

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.019

基于安全裕度理论的太湖流域北部城市排涝与区域防洪标准衔接研究

李曦亭^{1,2}, 王磊之², 王银堂^{2,3}, 李伶杰^{2,3}, 胡庆芳^{2,3}, 揭仕青^{4,5}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 抚河水文水资源监测中心, 江西 抚州 344000;

5. 鄱阳湖水文生态监测研究重点实验室, 江西 抚州 344000)

摘要: 提出了基于水位安全裕度理论的太湖流域北部城市排涝与区域防洪标准衔接方法, 剖析现状城市排涝与区域防洪标准的衔接性, 并通过不同标准组合方案的试算, 分析了区域和城市防洪排涝标准变化对关键断面出入水量的影响, 并基于水位安全裕度评估方法提出了相衔接的城市排涝标准与区域防洪标准设计组合。研究表明: 现状太湖流域北部区域防洪与城市排涝标准基本具备抵御 50 年一遇洪水的能力, 但城市、区域层面防洪排涝能力与需求表现出不衔接, 表现为城市内部水位远低于防洪设计水位, 而区域水位则接近甚至超出防洪设计水位, 防洪能力略显不足; 不同区域防洪标准提升导致的外排格局变化特征具有显著差异, 武澄锡虞区、阳澄淀泖区防洪能力提升通过扩大向长江泄洪实现, 湖西区则通过扩大向太湖泄洪实现; 限制城市大包围外排水量对缓解城市外部区域防洪压力的效果有限; 太湖流域北部 50 年一遇区域防洪标准与 20 年一遇城市排涝标准是相衔接的标准设计组合。

关键词: 标准衔接; 安全裕度; 区域防洪; 城市排涝; 水文水动力模型; 太湖流域

中图分类号: P333.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)02-0150-07

Standard syntaxis of urban drainage and sub-basin flood standards based on safety margin theory in the north of Taihu Lake Basin

LI Xiting^{1,2}, WANG Leizhi², WANG Yintang^{2,3}, LI Lingjie^{2,3}, HU Qingfang^{2,3}, JIE Shiqing^{4,5}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering & Science, Nanjing 210029, China;

3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Fuhe Hydrology and Water Resources Monitoring Center, Fuzhou 344000, China;

5. Jiangxi Province Key Laboratory of Poyang Lake Hydrology and Ecology Monitoring and Research, Fuzhou 344000, China)

Abstract: A method of standard syntaxis of the flood control and drainage based on the theory of water level safety margin is constructed, and the northern part of the Taihu Lake Basin is used as the study area to analyze the cohesion between the sub-basin flood and urban drainage standards. Through the trial calculation of different simulation schemes, the effect of changes of sub-basin flood and urban drainage standards on the inflow and outflow volume in key sections is analyzed, and the design combination of sub-basin flood and urban drainage standards is proposed based on the evaluation method of water level safety margin. The results indicate that the current sub-basin flood and urban drainage standards of the northern part of the Taihu Lake Basin basically can resist the flood with a return period of 50-year. However, the capacity and demand of flood control and drainage at the sub-basin and urban are incohesion,

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3000101-02); 国家自然科学基金(52109028); 江苏省自然科学基金(BK20210042); 江苏省博士后科研资助计划(2020Z060)

作者简介: 李曦亭(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事防洪减灾与水文预报研究。E-mail: xiting1016@tju.edu.cn

通信作者: 王磊之(1991—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事防洪除涝、水资源规划管理等研究。E-mail: leizhi668@foxmail.com

引用本文: 李曦亭, 王磊之, 王银堂, 等. 基于安全裕度理论的太湖流域北部城市排涝与区域防洪标准衔接研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 150-156.

LI Xiting, WANG Leizhi, WANG Yintang, et al. Standard syntaxis of urban drainage and sub-basin flood standards based on safety margin theory in the north of Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 150-156.

which shows that the water level in the urban is far lower than the flood control design water level, while the sub-basin water level is close to or even higher than the flood control design water level and even slightly higher than its flood control capacity. There are significant differences in the characteristics of changes in the flood discharge pattern caused by the improvement of flood control standards in different sub-basins. The flood control capacity of Wuchengxiyu District and Yangchengdianmao District is improved by expanding the flood discharge to the Yangtze River, while the Huxi District is profited by expanding flood discharge to the Taihu. Limiting the discharge volume of polder of urban has limited effect on alleviating the flood control pressure in the external area of urban. Finally, the sub-basin flood standard with a return period of 50-year and the urban drainage standard with a return period of 20-year in the north of Taihu Lake Basin are the design combination of standard syntaxis.

Key words: standard syntaxis; safety margin; sub-basin flood control; urban drainage; coupled hydrology and hydrodynamic models; Taihu Lake Basin

近年来,全球气候变化导致极端气候事件增加,以及城市化和人为活动引起的下垫面变化,使得城市及所在区域暴雨频发,径流系数增加,汇流速度加快,而随着社会财富向城市的聚集,城市洪涝风险的暴露度大幅提升,洪涝灾害的危害日益严重^[1-3]。

通常,城市内部河网涝水是经闸泵自排或抽排至城市外部承泄区,区域性河道是城市外排涝水的接纳体。若城市外部区域防洪能力不足,承泄河道水位过高,将对城市外排涝水产生顶托,并制约着城市排涝体系的有效运行;若城市排涝能力不足,会造成城市内河网涝水无法及时排出,水位快速上升甚至发生漫溢,这就要求城市排涝能力与所在区域河道的行洪能力相互衔接并协同运行。防洪排涝标准是确定区域或城市防洪排涝工程能力和规模的重要依据,也是防洪排涝能力的直接体现,因此,制定合理衔接的城市排涝与区域防洪标准是有效应对城市 and 所在区域防洪排涝矛盾、科学提升区域防洪排涝效益的有效手段。

针对城市内部市政管网排水与城市包围圈水利排涝标准衔接问题的具体研究思路分为两类:第一类是从设计暴雨的选择和重现期等角度开展城市市政排水和水利排涝设计暴雨的衔接性研究,目前广泛采用 Chow 公式对城市市政排水年多个样法和水利排涝年最大值选样法计算的设计暴雨重现期进行转换^[4]。邵卫云等^[5-6]分别对 Chow 公式进行了验证和比较;谢华等^[7-9]运用推理公式法对特定地区两个层次的重现期转换关系进行了研究。除采用排频拟合等传统方式之外,也有学者采用多元概率等统计学方法来研究两级暴雨(或暴雨和潮位)标准的衔接互动问题,如陈子桑等^[10]应用阿基米德 Copula 分布推算了珠海市各组合的设计暴雨值;Fu^[11]则采用 Copula 函数来生成降水过程并评估排水系统的效果;刘曾美等^[2]在广州市构建市政排水与水利排涝标准的衔接风险分析模型,并基于 Copula 函数给出了求解方法。第二类是基于流量计算方法和水文水动力学模型开展标准衔接研究,如曾娇娇^[12]采用推理公式法、综合单位线法,得出广州市东濠涌流域断面洪峰流量,发现水利排涝重现期约为市政排水重现期的 10 倍;黄国如等^[13]基于 InfoWorks ICM 构建了研究区管道、河道及地面二维耦合模型,研究了城市市政管网排水标准和城市包围圈水利排涝标准的衔接关系,并分析了排水管网出水口高程对排水效果的影响;曾娇娇等^[12]、李连文^[14]则分别基于 InfoWorks ICM 模型、MIKE 模型,模拟研究了广州市、南昌市城区的排水和排涝系统的衔接关系。

综合以上研究可以看出,在城市层面上,相关学者从不同角度研究了城市内部市政管网排水与城市包围圈水利排涝设计标准的衔接关系,但涉及城市包围圈水利排涝标准与其毗邻区域防洪标准衔接问题的很少。然而,在城市组团发展的背景下,大中城市规模迅速扩大,城市对所在地区的带动效能也越发强烈,城市洪涝情势的改变不仅影响城市自身,更可能导致所在区域洪涝格局的重大调整。在这样的背景下,囿于城市自身开展防洪排涝研究不利于妥善处理新形势下地区间的洪涝灾害矛盾,应将研究尺度从城市拓展到城市所在区域,将城市、区域视为一个整体,深刻认识城市与所在区域防洪排涝的相互影响与作用机制。鉴于此,本文基于安全裕度理论提出太湖流域北部城市排涝与区域防洪标准衔接评估方法,采用水文水动力模型从水位和水量的角度分析常州市、无锡市、苏州市的排涝标准与其毗邻区域湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区防洪标准的衔接性,并提出研究区相衔接的防洪排涝标准设计组合。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

研究区地处太湖流域北部,位于 119°08'E ~ 121°55'E、30°05'N ~ 32°08'N 之间,其位置及其水位代表站示意图见图 1。研究区主要有湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区 3 个水利分区以及常州、无锡、苏州三大城市。湖西区地形起伏较大,周边高,腹部低,呈逐渐向太湖倾斜的形态,而武澄锡虞区和阳澄淀泖区地势低平,属于太湖

下游的低洼平原区。研究区属于典型的亚热带季风气候,多年平均气温 15~17℃,多年平均降水量 1 177 mm,降雨集中在 4—10 月,区内洪水主要由梅雨和台风雨形成,历时长,范围广,洪水经本地调蓄后大都通过北部骨干河道和泵站排入长江,其余进入太湖,再经太湖调蓄后通过望虞河和太浦河排出。常州、无锡和苏州市中心城区通过城市大包围枢纽将城市内部涝水集中排入江南运河以及所在的湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区骨干河道,3 座城市沿江南运河的排水规模达 729 m³/s,区域与城市的防洪排涝矛盾较为突出^[15]。

1.2 数据资料

a. 自然地理数据。①研究区 2016 年土地利用数据(时空分辨率 30 m×30 m)来源于清华大学宫鹏老师团队的全球土地利用数据(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>);②DEM 数据(时空分辨率 30 m×30 m)、行政区划数据来自资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>);③河湖水系数据来自太湖流域管理局。

b. 研究所用日尺度气象水文数据包括太湖流域 1984—2002 年 105 个雨量站实测降水数据、15 个代表站点实测水位数据(区域、城市代表站的选取及分布情况见图 1)、10 个蒸发站实测蒸发数据、31 个边界潮位站数据,均摘自水文年鉴。

c. 太湖流域 50 年一遇最大 90 日设计暴雨资料、河湖水系资料、防洪排涝工程和调度资料来自太湖流域管理局,包括河道、闸泵等工程资料,以及相关工程调度规则资料。

2 研究方法

2.1 水文水动力模型

太湖流域水文水动力模型耦合了流域产汇流模型和一维河网水动力模型。流域产汇流模型为一维河网水动力模型,提供河流侧向入流与流量边界^[16]。流域产流模型中,低矮丘陵地区和平原河网地区产水量为水面、水田、旱地和城镇四类下垫面的径流深乘以相应面积后的总和;在以山地为主且受人类活动影响较小的地区产水量则用三水源新安江模型计算。流域汇流模型根据假定的汇流曲线模拟各计算单元净雨汇集至河网或流域出口断面的过程。一维河网水动力模型由圣维南方程组、节点方程组和边界条件联立闭合方程组,求解河道各断面的水力要素。太湖流域水文水动力模型计算原理见文献^[17-19]。

2.2 基于安全裕度理论的标准衔接方法

2.2.1 水位安全裕度计算方法

安全裕度评估是一种以性能阈值和裕量为关键点的安全评定方法,安全裕度理论被广泛应用于对工程系统进行定量风险评估和安全评价^[20]中。在水利行业中,水位的安全裕度定义为湖泊、河网最高洪水位与防洪设计水位之间的安全容量:

$$M_i = Z_{\max} - L_z$$

(1)

式中: M_i 为水位安全裕度; $Z_{\max}$ 为区域防洪体系和城镇排涝体系中湖泊、河网的水位响应值,即湖泊、河网代表站点的最高洪水位值; L_z 为区域防洪体系和城镇排涝体系中湖泊、河网的极限防洪能力阈值,即湖泊、河网代表站点相应防洪排涝标准下的防洪设计水位值。

在城市排涝与区域防洪标准衔接分析中,不同防洪排涝标准对应防洪设计水位不同,导致水位安全裕度评估标准的不统一。针对这一问题,在式(1)的基础上同时除以不同区域防洪和城市排涝标准下的水位安

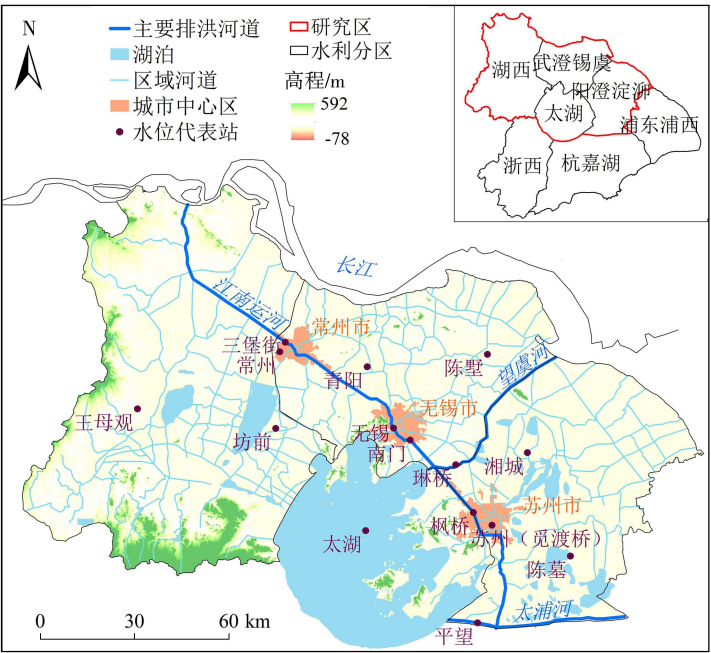


图 1 研究区位置及其水位代表站示意图
Fig. 1 Location of study area and its representative water level stations

全裕量范围,建立基于安全裕度理论的无量纲表达式:

$$M_i = \frac{Z_{\max} - L_z}{L_z - S_z}$$

(2)

式中 S_z 为区域防洪体系和城镇排涝体系中湖泊、河网的水位敏感阈值,即湖泊、河网代表站点的警戒水位值。
在不改变数据性质的前提下将式(2)取对数,以免出现结果差异过大的情况,最终提出一种适用于城市排涝与区域防洪标准衔接分析的水位安全裕度评估方法。计算公式如下:

$$M_i = \begin{cases} \ln\left(\frac{Z_{\max} - S_z}{L_z - S_z}\right) & Z_{\max} > L_z \\ -\ln\left[2 - \left(\frac{Z_{\max} - S_z}{L_z - S_z}\right)\right] & Z_{\max} < L_z \end{cases}$$

(3)

2.2.2 防洪排涝标准衔接评定准则

若区域和城市对应代表站点 M_i 均为负,则评定区域与城市所对应的防洪排涝标准衔接,且 M_i 越小,对应站点的水位安全容量越大,防洪排涝系统就越安全。若区域与城市任一代表站点 $M_i > 0$,则评定区域与城市防洪排涝标准整体不衔接,且 M_i 值越大,代表站点所对应的区域防洪标准、城市排涝标准与其余区域防洪标准、城市排涝标准的不衔接程度越高,洪涝矛盾越突出。

2.3 模型验证

为保证太湖流域水文水动力模型的可靠性,在以山地为主且受人类活动影响较小的地区选用 1984—1987 年资料率定了新安江模型参数,根据洪水运动模拟的需要,增加了洪涝水滞蓄的仿真部分,并重新率定了有关参数,对具代表性的流域特大洪水年 1991 年、1999 年洪水进行了复核计算。根据率定后的参数选用 2002 年降水量较多的时段——5 月 1 日至 6 月 30 日,对太湖流域水文水动力模型进行验证,根据太湖、王母观、陈墓和洛社等 15 个代表断面水位的计算值与实测值对比情况,水位误差均在 15 cm 以内,模型计算精度较高。

2.4 模拟方案设置

基于研究区现状和规划防洪排涝标准及相应防洪排涝工程规模和调度方案,以提升区域防洪标准和适当限制城市大包围外排流量为基本思路,设置模拟方案。方案 1 为现状方案,即区域防洪标准、城市排涝标准,均为 20 年一遇,太湖、望虞河、太浦河和江南运河防洪标准为 50 年一遇;方案 2 为区域标准提升方案,在方案 1 的基础上,通过拓浚北排长江和引排太湖骨干河道、提升沿长江口门设计流量,将湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区防洪标准同时提升至 50 年一遇,城市排涝标准为 20 年一遇;方案 3 为限制城市排涝方案,在方案 1 的基础上,在不影响常州、无锡、苏州市内部河网行洪安全的前提下降低中心城区大包围泵排流量 30%,区域防洪标准为 20 年一遇。

模拟方案采用的暴雨情景为“99 南部”50 年一遇设计暴雨,该设计暴雨过程保持了 1999 年实况暴雨特性:暴雨总量大,洪水历时长,降雨中心位于研究区下游太湖区和阳澄淀泖区,对太湖流域北部造成了严重的洪涝灾害。研究区沿长江口门、控制线口门、环太湖口门以及太湖、望虞河、太浦河工程,现行调度规则依据《太湖流域洪水与水量调度方案》和《苏南运河区域洪涝联合调度方案(试行)》设置,常州、无锡和苏州市中心城区大包围调度规则分别依据《常州市城市防洪规划修编报告(2017—2035)》《无锡市城市防洪规划修编报告(2013—2030)》和《苏州城市防洪排涝专项规划》设置。以 1999 年实测站的特征潮位资料作为下游水位边界条件参与水文水动力模型计算。研究区属典型平原河网地区,水位是反映该地区洪涝情势的主要信息^[21-22],采用的水位代表站点及其特征水位见表 1。结

表 1 研究区代表站及其特征水位值
Table 1 Representative gauges and corresponding characteristic water levels of study area

区域/城市	代表站	警戒 水位/m	保证 水位/m	防洪设计水位/m	
				20 年一遇	50 年一遇
太湖	太湖	3.80	4.65	4.66	
	望虞河	3.80	4.20	4.30	
	太浦河	3.70	4.00	4.14	
江南运河	常州	4.30	4.80	5.65	
	无锡	3.90	4.53	4.75	
	枫桥	3.80	4.20	4.65	
湖西	王母观	4.60	5.60	5.88	6.20
	坊前	4.10	4.60	5.21	5.49
武澄锡虞	青阳	4.00	4.85	5.00	5.30
	陈墅	3.90	4.50	4.60	4.80
阳澄淀泖	湘城	3.70	4.00	4.10	4.28
	陈墓	3.60	4.00	4.10	4.15
常州市	三堡街	4.30	4.74	5.74	
无锡市	南门	3.59	4.20	4.94	
苏州市	觅渡桥	3.50	3.90	4.70	

合水位安全裕度评估方法,计算不同方案下区域、主要排洪河道、城市内部河网共 15 个代表站的水位安全裕度,并对区域防洪标准与城市排涝标准的衔接性开展评估。

3 结果与分析

3.1 区域与城市现状防洪排涝能力分析

方案 1 代表站最高水位及超防洪设计水位值见表 2。由表 2 可知,区域层面上,阳澄淀泖区湘城站和陈墓站最高水位超防洪设计水位为 0.04 ~0.07 m,表明该区域河道防洪能力不足,其余区域代表站最高水位均未超防洪设计水位,但与防洪设计水位之间的安全裕量也较小,如湖西区坊前站和武澄锡虞区青阳站最高水位与防洪设计水位之间仅余 0.07 m 和 0.01 m,表明两个区域的防洪能力仍有待提升以确保区域内部防洪安全。城市层面上,城市内部河网代表站最高水位均未超防洪设计水位,且与防洪设计水位间尚有较大空间(0.79 ~1.22 m)。

主要排洪河道局部水位超防洪设计水位,如望虞河、太浦河、江南运河无锡段代表站琳桥、平望和无锡最高水位分别超防洪设计水位 0.08 m、0.02 m 和 0.06 m。

综上可知,太湖流域北部区域和城市现状防洪排涝能力基本能够防御 50 年一遇设计洪水,但区域和城市在洪涝期间的运行水位表现出巨大差别:得益于城市泵站强排能力的发挥,城市内部水位在汛期得到有效控制,其最高水位远低于防洪设计水位,与此同时,城市外部的部分区域及河道防洪能力却依然不足,大部分站点最高水位超过防洪设计水位,其余站点水位虽并未超过阈值但也相当接近,导致城外区域的防洪风险远超城内。

3.2 防洪排涝标准变化对出入水量的影响

不同方案下关键断面水量与基础方案的差值见表 3。由表 3 可知,提升区域防洪标准至 50 年一遇可增加区域北排长江水量。与方案 1 相比,方案 2 在提升区域防洪标准后,整体北排长江水量增加了 3.48 亿 m³,其增加量主要在武澄锡虞区,为 2.24 亿 m³,其次为阳澄淀泖区,为 0.94 亿 m³,湖西区增加较少,仅为 0.30 亿 m³。与此同时,湖西区入太湖水量相比方案 1 增加了 0.98 亿 m³,武澄锡虞区和阳澄淀泖区则分别减少了 0.31 亿 m³、0.14 亿 m³。武澄锡虞区和阳澄淀泖区入望虞河和太浦河水量分别减少了 1.17 亿 m³ 和 0.10 亿 m³。因此,各区域防洪标准提升导致的外排格局变化特征区别显著:湖西区因其地势和水系原因主要向太湖泄洪,其防洪能力增加主要通过区内新沟河、新孟河等入湖通道实现,因此湖西区北排长江增量相对有限;武澄锡虞区和阳澄淀泖区的防洪能力提升主要通过扩大向长江泄洪量实现,其中前者更甚。

表 3 不同方案下关键断面出入水量与基础方案的差值

Table 3 Comparison of water quantity difference of key cross section for different simulation schemes							
主要泄洪情况	区域	方案 2 与	方案 3 与	主要泄洪情况	区域	方案 2 与	方案 3 与
		方案 1	方案 1			方案 1	方案 1
		差值/亿 m ³	差值/亿 m ³			差值/亿 m ³	差值/亿 m ³
区域沿长江 泄洪量	湖西区	0.30	0.02	城市大包围 外排水量	常州市	-0.08	-0.24
	武澄锡虞区	2.24	0.00		无锡市	-0.11	-0.27
	阳澄淀泖区	0.94	0.21		苏州市	-0.17	-0.14
	合计	3.48	0.23		合计	-0.36	-0.65
区域入太湖 水量	湖西区入湖	0.98	-0.25	区域入望虞河水量	武澄锡虞区	-1.11	0.03
	武澄锡虞区入湖	-0.31	-0.04		阳澄淀泖区	-0.06	0.04
	阳澄淀泖区入湖	-0.14	-0.03		合计	-1.17	0.07
	合计	0.53	-0.32		区域入太浦河水量	阳澄淀泖区	-0.10

由方案 3 和方案 1 的差值可知,相较于方案 1,方案 3 城市大包围外排水量减少了 0.65 亿 m³,同时区域入太湖水量小幅减少,减少约 0.32 亿 m³,因此,限制城市大包围外排水量可在一定程度上缓解区域防洪压

力,但效果有限。

3.3 区域与城市防洪排涝标准衔接性评估

不同模拟方案下各代表站及对应地区 M_i 值见表4和图2。由表2可知,当区域防洪标准均由20年一遇提升至50年一遇时,方案2中区域与城市15个水位代表站的 M_i 均为负,区域与城市防洪排涝标准整体衔接,但研究区主要排洪河道望虞河和太浦河水位留有的安全裕量较少,望虞河琳桥站和太浦河平望站的 M_i 仅分别为-0.03和-0.01。

在方案3中,15个水位代表站中有4个站点 $M_i > 0$ 。研究区主要排洪河道望虞河和太浦河代表站的 $M_i > 0$,琳桥站和平望站 M_i 分别为0.14和0.03,与此同时,阳澄淀泖区代表站也出现 $M_i > 0$ 情况,湘城站和陈墓站 M_i 为0.08~0.18。综上,仅限制城市大包围泵排流量对研究区防洪排涝格局影响甚微,并不能使得区域与城市防洪排涝标准相衔接。

表4 研究区不同模拟方案代表站 M_i 值

Table 4 M_i values of representative stations for different simulation schemes in study area

代表站	方案2	方案3	代表站	方案2	方案3
太湖	-0.07	-0.08	青阳	-0.14	-0.03
琳桥	-0.03	0.41	陈墅	-0.50	-0.29
平望	-0.01	0.03	湘城	-0.38	0.45
常州	-0.43	-0.33	陈墓	-0.12	0.15
无锡	-0.23	-0.17	三堡街	-0.61	-0.42
枫桥	-0.42	-0.40	南门	-0.49	-0.47
王母观	-0.52	-0.18	觅渡桥	-0.66	-0.27
坊前	-0.34	-0.11			

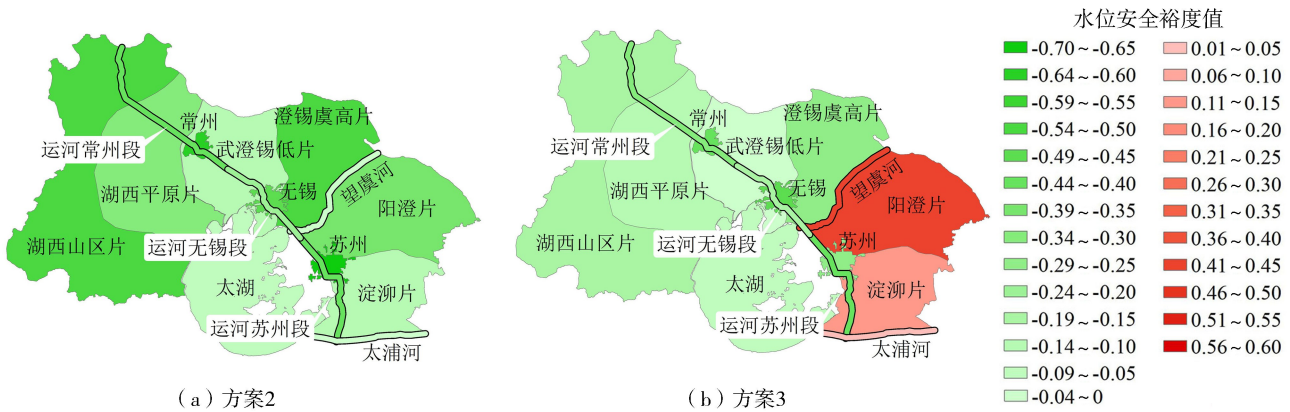


图2 研究区不同模拟方案下各地区 M_i 展示

Fig.2 Display of M_i in each region for different simulation schemes in study area

4 结 论

- a. 在研究区内,现状区域与城市防洪排涝能力基本能够防御50年一遇设计洪水,但区域和城市在洪涝期间的运行水位表现出巨大差别:一方面,城市内部河网水位远低于防洪设计水位,但城市外部区域及主要排洪河道水位已经接近甚至超过防洪设计水位,因此防洪能力依然不足。单从水位来看,城市、区域层面防洪排涝能力与防洪排涝需求表现出一定的不衔接。
- b. 不同区域防洪标准提升导致的外排格局变化特征具有明显的差异,如湖西区主要通过扩大向太湖泄洪量提升防洪能力,而北排长江增量相对有限;武澄锡虞区和阳澄淀泖区防洪能力的提升主要通过扩大北排长江泄洪量实现,其中前者更甚。限制城市大包围外排水量可在一定程度上缓解区域防洪压力,但效果有限。
- c. 基于水位安全裕度评估可知,当研究区城市排涝标准为现状20年一遇,区域防洪标准均提升至50年一遇时,区域防洪标准与城市排涝标准整体衔接。区域防洪标准与城市防洪排涝标准整体衔接的关键在于提升区域防洪标准,限制城市排涝流量对区域防洪标准与城市排涝标准整体衔接具体积极作用,但影响甚微。

参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advance in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[2] 刘曾美,熊腮敏,雷勇,等. 城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J]. 水资源保护,2022,38(1):125-132.

- (LIU Zengmei, XIONG Saimin, LEI Yong, et al. Study on design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 125-132. (in Chinese))
- [3] 郝晓丽, 穆杰, 喻海军, 等. 城市洪涝试验研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 80-86. (in Chinese))
- [4] BIJAN G, DAVAR K. A revisit to partial duration series of short duration rainfalls[J]. Iranian Journal of Science Technology, 2004, 28(5): 547-558.
- [5] 邵卫云. 基于水文特性的暴雨选样方法的频率转换[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 8(8): 1597-1603. (SHAO Weiyun. Probability relationships between rainstorm sampling methods based on hydrological characters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 8(8): 1597-1603. (in Chinese))
- [6] 杨智硕. 暴雨选样间的频率转换问题探讨[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 230-233. (YANG Zhishuo. Study on frequency conversion problem in storm sampling[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2005, 33(2): 230-233. (in Chinese))
- [7] 谢华, 黄介生. 城市化地区市政排水与区域排涝关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 10-13. (XIE Hua, HUANG Jiesheng. Study on the relationship of municipal drainage and hydrological for urban area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(5): 10-13. (in Chinese))
- [8] 刘俊, 俞芳琴, 张建涛, 等. 城市管道排水与河道排涝设计标准的关系[J]. 中国给水排水, 2007, 23(2): 43-45. (LIU Jun, YU Fangqin, ZHANG Jiantao, et al. Study on relationship between design standards of pipe and river drainage[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(2): 43-45. (in Chinese))
- [9] 蓝福鹏. 不同选样方法的市政排水与水利排涝暴雨标准衔接关系对比研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [10] 陈子荣, 高时友, 李鸿皓. 基于二次重现期的城市两级排涝标准衔接的设计暴雨[J]. 水科学进展, 2017, 21(3): 64-71. (CHEN Zishen, GAO Shiyu, LI Honghao. Design storm for mixed level-1 and level-2 urban drainage standards based on the secondary return period[J]. Advance in Water Science, 2017, 21(3): 64-71. (in Chinese))
- [11] FU Guangtao. Copula-based frequency analysis of overflow and flooding in urban drainage systems[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 49-58.
- [12] 曾娇娇. 市政排水与水利排涝标准衔接研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [13] 黄国如, 王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 1-5. (HUANG Guoru, WANG Xin. Study on standard syntaxis of urban drainage between pipe and river based on urban storm flood models[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 1-5. (in Chinese))
- [14] 李连文. 基于 MIKE 模型的城市水利除涝与市政排水衔接研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [15] 王磊之, 胡庆芳, 王银堂, 等. 太湖流域 2016 年、1991 年大洪水对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 471-478. (WANG Leizhi, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Comparison of the two flood events occurred in 2016 and 1991 in the Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 471-478. (in Chinese))
- [16] 吴娟, 林荷娟, 季海萍, 等. 城镇化背景下太湖流域湖西区汛期入湖水量计算[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 10. (WU Juan, LIN Hejuan, JI Haiping, et al. Calculation of water quantity entering the Taihu Lake from the Huxi sub-basin during flood season under the background of urbanization[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 10. (in Chinese))
- [17] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.
- [18] 高丽莎, 高程程, 汪涛. 基于精细化河网水动力模型的长宁区除涝能力评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 62-67. (GAO Lisha, GAO Chengcheng, WANG Tao. Assessment of waterlogging control capacity in Changning District based on refined river network hydrodynamic model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 62-67. (in Chinese))
- [19] 徐天奕, 刘克强, 李琛, 等. 太湖流域大尺度洪涝淹没仿真模型的建立及应用[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 40-45. (XU Tianyi, LIU Keqiang, LI Chen, et al. Establishment and application of large-scale flood inundation simulation model for Taihu Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 40-45. (in Chinese))
- [20] 杜志明, 范军政. 安全裕度研究与应用进展[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 6-10. (DU Zhiming, FAN Junzheng. Progress in study and application of safety margin[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(6): 6-10. (in Chinese))
- [21] 王磊之, 胡庆芳, 胡艳, 等. 1954—2013 年太湖水位特征要素变化及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 13-19. (WANG Leizhi, HU Qingfang, HU Yan, et al. Changes and cause analysis of water level characteristic factors in Taihu Lake during period from 1954 to 2013[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1): 13-19. (in Chinese))
- [22] 张伊佳, 陈星, 许钦, 等. 太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 79-86. (ZHANG Yijia, CHEN Xing, XU Qin, et al. Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 79-86. (in Chinese))