

平原水网区洪水形态特征变化及其影响因素

王强^{1,2,3}, 宋琛³, 张建云¹, 贺瑞敏¹, 许有鹏³, 徐羽⁴, 吴金宁⁵

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029;

2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023;

4. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 5. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 常州 213022)

摘要: 暴雨洪水的形态特征是洪涝预警预报及灾害防控的重要指标, 在防洪减灾工作中具有重要指示意义。传统水文学研究多关注变化环境下洪水量级的变化特征, 对于洪水形态参数变化和影响机理的研究还有待深入。本文以高度城市化的太湖平原水网区为典型, 构建了基于过程的暴雨洪水事件识别方法, 揭示了1971—2020年暴雨洪水事件的形态特征变化及其驱动机制。结果表明变化环境背景下太湖平原地区不仅洪水量级(洪峰水位和水位涨幅)发生显著变化, 洪水涨落形态特征(如涨水速率和退水速率)也发生了明显改变。随着城市化程度增加, 暴雨洪水形态特征变化呈现先增加后减小的非线性变化特征, 受到了不透水面和水利设施的共同作用。洪峰水位有61.5%站点存在显著突变和76.9%站点呈现显著上升趋势。涨水速率有46.2%站点存在显著突变, 所有站点均呈现增加态势, 其中38.5%站点达到显著水平。退水速率有53.8%的站点存在显著突变和显著趋势特征, 整个时段趋势达 $0.628 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。前期水位条件和降雨特性是影响该地区洪水形态特征的主要驱动因素。本文研究结果将加深对变化环境下太湖平原地区洪水演变规律的认识, 可为类似平原水网地区洪涝灾害防控提供参考和支撑。

关键词: 洪水形态特征; 可解释机器学习; 变化环境; 城市化; 平原水网地区

DOI: 10.11821/dlxb202411006

1 引言

随着城市化和气候变化影响的加深, 暴雨洪水问题日趋严峻^[1-2]。平原水网地区多位于河口三角洲, 易受到极端暴雨、上游洪水和潮位顶托等多重因素影响, 洪涝频发, 形势复杂^[3]; 平原地区城市化发展较快, 人口和经济相对更为聚集, 遭受暴雨洪水威胁相对较大, 严重制约了社会经济可持续发展^[4]。传统水文学研究多关注极端洪水事件的量级和频率特征, 对于暴雨洪水涨落过程的形态特征演变还有待进一步探究。针对日益突出的暴雨洪水问题, 探讨平原水网地区暴雨洪水事件变化的新特征和驱动机理, 是当前水文学等学科研究的热点问题, 可为洪涝灾害防控提供参考与支撑。

收稿日期: 2024-04-12; 修订日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101020, U2240203); 中央高校基本科研业务费专项资金关键地球物质循环前沿科学中心“GeoX”交叉项目(0209-14380127); 水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金资助项目(2022nkms02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42101020, No.U2240203; The Fundamental Research Funds for the Central Universities Cernac “GeoX”, No.0209-14380127; The Belt and Road Special Foundation of the National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, No.2022nkms02]

作者简介: 王强(1992-), 男, 安徽安庆人, 副研究员, 主要从事城市化地区水文观测与模拟研究。

E-mail: wqianghy@nju.edu.cn

针对变化环境下的暴雨洪水问题,国内外学者开展了大量卓有成效的研究。受季风气候和地形地貌的影响,中国洪涝灾害主要是由较大强度的降雨引起,即暴雨洪水。近期研究表明,变化环境下暴雨洪水过程在频率^[5]、量级^[6]和影响范围^[7-8]等方面均出现了新的变化特征,为防洪安全带来了新的考验。对于暴雨洪水过程的变化机制,其既受到城市化引起的土地利用/覆被和水系格局等下垫面因素变化的作用,也受到气候变化导致的极端降雨变化的影响^[9-11]。已有研究表明,人类活动对太湖平原地区极端水位过程起到了主导作用,并且对于不同城市化阶段,人类活动对水位过程的影响程度也有所差异^[6]。城市化对暴雨洪水过程的影响因素复杂,其可通过不透水面扩张直接影响地表产汇流过程^[12],也可通过河网水系的调蓄功能影响洪水的蓄泄过程^[13-14],城市化地区大规模修建的闸泵水利工程也对洪水过程起到了调控作用^[15]。由于平原水网地区暴雨洪水过程影响因素复杂,如何厘清城市下垫面、极端降雨、潮位和上游来水等多重因素对洪水过程的影响和作用形式对区域防洪减灾工作具有重要意义。

从大量样本中提取典型洪水特征指标可为水资源管理提供可靠决策信息支持,对洪涝灾害防治具有重要意义。以往研究多基于年最大值^[16]和超阈值^[17]等抽样法提取极端事件序列,较好反映了洪峰量级特性,但也忽略了暴雨洪水的涨落特征^[18]。洪水涨幅、涨速和退水速率等反映了暴雨洪水事件的形态特征,涨幅越大、涨速越快,极易在短时间形成灾害性洪水^[19]。平原水网地区地势低平,受到闸门、泵站等水利工程调控作用,水流情势复杂,多为往复流,水文情势多用水位过程表征,难以获取实测河道流量数据^[20]。如何基于长序列水位观测数据,识别平原地区暴雨洪水过程,还有待进一步深入探究。

因此,本文以太湖平原水网地区为典型,建立基于过程的暴雨洪水事件行为特征指标,结合非平稳性分析及可解释机器学习等方法,探讨变化环境下暴雨洪水事件的变化规律及驱动因素,以期为类似平原水网地区防洪减灾提供科学依据。

2 数据与方法

2.1 太湖典型水网区概况

武澄锡虞区是太湖流域典型平原水网地区,地势低平,洪涝灾害频发,地理位置如图1所示。该区域是中国城市化程度最高、城市化发展最快的地区之一。快速城市化发展也导致了下垫面特征剧烈变化,20世纪60年代—21世纪10年代该地区河网密度和水面率分别减少18.87%和24.59%,1991—2010年城镇用地面积从705 km²增加到1533 km²^[14]。该地区受亚热带季风气候影响,汛期降雨集中。近年来,受城市化引起的下垫面变化和气候变化导致的极端降雨变化等因素影响,洪涝灾害呈现频发多发的趋势。为缓解城市洪涝灾害,闸泵等水利工程组建的城市防洪工程得到大规模修建,较好减轻了城市中心城区的洪涝灾害,但也出现了洪水出路不足和城市外围地区水位增加等新的特征^[21-22]。因此,本文以武澄锡虞区为典型,从洪水形态特征上揭示城市化和气候变化背景下太湖平原水网区暴雨洪水变化的新规律和驱动机制。

2.2 数据资料

本文采用的数据主要包括水文数据和地理空间数据。水文资料为1971—2020年日尺度水位、降水和潮位数据,来源于江苏省水文年鉴。水位数据包含平原水网地区13个重要河道国家级控制水文站,均匀分布于研究区,可较好反映该地区暴雨洪水过程;同时,包含3个太湖湖区水文站,用于表征太湖湖区水位。潮位资料为沿江分布的9个重要潮位观测站。水文站还包括研究区上游京杭大运河丹阳站,用于反映上游来水压力。所有水

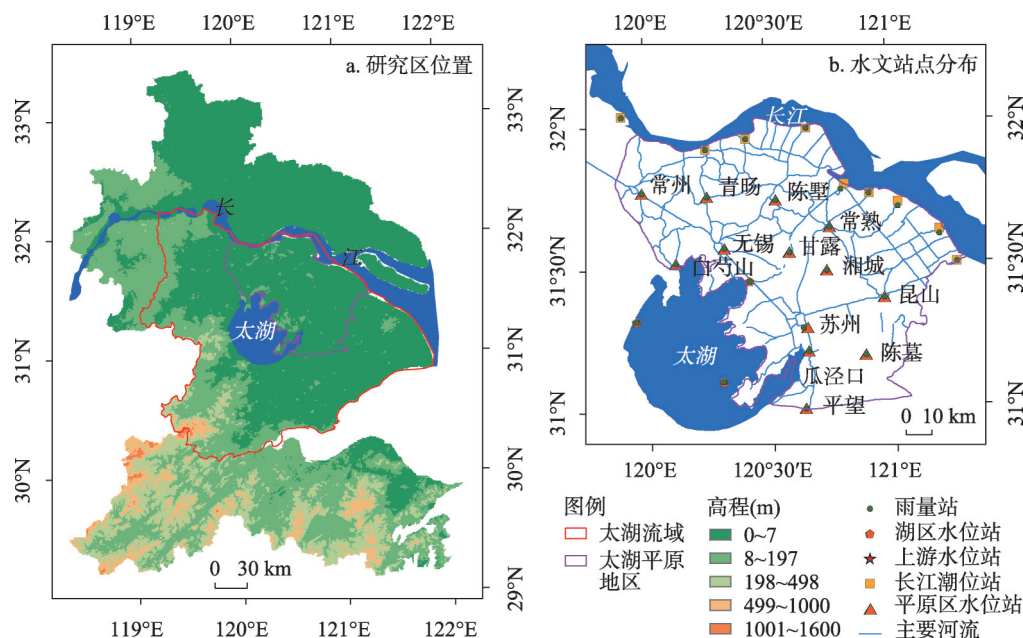


图1 太湖平原水网区概况及水文站点分布

Fig. 1 Location of the Taihu plain region and distribution of hydrological stations

位和潮位站均含有同步降水观测资料。地理空间数据主要包括1985—2018逐年不透水面资料(30 m分辨率)^[23]和自20世纪50年代以来的闸泵等水利工程普查资料,闸泵水利工程资料包含空间位置、建成年份和泵站抽排能力等信息。

2.3 研究方法

首先,建立了基于过程的暴雨洪水事件识别方法,从暴雨洪水的涨落过程出发,分析太湖平原水网区暴雨洪水的形态特征及其分布规律;其次,采用Pettitt与Mann-Kendall非参数检验法^[24],分析太湖平原水网区暴雨洪水形态特征的时空变化规律及其非平稳性;最后,采用可解释机器学习方法,量化暴雨、天文潮、上游来水、太湖水位等诸要素对洪水形态特征的影响程度和机理。

2.3.1 洪水事件识别及形态特征参数 平原水网地区水流方向不定,难以获得准确河道流量资料,洪水情势多用水位表征,如何通过洪水水位过程识别洪水事件尚未形成统一标准^[20]。由于平原地区洪峰流量难以观测,论文采用了洪峰水位等基于水位过程的特征指标描述洪水形态特征信息。本文从降雨水位响应过程出发,建立了平原水网区暴雨洪水事件识别方法。首先,采用递归数字滤波方法,将水位过程划分为常水位过程和暴雨洪水水位过程(图2a)。递归数字滤波方法可提取长序列数据中高频信号,例如水文序列中的洪水响应,已在水文学领域径流分割中广泛应用^[25-26]。其次,提取各独立洪水事件特征指标,为去除水利工程调度等人为因素影响,本文要求各独立洪水事件有降雨发生且洪峰水位高于年水位序列的80%分位数(图2b)。最后,选取洪峰水位(FM, m)、水位涨幅(FA, m)、涨水速率($FR, m \cdot d^{-1}$)和退水速率($FE, m \cdot d^{-1}$)4个行为参数描述暴雨洪水的形态特征(图2c)。水位涨幅、涨水速率和退水速率计算公式如下:

$$FA = FM - FI \quad (1)$$

$$FR = \frac{FA}{T_m - T_s} \quad (2)$$

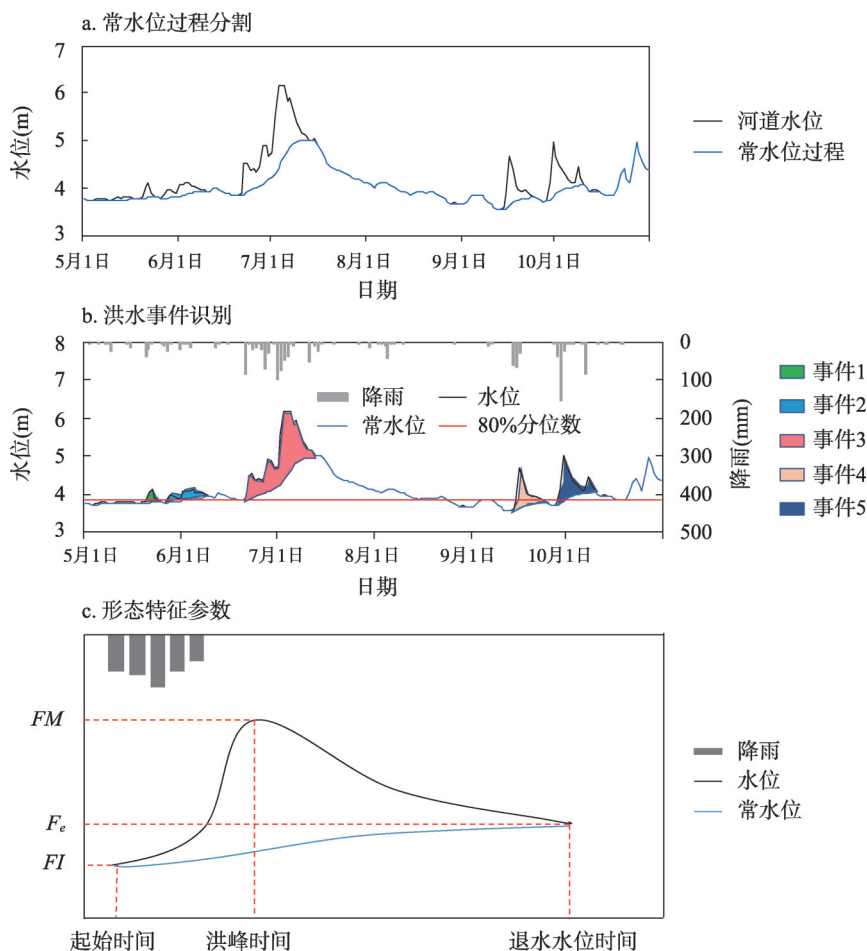


图2 2016年太湖平原地区洪水事件识别及形态特征参数

Fig. 2 The identification of flood events and morphological characteristics over the Taihu plain region in 2016

$$FE = \frac{FM - F_e}{T_e - T_m} \quad (3)$$

式中: FI 为起始水位 (m); F_e 为退水水位 (m); T_s 、 T_m 和 T_e 分别为起始、洪峰和退水水位的时间。

2.3.2 暴雨洪水特征的潜在影响因素 太湖平原地区洪水形成因素复杂, 本文从城市化、水利工程、前期条件、降雨、上游水位和太湖湖区水位等方面, 全面梳理了该地区暴雨洪水特征的20个潜在影响因素 (表1)。城市化特征可以从经济、人口和下垫面等不同方面衡量。从水循环角度来看, 城市化主要通过下垫面影响区域水文过程^[12]。因此, 本文主要选取不透水面表征城市化特征, 由于平原水网区无明确汇水边界, 兼顾平原区集水范围和站点之间距离, 以各站点5 km半径的缓冲区不透水面比率表征该站点周围的城市化程度, 基于不透水面资料^[23]可获取各站点逐年不透水面特征。同时, 考虑到平原河网地区水文过程还受到了广泛分布的闸泵水利工程设施的影响, 选取缓冲区范围内水闸数量、泵站数量和排涝能力等指标, 反映区域的水利工程因素。

2.3.3 非平稳及趋势性分析 由于水文序列多是偏态且不服从同一分布, 多应用非参数检验方法开展分析^[27]。因此, 本文采用了Pettitt突变和Mann-Kendall趋势检验方法, 对各洪

表 1 平原地区洪水形态特征的潜在影响因素

Tab. 1 The potential influencing factors of flood morphological characteristics in plain regions

序号	潜在影响因素	特征指标	简写	单位
1	城市化	不透水面比率	IA	%
2	水利工程	水闸数量	SZ	个
3		泵站数量	BZ	个
4		闸泵数量	ZB	个
5		排涝能力	PL	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
6		前期水位	FI	m
7	本地降雨	总降雨量	RA	mm
8		平均降雨强度	RI	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$
9		最大降雨强度	RM	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$
10		降雨持续时间	RD	d
11		前期(7 d)降雨	R7	mm
12	长江潮位	起始潮位	CI	m
13		最高潮位	CM	m
14		平均潮位	CA	m
15	上游水位	上游起始水位	UI	m
16		上游最高水位	UM	m
17		上游平均水位	UA	m
18	湖区水位	起始太湖水位	TI	m
19		太湖最高水位	TM	m
20		太湖平均水位	TA	m

水形态特征序列进行突变点识别和趋势性诊断，该两种方法具有适用范围广、受异常值干扰小等特点，在水文学等领域应用广泛^[28-29]。考虑暴雨洪水特征序列的显性趋势对自相关系数的影响，本文采用了去趋势预置白Mann-Kendall检验方法，通过去除样本序列趋势项和自相关项等操作，可以剔除样本序列中自相关系数的影响，从而使得趋势检验更为合理^[30-31]。

2.3.4 可解释机器学习算法 针对平原水网区暴雨洪水影响因素交织复杂并难以量化的问题，论文采用了可解释机器学习方法，通过构建随机森林（Random Forest）模型结合SHAP（Shapley Additive Explanations）算法，量化各潜在影响因素对洪水形态特征参数的影响程度。传统机器学习模型可建立多要素和洪水特征指标的非线性关系，虽然可以预测自变量对因变量的影响程度，但也存在可解释性较差的缺点，难以解释预测其影响特征和机理。SHAP方法可通过分离每个预测变量对目标变量的边际贡献，其与机器学习算法相结合，可分析不同预测变量对目标变量的影响程度和交互作用，近期已在水文学、地理学等学科中得到较好应用^[32-33]。随机森林模型主要参数为决策树个数（ n ）和最大深度（ m ），因此本文主要针对这两个参数进行模型参数优选。首先，将观测样本划分为训练集和测试集，其中训练集样本占比70%，测试集样本占比30%。其次，采用随机网格搜索的超参数优化方法，参数 n 变动范围为10~200，参数 m 范围为2~50和空值（空值表示不限制深度，模型自动选择），通过平均绝对误差（MAE）和相关系数（ r ）评估模型效果。

3 结果分析

3.1 太湖平原水网区暴雨洪水事件的形态特征

基于太湖平原水网地区洪水事件识别算法, 获取1971—2020年3849场次暴雨洪水事件, 分别提取各事件4个洪水形态参数和对应20个潜在影响因素特征。基于获取的暴雨洪水场次信息, 分析了太湖平原水网区暴雨洪水的形态特征(图3)。为揭示不同城市化程度下暴雨洪水特征, 本文将各水文站点区域按不透水面比率划分成不同城市化等级。由于目前城市化程度划分尚无明确定义, 故采用等间距划分法, 按2018年下垫面特征将各站点所代表区域划分为低度($IA \leq 33\%$)、中度($33\% < IA \leq 66\%$)和高度($IA > 66\%$)城市化地区。同时, 为分析不同降雨强度下洪水形态特征, 按最大24 h降雨量, 将各场次洪水事件划分为小雨($RM \leq 10 \text{ mm}$)、中雨($10 \text{ mm} < RM \leq 25 \text{ mm}$)、大雨($25 \text{ mm} < RM \leq 50 \text{ mm}$)和暴雨事件($RM > 50 \text{ mm}$)。

洪峰水位反映了洪水量级特征, 太湖平原区洪峰水位表现出明显的城市化和降雨等级差异(图3a)。从城市化程度来看, 不同降雨等级下洪峰水位均随着城市化程度先增加后减小的特征, 低度、中度和高度城市化地区洪峰水位的均值分别为3.35 m、3.76 m和3.59 m。从降雨等级来看, 洪峰水位呈现随降雨量级增加而增加的趋势, 小雨、中雨、大雨和暴雨事件下均值分别为3.51 m、3.51 m、3.55 m和3.82 m, 其中从大雨到暴雨事件变化幅度最大。水位涨幅反映了洪峰水位变化的相对幅度, 其与洪峰水位总体类似(图3b), 表现为随城市化程度先增加后减小的特征, 低度、中度和高度城市化区域水位涨幅均值分别为0.28 m、0.34 m和0.31 m。从降雨等级来看, 水位涨幅表现为随降雨等级增加而增加, 小雨、中雨、大雨和暴雨事件下水位涨幅分别为0.07 m、0.17 m、0.30 m和0.64 m; 从大雨到暴雨事件, 洪峰涨幅变化幅度最大。

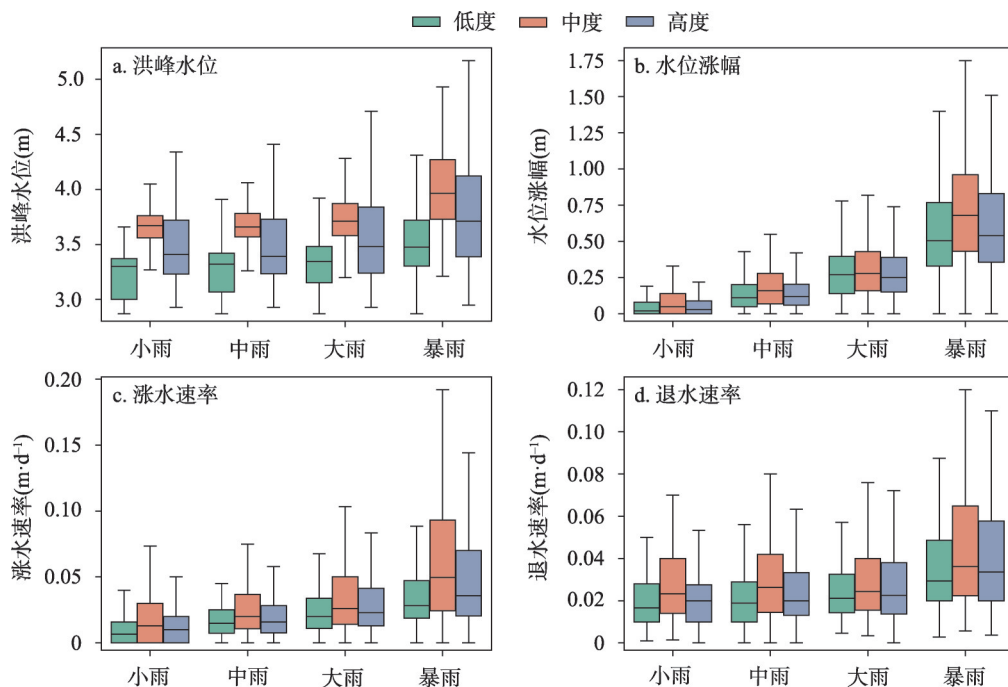


图3 不同城市化程度和降雨等级下的洪水形态特征

Fig. 3 Flood morphological characteristics under different urbanization degrees and rainfall levels

涨水速率和退水速率反映了暴雨洪水的涨落特征,太湖平原区洪水涨落特征也表现出明显的城市化和降雨等级差异(图3c~3d)。对于涨水速率,其表现为随城市化程度先增加后减小的特征,低度、中度和高度城市化地区涨水速率均值分别达到了 $0.02 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.04 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$;同时,涨水速率也表现出随降雨等级增加而增加的态势,小雨、中雨、大雨和暴雨事件下涨水速率分别达到了 $0.02 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.02 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ (图3c)。与涨水速率类似,退水速率也表现出随城市化程度先增加后减小和随降雨等级增加而增加的特征(图3d)。从不同城市化程度下涨落特征来看,暴雨洪水形态在城市化影响下呈现陡涨陡落的特征,但随着城市化程度进一步增加,其涨落特征有所变缓。

3.2 太湖平原水网区洪水形态特征的演变规律

本文进一步选取了各站点的年最大洪水事件,揭示太湖平原地区洪水形态特征的时空演变规律。从区域整体来看,洪峰水位呈现显著的非平稳变化趋势,突变发生在2007年($p<0.05$),突变前后和整个时期的变化趋势分别为 $2.897 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $23.432 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $8.859 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ($p<0.05$),突变后的变化趋势显著大于突变前期(图4a)。水位涨幅的突变特征不显著,值得注意的是,在1997年之前其呈现减少趋势,而在1997年之后呈现增加趋势(图4b)。涨水速率虽然在2011年前后均呈现不显著的下降趋势,但从整个时段来看却呈现上升趋势($p<0.10$),主要是由于在突变后期涨水速率相对较高,导致整体呈现上

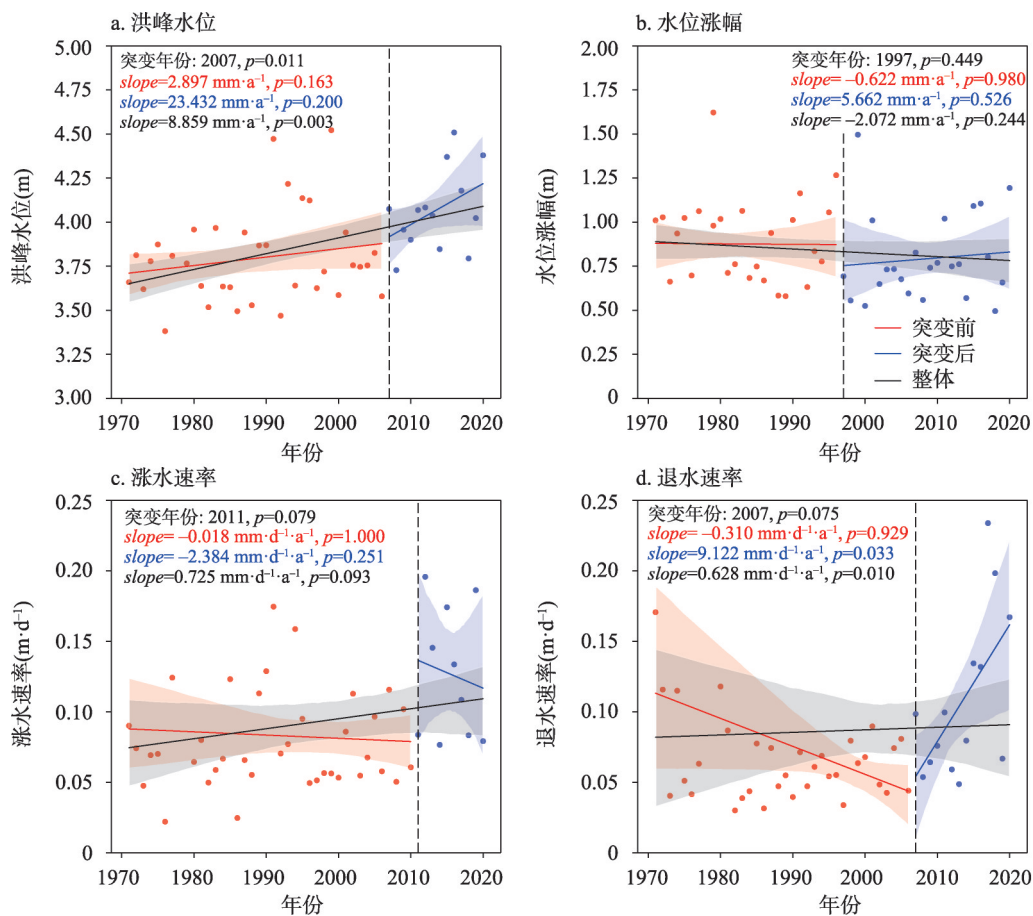


图4 太湖平原区洪水形态特征的非平稳性及趋势性特征

Fig. 4 The non-stationary and trends of flood morphological characteristics over the Taihu plain region

升态势(图4c)。退水速率在突变前期和突变后期呈现相反的变化趋势,突变前期有所下降,而突变后期显著上升($p<0.05$),整个时段的增加趋势达 $0.628 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ($p<0.05$)(图4d)。

从空间分布来看,太湖平原水网区洪峰水位有61.5%站点存在显著突变,但水位涨幅均不存在显著突变特征,涨水速率和退水速率分别有46.2%和53.8%站点存在显著突变特征(图5)。从突变时间来看,洪峰水位突变点主要在2000年之后,涨水速率和退水速率呈现显著突变的站点的时间也主要在2000年之后。这可能与太湖平原地区大规模城市化过程有关,2000年以后,太湖平原地区河网水系锐减、城镇用地大规模扩张及闸泵水利工程激增^[14-15, 18],导致区域产水量增加和河网容蓄能力下降,产蓄矛盾日益突出,改变了降雨—水位关系,从而使得洪水形态参数发生突变。

从变化趋势的空间分布来看,各站点洪峰水位均呈现上升趋势,其中存在显著性的站点占比为76.9%,无锡站变化趋势最大,达到 $16.67 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (图6a)。水位涨幅多呈现不显著减少趋势,湖区附近的白茆山站减少幅度最大,达 $-5.78 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (图6b)。所有站点涨水速率均呈现增加态势,其中38.5%的站点达到显著水平,白茆山站增加趋势最大(达 $2.51 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $p<0.05$)(图6c)。所有站点退水速率亦呈现增加趋势,其中达到显著水平的达到53.8%,无锡站增加趋势最大($1.92 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $p<0.05$)(图6d)。

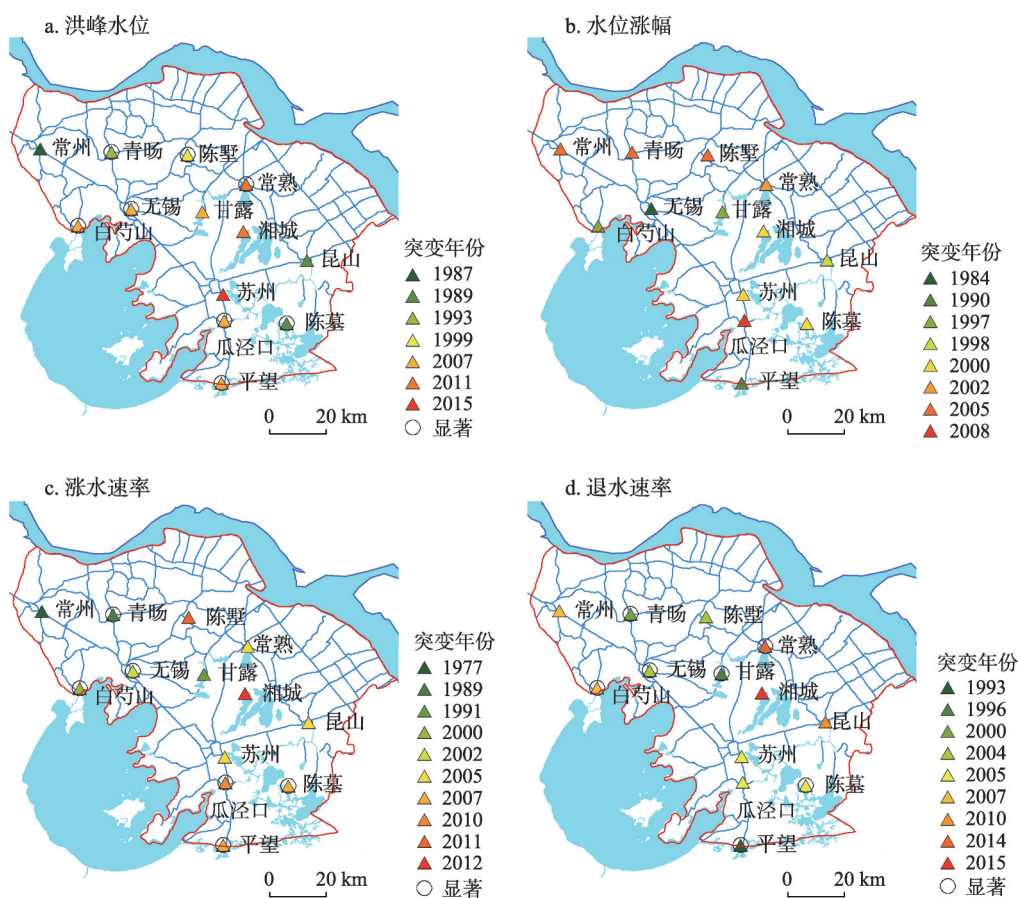


图5 太湖平原区洪水形态参数的突变特征

Fig. 5 Spatial distribution of breakpoint for flood morphological characteristics over the Taihu plain region

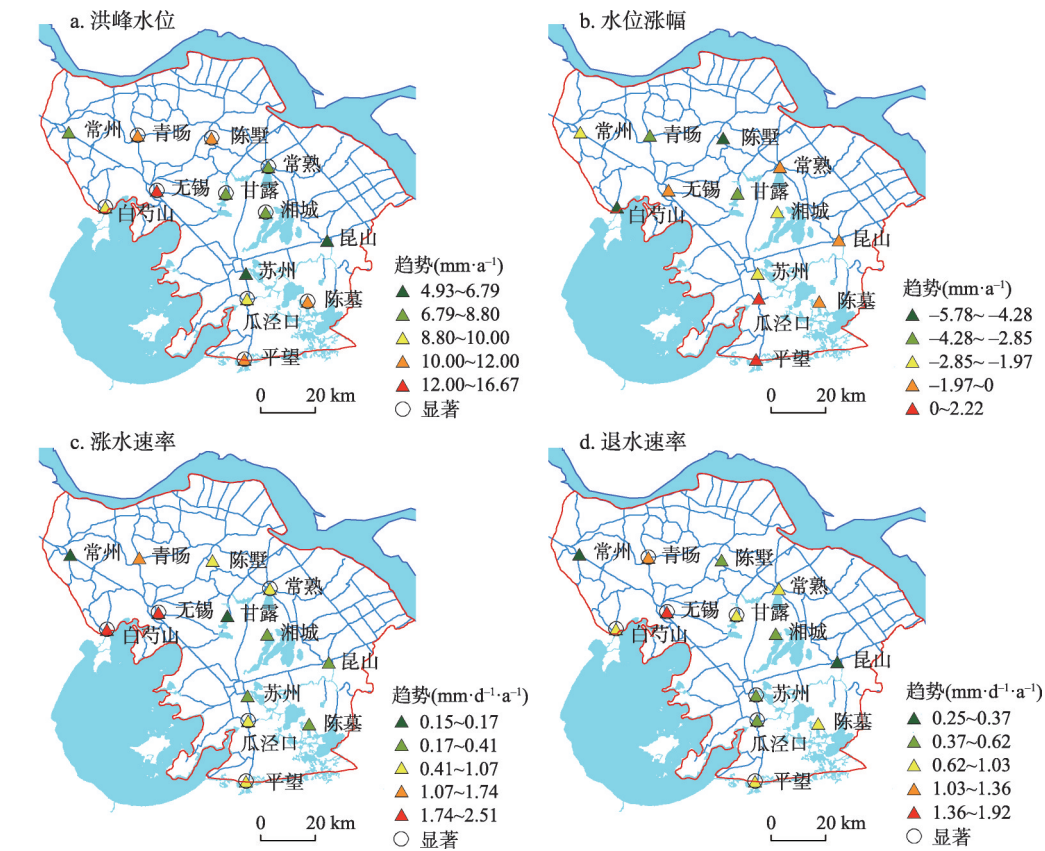
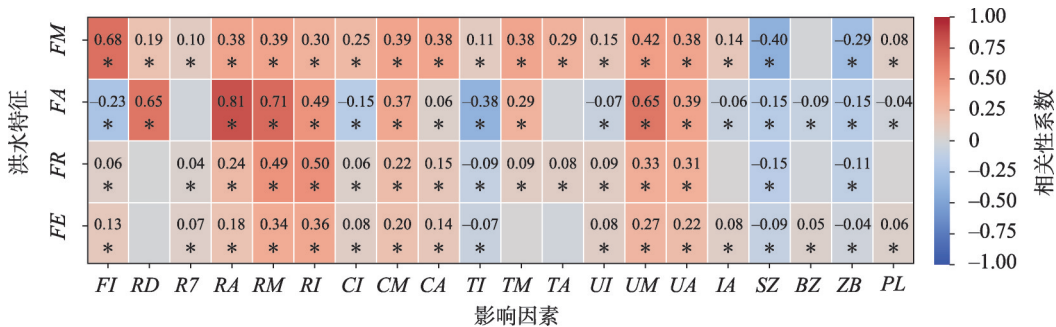


图6 太湖平原区洪水形态参数的趋势特征

Fig. 6 Spatial distribution of trends for flood morphological characteristics over the Taihu plain region

3.3 太湖水网区暴雨洪水形态变化的驱动机理

为揭示太湖平原区暴雨洪水形态特征的变化机理，本文进一步构建了可解释机器学习模型，量化不同潜在因素对暴雨洪水形态参数影响程度及作用形式。图7显示了各洪水形态参数与不同潜在因素之间的相关性。可以发现洪水形态参数与大部分潜在因素呈现显著相关关系，说明了选取的影响变量的合理性。对于洪峰水位，其与多数潜在因子呈现显著相关关系，其中与前期水位相关性最大（ $r=0.68$ 、 $p<0.05$ ）。洪水涨幅与总降水量、



注：图中*表示 $p<0.05$ 。

图7 洪水形态参数与潜在驱动因素之间的相关性

Fig. 7 The correlations between flood morphological characteristics and the potential influencing factors

最大降雨强度、降雨持续时间和上游最高水位相关性较高, 相关系数分别达到了0.81、0.71、0.65和0.65, 且均达到了显著水平 ($p < 0.05$)。涨水速率和退水速率主要与降雨强度相关, 同时与上游水位也有相对较大相关性。不透水面比率与洪峰水位、水位涨幅和退水速率均呈现显著相关关系, 说明城市化过程不透水面变化对洪水形态特征也起到了重要影响。水利工程与洪峰水位、水位涨幅、涨水速率和退水速率多呈现显著相关关系, 说明水利工程也是影响区域洪水形态特征的重要因素。水利工程数量与洪水特征多呈现显著负相关关系, 说明水利工程的建设和有效缓解了区域洪水压力; 但水利工程的排涝能力与洪峰水位呈现显著正相关, 与水位涨幅存在显著负相关, 表明了排涝能力对区域洪水影响的复杂性, 体现了城市防洪工程对城市内部和外围的多重影响, 近期相关研究也表明城市防洪工程导致城市外围河道水位有所增加^[4]。

由于不同因素之间可能存在多重共线性, 论文根据方差扩大因子, 去除了共线性较大潜在驱动因素变量, 最终选取了FI、RD、R7、RM、RI、CI、CM、TM、UI、UM、IA、ZB、PL共13个影响因子作为驱动变量建模, 量化不同驱动因素对太湖平原水网区暴雨洪水形态特征的影响大小和作用形式。图8a~8d分别显示了构建的模型在训练集和测试集的最优参数和模拟效果。对于洪峰水位和水位涨幅, 训练集和测试集相关系数 r 均大于0.85 ($p < 0.001$), $MAE < 0.11$ m; 对于涨水速率和退水速率, MAE 小于等于0.02 $m \cdot d^{-1}$, 相关系数 $r > 0.62$ ($p < 0.001$)。表明随机森林模型对于不同洪水形态特征均具有较好的模拟效果, 可用来分析各潜在因素对洪水特征的影响。图8e~8l分别显示了针对洪水形态参数模拟的

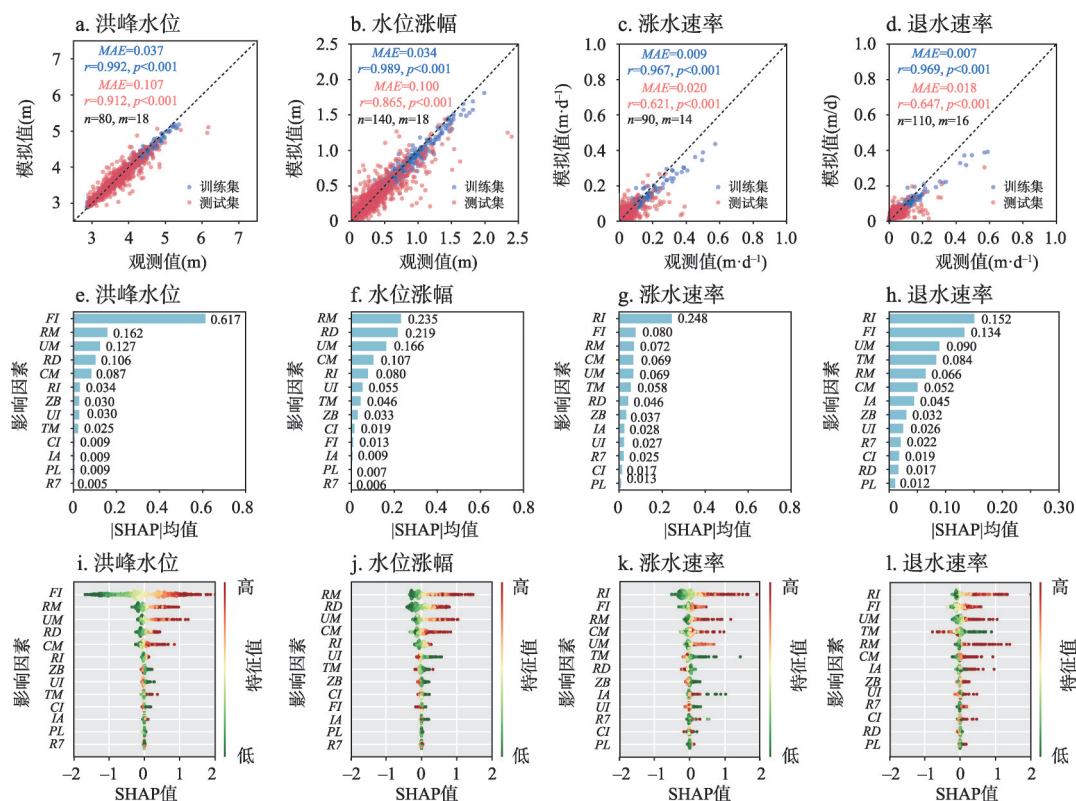


图8 洪水形态参数的模拟效果及影响因素的重要性排序及作用机制

Fig. 8 The simulations of flood morphological characteristics and the importance ranking and influencing mechanisms of driving factors

各影响因素的平均SHAP绝对值和SHAP值分布情况。平均SHAP绝对值越大,表明该因素对特定洪水形态参数越重要(图8e~8h)。SHAP值分布情况反映了特定影响因素对洪水形态参数的作用形式,若某影响因子高值分布在右侧(SHAP值为正值),表明随着该影响因子增加对目标洪水形态参数有正向作用,反之则为负向作用(图8i~8l)。

洪峰水位的影响因素中前期水位、最大降雨强度和上游最高水位重要性最高,且都为正向作用,前期水位对洪峰水位的影响远超过其他因素(图8e、8i)。水位涨幅的主要影响因素为最大降雨强度、降雨持续时间和上游最高水位,说明水位涨幅主要受到了降雨和上游来水的影响,降雨强度越大、持续时间越长和上游洪峰水位越高,水位涨幅越大;而太湖最高水位和起始潮位对水位涨幅有负向作用,说明太湖水位和长江潮位的顶托作用限制了平原水网区的洪水外排(图8f、8j)。不透水面比率也对水位涨幅有轻微的负向作用,这可能主要是由于城市化对暴雨洪水的影响存在阶段性,且影响过程较为复杂,图3也反映了不透水面变化对洪水特征要素的非线性影响。水利工程数量对洪峰水位和水位涨幅均呈现负向影响,说明水利工程建设有效缓解该区域的洪涝风险(图8i~8j)。

涨水速率主要受到了平均降雨强度、起始水位、最大降雨强度、最高潮位和上游最高水位等因素的正向影响,降雨强度增加、上游来水较大和起始水位较高等均可使得涨水速率增加(图8g、8k)。退水速率的影响因素主要是平均降雨强度、起始水位、上游最高水位和太湖最高水位等,降雨强度越大和起始水位越高,可使退水速率加快;而太湖湖区高水位则会抑制退水速率,主要是由于太湖水位顶托作用,使得沿湖地区洪水难以外排(图8h、8l)。不透水面对涨水速率和退水速率既有正向作用,也有负向作用,反映了下垫面对洪水特征的阶段性影响(图8k~8l)。水利工程数量对涨水速率主要为负向作用,而对退水速率为正向作用,说明水利设施主要抑制了洪水上涨过程,并加快了洪水消退过程(图8k~8l)。

4 讨论

太湖平原水网区城市化程度较高,地势低平,暴雨洪水过程受到了城市化(如不透水面扩张、水利工程调控和水系变化等)和气候变化(如暴雨特性变化和海平面上升等)等因素的共同影响^[34]。本文从洪水过程特性出发,揭示了1971—2020年暴雨洪水形态参数的特征及其演变规律。太湖平原区洪水形态特征具有随降雨等级和城市化程度变化而变化的规律,并且在时间上洪水形态参数多存在显著变化趋势,但也存在非平稳性变化特征。在变化环境下防洪减灾过程中不仅需要关注洪水量级变化特征(如洪峰),也需要关注洪水的涨落形态特征(如洪水涨率和退水速率等)。

城市化是影响暴雨洪水过程的重要因素,但城市化对暴雨洪水过程影响也较为复杂,既包括了不透水面扩张和水系衰减等不利影响,也包括了城市防洪工程和骨干河网疏浚的正面影响,如何量化城市化因素对暴雨洪水的影响是目前水文学研究的热点与难点^[35-36]。随着城市化程度增加,暴雨洪水形态特征变化呈现先增加后减小的非线性变化特征(图3)。从太湖平原区不透水面扩张过程来看(图9a),其呈现从城市中心向外围快速扩张的态势,不透水面比率从1985年1.40%扩张到2018年50.42%,使得降雨下渗减少和地表产流增加,导致洪水洪峰水位增加,洪水上涨速度加快^[37];同时,随着社会经济水平不断提高,闸泵等水利工程也在大规模修建(图9b),水利工程数量从20世纪50年代的33个扩张到21世纪10年代的5120个,增加过程主要发生在2000年以后,大量增加的城市防洪工程显著提高了洪涝外排能力,使得洪水退水过程加快,也使得洪峰水位和洪水涨率

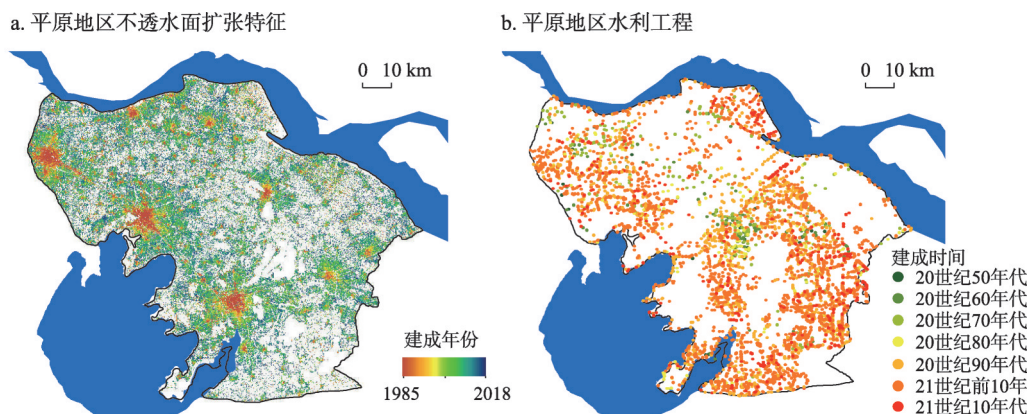


图9 太湖平原水网区不透水面及水利工程空间分布特征

Fig. 9 Spatial distribution of impervious area and hydraulic engineering over the Taihu plain region

的增加趋势有所缓解。城市化对洪水过程的不利和正面影响相互制约,使得太湖平原区暴雨洪水形态特征呈现随城市化程度先增加后减小的非线性变化。

基于太湖平原水网区13个重要水文站点(图1b)观测的1985—2018年3181个洪水样本,进一步探讨洪水形态参数随不透水面比率变化的分布规律。洪水形态参数均随着不透水面比率的增加呈现“W”型非线性变化特征(图10)。洪峰水位和退水速率规律较为类似,均随着不透水面比率总体呈现“增加—减小—增加”的变化规律。在城市化初期不透水面增加显著提升了洪峰水位,但随着不透水面达到40%左右,洪峰水位有所下降,主要是由于水利工程等设施的影响;当不透水面比率达70%以上时,水利工程设施等影响相对有限,洪峰水位继续抬升,表明了在城市建设中控制不透水面占比在防洪减灾工作中的重要性(图10a~10d)。水位涨幅和涨水速率随不透水面比率变化也总体呈现“W型”分布特征,在城市化初期,不透水面比率相对较低,洪水过程可能受其影响程度相对有限;在不透水面比率达到40%左右时,由于城市用地糙率相对较低,使得地表产流增加、汇水速度增加,水位涨幅和涨水速率相对较高;当不透水面继续增加时,城市化带来的经济发展也使得水利工程建设有较大进步,有效控制了洪水涨落过程(图10b~10c)。需要注意的是,不透水面占比仅是反映城市化程度的其中一个下垫面特征指标,城市化过程还伴随着河网水系、水利工程和局地气候等特征变化,图10所反映的不透水面影响规律具有一定区域特征,在不同城市化背景下暴雨洪水形态参数变化规律还有待进一步探究。

总体来看,太湖平原水网区洪峰水位、水位涨幅、涨水速率和退水速率的最主要影响因素分别是起始水位、最大降雨强度、平均降雨强度和平均降雨强度,说明气候变化因素控制的前期水位条件和降雨特征是影响该地区洪水形态的主要驱动因素(图8)。研究区位于长三角核心地区,区域洪水情势受到了极端暴雨、长江潮位、太湖水位和上游来水等各因素综合控制,随着气候变化影响的深入,极端降雨呈现增多增强的趋势^[24, 38-39],海平面上升也导致沿江潮位有所上涨^[7],使得洪水风险有所增加。同时,城市化所影响的不透水面和水利工程等也对该地区水文情势有重要影响,但各影响因素作用又相互制约,洪水形态特征的变化较为复杂,还有待继续深入探究。综合来看,受气候变化和城市化的综合影响,太湖平原地区洪水涨落形态特征已发生显著变化,在开展防洪减灾工作需要考虑其分布特征和变化规律,有助于提出变化环境下应对洪涝新形势的适应性防控对策。

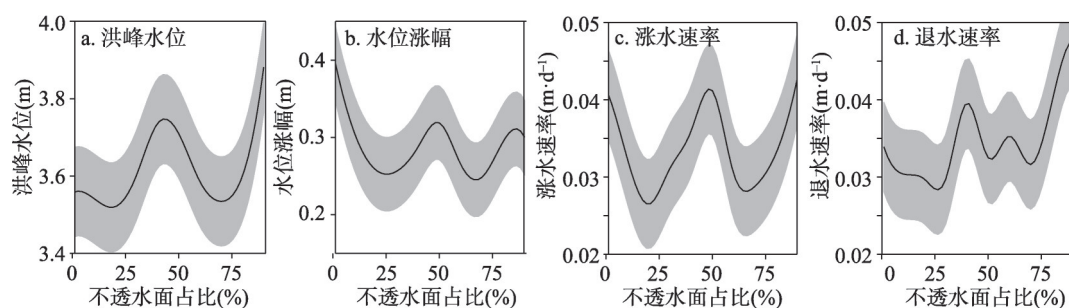


图 10 洪水形态特征对不透水面变化的非线性响应模式

Fig. 10 The nonlinear responding patterns of flood morphological characteristics to changes of impervious area

5 结论

(1) 太湖平原区洪水形态特征具有明显的城市化和降雨等级差异。不同降雨等级下洪水形态参数均随着城市化程度先增加后减小,不透水面对暴雨洪水形态特征具有“W”型非线性影响,当不透水面比率达到40%以上时,水利工程等影响逐渐得到体现。从降雨等级来看,洪水形态特征呈现随降雨量级增加而增加的趋势,其中从大雨到暴雨事件变化幅度相对较大。

(2) 太湖平原区洪水形态特征多存在明显突变和趋势性特征。洪峰水位有61.5%站点存在显著突变,有76.9%站点呈现显著上升趋势。涨水速率有46.2%站点存在显著突变,且均呈增加态势(38.5%站点达到显著性),其中白茆山站增加趋势最大(达 $2.51 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, $p < 0.05$)。所有站点退水速率均呈现增加趋势,有53.8%站点存在显著突变和显著趋势特征,整个时段区域退水速率的变化趋势达 $0.628 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ($p < 0.05$)。

(3) 太湖平原区洪水形态特征主要受前期水位和降雨特征的影响,同时城市化因素也不容忽视。洪峰水位受前期水位、最大降雨强度和上游最高水位的影响最大。洪水涨幅主要受最大降雨强度、降雨持续时间和上游最高水位影响,太湖水位和长江潮位的顶托作用限制了平原水网区的洪水外排。涨水速率主要受到了平均降雨强度、起始水位、最大降雨强度等因素的影响,退水速率主要受降雨强度、起始水位和上游最高水位和太湖最高水位等影响。

1971—2020年太湖平原区洪水形态参数已发生明显变化,主要受到了气候变化引起的极端暴雨特征、潮位和前期水位等条件变化和城市化引起的下垫面特征改变的影响。在变化环境下防洪减灾过程中不仅需要考虑洪水量级变化特征,也需要关注洪水的涨落形态特征。城市化对暴雨洪水过程的影响较为复杂,其伴随着河网水系、水利工程和局地气候等复杂特征变化,如何进一步精细化量化不同城市化因素对洪水形态参数的影响程度和作用机理还有待后续进一步探究。

参考文献(References)

- [1] Zhang Jianyun, Song Xiaomeng, Wang Guoqing, 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] Xu Zongxue, Cheng Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: Review on urban hydrology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 53-61. [徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础: 城市水文学研究进展. *水利学报*, 2019, 50(1): 53-61.]
- [3] Wang Chuanhai, Hua Wenjuan, Yang Hai, et al. The development and application of hydrological experimental areas

- (catchments) in plains. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2018, 46(1): 7-15. [王船海, 华文娟, 杨海, 等. 平原水文实验区(流域)的发展及应用. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(1): 7-15.]
- [4] Wang Yuefeng, Cui Tingting, Xu Youpeng, et al. Study on urban flood risk transfer caused by polders for flood control in plain river network areas. *Pearl River*, 2023, 44(7): 17-26. [王跃峰, 崔婷婷, 许有鹏, 等. 平原水网区圩垸防洪引发的城市洪涝风险转移研究. 人民珠江, 2023, 44(7): 17-26.]
- [5] Wang Danqing, Xu Youpeng, Wang Siyuan, et al. Change in return period of storm flood in plain river network area under urbanization: Taking Wuchengxiyu region of Taihu Lake basin as a case study. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 27-35. [王丹青, 许有鹏, 王思远, 等. 城镇化背景下平原河网区暴雨洪水重现期变化分析: 以太湖流域武澄锡虞区为例. 水利水运工程学报, 2019(5): 27-35.]
- [6] Gao Q Y, Li G F, Li Z Y. Attribution of climate change and human activities to urban water level alterations and factors importance analysis in Central Taihu Basin. *Urban Climate*, 2021, 40: 101011. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.101011.
- [7] Wang Qiang, Xu Youpeng, Yang Long, et al. Changes in flood characteristics and their driving mechanisms in the Taihu Plain region. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(5): 1088-1103. [王强, 许有鹏, 杨龙, 等. 太湖平原地区洪水特征变化及驱动机理. 地理学报, 2023, 78(5): 1088-1103.]
- [8] Mazzoleni M, Dottori F, Cloke H L, et al. Deciphering human influence on annual maximum flood extent at the global level. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 262. DOI: 10.1038/s43247-022-00598-0.
- [9] Singh N K, Basu N B. The human factor in seasonal streamflows across natural and managed watersheds of North America. *Nature Sustainability*, 2022, 5: 397-405.
- [10] Chagas V B P, Chaffe P L B, Blöschl G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5136. DOI: 10.1038/s41467-022-32580-x.
- [11] Yang L, Yang Y X, Villarini G, et al. Climate more important for Chinese flood changes than reservoirs and land use. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(11): e2021GL093061. <https://doi.org/10.1029/2021GL093061>.
- [12] Blum A G, Ferraro P J, Archfield S A, et al. Causal effect of impervious cover on annual flood magnitude for the United States. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(5): e2019GL086480. DOI: 10.1029/2019GL086480.
- [13] Yuan Wen, Yang Kai, Tang Min, et al. Stream structure characteristics and their impact on storage and flood control capacity in the urbanized plain river network. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 717-724. [袁雯, 杨凯, 唐敏, 等. 平原河网地区河流结构特征及其对调蓄能力的影响. 地理研究, 2005, 24(5): 717-724.]
- [14] Wang Yuefeng, Xu Youpeng, Zhang Qianyu, et al. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(3): 449-458. [王跃峰, 许有鹏, 张倩玉, 等. 太湖平原区河网结构变化对调蓄能力的影响. 地理学报, 2016, 71(3): 449-458.]
- [15] Lu Miao, Xu Youpeng, Gao Bin, et al. Variations of hydrological connectivity regulated by sluices in a delta plain. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2685-2696. [陆苗, 许有鹏, 高斌, 等. 平原河网区水利工程调控下水文连通变化. 地理学报, 2021, 76(11): 2685-2696.]
- [16] Blöschl G, Hall J, Viglione A, et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 2019, 573: 108-111.
- [17] Kjeldsen T R, Prosdocimi I. Use of peak over threshold data for flood frequency estimation: An application at the UK national scale. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130235. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130235.
- [18] Wang Jie, Xu Youpeng, Wang Yuefeng, et al. Impacts of anthropogenic activity on the response of water level to rainfall in the urbanized plain river network: A case study in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou region of Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3): 779-787. [王杰, 许有鹏, 王跃峰, 等. 平原河网地区人类活动对降雨—水位关系的影响: 以太湖流域杭嘉湖地区为例. 湖泊科学, 2019, 31(3): 779-787.]
- [19] Zhai Xiaoyan, Guo Liang, Zhang Yongyong. Flash flood type identification and simulation based on flash flood behavior indices in China. *Science China (Terrae)*, 2021, 51(7): 1092-1106. [翟晓燕, 郭良, 张永勇. 基于洪水行为特征指标的我国山洪类型辨识与模拟. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1092-1106.]
- [20] Wu Haoyun, Wang Yintang, Hu Qingfang, et al. Flood identification and constraints analysis for flood resources utilization in Taihu Lake basin. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(5): 1-8. [吴浩云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 太湖流域洪水识别与洪水资源利用约束分析. 水利水运工程学报, 2016(5): 1-8.]
- [21] Xu Zongxue, Ye Chenlei, Liao Ruting. Integrated management technology for urban flooding/waterlogging disaster: Research progress and case study. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(11): 1107-1120. [徐宗学, 叶陈雷, 廖如婷. 城市洪涝灾害协同治理: 研究进展与应用案例. 地球科学进展, 2023, 38(11): 1107-1120.]
- [22] He Shanfeng, Liang Shuang, Wu Shaohong, et al. Analysis on spatio-temporal evolution and relevance of urban flood

- disaster resilience in Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1988-1999. [贺山峰, 梁爽, 吴绍洪, 等. 长三角地区城市洪涝灾害韧性时空演变及其关联性分析. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(9): 1988-1999.]
- [23] Gong P, Li X C, 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.
- [24] Wu Lei, Xu Youpeng, Wang Qiang, et al. Evolution and non-stationary characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 730-742. [吴雷, 许有鹏, 王强, 等. 长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性. *水科学进展*, 2022, 33(5): 730-742.]
- [25] Lyne V D, Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. Barton: Institute of Engineers Australia National Conference, 1979.
- [26] Nathan R J, McMahon T A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 1990, 26(7): 1465-1473.
- [27] Zhang Danwu, Cong Zhentao, Ni Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490-496. [章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490-496.]
- [28] Sun P, Wen Q Z, Zhang Q, et al. Nonstationarity-based evaluation of flood frequency and flood risk in the Huai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 2018, 567: 393-404.
- [29] Wang Y F, Xu Y P, Lei C G, 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.
- [30] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1-4): 182-196.
- [31] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 2002, 38(6). DOI: 10.1029/2001WR000861.
- [32] Jiang S J, Tarasova L, Yu G, et al. Compounding effects in flood drivers challenge estimates of extreme river floods. *Science Advances*, 2024, 10(13): eadl4005. DOI:10.1126/sciadv.adl4005.
- [33] Cai X T, Li L Y, Fisher J B, et al. The responses of ecosystem water use efficiency to CO₂, nitrogen deposition, and climatic drivers across China. *Journal of Hydrology*, 2023, 622: 129696. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129696.
- [34] Jiang Rengui, Han Hao, Xie Jiancang, et al. The new response mode of urban storm flood under changing environment. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(3): 12-17. [姜仁贵, 韩浩, 解建仓, 等. 变化环境下城市暴雨洪涝应对新模式研究. *灾害学*, 2017, 32(3): 12-17.]
- [35] Yang Dawen, Xu Zongxue, Li Zhe, et al. Progress and prospect of hydrological sciences. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 36-45. [杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 36-45.]
- [36] Liu Jiahong, Wang Hao, Gao Xuerui, et al. Review on Urban Hydrology. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(36): 3581-3590. [刘家宏, 王浩, 高学睿, 等. 城市水文学研究综述. *科学通报*, 2014, 59(36): 3581-3590.]
- [37] Zhang Jianyun, Wang Yintang, He Ruimin, 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.]
- [38] Lei C G, Wang Y F, Xu Y P. Spatiotemporal characteristics of different-grade extreme precipitation evolution detected by innovative trend analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, 154: 1119-1136.
- [39] Hu Qingfang, Zhang Jianyun, Wang Yintang, 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.]

Change of flood morphological characteristics and its influencing factor over the river network plain region

WANG Qiang^{1,2,3}, SONG Chen³, ZHANG Jianyun¹,
HE Ruimin¹, XU Youpeng³, XU Yu⁴, WU Jinning⁵

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hydrology and Water Resources College, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 5. Changzhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Changzhou 213022, Jiangsu, China)

Abstract: The morphological characteristics of floods are important indicators for flood prevention and control, and have important indicative significance. Traditional hydrological studies mainly focus on the change of characteristics in flood magnitude under the changing environment, and the characteristics and mechanism of changes in flood morphological parameters under the influence of urbanization and climate change remain to be further explored. Taking the highly urbanized river network area of the Taihu plain as a typical example, this paper proposed a process-based method to identify flood events, and revealed the change in flood morphological characteristics and its driving mechanisms between 1971 and 2020. The results show that not only the flood magnitude (peak water level and water level increment) but also the morphological characteristics of flood fluctuation (such as rate of rising limb and recession) have changed significantly in the Taihu plain under the background of changing environment. Impervious area has a non-linear effect on the flood morphological characteristics. In the study area, the stations with significant breakpoint for peak water level occupy 61.5%, and 76.9% stations showed a significant upward trend. 46.2% of the stations have a significant breakpoint for rate of rising limb, and all stations showed an increasing trend, among which, 38.5% of the stations reach the significance level. A total of 53.8% of the stations have significant mutation and significant trends of recession rate, and the recession rate reaches $0.628 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in the whole period in the study area ($p < 0.05$). The antecedent water level conditions and rainfall characteristics are the main driving factors affecting the flood morphological pattern in the river network area of the Taihu plain. The results of this study could deepen the understanding of flood evolution in the Taihu plain region under a changing environment, and provide reference and support for flood disaster prevention and control in similar plain river network areas.

Keywords: flood morphological characteristics; explainable machine learning; changing environment; urbanization; river network plain region