

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.03.015

沿海城市复合洪涝顶托作用的物理模型试验研究

——以海口市美舍河流域为例

徐奎^{1,2}, 文纳新^{1,2}, 庄云超^{1,2}

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 暴雨、上游来洪、高潮位等多因子驱动的复合洪涝灾害严重威胁沿海城市可持续发展。为探究多因子复合作用下洪潮顶托致涝机制, 本文以海口市美舍河流域主城区为例, 构建复合洪涝物理模型, 采用粒子示踪方法, 分析不同暴雨-河流洪水-高潮位(雨-洪-潮)组合情景下城市地下排水管网所受洪潮顶托作用特征。结果表明: 降雨强度越大, 排水管网所受洪潮顶托作用越弱; 河水位抬升, 洪潮顶托效应增强, 管网所受顶托作用范围自河道排水口向管网内部延伸, 顶托最大长度达14.55 m, 范围占比达82.58%; 当潮位增加, 洪潮顶托持续时间及范围降低, 20年一遇降雨下, 洪潮顶托作用持续时间减少37 min, 最大顶托范围占比下降35.70%; 50年一遇降雨下, 持续时间减少42 min, 最大顶托范围占比下降30.66%。研究成果可为沿海城市防洪排涝工程及复合灾害防控提供科学依据。

关键词: 复合洪涝; 物理模型; 粒子示踪; 顶托作用

中图分类号: TU998.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2025)03-0527-09

受气候变化、城市化、海平面上升等影响, 沿海城市洪涝灾害频次有明显上升趋势, 其造成的损失也更加严重^[1-3]。传统洪水灾害分析往往侧重于强降雨影响, 然而沿海城市洪涝灾害致灾因子众多, 洪水往往由降雨、风暴潮、上游来洪等多种因子驱动, 当不同洪水驱动因子在时间和空间上重合, 沿海城市就会发生复合洪水灾害^[4-6]。如2023年9月极端暴雨与河道洪水遭遇, 造成深圳龙岗区发生特大暴雨洪涝灾害^[7]; 2024年9月强台风“摩羯”作用下强降雨和风暴潮遭遇, 给海南带来巨大社会经济财产损失; 2013年9月台风“菲特”^[8]和2024年9月台风“贝碧嘉”影响下风暴潮、特大暴雨与上游洪水遭遇, 造成浙江、上海、江苏等地发生严重洪涝灾害。

国内外已有学者运用数理统计方法研究复合洪水驱动因素的联合分布及其相关性。如Ward等^[9]通过Kendall秩相关系数计算全球三角洲区域的洪-潮相关性, 发现超过一半的站点表现出显著相关性; 许瀚卿等^[10]通过Copula函数揭示中国沿海复合洪涝潜在风险以及风暴潮与降水间的时空依赖性; 张卡等^[11]通过非一致性频率计算方法与时变Copula函数, 发现上游洪水、台风和天文潮共同作用下的复合洪水事件在未来发生概率呈上升趋势。随着计算机技术快速发展, 不少学者利用数值模型开展沿海城市复合洪水评估工作。Pariartha等^[12]将MIKE FLOOD水动力模型与GIS相结合, 量化城市化、降雨情景变化和海平面上升对沿海城市洪灾的复合效应; 孙钦珂等^[13]基于Delft3D FLOW&WAVE耦合模型, 揭示风-浪非线性作用导致复合洪水的影响。这些研究多聚焦于上游来洪-高潮位、暴雨-高潮位等2种因子间的相关性及其致涝特征, 少有学者对暴雨、河流洪水和高潮位3个因子共同驱动的沿海复合洪水展开分析。

现有的物理模型以河道为主要建模段, 通过溃坝洪水模拟试验研究洪水演进过程。陆灵威等^[14]通过物理模型试验模拟, 揭示溃堤后洪泛区内的洪水演进与河道内落水波的传播过程; 张晓雷等^[15]通过开展堤防

收稿日期: 2025-01-02; 网络出版日期: 2025-05-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20250517.1538.004>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379019)

作者简介: 徐奎(1987—), 男, 湖北襄阳人, 副教授, 博士, 主要从事城市复合洪涝研究。E-mail: kui.xu@tju.edu.cn

溃决概化模型试验,研究溃堤洪水在滩区的演进规律以及溃堤后主槽水位变化;Al-Hafidh等^[16]通过瞬时溃坝试验,分析了工程堤防决口对河道内洪水水位的影响。下垫面和建筑物是城市内涝形成过程中不可忽视的因素,目前一些学者通过简化的城市地形研究了建筑物与下垫面对洪水演进的影响^[17-18]。刘慧娟等^[19]通过降雨模拟试验,揭示城市下垫面条件对产汇流过程的影响,发现设置城市下部不透水相较上部不透水产流量小、产流速度快;董柏良等^[20]基于洪水演进物理模型,发现建筑物密度增加使流入街区水体积减小,布设绿化带将增加水流阻力,促使水流沿模型道路演进。这些物理模型研究大多以单因子(降雨或洪水)为主,缺乏对多因子复合洪涝机理的研究。海口市作为中国典型的沿海大城市,频繁遭受台风侵袭,是受到降雨、洪水和高潮位共同作用的复合洪涝灾害的代表性区域。

本文以海口市美舍河流域主城区为例,基于美舍河出口流域地形和排水管网等资料,构建雨-洪-潮复合洪涝模拟物理模型,利用粒子示踪方法,探究在雨-洪-潮多重致灾因子影响下城市地下排水管网的排水能力以及洪潮顶托作用特征。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域

研究区位于海南省海口市美舍河下游出口流域。随着全球气候变暖,海水潮位不断上升,在暴雨和高潮位共同影响下,河网高水位会对排水管网产生顶托作用,限制排水系统排水能力,加重海口市复合洪涝风险。本研究所需的降雨数据、建模基础资料均由海口市水务局提供,潮位数据采用海口潮位站提供的1974—2012年实测潮位。整个研究区域长度为1 050 m、宽度为700 m,图1为美舍河下游出口流域位置示意。

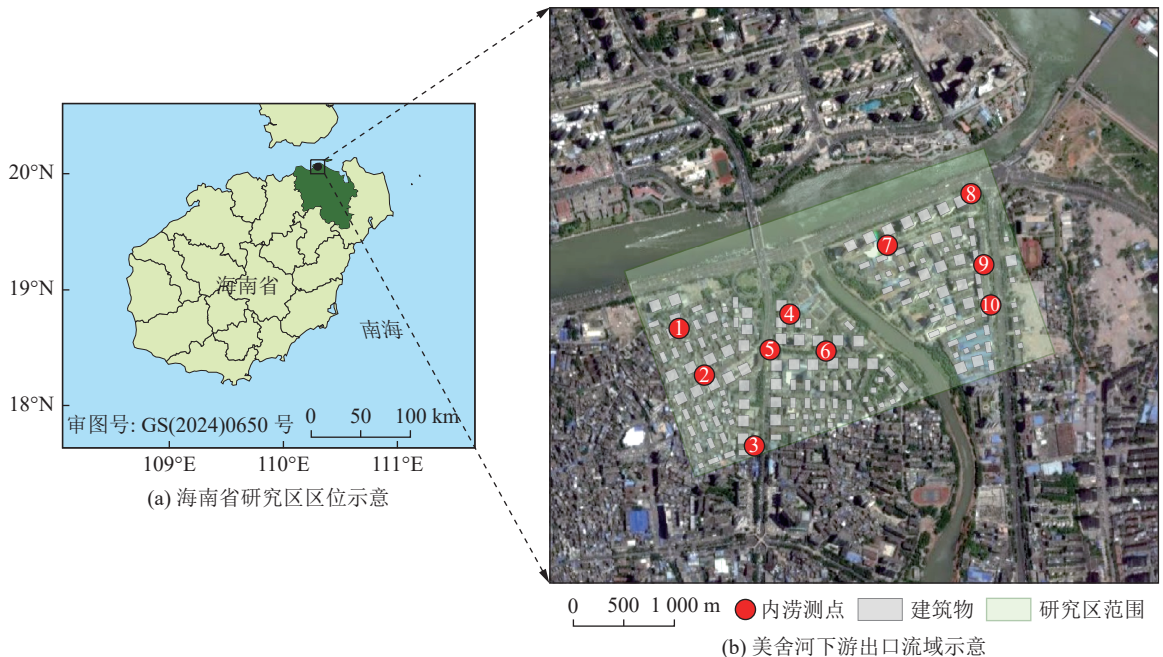


图1 美舍河下游出口流域

Fig. 1 Estuarine watershed of Lower Meishe River

1.2 物理模型

研究参考河工模型设计思路,构建水平比尺为1:300、垂直比尺为1:30的变态物理模型。复合洪涝物理模型设计为长3.5 m、宽2.0 m。基于重力相似、阻力相似和惯性力相似准则对物理模型试验中流量比尺、

降水量比尺推求。详细的模型比尺推求以及率定和验证可参考文献[21]。

复合洪涝物理模型由主体试验装置、供水系统设施、降雨模拟装置以及试验记录装置4部分组成。主体试验装置包括上部建筑物、检查井、河道、海岸、下垫面以及下部排水管网等部分;供水系统以水泵为动力源,利用磁性阀门调节水流进入降雨模拟装置实现对降雨强度的控制;降雨模拟装置布设于主体试验装置上部1.5 m,设置36个喷嘴式喷头;试验记录装置布设于排水管网底部,由左右岸各1台摄像设备组成。图2为复合洪涝物理模型装置示意。

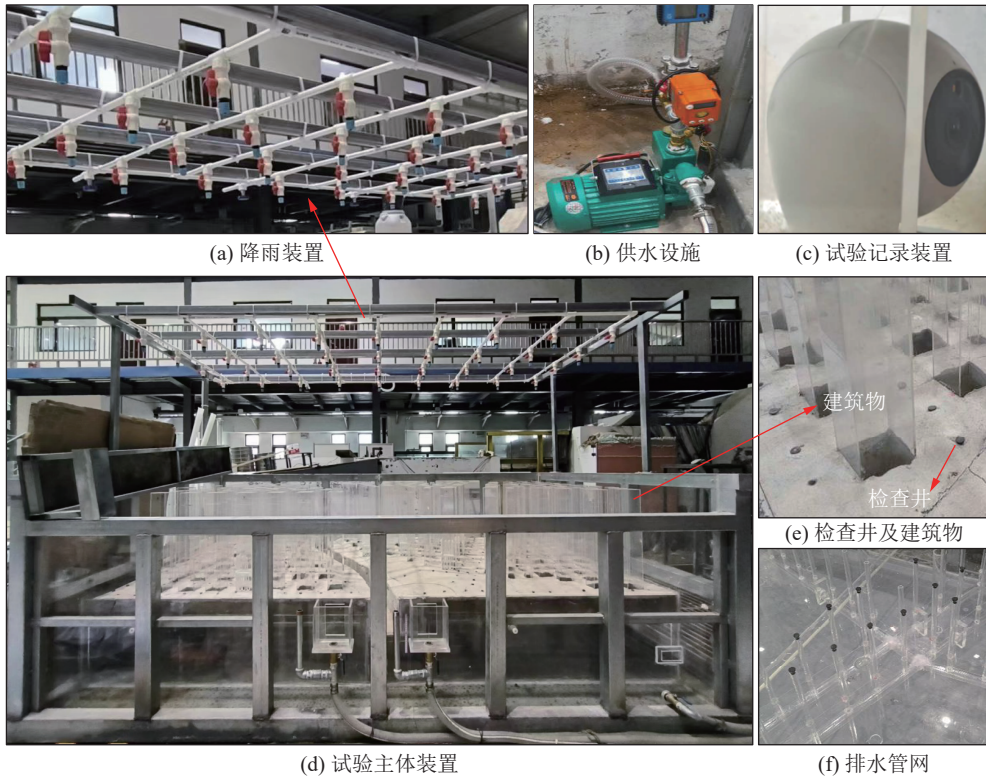


图2 复合洪涝物理模型装置

Fig. 2 Compound flooding physical model device

1.3 试验工况设置

表1为设计的8种复合洪涝试验工况。在考虑海口市城区内涝防治标准和城区河道设计排涝标准时,将20年一遇和50年一遇降雨与不同潮位条件相结合,包括基线潮位、20年一遇和50年一遇高潮位,以及相应河水位,其中基线潮位是海口市水务局基于历史长时间潮位监测设计的潮位过程。试验模拟时间为1 h,降雨强度时间间隔为10 min。潮位和河水位波动小,使用固定的潮位和河水位。由于研究区域位于河口位置,河道水位完全受潮位控制,且该模型中河水位与潮位存在固定高差,为探究高河道水位对管网的顶托作用,通过在河道出水口位置安置挡潮闸来抬高河水位,此时河水位为4.8 m,对应工况3和工况4。各工况下降雨与潮位均由设计降雨与设计潮位采用同倍比放大法求得。

1.4 管网示踪剂浓度识别

研究采用罗丹明B和亚甲基蓝2种不同颜色示踪剂分别对河流洪水和潮水进行追踪,各试验工况2种示踪剂添加剂量均为5 g,通过试验记录装置拍摄在1 h内潮水(蓝色)和河流洪水(红色)在排水管网的流动路径,利用Matlab读取不同时刻管网示踪剂质量浓度变化RGB彩色图像,提取红色、绿色和蓝色分量,3个颜

表1 试验模拟工况

Table 1 Experimental simulation scenarios

工况	降水量/mm	潮位/m	河水位/m	工况	降水量/mm	潮位/m	河水位/m
工况1	90.4(20年一遇)	2.0(基线潮位)	2.9	工况5	90.4(20年一遇)	3.5(20年一遇)	4.4
工况2	101.8(50年一遇)	2.0(基线潮位)	2.9	工况6	101.8(50年一遇)	3.5(20年一遇)	4.4
工况3	90.4(20年一遇)	2.0(基线潮位)	4.8	工况7	90.4(20年一遇)	4.2(50年一遇)	5.1
工况4	101.8(50年一遇)	2.0(基线潮位)	4.8	工况8	101.8(50年一遇)	4.2(50年一遇)	5.1

色分量取值范围为 $[0, 255]$ 。

仅有RGB数值不能揭示与示踪剂质量浓度的关系，而多元线性拟合适用于确定2个或多个变量之间的定量关系，对于目标变量 y ，多元表达式可以写为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m \quad (1)$$

式中： x_1, x_2, \dots, x_m 为用于线性拟合的输入参数； $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 为线性拟合的回归参数。

配置9种标准质量浓度分别为0.0001、0.0005、0.002、0.005、0.01、0.02、0.05、0.1、1.0 mg/L的罗丹明B试剂，分别提取不同质量浓度试剂的RGB值，采用多元线性拟合得到RGB与质量浓度的多元线性表达式为

$$C = 6.6 \times 10^{-3} + 3.1 \times 10^{-4} C_R + 1.7 \times 10^{-4} C_G - 5.8 \times 10^{-4} C_B \quad (2)$$

式中： C 为排水管网中的示踪剂质量浓度，mg/L； C_R 为红色分量； C_G 为绿色分量； C_B 为蓝色分量。

2 结果与分析

2.1 示踪剂质量浓度采集结果

图3为排水管网示踪剂质量浓度变化分析点位示意图，共计8个分析点位。依据所选取的点位，截取1h降雨序列内管道中示踪剂质量浓度变化结果，图4为工况1排水管网中示踪剂质量浓度在试验时段的变化。

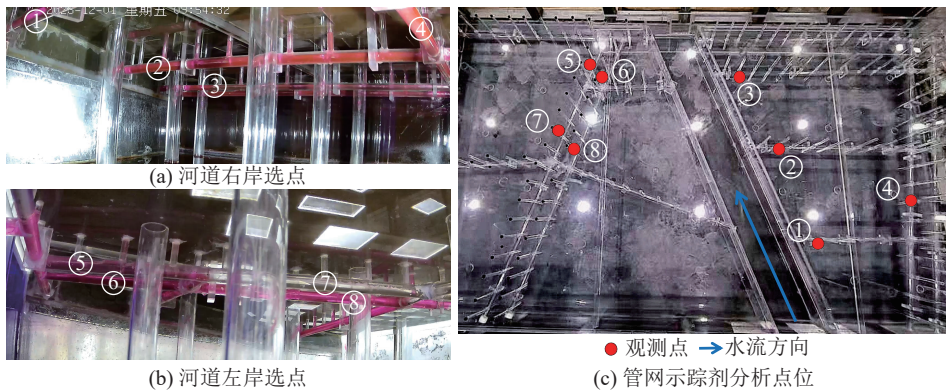


图3 管网示踪剂质量浓度变化分析点位示意

Fig. 3 Analysis location for tracer concentration changes in pipe network

2.2 示踪剂质量浓度变化结果与分析

图5为各工况下排水管网中示踪剂质量浓度变化过程。对于河道右岸而言，在相同潮位河水位组合下，不同降雨条件下排水管网示踪剂质量浓度变化趋势基本一致；在基线潮位工况下，对应工况1和工况2，管网所受顶托作用变化趋势表现为与降雨强度相反；当河道水位抬升，对应工况3和工况4，在4.8 m高河道水位影响下顶托效应被放大，此时管网所受顶托作用强度几乎不受降雨强度的影响。在20年一遇和50年一遇

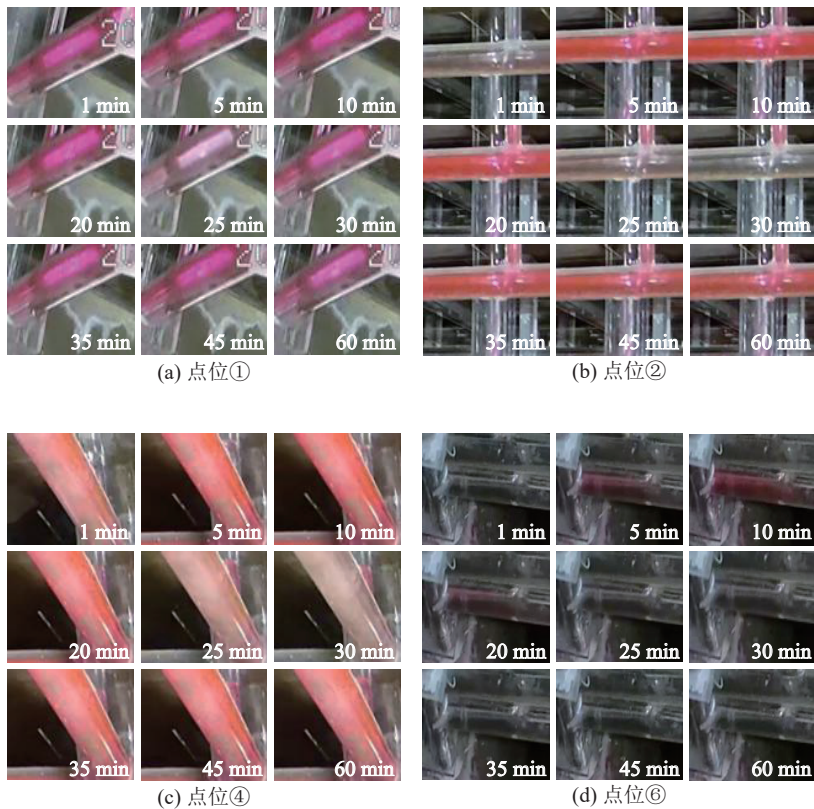


图4 工况1管网示踪剂质量浓度变化

Fig. 4 Pipe network tracer concentration changes of scenario 1

高潮位工况中,对应后4种工况,管网所受顶托作用变化趋势则表现为在试验初期迅速增大到峰值,随着降雨强度增大,顶托作用迅速减弱随后一直趋近于0。相较于河道右岸,左岸管网所受洪潮顶托作用并不明显,仅在基线潮位工况和4.8 m高河道水位工况出现洪潮顶托效应,表明在美舍河左岸受地形地貌、下垫面、边界条件等因素影响河道与排水管网的水力水量互馈作用较少。

由图5可以看出在试验开始初期12 min时,河道右岸多种工况中点位②示踪剂质量浓度高于其他点位,表明该位置所受顶托作用强烈,故对不同工况下点位②在试验12 min时的示踪剂质量浓度对比分析。20年一遇降雨条件下,基线潮位工况在试验12 min时,点位②示踪剂质量浓度出现整个试验的最大值0.041 mg/L,随着河道水位抬升到4.8 m,示踪剂质量浓度降低至0.033 mg/L,当潮位重现期增加至50 a时,示踪剂质量浓度降低至0.027 mg/L;50年一遇降雨条件下,随着河道水位抬升到4.8 m,示踪剂质量浓度从0.032 mg/L降低至0.031 mg/L,当潮位重现期增加至50 a时,示踪剂质量浓度降低至0.002 5 mg/L;在潮位重现期为20 a时,点位②示踪剂质量浓度为0即无顶托效应。此外,在相同的潮位河水组合下,管道所受顶托作用随降雨强度增大而减小。总之,降雨、潮位与河水位的增加,减少了洪潮顶托下河道与排水管网间的水力水量交换,降低了洪潮对管网的顶托作用。

2.3 洪潮顶托时间及范围分析

图6为不同工况下排水管网顶托范围变化过程,各时刻顶托范围占比为含示踪剂管道长度与排水管网总长度的比值。洪潮顶托范围占比变化过程与排水管网示踪剂质量浓度变化趋势基本一致,主要与降雨强度呈相反趋势。当潮位重现期增加时,顶托效应出现时间明显推迟,试验开始时推迟约2 min,第2段顶托效应增长的出现推迟约10 min。

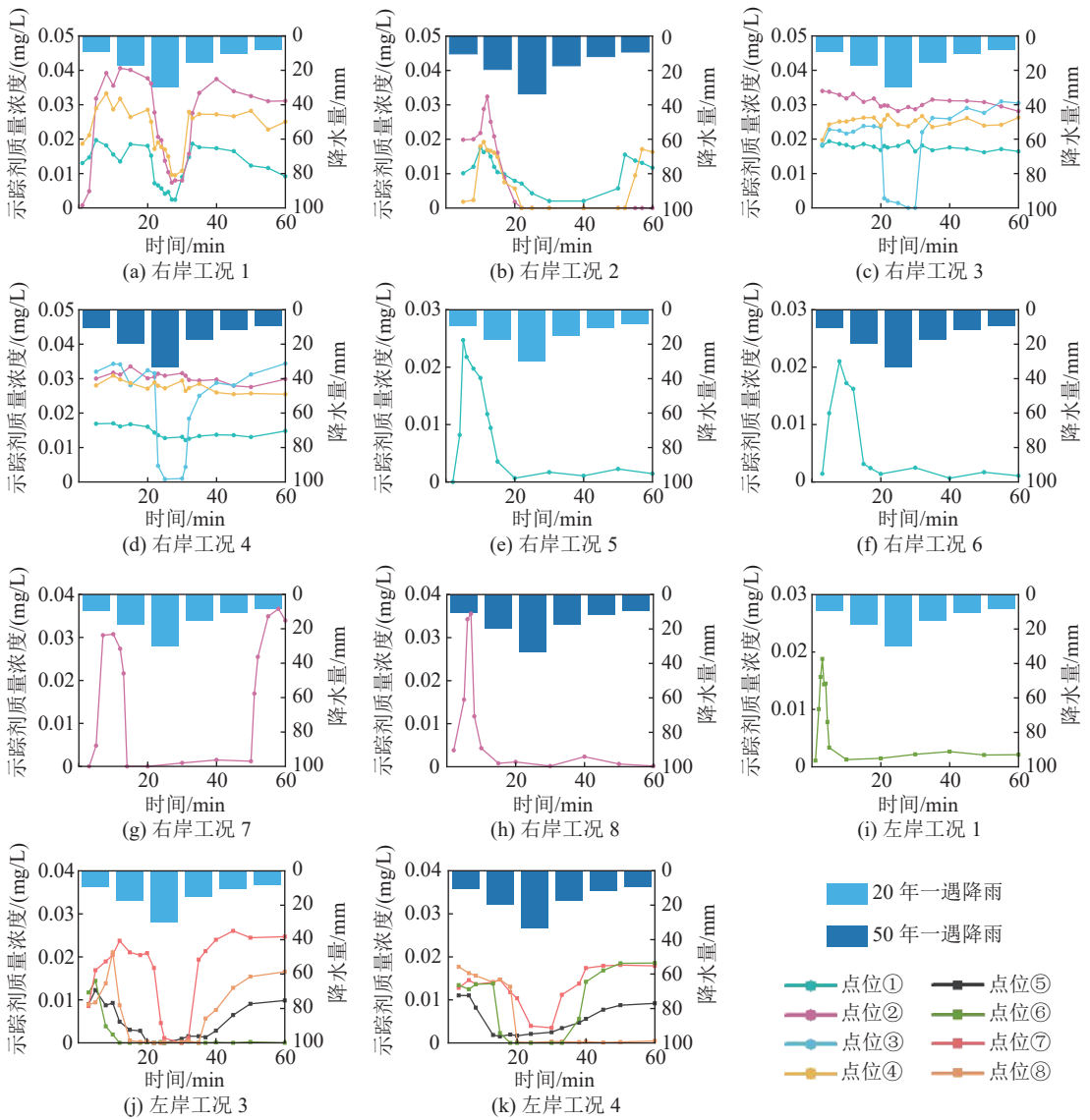


图5 不同雨洪潮组合工况下排水管网中示踪剂质量浓度变化结果

Fig. 5 Tracer concentration changes in pipe network of different compound flooding scenarios

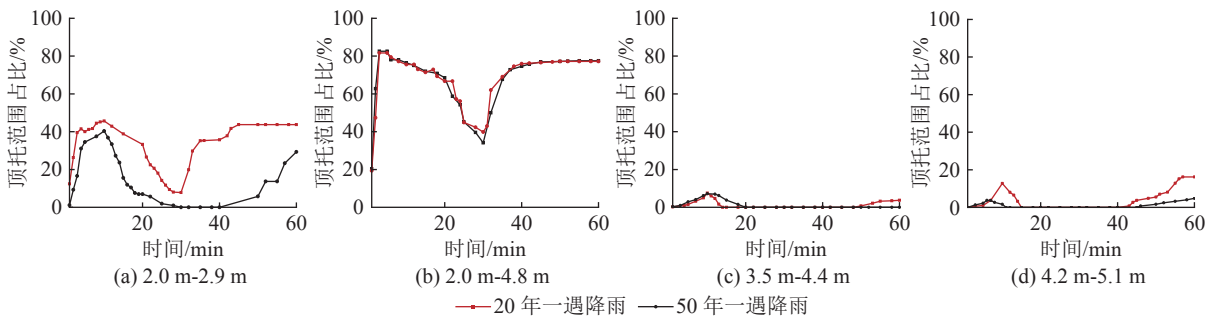


图6 不同潮位-河水位下排水管网顶托范围变化过程

Fig. 6 Range of jacking effect changes in pipe network under different tide level-river level

图7为8种不同工况下排水管网顶托持续时间和最大顶托范围占比,在4.8 m高河道水位的影响下,对

应工况3和工况4, 此时只有河道水位抬高, 潮位边界仍然采用基线条件边界, 因此高河道水位的顶托效应被放大, 排水管网受到洪潮顶托的持续时间最久, 贯穿整个试验时段, 此时管网所受自河道排水口向管网内部延伸的顶托长度最大, 20年一遇降雨条件下顶托长度达14.55 m, 顶托范围占比为82.58%, 50年一遇降雨条件下顶托长度达14.39 m, 顶托范围占比为81.69%。在相同潮位河水位组合下, 降雨强度增加使洪潮顶托持续时间及顶托范围减小。当潮位重现期增加到20 a时, 20年一遇降雨条件下洪潮顶托作用持续时间由60 min减少至23 min, 最大洪潮顶托范围占比下降35.70%, 50年一遇降雨条件下持续时间由50 min减少至8 min, 最大洪潮顶托范围占比下降30.66%。

表2为潮位重现期增加10个地表内涝积水观测点积水深度变化情况, 结果表明潮位重现期增加导致地表内涝积水深度明显增加。20年一遇降雨条件下, 当潮位重现期增加到20 a和50 a时, 平均内涝深度由0.65 cm分别增加到0.74 cm和0.85 cm; 50年一遇降雨条件下, 当潮位重现期增加到20 a和50 a时, 平均内涝深度由0.73 cm分别增加到0.77 cm和0.92 cm。这是由于在高潮位顶托作用下, 与海相邻的管道排水能力降低, 排水管网主要通过河道排水, 而地表内涝积水增加使管网水头增加, 进一步减弱了河道对管网的顶托作用。

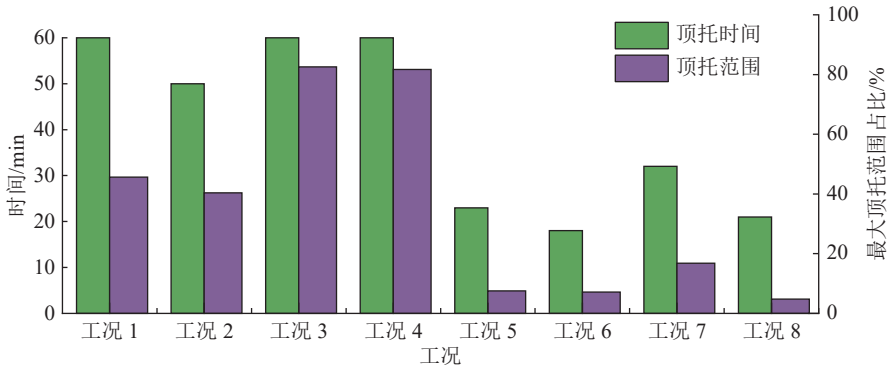


图7 不同工况下排水管网顶托持续时间和最大顶托范围占比

Fig. 7 Max range and duration of jacking effect in pipe network under different scenarios

表2 20年一遇和50年一遇高潮位顶托下地表内涝积水变化情况

Table 2 Changes in surface waterlogging under the jacking effect of 20-year and 50-year high tide levels

单位: cm

积水点	20年一遇降雨			50年一遇降雨		
	基线潮位	20年一遇高潮位	50年一遇高潮位	基线潮位	20年一遇高潮位	50年一遇高潮位
1	0.30	0.25	0.30	0.30	0.30	0.45
2	0.25	0.20	0.25	0.30	0.30	0.40
3	0.25	0.35	0.45	0.45	0.40	0.45
4	0.80	1.20	1.40	0.90	1.10	1.40
5	1.00	1.25	1.50	1.10	1.25	1.50
6	1.50	1.60	1.80	1.60	1.70	1.90
7	1.35	1.45	1.50	1.40	1.50	1.60
8	0.60	0.65	0.80	0.70	0.70	0.90
9	0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25
10	0.20	0.25	0.30	0.25	0.20	0.35
平均	0.65	0.74	0.85	0.73	0.77	0.92

3 结 论

本文以海口市美舍河流域主城区为例,基于复合洪涝物理模型,采用粒子示踪法,探究了雨-洪-潮复合洪灾下城市地下排水管网的洪潮顶托特征。主要结论如下:

(1)排水管网中示踪剂质量浓度变化分析表明,美舍河右岸排水管网所受洪潮顶托作用显著,而左岸因地形地貌、下垫面及边界条件等因素影响,顶托效应较弱。排水管网所受洪潮顶托作用与降雨强度呈相反趋势。

(2)洪潮顶托时间及范围分析显示,潮位重现期增加导致顶托效应出现时间推迟,试验初期推迟约 2 min,第 2 段顶托效应增长推迟约 10 min。当河水位抬升,在 4.8 m 高河水位影响下,洪潮顶托效应增强,管网所受顶托最大长度为 14.55 m,顶托范围占比最大达 82.58%,顶托持续时间贯穿整个试验阶段。潮位重现期增加,顶托持续时间及范围显著降低。

(3)地表内涝积水深度分析表明,潮位重现期增加至 20 a 和 50 a 时,20 年一遇降雨下平均内涝深度分别增加了 0.09 和 0.20 cm,50 年一遇降雨下分别增加了 0.04 和 0.19 cm。高潮位顶托下,地表内涝积水增加导致管网水头上升,减弱了河道对管网的顶托作用。

参考文献:

- [1] EDMONDS D A, CALDWELL R L, BRONDIZIO E S, et al. Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4741.
- [2] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等.中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J].*水科学进展*, 2024, 35(3): 357-373. (SONG X M, XU N T, ZHANG J Y, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese))
- [3] ÇAL İ, CIRAVOĞLU A. Determining vulnerability indicators of buildings for sea-level rise and floods in urban coastal areas[J]. *Sustainability*, 2025, 17(1): 27.
- [4] KARAMOUZ M, ZAHMATKESH Z, GOHARIAN E, et al. Combined impact of inland and coastal floods: mapping knowledge base for development of planning strategies[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2015, 141(8): 04014098.
- [5] HEMMATI M, ELLINGWOOD B R, MAHMOUD H N. The role of urban growth in resilience of communities under flood risk[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(3): e2019EF001382.
- [6] 方佳毅,殷杰,石先武,等.沿海地区复合洪水危险性研究进展[J].*气候变化研究进展*, 2021, 17(3): 317-328. (FANG J Y, YIN J, SHI X W, et al. A review of compound flood hazard research in coastal areas[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(3): 317-328. (in Chinese))
- [7] 席丹墀,钟满妮,任玉盛.超大型城市区域性极端特大暴雨防御经验及对策建议:以深圳龙岗区 2023 年“9·7”极端特大暴雨为例[J].*中国防汛抗旱*, 2024, 34(S1): 22-23. (XI D C, ZHONG M N, REN Y S. Experience and countermeasures of regional extreme rainstorm prevention in megacities: taking the “9.7” extreme rainstorm in Longgang District of Shenzhen in 2023 as an example[J]. *China Flood & Drought Management*, 2024, 34(S1): 22-23. (in Chinese))
- [8] 秦思,姚美,任福民,等.强台风“菲特”(1323)极端降水研究进展[J].*海洋气象学报*, 2021, 41(1): 11-18. (QIN S, YAO M, REN F M, et al. Research progress on extreme precipitation of Typhoon FITOW (2013)[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2021, 41(1): 11-18. (in Chinese))
- [9] WARD P J, COUASON A, EILANDER D, et al. Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(8): 084012.
- [10] 许瀚卿,谭金凯,李梦雅,等.中国沿海地区雨潮复合灾害联合分布及危险性研究[J].*地理科学进展*, 2022, 41(10): 1859-1867. (XU H Q, TAN J K, LI M Y, et al. Joint distribution and risk of the compound disaster caused by rainfall and storm surge across Chinese coastal region[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(10): 1859-1867. (in Chinese))
- [11] 张卡,刘丙军,胡仕焜,等.珠江河口区复合洪水事件多要素非一致性的时变遭遇分析[J].*热带地理*, 2024, 44(1): 143-151. (ZHANG K, LIU B J, HU S K, et al. Multi-element non-coherent time-varying encounter analysis of complex hazards contributing to Pearl River Estuary flooding[J]. *Tropical Geography*, 2024, 44(1): 143-151. (in Chinese))
- [12] PARIARTHA I P G S, AGGARWAL S, RALLAPALLI S, et al. Compounding effects of urbanization, climate change and sea-level rise on monetary projections of flood damage[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129535.

- [13] 孙钦珂, 周亮, 王宝. 气候变化背景下沿海特大城市复合洪水灾害空间模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(12): 2427-2438. (SUN Q K, ZHOU L, WANG B. Spatial simulation of compound flood hazard risk in coastal megacities under climate change[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(12): 2427-2438. (in Chinese))
- [14] 陆灵威, 林斌良, 孙健, 等. 河道溃堤水波的物理模型实验研究[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(11): 25-34. (LU L W, LIN B L, SUN J, et al. An experimental study of propagation of dike-break waves[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(11): 25-34. (in Chinese))
- [15] 张晓雷, 夏军强, 陈倩, 等. 生产堤溃决后漫滩水流的概化模型试验研究[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 100-108. (ZHANG X L, XIA J Q, CHEN Q, et al. Experimental studies on farm dike-break induced overbank floods using a sketched physical model[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 100-108. (in Chinese))
- [16] AL-HAFIDH I A I, CALAMAK M, LAROCQUE L A, et al. Experimental investigation of flood management by an instantaneous levee breach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 148(2): 04021056.
- [17] GÜNEY M S, TAYFUR G, BOMBAR G, et al. Distorted physical model to study sudden partial dam break flows in an urban area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(11): 05014006.
- [18] LAROCQUE L A, ELKHOLY M, CHAUDHRY M H, et al. Experiments on urban flooding caused by a levee breach[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(9): 960-973.
- [19] 刘慧娟, 卫伟, 王金满, 等. 城市典型下垫面产流过程模拟实验[J]. *资源科学*, 2015, 37(11): 2219-2227. (LIU H J, WEI W, WANG J M, et al. Experimental study on typical city underlyings runoff process[J]. *Resources Science*, 2015, 37(11): 2219-2227. (in Chinese))
- [20] 董柏良, 夏军强, 陈瑾晗. 典型街区洪水演进的概化水槽试验研究[J]. *水力发电学报*, 2020, 39(7): 99-108. (DONG B L, XIA J Q, CHEN J H. Experimental investigation of flood inundation over typical urban streets[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(7): 99-108. (in Chinese))
- [21] 徐奎, 庄云超, 马超, 等. 沿海城市复合洪涝模拟物理模型研究[J]. *水利学报*, 2024, 55(11): 1309-1318, 1332. (XU K, ZHUANG Y C, MA C, et al. Physical modeling of compound flooding simulation in coastal cities[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(11): 1309-1318, 1332. (in Chinese))

Experimental research on the jacking effect of compound flooding in a coastal city: case study in the Meishe River basin, Haikou City*

XU Kui^{1,2}, WEN Naxin^{1,2}, ZHUANG Yunchao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The compound flood disasters driven by rainstorm, river flood, high tide level and other factors pose a serious threat to the sustainable development of coastal cities. In order to explore the jacking effect mechanism under multiple disaster causing factors, this study takes the area of Meishe River basin in Haikou City as an example, a compound flooding physical model is constructed, and the particle tracing method is employed to explore the characteristics of jacking effect in urban underground pipe network under different scenarios of rainstorm, river flood and high tide level. The research results indicate that as rainfall increases, the jacking effect on the pipeline network decrease. As the river level increases, the jacking effect increases, and the jacking effect on the pipe network extends from the river drainage outlet to the inside, the maximum length of jacking effect reaches 14.55m, with a maximum range of jacking effect by 82.58%. But as the tide level increases, the duration and range of jacking effect decrease. Under the 20-year return period rainfall, the duration of jacking effect decreases by 37 minutes, and the proportion of maximum jacking effect range decreases by 35.70%; Under the 50-year return period rainfall, the duration of jacking effect decreases by 42 minutes, and the proportion of maximum jacking effect range decreases by 30.66%. The research results can provide scientific basis for flood control and drainage engineering in coastal cities, as well as for the prevention and control of composite disasters.

Key words: compound flooding; physical model; particle tracing; jacking effect

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52379019).