

雨潮错峰组合下城市积涝过程特征模拟分析

刘亚荣¹, 侯精明¹, 张荣斌¹, 黄玉¹, 吴新垒², 韩颖³

(1. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室; 2. 宁波市大数据投资发展有限公司; 3. 渭南市园林绿化处)

摘要:为探究沿海城市雨潮叠加对城市积涝过程的影响,采用 GAST 模型耦合 SWMM 模型模拟了宁波市海曙区的中心城区在不同组合情景下地表积水特征和管网排水过程。结果表明:积水面积峰值最大组合工况为 50 a 重现期、高潮位且降雨峰值较潮位峰值提前的工况,此时积水面积为 11.98 万 km²,是最小面积的 1.2 倍;降雨峰值与潮位峰值叠加工况下积水面积峰值均比错峰工况下小;同一重现期下典型排口 I、II、III 的流量峰值在高潮位下明显高于典型潮位,且 3 个排口的流量峰值均随重现期的增大而增大,其峰现时间也逐渐提前;降雨峰值与潮位峰值叠加对排口流量峰值有显著削减作用,且在 50 a 重现期下削减程度最大。

关键词:雨潮错峰组合;城市积涝;二维水动力模型;边界条件;宁波

Simulation and analysis of urban waterlogging process characteristics under combination of staggered rainfall and tidal peaks//Liu Yarong¹, Hou Jingming¹, Zhang Rongbin¹, Huang Yu¹, Wu Xinlei², Han Ying³(1. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology; 2. Ningbo Big Data Investment & Development Co., Ltd.; 3. Weinan City Landscaping Department)

Abstract: To investigate the influence of rainfall and tide superposition on the process of urban waterlogging in coastal cities, the GPU accelerated surface water flow and transport (GAST) model coupled with the storm water management model (SWMM) was used to simulate the characteristics of urban surface water accumulation and the process of pipe network drainage in the central urban area of Haishu District, Ningbo City, under different combination scenarios. The results indicate that the scenario with the largest peak waterlogging area occurred under a 50-year return period, high tidal level, and rainfall peak preceding the tidal peak, where the peak waterlogging area reached 119 800 km², 1.2 times the minimum area. The peak waterlogging area under overlapping rainfall and tidal peaks was consistently smaller than under staggered peaks. Under the same return period, the peak flow rates at typical outlets I, II, and III were significantly higher during high tidal levels compared to typical tidal levels, and the peak flow rates at all three outlets increased with higher return periods, with their peak occurrence times advancing gradually. The overlapping of rainfall and tidal peaks significantly reduced the peak flow rates at the outlets, with the greatest reduction observed under the 50-year return period scenario.

Key words: combination of staggered rainfall and tidal peak scenario; urban waterlogging; two-dimensional hydrodynamic model; boundary condition; Ningbo City

在全球气候变化和城市化快速发展的影响下,城市内涝、洪水等极端事件日益频发^[1]。例如:2021 年郑州“7·20”暴雨事件造成 292 人遇难,47 人失踪,直接经济损失达 532 亿元^[2];2022 年 2—3 月澳大利亚重大洪灾过程造成 20 人死亡,经济损失高达 20 亿澳元^[3]。我国沿海、滨江城市内涝具有明显的地域特征,容易遭受雨潮、洪潮、风暴潮等复合灾害侵袭。例如:2013 年台风“菲特”期间,上海遭遇了台风、暴雨、高潮位、上游洪水等多种致

灾因子遭遇的复合洪涝灾害^[4];2019 年超强台风“利奇马”期间,上海普降暴雨,导致多条道路严重积水^[5-10]。可见复合洪涝灾害事件极易引发灾害伴生现象与灾害链叠加“放大效应”等现象^[11-13],采用高效高精度的数值模拟对复合洪涝灾害事件进行模拟有助于减少灾害损失。

针对沿海城市“逢雨必涝”、复合灾害链叠加效应,张哲然等^[14]以海流模型 FVCOM 和海浪模型 SWAN 为基础,建立了区域风暴潮-波浪耦合模型,

基金项目:国家自然科学基金项目(52009104);陕西省重点研发计划项目(2023GXLH-042);中德合作交流项目(M-0427)

作者简介:刘亚荣(2001—),女,硕士研究生,主要从事城市水利研究。E-mail:17352152618@163.com

通信作者:侯精明(1982—),男,教授,博士,主要从事地表水及其伴随过程数值模拟研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

对深圳市台风“山竹”期间的风暴潮过程进行了模拟;陆建宇等^[15]以南渡江河口为例分析了以洪水为主、以潮水为主时河口洪潮遭遇情况;张恒珍等^[16]分析了大凌河河口的洪水和潮水组合遭遇情况,确定了大凌河河口地区洪水和潮水遭遇的相关性;孟庆魁等^[17]采用一维水动力模型研究了不同雨潮组合下闽江的顶托作用对福州市河道影响的极限距离以及河道的水位变化;苗小波等^[18]利用雨水管理模型 SWMM 模型模拟了潮汐水位对雨水管网排水能力的影响,得出了潮水顶托会造成管网中下游检查井水位上升、管道充满度增加、流速下降等影响管道排水的结论;隆院男等^[19]采用非一致性 GAMLSS 模型优选了年最大洪峰边缘分布,得出洪水遭遇概率,研究了澧水与松滋河洪水遭遇规律以及洪水与暴雨组合下的最不利工况。可见,学者们大多运用一维、二维水文水动力模型构建城市积涝情景模型,对不同研究区域致灾过程进行模拟,或采用联合概率分布 Copula 函数^[20]分析洪水与潮水的遭遇概率。一维、二维水动力模型虽然计算简便,但无法精确模拟城市积涝过程中地表产汇流与地下管网的水量交互过程,且关于雨水-潮水组合下峰值的错峰效应对城市积涝过程影响的研究较少^[21-24]。

针对以上问题,考虑降雨之后地表产汇流与管网之间的水量交换,本文采用笔者团队自主研发的显卡加速下地表水及其伴随输移过程数值模型(GAST 模型)耦合 SWMM 模型,并在 SWMM 模型中加入设计潮位过程的出流序列边界条件,以宁波市海曙区中心城区为研究对象,构建设计降雨与设计潮水组合且两者峰值交错的多种情景,进行内涝过程计算与模拟,探究雨潮错峰组合下沿海城市积涝过程的特征变化规律,以期相关部门防灾减灾提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

宁波市海曙区东临奉化江,北濒余姚江,西与余姚市接壤,南与奉化区连接,属亚热带季风气候,多年平均降水量为 1 521 mm,多年平均降水天数为 169 天,降水多集中在梅雨期和台风季节,其中 5—9 月降水量约占全年的 65.6%。近年常受台风、洪水、海浪潮等众多灾种侵袭,如 2020 年 9 月,台风“天鹅”引起强降雨,水库泄流时流量急剧增大,致使下游受灾严重;2021 年 7 月,台风“烟花”恰逢天文大潮,风、暴、潮、洪“四碰头”,甬江潮位创历史新高,引发严重城市内涝灾情。本文以海曙区某城区(图 1)为研究对象,依据该地区现有的实测降雨和

潮水资料,对该地区遭遇降雨与潮水两种致灾因子时的内涝形成过程及特征进行模拟分析。

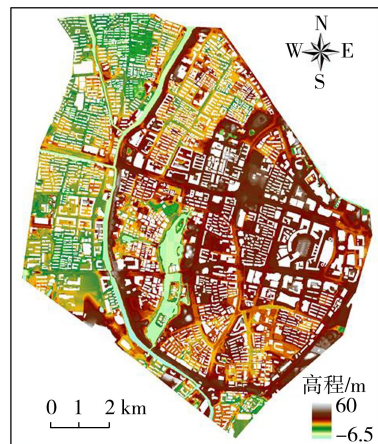


图 1 研究区地形

1.2 数据来源

1.2.1 地形与管网数据

根据无人机激光雷达及倾斜摄影技术扫描得到的高精度地形数据,研究区域整体地势平坦,呈西南略高、东北略低的态势,大部分地区海拔在 4 m 以下。本文采用空间分辨率为 2 m 的 DEM 数据,其精细化网格划分采用最大似然法,将方形网格单元分为绿地、道路、河道以及建筑 4 种不同的土地利用类型,如图 2(a)所示,各类土地利用类型的霍顿下渗率和曼宁系数根据文献[25-29]确定,具体数值见表 1,且已经在模型验证中表明了取值的合理性。根据现场勘测结果以及已有的管网资料构建 SWMM 模型,模型管网系统为海曙区中心城市主干雨水管道,其中雨水管段 943 个,管网井节点 960 个,排口 19 个,管网模型概化如图 2(b)所示。

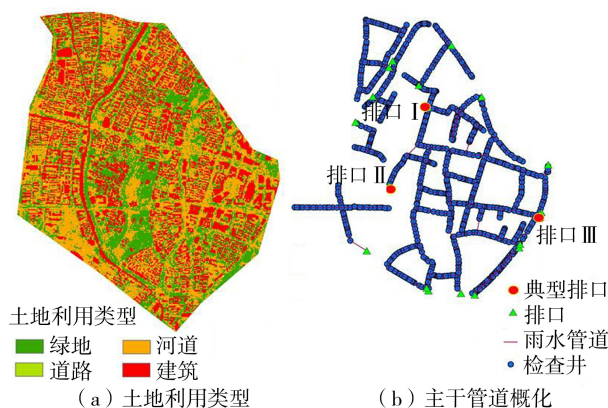


图 2 研究区土地利用类型与管网模型概化

表 1 不同土地利用类型属性

土地利用类型	霍顿下渗率(mm/h)	曼宁系数(m ^{1/3} /s)
绿地	10	0.1210
道路	3	0.0150
河道	0	0.0001
建筑	3	0.0150

1.2.2 降雨数据

采用雨峰系数为 0.3 的单峰雨型设计降雨,利用芝加哥雨型生成器计算得出设计降雨重现期为 5、10、50 a,降雨历时为 2 h 的 3 场设计降雨过程。采用宁波市海曙区实测降雨数据推求得到的暴雨强度公式为:

$$i = \frac{(1 + 0.7678 \lg P) \times 3379.931}{167(t + 13.132)^{0.808}} \quad (1)$$

式中: i 为设计暴雨强度,mm/h; P 为设计重现期,a; t 为降雨历时,min。根据暴雨强度公式计算得出宁波市海曙区各重现期单峰降雨过程线,如图 3 所示。

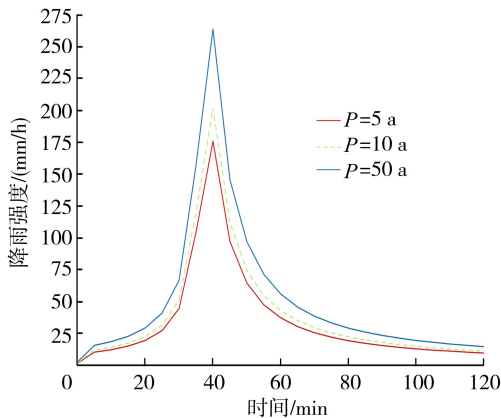


图 3 不同降雨重现期的设计降雨过程

1.2.3 潮位数据

根据海曙区三江口实际情况,其警戒水位为 2.5 m,且近 3 年该地实测最高潮位不超过 4 m,因此拟定高潮工况中最高水位为 3 m。以 2022 年 9 月 11 日 20:00 至次日 6:00 的实测典型潮位(图 4,为体现模型模拟过程,将 9 月 11 日 20:00 记为 0 时刻)为基础,利用设计涨潮潮差来确定设计高潮位时刻前的低潮位,利用设计落潮潮差来确定设计高潮位时刻后的低潮位,即确定设计高潮位以及前后相邻的低潮位后,其余时刻潮位过程线根据各个时刻潮位与低潮位的差值占整个潮差的比例再加设计低潮位来推算设计潮位过程线上各时刻潮位的相应数值,计算得到的设计潮位过程线如图 4 所示。

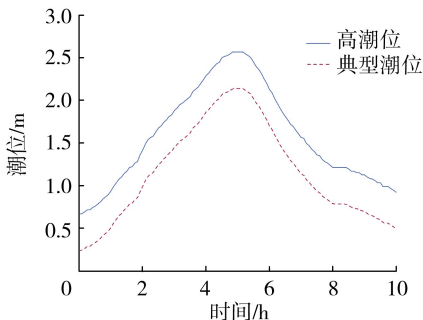


图 4 设计潮位过程线

2 研究方法

2.1 数值模型

2.1.1 控制方程

本文所用 GAST 模型二维水动力模块中地表汇流及演进过程的控制方程为平面二维浅水方程^[30]。浅水方程的应用场景会受到限制,主要应用于只考虑水平方向流速、忽略垂向运动的水流。在 GAST 模型中,浅水方程忽略了动力黏性项、湍流扩散项、风应力和科氏力等^[31-32]。

在求解地表产汇流过程时利用 Godunov 格式有限体积法求解二维浅水方程,采用基于二阶 TVD-MUSCL 格式的插值重构方法提高模型计算精度,通过 HLLC 近似黎曼求解器求解控制单元内界面上的物质与动量通量。其时间迭代采用二步龙格-库塔方法,同时采用 GPU 并行计算技术大幅提升计算速度。GAST 模型精度和计算效率较高,已在城市内涝、堤坝溃决及洪水灾害等领域得到广泛应用,成效显著^[33-34]。

2.1.2 耦合原理

本文模型的耦合机制为城市地表径流二维模型与一维雨水管网 SWMM 模型的水量交互,将计算结果反馈给地表径流二维模型和管网一维模型分别进行通量计算。其中一维管网模型将水量交互计算得到的入流或溢流量通过新增外部函数直接反馈到地表径流二维模型中^[35-37];地表径流二维模型则需要根据入流或溢流量对地表网格的水深进行重新计算。该研究在耦合一维管网水动力模块时将濒临甬江河口的部分排口的出流边界条件设置为潮位过程线,但不考虑未知入流,这样模型在耦合过程中会将管网一维模块中的潮位过程线、雨水管网 SWMM 模型一并与地表径流的二维模块进行耦合计算。

当管网节点水位 Z_{1D} 低于地表地形高程 Z_b ,也低于对应的地表网格水位 Z_{2D} 时,采用堰流公式(式(2))计算地表汇流至管网节点的水量;当 Z_{1D} 高于 Z_b ,但低于对应的 Z_{2D} 时,采用孔流公式(式(3))计算地表应汇流至管网节点的水量;当管道排水能力饱和,系统超负荷运行时,地下管网径流就会从雨水口处(耦合节点)溢流至地表,产生积水,此时耦合节点对应的管网节点水位和地表水位关系只有一种情况,采用孔流公式(式(4))计算管网系统从节点溢流至地表的水量。

$$Q_{2D \rightarrow 1D} = m_1 b \sqrt{2g} (Z_{2D} - Z_b)^{3/2} \quad (2)$$

$$Q_{2D \rightarrow 1D} = m_2 A \sqrt{2g(Z_{2D} - Z_{1D})} \quad (3)$$

$$Q_{1D \rightarrow 2D} = m_2 A \sqrt{2g(Z_{1D} - Z_{2D})} \quad (4)$$

式中: $Q_{2D \rightarrow 1D}$ 为从地表进入管网节点的入流量; m_1 为堰流系数, 取值为 $[0, 1]$; b 为雨水口周长; g 为重力加速度; m_2 为堰流系数, 取值为 $[0, 1]$; A 为雨水口面积; $Q_{1D \rightarrow 2D}$ 为节点溢流量。

2.1.3 模型设置

模型边界条件为开边界, 以降雨条件作为地表二维产汇流模型的主要驱动因素, 以潮位过程线作为一维管网模型中濒临甬江河口处排口的出流条件。当潮位过程线中的水位超过排口高程时, 模型中地表降雨产汇流的水量与一维管网中的水量通过管道、雨水口进行水量交互, 此时地表积水来源于降雨与潮水共同作用; 当潮位序列中的水位低于排口高程时, 地表积水则主要来源于降雨。

2.2 模型验证

将 2022 年 9 月 14 日 10:00—22:00 实测降雨下多个积水监测点的实测水深与模拟水深进行对比, 5 个街道监测点实测水深与模拟水深相对误差均在允许范围之内, 具体对比见表 2。选取其中 2 个监测点, 即大泥沙街道实测水深 34 个时间序列与尚书街实测水深 74 个时间序列, 将其模拟水深与实测水深进行对比, 结果如图 5 所示。计算得到大泥沙街道的纳什效率系数为 0.87, 尚书街的纳什效

表 2 实测最大水深与模拟最大水深

监测点	实测最大水深/m	模拟最大水深/m	相对误差/%
大泥沙街道	0.29	0.26	-10.34
屠园小区	0.54	0.52	-3.70
西北街 46 号	0	0	0
尚书街	0.41	0.45	9.75
广仁街道	0.68	0.78	12.80

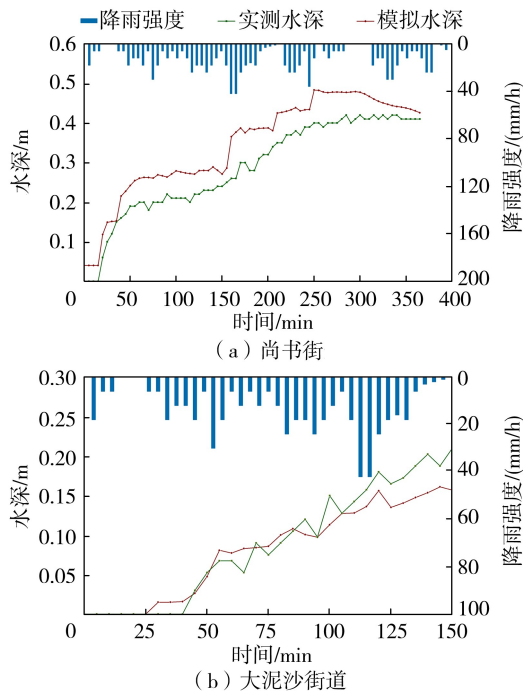


图 5 不同监测点水深验证

率系数为 0.73, 故模型可靠。

3 雨潮组合模拟

3.1 工况组合

以 5、10、50 a 重现期下的 3 场设计降雨分别与高潮位、典型潮位下的 2 场潮水过程进行组合, 并将其峰值进行错峰。为保证降雨之后地表积水有明显的退水过程, 将不同重现期的设计降雨峰值在相较于潮位峰值提前、叠加两种错峰情况下进行组合, 共 12 种模拟工况, 具体工况组合见表 3 和图 6。工况模拟时长为 10 h。

表 3 模拟工况组合

工况	重现期/a	潮位	错峰情况
1-a	5	典型潮位	提前
1-b	5	典型潮位	叠加
2-a	10	典型潮位	提前
2-b	10	典型潮位	叠加
3-a	50	典型潮位	提前
3-b	50	典型潮位	叠加
4-a	5	高潮位	提前
4-b	5	高潮位	叠加
5-a	10	高潮位	提前
5-b	10	高潮位	叠加
6-a	50	高潮位	提前
6-b	50	高潮位	叠加

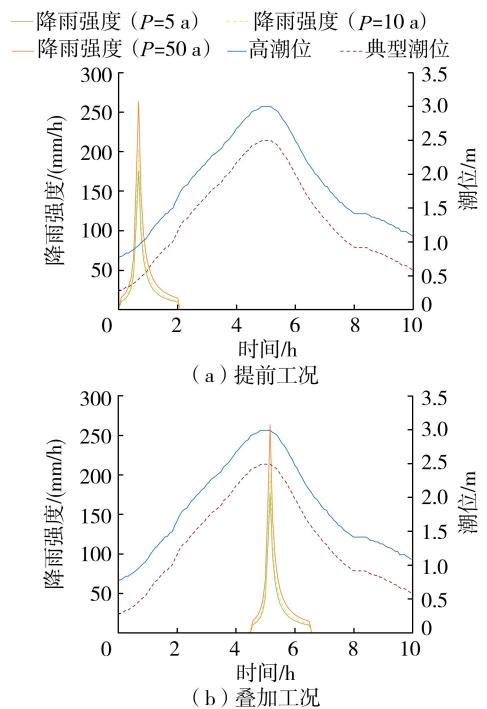


图 6 雨潮错峰组合工况设置

3.2 模拟结果与分析

3.2.1 积水特征

积水过程中的积水面积能够直观反映雨潮组合情景下的积水情况, 表 4 为研究区域在高潮位、典型潮位、雨潮错峰组合下从积水到退水全过程的积水

面积、积水面积峰值(积水水深最大时刻对应的面积)、峰现时间。由表4可知,在同一潮位且同一种雨潮错峰条件下,积水面积随着降雨重现期的增大呈增大趋势;在降雨峰值与潮位峰值叠加时的工况下积水面积均较提前时的工况小。

表4 研究区地表积水特征

工况	积水面积/万 km ²	积水面积峰值/km ²	峰现时间/s
1-a	10.91	1525.44	3300
1-b	6.67	1526.16	19500
2-a	11.26	1627.39	3000
2-b	6.96	1628.27	19200
3-a	11.96	1828.91	2700
3-b	7.53	1829.84	18900
4-a	10.92	1526.27	2400
4-b	6.74	1529.32	18600
5-a	11.27	1628.01	2100
5-b	7.03	1631.19	18300
6-a	11.98	1829.66	1800
6-b	7.61	1832.73	18000

图7为6-a和3-a两种工况下 $t=10800$ s时刻积水面积峰值的地表淹没水深图。因地表降雨进行产流、汇流需要时间,在耦合一维管网模块时,加入了潮水序列的出流边界,故地表水量与地下管网中降雨与潮水相互作用下的水量交换同样需要时间,致使内涝积水峰现时刻总是滞后于降雨峰值出现时刻,不同雨潮组合情景下的积水面积峰现时刻不尽相同。

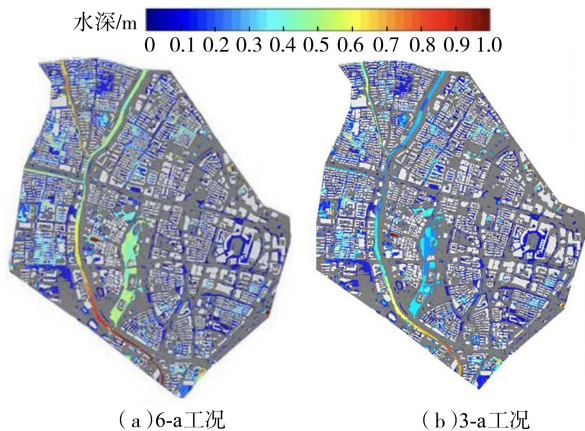


图7 地表积水过程中 $t=10800$ s时刻淹没水深

由表4可知:①在降雨峰值与潮位峰值叠加时的所有工况下,积水面积峰值均大于降雨峰值较潮位峰值提前时所对应的工况,这是因为潮位峰值与降雨峰值叠加时,积水面积具有放大效应且前者降雨模拟时长共10h,后者降雨模拟时长共6h,前者较后者多模拟的4h体现在退水过程中地表积水未完全退去的部分。②6-a工况下积水面积最大,为11.98万km²;1-b工况下最小,为6.67万km²。

同一重现期、同一潮位下,降雨峰值与潮位峰值的相对位置对积水面积峰值的影响较小。降雨峰值

相对于潮位峰值的前后会影积水面积峰现时间,同一潮位同一重现期状况下,降雨峰值与潮位峰值叠加时的峰现时间较错峰情况下均迟滞4.5h,且50a重现期下所有工况的积水面积峰现时间较10a重现期相对应的工况均提前5min,10a重现期下所有工况峰现时间较5a重现期相对应工况均提前5min。

3.2.2 排水特征

图8为管道排水过程中高潮位边界条件下某时刻的管道充满度,能够看出甬江河口附近排口由于设置了潮位边界,附近管道充满度达到1。选取典型排口研究其排水过程特征变化规律,即设置了潮位边界的排口Ⅲ与未设置潮位边界的排口Ⅰ、Ⅱ的排口流量过程线,研究降雨峰值较潮位峰值提前、降雨峰值与潮位峰值叠加时的排水流量过程,结果表明,潮位对区域排水管道的流量影响较大,其中濒临甬江的排口Ⅲ的流量削减过程最为明显。

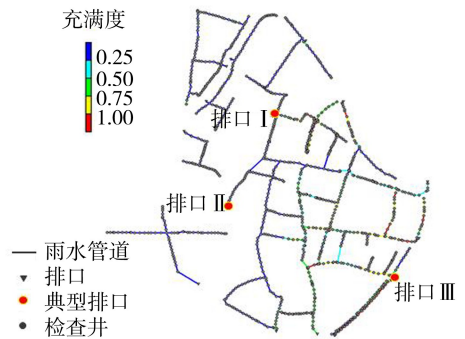


图8 管网排水过程中某时刻管道充满度

图9为排口Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ在降雨峰值较潮位峰值提前时不同重现期和潮位下的排水流量过程线。从同一重现期3个排口的排水流量过程线可得,高潮位下管道流量峰值明显高于典型潮位下,且3个排口的峰值流量均随着重现期的增大明显增大,流量的峰现时间也逐渐提前,5、10、50a重现期下3个排口流量峰值出现的时间在降雨1h45min、1h40min、1h35min。50a重现期下,排口Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ在高潮位下的峰值流量分别为1.44、1.53、2.67m³/s,而在典型潮位下的峰值流量分别为0.81、1.19、1.33m³/s,相较于高潮位分别减少了43.75%、22.20%、50.19%。

图10为高潮位下5、10、50a重现期的雨潮峰值提前、叠加情况下排口Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的流量过程线。由图10可知,降雨峰值与潮位峰值叠加时排口流量明显减少,且3个排口流量峰值削减程度均随重现期的延长而增大。这是由于排口加了潮位边界后,潮水出流造成检查井水位上升,管道充满度增大,管道流速受地表与检查井水量交换、潮位影响发生波动,从而对排口流量造成了不同程度的削减。在设计降雨峰值与潮位峰值叠加时5、10、50a重现期下排口

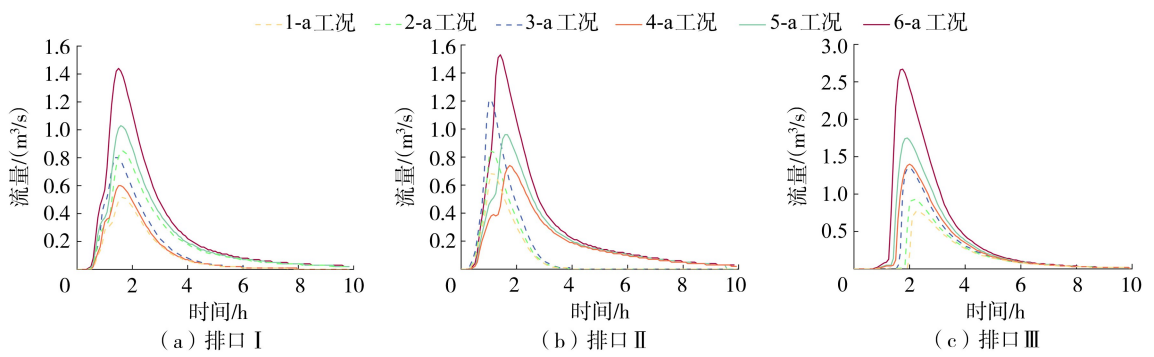


图9 降雨峰值较潮位峰值提前工况下排水流量过程线

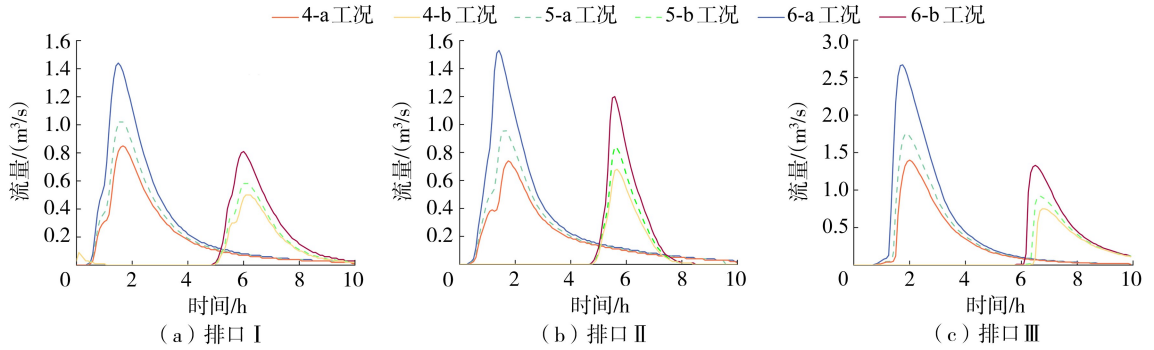


图10 高潮位下各工况排水流量过程线

I 的流量峰值分别比提前时削减了 40%、41.18%、43.75%；排口 II 的流量峰值分别削减了 8.10%、12.50%、24.80%；排口 III 的流量峰值分别削减了 47.42%、47.82%、50%。

4 结论

a. 在相同潮位和雨潮错峰条件下,积水面积随重现期的增大而增大;在 50a 重现期、高潮位且降雨峰值较潮位峰值提前情景下,积水面积最大;同一潮位下降雨峰值与潮位峰值的相对位置对积水面积峰值的影响很小,但会使积水面积峰值的峰现时间有所迟滞,在高潮位与典型潮位下,同一重现期的降雨峰值与潮位峰值叠加较提前情况下相对应的工况均迟滞 4.5 h。

b. 高潮位下所有工况流量峰值均比典型潮位下流量峰值大;同一潮位下,在降雨峰值较潮位峰值提前时,典型排口流量峰值随重现期的增大而增大,峰现时间也逐渐提前,10a 重现期流量峰值较 5a 重现期提前 5 min,50a 重现期流量峰值较 10a 重现期提前 5 min。

c. 降雨峰值与潮位峰值错峰对排口流量峰值有显著削减作用。在高潮位下,在设计降雨峰值与潮位峰值叠加时因典型排口位置不同、潮位过程不同,较提前情况的削减程度也有所差异,且排口 I、II、III 在 50a 重现期下的排水流量峰值削减程度最大,其数值分别为 43.75%、24.8%、50%。

参考文献:

- [1] Li Guoyu, Cao Yu, He Zhichao, et al. Understanding the diversity of urban-rural fringe development in a fast urbanizing region of China[J]. Remote Sensing, 2021, 13 (12): 2373.
- [2] 张书函, 郑凡东, 邸苏闯, 等. 从郑州“2021.7.20”暴雨洪涝思考北京的城市内涝防治[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 5-11. (Zhang Shuhan, Zheng Fandong, Di Suchuang, et al. Thoughts on urban waterlogging control in Beijing from the rainstorm and flood of “2021.7.20” in Zhengzhou[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 5-11. (in Chinese))
- [3] 蓝琳琳, 游志斌. 2022 年 2—3 月澳大利亚重大洪灾过程应对工作分析与评价[J]. 中国减灾, 2022(15): 34-37. (Lan Linlin, You Zhibin. Analysis and evaluation of the response to major floods in Australia from February to March 2022[J]. Disaster Reduction in China, 2022(15): 34-37. (in Chinese))
- [4] 许瀚卿. 沿海城市复合洪涝灾害评估与适应对策研究: 以上海为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [5] 何立富, 陈双, 郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因[J]. 应用气象学报, 2020, 31(5): 513-526. (He Lifu, Chen Shuang, Guo Yunqian. Observation characteristics and synoptic mechanisms of typhoon Lekima extreme rainfall in 2019[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(5): 513-526. (in Chinese))
- [6] 胡艳, 岳彩军, 顾问, 等. 台风“利奇马”(1909)影响期

- 间上海强降水成因诊断分析[J]. 热带气象学报, 2023, 39(6): 883-897. (Hu Yan, Yue Caijun, Gu Wen, et al. Diagnosis of severe precipitation in Shanghai under influence of typhoon Lekima (2019) [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2023, 39(6): 883-897. (in Chinese))
- [7] 孙雅文, 付迪, 王彬, 等. 台风“利奇马”导致的山东降水成因分析[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(3): 17-22. (Sun Yawen, Fu Di, Wang Bin, et al. Analysis of precipitation in Shandong caused by typhoon Lekima [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(3): 17-22. (in Chinese))
- [8] 夏天竹, 卜盛田, 李肖霞, 等. 超强台风利奇马(1909)期间海洋中尺度冷涡特征分析[J]. 天津科技, 2023, 50(增刊1): 99-102. (Xia Tianzhu, Bu Shengtian, Li Xiaoxia, et al. Characteristics analysis of mesoscale oceanic cold eddy during super typhoon Lekima (1909) [J]. Tianjin Science & Technology, 2023, 50(S1): 99-102. (in Chinese))
- [9] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [10] 刘家宏, 梅超, 刘宏伟, 等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展, 2023, 34(2): 172-181. (Liu Jiahong, Mei Chao, Liu Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 172-181. (in Chinese))
- [11] 刘俊勇. 对近年珠三角区域外洪与内涝问题的新思考[J]. 人民珠江, 2014, 35(5): 16-20. (Liu Junyong. New thinking on the problem of external flooding and waterlogging in the Pearl River Delta region in recent years [J]. Pearl River, 2014, 35(5): 16-20. (in Chinese))
- [12] 陆垂裕, 柳炳俊, 孙青言, 等. 淮河中游北岸地区内涝与外洪遭遇分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(1): 19-25. (Lu Chuiyu, Liu Bingjun, Sun Qingyan, et al. Analysis of inner and outer flood encounter in north bank area of the Huaihe River midstream [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(1): 19-25. (in Chinese))
- [13] 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 Hanqing, Tan Jinkai, Li Mengya, 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))
- [14] 张哲然, 胡俊洋, 周凯, 等. 不同类型台风气象场对深圳近海海域风暴潮模拟的比较研究: 以台风“山竹”为例[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(6): 1-14. (Zhang Zheran, Hu Junyang, Zhou Kai, et al. Storm surge simulations of the coastal area of Shenzhen using different types of typhoon meteorological fields: a case study of Typhoon Mangkhut [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(6): 1-14. (in Chinese))
- [15] 陆建宇, 李婕, 杜娟. 南渡江河口段洪潮遭遇分析[J]. 水利水电工程设计, 2023, 42(1): 26-28. (Lu Jianyu, Li Jie, Du Juan. Analysis of flood tide encounters in the estuary section of the Nandu River [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2023, 42(1): 26-28. (in Chinese))
- [16] 张恒珍, 张磊, 刘扬扬. 大凌河入海河口洪潮遭遇分析[J]. 东北水利水电, 2019, 37(4): 41-43. (Zhang Hengzhen, Zhang Lei, Liu Yangyang. Analysis of flood-tide encounter in estuary of Dalinghe River [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2019, 37(4): 41-43. (in Chinese))
- [17] 孟庆魁, 吕浩萍, 张波, 等. 基于一维水动力学模型的福州不同雨潮组合的潮位影响范围分析[C]//中国水利学会. 2022(第十届)中国水利信息化技术论坛论文集. 莆田: 河海大学, 福建省幸福河湖促进会, 福建省水利学会, 2022.
- [18] 苗小波, 吕谋, 梁凤超, 等. 潮水顶托对雨水管网的影响分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(6): 84-87. (Miao Xiaobo, Lyu Mou, Liang Fengchao, et al. Impact analysis of tidal backwater on rainwater pipe network [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(6): 84-87. (in Chinese))
- [19] 隆院男, 黄春福, 莫军成, 等. 非一致性条件下松澧地区洪水遭遇规律分析[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(4): 14-22. (Long Yuannan, Huang Chunfu, Mo Juncheng, et al. Analysis of flood coincidence law in Song-Li Region under non-consistency conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 14-22. (in Chinese))
- [20] 高玉琴, 汪键, 高见, 等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 22-29. (Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))
- [21] Kong Lingzhong, Li Yueqiang, Yuan Saiyu, et al. Research on water level forecasting and hydraulic parameter calibration in the 1D open channel hydrodynamic model using data assimilation [J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 129997.
- [22] Ladwig R, Daw A, Albright E A, et al. Modular

- compositional learning improves 1D hydrodynamic lake model performance by merging process-based modeling with deep learning[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2024, 16(1): e2023MS003953.
- [23] Rana M, Patel D, Vakharia V, et al. UAV-based DEM augmentation using ConSinGAN for efficient flood parameter prediction with machine learning and 1D hydrodynamic models[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2024, 135: 103675.
- [24] 季孔阳, 李学明, 高见, 等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(3): 13-20. (Ji Kongyang, Li Xueming, Gao Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(3): 13-20. (in Chinese))
- [25] 费茉莉, 刘苇航, 王席, 等. 城市暴雨内涝模拟模型优化与精度验证[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(7): 895-900. (Fei Moli, Liu Weihang, Wang Xi, et al. Optimization and verification of a novel hydrodynamic model for urban flood simulation[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(7): 895-900. (in Chinese))
- [26] 叶荣辉, 宋志尧, 吴小明, 等. 浅水方程模拟中确定糙率的回归系数法[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 574-580. (Ye Ronghui, Song Zhiyao, Wu Xiaoming, et al. A regression coefficient method for calibrating Manning's coefficients in shallow water flow modeling[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 574-580. (in Chinese))
- [27] 赖锡军, 姜加虎, 黄群. 应用最优控制理论自动率定二维浅水方程的糙率参数[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 383-388. (Lai Xijun, Jiang Jiahu, Huang Qun. Calibration of Manning roughness coefficients in two-dimensional shallow water flows using optimal control theory[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 383-388. (in Chinese))
- [28] 侯精明, 李桂伊, 李国栋, 等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(2): 96-107. (Hou Jingming, Li Guiyi, Li Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(2): 96-107. (in Chinese))
- [29] 李贵玉. 黄土丘陵区不同土地利用类型下土壤入渗性能对比研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [30] Hou Jingming, Liang Qiu-hua, Simons F, et al. A 2D well-balanced shallow flow model for unstructured grids with novel slope source term treatment[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 52: 107-131.
- [31] Liang Qiu-hua, Marche F. Numerical resolution of well-balanced shallow water equations with complex source terms[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(6): 873-884.
- [32] 侯精明, 马勇勇, 马利平, 等. 无高精度地形资料地区溃坝洪水演进模拟研究: 以金沙江叶巴滩-巴塘段为例[J]. *人民长江*, 2020, 51(1): 64-69. (Hou Jingming, Ma Yongyong, Ma Liping, et al. Simulation of dam break flood evolution for catchments without high-precision topographic data: case of section between Yebatan and Batang on Jinsha River[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(1): 64-69. (in Chinese))
- [33] 梁鑫, 侯精明, 王添, 等. 基于多源数据融合的城市洪涝模拟高精度地形构建方法[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(6): 56-63. (Liang Xin, Hou Jingming, Wang Tian, et al. A method for constructing high-precision terrain for urban flood simulation based on multi-source data fusion[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(6): 56-63. (in Chinese))
- [34] 王小杰, 夏军强, 李启杰, 等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. *水科学进展*, 2024, 35(2): 244-255. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(2): 244-255. (in Chinese))
- [35] 董柏良, 夏军强, 王小杰, 等. 地表径流与地下管流耦合的城市暴雨洪涝动力学模型[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 95-103. (Dong Boliang, Xia Junqiang, Wang Xiaojie, et al. Urban rainstorm flood dynamic model coupled with surface runoff and sewer flow[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 95-103. (in Chinese))
- [36] Luan Guangxue, Hou Jingming, Wang Tian, et al. A 1D-2D dynamic bidirectional coupling model for high-resolution simulation of urban water environments based on GPU acceleration techniques [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428: 139494.
- [37] Li Xinyi, Hou Jingming, Pan Zhanpeng, et al. Response of urban floods to two coupling modes of surface and pipe flow models[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2024, 69(3): 365-376.

(收稿日期: 2024-08-30 编辑: 俞云利)