

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.001

联安围防洪保护区洪水演进模拟分析

张文婷^{1,2}, 刘永志^{2,3}, 张行南^{1,2}, 唐雯雯¹, 宋淑红⁴

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029; 4. 陕西省水文水资源勘测中心, 陕西 西安 710068)

摘要:针对联安围防洪保护区地形多变, 水系复杂的特点, 以水力学方法为理论基础, 构建了一维水流模型与二维非恒定流模型水动力耦合的洪水模拟模型, 综合考虑研究区丘陵地形、不同重现期洪水、防洪系统薄弱堤段等组合情景, 进行基于情景方案的河道溃决洪水演进模拟及风险分析, 模拟不同情景下保护区内的淹没面积、水深、溃口流量过程和洪水演进过程。结果表明, 该模型能综合反映溃堤洪水造成的影响, 可为洪水灾害的预警提供技术支持。

关键词:洪水演进模拟; 河堤溃决; 耦合水动力模型; 联安围防洪保护区

中图分类号:TV12 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)02-0001-06

Flood routing simulation and analysis of Lian'anwei flood protection zone // ZHANG Wenting^{1,2}, LIU Yongzhi^{2,3}, ZHANG Xingnan^{1,2}, TANG Wenwen¹, SONG Shuhong⁴ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Hydrology and Water Resources Survey Center of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China)

Abstract: In view of varied terrains and the complex water system in the Lian'anwei flood protection zone, a hydrodynamic model coupling one-dimensional flow model and two-dimensional unsteady flow model was developed for flood simulation based on hydraulic methods. The model took into account the combined scenarios of hilly terrain, floods with different return periods, and weak dikes of the flood control system in the study area, and was used to simulate the submerged area, water depth, breach flow process, and flood routing process in the flood protection area under different scenarios. The results show that the model can accurately reflect impacts of floods caused by dike breaching and provide technical support for early warning of flood disasters.

Key words: flood routing simulation; dike breaching; coupled hydrodynamic model; Lian'anwei flood protection zone

联安围防洪保护区属于珠江流域西江水系, 位于经济发达的珠三角, 区域人口稠密, 经济发达, 防洪体系逐步完善。区域内水系密集, 动力复杂, 面临西江流域洪水和下游三角洲海口潮汐多重复杂的洪源威胁, 如若叠加台风, 则会加剧流域的综合洪水风险。因此, 建立高效适用的模型, 开展联安围防洪保护区洪水影响模拟和洪灾风险评估, 对保护区域内人员生命财产安全和整体防洪体系的建设具有十分重要的意义。

洪水演进模拟方法是洪水风险分析的基础, 国内外学者在洪水数值模拟方法和模型应用方面开展了深入研究^[1-3]。牛帅等^[4]通过构建一、二维耦合水动力模型实现了万城镇易涝区动态洪水风险分析; 杨莉玲等^[5]通过2套不同尺度的一、二维联解模型进行感潮河网区风暴潮洪水风险分析; 姚斯洋等^[6]采用Mike Flood耦合水动力模型对典型丘陵地貌地区的洪水淹没进行模拟; 魏博文等^[7]基于MIKE系列模型对江西省修河丘陵地区叉网式河流

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1510204); 国家自然科学基金(42175177); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y521002); 中央高校基本科研业务费专项(2019B10714)

作者简介: 张文婷(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事城市水灾害防治和洪水风险研究。E-mail: zwt@hhu.edu.cn

通信作者: 张行南(1960—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域水文模拟研究。E-mail: zxn@hhu.edu.cn

洪水进行数值仿真模拟;刘亚等^[8]建立一、二维耦合数学模型对松滋江堤溃决后洪水演进过程进行模拟;李亚琳等^[9]应用 InfoWorks RS 软件对赣江设计洪水及超标洪水进行溃堤洪水模拟分析。国外很多学者也进行了相关研究^[10-12]。Lee 等^[13]开发了基于栅格的二维淹没模型,直接应用数字高程模型 (DEM) 进行洪水淹没建模,并将此模型应用于韩国光州柏山大堤溃决的模拟;Lee 等^[14]以 2002 年 8 月因暴雨而崩塌的洛东江流域柏山大堤为研究对象,采用四叉树网格的 Gerris 流求解器进行洪水淹没分析;Patel 等^[15]采用 HEC-RAS 一、二维耦合水动力模型对印度 Surat 市的洪水风险进行评估;Azouagh 等^[16]采用 GIS 与 HEC-RAS 集成的方法对摩洛哥北部 Martil 河洪水演进进行建模分析;Beretta 等^[17]建立了二维水动力模型模拟意大利 Olbia 市城市建筑物对洪水演进的影响。

本文以水力学方法为理论基础,建立联安围防洪保护区一、二维耦合的洪水模拟模型,在对当地历史洪水灾害进行归纳提炼的基础上,设置多个洪水情景模拟方案,开展相应方案下洪水演进过程模拟,分析淹没范围、水深、历时等洪水风险特征信息,旨在为该地区洪灾损失评估和避险转移策略的制定提供技术支撑。

1 研究区概况

联安围防洪保护区位于广东省肇庆市高要区,属珠江流域西江水系,总保护面积 179.2 km²,涉及的河流水系主要包括西江干流、宋隆河。西江是珠江流域的主要水系,发源于云南曲靖市境内乌蒙山脉的马雄山,自源头至思贤滘西滘口,长 2 075 km,河道平均比降 0.058%,集雨面积 353 120 km²。西江洪水峰高、量大、历时长、涨落较缓慢,较大的洪水过程多呈双峰型或复峰型。宋隆河属西江的一级支流,发源于高要区罗容山,总集雨面积 410 km²,以蛟塘水为主,全长 52 km,平均比降 0.561%。宋隆河由云路、刘村二水汇合而成。云路水全长 31 km,平均比降 0.079%,总落差 268 m;刘村水全长 21.5 km,平均比降 0.08%,总落差 270 m。区域地形以山地、丘陵为主,地势自西北向东南倾斜,其中宋隆河流域中下游属平原低塿区,两侧大部分地面高程为 4~8 m,其河道两侧属高要区重要的粮食和蔬菜主产区,分布着新兴的工业区。联安围防洪保护区是联金大堤的重要组成部分,西起新兴江汇入西江处下游的沙田坑,沿西江右岸延伸至羚羊峡口的象山岗,堤长约 6 km。工程设计防洪标准为 50 年一遇设计洪水标准。宋隆河属

天然河道,大部分河段无堤防工程,河岸为自然冲刷形成的土质边坡。

2 模型建立

2.1 模型耦合

本文将河网一维水流模型与二维非恒定流模型进行耦合,依据水量及能量守恒原理,对研究区域洪水演进过程进行模拟。

河道非恒定流的水动力学模拟基于圣维南方程,其连续方程和动量方程分别为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f - uq = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为河道流量, m³/s; A 为河道横断面面积, m²; u 为流速, m/s; t 为时间, s; q 为河道的侧向单宽入流流量, m²/s; α 为动量修正系数; g 为重力加速度, m/s²; y 为水位, m; S_f 为摩阻坡降。

二维模型用于模拟二维平面自由表面流,能够模拟复杂水流在无固定路径的洪泛区的演进过程,详细准确地描述洪水淹没的范围、时间、水深、流速分布等风险要素。二维水动力学模型的控制方程包括连续方程(式(3))和动量方程(式(4))。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = S_0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{UV}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} + gh(S_{fx} - J_{ox}) = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{UV}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial y} + gh(S_{fy} - J_{oy}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: h 为水深, m; U 、 V 分别为 x 和 y 方向的单宽流量, m²/s; J_{ox} 、 J_{oy} 分别为 x 和 y 方向底坡坡度; S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向摩阻坡降; S_0 为源项。方程忽略科氏力和紊动项的影响。

洪水演进模拟时,一、二维数学模型在堤防设置的溃口处实现模型耦合。一维河道模型和二维洪泛区模型耦合后,模型系统可以自动识别溃口出流对河道水位的影响,以及河道水位下降反过来对洪泛区分洪量的影响^[18-19],溃口内外水流交互的精确模拟有利于提高模拟精度和可靠性。在干湿界面的处理上,本文应用 Sleight 等^[20]限制水深的方法处理动边界问题。

2.2 模型边界条件和网格概化

研究区域属于珠三角河网片区,珠江流域河网关联密切,水动力特性复杂。考虑到河网水流连通性,从整体建模着手,基于珠江三角洲地区的河网地形资料,构建一致的珠江河网模型用于模拟联安围

防洪保护区的水动力过程。其中模拟河段总长约 2 000 km,断面间距控制在 0.5 ~ 2 km 之间。以西江的高要水文站和北江的石角水位站为一维河网的上游边界控制站,模型边界设置为流量边界;以三角洲入海口各潮位站点(例如甘竹、大熬)水位过程为下游控制边界。一维河网模型边界及各控制站点如图 1 所示。

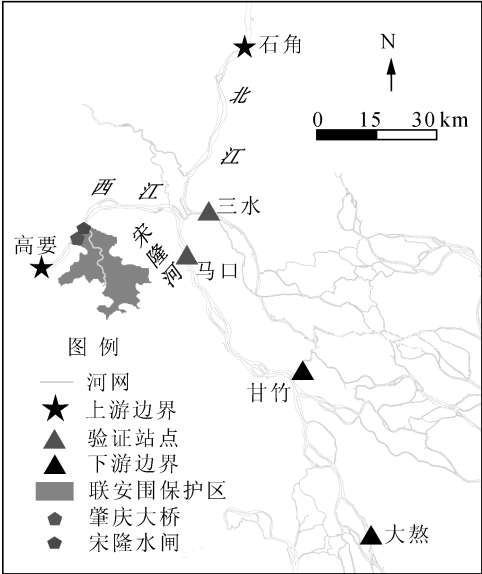
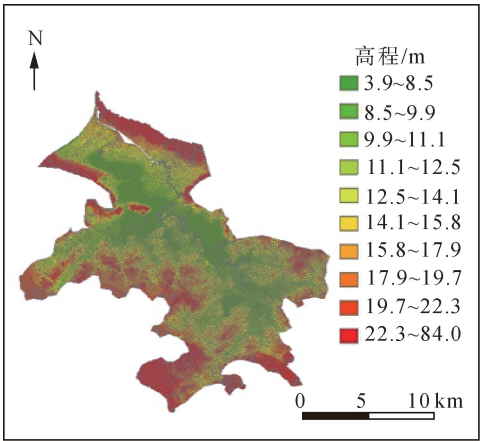


图 1 一维河网模型边界、控制站点位置和保护区范围
Fig. 1 Boundary of one-dimensional river network model, locations of control stations, and range of Lian'anwei flood protection zone

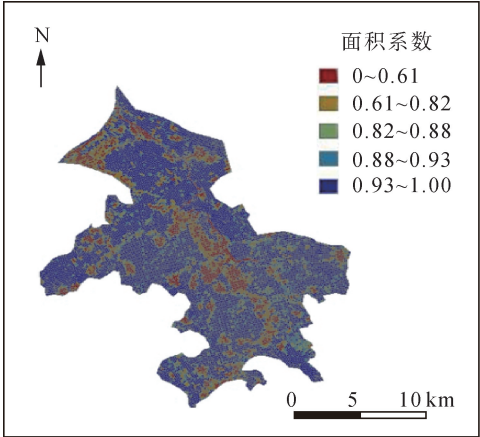
根据研究区面积大小,确定最小网格面积和最小角度;在经济与人口分布密集区以及地形变化较大的部分区域,进行网格加密。下垫面模型剖分出不规则三角网格总数为 18 848,网格平均面积 9 500 m²,网格平均边长 120 m,通过试算能较好地实现模型运算速度与模拟精度的平衡。网格划分过程中考虑重要阻水建筑物的作用,将区域内高于地面的线状地物(公路、铁路路基、堤防等)作为网格划分的控制边界,将保护区内部的河道处理成河道型特殊通道。利用 DEM 和高分辨率遥感图像确定剖分出的网格上相应的属性值,通过试算进行优化调整后,最终确定网格模型的相关设置。研究区网格分布如图 2 所示。

2.3 模型率定及验证

河道底部糙率和陆地洪泛区地表糙率,都是反映水流阻力的灵敏度参数,糙率取值关乎水动力模拟结果的准确性。考虑实际地形及水文资料,选取“8·6”珠江流域洪水对一维水动力数学模型进行率定,通过对一维河道水位值的模拟试算,确定最佳水位拟合条件下河道糙率值为 0.032。珠江三角洲近年来较少发生溃堤事件,较为严重的一次为樵桑



(a) 网格高程分布



(b) 网格面积系数分布

图 2 模型网格分布

Fig. 2 Grid distribution of model

联围荷村水闸溃堤事件。在地理位置、水力条件、经济发展等方面,樵桑联围和联安围具有较高的相似性,因此,本文参考樵桑联围洪水分析资料中的糙率参数赋值,结合联安围防洪保护区下垫面的土地利用分类情况,确定二维模型中不同土地利用类型区域的糙率取值,如表 1 所示,模型网格糙率分布如图 3 所示。

表 1 不同土地利用类型糙率取值

Table 1 Roughness values for different land use types			
土地类型	糙率	土地类型	糙率
村庄	0.070	水田	0.050
树丛	0.065	道路	0.035
旱田	0.060	河道	0.032

2005 年 6 月 17—25 日,珠江流域出现大范围持续性暴雨天气,局部地区出现高强度特大暴雨,西江中下游发生了超 100 年一遇特大洪水,选用该场典型洪水对珠江河网一维数学模型进行验证,选取了联安围防洪保护区附近的马口水文站和西江下游区域的甘竹水文站、大熬水文站进行河道水位验证。从“5·6”洪水水文条件下模型模拟结果与实测数据的比较结果(图 4)来看,模型能较好地模拟出研

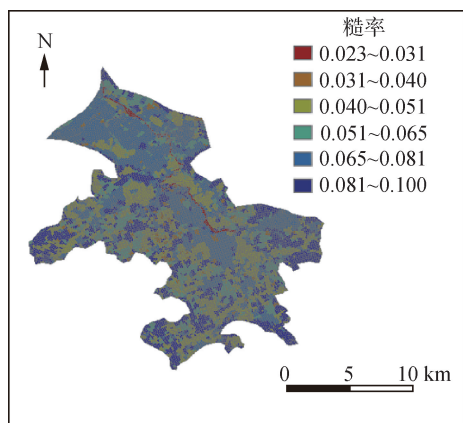


图3 模型网格糙率分布

Fig.3 Roughness distribution on model grid

究区域在洪水及潮汐共同作用下的水动力分布特性。由于研究区域历史上未发生较严重的溃堤事件,无法将二维模型模拟结果与实测资料进行综合对比验证,本文参照《洪水风险图编制技术细则》的要求,从水量平衡、流场分布和不同方案下的洪水风险信息等方面对二维模拟结果进行了合理性分析,结果表明,模型可用于研究区域洪水模拟和风险评估分析研究。

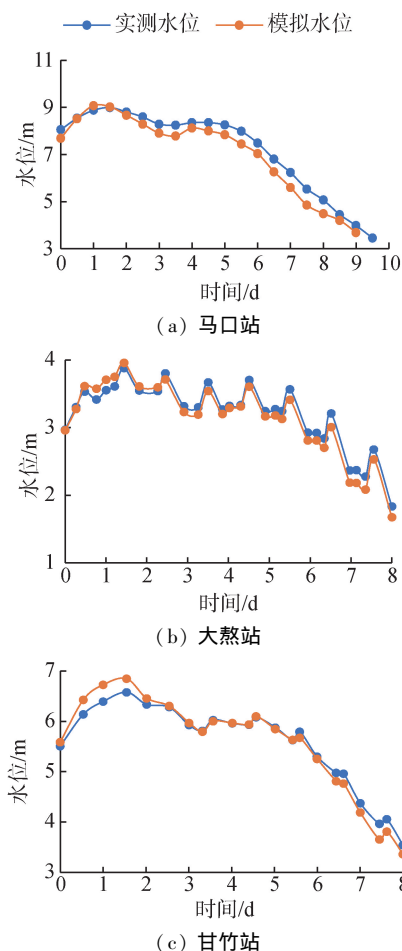


图4 “5·6”洪水条件下各站点实测水位与模拟水位对比
Fig.4 Comparison of measured and simulated water levels at different hydrological stations during “5·6” flood

2.4 多情景溃堤场景模拟方案设置

联安围防洪保护区位于西江中下游右岸,上游西江洪水是联安围最主要的外江洪水来源;超标准西江洪水洪量将导致河道堤岸溃堤甚至漫堤,进而给联安围带来洪灾损失风险。经过现场调研和专家论证,联安围防洪保护区发生洪水漫溢的可能性小于溃堤的可能性。本文针对联安围溃口的设定,结合区域实际情况考虑了“可能”“不利”和“代表性”3个原则,在西江右岸,分别选取西江肇庆大桥险段(溃口宽度设置为170 m)、西江大堤宋隆水闸(升级改造)段(溃口宽度设置为150 m)设置溃口。根据已有资料,联安围西江段防洪标准为50年一遇,故组合时上游洪水量级考虑采用50年、100年和200年一遇,下游考虑遭遇多年平均高潮位,根据边界水文条件和溃口分布,共设置6个计算方案,见表2。

表2 计算方案

Table 2 Calculation schemes

方案	溃口	洪水频率	溃口底部高程/m
1	肇庆大桥险段	50年一遇	8.6
2		100年一遇	8.6
3		200年一遇	8.6
4	宋隆水闸段	50年一遇	5.9
5		100年一遇	5.9
6		200年一遇	5.9

3 结果与分析

3.1 洪水淹没的影响

利用构建的一、二维耦合水力学模型对2个溃口、3种频率洪水组合条件下河道堤防溃决洪水进行模拟,结果如表3所示。

表3 各溃口方案模拟结果

Table 3 Simulated results of different breach schemes

方案	溃口处最大流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大淹没面积/ km^2	最大淹没水深/m	平均淹没水深/m	淹没水量/ 万 m^3
1	351	35.83	7.94	2.57	9816
2	444	49.08	8.49	2.46	12472
3	647	58.04	9.08	2.65	15849
4	214	40.28	8.21	2.23	9373
5	244	46.46	8.62	2.34	11296
6	309	50.16	8.94	2.40	14156

结果显示,所有方案中造成最大淹没范围和淹没水深的情景是200年一遇洪水量级下肇庆大桥段溃口造成的洪水灾情,区域最大淹没面积达到 58.04 km^2 。随着洪水量级的增大,2个溃口方案洪水造成的淹没影响都随之扩张,其中,肇庆大桥段溃口方案造成的洪水淹没面积、淹没水深和淹没水量的增长速度均大于宋隆水闸段溃口模拟结果。

3.2 极端情景下淹没过程分析

根据以上各方案结果的比对,以研究区域最极端洪水情景——肇庆大桥段溃口遭遇西江 200 年一遇洪水(方案 3)为例,对洪水淹没范围及深度进行分析,研究区内最大淹没范围及水深分布见图 5。

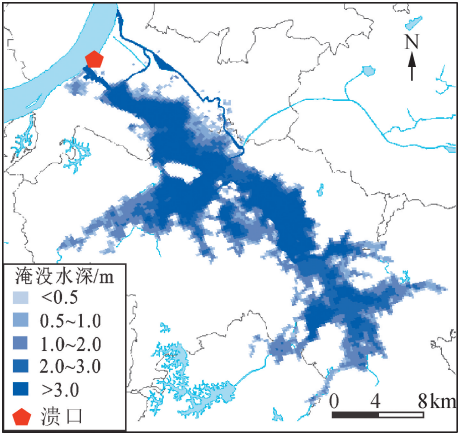


图 5 联安国防洪保护区在方案 3 下的最大淹没水深分布
Fig.5 Submerged depth distribution in Lian'anwei flood protection zone in scheme 3

肇庆大桥段溃口设为瞬时全溃方式,由图 6 可知,在 $t = 38\text{ h}$ 时发生溃决,在溃决初期,溃口流量迅速增大到 $647\text{ m}^3/\text{s}$,此时,防洪保护区内外水位差较大。随着溃决洪水持续进入,外江水位和溃口处围内水位差逐渐减小,溃口流量逐渐减小,在 $t = 148\text{ h}$ 时,外江水位与溃口处围内淹没水位基本持平。随后,保护区内淹没水位高于外江水位,洪水通过溃口回流外江。不同时刻淹没范围如图 7 所示,模拟开始后 24 h ,洪水沿着宋隆河向两岸扩散,淹没面积达 15 km^2 ; 48 h 时,洪水已到达宋隆河中段并淹没了金渡水支流的部分区域,淹没面积达 40 km^2 ; 72 h 时,洪水进一步沿宋隆河向下游扩散,淹没面积达 58 km^2 。

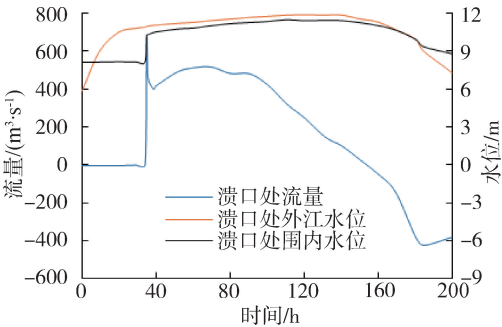
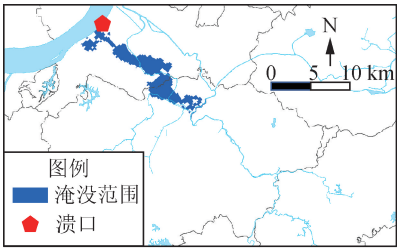
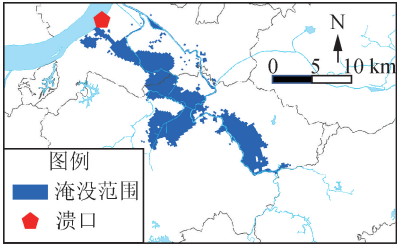


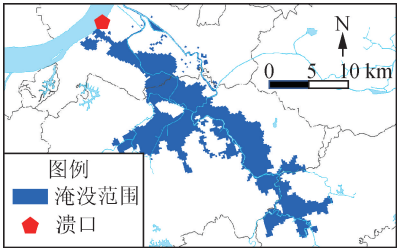
图 6 方案 3 下联安围溃口流量及溃口内外水位变化
Fig.6 Variations of flow and inside and outside water levels at breach of Lian'anwei flood protection zone in scheme 3



(a) 24 h



(b) 48 h



(c) 72 h

图 7 肇庆大桥段溃口不同时刻淹没情况

Fig.7 Flooding situation at different moments after collapse of Zhaoqing Bridge

4 结 语

本文建立了联安国防洪保护区一维河网和二维洪泛区洪水演进耦合模型,利用 2008 年珠江流域洪水资料对模型中的关键参数进行了率定,并以 2005 年历史实测洪水资料对模型准确性进行了验证,模型可有效地模拟珠江河网区域复杂的水力连通和溃堤洪水在保护区内的演进过程。模拟结果显示,尽管目前联安围的堤防经过达标建设达到了 50 年一遇的设计标准,但西江近年来冲刷严重,河道下切,仍需加强堤防的薄弱段、险工险段的巡查,进一步健全防洪系统。同时应定期开展洪水情景模拟,对洪水淹没风险进行预判,为减少社会经济损失和制定合理的避洪转移方案提供科学决策的依据。

参考文献:

[1] 龚政,郭蕴哲,杭俊成,等. 沿海城市溃堤洪水模拟技术研究进展[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):78-85.
(GONG Zheng, GUO Yunzhe, HANG Juncheng, et al. Advances in dike-breaking flood simulation technology in

- coastal cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(3):78-85. (in Chinese))
- [2] 苑希民,薛文宇,冯国娜,等. 溃堤洪水分析的一、二维水力耦合模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):53-58. (YUAN Ximin, XUE Wenyu, FENG Guona, et al. A coupled one-and two-dimensional hydrodynamic model for analysis of levee-breach flood and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2016,36(4):53-58. (in Chinese)).
- [3] 吴滨滨,喻海军,穆杰,等. 考虑下渗的河道与蓄滞洪区洪水演进过程模拟[J]. 水资源保护,2019,35(6):68-75 (WU Binbin, YU Haijun, MU Jie, et al. Flood simulation in river and flood storage-detention area considering infiltration[J]. Water Resources Protection, 2019,35(6):68-75. (in Chinese)).
- [4] 牛帅,崔信民. 村镇易涝区动态洪水风险分析模型研究[J]. 中国农村水利水电,2019(4):80-83. (NIU Shuai, CUI Xinmin. Dynamic flood risk analysis model for waterlogged areas in villages and towns[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(4):80-83. (in Chinese))
- [5] 杨莉玲,杨芳,余顺超,等. 感潮河网区风暴潮洪水风险模拟研究:以中顺大围为例[J]. 人民珠江,2018,39(8):4-8. (YANG Liling, YANG Fang, YU Shunchao, et al. Study on simulation of storm surge flood risk in Tidal River network area: take the Zhongshun protection zone as an example[J]. Pearl River,2018,39(8):4-8. (in Chinese))
- [6] 姚斯洋,刘成林,魏博文,等. 基于 Mike Flood 的组合情景洪水风险分析[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(1):61-69. (YAO Siyang, LIU Chenglin, WEI Bowen, et al. Combined scenario flood risk analysis based on Mike Flood [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17 (1): 61-69. (in Chinese))
- [7] 魏博文,陈良捷,程颖新,等. 基于 Mike Flood 模型的丘陵地区叉网式河流洪水风险分析[J]. 南昌大学学报(工科版),2019,41(1):45-50. (WEI Bowen, CHEN Liangjie, CHENG Yingxin, et al. Flood routing risk analysis of fork network river in hilly region based on mike flood[J]. Journal of Nanchang University(Engineering & Technology),2019,41(1):45-50. (in Chinese))
- [8] 刘亚,姚仕明,朱勇辉,等. 松滋江堤防洪保护区洪水风险研究: I. 模型的建立与验证[J]. 长江科学院院报,2019,36(3):40-45. (LIU Ya, YAO Shiming, ZHU Yonghui, et al. Flood risk of flood protection region enclosed by Songzi Levee in complex river network: I. development and verification of numerical model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019,36(3):40-45. (in Chinese))
- [9] 李亚琳,王小笑. 应用 InfoWorks RS 模拟溃堤洪水[J]. 水资源研究,2017,6(5):443-451. (LI Yalin, WANG Xiaoxiao. Application of InfoWorks RS to simulate dike-break floods [J]. Journal of Water Resources Research, 2017,6(5):443-451. (in Chinese))
- [10] CHEN W, LIU W, WU C. Coupling of a one-dimensional river routing model and a three-dimensional ocean model to predict overbank flows in a complex river-ocean system [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37 (9): 6163-6176.
- [11] WAHL T, JAIN S, BENDER J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities [J]. Nature Climate Change, 2015, 5 (12): 1093-1097.
- [12] WU X, WANG Z, GUO S, et al. Scenario-based projections of future urban inundation within a coupled hydrodynamic model framework: a case study in Dongguan City, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 547: 428-442.
- [13] LEE G, LEE S, JUNG K. Development of a raster-based two-dimensional flood inundation model [J]. Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation, 2010, 10: 155-164.
- [14] LEE D, AN H, LEE G, et al. Applicability evaluation of flood inundation analysis using quadtree grid-based model [J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2013, 46: 655-666.
- [15] PATEL D, RAMIREZ J, SRIVASTAVA P, et al. Assessment of flood inundation mapping of Surat City by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5 [J]. Natural Hazards 2017, 89: 93-130.
- [16] AZOUAGH A, ELBARDAI R, HILAL I, et al. Integration of GIS and HEC-RAS in flood modeling of Martil River (Northern Morocco) [J]. European Scientific Journal, 2018, 14(12): 130-142.
- [17] BERETTA R, RAVAZZANI G, MAIORANO C, et al. Simulating the influence of buildings on flood inundation in urban areas [J]. Geosciences, 2018, 8: 1-11.
- [18] 李传奇,侯贵兵. 一维二维水力模型耦合的城市洪水模拟[J]. 水利水电技术, 2010, 41(3): 83-85. (LI Chuanqi, HOU Guibing. Simulation on urban flood based on coupling of 1D and 2D hydrodynamic models [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41 (3): 83-85. (in Chinese))
- [19] 潘明婕,杨芳,荆立,等. 台风“纳沙”过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制[J]. 水资源保护,2019,35(4):42-48. (PAN Mingjie, YANG Fang, JING Li, et al. Dynamic mechanism of salinity intrusion in Modaomen Waterway during typhoon “Nesat” transit [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 42-48. (in Chinese))
- [20] SLEIGH P A, GASKELL P H. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries [J]. Computers & Fluids, 1998, 27: 479-508.

(收稿日期:2020-07-29 编辑:施业)