

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0009

姚斯洋,刘成林,魏博文,等.基于MikeFlood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 S Y, LIU C L, WEI B W, et al. Combined scenario flood risk analysis based on MikeFlood[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 61-69. (in Chinese)

## 基于 MikeFlood 的组合情景洪水风险分析

姚斯洋<sup>1</sup>, 刘成林<sup>1</sup>, 魏博文<sup>1,2</sup>, 陈良捷<sup>1</sup>, 金戎<sup>3</sup>, 程颖新<sup>1</sup>

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;  
3. 九江市水文局, 江西 九江, 33200)

**摘要:**针对模拟河道洪水淹没时,干、支流同频率暴雨组合情景不能合理反映洪水漫堤真实情景的缺陷,考虑到洪水汇流淹没过程中干、支流实际降水情况的差异,构建基于干、支流不同频率组合方案下洪水淹没情景的 MikeFlood 耦合水动力模型。以典型丘陵地貌地区修水为研究对象,模拟研究区域内干流以及主要支流分别发生 20 年、50 年、100 年不同频率暴雨时的 24 种组合情景,选取其中几种情景与干、支流发生同一种频率暴雨的典型暴雨情景进行对比。结果表明:选取的组合情景与典型情景相比,其淹没水深的分布、大小均有较大的变化,可多样性地反映洪水来临时洪水漫堤的情景,为丘陵地区的洪水风险预报和紧急避洪转移工作提供决策依据和技术支撑。

**关键词:** Mike; 洪水数值模拟; 丘陵地区; 组合暴雨情景; 典型暴雨情景

中图分类号: TV122 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Combined scenario flood risk analysis based on MikeFlood

YAO Siyang<sup>1</sup>, LIU Chenglin<sup>1</sup>, WEI Bowen<sup>1,2</sup>, CHEN Liangjie<sup>1</sup>, JIN Rong<sup>3</sup>, CHENG Yingxin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

3. Jiujiang Hydrology Bureau, Jiujiang 33200, China)

**Abstract:** During the flooding of simulated rivers, the same-frequency rainstorm combination scenario of the main stream and tributary cannot reasonably reflect the real overflow situation. In view of this defect, considering the difference of actual precipitation conditions between the main stream and tributary during the flooding, we established a MikeFlood coupled hydrodynamic model based on flooding scenarios of different frequency combinations of the main stream and tributary. In this paper, the typical hilly landform area, Xiushui, was taken as the research object. We simulated the 24 combinations in which the main stream and the main tributaries respectively had 20-, 50- and 100-year rainstorms. We compared several scenarios with the typical storm scenarios in which the main stream and tributaries had rainstorms of the same frequency. The comparison results showed that: the selected combination scenarios presented much different distribution and size of submerged depth than the typical scenarios. They can diversely reflect the overflow situation in the flood, providing decision-making basis and technical support for flood risk forecasting and emergency evacuation to avoid flood in hilly areas.

**Key words:** Mike; flood numerical simulation; hilly area; combined rainstorm scenario; typical rainstorm scenario

收稿日期: 2018-09-01 修回日期: 2018-10-29 网络出版时间: 2018-11-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181128.1049.002.html>

基金项目: 江西省研究生创新专项资金项目(YC2018-S121)

作者简介: 姚斯洋(1994—), 男, 江西宜春人, 主要从事河流动力学与水文分析计算方面的研究。E-mail: 125673190@qq.com

通信作者: 刘成林(1973—), 男, 江西玉山人, 教授, 博士, 主要从事遥感与水文水资源分析研究。E-mail: 565561461@qq.com

随着全球气候的变暖,局部暴雨等极端气候事件频发,再加上城镇化建设引发的洪水区域下垫面改变,洪水诱发的灾害日趋严峻。因此,开展洪水数值模拟研究对于城镇漫堤洪水灾害评估、防洪防涝工程建设具有十分重要的意义。

目前为止,国内外学者利用各种水力学模型对洪水的数值模拟技术做了大量研究<sup>[1-8]</sup>,在河网洪水演进、防洪排涝工程的建设等方面的应用均取得了较令人满意的成果,李艳红等<sup>[4]</sup>提出“混合五对角法”建立平面二维数学模型,解决山区河流复杂边界及计算稳定性等问题;解刚<sup>[5]</sup>用有限差分 ADI 法离散方程,并利用贴体网格建立了适用于山区河流的平面二维推移质模型;陈一帆等<sup>[6]</sup>基于三角形无结构网格的有限体积法建立了耦合水工建筑物的河流平面二维模型。近年来,DHI Mike 模型<sup>[9-11]</sup>由于其模型稳定性好、模拟精度高而被广泛运用于洪水风险的评估中<sup>[3,12-21]</sup>。施露等<sup>[18]</sup>利用 Mike 软件构建中小河流域一、二维耦合水文-水动力模型,对中小河流进行洪涝风险分析;郭凤清等<sup>[21]</sup>利用 Mike21 软件,对蓄滞洪区的洪水模拟仿真分析,并调度运用方案展开研究。现有研究多采用干、支流同频率暴雨组合成的情景来分析洪水灾害,然而实际情况中,干、支流实际发生的洪水可能为不同的频率,故单一洪水频率下的流域洪水分析不能较为准确地反映洪水来临时真实的淹没情景。

本文综合运用现代水文学模型、河流水动力学理论及 ArcGIS 遥感数据,在缺乏水文观测资料的情况下,利用水文学方法,推求水力学模型的边界入流,构建 Mike11 一维水动力模型、Mike21 二维水动力模型和 MikeFlood 耦合水动力模型,对修水县进行洪水风险分析,并选取修水县修河郭家滩电站至三都电站的区域作为研究实例,制定组合洪水方案,建立组合暴雨频率下的洪水演进数值模型,分析研究区域的洪涝情况。

## 1 MikeFlood 耦合模型原理

MikeFlood 耦合模型是把 Mike11 一维模型和 Mike21 二维模型连接在一起,进行动态耦合的模型系统,由于 Mike11 不能准确模拟河道断面之外的洪泛平原水流漫堤的情况,而 Mike21 单一模型模拟效率不高,故利用 MikeFlood 耦合模型进行模拟。该模型既利用了 Mike11 和 Mike21 的优点,又避免了采用单一模型时遇到的网格精度和准确性方面的问题<sup>[11,22]</sup>。

需要指出的是, Mike11 编辑器构建的一维河道

水动力模型是基于以下假定提出的<sup>[9]</sup>。河流水体为不可压缩的一维均质流体、河道坡降小、纵向断面变化幅度小且符合静水压力假设。采用 6 点 Abbott-Ionescu 有限差分格式对 Saint-Venant 方程组求解,包括连续方程和动量方程,分别符合质量守恒定律和牛顿第二定律等流体物理定律<sup>[9]</sup>。Saint-Venant 方程组见式(1)。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $q$  为侧向入流 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A$  为过水面积 ( $\text{m}^2$ );  $h$  为水位 ( $\text{m}$ );  $R$  为水力半径 ( $\text{m}$ );  $C$  为谢才系数;  $\alpha$  为动量修正系数。

二维自由表面流模型 Mike21 是以垂向平均的水流因素为研究对象模拟计算蓄滞洪区、河道、湖泊、海洋的流场、流速、水位的变化,在分析过程中其不考虑水流垂向加速度。由于丘陵地区地形地势复杂,建模需要采用非结构化网格,即三角网格与四边形网格相结合的混合网格,方可更好地反应水流边界信息,故二维模型建立选用 Mike21FM 模块。该计算模块原理基于程是基于不可压缩的雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深积分的连续方程和动量方程<sup>[10]</sup>,描述平面二维水流的连续方程和动量方程见式(2)和(3)。

连续方程为

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = \\ v_t \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = \\ v_t \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $h$  为水深;  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的流速;  $u$ 、 $v$  分别为垂线平均流速在  $x$ 、 $y$  方向上的分量;  $z$  为水位;  $g$  为重力加速度;  $C$  为谢才系数;  $v_t$  为紊动黏性系数。

Mike11 和 Mike21 模型在 Mike Flood 中进行一二维耦合有以下几种连接方式:标准连接、侧向连接、结构物连接、人孔连接、零流动连接、河道排水管网连接等几种方式。因为侧向连接允许 Mike21 网格单元从侧面连接到 Mike11 的部分河段甚至是整个河段,把 Mike11 里断面定义的河岸当做一个堰,

运用堰的流量公式来计算通过侧向连接的水流,从而有效模拟水从河道漫流到洪泛区的运动,故本次模拟主要利用侧向连接。

## 2 模型构建

### 2.1 研究区概况及模型概化

研究区位于江西省西北部、九江市西南方向的修河流域,流域面积14 796 km<sup>2</sup>,西高东低,东西长、

南北窄,形似芭蕉叶,河道平均坡降 0.64%,见图 1。年均降雨量为 1 875 mm,最大年降雨 2 654 mm,最少年降雨 1 000 mm,降雨集中在 3—7 月,研究区内主要包含修河干流以及安溪水、武宁水、杭口水等支流。研究区支流杭口水、武宁水虽然上游以山区为主,但是上述支流下游河道周边地势较平坦,每逢暴雨,雨水极易汇聚于此,又加上干流的壅水效应,使之极易形成洪涝区。



图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

据《修水县志》记载,自建国以来,洪水灾害发生较频繁,造成的损失也较大。1973 年 6 月 24 日,全县大水,降雨量 363.3 mm,此次洪水是建国以来发生的最大的一次洪水,重灾人口达 134 277 人,农作物被淹面积 17 307.6 hm<sup>2</sup>。2017 年 6 月下旬至 7 月上旬,修水县遭遇了连续强降雨过程,城区范围内多处地段被淹。

将郭家滩水电站下游、龙潭峡水电站下游至三都水电站作为水力学计算区,将郭家滩水电站、龙潭峡水电站直接概化为模型的入流点,利用其流量数据作为模型上边界入流边界条件输入模型,同上,小支流杭口水、竹坪水、安溪水、庙岭水的流量数据作为模型的上边界输入模型。为充分考虑下游水电站的壅水效应,故把三都水电站的水位数据作为下边界水位边界条件输入模型。模型区域内的南圳大桥、姜家渡大桥、修水大桥以及杨梅渡大桥利用模型内置的 Bridge 进行概化,而位于区域瓶颈处的抱子石水电站利用模型内置的 Control Structure 进行概化,模型概化见图 2。

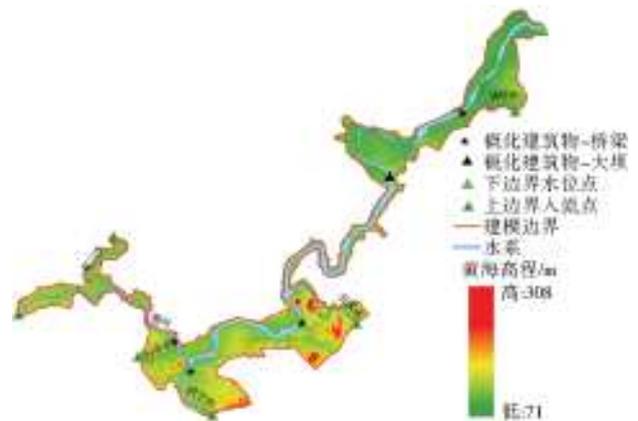


图 2 模型概化

Fig. 2 Model generalization

### 2.2 耦合模型的建立

耦合模型建立包括 Mike11 一维模型的建立、Mike21 二维模型的建立、MikeFlood 耦合模型的建立。

(1) Mike11 一维模型主要由河网文件、断面文件、HD 参数文件、边界条件文件组成。虽然区域内河道分布相对简单,但是干流河段较长且蜿蜒多变,

故在河道流向变化较大处与河道突然加宽或变窄处增设节点与加密断面,使概化的模型能够基本反映出区域内真实的河道走向以及变化。具体输入信息与思路如下:a. 根据概化的修河河网,生成各节点和河段信息,研究区域模型概化的水工建筑物为大坝以及桥梁。大坝为位于研究区域瓶颈处的抱子石大坝,利用其计算或者实测下泄流量来控制闸门的调度。由于桥墩的阻碍和束窄作用,水流经过桥墩时需要克服桥墩施加的阻力,从而在桥墩前形成一定的水位壅高,并损失一定的水头<sup>[23]</sup>,故桥梁对洪水期间水位的影响也较为显著,本文采用软件内置的桥墩 Yarnell 方法,利用桥墩宽度占过水面积的宽度(openning)参数来控制阻水能力,本次模型概化的桥梁为 4 座,位于干流的 3 座,位于支流的 1 座设置桥梁,分别根据现有桥墩资料计算出参数(openning)导入模型;b. 断面文件,据掌握资料的不同,对有实测大断面资料的河道,直接将实测的断面数据直接导入到软件中,对无实测断面的河道,利用 GIS 在 DEM 图上量出;c. HD 参数文件,由于研究区域地形变化较大,河道水位分段赋值,实况年的初始值设置为模拟开始日期的实测水位,设计年的初始值设置为相应上一较高频率模拟结束时的水位,对于频率最高的设计年初始值设定为平水期平均实测水位,河道糙率则根据率定来确定,时间步长 10 s,模拟时间 72 h. d. 边界条件文件,对于上边界均采用实测或者水文学方法算出的流量作为入流边界条件,下边界采用实测三都水位或者相应频率三都计算水位,对于区间入流则采用分布式边界把计算出的流量平均分配到干流。

(2)Mike21FM 模型主要包括了建立网格、制作糙率场、干湿水深的选择。而建立的网格直接关系到模型能否充分反映研究区域的地形特点,故洪泛区内居民密度较大的区域与地势起伏较大的区域则加密网格,以便在网格内充分反映其特征。具体输入信息与思路如下:a. 建立网格。Mike21FM 网格生成器采用非结构不规则网格,对修水防洪保护区计算区域进行网格划分,建模范围内最大网格的面积不超过 0.05 km<sup>2</sup>,共剖分网格 8 401 个。b. 制作糙率场。根据整理出来的土地利用文件,确定不同区域的糙率值,利用 GIS 将下垫面数据导入模型,创建糙率分区,并设置不同的糙率。糙率根据实际经验选取,并根据率定过程进行相应的调整。c. 干湿水深的选择。模型中干水深设置为 0.005 m,淹没水深设置为 0.05 m,湿水深设置为 0.07 m。

(3)MikeFlood 耦合模型主要由 Mike11 一维模

型和 Mike21FM 二维模型中采用侧向连接方式在 Mike Flood 模块中建立耦合点进行动态耦合。在 Mike Flood 模块中建立一维模型与二维模型的耦合点,使二者动态连接到一起,左侧岸线建立 380 个耦合点,右侧岸线建立 356 个。

## 2.3 推求边界入流

实测工况:有实测资料的支流,直接利用实测流量过程线输入模型;没有实测资料的支流,则根据当日暴雨等值线图以及实地调查资料,利用瞬时单位线法估算出当日暴雨量,并绘制流量过程线。

计算工况:有多年径流数据的河流,利用数据进行经验频率计算,计算出各工况下的设计洪水;无多年径流资料的河流则根据《江西省暴雨计算手册》,利用瞬时单位线计算得出 20 a 一遇( $p=5\%$ ),50 a 一遇( $p=2\%$ ),100 a 一遇( $p=1\%$ )频率下的设计洪水。

## 2.4 模型的率定与验证

采用修水“6·24”洪水水位过程线对模型进行率定,一维模型河道糙率  $n$  率定结果为 0.035,二维模型  $M$  选取值为:空地 28.6,旱田 16.7,水田 20.0,树丛 15.4,村庄 14.3。

由于可利用的历史洪水资料不多,此次通过两种方式来验证模型,对于资料较全的“7·1”洪水采用模拟水位过程线与实测水位过程线进行验证,第二种则是通过研究区域内的高沙水位站多年径流资料的经验频率计算结果与模型计算的结果进行对比验证,验证结果分别见表 1、2。

表 1 率定与验证结果  
Tab. 1 Calibration and verification results

水文测站	率定/验证选取的洪水	最大水位差/m	N-S 系数
修水	6·24(率定)	0.06	0.92
	7·01(验证)	0.08	0.91
大洋洲	6·24(率定)	0.03	0.93
	7·01(验证)	0.09	0.97

表 2 高沙站流量设计值与模拟值验证结果

Tab. 2 Verification results of design flow and simulated flow at Gaosha station

工况	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
	一遇	一遇	一遇	一遇	一遇
模拟值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	4 669.28	5 818.14	6 810.21	8 401.65	9 545.32
设计值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	4 904.71	6 114.89	7 297.96	8 836.24	9 986.69
误差率/%	4.8	4.9	6.7	4.9	4.4

## 3 组合洪水情景的制定与风险对比分析

### 3.1 组合情景的制定

修水县城人口分布相对其它受灾乡镇较密集,

受灾害的影响最大,灾害损失也最大。故着重对修水县城的洪水演进做进一步的分析。研究区域内修河水系有干流修河,支流杭口水、武宁水、安溪水、庙岭水,流经修水城区的河段有武宁水与修河,故把修水城区分为武宁水下游、大洋洲公园、主城和修水大桥四段分析其城区防洪能力。根据已有资料,修水城区防洪标准为 20 a 一遇,故组合时洪水量级选 20 a 一遇、50 a 一遇、100 a 一遇。组合研究区域选为郭家滩水电站至抱子石水电站段,区域内包含干流一条以及四条支流,由于其中竹坪水洪峰大小较小,故组合时竹坪水流量过程线均用 100 a 一遇,而当中安溪水由于处于城区下游,且根据多年降雨资料分析其洪水发生时间滞后研究区域上游洪水的发生时间较长,故不纳入组合区域研究支流,其洪水量级则和干流一致,其他需要考虑的变量均用与干流一致的洪水量级。

现利用筛选出的 3 种洪水量级(20 a 一遇、50 a 一遇、100 a 一遇)与 1 条干流(I)、2 条支流(II、III)通过改变入流条件组合出 24 种组合情景(情景 1 至情景 24)与 3 种典型情景(情景 25 至情景 27),见表 3。查阅研究区域内水文站多年降雨的资料,各站暴雨频率间过渡不宜太大,故再从这 24 种情景中筛选出几种可能发生频率高且淹没较多情景与相应典型情景进行对比。通过对 24 种情景进行比较,在干流发生 20 年暴雨情景的基础下选出情景 5、情景 7;在干流发生 50 a 一遇暴雨的情景基础下选出情景 13、情景 15、情景 16;由于在干流发生 100 a 一遇暴雨情景时典型情景流量最大,故不比较此类情况。现用筛选出的组合情景与相应典型情景,着重以城区人口较为密集几处位置为基础进行洪水风险淹没对比分析。

表 3 暴雨频率组合结果  
Tab. 3 Combinations of rainstorm frequencies

发生地点	情景													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
郭家滩电站(I)	20	20	20	20	20	20	20	20	50	50	50	50	50	50
杭口水上游(II)	20	20	50	50	50	100	100	100	20	20	20	50	50	100
龙潭峡电站(III)	50	100	20	50	100	20	50	100	20	50	100	20	100	20
发生地点	情景													
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
郭家滩电站(I)	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	20	50	100	
杭口水上游(II)	100	100	20	20	20	50	50	50	100	100	20	50	100	
龙潭峡电站(III)	50	100	20	50	100	20	50	100	20	50	20	50	100	

### 3.2 组合洪水情景风险对比分析

图 3(a)是典型情景 25 与相应组合情景淹没面积随时间变化图,在 13 h 左右时,图中各情景淹没面积增大趋势明显,组合情景的淹没面积增长速度快于典型情景,在 21 h 左右时经典情景 25 与组合情景 5 的淹没面积分别达到最大值 3.81 km<sup>2</sup> 和 4.61 km<sup>2</sup>,随后呈下降之势,而此时组合情景 25 的淹没面积增长趋于稳定,并于 23 h 左右时达到最大值 4.97 km<sup>2</sup>。图 3(b)是典型情景 26 与相应组合情景淹没面积随时间变化图,与图 3(a)相似,在 13 h 左右时,图中各情景淹没面积增长明显,组合情景 13、16 增长速度均快于典型情景 26,而组合情景 15 与典型情景 26 的增长速度趋于一致,在 21 h 左右时经典情景 26、组合情景 13 和组合情景 15 的淹没面积分别达到最大值 5.43、5.51 和 5.94 km<sup>2</sup>,随后便下降,而此时组合情景 25 的淹没面积增长趋于稳定,并于 23 h 左右时达到最大值 6.34 km<sup>2</sup>。综上所

述可得,较典型情景,选取出的组合情景淹没面积在洪水扩散时的增长速度更快,淹没面积也更大,特别是组合情景 5 与组合情景 16,增加的淹没面积分别达 1.16 km<sup>2</sup> 与 0.90 km<sup>2</sup>,分别占相应典型情景淹没面积的 30.4% 和 16.6%。限于篇幅,故对与相应典型情景淹没面积差别较大的组合情景 5 与组合情景 16 与相应典型情景作进一步对比分析。

典型情景 25 和典型情景 26 均为干、支流均发生相同量级暴雨时的淹没情景,从图 4(a)、4(b)可知,其淹没范围差别较大。图 4(a)为干、支流均发生 20 a 一遇暴雨的典型情景,可知大洋岛与武宁下游交界处洪水漫堤最为严重,淹没纵深向内延伸最远距离约为 153 m,其中最大水深值出现在大洋岛段,达 4.3 m,而修水大桥左岸处有一低洼处漫堤明显,淹没纵深向内延伸最远距离约为 290 m,其余几处漫溢洪水水深多集中在 1 m 以内且只是在沿岸稍有漫溢过堤。图 4(b)为干、支流同时发生 50 a 一遇暴雨时的典型情景,可知在这个情景下县城六处

均漫堤严重,较情景 25 淹没洪水向内扩散更广,淹没水深更深,其中最大水深出现在大洋岛段,达 5.6 m,大洋岛与主城中段、马家岛左右岸均出现严

重的漫堤现象,且均有居民房屋被淹,淹没纵深向内延伸最远距离分别约为 230、373 和 257 m。

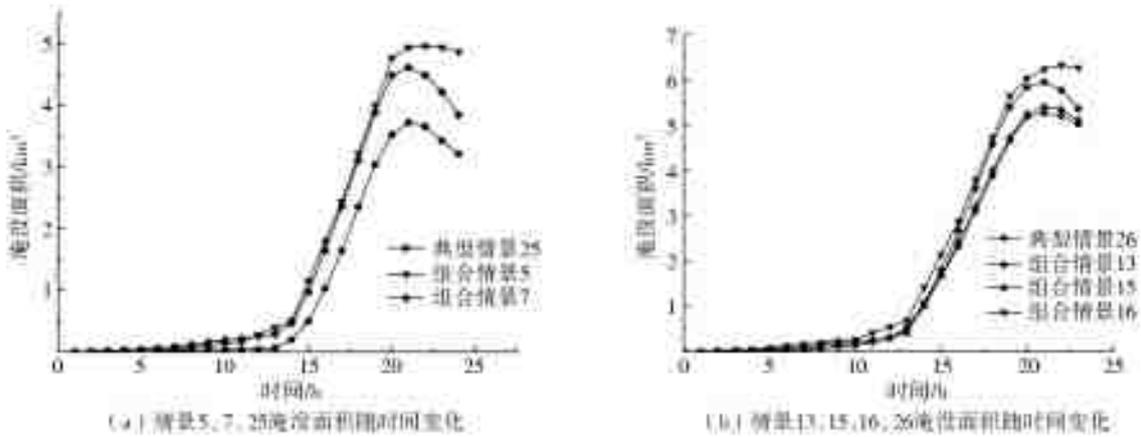


图 3 各情景淹没面积随时间变化过程  
Fig. 3 Change in area of submerged area over time

从图 4(c)组合情景 5 的淹没水深分布图可得,较典型情景 25,县城六处除修水大桥右岸外其余几处淹没范围与水深均有较大增加,大洋岛与主城中段出现一处居民房屋被淹的严重漫堤现象,此处最大水深为 3.4 m,淹没纵深向内延伸最远距离约为 183 m,最大水深出现在武宁下游处,达 6.7 m。从图 4(d)组合情景 16 的淹没水深分

布图可得,较典型情景 26,武宁下游、大洋岛与主城三处的淹没范围与水深均有较明显的增加,其中淹没最为严重的在武宁下游与大洋岛交界处和大洋岛与主城中段,两处淹没纵深向内延伸最远距离分别约为 406 m 与 603 m,其较典型情景分别增加约 223 m 和 338 m,最大水深出现在武宁下游处,为 7.1 m。

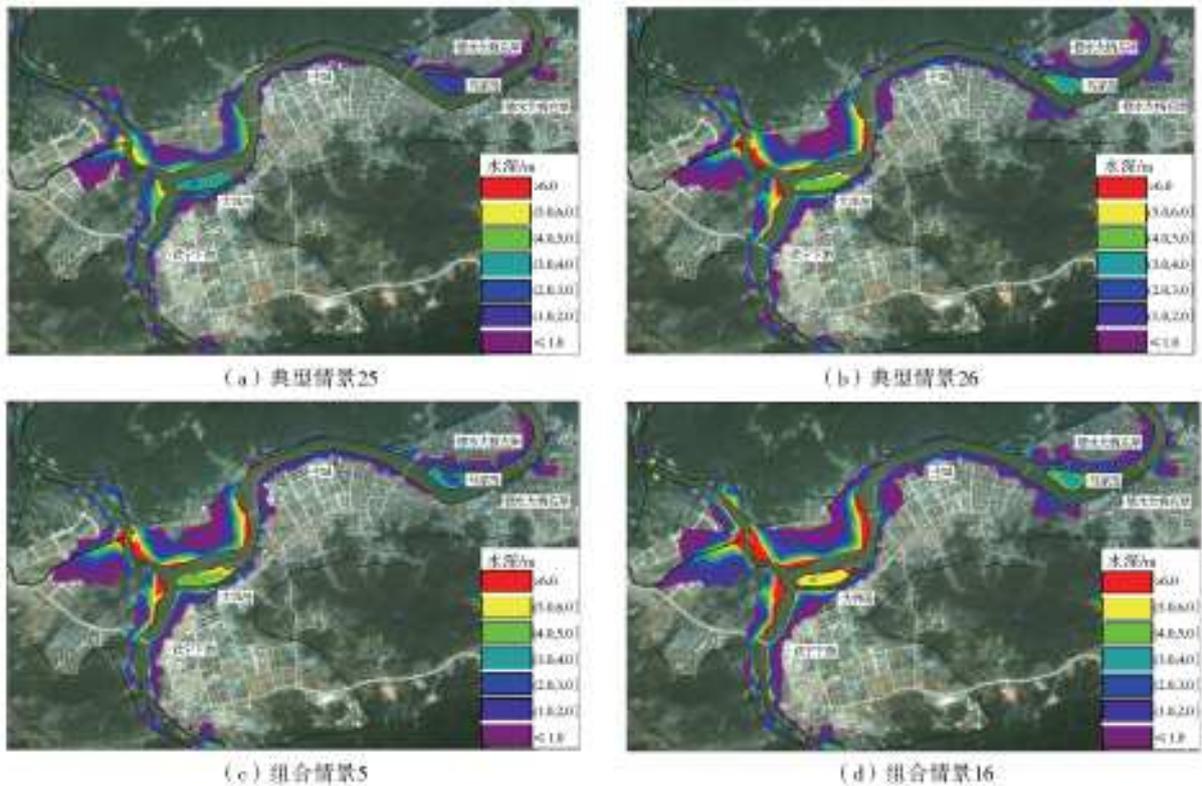


图 4 典型情景与组合情景淹没水深分布

Fig. 4 Submerged depth distribution in typical scenarios and combined scenarios

由图 5(a)组合情景 5 与典型情景 25 水深分布作差图可知,情景 5 与典型情景的淹没水深相差值

在武宁下游至主城段集中在 1.0~1.5 m,在主城至修水大桥段集中在 0.5~1.0 m,且局部相差值能达

到 2.0 m 以上。由图 5(b)组合情景 16 与典型情景 26 水深分布作差图可知,情景 16 与典型情景的淹没水深相差值在武宁下游与主城段的近河岸集中于

0.5~1.0 m,且大洋岛至主城段出现一处水深相差值达 2.0 m 以上的部分,其余几处水深相差值均集中于 0.5 m 以下。

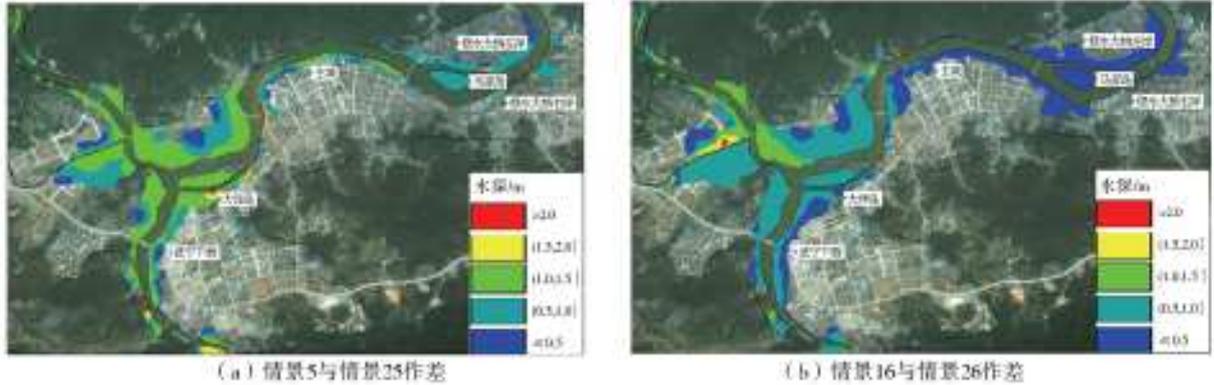


图 5 组合情景与相应典型情景水深分布作差

Fig. 5 Water depth in combined scenario minus that in the corresponding typical scenario

表 4 为情景 5 与情景 16 与相应典型情景洪水影响统计,可知在干流分别发生 20 a 与 50 a 一遇暴雨的基础上,典型情景与组合情景的淹没面积相差最大均集中在淹没水深大于 2 m 的深水区,其中深水区所占面积比例最大的情景为组合情景 26,达到 55.8%。

表 4 各情景洪水淹没影响统计

Tab. 4 Statistics on the impact of flood inundation

研究区域淹没水深/m	情景 25	情景 5	情景 26	情景 16
	淹没面积/ km <sup>2</sup>	淹没面积/ km <sup>2</sup>	淹没面积/ km <sup>2</sup>	淹没面积/ km <sup>2</sup>
浅水区(<1)	1.05	1.26	1.47	1.48
中水区(1~2)	1.18	1.06	1.15	1.32
深水区(>2)	1.58	2.65	2.80	3.54
总和	3.81	4.97	5.43	6.34

综合分析上述各图可知,选取的县城几处区域防洪能力基本上满足典型情景的 20 a 一遇,但是修水大桥右岸处有一低洼地易被淹,当发生以干流 20 a 一遇洪水为基础的组合情景时,大洋岛与主城中段一处居民房屋较多地易被淹没,故此处不满足该组合情景下洪水的防洪能力,当发生 50 a 一遇的典型情景时,马家岛左右岸与大洋岛与主城中段均极易被淹,且洪水向内蔓延明显,这三处均是居民房屋集中部分,当发生以干流为 50 a 一遇洪水为基础的组合情景时,淹没情况和 50 a 一遇典型情景基本一致,但是大洋岛与武宁下游交接处较典型情景 26 漫堤更为严重。以上提到的修水大桥右岸处低洼地、马家岛左右岸、大洋岛与主城中段和大洋岛与武宁下游交接处均处于河流流向急剧变化或河中有一巨大岛屿的区域,因此河内洪水极易上涨,且这几处

居民房屋密集,均是防洪设施需要完善的重点之处,洪水一旦漫堤会造成严重的影响。针对以上得出的防洪重点之处,可提高各处堤防防洪标准,并定期清理河道的淤泥,而极易被淹的修水大桥右岸低洼处,淹没水深较浅的河岸远端可架高房屋,淹没水深较深的近岸可实施对原有房屋的搬迁,并设立详细说明洪涝水情特征、灾害损失情况的警示牌。

从组合情景与典型情景比较中可以得出,较典型情景而言,由于选取出的组合情景遭遇的干、支流洪水量级更大,从而引起漫堤洪水淹没水深的增大,洪水淹没水深的增大导致其向内漫堤更严重,淹没面积就变得更广,因此组合洪水带来的灾害与损失也更大。

## 4 结论

本文综合运用现代水文学模型、河流水动力学理论及 ArcGIS 遥感数据,在缺乏水文观测资料的情况下,建立了 Mike11 一维水动力模型、Mike21 二维水动力模型与 MikeFlood 耦合模型,并根据县城现有的防洪标准以及流经的河流制定洪水组合方案,模拟了干、支流发生不同频率的暴雨之下,研究区域的淹没情况,对比分析了 5 种组合情景与相应典型情景的淹没面积随时间变化的结果,选取出了两种具有代表性的组合情景分别与相应的典型洪水情景从淹没水深分布、最大淹没面积分布进行比较分析,得出以下结论。

(1)修水大桥右岸低洼地处于沿河低洼地带,频率较高的典型洪水(20 a 一遇)就能对其造成范围较大的淹没,淹没纵深向内延伸最远距离可达 290 m,洪水危险性大,此区域应是今后修水县防洪避险转

移的重点区域。

(2)较典型情景,组合情景淹没面积在洪水扩散时的增加更为持久,且增加面积可达 1.16 km<sup>2</sup>,占相应典型情景面积的 30.4%,淹没纵深向内延伸最远距离的增加可达约 338 m,洪水淹没水深局部增加可达 2.7 m,故采用单一频率洪水情景进行风险评估易造成对实际来临洪水灾害的低估,而本文制定的组合频率洪水情景则更能多样性地反映发生洪水时淹没造成的灾害,为丘陵地区漫堤洪水的灾害性分析方案提供了新的制定思路,并可为其洪水演进风险预报和紧急避洪转移提供决策依据。

#### 参考文献(References):

- [1] RAHMAN Md M, ARYA D S, GOEL N K. Design Flow and Stage Computations in the Teesta River, Bangladesh, using frequency analysis and MIKE 11 Modeling [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(2): 176-186. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000299.
- [2] RIYAZ AHMAD MIR, SANJAY K JAIN, A K LOHANI, et al. Glacier recession and glacial lake outburst flood studies in Zaskar basin, western Himalaya[J]. Journal of Hydrology, 2018 (564): 376-396. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.05.031.
- [3] 周洁,董增川,朱振业.基于 Mike Flood 的洪泽湖周边滞洪区洪水演进模拟[J].南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 56-62. (ZHOU J, DONG Z C, ZHU Z Y. Flood Simulation of flood depression area around Hongze Lake based on Mike Flood[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2017, 15(5): 56-62. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkk.2017.05.009.
- [4] 李艳红,周华君,时钟.山区河流平面二维流场的数值模拟[J].水科学进展, 2003, 14(4): 424-429. (LI Y H, ZHOU H J, SHI Z. Numerical simulation of two-dimensional flow field in mountain river[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 424-429. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2003.04.007.
- [5] 解刚.山区河流平面二维泥沙数学模型[D].成都:四川大学, 2004. (XIE G. Mathematical model of two-dimensional sediment in mountain rivers [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. (in Chinese))
- [6] 陈一帆,程伟平,蒋建群,等.含水工建筑物的山区河流二维流场数值模拟[J].浙江大学学报(工学版), 2013, 47(11): 1945-1950. (CHEN Y F, CHENG W P, JIANG J Q, et al. Numerical simulation of two-dimensional flow field of mountain rivers with water-bearing structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(11): 1945-1950. (in Chinese)) DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2013.11.009
- [7] 姜治兵,崔丹,程子兵.坝体溃决过程与溃坝洪水演进耦合数值模拟[J].长江科学院院报, 2018, 35(5): 63-67. (JIANG Z B, CUI D, CHENG Z B. Coupling numerical simulation of dam body collapse process and dam failure flood evolution [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(5): 63-67. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20171175.
- [8] 藏兴科.基于 GIS 耦合 HEC-RAS 的城市洪水灾害风险评估:以重庆市主城区长江、嘉陵江段为例[J].吉林水利, 2017(3): 52-27. (ZANG X K. Risk Assessment of urban flood disaster based on GIS-Coupled HEC-RAS; Taking the Yangtze River and Jialing River section of Chongqing main City as an example[J]. Jilin Water Resources, 2017(3): 52-27. (in Chinese)) DOI: 10.16867/j.cnki.cfdm.2016.02.014.
- [9] Danish Hydraulic Institute(DHI). Mike11: a modeling system for rivers and channels user guide [M]. Copenhagen: Danish Hydraulic Institute, 2013.
- [10] Danish Institute(DHI) Mike21 flow model FM; hydrodynamic module [M]. Copenhagen: Danish Hydraulic Institute, 2013.
- [11] Danish Hydraulic Institute(DHI). MikeFlood; 1D-2D modeling user manual [M]. Copenhagen: Danish Hydraulic Institute, 2013.
- [12] 刘卫林,梁艳红,彭友文.基于 Mike Flood 的中小河流溃堤洪水演进数值模拟[J].人民长江, 2017, 48(7): 6-10. (LIU W L, LIANG Y H, PENG Y W. Numerical simulation of flood routing evolution of small and medium-sized rivers based on Mike Flood [J]. People's Yangtze River, 2017, 48(7): 6-10. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.07.002.
- [13] 侯燕,马山玉.基于 Mike 与 GIS 的城市洪水风险分析及应用[J].水电能源科学, 2016, 34(11): 72-76. (HOU Y, MA S Y. Analysis and application of urban flood risk based on Mike and GIS [J]. Hydroelectric Energy Science, 2016, 34(11): 72-76. (in Chinese))
- [14] 魏凯,梁忠民,王军.基于 MIKE21 的濠洼蓄滞洪区洪水演算模拟[J].南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 16-19. (WEI K, LIANG Z M, WANG J. Simulation of flood calculation in Mengyu flood detention area based on MIKE21 [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2013, 11(6): 16-19. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.06016.
- [15] 吴天蛟,杨汉波,李哲,等.基于 MIKE11 的三峡库区

- 洪水演进模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 51-57. (WU T J YANG H B, LI Z, et al. Simulation of flood evolution in the Three Gorges reservoir area based on MIKE11[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 51-57. (in Chinese))
- [16] 金玲, 许士国, 于德全. 中小河流洪水风险分析中的洪水演进计算研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 48-51. (JIN L, XU S G, YU D Q. Research on flood evolution calculation in flood risk analysis of medium and small rivers[J]. Hydroelectric Energy Science, 2014, 32(10): 48-51. (in Chinese))
- [17] 初 祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于 Mike11 和 Mike21 的城市暴雨洪涝灾害风险分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 446-451. (CHU W, PENG D Z, XU Z X, et al. Risk analysis of urban storm and flood disaster based on Mike11 and Mike21 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, 50(5): 446-451. (in Chinese))
- [18] 施 露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 351-357. (SHI L, DONG Z C, FU Xi H, et al. Application of Mike Flood in risk analysis of floods in medium and small rivers[J]. Journal of Hohai University, 2017, 45(4): 351-357. (in Chinese)) DOI 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2017. 04. 011.
- [19] 叶爱民, 刘曙光, 韩 超, 等. Mike Flood 耦合模型在杭嘉湖流域嘉兴地区洪水风险图编制工作中的应用[J]. 研究探讨, 2016, 26(2): 56-60. (YE A M, LIU S G, HAN C, et al. Application of Mike Flood coupling model in the compilation of flood risk map in Jiaying area of Hangzhou-Jiaying-Huzhou basin [J]. Research, 2016, 26(2): 56-60. (in Chinese)) DOI: 10. 16867/j. cnki. cfdm. 2016. 02. 014.
- [20] 何典灿, 周建中, 江炎生, 等. 基于 MIKE 的杜家台洪道行洪能力研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(9): 52-56. (HE D C, ZHOU J Z, JIANG Y S, et al. Research on flooding capacity of Dujiatai flood road based on MIKE[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(9): 52-56. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20160514.
- [21] 郭凤清, 屈寒飞, 曾 辉. 基于 Mike21 的滙江蓄滞洪区洪水危险性快速预测[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3): 144-152. (GUO F Q, QU H F, ZENG H. Rapid prediction of flood risk in the Lujiang River flood detention area based on Mike21[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(3): 144-152. (in Chinese)) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2013. 0320.
- [22] 衣秀勇. DHI Mike Flood 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (YI X Y. Application and research of DHI Mike Flood flood simulation technology [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2014. (in Chinese))
- [23] 张念. 桥墩壅水的数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. (ZHANG N. Numerical simulation of bridge pier drowning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))

.....

(上接第 53 页)

- [23] 曾晟轩, 顾娟, 贺缠生. 西北农牧交错带中部气候变化特征及其持续性[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 356-364. (ZHENG S X, GU J, HE C S. Variability and persistence of climate in the agricultural pastoral transitional zone in the central part of the northwest China[J]. Research of soil and water conservation, 2018, 25(4): 356-364. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2018. 04. 052.
- [24] 王怀清, 殷剑敏, 孔萍, 等. 鄱阳湖流域千年旱涝变化特点及 R/S 分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1215-1220. (WANG H Q, YIN J M, KONG P, et al. Variation of drought and flood over the last millennium in poyang lake basin by R/S analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze basin, 2015, 24(7): 1215-1220. (in Chinese)) DOI: 10. 11870/cj-lyzyyhj201507019.
- [25] 邱海军, 曹明明, 胡胜, 等. 近 60a 来中国洪涝灾情变化趋势持续性和周期性研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(1): 17-23. (QIU H J, CAO M M, HU S, et al. Susceptibility and periodicity of flood disasters since the 1950s in China[J]. EARTH AND ENVIRONMENT, 2014, 42(1): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10. 14050/j. cnki. 1672-9250. 2014. 01. 015.
- [26] INESON S, SCAIFE A A, KNIGHT J R, et al. Solar forcing of winter climate variability in the northern Hemisphere[J]. Nature Geoscience, 2011, 4(11): 753-757. DOI: 10. 1038/ngeo1282.