

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.004
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[J]. 水利水运工程学报, 2019(5): 27-35. (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[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(5): 27-35. (in Chinese))

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

王丹青¹, 许有鹏¹, 王思远¹, 王 强¹, 袁 甲¹, 胡尊乐²

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 常州 213022)

摘要:以太湖流域武澄锡虞区典型雨量水文站为例, 基于长时间序列逐日降雨与水位数据, 采用累积距平法、皮尔逊频率曲线和克里金插值等方法对水位进行还现分析以及对暴雨洪水重现期进行分析, 探讨了城镇化背景下典型平原河网区暴雨洪水重现期变化规律及成因。结果表明: (1) 武澄锡虞区不同量级降雨重现期均有提前, 极端降雨频率增大; 武澄锡虞区小量级洪水事件($T=5, 10, 20$ a)发生频率有所增加, 而量级较大($T=50$ a)的洪峰水位重现期在城区与郊区则差异显著。受圩垸影响的常州站 1960 年 50 年一遇洪峰水位在 2010 年增至 68 年一遇, 洪峰水位整体降低, 而郊区白茆山站 1960 年 50 年一遇洪峰水位在 2010 年则提前至 32 年, 洪峰水位整体有所增加。 (2) 小量级洪水事件发生频率增加主要是由降雨增加, 城镇扩张以及河网水系衰减所致, 同等量级的暴雨导致洪峰水位不断增长; 而闸泵和圩垸等水利工程建设加强了对较高量级洪水的调节作用, 使高量级洪峰水位有所降低, 减小了城区圩垸内洪水风险。对于不同量级的洪峰水位, 下垫面特征变化和水利工程建设对其影响的程度则有所不同。分析结果可为研究该地区防洪安全提供技术支持。

关 键 词: 暴雨洪水; 重现期; 水利工程

中图分类号: TV122⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)05-0027-09

受季风气候和复杂地形的影响, 洪涝灾害已成为中国自然灾害中影响最严重的灾害之一^[1-2]。据统计, 1984—2008 年间, 中国暴雨洪涝灾害造成的直接经济损失平均每年为 537 亿元^[3]。其中平原地区面对洪涝灾害的脆弱性较其他地区更为突出^[4]。太湖流域经济发达、人口集中, 以占全国 4.4% 的人口创造了 10.2% 的 GDP; 作为典型的平原河网区, 区内地势低平、河网密布, 洪涝灾害频发, 给区域经济发展造成巨大损失^[5]。流域内人类活动诸如水利工程建设、城市不透水面扩张等, 不仅影响产汇流过程, 也会引起极端洪水事件频率发生改变^[6]。因此探讨太湖平原河网区在不同城镇化背景下暴雨洪水重现期的变化规律, 能提高区域应对极端水文事件的能力, 为平原河网区的防洪安全提供参考。

过去几十年来, 国内外学者基于水文统计、模型模拟等方法, 已开展了众多暴雨洪水重现期变化的分析研究^[7]。不少研究表明, 气候和下垫面环境是引起洪水量级变化的两大主要因素。Chien 等将多种气候模式与 SWAT 模型相结合, 模拟伊利诺斯河流域未来的水流变化, 发现未来情景下, 10 年和 100 年一遇的洪水重现期趋于增加^[8]。城镇化背景下随着建设用地增加, 洪峰和洪量均有明显增加^[9]。快速城镇化的深圳地区布吉河流域, 由于下垫面变化, 使得 100 年、50 年和 20 年一遇的洪水最大洪峰流量分别增加了 20.2%,

收稿日期: 2018-09-19
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401502); 国家自然科学基金资助项目(41771032); 江苏水利基金重大项目(2015003)
作者简介: 王丹青(1995—), 女, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事水文学与水资源研究。E-mail: dqwang2017@163.com
通信作者: 许有鹏(E-mail: xuyp305@163.com)

23.0%和28.9%^[10]。雷超桂等^[11-12]应用HEC-HMS模型模拟下垫面变化对洪水重现期的影响,发现流域下垫面不透水率的增加使得洪水重现期有所提前。以往运用统计方法研究暴雨洪水重现期的研究多是选取某一场或几场典型场次的暴雨洪水作为研究对象,分析研究区的暴雨洪水特点^[13-15],仅侧重于某一典型场次的暴雨洪水过程;基于模型模拟的方法探讨暴雨洪水重现期变化,能充分考虑城镇化发展背景下下垫面不透水面积增加对暴雨洪水频率的影响并揭示其影响机制。然而,基于水文模型的研究多位于资料完备的自然流域,对于圩垸、闸站等水利工程控制的平原河网地区,由于水流往复,流量监测难度较大,人类活动影响明显,相关暴雨洪水重现期的研究较少。

本文以太湖腹地为例,基于长时间序列降雨水位资料,运用数理统计方法定量对比分析多年来武澄锡虞区典型代表站点常州站、白茆山站暴雨洪水重现期变化规律并探究其成因。武澄锡虞区为太湖腹地典型的高度城镇化平原河网地区,自20世纪90年代,城镇用地面积开始快速增加,对该区域降雨产汇流环境产生影响,导致区域内暴雨洪涝问题严峻^[16]。为保证该地区人民生命财产安全,加快了闸泵、圩垸等水利工程的建设和投入使用。而城镇用地和水利工程的运行均会对该地区暴雨洪水响应规律产生影响,且该地防洪能力对于太湖流域下游地区重要城市的防洪安全有很大影响。因此,在变化环境下,探讨武澄锡虞区暴雨洪水重现期的变化规律,能为该地区防洪减灾提供技术参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

武澄锡虞区位于太湖流域北部,北临长江、南濒太湖,是太湖流域典型的平原水网区(见图1)。该流域季风气候显著,雨量充沛,多年平均降雨量1 050 mm,且降雨量年际变化较大。每年5—10月受梅雨天气和台风影响,降水量集中、易形成洪水灾害。武澄锡虞区行政分区主要包括江苏省常州市、无锡市,均为人口密集、经济发达的大中城市,集中了大量人口和社会财富,面临着巨大的洪涝灾害风险。常州站与白茆山站是能反映武澄锡虞区主要河湖水位变化的控制点,也是构成水网的主要节点,资料系列长,与周边水文站水文资料有稳定关系,且该区域内的其他站点受潮位等其他因素影响较大,因此,选择常州站和白茆山站作为该区域的代表站点。常州站处于常州市中心城区的运北防洪大包围内,为高度城镇化地区;白茆山站位于无锡市胡埭镇,为圩外城郊地区,分别代表了武澄锡虞区高度城镇化地区与城郊地区的降雨水位状况。

选用1960—2015年常州国家雨量站的逐日降水数据、常州(京杭运河)水位站监测的逐日水位数据、年最大24 h降雨量、闸泵建成时间与数量及1968—2015年白茆山站逐日降水、水位数据、年最大24 h降雨量作为基础数据,其中根据有关基面和地面沉降已对水位数据进行校准。借助皮尔逊Ⅲ型频率曲线进行频率拟合及克里金插值技术得出常州站56年间(白茆山站48年间)暴雨洪水重现期变化规律。遥感资料主要以1991,2001与2014年Landsat TM和ETM遥感影像资料作为基础数据。

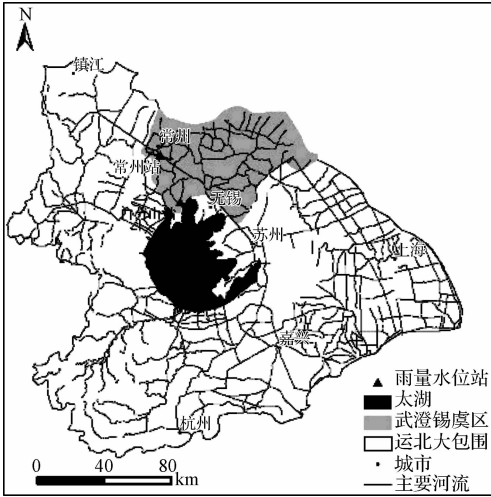


图1 武澄锡虞区地理位置及典型雨量水位站点
Fig. 1 Locations and typical rainfall water level stations in Wuchengxiyu region

1.2 研究方法

1.2.1 时间序列分析 累积距平法是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法,若曲线变化趋势有明显拐点,则一般认为是突变的结果^[17]。文中借助累积距平法对水位序列做了突变分析,其计算式为:

$$X(t) = \sum_{i=1}^t (X_i - \bar{X}) \tag{1}$$

式中: X_i 表示系列中的数值; $\bar{X}$ 表示多年数值的平均值。

重现期的计算需借助于皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ)频率曲线,该曲线在水文中应用广泛。经研究发现 P-Ⅲ型分布对我国大部分河流的水文资料拟合较好^[18],适用于反映某一地区水文变化的规律性。

1.2.2 还原算法 复杂的人类活动使平原水网区下垫面状况发生了显著变化,使得水位系列的一致性假设受到了挑战。针对非一致性频率计算方法已有较多研究^[19]。主要途径有向前还原或向后还原方法,“向前还原”法中的“前”一般界定为未大量兴建水利工程时的状况,考虑到由于下垫面环境受人类活动干扰强烈;若采用“向前还原”法,所产生的水位也不会回到天然状态,且“向前还原”法存在精度不高的问题。因此选择“向后还原”的方法来处理水位系列的一致性问题,主要针对下垫面变化前后最高水位与最大 24 h 降雨对应的场次洪峰水位进行修正。基于还原途径的方法有多种,采用变异点前后系列与同一参数分析法^[18],其原理为:首先,需要检验汛期最高水位的变异性,确定变异点位置 τ ,则可将变异点前后水文系列表示为 $x_1, x_2, \dots, x_\tau$ 和 $x_{\tau+1}, x_{\tau+2}, \dots, x_n$ 。假设变异点前后水位涨幅与其相应时间累积降雨的相关关系分别为 $X_b = f_b(p)$ 和 $X_a = f_a(p)$,则累积降雨在变异前后不同时期所产生的水位涨幅差值可表示为 $\Delta X = X_b - X_a$,以此差值作为水位修正值,即可实现极值水位系列向变异前后某一时期的修正。

2 结果分析与讨论

2.1 暴雨及洪水位变化

选取常州站 1960—2015 年年最大 24 h 降雨与对应洪峰水位、白茆山站 1968—2015 年年最大 24 h 降雨与对应洪峰水位,借助箱线图统计不同年代时最大 24 h 降雨与对应洪峰水位的变化规律,结果如图 2 所示。

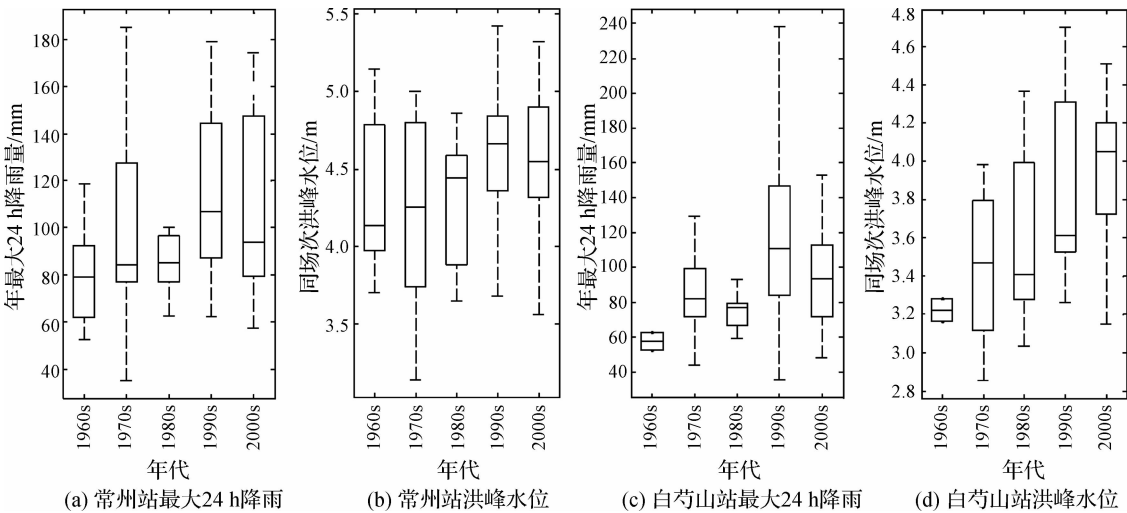


图 2 常州站和白茆山站最大 24 h 降雨与同场次洪峰水位分时段统计

Fig. 2 Statistical data of maximum 24-hour rainfall and corresponding peak stage in different periods at Changzhou and Baishaoshan stations

由图 2 可见,1960—2015 年间,武澄锡虞区最大 24 h 降雨整体上呈现先增后降的变化趋势,但洪峰水位在不同地区则表现出不同的变化趋势。常州站最大 24 h 降雨与同场次洪峰水位变化趋势基本一致,整体上表现为先增后降的变化趋势;在 1960—1990 年间,常州站最大 24 h 降雨与同场次洪峰水位均呈不断增加的趋势,到 20 世纪 90 年代,最大 24 h 降雨与对应的洪峰水位均达到最大值;90 年代太湖流域极值水位居高不下^[20],该时期太湖流域极端降雨事件频发;自 2000 年开始二者均呈现下降趋势,2000 年以来太湖流域降雨有所减少,水位也有相应降低。白茆山站年最大 24 h 降雨表现为先增后降的变化趋势,而其对应的洪峰水位整体上则呈上升趋势;自 2000 年以来,降雨有所下降,而洪峰水位均值则呈上升趋势,表现出“小(中)雨高水位”现象。

2.2 还现结果分析

暴雨洪水频率计算主要是对汛期暴雨洪水的统计分析,选用常州站 1960—2015 年、白茆山站 1968—2015 年每年汛期(5—10 月份)最高水位与年最大 24 h 降雨对应场次的洪峰水位进行还现,消除变异前后极值水位的非一致性。累积距平法可从曲线直观判断离散数据点的变化趋势,其曲线变化趋势的拐点一般认为是突变的结果。运用累积距平法计算常州站(白茆山站)年最高水位序列突变点,结果如图 3 所示。

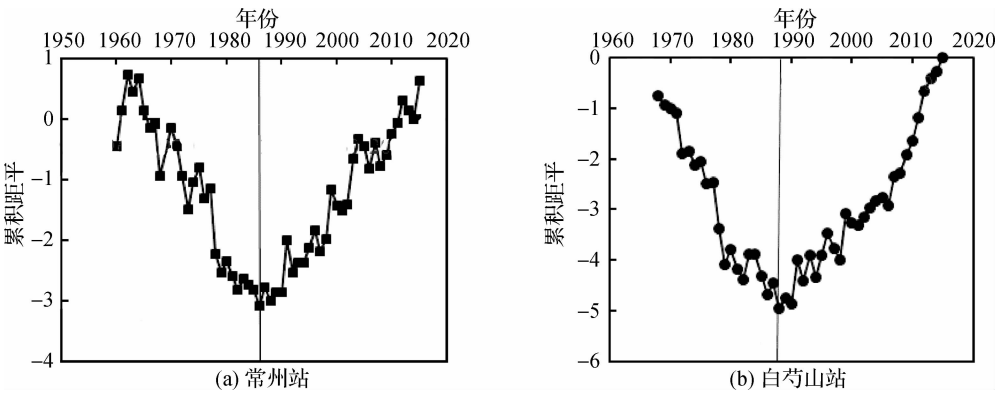


图 3 常州站和白茆山站水位突变分析

Fig. 3 Mutation analysis of water level at Changzhou and Baishaoshan stations

可见,常州站突变点为 1986 年,白茆山站突变点为 1988 年,突变年份与现有研究结果基本一致^[21],主要受水利工程等人类活动影响所致。参考该区水文条件变化,将常州站洪水位划分为 1960—1986 年与 1987—2015 年两个序列,白茆山站洪水位划分为 1968—1988 年与 1989—2015 年两个序列,将变异前最高水位与最大 24 h 对应场次洪峰水位还现至变异后阶段。采用超定量抽样法选取集中在 5—10 月的回归样本,样本数量为 110 个,选取场次暴雨洪水的水位涨幅和起涨时段的累积暴雨量。突变前后回归线的相关系数均大于显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时所要求的最小相关系数,水位涨幅和累积雨量相关性显著。常州站汛期水位修正结果如图 4 所示,基本做负修正,即修正到突变后的年最高水位低于突变前,表明人类活动导致区域突变后的水位涨幅有所降低,这可能与城市防洪工程的建设有关。白茆山站汛期水位修正结果如图 4 所示,修正到突变后的年最高水位高于突变前,这可能与白茆山站处于圩外地区有关。

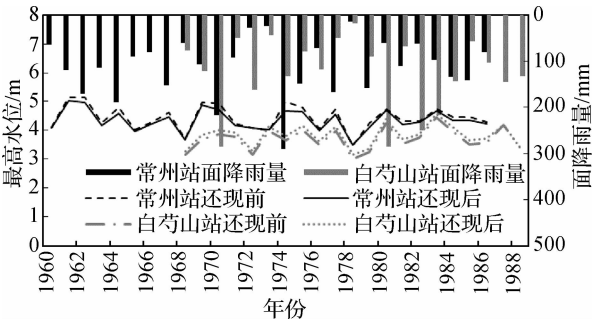


图 4 常州站和白茆山站汛期最高洪峰水位修正结果

Fig. 4 Correction results of highest peak stage at Changzhou and Baishaoshan stations in flood season

2.3 暴雨洪水重现期变化分析

首先计算常州站 1960—2015 年与白茆山站 1968—2015 年最大 24 h 降雨与汛期最高水位的经验频率,再运用皮尔逊曲线进行频率适线,得出年最大 24 h 降雨以及同场次洪峰水位值对应重现期。通过调整 C_s 和 C_v 值,获得最优适线,最终确定常州站最大 24 h 降雨与对应场次洪峰水位 C_s/C_v 的最优值分别为 3.59 和 3.22,白茆山站年最大 24 h 降雨与对应场次洪峰水位 C_s/C_v 的最优值分别为 3.87 和 3.70,水文频率拟合度均高于 0.97,拟合效果很好。为了获取暴雨洪水重现期变化规律,基于 P-Ⅲ型频率曲线计算出的该区暴雨洪水重现期,参考国内外相关研究^[12,22],对最大 24 h 降雨、同场次洪峰水位的重现期进行交叉模拟估算,以重现期和年份作为变量,借助克里金插值方法分别获得最大 24 h 降雨与洪峰水位重现期逐年变化趋势图,获取不同时期重现期的变化趋势。暴雨洪水量级分为 5,10,20,50 年一遇等典型量级,根据最大 24 h 降雨及其同场次洪峰水位重现期插值结果,以 1960 年 5,10,20,50 年重现期对应降雨、水位作为基准值,分别统计了该基准值状况下的降雨,以及水位在 1970,1980,1990,2000,2010 年重现期的变化。以同样方法统计了白茆山站的暴雨洪水重现期变化,如图 5 所示。

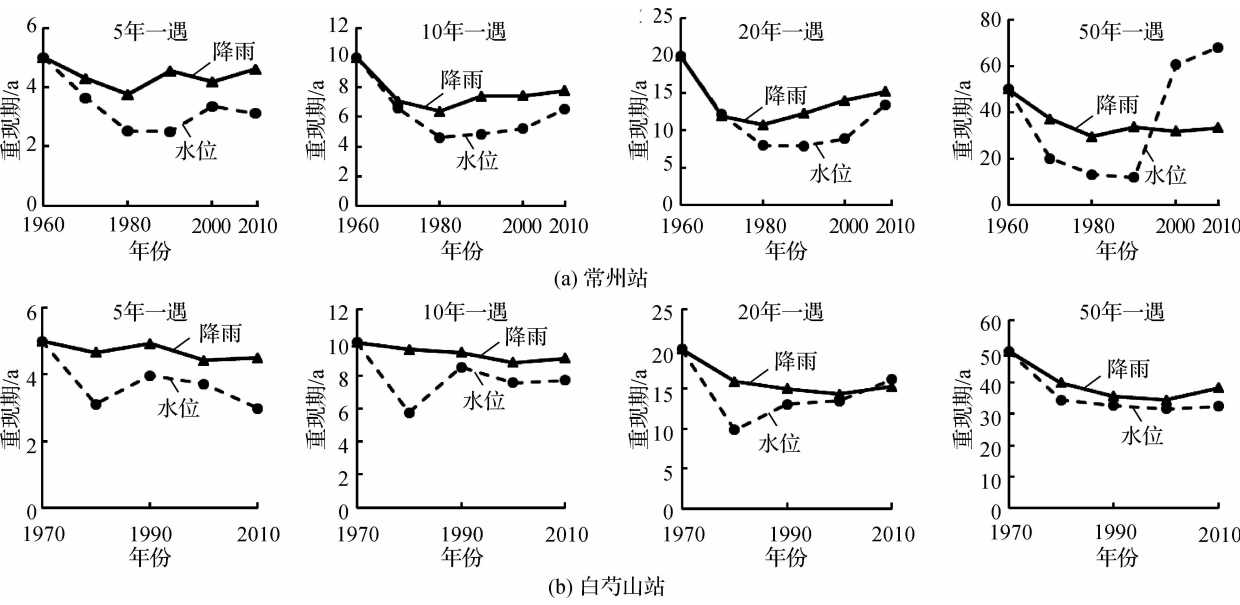


图5 最大 24 h 降雨与洪峰水位重现期变化趋势
Fig.5 Change trend of return period of maximum 24-hour rainfall and peak stage

由图 5 可见,常州站最大 24 h 降雨重现期整体上呈现 1960—1980 年减小,1980—2010 年增大的趋势,但其值仍低于 1960 年。说明常州站不同量级的极端降雨频率较 1960 年均呈增大趋势,极端降雨更为频繁。最大 24 h 降雨对应洪峰水位的重现期变化更为显著,对于小量级洪水 ($T=5,10$ 和 20 a),其变化趋势与最大 24 h 降雨同等量级重现期变化趋势一致,与 1960 年相比,不同量级重现期均有所提前,且洪峰水位重现期提前时间大于最大 24 h 降雨提前时间。而较大量级 ($T=50\text{ a}$) 洪峰水位重现期呈现不同的阶段性变化规律:1960—1990 年,50 年一遇洪峰水位重现期提前至 12 年,同等量级下洪峰水位上升;1990—2010 年,洪峰水位重现期相对于 1960 年洪峰水位重现期增至 68 年。白茆山站不同量级的极端降雨与对应洪峰水位的重现期整体上呈现不断提前的趋势,1960—2010 年,50 年一遇洪峰水位重现期提前至 32 年,且洪峰水位重现期提前时间大于最大 24 h 降雨提前时间,表明同等量级的降雨会产生更高的洪水,小(中)雨高水位频率增加。武澄锡虞区最大 24 h 降雨重现期整体上有所提前,与 Wang^[23],Han^[24] 和时光训^[25] 等研究结论一致:极端降雨频发,降雨变化与气候变化密切相关,全球气候变暖加速了长三角地区水文循环,降水增加;此外,在城镇化发展较快的长三角地区,人类活动的剧烈影响也可能是极端降雨频率增加的重要因素。而洪峰水

位重现期变化趋势则更为复杂,武澄锡虞区小量级洪峰水位重现期均有不同年份的提前,且提前年份大于对应降雨重现期提前年份,即同等量级的降雨会产生更高的洪水位,该重现期水位出现频率增大;而较大量级的洪峰水位主要受水利工程的影响,在城区防洪大包围下的水位重现期呈增大趋势,洪水风险降低,圩外郊区站点则呈现减小趋势,洪水风险有一定增加。

2.4 讨 论

城镇化发展和水利工程建设是影响洪水量级变化的主要因素。城镇化快速发展对下垫面的影响主要表现在河网水系的变化和土地利用方式转变。受快速城镇化的影响,20 世纪 60 年代到 2015 年,武澄锡虞区水系数量、河网密度、水面率及盒维数分别下降了 20.00%、18.75%、26.88% 和 8.76%,在 20 世纪 80 年代到 2015 年,各水系指标的衰减更为严重^[26]。在该变化过程中,武澄锡虞区许多支流河道因被掩埋或淤积而消失,水系结构趋于主干化;但近年来该地区多条骨干河道经历了疏浚和京杭运河改线工程,增强了区域水系连通与行洪能力;而支流河道的衰减也降低了河网调蓄能力,从而改变了流域产汇流过程,对暴雨洪水风险产生了一定影响;但从整体水系变化来看,其对区域洪水的影响表现出空间差异。位于圩内城区的常州站 50 年一遇洪峰水位重现期增大,位于圩外郊区的白茆山站,其各量级洪峰水位重现期则有所提前,圩外洪水风险增加。通过分析武澄锡虞区 1991、2001、2015 年三期土地利用/土地覆被数据,得出武澄锡虞区各时期土地利用类型所占比重,随着城镇化发展,该区的土地利用/土地覆被发生了很大变化。水田和城镇用地变化幅度最大,水田比重持续大幅下降,所占比重从 1991 年的 67.39% 下降至 2015 年的 22.78%,城镇、水域、林草地和旱地均有所增加,其中城镇用地上涨幅度最大,其面积比重从 1991 年的 16.75% 增至 2015 年的 50.24%。总体来看,各类土地利用在 2001 年以后开始发生大幅度变化,该区土地利用类型表现为水田向城镇用地的转移,城镇用地的大幅度增加表明下垫面不透水率的增加,从而改变了该区域的水文过程。相关研究发现,不透水面增加会导致区域洪峰水位增加,从而增加了该区域的洪水风险^[11]。武澄锡虞区低量级($T=5, 10$ 和 20 a)暴雨洪水重现期均有所提前,且提前年份洪峰水位明显大于最大 24 h 降雨,说明该区域不透水面的增加,使得降雨-径流系数增大,以及河流水系衰减降低了河网调蓄能力,导致同等量级的暴雨产生更高的洪峰水位。但相较于土地利用和河流水系的变化对区域水文过程的影响,闸泵、堤防、圩垸等水利工程对水位的影响则更为明显。

水利工程建设自古一直是防洪最重要的工程措施,对洪涝过程的影响越来越大。在平原河网地区,一般通过修建堤坝、闸泵,形成“圩垸”,许多地区不断加强城市大包围的建设。武澄锡虞区截至目前共修建了 456 个闸泵工程。常州市于 2006 年开始运行运北城市防洪大包围,并于 2014 年建设完成,一遇较大量级的暴雨,便运行圩垸内闸泵工程将大量河水排到外河,从而引起外河水位快速上升,虽能有效缓解城区洪涝风险,但增大了联圩外部城郊地区的洪涝风险。白茆山站位于无锡市郊区,受圩垸等水利工程保护较少。常州站 1960 年 50 年一遇洪峰水位重现期在 2010 年变为 68 年一遇,明显降低了该区较大量级的洪水风险,水利工程对于高量级洪峰水位的调节作用更强。白茆山站低量级($T=5, 10$ 和 20 a)洪水重现期变化趋势整体上同常州站一致,均有所提前,而 50 年一遇的洪水重现期则呈现不断提前的趋势,主要是水利工程建设的

3 结 语

以武澄锡虞区为例,分析了城镇化背景下平原河网地区暴雨洪水重现期变化规律,并探讨了下垫面土地利用和水系变化、水利工程建设等对暴雨洪水的影响。研究得出主要结论如下:

(1) 1960—2015 年间,武澄锡虞区最大 24 h 降雨整体上呈现 1960—1990 年增加、1990—2010 年减小的变化趋势,但洪峰水位在不同地区则表现出不同的变化趋势。20 世纪 90 年代以后,整体上武澄锡虞区降雨有所减少,但对应洪峰水位在城市防洪大包围下呈下降趋势,而圩外地区水位则明显上升。

(2) 对暴雨洪水进行频率计算发现,武澄锡虞区最大 24 h 降雨不同量级重现期均有提前,极端降雨频率不断增大,主要受全球变暖和快速城镇化的双重影响;洪峰水位重现期变化趋势在城区与郊区表现有所不同。在水利工程控制较多的城市防洪大包围下,洪水风险呈降低趋势,而在圩外地区,在暴雨和来自圩内排出大量河水的双重影响下,增大了联圩外部城郊地区高水位的出现频率。

(3) 下垫面特征变化和水利工程建设均对水位有影响,但对不同量级洪峰水位有不同的影响。较小量级洪水主要受降雨增加、城镇扩张以及河网水系衰减的影响,发生频率有所增加;但近年来大规模水利工程建设对较高洪峰水位的调节控制作用增强,尤其是城市防洪大包围建设,加大了对高水位的调节作用,大大提高了该区域对较大洪水的防洪能力,降低了城区的洪涝风险。而圩外地区受水利工程保护较少,且暴雨时期需承受来自圩内的大量涝水,区域洪水风险有所增加。

本次研究加深了对平原河网地区人类活动对区域水位过程影响机制的理解,可为区域防洪减灾提供一定的参考。主要运用数理统计方法探讨了降雨、水位重现期的变化规律及成因,得出下垫面特征变化与水利工程建设均对水位有重要影响;下一步可能需要借助水文水力学模型定量计算降雨、下垫面变化及水利工程建设对水位的贡献率,以便为该地区新形势下防洪减灾提供更好的技术支持。

参 考 文 献:

- [1] 喻君杰. 大范围平原河网地区防洪标准分析研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 57-60. (YU Junjie. Study on flood control standards in great plain river network regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(2): 57-60. (in Chinese))
- [2] 柳杨, 范子武, 谢忱, 等. 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征[J]. 水利水运工程学报, 2018(2): 10-18. (LIU Yang, FAN Ziwu, XIE Chen, et al. Study on evolvement law of urban flood disasters in China under urbanization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(2): 10-18. (in Chinese))
- [3] 於琰, 徐影, 张永香. 近 25 a 中国暴雨及其引发的暴雨洪涝灾害影响的时空变化特征[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1): 67-72. (YU Li, XU Ying, ZHANG Yongxiang. Temporal and spatial variation of rainstorms and the impact of flood disasters due to rainstorms in China in the past 25 years[J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(1): 67-72. (in Chinese))
- [4] 庄天文. 平原河网地区区域防洪标准分析[J]. 价值工程, 2017, 36(18): 241-242. (ZHUANG Tianwen. Analysis on regional flood control standard in plain river network area[J]. Value Engineering, 2017, 36(18): 241-242. (in Chinese))
- [5] 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[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 1-8. (WU Haoyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Flood identification and constraints analysis for flood resources utilization in Taihu Lake basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 1-8. (in Chinese))
- [6] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: Whither water management? [J]. Science, 2008, 319(5863): 573-574.
- [7] BERNARD B, RASMUSSEN P F. Recent advances in flood frequency analysis[J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(33): 1111-1116.
- [8] CHIEN H. Assessing the changes of return periods of floods and droughts in response to climate change using a hydrologic modeling approach[C]//AGU Fall Meeting. AGU Fall Meeting Abstracts, 2015.
- [9] LI Jianzhu, FENG Ping. Runoff variations in the Luanhe River Basin during 1956—2002[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 339-350.
- [10] 袁艺, 史培军, 刘颖慧, 等. 土地利用变化对城市洪涝灾害的影响[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 6-13. (YUAN Yi, SHI Peijun, LIU Yinghui, et al. Impact of land use change on urban flood disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(3): 6-13. (in Chinese))
- [11] 雷超桂, 许有鹏, 张倩玉, 等. 流域土地利用变化对不同重现期洪水的影响——以奉化江皎口水库流域为例[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5017-5026. (LEI Chaogui, XU Youpeng, ZHANG Qianyu, et al. Impacts of land-use change on flood process and frequency of various return periods: a case study of Jiaokou Reservoir watershed in Fenghua River[J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2016, 36(16):5017-5026. (in Chinese))
- [12] 郑鹏, 林韵, 潘文斌, 等. 基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1268-1275. (ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al. Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1268-1275. (in Chinese))
- [13] 张万宝. 宁夏干旱地区暴雨洪水重现期的特点分析[J]. 水科学与工程技术, 2015(4): 15-18. (ZHANG Wanbao. Characteristics analysis of return period of torrential rains flood in Ningxia arid regions[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2015(4): 15-18. (in Chinese))
- [14] 肖贵清, 余平佬, 黄清涛. 鄂西北“2012.8”暴雨中心最大 24 h 降雨量重现期计算与思考[J]. 抗洪抢险, 2015, 25(1): 54-56, 64. (XIAO Guiqing, YU Pinglao, HUANG Qingtao. Estimating 24-hour rainfall frequency for “2012.8” flood in north-west Hubei Province[J]. Flood Management and Emergency Response, 2015, 25(1): 54-56, 64. (in Chinese))
- [15] 刘阳生. 海南省昌化江 9618 号台风暴雨洪水特性分析[J]. 水文, 2008, 28(1): 94-95, 63. (LIU Yangsheng. Analysis on characteristics of rainstorms and flood in No. 9618 typhoon of Changhua River, Hainan Province[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1): 94-95, 63. (in Chinese))
- [16] 章杭惠, 李琛. 太湖流域防洪形势及对策分析[J]. 中国防汛抗旱, 2014, 24(2): 35-38. (ZHANG Hanghui, LI Chen. Analysis on the flood control situation and countermeasures in the Taihu Basin[J]. China Flood and Drought Management, 2014, 24(2): 35-38. (in Chinese))
- [17] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 388-397. (WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(3): 388-397. (in Chinese))
- [18] 郭生练, 刘章君, 熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314. (GUO Shenglian, LIU Zhangjun, XIONG Lihua. Advances and assessment on design flood estimation methods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 302-314. (in Chinese))
- [19] 梁忠民, 胡义明, 王军. 非一致性水文频率分析的研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 864-871. (LIANG Zhongmin, HU Yiming, WANG Jun. Advances in hydrological frequency analysis of non-stationary time series[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 864-871. (in Chinese))
- [20] 尹义星, 许有鹏, 陈莹. 太湖最高水位及其与气候变化、人类活动的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 609-614. (YIN Yixing, XU Youpeng, CHEN Ying. Maximum water level of Taihu Lake and its relation to the climate change and human activities[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(7): 609-614. (in Chinese))
- [21] 尹义星, 许有鹏, 陈莹. 太湖流域典型区 50 年代以来极值水位时空变化[J]. 地理研究, 2011, 30(6): 1077-1088. (YIN Yixing, XU Youpeng, CHEN Ying. Temporal and spatial changes of extreme water levels in the typical regions of Taihu Lake basin since the 1950s[J]. Geographical Research, 2011, 30(6): 1077-1088. (in Chinese))
- [22] HUANG S, CHENG S, WEN J, et al. Identifying peak-imperviousness-recurrence relationships on a growing-impervious watershed, Taiwan[J]. Journal of Hydrology, 2008, 3(3): 320-336.
- [23] WANG Y, XU Y, LEI C, et al. Spatio-temporal characteristics of precipitation and dryness/wetness in Yangtze River Delta, eastern China, during 1960-2012[J]. Atmospheric Research, 2016, 172-173: 196-205.
- [24] HAN L, XU Y, YANG L, et al. Changing structure of precipitation evolution during 1957-2013 in Yangtze River Delta, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(8): 2201-2212.
- [25] 时光训, 刘健, 马力, 等. 1970—2014 年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. 水文, 2017, 37(4): 77-85. (SHI Guangxun, LIU Jian, MA Li, et al. Spatio-temporal variations of extreme precipitation events in Yangtze River Basin during 1970-2014[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(4): 77-85. (in Chinese))
- [26] 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[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 449-458. (WANG Yuefeng, XU Youpeng, ZHANG Qianyu, et al. Influence of stream structure change on regulation capacity of river networks in Taihu Lake Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 449-458. (in Chinese))

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

WANG Danqing¹, XU Youpeng¹, WANG Siyuan¹, WANG Qiang¹, YUAN Jia¹, HU Zunle²

(1. School of Geography and Oceanography Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Changzhou 213022, China)

Abstract: Taking the Wuchengxiyu region as an example, based on the long-term sequence daily rainfall and water level data, the cumulative anomaly method, Pearson frequency curve and Kriging interpolation method are used to analyze the changes of the water level and the storm flood return period. The change regularity and causes of the flood return period and the storm flood in the typical plain river network area under the background of urbanization are discussed. The analysis results show that the return periods of rainfall with different magnitude are ahead of schedule, and extreme rainfall is frequent and its frequency increases in Wuchengxiyu region. The occurrence frequency of the small-scale flood events ($T=5, 10, 20$ a) in the Wuchengxiyu region has increased, and the return period of the larger-scale flood peak stage ($T=50$ a) is obviously different between urban and suburban areas. The flood with 50 a return period in 1960 increased to 68 a in 2010 at Changzhou station affected by polders, with overall flood level reduction, while the flood with 50 a return period at Baishaoshan station in suburbs decreased to 32 a in 2010, with overall rise of flood level. The increase of the frequency in the small magnitude flood events was mainly caused by the rainfall increase, urban expansion and the attenuation of the river network and water system, and the flood peak water level in 2010 under the same magnitude of rainfall in 1960 continuously increased. The construction of the hydroprojects such as sluices, pumping stations and embankments has played an increasingly important role in regulating higher-level floods, resulting in a reduction of flood risk in the urban areas. For different magnitudes of the flood peak water level, the changes of the underlying surface characteristics and the influence degree of the hydraulic engineering construction are different. The analysis results can provide a technical reference for the study of the flood control safety in this area.

Key words: storm flood; return period; hydroproject