

排水管网系统堵塞与拍门对城市水动力过程的影响研究

蒋卫威¹, 鱼京善¹, 陈基培², 陈寅生³, 刘艳民¹, 刘源¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 珠江水资源保护科学研究所, 广东 广州 510611; 3. 泉州市晋江河道堤防管理处, 福建 泉州 362000)

摘要: 为揭示管网系统堵塞与防倒灌拍门对城市水动力过程的影响,以东南沿海山区小流域—梅溪流域为例,构建了山区水文城区水动力耦合模型。耦合模型经过验证,适用性较好。定量开展了管道堵塞与拍门对城市水动力过程的影响研究,结果表明:从空间上来看,识别出了堵塞不利影响最大的管段;在堵塞程度上,管段尽量不要堵塞超过内径的20%。在不同的重现期下,最大淹没水深和峰现时间对堵塞不敏感,而高重现期下,淹没历时对堵塞十分敏感。此外,管网系统排水口安装防倒灌拍门后,各重现期的最大淹没水深与最大淹没面积均略有减小。更重要的是,拍门在减少淹没历时上发挥了积极作用。本研究可以为梅溪流域的洪水预报、管道清淤及防洪管理提供技术支撑。

关键词: 水文水动力耦合; 排水管网系统堵塞; 防倒灌拍门; 排水口; BTOPMC模型; FLO-2D模型; 山区小流域
中图分类号: TV134.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2021)01-0143-08

Impact of discharge pipe system clogging and flap gate on urban hydrodynamic process

JIANG Weiwei¹, YU Jingshan¹, CHEN Jipei², CHEN Yinsheng³, LIU Yanming¹, LIU Yuan¹

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Water Circulation and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Scientific Research Institute of Pearl River Water Resources Protection, Guangzhou 510611, China; 3. Quanzhou Channel Levee Management Bureau of Jinjiang River, Quanzhou 362000, China)

Abstract: In order to illustrate the influence of pipe system clogging and anti-backflow flap gate installation on urban hydrodynamic process, a coupling model of hydrologic and hydrodynamic was constructed based on the case study of a small catchment in the coast area of southeast China—Meixi Catchment. The coupling model is proved to be applicable. The simulation results show that the clogged conduits with the most adverse effect was identified spatially. For the degree of clogging, the conduits should not be clogged more than 20% of the inner diameter. With different return periods, the maximum inundation depth and peak time are not sensitive to clogging; however, it is not the case for inundation duration time in high return periods. In addition, when the anti-backflow flap gates are installed, the maximum inundation depth and the maximum inundation area will slightly reduce for each return period. More importantly, flap gate has played a positive role in reducing the inundation duration time. This study can provide technical support for flood forecast, conduits desilting and flood control management in Meixi Catchment.

Key words: hydrologic and hydrodynamic coupling; discharge pipe system clogging; anti-backflow flap gate; waterspout; BTOPMC model; FLO-2D model; small mountainous catchment

1 研究背景

在气候变化与人类活动的共同影响下,极端水文事件发生的概率越来越大^[1]。我国洪涝灾害多发,但关于洪水风险的管理与研究均集中在大中流域与大中城市。山区小流域的洪水预报与管理技术

等相关研究需要进一步加强^[2]。近年来,海绵城市建设在我国各大城市施行^[3],其中低影响开发能够有效地削减低重现期降雨的洪量^[4]。但在高重现期下,这些海绵城市的措施发挥作用很小,必须要协同管网系统共用作用^[5],这表明了管网系统在城市防洪排涝中发挥着更重要的作用。

收稿日期:2020-06-11; 修回日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51779007/41671018);“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0401308)

作者简介:蒋卫威(1991-),男,贵州遵义人,博士研究生,研究方向为水文学、河流动力学。

通讯作者:鱼京善(1965-),男,吉林延边人,教授,博士生导师,研究方向为水文学与水资源、河流动力学。

长期以来,学者们针对城市管网系统开展了大量研究。从手段上,SWMM, MIKE Urban, Info Works, DR3M-UQAL, FLO-2D 等众多模型应用广泛^[4-8]。例如,在不同降雨特征与不同下垫面特征下,管网系统对城市产汇流过程的差异与比较^[9-10]。也有针对于不同流域的管网排水能力、不同管网密度、管道系统概化、管网坡度与管网结构等机制的研究^[10-12]。此外,在计算方法的改进上,结合 GIS 软件和 SWMM 模型,使得管网系统对城市内涝的淹没模拟可视化^[13]。耦合管道一维与地表二维水动力模拟,实现管道溢流与地表漫流的结合^[14]。研究表明,外江或外河的顶托作用对城市管网系统排水效率有一定的影响^[15],而且可能还会导致倒灌,说明了外江水位的影响不可忽视^[16],这种情况下,单向流拍门就会产生一定的防倒灌作用。管道堵塞是城市管网系统的常见问题,往往会导致排水效率降低。因此定量开展管道堵塞对城市水动力过程影响的研究,对管道清淤与管道泄洪工程也有十分重要的作用。

2016 年 9 月,“莫兰蒂”台风登陆泉州市,强降雨引起了梅溪流域内洪濑镇城区特大洪水,城区主路东大路淹没水深达 1.8 m,梅溪沿岸农田淹没最深达 3 m,造成了极大的损失^[17-18]。在众多的致洪原因中,除极强暴雨外,管网系统堵塞与外江水位顶托^[18]均加剧了淹没程度。基于此,本研究以梅溪流域为例,构建并耦合山区水文模型、城区洪泛区二维水动力模型与管网系统一维水动力模型,分别在空间上、堵塞程度及不同重现期等方面定量研究了管网系统的响应特征。同时,定量计算了外江拍门对城市水动力过程的效应,为梅溪流域尺度下的洪水预报、城区范围内管网系统检测和清淤工作以及防洪排涝的相关工程措施提供参考。

2 研究区概况

梅溪流域位于我国东南沿海福建省泉州市南安市,降雨充沛且经常受到台风短时暴雨的影响。梅溪流域面积 101 km²,整个流域由山区与城区组成,梅溪流域概况及子流域分区见图 1。梅溪流域为山区小流域,气象、地形和水文观测数据均十分缺乏。根据山区 DEM 子流域划分,可分为 5 个子流域 S1-S5,面积依次为 6.5、55.1、1.4、1.9 和 38.4 km²。其中 S2 与 S5 面积较大,有天然河道梅溪与四都溪,并最终汇入东溪(即外江)。城区即为洪濑镇主城区,城区面积 5.4 km²。人口与建筑物密集,地势低

洼,洪水风险与损失远大于山区。由于梅溪流域的洪濑镇城区三面环山,西面为外江,在高重现期降雨下,城区易受到山区产流三面来洪。其中 S2 与 S5 区域内的梅溪和四都溪洪水进入城区后,会在两岸农田等低洼处漫堤造成洪灾;而 S1、S3 与 S4 区域的山洪则会以坡面流的方式直接进入城区并继续演进。同时,受上游来洪的影响,高重现期降雨下外江水位同样很高。虽然东溪(外江)洪水不会直接漫堤进入城区,但外江高水位对城区梅溪下游与管网系统的排水造成了顶托甚至倒灌的作用,可能会加剧洪濑镇城区范围的淹没程度。梅溪流域洪濑镇城区概况与管网系统分布见图 2。

3 研究方法

3.1 BTOPMC 水文模型

BTOPMC 是基于物理学原理的分布式流域水文模型。详细的模型介绍、原理及主要敏感参数见周碧琼等^[19]、程艳等^[20]的应用研究。研究表明^[20],BTOPMC 模型在地形差异更大的山区流域适应性较好,故本研究中利用 BTOPMC 模型分别计算 5 个山区子流域的产流量。

3.2 FLO-2D 水动力模型

由于城区下垫面复杂,借助了 FLO-2D 水动力模型模拟城区的水动力与淹没过程。FLO-2D 模型可考虑城区建筑物、街道、水工建筑、地下管网系统等,已成功应用于泥石流与河道一维、洪泛区二维坡面流淹没模拟^[17, 21]。FLO-2D 模型的基本控制方程如下。

连续方程式:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial t} = i \quad (1)$$

式中: h 为流体深度, m; t 为时间, s; u 为水平方向上的平均流速, m/s; v 为垂直方向上的平均流速, m/s; i 为有效降雨强度, mm/h。

动力波方程式:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{g} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{v}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式中: S_{fx} 、 S_{fy} 为摩擦坡降; S_{ox} 、 S_{oy} 为底床坡降。

此外,本研究中使用的 FLO-2D 2012 版本已经内嵌耦合了 EPA SWMM 5.0 模块,该模块调用一维水动力模型,实现了流域地下管网节点的排水和满管溢流等现象的模拟,从而考虑了地下管网排水

对洪泛区洪水的耦合过程。SWMM 模型介绍、原理与控制方程详见相关文献报道^[4-6]。需要说明的是,本研究只是借助了 SWMM 模块构建研究区城区地下管网系统,再导入 FLO-2D 中,而降雨、产流模块、汇流过程、管网排水及溢流等过程均在 FLO-2D 模型中设置与模拟计算。

3.3 模型耦合

本文采用了松散耦合的方法,即将多种软件模

型组合,不用修改代码,是一种最有效且最方便的多模型耦合方式。即将 BTOPMC 水文模型计算的山区各子流域产流量输出结果作为城区水动力 FLO-2D 模型的输入。因 FLO-2D 内置嵌入了 SWMM 模块,从而实现山区产流、城区河道、洪泛区及管网系统的水文与水动力模拟过程。

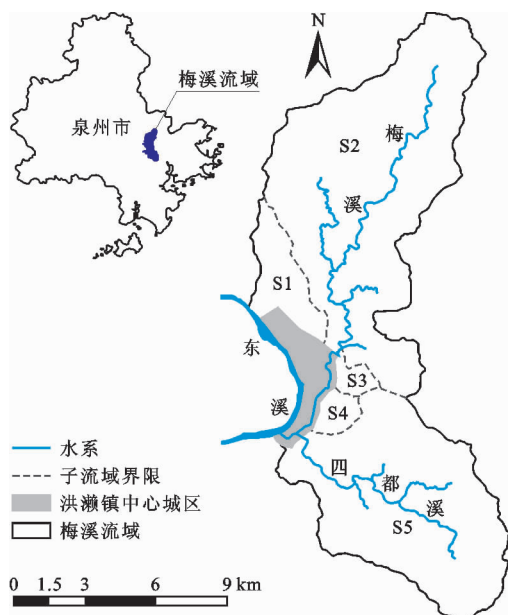


图1 梅溪流域概况及子流域分区

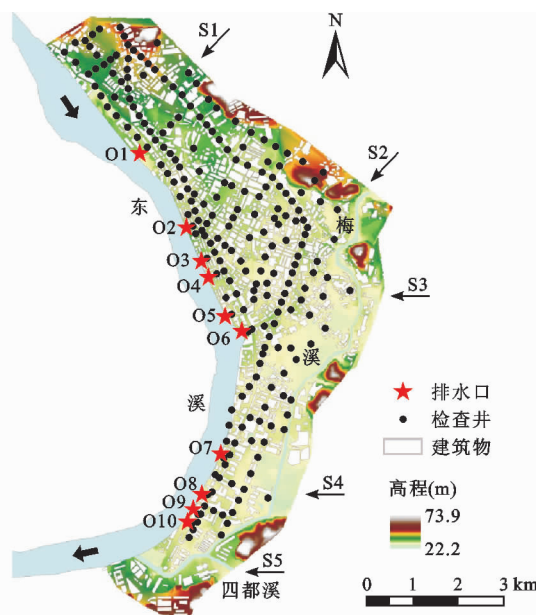


图2 梅溪流域城区概况及管网系统分布

4 耦合模型的构建与验证

4.1 数据来源

4.1.1 水文模型 水文模型所需要的降雨数据来自于流域内洪濑水文站;DEM 数据(30 m 分辨率)与土地利用数据来自地理空间数据云平台;土壤类型数据来源于中国科学院南京土壤研究所 1:100 万中国土壤图;S-W 蒸散发模型所需 NDVI 数据采用 GIMMS NDVI 遥感数据。由于梅溪与四都溪均无水文站,梅溪流域属无资料地区,故于 2019 年 3-9 月在两条河道从山区汇进城区的边界处布设了小型气象仪(JLC-QTF,每 5 min 测 1 个数据)与水位计(HOBO U20,每分钟测 1 个数据)获取到相关数据,用于率定与验证水文模型。根据获取的水位数据和断面形状,推算出了相应的河道流量,具体方法见文献[22]。

4.1.2 水动力模型 水动力模型需要的降雨数据同样来自于洪濑水文站点数据。本研究采用了无人机倾斜摄影技术,获取了城区 1 m 高分辨率的 DEM

数据,流量输入数据源于水文模型的输出。下垫面土地利用也采用了无人机航拍高清影像解析。建筑物通过高清影像利用 ArcGIS 软件等比例刻画,并导入 FLO-2D 模型中。本模型考虑建筑物的方式为设定高程法,即将建筑物看成不透水实体,建筑物内的网格与外界没有水交换和下渗。

SWMM 模块需要的地下管网系统数据来自于城区相关部门收集的管网系统资料与现场走访及调研,确定了各雨水排水口和检查井位置(见图 2)以及地下管网系统的走向、各节点高程、坡度(0.1%~2.5%)和管径(DN600~1 200 mm)。最终确定,模型中共有 229 个检查井,管段总长度为 27.5 km,管网排水长度为 196.36 m。另外,通过实地走访调研,观测了各排水口的位置、高程、形状和内径,确定管网系统有 10 个排水口,其中 O1 有可调控闸门,O2~O10 均为自由出流,各自沿江排入东溪(见图 2)。为了减少模拟过程的复杂性,本研究城区水动力模型的模拟范围不包含东溪,只需将东溪水位作为下边界输入模型中即可。梅溪河道与管网系统的下边界均为东溪水

位,数据源于东溪洪濂水文站,结合《福建省南安市洪濂镇区排涝规划报告》中东溪洪濂段沿程水面线,分别计算出了 10 个排水口各自对应的水位与梅溪东溪汇合处的水位。

4.2 模型率定与验证

4.2.1 水文模型 BTOPMC 水文模型的网格为 30 m,计算步长为 1 h。根据梅溪与四都溪河道监测获取的流量数据,对梅溪子流域 S2 和四都溪(子流域

S5)进行了率定与验证,结果见图 3。由图 3 可见,流量模拟值与实测值较为吻合,两个子流域率定期与验证期的 Nash 系数均大于 0.6。由于子流域 S1、S3 和 S4 内没有天然河道,北部 S1 和东部 S3 与 S2 相邻,东南部 S4 与 S5 相邻,故本研究中采用了相邻流域参数移植的方法。有研究发现参数移植在无资料流域具有良好的效果^[19-20],各子流域率定与验证的具体参数见表 1。

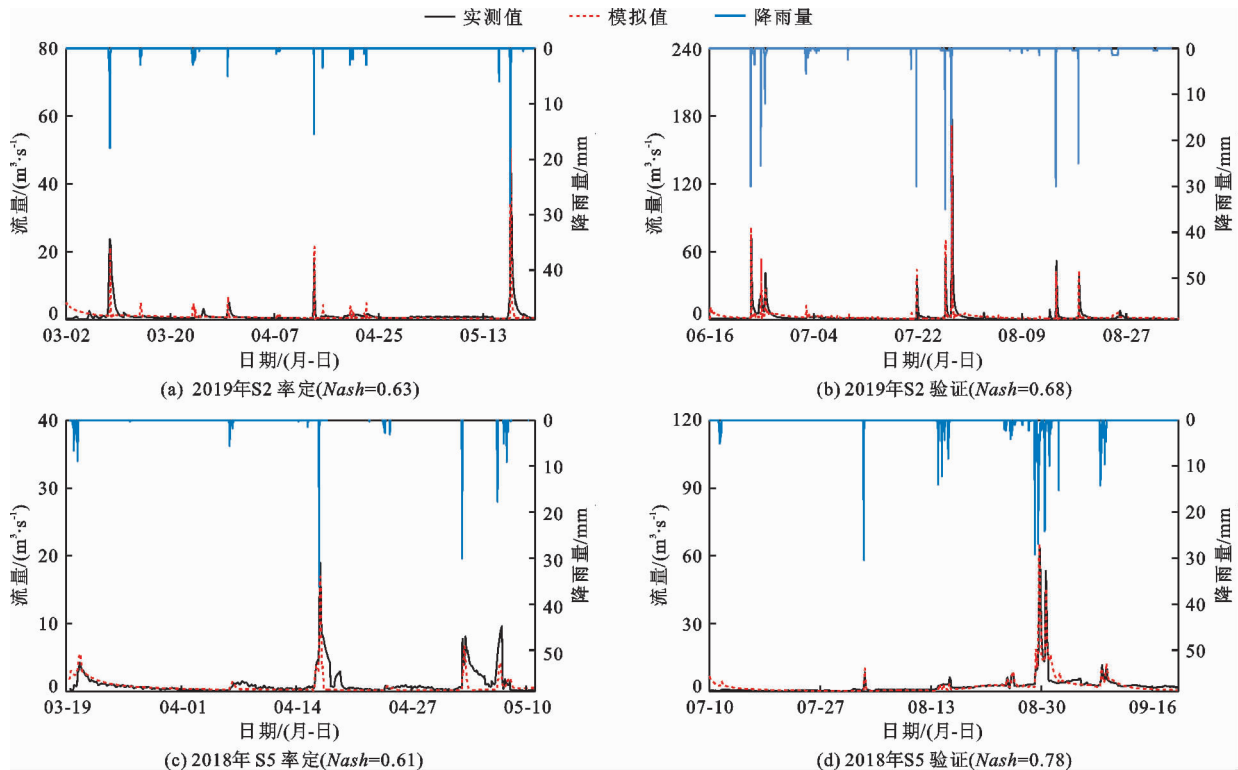


图3 BTOPMC 水文模型在子流域 S2 和 S5 的流量率定与验证结果

表1 BTOPMC 水文模型参数率定结果

区域	饱和土壤水分传导度/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)			最大根区蓄水 容量/m			流量衰 减系数	蒸发函数 参数	曼宁 系数	时间步 长/h	子河 段数
	沙土	粉土	黏土	林地	草地	耕地					
梅溪山区(S1、S2、S3)	15	10	8	0.02	0.01	0.01	0.023	4.3	0.05	1	1
四都溪山区(S4、S5)	10	15	10	0.01	0.01	0.01	0.019	3.5	0.03	1	1

4.2.2 水动力模型 水文模型参数率定与验证后,根据 2016 年“莫兰蒂”台风场景的降雨数据,计算了 2016-09-14T22:00 – 2016-09-15T23:00 山区各子流域的产流量(结果见图 4),并将其输入到 FLO – 2D 模型中。城区水动力模型的网格为 10 m,网格共计 51 265 个,计算步长为 1 s。城区下垫面由建筑物、不透水地面、河道、农田及林地构成,FLO – 2D 模型使用的下渗计算方法为 Green – Ampt 法,参考

FLO – 2D 使用手册进行下渗参数设置(见表 2)。城区不同下垫面的糙率与管网系统的糙率(见表 3)参考了相关文献[23]。

为验证水动力模型,通过现场调研获取了 2016 年“莫兰蒂”台风场景洪濂镇城区 17 处洪水淹没痕迹(即最大淹没水深),模拟计算得到的最大淹没水深分布见图 5。两者比较结果表明,17 个点位模拟最大淹没水深值与实测值的绝对误差平均值为 0.13

m,平均相对误差 9.3% (见图 6),可见水文水动力耦合模型的计算结果良好。此外,模拟结果(图 5)还显示,梅溪沿岸的农田淹没水深达到了 3 m,虽然城中心建筑密集区和主干道(即图 5 中重点区域)的淹没水深只有 1.5 m 左右,但关注度与风险更高,东大路中段重点区域内的峰现时间为 15 日 12 时左右,这与笔者在现场调研及事后新闻报道的时间大致相同,进一步的说明了耦合模型的适应性较好。

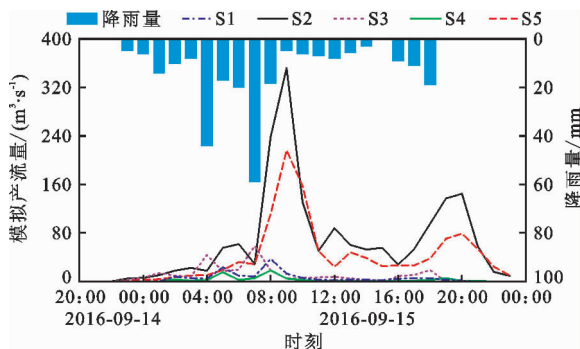


图 4 “莫兰蒂”台风场景下山区各子流域的产流量计算结果

表 2 FLO-2D 水动力模型下渗参数设定

下垫面类型	水力传导系数 $/(mm \cdot h^{-1})$	土壤水吸力/mm	土壤缺水度	降雨填洼/mm	土壤深度/m
林地	4.5	88.90	0.30	5.3	3
农田	9.1	109.22	0.35	3.1	3
河道	2.5	88.90	0.10	0.5	3

表 3 FLO-2D 模型不同下垫面与管道糙率设置

下垫面类型	相关描述	糙率 n
不透水地面	沥青路面	0.040
农田	普通耕地	0.150
林地	稀疏树木	0.400
河道	多石河床、多草河岸	0.035
管网系统	内有泥、石及其他杂物	0.013

5 模型应用与分析

5.1 不同降雨重现期下管网系统的响应特征

由于研究区气象数据十分缺乏,故根据南安市暴雨计算公式^[17],分别设计了 6 种不同重现期的降雨数据。降雨雨型采用芝加哥雨型,雨峰系数为 0.5。不同重现期的设计暴雨强度及 3 h 累计降雨量见表 4,不同降雨重现期下研究区管网系统的响应计算结果见图 7。由图 7 可以看出,节点平均超渗时间的占比与溢流节点数的占比变化趋势基本一致;在 1 a 低重现期下,超渗管段数的占比即达到了

36%,在 100 a 重现期下甚至可以达到 90%。这可能是因为管道系统的管径整体较小,总体排水能力较弱所致。有研究也得出了类似的结果,超渗比例在 1 a 重现期就达到了 38%^[6]。由于洪濂镇主城区管网排水口中有 9 个为自由出流,高重现期下外江(东溪)高水位会导致洪水倒灌入管网系统中。降雨重现期为 10 a 以上就会产生少量外江水倒灌,而降雨重现期为 20 a 以上时,外江水倒灌量占地表汇入管网系统总水量的比例为 15% 左右,从而加剧了城区地表的淹没状况。

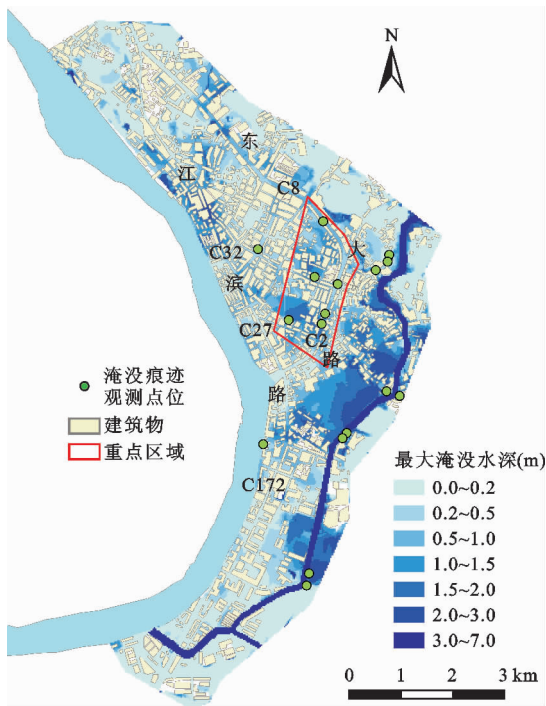


图 5 “莫兰蒂”台风场景洪濂镇城区模拟最大淹没水深分布

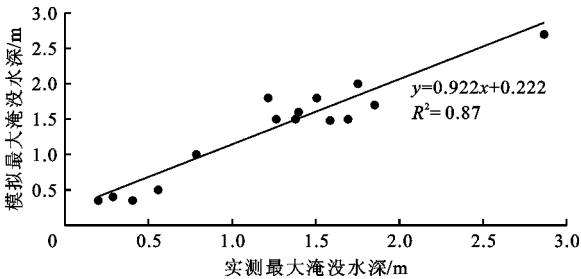


图 6 FLO-2D 水动力模型最大淹没水深验证结果

表 4 不同重现期研究区设计暴雨强度及 3 h 累计降雨量

重现期/a	暴雨强度/ $(mm \cdot min^{-1})$	累计降雨量/mm
1	0.41	72.70
5	0.52	93.55
10	0.59	107.08
20	0.67	120.62
50	0.76	138.52
100	0.84	152.06

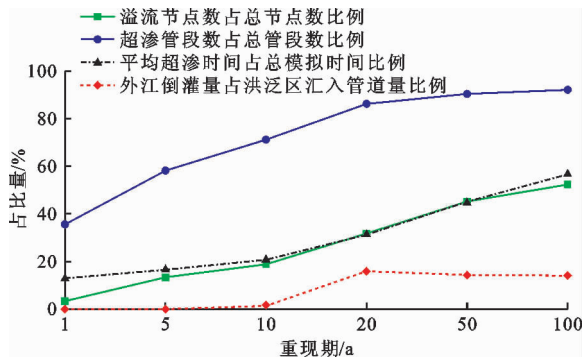


图7 不同降雨重现期研究区管网系统的响应特征

5.2 管道系统堵塞的影响

由2017年南安市洪濑镇开展的东大路管道检测工程报告可知,东大路地下主管道有不同程度的泥沙、碎石与杂物堆积,比较严重的局部管段,1.2 m内径的管道就堵塞了25 cm左右,约占管道内径的20%。管网系统的现状使低重现期降雨也会发生部分饱和超渗状况,因此,在2016年“莫兰蒂”台风场景的淹没情况中,管道堵塞很可能带来了不利效应。

SWMM模型中,通过设定管道中沉积物不同淤积深度来实现管道不同堵塞程度的模拟。为判别出城区空间上不同位置管段堵塞对淹没过程的影响,选择了洪濑镇城区内两条主路不同位置下方5处坡度较小、可能易堵塞的代表性管段(东大路和江滨路C2、C8、C27、C32、C172管段,见图5),分别计算2016年“莫兰蒂”台风场景下管道堵塞20%后对城区淹没状况的影响。所选择的管段均为主管道(内径1 200 mm,为最大),其主要参数见表5,各管段堵塞20%后对城区淹没状况影响的模拟结果见图8。由图8可看出,与无堵塞状况相比,东大路中段C2管段堵塞造成的影响最大;各个管段相比,虽然最大淹没面积相差不大,但C2管段明显增大了管道溢流总水量,且重点区域淹没历时对C2管段堵塞的响应更大,增量达到了7%。因此,应该对东大路中段的管段进行常年重点监测。

表5 洪濑镇城区管网系统不同位置各代表性管段主要参数

管段编号	管段长度/m	管径/mm	管段坡度/%	管段位置
C2	98.43	1200	0.10	东大路中段
C8	103.62	1000	0.20	东大路上段
C27	206.66	1200	0.10	东大路下段
C32	76.13	1200	0.10	江滨东路,02附近
C172	137.02	1200	0.15	江滨西路,05附近

同样在2016年“莫兰蒂”台风场景下,C2管段不同程度堵塞对城区淹没状况影响的模拟结果见图

9。由图9可看出,最大淹没面积虽然随着C2管段堵塞程度的增大而增大,但增幅很小;重点区域淹没历时在堵塞10%时的增量为3.7%,而堵塞20%后,淹没历时对堵塞的影响开始变得敏感(淹没历时增量>5%);堵塞程度由10%变为20%的情况下,管道溢流水量明显增大。综上所述,C2管段堵塞程度达到20%后对淹没历时的影响较大,因而,在对城区主管网系统清淤时,应尽量将堵塞程度减少到10%以下。

此外,还分别计算了C2管段堵塞20%的情况下对不同降雨重现期城区重点区域淹没状况的影响,结果见图10。由于计算中仅设置了C2管段堵塞20%,而该管段长度仅为98.43 m,占整个管网系统长度的比例很小。因此,各个降雨重现期下整个系统的溢流节点数、超渗管段数与平均超渗时间的变化都不大。由图10中地面洪泛区的淹没情况来看,堵塞对城区重点区域的平均最大淹没水深、平均峰现时间与平均淹没历时影响最大的降雨重现期分别为10、5及20 a;随着降雨重现期的增加,堵塞贡献比均基本表现为先增大后减小,这种中间降雨重现期出现最大堵塞贡献比的原因,可能是在更高重现期下,最大淹没水深、峰现时间及淹没历时的基数比上一个重现期增大了很多,导致堵塞的贡献比可能会低于上一个重现期。其次,各重现期下,最大淹没水深与峰现时间对堵塞的响应不敏感(见图10(a)、10(b))。而在10 a重现期以上,淹没历时对堵塞十分敏感,在20、50和100 a降雨重现期下,堵塞贡献比分别达到了38%、11%和10%(见图10(c))。

5.3 排水口拍门的效应

管网系统排水口O2~O10均为自由出流,当外江水位压力大于管网系统的压力时,外江水会大量倒灌入管网系统中,因此单向的防倒灌拍门具有一定的作用。FLO-2D模型自带外江水位边界条件开闭设定,从而可等效实现单向流动拍门的模拟。由于在低降雨重现期下不会出现倒灌现象(见图7),因此分别计算了20、50和100 a降雨重现期下管网系统排水口全部安装拍门后对城区重点区域淹没状况的影响。

计算结果表明:峰现时间对拍门不敏感;相对于无拍门情况,安装拍门后最大淹没水深略有降低,但降幅均在2%以内;有拍门的情况下20、50和100 a降雨重现期的最大淹没面积分别减少了1.4%、2.9%和1.1%。可见安装拍门对最大淹没水深和最大淹没面积均有正面作用,但作用很小。安装拍

门对城区重点区域淹没历时的影响计算结果见图11,由图11可知,拍门有效地缩短了城区重点区域的平均淹没历时。20、50和100 a降雨重现期的淹没历时平均分别减少了0.75、0.68和1.12 h。分析城区重点区域内东大路最低洼点的淹没过程线(见图12)可以发现,安装拍门后各降雨重现期下,峰现

时间几乎没有变化,最大淹没水深略降低了1~3 cm左右,但淹没过程线消退的时间明显缩短。20、50和100 a降雨重现期下拍门对缩短淹没历时的贡献率分别为13.5%、5.4%和6.9%。因此,安装拍门对减轻城区重点区域高降雨重现期下的淹没程度有明显的作。

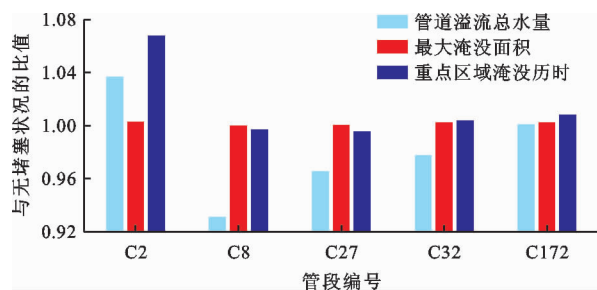


图8 各代表性管段堵塞20%对城区重点区域淹没状况的影响

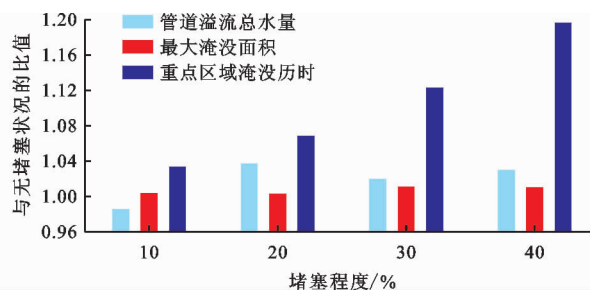


图9 C2管段不同程度堵塞对城区重点区域淹没状况的影响

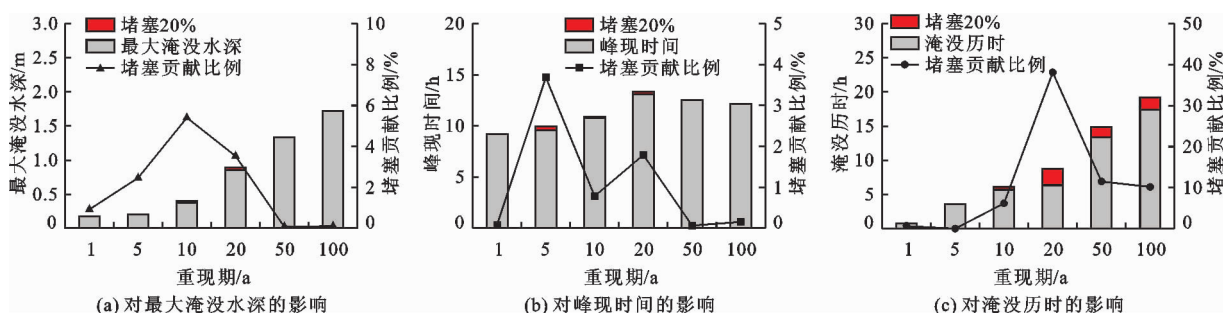


图10 C2管段堵塞20%对不同降雨重现期城区重点区域淹没状况的影响

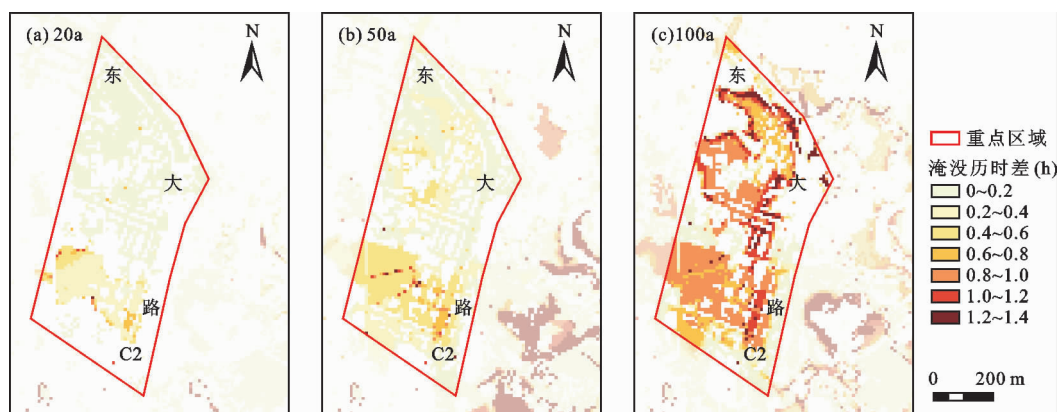


图11 拍门对不同降雨重现期下城区重点区域淹没历时的影响

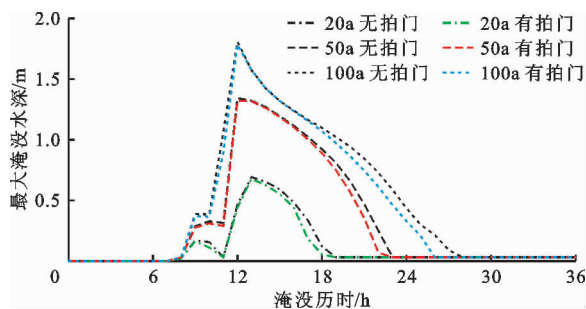


图12 不同降雨重现期下城区重点区域内东大路最低洼处的淹没过程线

6 结 论

(1)以山区小流域梅溪流域为例,构建了山区水文、城区管网系统一维水动力与洪泛区二维水动力耦合模型。水文模型通过实测数据率定与验证, Nash 系数均大于0.6。水动力模型采用实测最大淹没水深验证,平均相对误差为9.3%。表明水文模型和耦合模型的模拟结果较好。

(2)定量研究了管网系统堵塞对城市水动力过

程的影响。在空间上,识别出了东大路中段管道堵塞对城区淹没状况的不利影响最大;在堵塞程度上,管道堵塞程度达到 20% 后的影响明显增大。随着重现期的增加,管道堵塞对最大淹没水深、峰现时间和淹没历时的贡献比例均基本表现为先增大后减小。其中,最大淹没水深和峰现时间对管道堵塞不敏感,而在 10 a 降雨重现期以上,淹没历时对管道堵塞十分敏感。

(3) 定量研究了排水口安装防倒灌拍门对城市水动力过程的作用。安装拍门后,各重现期的最大淹没水深和最大淹没面积均略有减小;拍门最大的作用是有效缩短了城区重点区域的平均淹没历时,在 20、50 和 100 a 降雨重现期下,拍门对缩短淹没历时的贡献率分别为 13.5%、5.4% 与 6.9%,表明安装拍门对减轻城区重点区域高降雨重现期下的淹没程度有明显的作用。

参考文献:

- [1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594–605.
- [2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485–491.
- [3] 夏军,张永勇,张印,等. 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J]. 人民长江, 2017, 48(20): 1–5.
- [4] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于 SWMM 模型的城市雨洪模拟与 LID 效果评价——以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(11): 84–93.
- [5] 马萌华,李家科,邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62–72.
- [6] 薛偲琦,张瑛,李一平,等. 基于 SWMM 的南京市内秦淮河中段管网排水能力分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 169–173.
- [7] 黄子千,庞博,任梅芳,等. 基于 InfoWorks ICM 的济南市少年路暴雨内涝模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 160–166.
- [8] 任梅芳,徐宗学,初祁,等. 济南市历下区立交桥区域暴雨内涝积水模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 9–15.
- [9] ZHOU Qianqian, REN Yi, XU Miaomiao, et al. Adaptation to urbanization impacts on drainage in the city of Hohhot, China[J]. Water Science & Technology, 2016, 73(1): 167–175.
- [10] MEIERDIERCKS K L, SMITH J A, BAECK M L, et al. Analyses of urban drainage network structure and its impact on hydrologic response[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 46(5): 932–943.
- [11] 吕恒,倪广恒,田富强. 排水管网结构概化对城市暴雨洪水模拟的影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37(11): 99–106.
- [12] OCHOA – RODRIGUEZ S, WANG Lipen, GIRE S A, et al. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 389–407.
- [13] 石赞赞,万东辉,陈黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(6): 57–60.
- [14] JANG J H, CHANG T H, CHEN Weibo. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 168–180.
- [15] 罗文兵,王修贵,史德亮,等. 平原湖区外江水位变化对排涝流量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 126–132.
- [16] 姜蓉,邵银霞,李光炽. 外河对城市排水管网影响的数值模拟研究[J]. 水力发电, 2017, 43(10): 94–98.
- [17] 黄秋森. BTOPMC 与 FLO2D 耦合模型在小流域洪水预报中的应用[D]. 北京: 北京师范大学, 2018.
- [18] 余富强,鱼京善,蒋卫威,等. 梅溪流域“莫兰蒂”台风暴雨洪水分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(3): 5–8.
- [19] 吴碧琼,周理,黎小东,等. 基于 BTOPMC 的无资料区水文模拟及相似性分析[J]. 人民长江, 2015, 46(4): 21–25.
- [20] 程艳,黎小东,吴碧琼,等. BTOPMC 模型在无资料地区的径流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 46–49.
- [21] PENG S H, LU S C. FLO – 2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in Southeastern Taiwan during Typhoon Morakot [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(2): 207–218.
- [22] 周方录,黄金柏,王斌. 基于栅格的不规则断面水深–流量关系曲线确定方法[J]. 水资源研究, 2013, 2(2): 109–113.
- [23] 李炜. 水力计算手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.