

黄浦江上游流域工程防洪风险分析及对策研究

王建生

(上海市堤防泵闸建设运行中心, 上海市 200080)

摘要: 为应对气候变化和城市化对黄浦江上游防洪体系的双重压力,通过水文情势演变分析、工程现状问题调查和采用层次分析法构建的四维风险评价模型,发现支流历史最高水位最大抬升 60 cm,原 50 a 一遇设计水位现状实际不足 10 a 一遇标准;拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾处于中低至中风险等级,主因是堤防稳定性不足和堤顶欠高。为此提出了以韧性工程改造、数字孪生监测和防洪管理能力提升为核心的应对策略,为上海及长三角一体化示范区防洪体系建设提供科学依据。

关键词: 黄浦江上游支流;水文情势;堤防;防洪形势;防洪风险

中图分类号: TV871

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0180-05

Analysis on Flood Control Risk and Study on Countermeasures of Projects in Upper Reaches of Huangpu River Basin

WANG Jiansheng

(Shanghai Embankment, Pump and Gate Construction Operation Center, Shanghai 200080, China)

Abstract: To address the dual pressures of climate change and urbanization on the flood control system in the upper reaches of Huangpu River, through the analysis of the evolution of hydrological conditions, the investigation of current engineering problems, and the construction of a four-dimensional risk assessment model using the Analytic Hierarchy Process (AHP), it is found that the historical highest water level of the tributary rises by up to 60 cm. The current designed water level of the original once in 50 years is actually less than the once in 10-year standard. The sections of Lanlugang - Maohe - Xietang and the Hongqitang - Dazhentang - Yuanxiejing are at a medium to low risk level. The main reasons are the insufficient stability of the embankment and the low height of the embankment top. Therefore, the countermeasures centered on the resilient engineering reconstruction, the digital twin monitoring and the improvement of flood control management capabilities have been proposed, which provide the scientific basis for the construction of the flood control system in Shanghai and the Yangtze River Delta Integration Demonstration Zone.

Keywords: upstream tributaries of Huangpu River; hydrological regime; embankment; flood control situation; flood control risk

0 引言

在全球气候变化和城市化进程加快的背景下,流域防洪风险治理呈现多学科交叉趋势。荷兰提出“弹性水系统”理论^[1-4];日本通过复合型洪水模型来优化东京湾防洪体系^[1,5]。国内研究中,基于数字孪生技术构建“四预”耦合模型^[6-7],实现了洪水演进的精准模拟和智能调度。本文通过构建包含堤防稳定、漫溢风险、河势演变、抢险救灾四维度的防洪风险评价体系,结合黄浦江上游支流水文变化和工程

老化实际情况,提出了相应的治理对策,为解决流域防洪安全难题提供新范式。

1 河道概况

上海处于平原感潮河网地区,根据《太湖流域防洪规划》^[8],黄浦江及黄浦江上游的主要支流拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾、太浦河、大浏港(见图1)是太湖流域洪涝水东排的骨干通道,具备流域行洪、区域排涝、航运、生态等综合功能。20世纪90年代,太湖流域综合治理总体规划方案提出系统整治黄浦江上游主要支流^[9],并于21世纪初按照50 a一遇防洪标准完成工程建设工作;此后,拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾、太浦河、大浏港以专项维修为主。本文重点分析上海境

收稿日期: 2025-05-07

作者简介: 王建生(1980—),男,学士,高级工程师,上海市堤防泵闸建设运行中心副主任,从事上海城市防洪工程前期和建设和管理工作。

内河道情况。

拦路港—泖河—斜塘北起淀山湖、南至三角渡,全长 23.7 km;红旗塘—大蒸塘—园泄泾(上海段)西起浙沪省界、东至三角渡,上海境内长 17.0 km;太浦河(上海段)西起苏沪省界、东至泖河,上海境内长 15.2 km;大泖港南起小泖港和掘石港交汇

处,北连黄浦江上游干流段,长 5.6 km。随着全球气候变暖、海平面上升等自然因素以及流域水情、工情变化影响,黄浦江上游主要支流防洪形势发生变化,除太浦河防洪情况相对较好之外,其余 3 支流均存在不同程度的防洪安全问题(见表 1)。

表 1 黄浦江上游主要支流基本情况表

基本情况	拦路港—泖河—斜塘	红旗塘—大蒸塘—园泄泾(上海段)	太浦河(上海段)	大泖港
河道长度/km	23.7	17.0	15.2	5.6
设计防洪标准	50 a 一遇	50 a 一遇	50 a 一遇	50 a 一遇
现状堤防顶高程/m	5.03~5.82	5.05~5.60	5.24~6.00	5.12~5.40
2021 年“烟花”台风期间出险情况	出险 14 处	出险 26 处	几乎不出险	出险 12 处

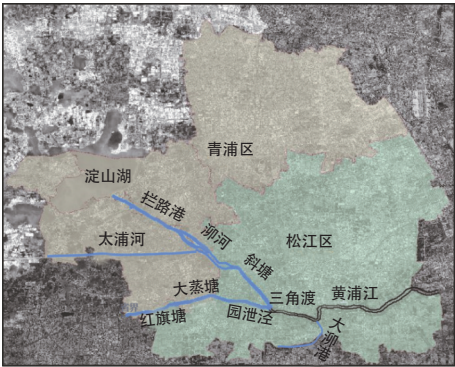


图 1 黄浦江上游主要支流位置分布图

2 黄浦江上游支流水文情势

黄浦江上游主要支流建设历史距今 20 a 左右、工程研究期距今 30 a 左右,受海平面上升和人类活动影响,现状水情较原设计条件已发生较大变化,高水位抬升明显^[10],原堤防设计成果已不适应如今水情、工情条件。

从行洪水量、流量看,原工程建设后满足当时工程建设的任务要求,但由于城市化进程快速推进改变了下垫面条件,同时重要城市包围圈形成、圩区大规模整治等使得圩外调蓄水面减少,洪水风险由圩内向圩外转移^[11],现状下垫面之下遭遇 100 a 一遇“99 南部”雨型时,流域东排最大 30 d 洪量为 37.7 亿 m³,比《太湖流域防洪规划》期间成果增加 3.9 亿 m³ 洪量^[8],其中黄浦江支流拦路港最大 30 d 承泄水量 3.0 亿 m³,增幅达 38.2%,红旗塘峰值流量增大约 100 m³/s。

从洪水(潮)位角度看,相比黄浦江上游支流原工程建设阶段,现状(1980—2021 年)河祝、泖甸、夏字圩、西塘、金泽、泖港水位站历史最高水(潮)位分别上升 31、40、59、57、60、51 cm(见图 2),多年平均年最高水(潮)位分别上升 21、23、33、11、16、30 cm(见图 3);2% 频率下现状高水位较原设计成果抬升

27~41 cm(见表 2),原工程 50 a 一遇设计水位相当于目前水情下 5~10 a 一遇。

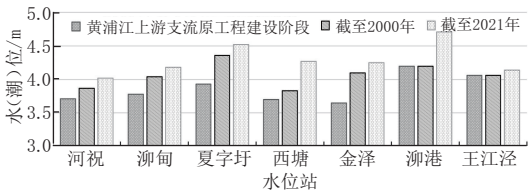


图 2 黄浦江上游支流相关水位站历史最高水(潮)位变化

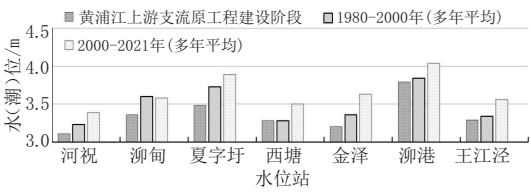


图 3 黄浦江上游支流相关水位站多年平均年最高水(潮)位变化

表 2 黄浦江上游支流 50 a 一遇高水位变化情况表

水位站	黄浦江上游支流原工程建设阶段 50 a 一遇设计水位/m	现状(1980—2021 年)50 a 一遇水位/m	(现状-过去)差值/m
河祝	3.73	4.00	0.27
泖甸	3.89	4.20	0.31
夏字圩	3.99	4.36	0.37
西塘	3.84	4.13	0.29
金泽	3.84	4.24	0.40
泖港	4.22	4.63	0.41

3 面临的问题及形势研究

3.1 防洪压力增加和高水位抬升明显

黄浦江上游支流既受太湖流域洪涝水影响,也受下游潮汐影响。受全球气候变化、海平面上升、风暴潮加剧、地面沉降等自然环境因素的影响,黄浦江高潮位屡创新高,且其抬升趋势依然存在,中上游段受潮汐顶托影响显著,高水位不断刷新记录。以支流夏字圩站为例,“9711”台风、2013 年“菲特”和 2021 年“烟花”台风最高水位分别达到 3.93、4.37、

4.52 m,此外支流相关站点 50 a 一遇高水位相较支流工程建设期,平均抬升约 30 cm。在来流方面,黄浦江上游支流系统建设后的 20 多年来,城镇化进程加快,导致下垫面发生了剧烈变化,城市建成区不断扩张,城镇建设用地迅猛增加,耕地面积减少,圩区大规模实施整治,重要城市包围圈逐渐形成,航道大规模升级整治等,改变了流域、区域与城市洪涝特性和部分区域水流运动格局,间接或直接地对流域和区域防洪产生了明显影响。

3.2 堤防防御能力不足和局部质量安全隐患

支流长期开展专项维护工作,其堤防(防汛墙)基本满足原设计、原治理要求,但随着社会发展、水情、工情等变化,原堤防设计顶高程存在不适应现状水情要求的情况,现状堤防顶高程除太浦河(上海段)基本能满足 50 a 一遇防洪要求外,拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾(上海段)、大浏港现状防洪能力基本为 5~50 a 一遇,其中大浏港现状防洪能力最低。堤防(防汛墙)建设历史较久,裂缝、破损、老化、止水开裂及墙体倾斜等现象时有发生^[12]。虽然维护性工作能起到较好的事后补救防护效果,但治标不治本。2021 年“烟花”台风期间,多次出现防汛墙墙体前倾、墙后渗水、涵闸渗水等问题,调查发现支流拦路港—浏河—斜塘出险 14 处,红旗塘—大蒸塘—园泄泾(上海段)出险 26 处,大浏港出险 12 处,太浦河(上海段)出险较少;2024 年的进一步质量普查发现,拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾(上海段)分别约有 9%、7% 岸段存在贯穿性裂缝、墙体错位、老化破损等质量问题,经稳定复核,分别有 8%、6% 不满足稳定要求。

3.3 口门建筑物风险隐患尚存,防汛通道待全线贯通

现状口门建筑物普遍存在混凝土结构老化、破损、开裂、露筋锈胀、浆砌石砂浆脱缝、伸缩缝止水破损缺失等问题,且沿线大部分口门建筑物门顶高程低于现状堤防(防汛墙)顶高程,是沿线堤防中漫顶风险最高的区域之一,遭遇极端雨水天气易出现渗漏、漫溢等现象。面对可能的安全隐患,在防汛通道贯通方面,黄浦江上游主要支流防汛通道普遍协同支河口门建筑物布置,局部区域支河口门建筑物与河口有一定距离而引起绕道,对防汛抢险工作的紧急性、及时性具有一定影响。现状防汛通道绕道长度表现为:拦路港—浏河—斜塘绕道 6.5 km、红旗塘—大蒸塘—园泄泾(上海段)绕道 11.4 km、大浏港绕道 3.2 km、太浦河(上海段)基本不绕道。

4 黄浦江上游支流防洪风险研究

结合黄浦江上游支流防洪形势,综合堤防稳定性、堤防顶高程达标、口门建筑物隐患、防汛通道贯通和河势等多方面情况,分别从堤防安全稳定因素风险(A1)、漫溢因素风险(A2)、河势因素风险(A3)、抢险救灾因素风险(A4)4 个层次,采用层次分析法(AHP)^[14-15]将定量和定性分析相结合,构建黄浦江上游支流防洪风险综合评价体系,综合评价黄浦江上游支流防洪风险。

根据经验,对 4 个一级指标(A1~A4)进行两两重要性比较,采用 1~9 标度法^[13]构建判断矩阵(见表 3)。通过求解判断矩阵的最大特征值及对应的特征向量,得到各指标权重 $W=[0.557\ 7, 0.266\ 3, 0.132\ 2, 0.043\ 8]$ 。并通过一致性检验(一致性比率 $C_R=0.022\ 8<0.1$)。采用同样方法,可确定二级指标权重。

表 3 准则层判断矩阵

风险因素	A1	A2	A3	A4
A1	1	3	5	9
A2	1/3	1	3	7
A3	1/5	1/3	1	5
A4	1/9	1/7	1/5	1

需要指出的是:4 个一级指标(A1~A4)进行两两重要性比较时,相对重要性分为稍微重要(标度 3)、明显重要(标度 5)、强烈重要(标度 7)、极端重要(标度 9)4 个等级。如与堤防漫溢对比,堤防安全稳定为稍微重要,则 $A1/A2=3$,反之, $A2/A1=1/3$;与抢险救灾风险对比,堤防安全稳定为极端重要,则 $A1/A4=9$,反之, $A4/A1=1/9$ 。

采用层次分析法将定量和定性分析相结合,构建黄浦江上游支流防洪风险综合评价体系(见表 4),将防洪风险划分为Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ共 4 个等级,分别代表低风险、中低风险、中风险、高风险(见表 5);堤防风险等级评价根据表 6 确定。

需要指出的是:B2 根据防汛墙边坡抗滑稳定、结构稳定(天然地基、桩基)、渗流安全性复核成果进行评价,1、2、3、4 分别表示有 1~4 项复核成果不满足规范要求;B5 根据流速大小进行赋值;B6 首要量化指标为边坡系数,同时考虑深槽存在,对 B6 指标进一步赋值;B7 根据防汛通道绕行长度进行赋值。

根据现状情况,按表 4 对二级指标赋分,分值乘以相应权重并求和得到各堤段得分,再根据得分确定各堤段风险等级。以红旗塘某堤段为例,堤段计

表 4 防洪风险综合评价指标体系

目标层	指标层 A	权重/%	二级指标层 B	权重/%
防洪风险分析	堤防(防汛墙)(含口门建筑物)安全稳定因素风险 A1	55.77	工程质量 B1	49.4
			结构安全 B2	50.6
	漫溢因素风险 A2	26.63	堤顶高程欠高程度 B3	57.6
			周边用地情况 B4	42.4
	河势因素风险 A3	13.22	水动力条件 B5	46.4
			河床情况边坡稳定系数 B6	53.6
	抢险救灾因素风险 A4	4.38	防汛通道绕道情况 B7	100

表 5 二级指标赋分标准

指标	[90, 100]	[80, 90)	[60, 80)	[0, 60)
B1	综合考虑墙身倾斜、下沉、墙体老化等因素			
B2	0	1	2	3, 4
B3	[-0.1, 0]	[-0.2, -0.1)	[-0.3, -0.2)	<-0.3
二级指标阈值	B4 两岸几乎为林农田	以林地为主,少量居民、产业园	林地与产业园占比相当	以居民、产业园为主
B5	[0.6, 0.8)	[0.4, 0.6)	[0.2, 0.4)或[0.8, 1)	<0.2或≥1.0
B6	≥5	[3, 5)	[2, 3)	<2
B7	<500	[500, 2 000)	[2 000, 3 000)	≥3 000

表 6 风险评价标准

风险等级	IV(低风险)	III(中低风险)	II(中风险)	I(高风险)
准则阈值	[90, 100]	[80, 90)	[60, 80)	[0, 60)

算得分 83.60 分,为中低风险(见表 7)。

表 7 红旗塘某堤段分值计算

一级指标	权重/%	二级指标	权重/%	二级指标赋分	权重分值计算
A1	55.77	B1	49.40	91	25.07
		B2	50.60	85	23.99
A2	26.63	B3	57.60	70	10.74
		B4	42.40	90	10.16
A3	13.22	B5	46.40	85	5.21
		B6	53.60	85	6.02
A4	4.38	B7	100	55	2.41
合计					83.60

经计算得到黄浦江上游主要支流防洪综合风险情况(见表 8),以及各段风险分布(见图 4)。

表 8 黄浦江上游主要支流防洪综合风险情况表

序号	河道名称	风险等级	主要风险	备注
1	拦路港— 柳河—斜塘	中低风险—中 风险	堤防安全稳定 与堤顶欠高风险	中风险堤段 占比 35%
2	红旗塘— 大蒸塘— 园泄泾	中低风险—中 风险,存在局 部高风险堤段	堤防安全稳定 与堤顶欠高风险	中风险堤段 占比 47%
3	大泖港	中低风险—中 风险	堤顶欠高风险	
4	太浦河	低风险—中低 风险	总体相对较好	

5 对策研究

黄浦江上游主要支流的防洪体系正面临历史性

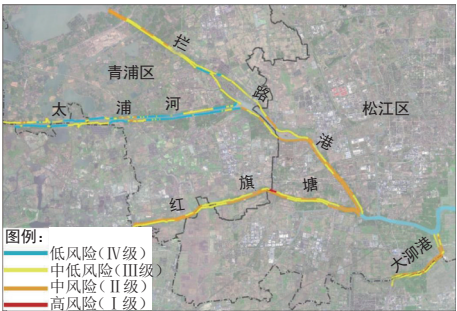


图 4 黄浦江上游主要支流防洪综合风险分布示意图

挑战,研究揭示了多重压力叠加下的风险特征和发展趋势。从系统演变角度分析,1990 年代建设的防洪工程已难以适应新的水情工情条件,其核心矛盾体现在 3 方面:一是自然条件变异导致的设计标准失效,原 50 a 一遇设计水位已降级为 5~10 a 一遇;二是城市化引发的流域水文特性改变,圩区整治使圩外调蓄水面缩减,洪水风险外部化特征显著;三是工程结构老化与防御需求提升的剪刀差,调查显示接近 10% 堤段存在结构缺陷,此外口门建筑物顶高程偏低明显。在风险机理层面,研究建立了包含堤防稳定、漫溢风险、河势演变、抢险效能四维度的评价模型,量化分析表明,各支流风险呈现空间分异特征:拦路港—柳河—斜塘和红旗塘—大蒸塘—园泄泾因堤防稳定和堤顶欠高因素,中风险岸段分别占比达 35%、47%;大泖港相对处于下游,相较其他 3 支流,高水位抬升影响最大,顶高程欠高程度大、漫溢因素风险大。另外值得关注的是,防汛通道绕道段使应急响应时效降低。研究证实,当前防洪风险本质是系统演进与静态防御体系的矛盾,未来需建立

动态适应机制,有机结合工程措施与非工程措施,为保障区域经济社会高质量发展提供坚实水安全支撑。面向新发展需求,提出3层次应对策略:

首先,实施工程韧性提升计划(见表9),依托流域和上游阳澄淀泖区、杭嘉湖区区域治理,针对现状不同堤段存在问题,实施防洪能力提升工程。同时加快实施黄浦江河口挡潮闸,挡住潮水上溯,减少风暴潮洪“三碰头”、“四碰头”机会,以“河口闸+堤防”防汛体系,降低上游支流堤防防洪风险,并研究开辟扩大流域东南排杭州湾新通道,以扩大流域和区域洪涝水外排出路,减轻黄浦江潮水上溯影响,降低河道洪水位,巩固完善城市外围防洪屏障,综合提升防洪(潮)能力(见表10)。

表9 韧性提升策略

问题	对策
海平面上升、风暴潮加剧,下游潮位顶托	黄浦江河口新建挡潮闸
城市化进程和圩区建设,使汇流速度加快,上游来水量增大	提升圩区水面率、控制强排流量
黄浦江上游太湖、淀山湖和嘉兴来水集中汇入黄浦江干流,洪水外排出路不足	开辟扩大流域东南排杭州湾新通道

表10 现状堤防问题的治理对策措施表

现状问题	对策措施	重点河道
堤防稳定性不足	堤防加固	红旗塘—大蒸塘—园泄泾
堤顶高程欠高	堤防加高培厚,新建堤顶防洪墙	拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾
口门建筑老化、及挡水高程不足问题	口门建筑物改造,提高设计挡水高程	全流域口门建筑物
防汛通道不畅	新建防汛道路,加强防汛道路管理,保持通道畅通	拦路港—浏河—斜塘、红旗塘—大蒸塘—园泄泾

其次,加快上海市数字孪生流域河网建设。水利部发布了《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》,要求“以数字化、网络化、智能化为主线,数字化场景、智慧化模拟、精准化决策为路径,以构建数字孪生流域为核心,全面推进数据、算法、算力建设,加快构建预报、预警、预演预案功能的智慧水利体系”。围绕黄浦江上游河道和堤防安全,建立一体化、全覆盖、全天候、全要素智能监测和感知体系,为设施运行、洪灾防控和应急抢险提供技术保障,同时建立标准化数据集成系统,加强基础设施智能化改造,以及水下地形和设施运行数据汇集分析,将地理空间数据、工程设施基础数据、实时监测数据、业务管理数

据和气象水文数据集成;融合雷达、卫星遥感等实时数据,实现太湖全流域水文气象监测全覆盖,通过建设上海市数字孪生河网,提升工程运行监控能力,为制定太湖流域地区到上海区域水利片区的涝水外排制度、指挥调度科学化决策和可视化呈现提供支持。

最后,提升防洪管理能力,修订完善《黄浦江防汛墙保护管理办法》、《堤防安全鉴定规定》等规范,进行法治体制机制建设,落实日常维护、年度岁修和品质提升,加强对堤防设施保护和功能提升,确保设施完好及其安全运行。完善超标准洪水应急管理体制建设,以加强防洪工程和调度管理、强化洪水风险防控管理为重点,通过条块结合、以块为主,在防汛物资、防汛预案、抢险队伍等防汛体系中,系统提升防灾减灾能力和安全韧性,强化超标准洪水应对重点措施,充分发挥防洪体系综合效益。

6 结 语

(1)本文一是构建多维度防洪风险评价体系,将定量和定性分析相结合,分析各堤段风险等级;二是提出流域防洪韧性提升策略,为流域防洪治理提供新思路。

(2)部分风险评价指标权重受主观因素影响较大,风险模型的普适性有待进一步验证。未考虑极端天气情况下的风险突变机制。

(3)后续将深化极端气候对防洪风险影响的研究,优化风险评价模型;基于数字孪生技术,构建“天空地水工”一体化监测感知体系,支撑实现水利业务“四预”,提升流域防洪能力。

参考文献:

[1] 胡文明,温骥宇,王静,等.欧美亚典型发达国家洪水标准及应对气候变化策略[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(3):605-617.
[2] 刘远新,刘博,杨智,等.荷兰洪水风险管理对我国中小河流治理的启示[J].中国水利,2023(18):67-72.
[3] 赵宏宇,李耀文.通过空间复合利用弹性应对雨洪的典型案列——鹿特丹水广场[J].国际城市规划,2017,32(4):145-150.
[4] 郭巍,侯晓蕾.荷兰三角洲地区防洪的弹性策略分析[J].风景园林,2016(1):34-38.
[5] 李媛,陈轶.日本城市洪涝灾害风险治理与经验借鉴[J].吉林水利,2024(8):60-63.
[6] 张莹,陈赞,王奇.强化“四预”助力太湖流域防汛智慧化[J].中国水利,2022(8):39-40;46.
[7] 何健,肖尧轩,刘国庆,等.流域防洪“四预”关键技术研究与应用[J].中国水利,2025(7):14-29.
[8] 水利部太湖流域管理局.太湖流域防洪规划[Z].上海:水利部太湖流域管理局,2008.

(下转第190页)