

都利亚,王兆礼,祁旭阳,等.基于 TELEMAC-2D 模型的城区水库溃坝洪水数值模拟——以广州市龙洞水库为例[J].地球科学与环境学报,2022,44(5):850-859.

DU Li-ya, WANG Zhao-li, QI Xu-yang, et al. Numerical Simulation of Dam-break Flood in Urban Area Based on TELEMAC-2D Model—A Case Study for Longdong Reservoir in Guangzhou, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(5): 850-859.

DOI:10.19814/j.jese.2021.12027

基于 TELEMAC-2D 模型的城区水库 溃坝洪水数值模拟 ——以广州市龙洞水库为例

都利亚¹,王兆礼^{1,2},祁旭阳¹,赖成光^{1,2,3*}

(1. 华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510641; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,广东 广州 510641; 3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心,广东 广州 510641)

摘要:针对城市水库下游地区地形复杂、建筑物密集的特点,以广州市天河区龙洞水库为例,采用基于不规则网格的 TELEMAC-2D 模型,构建二维溃坝洪水演进模型并开展数值模拟,将模拟结果与 LISFLOOD-FP、WCA-2D 模型的模拟结果进行综合对比。结果表明:当模拟历时大于 15 min 后,TELEMAC-2D 模型模拟的下游淹没区内淹没总水量与溃口流量过程线所计算的累积洪水量基本相等,二者相对误差仅为 0.26%,在 3 种模型中误差最小;3 种模型模拟的洪水演进规律基本一致,且模拟的最大水深空间分布相关性均不小于 0.92,表明模拟结果科学合理;TELEMAC-2D 模型可对建筑物密集区域的地形进行局部网格加密处理,能更精细地表征城区的复杂地形情况,模拟效果较 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型更好。研究结果可为城区水库溃坝洪水数值模拟、溃坝洪水预警预报以及相关防洪减灾等工作提供科学的参考依据。

关键词:溃坝洪水;二维数值模拟;城区水库;TELEMAC-2D 模型;LISFLOOD-FP 模型;WCA-2D 模型;淹没水深

中图分类号:TV122⁺.4

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)05-0850-10

Numerical Simulation of Dam-break Flood in Urban Area Based on TELEMAC-2D Model

—A Case Study for Longdong Reservoir in Guangzhou, China

DU Li-ya¹, WANG Zhao-li^{1,2}, QI Xu-yang¹, LAI Cheng-guang^{1,2,3*}

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Safety and Greenization for Water Conservancy Project, Guangzhou 510641, Guangdong, China)

Abstract: Considering the characteristics of complex terrain and dense buildings in the downstream of urban reservoirs, TELEMAC-2D model, which is a hydrodynamic model based on irregular triangular grid, was adopted to construct a 2D dam-break flood evolution model. Taking

收稿日期:2021-12-15;修回日期:2022-01-26 投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3001002);广东省水利科技创新项目(2020-28)

作者简介:都利亚(1998-),女,河南洛阳人,工学硕士研究生,E-mail: aaduliya@163.com.

* 通讯作者:赖成光(1986-),男,广东肇庆人,华南理工大学教授,理学博士,E-mail: laichg@scut.edu.cn.

Longdong reservoir in Tianhe district of Guangzhou city as a case, the numerical simulation of dam-break flood was conducted, and the simulated results were comprehensively compared with LISFLOOD-FP and WCA-2D models. The results show that when the simulation duration is more than 15 minutes, the inundation volume simulated by TELEMAC-2D model is basically equal to the accumulated outflow of the dam breach based on theoretical computation results, and the relative error is merely 0.26%, which is the smallest among the three models; the flood evolution rule simulated by the three models is basically similar, and the correlation coefficients are not less than 0.92 in the spatial distribution of the simulated maximum water depth, indicating that the simulation results are scientific and reasonable; TELEMAC-2D model can carry out local mesh encryption in built-up areas, considering more details of the complex terrain and showing better performance than LISFLOOD-FP and WCA-2D models. This study can provide reference for numerical simulation, early-warning and prediction, and related work on flood control and disaster reduction of dam-break flood in urban area.

Key words: dam-break flood; 2D numerical simulation; urban reservoir; TELEMAC-2D model; LISFLOOD-FP model; WCA-2D model; inundated depth

0 引言

水库大坝具有防洪、灌溉、发电等功能,对推动社会经济发展起着重要的作用。然而,水库蓄水量一般较大,水库大坝一旦溃决,大量水体下泄会对下游地区造成灾难性破坏^[1-6]。1954~2006年,全国共有3498座水库发生溃坝,其中1954~1990年有3260座,1991~2000年有227座,2001~2006年有35座^[7]。21世纪以来,水库设计、施工以及管理水平不断提高,使得溃坝数量明显减少,但近些年来溃坝事故仍时有发生。此外,在全球变暖背景下,不少地区极端暴雨事件频发,这也增加了水库溃坝的风险^[8]。水库下游地区特别是城市水库下游地区往往聚集了大量人口和财产,一旦发生溃坝事故,其损失难以估计。为了防止水库溃坝事件发生以及减小溃坝后的灾害损失,除了采取工程措施外还可以采取一系列非工程措施,如对溃坝洪水的演进开展数值模拟,并分析洪水演进的时间、水流速度、淹没深度和范围等信息,可为溃坝洪水的预警和应急预案的制定提供科学依据^[9-10]。

由于溃坝洪水演进过程十分复杂,相较于一维模型,二维模型能更详细准确地描述洪水流动特性^[8]。目前广泛用于溃坝洪水演进数值模拟的二维水动力模型有 LISFLOOD-FP、WCA-2D、Info Works、MIKE 系列等平台或软件。Zhao 等考虑了洪水衰减效应,采用 LISFLOOD-FP 改进模型模拟溃坝时洪水在下游的演进过程,并分析了洪水的淹没范围^[11];王欣等通过 MIKE FLOOD 耦合模型模

拟了民治水库在瞬间溃和逐渐溃两种溃决方式下洪水的演进情况^[12];针对城市水库,廖威林等利用 MIKE 21 模拟了溃坝洪水在复杂城市地区的演进及其淹没特征^[13];尹灵芝等基于 GPU 加速技术构建 GPU-CA 溃坝洪水模型,以提高溃坝模拟的计算效率^[14]。借助这些模型有助于分析溃坝洪水的演进特性,为制定应急预案以及防洪减灾提供强有力的工具。

TELEMAC-MASCARET 系统是由法国国家水力学与环境实验室开发的一套适用于模拟河流、河口和海岸二维和三维水动力、泥沙、水质和生态等问题的模型系统^[15],主要基于有限单元或有限体积数值求解。TELEMAC-2D 模型是 TELEMAC-MASCARET 系统的一款二维模块,目前在美国、西欧和加拿大等国家或地区河流模拟中应用较为广泛^[16-18],但在中国的应用相对较少。张琴等基于 TELEMAC-2D 模型建立了台州湾近海潮汐潮流数值模型,并对台州湾浅海滩涂大规模围垦前后的潮汐潮流进行了模拟计算^[19];汤中倩基于 GIS 平台和 TELEMAC-2D 模型模拟了洪水来临时汉江下游干流与洪泛平原的洪水灾害情况^[20];刘家宏等利用 TELEMAC-2D 模型构建厦门岛的城市内涝模型,以探讨不同重现期和不同雨峰系数下内涝积水情况^[21];邵蕊等基于 TELEMAC-2D 模型分析了不同雨涝情景对城市应急响应时间的影响^[22]。上述研究表明:TELEMAC-2D 模型的潮汐模拟和洪涝模拟技术在中国具有较好的适用性。对于溃坝洪水模拟,石莎等首次利用 TELEMAC-2D 模型对浯溪口

水利枢纽开展了二维溃坝数值模拟,取得了良好的成果^[23],表明该模型模拟大范围泛洪区的效果较好。然而,该模型对于具有复杂下垫面的城市地区溃坝洪水的数值模拟是否仍具有良好的适用性,目前还没有相关的研究。

基于此,本文以广州市天河区龙洞水库为例,基于 TELEMAC-2D 模型构建二维溃坝洪水演进数值模型,对溃坝后的洪水演进过程开展数值模拟,探讨洪水在复杂城区的演进特征;此外,模拟结果将分别与基于 LISFLOOD-FP 模型和 WCA-2D 模型的模拟结果进行综合对比,进一步验证 TELEMAC-2D 模型的合理性。研究结果以期为城区水库溃坝洪水演进数值模拟、灾害预警以及防洪减灾等工作提供科学的参考依据。

1 研究区概况

龙洞水库位于广州市天河区东北部,始建于1960年,水库规模为小(一)型。水库集雨面积为6.36 km²,正常蓄水位为64.86 m(珠基高程系统,下同),百年一遇设计洪水位为64.90 m,千年一遇校核洪水位为66.10 m,正常库容为237×10⁴ m³,校核洪水位总库容为250×10⁴ m³。水库大坝坝长164 m,坝顶高程为67 m,防浪墙高0.5 m,最大坝

高为22 m。水库的功能以灌溉为主,兼有供水、防洪等。大坝下游有学校、工业园、居民区、商场等,生命财产集中度较高,若大坝溃决将造成不可估量的损失。根据地形特点和可能淹没的区域,确定研究区域为龙洞水库至下游华南植物园附近,共12.00 km²[图1(a)]。

2 分析方法

2.1 模型计算原理

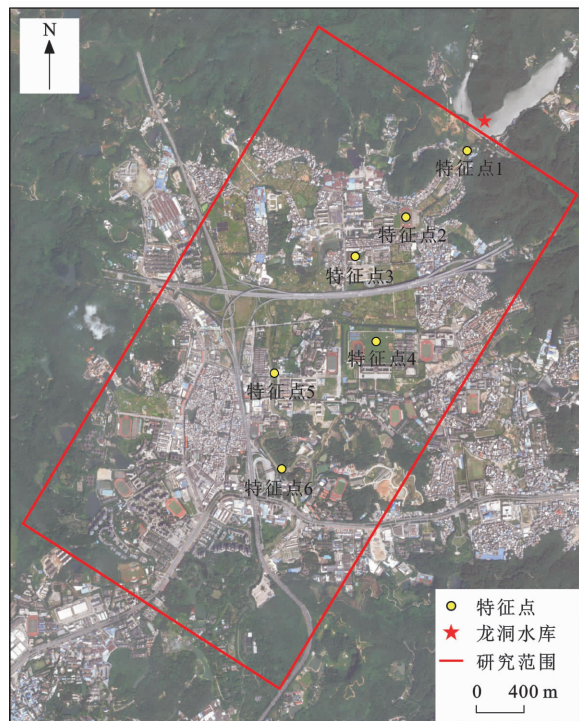
TELEMAC-2D 模型主要通过求解基本方程开展数值模拟。基本方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

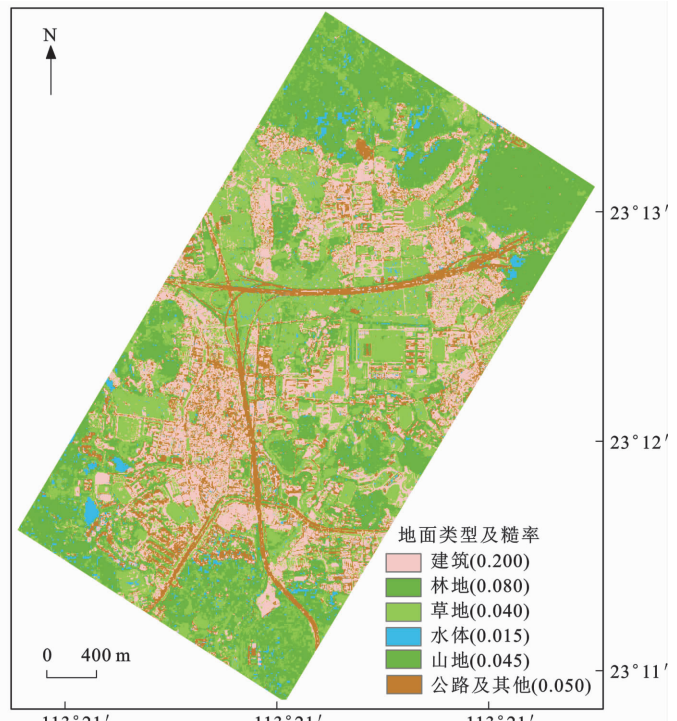
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_e \nabla u) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h} \text{div}(h\nu_e \nabla v) \quad (3)$$

式中: u 、 v 分别是 x 方向和 y 方向的流速; t 是时间; h 是水深; z 是自由水位高程; F_x 和 F_y 分别为 x 方向和 y 方向动力方程的源或汇; ν_e 为有效黏性系数; g 是重力加速度; div 表示散度(Divergence)计算符号; ∇ 是梯度运算符号。



(a) 遥感影像



(b) 糙率分布

图1 广州市龙洞水库周边遥感影像及糙率分布

Fig. 1 Remote Sensing Image and Distribution of Roughness Around Longdong Reservoir of Guangzhou City

TELEMAC-2D 模型提供了有限元方法和有限体积方法。有限体积方法对比有限元方法具有更好的守恒性、更加明确的物理意义以及对复杂区域更强大的适用性等优点。本研究主要采取有限体积方法,它是一种基于“双网格”的顶点中心方法,整个计算域被划分为 n 个与顶点 i 相关联的子区域,被称为控制体积 K_i 。具体来说,通过连接围绕顶点 i 的三角形 T_i 的质心来获得对偶单元。对基于上述定义的控制体积积分后,利用高斯定理得到

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \sum_{j=1}^{m_i} \sigma_{ij} F(\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_j, \mathbf{n}_{ij}) - \sigma_i F(\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_e, \mathbf{n}_i) + \Delta t \mathbf{S}_i \quad (4)$$

式中: \mathbf{U}_i^n 是解在时刻 t^n 的平均空间积分, $t^n = n\Delta t$, Δt 为时间步长; m_i 为单元格中的公共边界数; $\sigma_{ij} = \frac{\Delta t L_{ij}}{|K_i|}$, $\sigma_i = \frac{\Delta t L_i}{|K_i|}$, L_{ij} 为相邻两个节点 i 和 j 的控制单元 (K_i 和 K_j) 之间的公共边界长度,当节点 i 位于网格线上时用 L_i 表示其公共边界长度; $F(\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_j, \mathbf{n}_{ij})$ 和 $F(\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_e, \mathbf{n}_i)$ 是通量 $F(\mathbf{U})$ 的法向向量估计; \mathbf{U}_i 和 \mathbf{U}_j 为节点 i 和 j 处的状态矢量, \mathbf{U}_e 是一种弱施加边界的虚拟状态矢量; \mathbf{n}_{ij} 是垂直于公共边界的向外单元;当 i 位于网格线上时用 \mathbf{n}_i 表示; \mathbf{S}_i 为源项的体积积分平均值。

解在时刻 t^n 的平均空间积分表达式为

$$\mathbf{U}_i^n = \frac{1}{|K_i|} \int_{K_i} \mathbf{U}(\mathbf{x}, t^n) d\mathbf{x} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{U}(\mathbf{x}, t^n)$ 为 \mathbf{x} - t 空间的面向量。

源项的体积积分平均值表达式为

$$\mathbf{S}_i^n = \frac{1}{|K_i|} \frac{1}{\Delta t} \int_{t^n}^{t^n + \Delta t} \int_{K_i} \mathbf{S}(\mathbf{U}_i(\mathbf{x}, t)) d\mathbf{x} dt \quad (6)$$

式中: \mathbf{S}_i^n 是源项在时刻 t^n 的平均空间积分; $\mathbf{U}_i(\mathbf{x}, t)$ 为 \mathbf{x} - t 空间的 \mathbf{U}_i^n ; $\mathbf{S}(\mathbf{U}_i(\mathbf{x}, t))$ 为源项在 \mathbf{x} - t 空间上的体积矢量。

为了进一步验证 TELEMAC-2D 模型的合理性及其模拟精度,分别构建 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 两种二维溃坝洪水演进模型开展综合对比分析。LISFLOOD-FP 模型^[24] 是一种基于局部惯性公式的简化浅水水动力学模型,能够模拟一维河道水力变化和二维蓄洪区水力变化;它以矩形栅格为计算网格(网格的分辨率与输入数字高程模型(DEM)相同),使用有限差分格式求解控制方程,计算效率较高。WCA-2D 模型^[25] 是一种基于权重转换规则的元胞自动机模型;它虽不考虑惯性项和动量守恒,但具备模拟二维水动力过程的能力。

2.2 基于 TELEMAC-2D 模型的洪水演进模型

2.2.1 模型构建及参数选取

假设大坝溃决后,利用 TELEMAC-2D 模型模拟水流从水库下泄到下游城区演进过程。模型构建主要步骤有 3 步,即数据预处理、网格划分、边界条件及计算参数确定。

第一步,数据预处理。利用 ArcGIS 软件对所获得的 DEM 数据、卫星遥感图、土地利用类型数据等进行预处理。其中,DEM 数据来源于广州市国土资源和房屋管理局,分辨率为 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$,能较好地表征水库下游地区复杂的建筑地形。为保证模拟过程中洪水的流动状态符合实际,将 DEM 数据中建筑物所在地点赋予建筑物真实高度值或加高足够大的假定海拔值。当水库溃决时,洪水演进所淹没的城市地区则看作河床。综合考虑下游地区土地利用类型,并参考广州市和珠三角其他地区的相关研究成果^[12,21,25],对不同土地利用类型赋予不同的糙率值。建筑区、公路、水体、草地、林地、山地和其他土地利用类型的糙率分别取值为 0.200、0.050、0.015、0.040、0.080、0.045 和 0.050。根据水库下游地区的糙率信息,利用 ArcGIS 软件制作研究区的糙率场[图 1(b)]。

第二步,网格划分。在对地形数据进行网格划分时,TELEMAC-2D 模型能在 Blue Kenue 软件中将网格处理为非结构化的不规则三角网格,使得所划分的网格能更好地适应边界。为了精细处理局部地形,在建筑物附近区域进行局部加密并生成不规则三角网格;为了优化计算,在建筑物相对较少、坡度变化不大且在同一土地利用类型内的区域生成相对较粗的网格^[24](图 2)。研究区经过划分后共得到 568 704 个节点和 1 094 553 个网格,网格最大分辨率为 8 m,最小为 3 m。LISFLOOD-FP 模型和

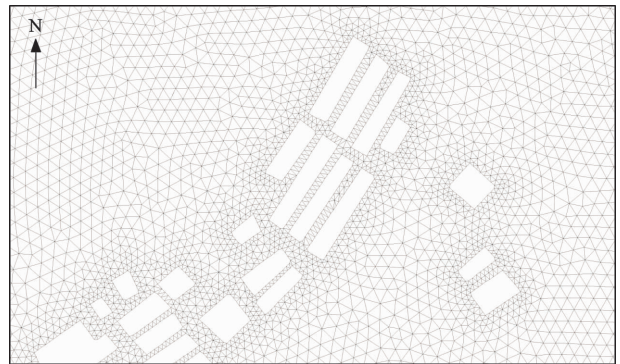


图 2 大坝下游局部区域网格示意图

Fig. 2 Mesh View of Downstream Local Area of the Dam

WCA-2D模型只能将地形数据处理为固定大小的正多边形网格(网格分辨率与输入的DEM数据分辨率一致,为 $8\text{ m}\times 8\text{ m}$),无法对建筑密集区域进行局部加密。

第三步,边界条件及计算参数确定。TELEMAC-2D模型采用关键字定义计算参数、边界条件和初始条件等。在二维仿真模拟时,边界一般包括开放边界和封闭边界两种类型,设置模型的下游边界条件是自由出流,固壁边界采用曼宁准则,初始条件对应关键字取为 INITIAL DEPTH=0,采用变步长,初始步长为0,库朗数为0.75。总计算时长根据溃坝流量过程设定,模拟时长设置为18 000 s,采用有限体积法进行模拟,不考虑下渗作用。

为了保证模拟结果的可比性,LISFLOOD-FP模型和WCA-2D模型的边界条件和主要计算参数值均与TELEMAC-2D模型设置一致。

2.2.2 溃口流量计算

水库大坝溃决是一个极其复杂的物理过程。为了方便计算,本次仅考虑受到极端暴雨后水位迅速上涨(校核水位)导致大坝瞬间全溃的最危险情况。根据文献[13],瞬间全溃的最大流量计算公式为

$$Q_m = \frac{8}{27} \sqrt{g} \left(\frac{B}{b_m} \right)^{0.25} b_m H_0^{1.5} \quad (7)$$

式中: Q_m 、 B 、 b_m 、 H_0 分别表示大坝溃决最大流量、坝长、最终溃口宽度、溃决水深。

假设溃决洪量为已知的水库库容 W ,洪水历时 T_n 待求,则 t 时刻洪水流量(Q)为

$$Q = Q_m \left(\frac{Q_m}{5W} t - 1 \right)^4 \quad (8)$$

当水库发生全溃时,溃口宽度为164 m,水库库容为 $250 \times 10^4 \text{ m}^3$ (校核水位)。根据式(7)计算得到溃口最大流量为 $14\,743 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;根据式(8)得到流量过程线(图3)。由图3可知,约14 min后水库基本被排空。

3 结果分析

3.1 水量平衡验证

由于无溃坝流量实测资料,模型及计算结果的合理性无法直接验证,所以采用水量平衡的方式来间接检验。水量平衡验证是将溃坝后某段时间内由溃口流量过程线累积下泄洪水量与模型模拟计算的下游淹没区内淹没总水量相对比,分析两者误差。由表1可知,对于TELEMAC-2D模型,当历时1 min时相对误差为1.50%,当历时15 min后相对误

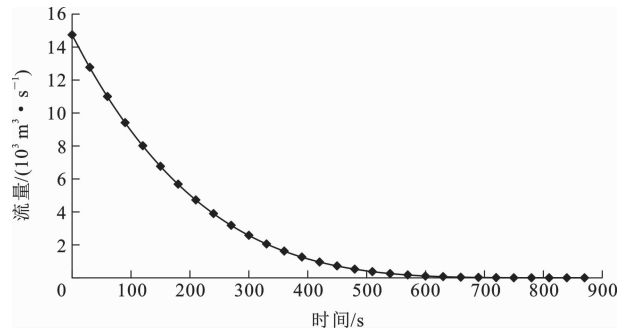


图3 溃口流量过程线

Fig. 3 Discharge Curve of the Dam Breach

差降至0.26%,可认为二者水量基本相等,表明模型模拟结果较为合理。此外,当历时大于5 h时,LISFLOOD-FP模型和WCA-2D模型相对误差分别为1.31%和2.15%,大于TELEMAC-2D模型相对误差,表明TELEMAC-2D模型在水量平衡验证方面表现更优。

表1 下泄水量与淹没水量对比结果

Table 1 Comparative Results of Water Volume Between Drainage and Inundation

模型	历时	下泄水量/ 10^4 m^3	模拟淹没总水量/ 10^4 m^3	相对误差/%
TELEMAC-2D	1 min	78.08	76.90	1.51
	5 min	222.71	221.95	0.34
	10 min	248.74	249.53	0.32
	15 min	250.74	250.08	0.26
	30 min	250.74	250.08	0.26
	1 h	250.74	250.08	0.26
	3 h	250.74	250.08	0.26
	5 h	250.74	250.08	0.26
	>5 h	250.74	250.08	0.26
LISFLOOD-FP	>5 h	250.74	254.03	1.31
WCA-2D	>5 h	250.74	245.35	2.15

3.2 特征点水位及洪水流速

为了分析溃坝后洪水演进规律,按照淹没水深和生命财产聚集情况依次选取了6个典型特征点[图1(a)]来分析水深及洪水流速变化情况。6个特征点按照离溃口由近到远分别是:特征点1(广州大学矿泉水厂)、特征点2(广东工程职业技术学院)、特征点3(渔沙坦小学)、特征点4(广东金融学院)、特征点5(广东食品药业公司学生公寓)、特征点6(广东树木公园)。各特征点水深及洪水流速变化如图4所示。

由图1(a)和图4可知:基于TELEMAC-2D模型模拟的下泄洪水符合溃坝水流演进规律,特征点距离溃口越近其淹没水位上涨速度越快,洪水流速

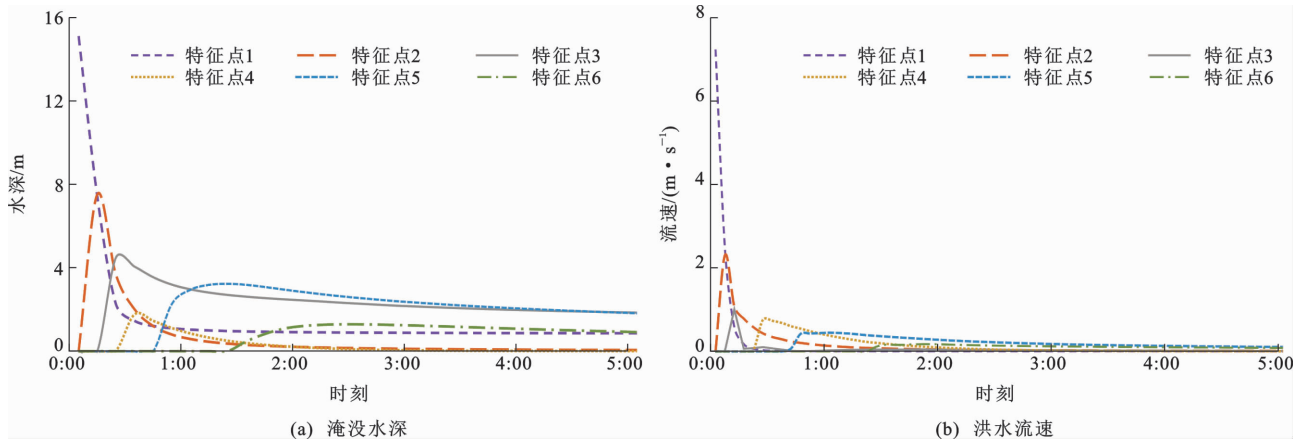


图 4 特征点的水深及流速变化

Fig. 4 Changes of Water Depth and Velocity at the Representative Points

越大;当各特征点水位上升到最高水位后开始回落,距离大坝溃口近的回落速度更快;随着时间的推移,各特征点的洪水回落并趋于稳定状态。各特征点的洪水流速与水位变化特征相似,而随着洪水向下游演进,沿程各特征点的洪水最大流速逐渐下降。

3.3 淹没范围与水深

溃坝后洪水的最大淹没水深是反映受灾区域受损严重程度的关键指标之一^[13]。TELEMAC-2D、LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型模拟的最大淹没水深和淹没范围如图 5 所示;利用 ArcGIS 软件对 3 种模型模拟的最大淹没水深空间分布进行相关性分析,结果见表 2。结果表明,TELEMAC-2D 模型模拟的最大淹没水深空间分布特征与 LISFLOOD-FP

表 2 3 种模型模拟的最大淹没水深分布空间相关性

Table 2 Spatial Correlation of Maximum Submerged Water Depth Simulated by Three Models

模型	TELEMAC-2D	LISFLOOD-FP	WCA-2D
TELEMAC-2D	1.00		
LISFLOOD-FP	0.92	1.00	
WCA-2D	0.92	0.98	1.00

和 WCA-2D 模型的相关系数均为 0.92。3 种模型模拟的最大淹没水深分布特征和淹没范围总体相似,局部地区的最大淹没水深略有差异。由图 5 可知:距离大坝越近的区域最大淹没水深越大,地势较低处的淹没情况比地势高的更严重;受城区内建筑物阻挡影响,溃坝洪水壅高后导致建筑物间隙或局

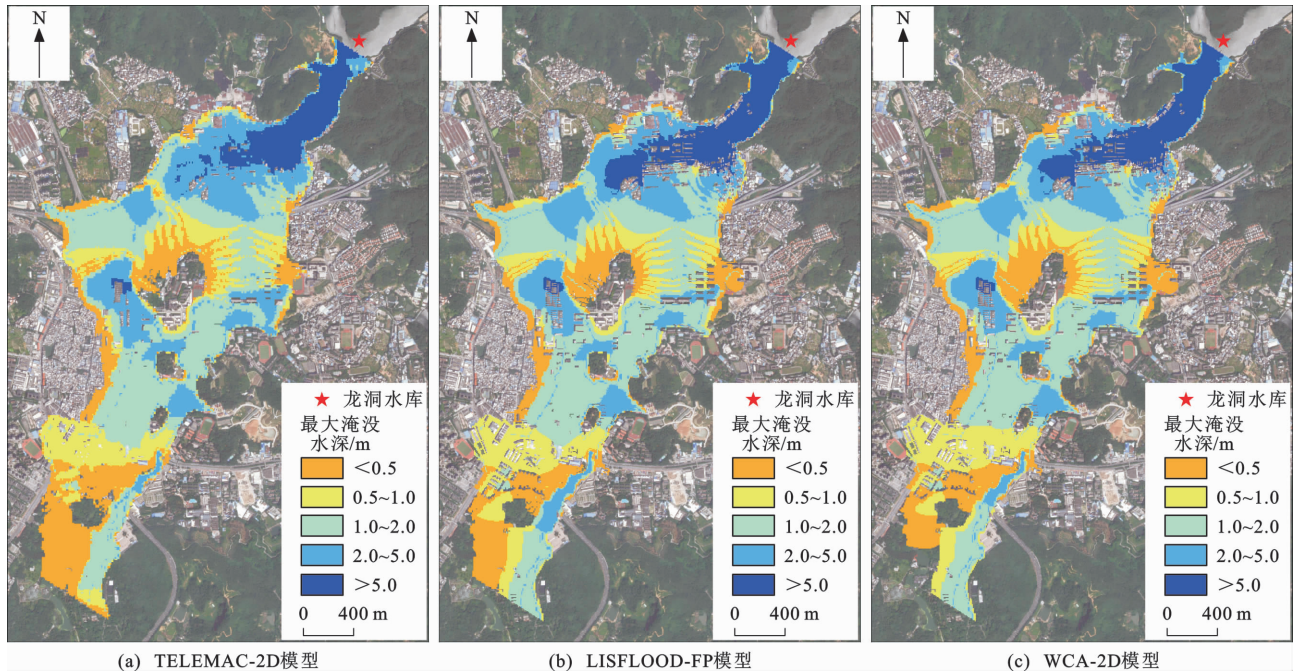


图 5 3 种模型模拟的最大淹没水深及淹没范围

Fig. 5 Maximum Inundation Depth and Range Simulated by Three Models

部街道区域的最大淹没水深比非建筑区域更高,如位于建筑物较为密集的特征点 3、4、5 附近的最大淹没水深明显高于附近建筑物较稀疏的区域。

根据 3 种模型模拟的最大淹没水深分布结果可知(表 3):TELEMAC-2D、LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型所模拟的被淹没区域总面积分别为 3.75、3.74 和 3.73 km²;最大淹没水深超过 5 m 的受灾区主要位于大坝溃口至渔沙坦小学之间;最大淹没水深超过 1 m 的受灾区范围超过 2.49 km²,占总淹没面积的 66%以上,这些区域主要分布在大坝溃口至广东树木公园附近之间;淹没水深为 1~2 m 的面积占比最大,3 种模型模拟的比例均超过了 30%。根据《城市防洪应急预案编制导则》(SL 754—2017)^[26]可知,当洪水深度大于 1.1 m 或当流速大于 2.6 m·s⁻¹时,其具有较强破坏力,可能会对建筑物产生破坏,并对群众生命安全造成威胁。因此,结合图 4 和图 5 可知,水库大坝溃口至广东树木公园之间的区域以及华南植物园部分区域洪水淹没深度较深,群众生命财产安全将会受到威胁;水库大坝溃口至广东工程职业技术学院之间的区域,不仅淹没水深大,洪水流速也迅猛,建筑物可能会遭到严重破坏,生命财产遭受严重威胁,是溃坝洪水袭击的重灾区。

表 3 3 种模型模拟的淹没面积及占比

Table 3 Inundated Depth and Ratio Simulated by Three Models

淹没水深/m	TELEMAC-2D 模型		LISFLOOD-FP 模型		WCA-2D 模型	
	淹没面积/km ²	淹没占比/%	淹没面积/km ²	淹没占比/%	淹没面积/km ²	淹没占比/%
<0.5	0.63	16.80	0.51	13.70	0.59	15.82
0.5~1	0.63	16.80	0.74	19.72	0.65	17.42
1~2	1.27	33.87	1.39	37.22	1.36	36.46
2~5	0.84	22.40	0.68	18.19	0.74	19.84
>5	0.38	10.13	0.42	11.17	0.39	10.46

注:TELEMAC-2D 模型模拟的淹没面积为 3.75 km²;LISFLOOD-FP 模型模拟的淹没面积为 3.74 km²;WCA-2D 模型模拟的淹没面积为 3.73 km²。

3.4 最大淹没水深差异性

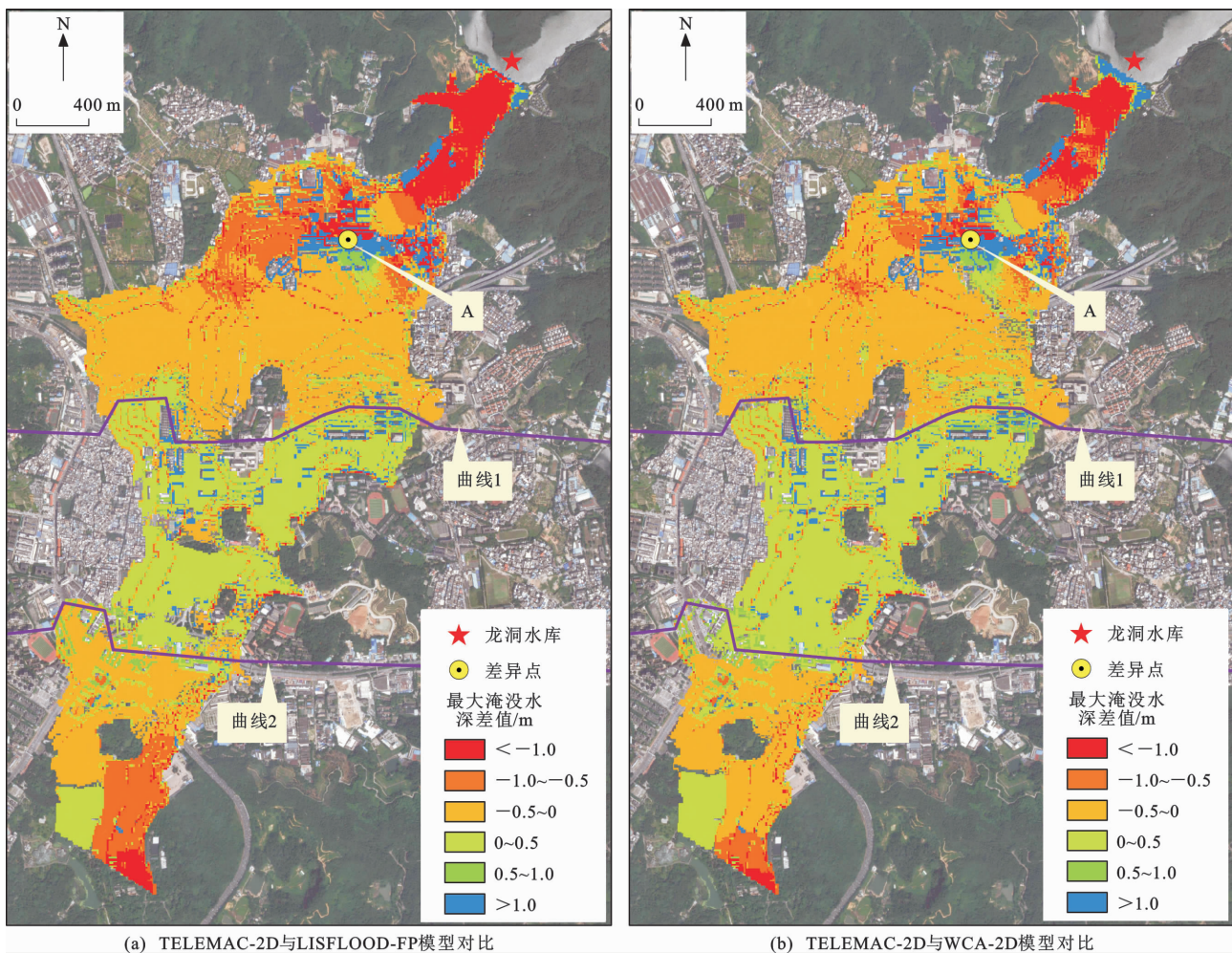
为了进一步分析模型模拟结果的差异,将 TELEMAC-2D 模型模拟的最大淹没水深空间分布结果与 LISFLOOD-FP、WCA-2D 模型的模拟结果进行差异性分析,结果如图 6 所示。由图 6 可知,TELEMAC-2D 模型的模拟水深与 LISFLOOD-FP、WCA-2D 模型的模拟水深存在一定差异。在大

坝溃口至曲线 1 之间以及在曲线 2 下游东部的受淹区,TELEMAC-2D 模型模拟的最大淹没水深比 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型小;而在曲线 1 至曲线 2 之间以及在曲线 2 下游西南部的受淹区,TELEMAC-2D 模型模拟的最大淹没水深比 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型大。从局部来看,在建筑物密集区域,TELEMAC-2D 模型模拟的最大淹没水深普遍比 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型大,而在建筑物相对稀疏区域,TELEMAC-2D 模型模拟的最大淹没水深普遍比另两种模型小。造成上述差异的原因是 3 种模型在地形处理时网格的划分有所不同。LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型只能生成与输入 DEM 分辨率一样的正多边形网格,在建筑物间距较小(通过测量图中部分地区建筑物间隙小于 8 m)且密集的区域,无法生成较为精细或小于 8 m 分辨率的网格,因此,在模拟时水流不能通过这些建筑间隙。这导致本该通过建筑物流向下游的部分水流改变方向而向着地形较为开阔的区域流去,使得在建筑物较密集区域模拟的最大淹没水深较小,而在建筑物稀疏区域水深较大,且流向下流的洪水相对较多。TELEMAC-2D 模型可将地形处理为不规则的三角网格,能够很好地适应各边界,还能在建筑物密集区域附近局部加密,处理的地形更为平滑,水流在这些区域能够较为顺利的演进,而在其他区域可以生成相对较粗的网格以优化计算。

例如,图 6 中 A 区域附近,因 3 种模型处理地形方式的不同,导致在该区域的最大淹没水深有较大差异。图 7(a)为 A 区域原始建筑物布局与形态,TELEMAC-2D 模型在划分网格后能基本保持该区域建筑物及其周围地形的原始形态与布局[图 7(b)],且在建筑物间隙较小的区域也能生成精细的不规则三角网格,确保水流能流经建筑物间隙区域。而 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型只能生成 8 m×8 m 的正方形网格,在 A 区域生成的地形网格与原始的形态及布局存在较大差异[图 7(c)、(d)],使得众多本不相连的建筑物连接在一起,从而造成模拟不够精准。因此,在建筑物密集且地形复杂的城镇区域,基于 TELEMAC-2D 模型建立的城区溃坝模型理论上更符合溃坝洪水的演进情况,模拟精度更高。

4 结 语

本文基于 TELEMAC-2D 模型构建了广州市天河区龙洞水库下游地区的二维溃坝洪水演进模型,



最大淹没水深差值是指两种模型模拟的最大淹没水深之差

图 6 3 种模型模拟的淹没水深差值图

Fig. 6 Differences of Inundated Depth Simulated by Three Models

对溃坝洪水开展数值模拟并分析了下泄洪水在具有复杂地形的城区演进特征,同时与基于 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型模拟结果进行综合对比,验证 TELEMAC-2D 模型的合理性及模拟精度。

(1) 当模拟历时大于 15 min 后,溃口下泄洪水量与 TELEMAC-2D 模型模拟的淹没总水量基本达到平衡,二者的相对误差仅为 0.26%,在 3 种模型中误差最小。

(2) TELEMAC-2D 模型与 LISFLOOD-FP、WCA-2D 模型模拟的洪水空间分布特征基本相似,空间分布相关性均为 0.92。

(3) TELEMAC-2D 模型可对建筑物密集区域网格加密,对城区复杂地形的表征效果更精细,模拟结果较 LISFLOOD-FP 和 WCA-2D 模型更合理,在具有复杂下垫面的城市地区溃坝洪水数值模拟的应用中展现出良好的适用性,模拟精度和效果均取得令人满意的效果。因此,TELEMAC-2D 模型可为

溃坝洪水数值模拟、溃坝洪水预警预报以及相关防洪减灾等工作提供有力支持。

参考文献:

References:

- [1] PILOTTI M, MARANZONI A, TOMIROTTI M, et al. 1923 Gleno Dam Break: Case Study and Numerical Modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(4): 480-492.
- [2] XIE Z H, STOESSER T, XIA J Q. Simulation of Three-dimensional Free-surface Dam-break Flows over a Cuboid, Cylinder, and Sphere[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 147(9): 06021009.
- [3] PALU M C, JULIEN P Y. Test and Improvement of 1D Routing Algorithms for Dam-break Floods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(6): 04020043.
- [4] MARANGOZ H O, ANILAN T. Two-dimensional Modeling of Flood Wave Propagation in Residential

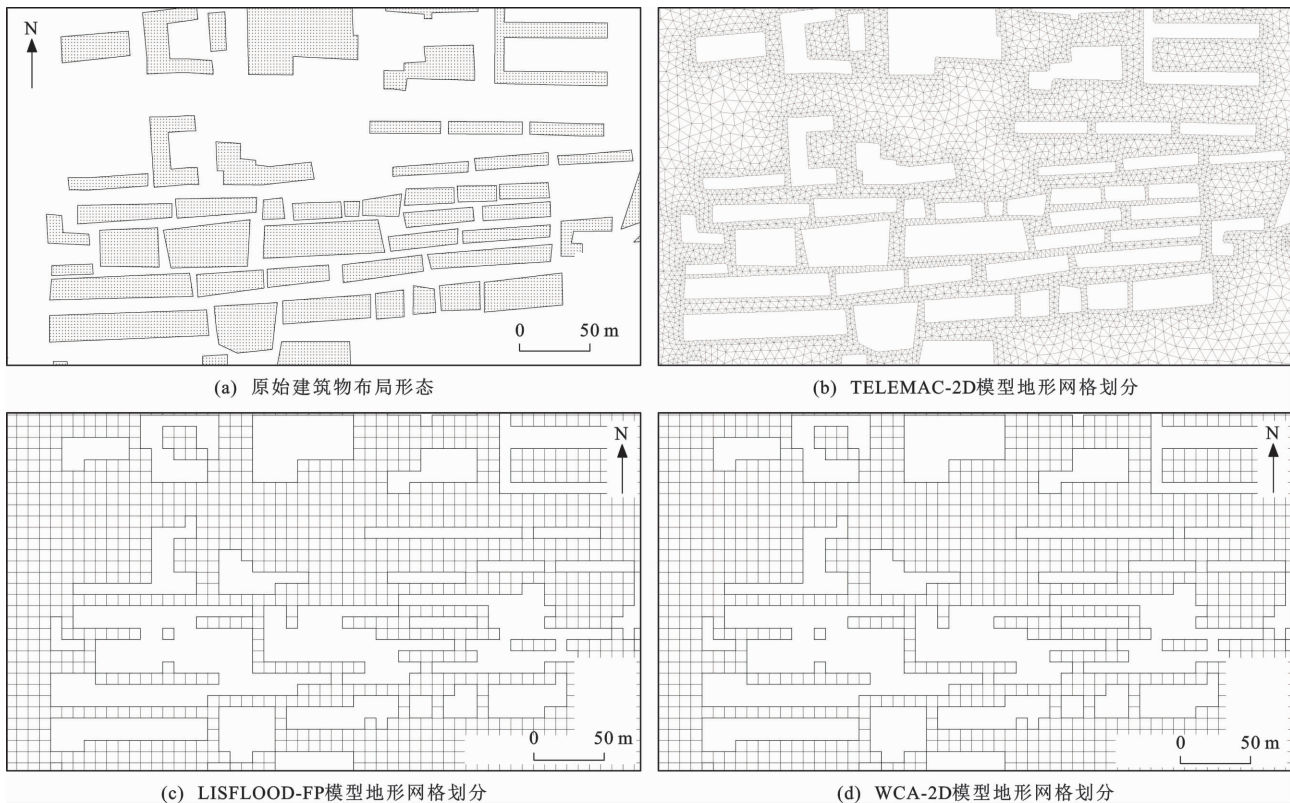


图7 A区域原始建筑物布局形态及3种模型地形网格划分

Fig. 7 Distribution of Original Building Around Region A and Terrain Grid Partition by Three Models

Areas After a Dam Break with Application of Diffusive and Dynamic Wave Approaches[J]. *Natural Hazards*, 2022, 110: 429-449.

[5] 张士辰, 王晓航, 厉丹丹, 等. 溃坝应急撤离研究与实践综述[J]. *水科学进展*, 2017, 28(1): 140-148.

ZHANG Shi-chen, WANG Xiao-hang, LI Dan-dan, et al. Overview on Research and Practice of Dam Failure Emergency Evacuation[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(1): 140-148.

[6] HUANG D J, YU Z B, LI Y P, et al. Calculation Method and Application of Loss of Life Caused by Dam Break in China[J]. *Natural Hazards*, 2017, 85: 39-57.

[7] 解家毕, 孙东亚. 全国水库溃坝统计及溃坝原因分析[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(12): 124-128.

XIE Jia-bi, SUN Dong-ya. Statistics of Dam Failures in China and Analysis on Failure Causations [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(12): 124-128.

[8] 张玉蓉, 侯精明, 荆海晓, 等. 基于GPU技术的溃坝洪水过程高效高分辨率数值模拟研究[J]. *水资源保护*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210910.1421.004.html>.

ZHANG Yu-rong, HOU Jing-ming, JING Hai-xiao, et al. Research on High-efficiency and High-resolution Numerical Simulation of Dam-break Flood Pro-

cess Based on GPU[J]. *Water Resources Protection*, 2021, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20210910.1421.004.html>.

[9] 班华珍. 土石坝水库溃决模拟及洪水风险研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020.

BAN Hua-zhen. Dam Break Simulation and Flood Risk Research of Earth-rock Dam[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.

[10] ZHANG S H, XIA Z X, YUAN R, et al. Parallel Computation of a Dam-break Flow Model Using OpenMP on a Multi-core Computer[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 126-133.

[11] ZHAO G, BATES P, NEAL J. The Impact of Dams on Design Floods in the Conterminous US[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(3): e2019WR025380.

[12] 王欣, 王玮琦, 黄国如. 基于MIKE FLOOD的城区溃坝洪水模拟研究[J]. *水利水运工程学报*, 2017(5): 67-73.

WANG Xin, WANG Wei-qi, HUANG Guo-ru. Simulation Research of Urban Dam Break Flood Based on MIKE FLOOD Model[J]. *Hydro-science and Engineering*, 2017(5): 67-73.

[13] 廖威林, 周小文, 何勇彬. 城市地区水库溃坝洪水演进模拟[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(10): 98-103.

LIAO Wei-lin, ZHOU Xiao-wen, HE Yong-bin. Nu-

- merical Simulation of Flood Propagation Caused by Dam-break in Urban Area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 98-103.
- [14] 尹灵芝,朱 军,王金宏,等. GPU-CA 模型下的溃坝洪水演进实时模拟与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(8): 1123-1129, 1136.
YIN Ling-zhi, ZHU Jun, WANG Jin-hong, et al. Real-time Simulation and Analysis of Dam-break Flood Routing Based on GPU-CA Model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(8): 1123-1129, 1136.
- [15] 王兆礼,陈昱宏,赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124.
WANG Zhao-li, CHEN Yu-hong, LAI Cheng-guang. Numerical Simulation of Urban Waterlogging Based on TELEMAC-2D and SWMM Model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124.
- [16] FORSTER A, COSTI J, MARQUES W C, et al. Application of the TELEMAC-2D Model in the Fluvial Hydrodynamics Simulation and Reproduction of Flood Patterns [J]. Defect and Diffusion Forum, 2019, 396: 187-196.
- [17] LAVINE W, JAMAL M H, WAHAB A, et al. Effect of Sea Level Rise on Oil Spill Model Drift Using TELEMAC-2D [J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(4): 1021-1031.
- [18] CONG S D, NGUYEN B D, NGUYEN K D, et al. A Possible Solution for Flood Risk Mitigation in Ho Chi Minh City and the Lower Sai Gon-Dong Nai River Basin [J]. La Houille Blanche, 2019, 105(5/6): 114-123.
- [19] 张 琴,陶建峰,张长宽,等. 台州湾浅海滩涂大规模围垦下水动力变化分析[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 392-398.
ZHANG Qin, TAO Jian-feng, ZHANG Chang-kuan, et al. Effect of the Large-scale Reclamation of Tidal Flats on the Hydrodynamic Characteristics in the Taizhou Bay [J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(4): 392-398.
- [20] 汤中倩. 基于 GIS 的洪水仿真及洪水要素可视化 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
TANG Zhong-qian. Flood Simulation and Visualization of Flood Elements Based on GIS [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [21] 刘家宏,李泽锦,梅 超,等. 基于 TELEMAC-2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析[J]. 科学通报, 2019, 64(19): 2055-2066.
LIU Jia-hong, LI Ze-jin, MEI Chao, et al. Urban Flood Analysis for Different Design Storm Hyetographs in Xiamen Island Based on TELEMAC-2D [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(19): 2055-2066.
- [22] 邵 蕊,邵薇薇,苏 鑫,等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69.
SHAO Rui, SHAO Wei-wei, SU Xin, et al. Impact of Various Flood Scenarios on Urban Emergency Responses Times Based on the TELEMAC-2D Model [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(1): 60-69.
- [23] 石 莎,范子武,张 铭,等. 涪溪口水利枢纽溃坝洪水模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 67-73.
SHI Sha, FAN Zi-wu, ZHANG Ming, et al. Dam-break Flood Simulation for Wuxikou Hydroproject [J]. Hydro-science and Engineering, 2013(6): 67-73.
- [24] 曾照洋,王兆礼,吴旭树,等. 基于 SWMM 和 LISFLOOD 模型的暴雨内涝模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2017, 36(5): 68-77.
ZENG Zhao-yang, WANG Zhao-li, WU Xu-shu, et al. Rainstorm Waterlogging Simulations Based on SWMM and LISFLOOD Models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77.
- [25] 曾照洋,赖成光,王兆礼,等. 基于 WCA-2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 29-38.
ZENG Zhao-yang, LAI Cheng-guang, WANG Zhao-li, et al. Rapid Simulation of Urban Rainstorm Based on WCA-2D and SWMM Model [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38.
- [26] SL 754—2017, 城市防洪应急预案编制导则[S].
SL 754—2017, Guidelines for the Formulation of Urban Flood Emergency Plan [S].