间分布公里网格数据集(1 km×1 km),现存1995年、2000年、2005年、2010年、2015年和2019年6期数据。此外,本文根据研究区各省市统计年鉴中的数据对区域的经济发展状况进行评估,从而对城市化发展的不同时期进行划分。

2 研究方法

2.1 极端降水定义

在统计学中,目前对极端降水的定义可以分为参数化方法和非参数化方法两大类。为更好地体现各区域的变化差异,本文对极端降水的定义采用非参数化方法中的百分位阈值法^[27-28]。将各个雨量站 1978—2021 年 4—10 月大于 0.1 mm 的小时降水量按升序排列,取其第 95% 的降水量作为该雨量站的极端降水阈值。百分位阈值法能更好地消除地域差异造成的影响,增强少雨地区和多雨地区降水指标的空间可比性,具有较弱的极端性和较强的显著性等特点,但是由于每个雨量站的极端降水阈值不同,从整体来评估区域的极端降水变化就会存在一定的难度^[18,24]。

2.2 城市化进程的划分

结合 GDP、人口等数据将研究区城市化进程划分为 1978—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2011—2021 年 4 个时间段。选择 1985 年、1995 年、2005 年和 2015 年的数据代表不同城市化发展阶段研究区下垫面的情况(图 2)。通过计算可知,研究区城市用地占比呈持续增长的趋势,后一个时间段相对前一个时间段的增长率分别为 58.4%、84.7%、54.1%,相对应耕地面积的下降率分别为 5.4%、10.9%、9.7%。

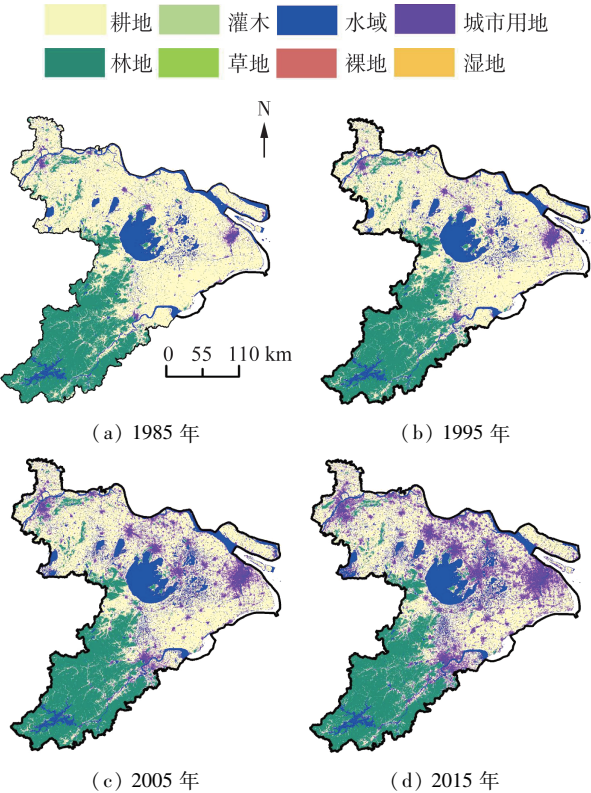


图 2 研究区不同时期土地利用情况

Fig. 2 Land use in different periods in study area

2.3 分析方法

对研究区的城市化进程进行划分后,采用统计学方法结合 GIS 分析研究区汛期降水空间上的变化特征,利用 Mann-Kendall (M-K) 趋势和突变检验分析时间上的变化规律,最后通过比较城郊差异以及不同时期降水指标的变化来探究城市化对汛期降水的影响。

3 结果与分析

3.1 汛期降水时空特征分析

3.1.1 汛期降水空间变化特征

利用 ArcGIS 的插值功能得到研究区极端降水阈值分布,结果如图 3 所示,可以看出,极端降水阈值的分布呈现从北向南逐渐减小的趋势,阈值范围为 7.70 ~ 10.11 mm,均值为 8.53 mm。

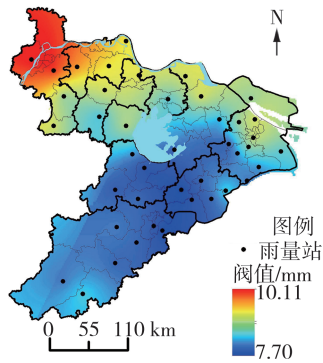


图 3 极端降水阈值分布

Fig. 3 Threshold distribution of extreme precipitation

在确定各雨量站阈值的基础上计算汛期极端降水量的年平均值,根据划分的 4 个时间段分析得到汛期极端降水量的空间分布以及随时间的变化情况,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,4 个时间段的降水空间分布基本上呈现由南向北逐渐减少的趋势,2000 年以前降水的低值区域主要分布在研究区的北部,之后研究区的东部地区成为降水低值区域,4 个时间段的降水低值区域几乎都在太湖附近,一定程度上体现出大型水体下垫面对其上空降水的减弱作用^[27]。另外从全域的视角可以看出,长三角核心城市群的汛期极端降水从 1978—2021 年呈现增加的趋势。为进一步探究降水随时间变化的趋势,下文通过 M-K 趋势和突变检验进一步分析。

3.1.2 汛期降水时间变化趋势

研究区 42 个雨量站汛期总降水量、汛期极端降水量、前汛期极端降水量(4—6 月)和后汛期极端降水量(7—10 月)的 M-K 趋势检验结果如图 5 所示,共分为下降趋势(通过 95% 显著性检验)、下降趋势

汛期极端降水量/mm ≤250 >250~300 >300~350 >350~400 >400~450 >450

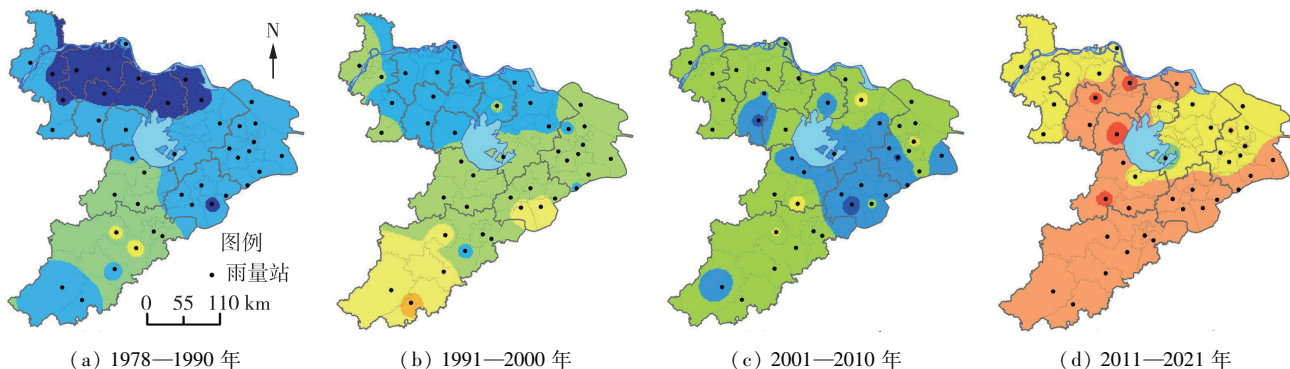


图 4 各时间段汛期极端降水量的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of extreme precipitation in flood season for different time periods

▼ 下降(通过95%显著性检验) ▼ 下降(未通过95%显著性检验) ▲ 上升(未通过95%显著性检验) ▲ 上升(通过95%显著性检验)

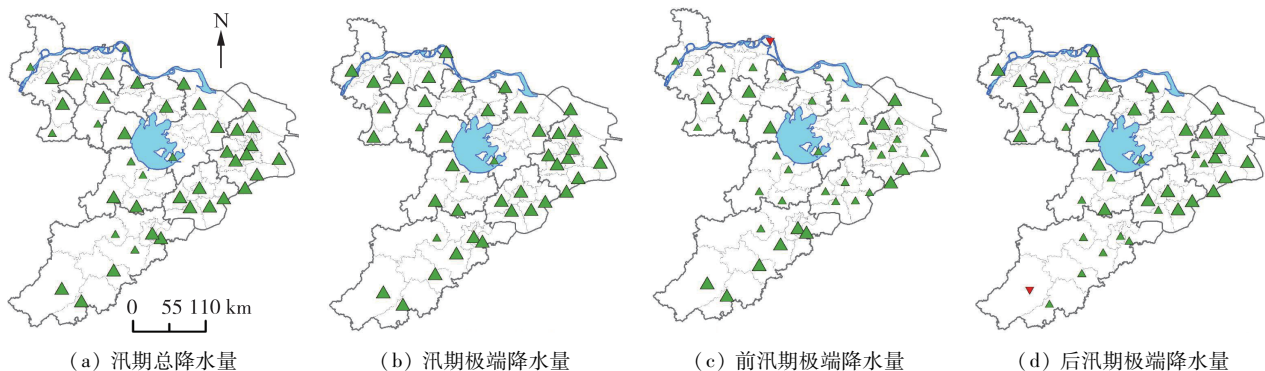


图 5 各雨量站不同降水指标变化趋势的空间分布

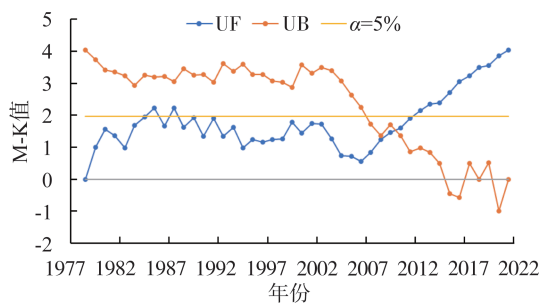
Fig. 5 Spatial distribution of variation trends of different precipitation indexes at each rainfall station

(未通过 95% 显著性检验)、上升趋势(未通过 95% 显著性检验)和上升趋势(通过 95% 显著性检验)4 类。通过计算所有雨量站所有指标的 M-K 值可以发现,除了前汛期极端降水量指标中的扬中站以及后汛期极端降水量指标中的淳安站,其他所有雨量站 M-K 值均大于 0,说明研究区的降水总体呈现增加的趋势。

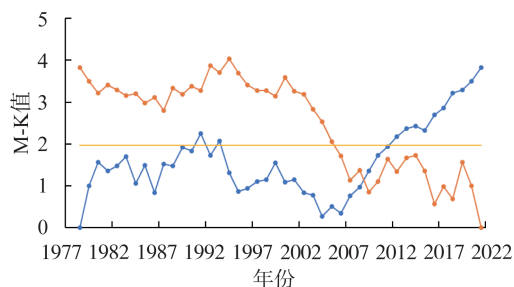
通过统计这几类雨量站的数量占比可知:所有雨量站汛期总降水量和汛期极端降水量指标都呈上升趋势,其中在汛期总降水量指标中,约 79% 的雨量站通过了显著性检验;在汛期极端降水量指标中,约 90% 的雨量站通过了显著性检验。结合这两个指标变化趋势的空间分布图(图 5(a)(b))可知,长三角核心城市群汛期降水总体呈显著增加的趋势,且极端降水的增加趋势更加突出和明显,说明汛期极端降水是汛期降水的重要组成部分,对汛期总降水会产生重要的影响。在前汛期极端降水量指标中,约 67% 的雨量站上升趋势未通过显著性检验;在后汛期极端降水量指标中,约 31% 的雨量站上升趋势未通过显著性检验。后汛期极端降水量增加

显著的雨量站较为集中地分布在中部和北部地区,南部地区除去一个呈下降趋势的雨量站外,其他所有雨量站的上升趋势均不显著;与之相反的是,南部地区前汛期极端降水量增加趋势显著,且中部和北部地区增加趋势的显著性弱于后汛期极端降水量。结合 DEM 高程图可以发现,研究区南部地区多山地,而中部和北部地区多平原,地形可能是导致前后汛期极端降水量变化趋势空间分布差异的重要原因。

对全域所有雨量站的汛期和后汛期极端降水量做平均计算,利用 M-K 突变检验方法分析研究区的降水变化情况,结果如图 6 所示。汛期极端降水量序列的突变时间在 2009—2010 年之间,后汛期极端降水量序列的突变时间在 2008—2009 年之间;汛期和后汛期极端降水量从 1978 年开始均呈现增加趋势,均在 2011 年之后呈现显著增加趋势。总体来看,汛期和后汛期极端降水量的变化趋势有较强的一致性,说明长三角核心城市群汛期降水的变化主要来自后汛期降水的变化^[24-25]。



(a) 汛期极端降水量



(b) 后汛期极端降水量

图6 研究区不同降水指标 M-K 突变检验结果
Fig.6 Results of M-K mutation test of different precipitation indexes in study area

3.2 城市化对汛期降水的影响

将研究区按照省级行政区进行划分,并根据人口、GDP 以及相关统计年鉴等参考数据,选择了南京、浦口、常州、无锡这 4 个雨量站作为江苏省的城区雨量站,宝山、闵行、徐家汇这 3 个雨量站作为上海市的城区雨量站,杭州和萧山这 2 个雨量站作为浙江省的城区雨量站,剩下的 33 个雨量站作为各个划分区域的郊区雨量站,城区和郊区雨量站的分布如图 1 所示。本文通过对城区和郊区降水的横向对比及不同城市化阶段降水指标的纵向对比来研究城市化对汛期降水特征的影响。

城区的降水变化不仅受城市化因素的影响,也会受气候变化因素的影响。结合图 5 不同降水指标的变化趋势可知,42 个雨量站的降水变化趋势基本一致,即 1978—2021 年的降水呈现增加趋势。这种一致的变化过程表明,在大尺度环流系统的背景下,气象因子对降水的影响基本相同,整个大气环流对研究区城区和郊区降水的影响总体上是一致的。因此,可以认为长三角核心城市群城区和郊区的降水差异主要是由城市化因素造成的^[18,29]。

3.2.1 城市化对降水变化趋势的影响

图 7 为苏浙沪城区和郊区降水时间序列的线性回归结果,可以看出上海、江苏和浙江的城区和郊区的汛期总降水量和后汛期极端降水量均呈现增加的

趋势,这与前文分析的结果一致,说明 1978 年以后长三角核心城市群降水总体呈增加趋势。苏浙沪城区和郊区汛期总降水量增加速率分别为每 10 年 64.6 mm 和 60.9 mm、66.8 mm 和 66.1 mm、52.9 mm 和 50.7 mm,后汛期极端降水量的增加速率分别为每 10 年 25.7 mm 和 30.6 mm、33.9 mm 和 29.5 mm、22.0 mm 和 20.3 mm。城区降水指标的增加速率几乎都高于郊区,说明城区降水的增速在一定程度上高于郊区。

另外,为了探究地形因素对汛期降水的影响,将浙江省的临安、富阳、桐庐、建德、淳安这 5 个分布在多山地地区的雨量站作为山区雨量站单独进行讨论分析,结果如图 8 所示。浙江山区汛期总降水量和后汛期极端降水量的增加速率分别为每 10 年 37.4 mm 和 4.5 mm。对比前面的分析可知,苏浙沪城区和郊区后汛期极端降水量的增加速率约占汛期总降水量增加速率的一半,而浙江山区后汛期降水量的增加速率大约只占汛期总降水量增加速率的 12%。说明浙江山区汛期降水的变化主要来源于前汛期,另外地形可能在降水方面起着重要的影响作用。

3.2.2 城市化对降水增长率的影响

对研究区城区和郊区汛期总降水量的增长率进行统计,并对其时间序列进行线性回归分析,结果如图 9 所示。1978—2021 年苏浙沪城区和郊区汛期总降水量的增长率均呈现递减的趋势,上海和江苏城区汛期总降水量增长率的递减速度比郊区更快,出现这种结果的原因可能是自 1978 年以来一些地区的城市用地比例已接近饱和,而一些尚未发展充分的城市开始进入快速发展阶段,从而对长三角核心城市群城区和郊区的降水差异产生影响。另外,浙江城区汛期总降水量增长率的递减速度小于郊区,结合对浙江山区汛期总降水量增长率时间序列的线性回归分析(图 10),可以发现浙江山区的汛期总降水量增长率的变化趋势和变化速度和浙江郊区相近,地形的因素可能会影响降水增长率的变化。

对不同行政区城区和郊区的汛期和后汛期极端降水量的增长率进行线性回归分析,得到各个地区不同指标的线性表达式如表 1 所示。上海和江苏城区和郊区的两个降水指标的增长率均呈现下降的趋势,说明汛期和后汛期极端降水量虽然在增加,但是增加的速度都在减小。浙江城区这两个降水指标的增长率均呈现上升趋势,而郊区呈现下降的趋势,说明浙江城区和郊区的降水差异在进一步扩大。

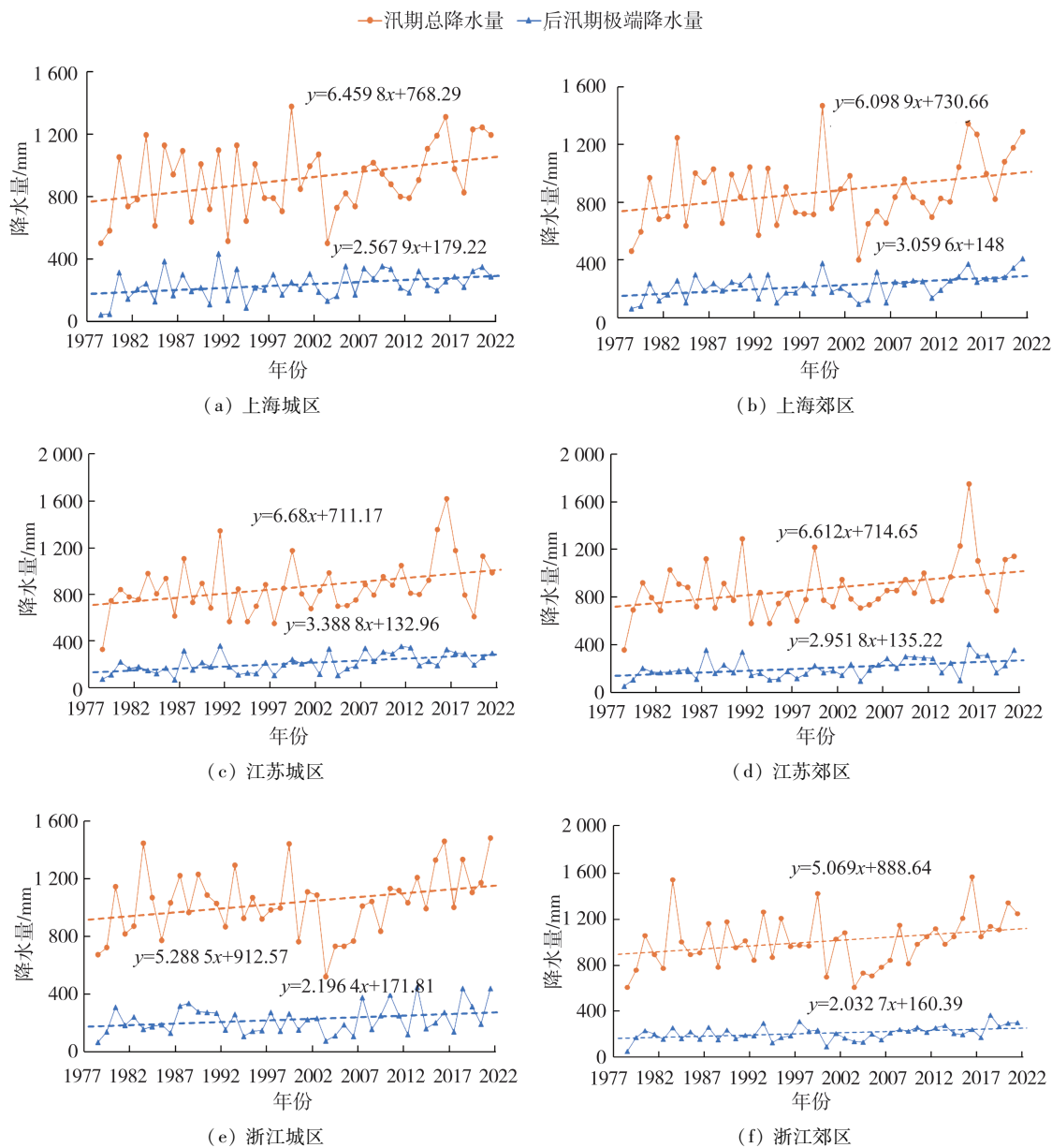


图7 上海、江苏和浙江城区和郊区汛期降水的时间变化趋势

Fig.7 Temporal variation trend of flood season precipitation of urban and suburban areas in Shanghai, Jiangsu, and Zhejiang

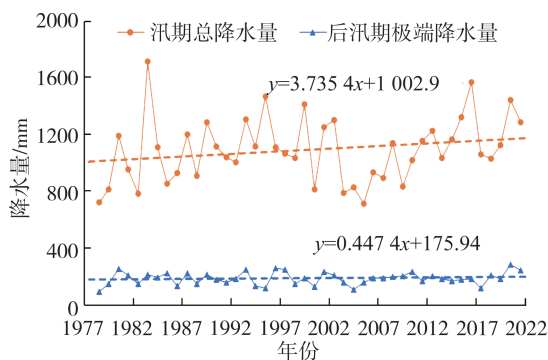


图8 浙江山区汛期降水的时间变化趋势

Fig.8 Temporal variation trend of flood season precipitation of mountainous areas in Zhejiang Province

表1 不同地区极端降水指标增长率的线性表达式

Table 1 Linear expressions of extreme precipitation index growth rates in different areas

地区	汛期极端降水量	后汛期极端降水量
上海城区	$y = -1.09x + 44.33$	$y = -2.23x + 80.69$
上海郊区	$y = -0.54x + 27.36$	$y = -0.70x + 35.31$
江苏城区	$y = -0.81x + 32.32$	$y = -0.80x + 38.04$
江苏郊区	$y = -0.69x + 26.68$	$y = -0.15x + 23.14$
浙江城区	$y = 0.30x + 6.92$	$y = 0.60x + 13.93$
浙江郊区	$y = -0.39x + 19.03$	$y = -0.71x + 29.68$
浙江山区	$y = -0.40x + 17.02$	$y = -0.24x + 13.76$

3.2.3 城市化对增雨系数的影响

城市化是个连续的过程,结合苏浙沪的统计年鉴以及相关的社会经济数据,在研究序列划分为4个时间段的基础上整合成1978—1999年和2000—

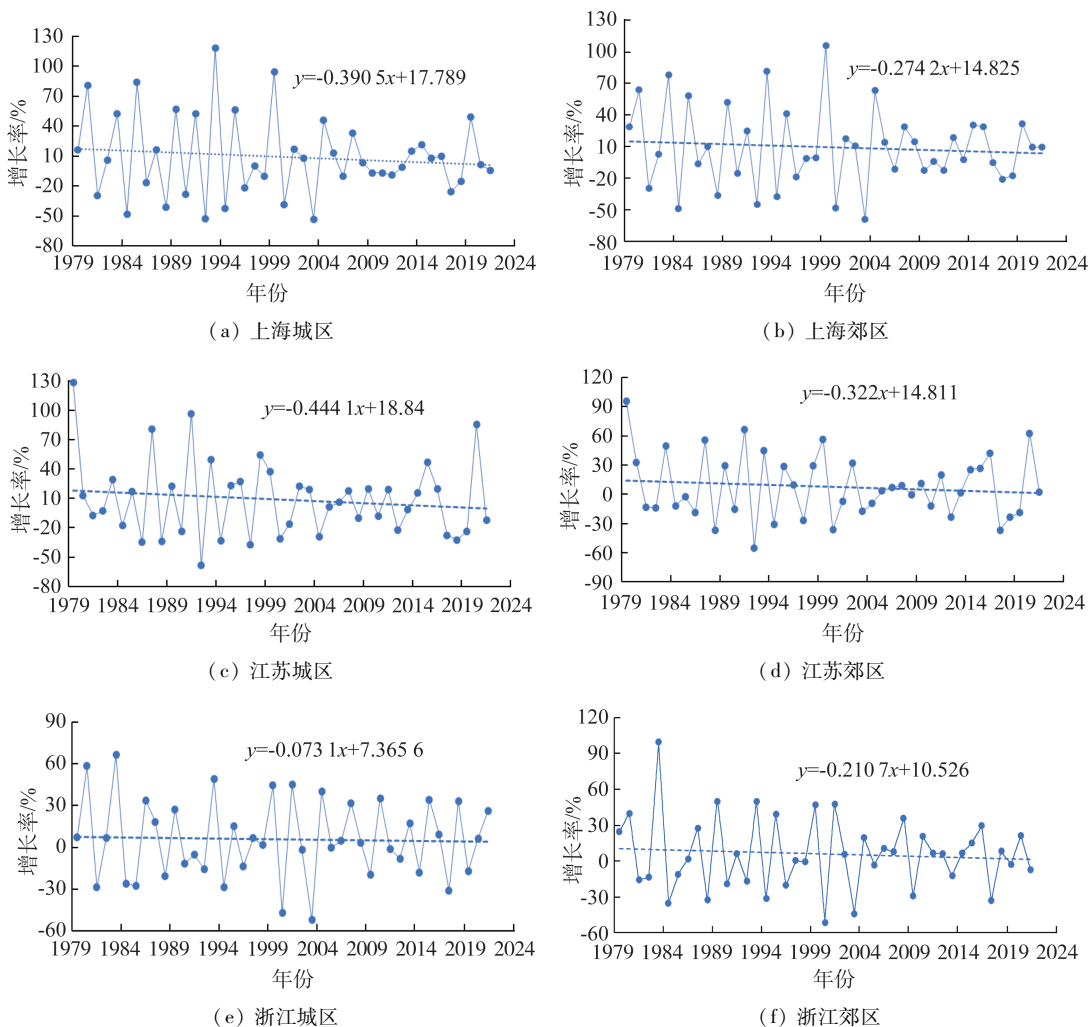


图9 不同地区汛期总降水量增长率的时间变化趋势

Fig. 9 Temporal variation trend of total precipitation growth rate in flood season in different regions

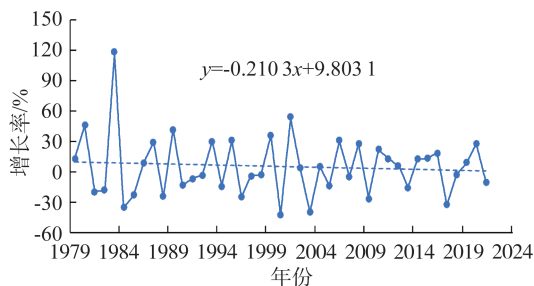


图10 浙江山区汛期总降水量增长率的时间变化趋势

Fig. 10 Temporal variation trend of total precipitation growth rate in flood season in mountainous areas of Zhejiang Province

2021 年两个大时间段,用增雨系数(即城区降水量与郊区降水量的比值)表示城区和郊区的降水差异,且在计算每年增雨系数的基础上以每个大时间段的多年平均值代表此时间段的城区和郊区降水差异。

由表 2 和表 3 可知,从第一个时间段到第二个时间段,上海城区汛期总降水量、汛期极端降水量和

后汛期极端降水量的增加率分别为 10.76%、20.86% 和 23.30%,郊区的增加率分别为 6.90%、18.35% 和 19.48%,3 个降水指标增雨系数的增加率分别为 5.05%、6.01% 和 11.83%;江苏城区汛期总降水量、汛期极端降水量和后汛期极端降水量的增加率分别为 14.34%、35.44% 和 45.24%,郊区的增加率分别为 13.15%、31.34% 和 36.10%,3 个降水指标增雨系数的增加率分别为 1.49%、1.94% 和 8.85%。上海和江苏后期的增雨系数均大于前期,且上海的所有增雨系数均大于 1,城市化对上海城区和郊区的降水差异产生更显著的影响。另外上海和江苏汛期极端降水量的增雨系数变化率大于汛期总降水量,后汛期极端降水量的增雨系数变化率又大于汛期极端降水量,也说明了城市化对降水影响效应的显著程度:后汛期极端降水量最大、汛期极端降水量次之、汛期总降水量最小。浙江地区汛期极端降水量以及后汛期极端降水量的增雨系数表现为后期小于前期,造成这种结果的原因可能是南部山地的地形特点以及植被分布。

表 2 城市化对不同降水指标的影响

Table 2 Effects of urbanization on different precipitation indexes

地区	汛期总降水量/mm		汛期极端降水量/mm		后汛期极端降水量/mm	
	1978—1999 年	2000—2021 年	1978—1999 年	2000—2021 年	1978—1999 年	2000—2021 年
上海城区	867.01	960.27	298.15	360.35	212.27	261.73
上海郊区	844.62	902.91	285.34	337.72	200.38	239.42
江苏城区	803.83	919.12	266.68	361.19	170.61	247.80
江苏郊区	816.35	923.72	267.98	351.96	173.31	235.87
浙江城区	1027.85	1045.85	329.30	365.20	207.98	238.88
浙江郊区	1001.98	1013.55	323.14	360.42	197.39	218.92

表 3 城市化对增雨系数的影响

Table 3 Impact of urbanization on rainfall-increasing coefficients

地区	增雨系数					
	汛期总降水量		汛期极端降水量		后汛期极端降水量	
	1978—1999 年	2000—2021 年	1978—1999 年	2000—2021 年	1978—1999 年	2000—2021 年
上海	1.027	1.079	1.053	1.116	1.040	1.163
江苏	0.983	0.997	1.010	1.030	0.997	1.086
浙江	1.032	1.034	1.046	1.018	1.087	1.080

城市热岛形成的热岛环流在凝结核丰富、水汽充足等其他有利的天气形势下,对流性降水和对流云更容易形成,同时对暴雨也会产生诱导和强化作用。城市化导致建筑物越来越密集,使城区的糙度大于郊区,降水云系飘移到城区上空的速度会减慢,滞留时间会增加,这样的城市阻碍效应也会导致城区降水量增加^[30-31]。另外,人类活动的加剧会影响城区的空气质量,大气中的气溶胶粒子因凝结核效应会形成更多且尺度更大的水滴,这些水滴在气流作用下转化成的冰晶会增加云层的厚度,致使对流性强降水的产生^[32-33]。

4 结 论

a. 在空间尺度上,极端降水阈值呈现从北向南逐渐减小的趋势。2000 年以前降水的低值区域主要分布在研究区的北部,2000 年之后研究区的东部地区成为降水低值区域,降水低值区域几乎都在太湖附近。

b. 在时间尺度上,长三角核心城市群的汛期总降水及极端降水均呈显著增加的趋势,但极端降水的增幅更大,表明汛期的极端降水对汛期总降水具有重要影响。此外,后汛期降水变化对整个汛期总降水变化起主导作用。

c. 基于线性回归分析方法,发现城区降水的增速基本高于郊区,浙江山区汛期降水的变化主要来自前汛期;苏浙沪城区和郊区汛期总降水量的增长率均呈现递减趋势,上海和江苏城区降水增长率的递减速度大于郊区。基于增雨系数,发现城市化对上海城郊降水差异的影响更为显著,对不同降水指

标的城郊差异影响程度表现为后汛期极端降水量最大、汛期极端降水量次之、汛期总降水量最小。

参考文献:

- [1] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护,2023,39(1):109-118. (ZHANG Li,ZHAO Ziyang,WANG Hongrui, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):109-118. (in Chinese))
- [2] 荣艳淑,魏佳,陈虎,等. 长江流域径流对气候变化响应的定量分析[J]. 水资源保护,2015,31(6):40-44. (RONG Yanshu,WEI Jia,CHEN Hu, et al. Quantitative analysis on the response of runoff to climate change in Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection, 2015,31(6):40-44. (in Chinese))
- [3] 魏潇娜,龙爱华,尹振良,等. 和田河流域冰川径流对气候变化响应的模拟分析[J]. 水资源保护,2022,38(4):137-144. (WEI Xiaona, LONG Aihua, YIN Zhenliang, et al. Simulation of response of glacier runoff to climate change in the Hotan River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4):137-144. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] GAO Ge, CHEN Deliang, XU Chongyu, et al. Trend of

- estimated actual evapotranspiration over China during 1960-2002 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D11): D11120.
- [6] FIELD C B, BARROS V R. Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability: global and sectoral aspects [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [7] BROWN M E, ARNOLD D L. Land-surface-atmosphere interactions associated with deep convection in Illinois [J]. International Journal of Climatology, 1998, 18 (15): 1637-1653.
- [8] 何玉芬, 杨汉波, 唐莉华, 等. 北大沙河流域径流变化归因分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (4): 95-101. (HE Yufen, YANG Hanbo, TANG Lihua, et al. Attribution analysis of runoff change in the Beidasha River Basin [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 95-101. (in Chinese))
- [9] LIU Jie, NIYOGI D. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification [J]. Scientific Reports, 2019, 9 (1): 7301.
- [10] 于志慧, 刘鹏飞, 何玉秀, 等. 太湖平原高度城镇化下降雨特征时空变化研究[J]. 湖泊科学, 2022, 34 (6): 2134-2143. (YU Zhihui, LIU Pengfei, HE Yuxiu, et al. Temporal and spatial variation of rainfall characteristics under high urbanization in the Lake Taihu Plain [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (6): 2134-2143. (in Chinese))
- [11] HUANG Huanping, WINTER J M, OSTERBERG E C. Mechanisms of abrupt extreme precipitation change over the northeastern United States [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123 (14): 7179-7192.
- [12] MURAKAMI H, DELWORTH T L, COOKE W F, et al. Increasing frequency of anomalous precipitation events in Japan detected by a deep learning autoencoder [J]. Earth's Future, 2022, 10 (4): e2021EF002481.
- [13] DEY R, LEWIS S C, ARBLASTER J M, et al. A review of past and projected changes in Australia's rainfall [J]. WIREs Climate Change, 2019, 10 (3): e577.
- [14] PRAVEEN B, TALUKDAR S, SHAHFAHAD, et al. Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using non-parametrical and machine learning approaches [J]. Scientific Reports, 2020, 10 (1): 10342.
- [15] WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Baolong, et al. Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973-2011 [J]. Quaternary International, 2013, 313-314: 110-117.
- [16] 杨龙, 田富强, 孙挺, 等. 城市化对北京地区降水的影响研究进展 [J]. 水力发电学报, 2015, 34 (1): 37-44. (YANG Long, TIAN Fuqiang, SUN Ting, et al. Advances in research of urban modification on rainfall over Beijing metropolitan region [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34 (1): 37-44. (in Chinese))
- [17] SHEPHERD J M, PIERCE H, NEGRI A J. Rainfall modification by major urban areas: observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41 (7): 689-701.
- [18] 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))
- [19] WEI Fengying, XIE Yu, MANN M E. Probabilistic trend of anomalous summer rainfall in Beijing: role of interdecadal variability [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113 (20): D20106.
- [20] 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.
- [21] LIANG Ping, DING Yihui, HE Jinhai, et al. Study of relationship between urbanization speed and change in spatial distribution of rainfall over Shanghai [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 19 (1): 97-103.
- [22] KAUFMANN R K, SETO K C, SCHNEIDER A, et al. Climate response to rapid urban growth: evidence of a human-induced precipitation deficit [J]. Journal of Climate, 2007, 20 (10): 2299-2306.
- [23] SETO K C, SHEPHERD J M. Global urban land-use trends and climate impacts [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2009, 1 (1): 89-95.
- [24] 黄国如, 陈易德. 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 [J]. 水资源保护, 2022, 38 (1): 82-90. (HUANG Guoru, CHEN Yisi. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under background of high urbanization [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 82-90. (in Chinese))
- [25] 杨海, 姜月华, 周权平, 等. 太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (6): 506-514. (YANG Hai, JIANG Yuehua, ZHOU Quanping, et al. Study on characteristics of rainfall-runoff generation processes at a plain experimental area in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (6): 506-514. (in Chinese))
- [26] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (8): 3907-3925.
- [27] 姜彤, 苏布达, MARCO G. 长江流域降水极值的变化趋势 [J]. 水科学进展, 2008, 19 (5): 650-655. (JIANG Tong, SU Buda, MARCO G. Trends in precipitation extremes over the Yangtze River Basin [J]. Advances in Water Science, 2008, 19 (5): 650-655. (in Chinese))

- Zheng, et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze Mainstem during recently 18 years[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5):1150-1162. (in Chinese))
- [15] 潘杰,李书建,胡尊乐,等. 流速分布规律在横向声学多普勒流量测验系统中的应用[J]. 水利信息化, 2021(2): 58-62. (PAN Jie, LI Shujian, HU Zunle, et al. Application of laws of velocity distribution in transverse acoustic Doppler flow measurement system[J]. Water Resources Informatization, 2021(2): 58-62. (in Chinese))
- [16] 程嫖嫖,金晨曦. ADCP 测流在巢湖流域水资源监测中的应用[J]. 水利信息化, 2019(4): 47-50. (CHENG Yuanyuan, JIN Chenxi. Application of ADCP flow measurement in water resources monitoring on Chaohu Lake Basin[J]. Water Resources Informatization, 2019(4): 47-50. (in Chinese))
- [17] 刘墨阳,蒋四维,林云发,等. 复杂水情下 H-ADCP 流量在线监测推流方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 27-34. (LIU Moyang, JIANG Siwei, LIN Yunfa, et al. Online H-ADCP discharge monitoring and flow derivation method under complex flow conditions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 27-34. (in Chinese))
- [18] 唐洪武,黄淑君,袁赛瑜,等. 长江-鄱阳湖交汇处三维水流结构研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 128-135. (TANG Hongwu, HUANG Shujun, YUAN Saiyu, et al. Three-dimensional flow structure at the confluence zone of Yangtze River and Poyang Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 128-135. (in Chinese))
- [19] 吴志勇,徐梁,唐运忆,等. 水文站流量在线监测方法研究进展[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 1-7. (WU Zhiyong, XU Liang, TANG Yunyi, et al. Research progress of on-line discharge monitoring methods in hydrometry stations[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 1-7. (in Chinese))
- [20] 张泉荣,谢运山,王萍,等. 定点式横向声学多普勒流速剖面仪应用研究[J]. 水文, 2021, 41(2): 69-74. (ZHANG Quanrong, XIE Yunshan, WANG Ping, et al. Study on the application of fixed-point type and lateral acoustic Doppler current profile[J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(2): 69-74. (in Chinese))
- [21] 谢运山,赵德友,张泉荣,等. 单波束声学多普勒流速仪垂向在线测流应用研究[J]. 水利信息化, 2018(6): 44-48. (XIE Yunshan, ZHAO Deyou, ZHANG Quanrong, et al. Application of single beam acoustic Doppler current meter in vertical online flow measurement[J]. Water Resources Informatization, 2018(6): 44-48. (in Chinese))
- [22] WEBB B W, PHILLIPS J M, WALLING D E, et al. Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS(R) programme[J]. Science of the Total Environment, 1997, 194-195: 379-389.

(收稿日期:2022-08-25 编辑:熊水斌)

(上接第 103 页)

- [28] 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))
- [29] YANG Mingnan, XU Youpeng, PAN Guangbo, et al. Impacts of urbanization on precipitation in Taihu Lake Basin, China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4): 739-746.
- [30] 岳彩军,唐玉琪,顾问,等. 城市阻碍效应对局地台风降水的影响[J]. 气象, 2019, 45(11): 1611-1620. (YUE Caijun, TANG Yuqi, GU Wen, et al. Study of urban barrier effect on local typhoon precipitation[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(11): 1611-1620. (in Chinese))
- [31] 江善虎,刘亚婷,任立良,等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 9-14. (JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 9-14. (in Chinese))
- [32] 黄晓东,刘文锴,曹润祥,等. 不透水面扩张对郑州主城区降水特征的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 22-30. (HUANG Xiaodong, LIU Wenkai, CAO Runxiang, et al. Effects of impervious surface expansion on precipitation characteristics in main urban area of Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 22-30. (in Chinese))
- [33] 杨悦莹,朱志华,蔡宴朋,等. 城市流域径流峰值对降雨时空异质性的响应[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 27-33. (YANG Yueying, ZHU Zhihua, CAI Yanpeng, et al. Response of peak runoff to temporal and spatial heterogeneity of rainfall in urban watershed[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 27-33. (in Chinese))

(收稿日期:2023-01-12 编辑:熊水斌)