

基于 MIKE21 FM 模型的洞庭湖区 平原城市洪水演进模拟

朱世云¹, 于永强², 俞芳琴³, 刘俊¹, 游志康¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014; 3. 南京市浦口区水利局, 江苏 南京 211800)

摘要: 洞庭湖区平原城市地势平坦, 多位于湖区防洪高水位之下, 洪水遭遇复杂, 历史上饱受洪涝灾害侵袭, 因此对洪涝无法完全消除地区开展研究是有必要的。以岳阳市为研究对象, 采用 MIKE21 FM 模型进行水动力数值模拟, 选定堤防设计水位与历史最高水位作为边界条件, 拟定溃口位置, 模拟洪水演进不同时期的淹没情况、洪水流态和进洪量。结果表明: MIKE21 FM 模型模拟精度高, 模拟成果合理, 对洞庭湖区平原城市洪水数值模拟具有一定应用价值, 成果可为岳阳市和其他湖区平原城市的防汛救灾工作提供参考。

关键词: 洪水演进模拟; MIKE21 FM 模型; 洞庭湖区; 湖区平原城市; 岳阳市;

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)02-0132-07

Flood routing simulation of Dongting Lakeshore Plain City based on MIKE21 FM Model

ZHU Shiyun¹, YU Yongqiang², YU Fangqin³, LIU Jun¹, YOU Zhikang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. HydroChina ZhongNan Engineering Corporation, Changsha 410014, China; 3. Water Conservancy Bureau of Pukou District, Nanjing 211800, China)

Abstract: The Dongting lakeshore plain city has complex flood problem due to its flat terrain, which is normally located below the high water level for flood control in the lake area, so it is necessary to conduct research in areas where floods can not be completely eliminated. The paper chooses Yueyang City as a case study to make the numerical simulation of hydrodynamics with MIKE21 FM model. In the flood simulation, the design level of the dike design level and the highest water level in the history are selected as the water level input in the model, the breach location is set, and the submergence, flood flow, and flood inflow at different periods of the flood evolution are simulated. The result shows that the MIKE21 FM model has high accuracy and real simulation effect, and has certain value in the flood simulation of lakeshore plain city. The research on the flooding simulation method of the plains in the lake area has direct significance to flood prevention and relief work in Yueyang City and in the lakeshore plain cities of China.

Key words: flood routing simulation; MIKE21 FM model; Dongting lakeshore; lakeshore plain city; Yueyang city

1 研究背景

城市洪涝灾害作为城市常见自然灾害之一, 不但阻碍城市的经济发展, 还会造成重大人员伤亡和社会动荡^[1]。我国是洪涝灾害频发的国家, 除沙漠、极端干旱地区和高寒地区外, 我国大约 2/3 的国

土面积都存在着不同程度和不同类型的洪涝灾害。国外对洪涝问题做出许多积极探索, 总结出丰厚的理论基础。20 世纪 50 年代, 对密西西比河和俄亥俄河流域建立了水动力学模型^[2-4], Herman 等^[5]利用情景模型对溃堤洪水进行分析, Jonkman 等^[6-7]、Pistrika 等^[8]采用基于情景模拟的方法给出了定量

收稿日期: 2017-09-26; 修回日期: 2017-11-27

基金项目: 中国工程院重大咨询研究项目 (2015-ZD-07)

作者简介: 朱世云 (1993-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为城市防洪与减灾。

通讯作者: 刘俊 (1968-), 男, 安徽马鞍山人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市防洪与减灾。

的溃堤洪水影响结果, Segura^[9] 在进行洪灾影响分析时利用 GIS 叠加危险性、暴露性和脆弱性因子估算出概率背景下的洪灾损失。国内洪涝分析方法主要采用了水文学方法和水力学方法, 水文学主要通过数理统计得出洪涝灾与相关因素的相关规律对洪涝进行分析, 水力学方法主要通过对圣维南方程的推导和迭代进行洪涝模拟分析^[10-12]。

地处长江中游平原的洞庭湖区是承纳湘、资、沅、澧四水和吞吐长江的洪道型调蓄湖泊, 经历了数次湖盆扩大和缩小的过程^[13]。近年来, 随着长江四口带来的泥沙淤积和人工围湖, 导致湖盆抬升, 人水争地矛盾显著。这一系列问题造成洞庭湖区城市洪涝灾害频发, 洪涝损失日益增大。同时湖区城市地形平坦多位于湖区防洪高水位之下, 依靠修建堤防营造防洪包围圈来保证水安全, 堤防失事后果将是巨大经济损失和人员伤亡, 城市将陷入瘫痪, 对洪涝无法完全消除地区开展研究是复杂且有必要的。

根据洞庭湖区平原城市独特自然地理特征, 提出洞庭湖区平原城市洪涝模拟方法, 制定不同情景分析城市洪水方案, 对湖区平原城市洪水问题进行动态分析, 可为城市洪涝灾害防治提供决策协助, 指导洞庭湖区平原城市水利建设和规划。对洞庭湖区平原城市的洪涝防治策略和工程规划布局具有积极意义, 对我国自然灾害研究和城市安全体系构建做出积极探索。

2 研究方法

城市洪水分析原则上应采用水力学法, 尤其在因河道泛滥而导致洪水的平原城市要求采用水力学方法。水动力学模型是以圣维南方程组为控制方程, 具有明确物理意义, 在计算过程中可以考虑城市中阻水建筑物和水利工程对洪水演进的影响^[14], 并且可以很好地模拟设防城市溃堤漫堤等极端水灾害情况。其中 MIKE21 FM 模型是基于数值解的二维浅水方程, 对恒定体积的 N-S 方程进行积分, 对质量、动量、温度、密度等都守恒, 可以模拟大部分竖向均匀的二维自由水面流态^[15]。

二维模型中二维水动力学模型的控制方程如下所示:

连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = q \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (uU)}{\partial x} + \frac{\partial (vV)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial (uV)}{\partial x} + \frac{\partial (vV)}{\partial y} + gh \frac{\partial H}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间, s; U 、 V 分别为 x 、 y 方向的单宽流量, m^2/s ; H 、 h 分别为水位和水深, m; n 为糙率系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; q 为源汇项。

本文针对研究区域采用 MIKE21 FM 模型, 选择堤防设计水位与历史最高水位作为边界条件, 拟定外洪量级, 根据堤防险工段排查确定溃口位置, 分析不同模拟情景下的洪水淹没特征。

3 实例分析

3.1 研究区域概况及资料来源

岳阳市位于长江中下游两湖平原的洞庭湖平原, 处于湖南省东北部, 环抱洞庭, 濒临长江, 地势东北高、西南低, 呈东西走向。城区位于洞庭湖出口与长江交汇带, 多为平原地形, 外围有低矮丘陵夹杂, 高程分布较均匀。岳阳以上流域集水面积约 $130 \times 10^4 km^2$, 其中长江占 $104 \times 10^4 km^2$, 洞庭湖约 $26 \times 10^4 km^2$ 。属从中亚热带向北亚热带过渡湿润大陆性季风气候, 温暖湿润, 四季分明, 季节性强。湖区气候均一, 山地气候悬殊。多年平均降水量为 1 439.1 mm, 春夏季多于秋冬季, 东部多于西部, 年内分布和年际分布都不均匀, 春夏季降雨量占年均降水量 70%, 年平均降雨最多时发生在 1954 年 (2 191.4 mm), 降雨最少时发生在 2011 年 (945.7 mm)。岳阳市是典型的洞庭湖区平原城市, 地理位置突出, 河湖关系复杂, 洪涝灾害频繁。

本文收集研究区域内 1: 500 和 1: 10000 矢量地图及行政区划图等地形资料, 以及邻近主要控制站 (岳阳、七里山、莲花塘等基本站) 1954、1998、1996 年及其他大水年实测洪水资料。

3.2 研究区划分

研究区域中东风湖大堤和南湖大堤内侧地势较低, 人口稠密, 且有内滑坡、风浪冲刷、散浸和蚁患等险工段, 选定东风湖溃口和南津港溃口进行分析, 溃口位置见图 1。外洪研究范围根据溃口位置及地形条件, 划分为东风湖计算分区和南湖计算分区, 面积分别为 $18.15 km^2$ 和 $96.77 km^2$ 。

3.3 模型边界条件设置

建立岳阳市主城区二维水力学模型, 溃口采用

水位过程控制。考虑到汛期洞庭湖水位较高,水量较大,溃口后对洞庭湖水位影响甚微,水位过程考虑采用定值。

堤防标准是由流域防洪标准制定,当外湖水位达到堤防设计水位时,可能发生溃堤险情。在此基础上,岳阳市西临洞庭湖出口处遭遇历时最高洪水水位时,则是工程最不利情景,此时外洪致灾性历时最大。因此为使情景模拟方案更符合实际情况,对岳阳市临洞庭湖洪水水量级设置为堤防设计水位和历史最高水位对应不同流量量级两种情景。



图1 溃口位置示意图

根据岳阳、七里山等水文站和流量站实测资料,参照历史洪水系列,岳阳市外湖洪水堤防设计和历史最高标准下的边界条件分别采用城陵矶七里山站1954 年最高水位 32.61 m、1998 年最高水位 34.0 m。

洞庭湖区堤垸溃口一般在 100 ~ 500 m 之间,由溃口内外地形条件、设计水位等分析溃口可能发展宽度,拟定溃口流量量级范围,最终根据拟定流量量级经模型试算确定溃口宽度。外洪溃口洪水量级设置见表 1。

表 1 岳阳市外洪洪水量级 m^3/s		
溃口	东风湖溃口	南津港溃口
堤防设计	2000	2000
	4000	4000
	6000	6000
历史最高	8000	8000

根据洞庭湖区堤垸历史溃决调查资料,采用瞬间溃的形式,溃口参数设置见表 2。

3.4 模型构建

模型网格剖分采用不规则三角网格,局部地形变化较大的区域进行局部加密。共剖得网格 18 785 个,网格平均面积 0.003 8 km²,最大网格面 0.008 9 km²。为保证模型精度和可靠度,采用高阶方法,时

间步长在 0.01 ~ 30 s 之间,临界 CFL 数为 0.8。

岳阳市内的南湖、东风湖水草、石块数量较少,湖面开阔,淤塞杂草丛生的情况较为少见,糙率 n 在 0.025 ~ 0.028 之间,陆地面积不透水较高,下垫面硬化程度高,多为灰色建筑物,糙率范围 0.014 ~ 0.016,城市中的绿地范围糙率取值在 0.018 ~ 0.021,洪水演进模型糙率选取标准见表 3,糙率场取值情况见图 2。

表 2 溃口参数设置

序号	溃口名称	溃决方式	底高/ m	流量级/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	溃口宽/ m
1	东风湖溃口	瞬间溃	27.68	2000	115
				4000	235
				6000	284
				8000	405
2	南津港溃口	瞬间溃	27.00	2000	97
				4000	194
				6000	237
				8000	312

表 3 不同下垫面洪水模型糙率选取标准

建筑 密集区	建筑一般 密集区	公园、 林地	道路	空地	河道、 内湖
0.016	0.015	0.021	0.014	0.014	0.025 ~ 0.028

采用 MIKE21 中水工建筑物堰来展现外洪溃口特性,采用宽顶堰类型,无闸控制流向。南津港溃口处堰底高程 27 m,根据不同流量级堰宽宽度在 97 ~ 312 m 之间;东风湖溃口处堰底高程 27.68 m,根据不同流量级堰宽宽度在 115 ~ 405 m 之间,设置的溃口堰位置见图 3。

本文采用正压模型,参考温度恒为 10℃,参考盐度恒为 32PSU。涡黏系数选用 Smagorinsky 公式表达,Smagorinsky 系数选用恒定值 0.28。根据东洞庭湖洪水来源,考虑东风湖溃口和南津港溃口,堤防设计水位和历史最高水位标准设 2000、4000、6000、8000 m³/s 流量级,洪水演进模型共设置 8 种模拟情景,见表 4。

3.5 模型成果

由模型运行结果可以得出岳阳市发生高量级洪水时,洪水演进不同时段的淹没情况、洪水流态和进洪量。岳阳市洪水演进模拟进洪量情况见表 5,各溃口各方案进洪流量过程见图 4 ~ 6。

表 4 岳阳市 8 种洪水演进模型模拟情景方案

序号	方案名称	标准	水位/m	底高/m	溃口宽/m
1	东风湖溃口堤防设计水位标准 2000 m ³ /s 流量级 (DFH_2000)	堤防设计	33.2	27.68	115
2	东风湖溃口堤防设计水位标准 4000 m ³ /s 流量级 (DFH_4000)		33.2	27.68	235
3	东风湖溃口历史最高水位标准 6000 m ³ /s 流量级 (DFH_6000)		34.1	27.68	284
4	东风湖溃口历史最高水位标准 8000 m ³ /s 流量级 (DFH_8000)		34.1	27.68	405
5	南津港溃口堤防设计水位标准 2000 m ³ /s 流量级 (NJG_2000)	堤防设计	33.2	27.00	97
6	南津港溃口堤防设计水位标准 4000 m ³ /s 流量级 (NJG_4000)		33.2	27.00	194
7	南津港溃口历史最高水位标准 6000 m ³ /s 流量级 (NJG_6000)		34.1	27.00	237
8	南津港溃口历史最高水位标准 8000 m ³ /s 流量级 (NJG_8000)		34.1	27.00	312

表 5 不同方案条件下不同进洪历时的进洪量模拟结果 10⁸ m³

历时/h	东风湖溃口方案				南津港溃口方案			
	1	2	3	4	5	6	7	8
	(DFH_2000)	(DFH_4000)	(DFH_6000)	(DFH_8000)	(NJG_2000)	(NJG_4000)	(NJG_6000)	(NJG_8000)
1	0.0060	0.0119	0.0178	0.0240	0.0729	0.1452	0.2170	0.2842
4	0.0180	0.0359	0.0541	0.0717	0.2917	0.5810	0.8557	1.0175
7	0.0361	0.0720	0.1085	0.1402	0.5105	0.8721	1.0465	1.0478
10	0.0722	0.1435	0.2129	0.2624	0.7216	0.8750	1.0487	1.0487
13	0.1445	0.2619	0.3645	0.3831	0.8570	0.8752	1.0488	1.0487
16	0.2740	0.3453	0.4409	0.4409	0.8750	0.8754	1.0488	1.0487
19	0.3466	0.3518	0.4418	0.4418	0.8752	0.8755	1.0488	1.0487
22	0.3518	0.3518	0.4417	0.4418	0.8754	0.8758	1.0488	1.0487
25	0.3518	0.3518	0.4418	0.4418	0.8755	0.8760		
28	0.3518	0.3518	0.4418	0.4418	0.8758	0.8760		
31	0.3518	0.3518			0.8760	0.8760		

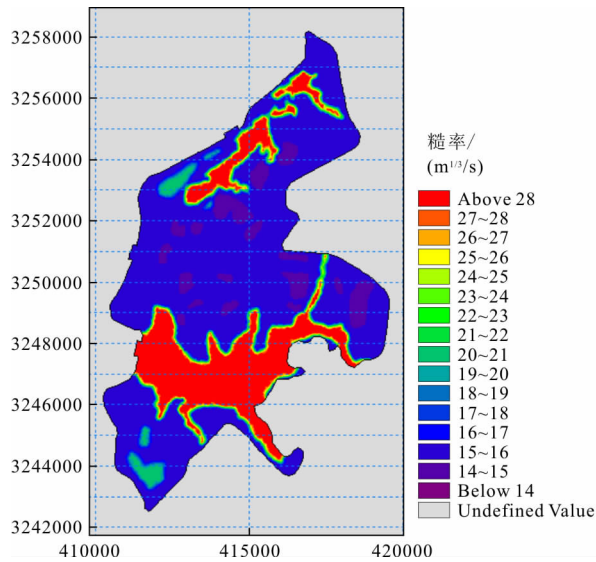


图 2 洪水模型糙率取值示意图

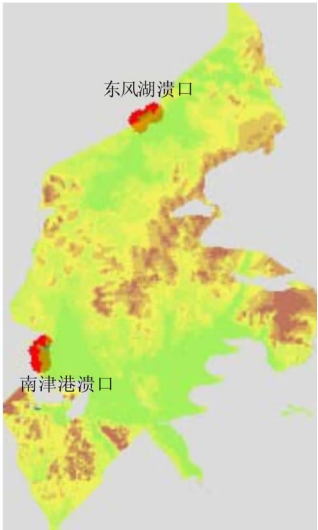


图 3 洪水演进模型溃口位置

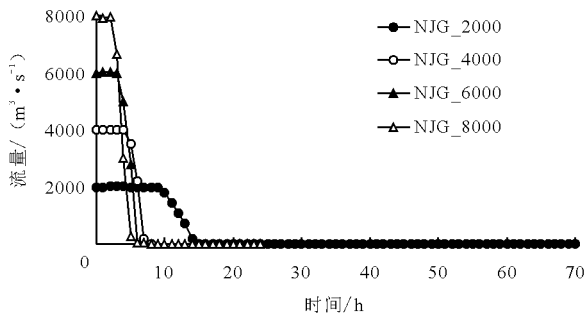


图4 南津港溃口情景进洪流量变化情况

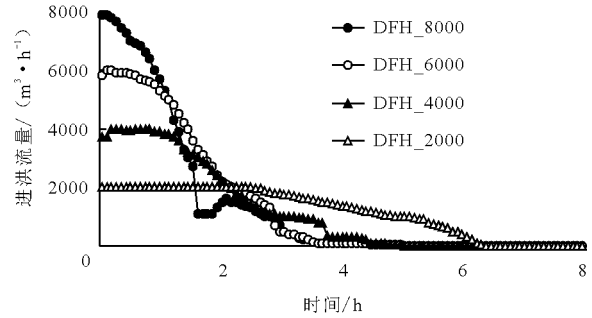


图5 东风湖溃口情景进洪流量变化情况

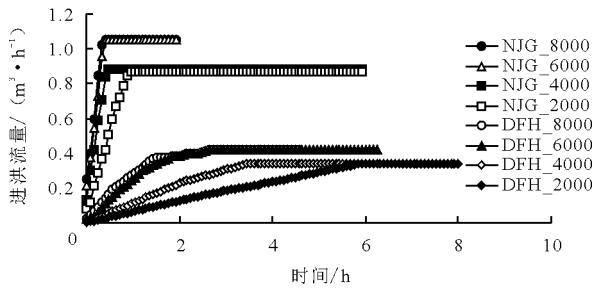


图6 不同模拟情景进洪量变化情况

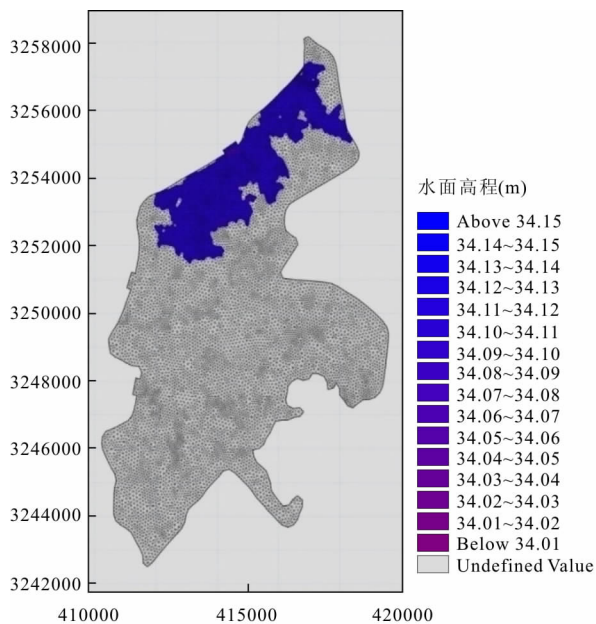
不同溃口,进洪量不同,东风湖溃口堤防设计水位标准和历史最高水位标准最大进洪量分别为 $0.352 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.442 \times 10^8 \text{ m}^3$,南湖则分别为 $0.876 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1.049 \times 10^8 \text{ m}^3$,二者进洪量相差约一倍;不同洪水标准,进洪量不同,以南津港溃口为例,历史最高水位标准比堤防设计水位标准进洪量多 $2\,700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。溃口流量量级越大,洪水演进

越快,以南津港溃口为例,堤防设计水位标准 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量级,14 h 后进洪流量达到平衡,而历史最高水位标准 $8\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量级,5 h 后进洪流量即达到平衡,二者相差 9 h。东风湖和南津港溃口最大淹没范围见图 7。

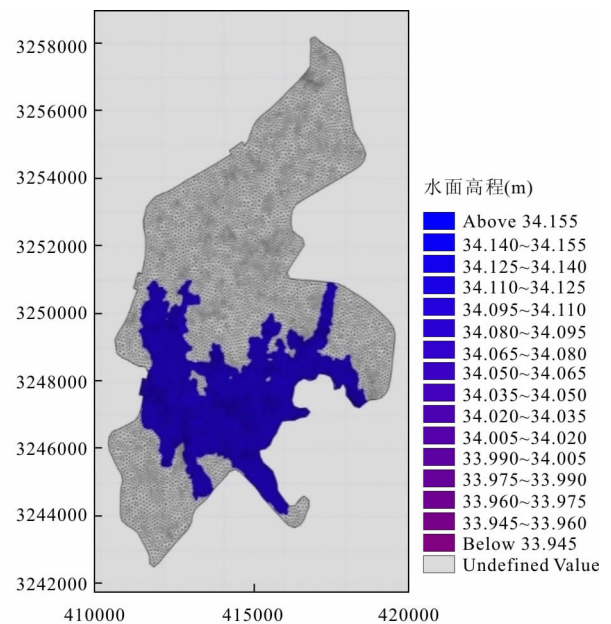
分别以东风湖溃口 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量级和南津港溃口 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量级为例,不同进洪历时淹没范围见图 8 和图 9。

岳阳市中心城区地势相对较高,东风湖和南津港溃口对中心城区影响不大,主要影响南湖及东风湖周边地势较低矮的区域。

不同方案,洪水淹没范围不同。溃口均位于内湖临洞庭湖出口堤段,溃堤洪水先入内湖,临近区域地势相对较低,影响范围相对较小,南湖溃口和东风湖溃口相比,淹没范围相差 9 km^2 ,主要原因是南湖调蓄区范围本身较大。



(a) 东风湖溃口



(b) 南津港溃口

图7 不同溃口最大淹没范围

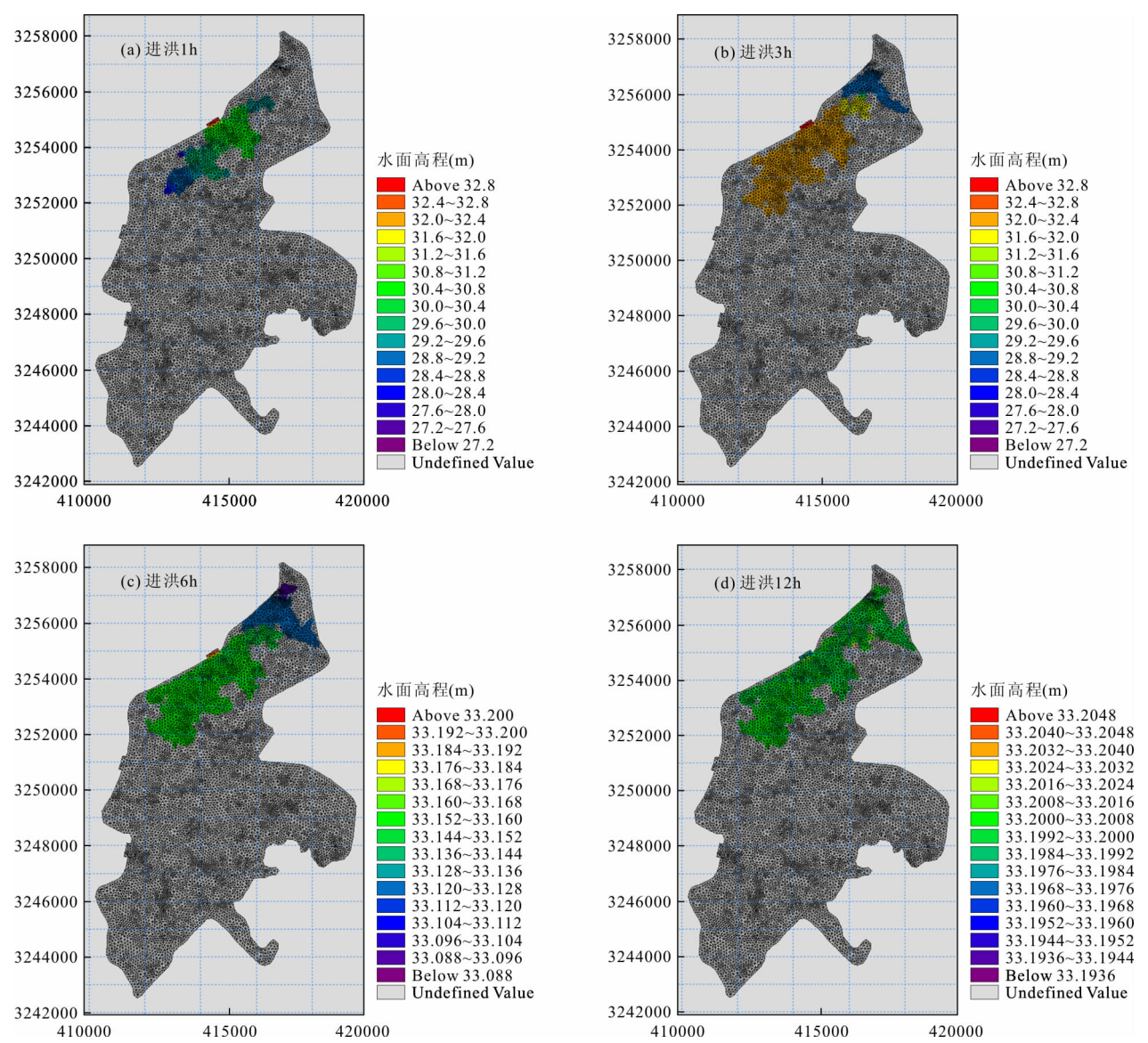
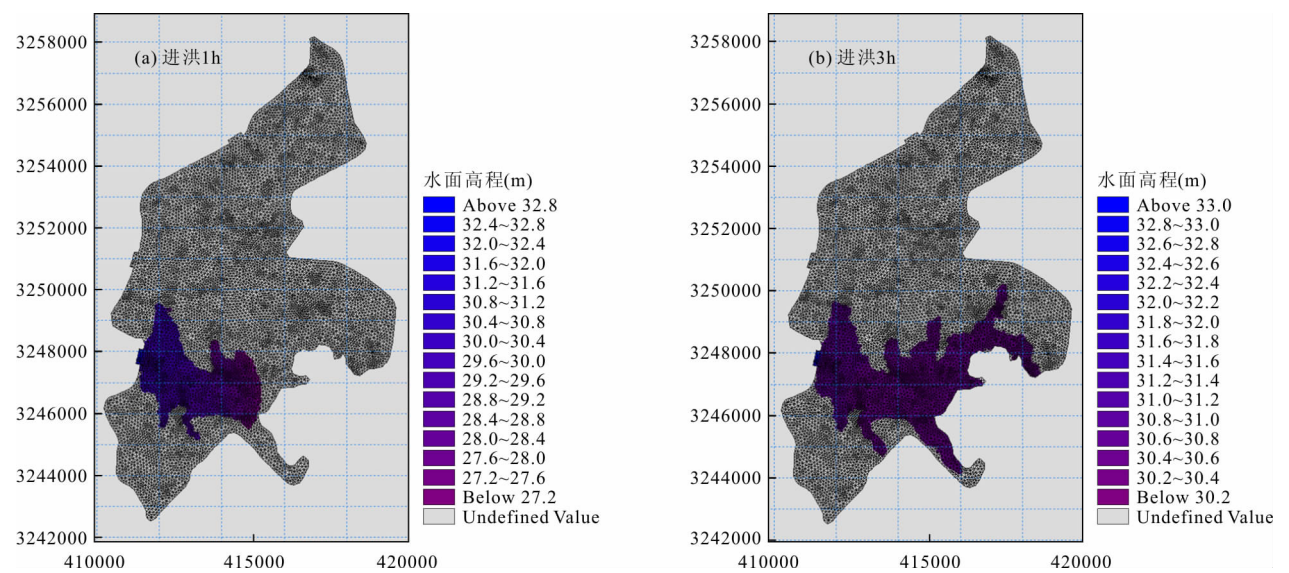


图 8 东风湖溃口 $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 洪水方案淹没范围变化



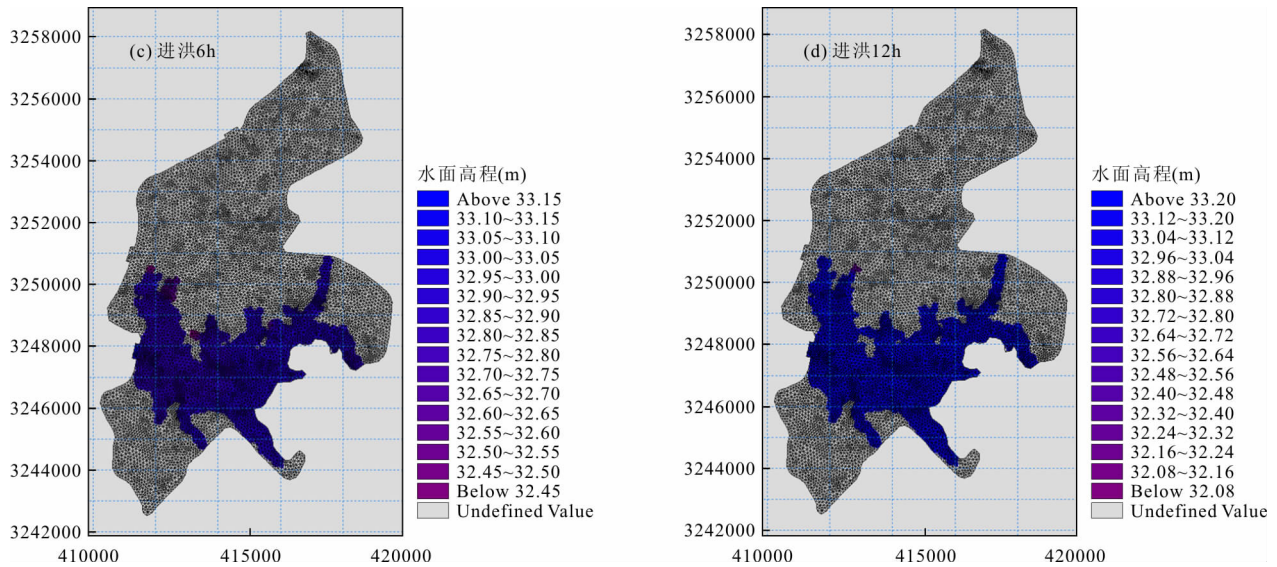


图9 南津港溃口 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 洪水方案淹没范围变化

4 结 论

本文采用 MIKE21 FM 模型分别计算研究区域 8 个洪水模拟方案,得出的主要结论如下:

(1) 研究区历史最高水位情景下淹没范围较大,堤防设计水位情景下淹没历时更长。水位越高,洪水演进速度越快,淹没深度也越大。外湖溃堤洪水影响范围有限,建议开展城区内涝风险研究。

(2) 研究结果合理可靠,可为湖区平原城市防汛救灾工作提供参考。表明 MIKE21 FM 模型在湖区平原城市的洪水数值模拟中具有一定应用价值。

参考文献:

- [1] 古荻欢. 基于社区尺度的上海市自然灾害社会脆弱性评估[D]. 上海:上海师范大学, 2016.
- [2] TODOROVIC P, ZELENHASIC E. A stochastic model for flood analysis[J]. Water Resources Research, 2010, 6(6):1641–1648.
- [3] ZELENHASIC E. On the extreme streamflow drought analysis[J]. Water Resources Management, 2002, 16(2):105–132.
- [4] TODOROVIC P. On some problems involving random number of random variables[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1970, 41(3):1059–1063.
- [5] HERMAN J, LOUAT T, HUANG Q, et al. Autoimmune and inflammatory disorder therapy: WO, US9301961[P]. 2016.
- [6] JONKMAN S N, MAASKANT B, BOYD E, et al. Loss of life caused by the flooding of New Orleans after Hurricane Katrina: analysis of the relationship between flood characteristics and mortality. [J]. Risk Analysis, 2009, 29(5): 676–698.
- [7] JONKMAN S N. Global perspectives on loss of human life caused by floods[J]. Natural Hazards, 2005, 34(2):151–175.
- [8] PISTRIKA A K, JONKMAN S N. Damage to residential buildings due to flooding of New Orleans after hurricane Katrina[J]. Natural Hazards, 2010, 54(2):413–434.
- [9] SEGURA G, BADILLA E, OBANDO L. Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor siquiriturrialba[J]. Revista Geológica De América Central, 2011(45):101–121.
- [10] 毛德华. 洪灾综合风险分析的理论方法与应用研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009.
- [11] 刘华振, 刘俊, 左君, 等. 马斯京根法在黄河吴堡—龙门区间洪水演算中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6):53–55.
- [12] 程晓陶. 我国推进洪水风险图编制工作基本思路的探讨[J]. 中国水利, 2005(17):11–13.
- [13] 王月容. 洞庭湖退田还湖区钱粮湖垸景观格局、土壤质量与土地承载力研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2010.
- [14] 薛文字. 城市暴雨积水及街道洪水模拟模型研究[D]. 天津:天津大学, 2015.
- [15] 房克照, 尹晶, 孙家文, 等. 基于二维浅水方程的滑坡体兴波数值模型[J]. 水科学进展, 2017, 28(1):96–105.