

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.013

基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟

栾震宇¹, 金秋^{1,2}, 赵思远², 蒋 姣², 卢 翔³

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 基于 MIKE FLOOD 平台, 将 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型耦合, 建立城市内涝模型, 对湖南省新化县典型区域的排涝情景进行模拟, 结果表明该模型适用于城市内涝风险评估管理。评价结果表明, 新化县目前建成的城市管网仍存在部分不合理的管段, 水量难以立即排入资江或花山渔场, 使老城区的整体排水能力受限, 部分区域达不到设计规划的排水标准; 城内主要的调蓄湖泊及暗渠均能满足 20 年一遇的设计标准; 虽然现有的泵站系统能满足排水的需要, 但区域内的 5 处易涝点仍需要采用对应的处理方案。

关键词: 城市内涝; MIKE FLOOD 耦合模型; 城市管网; 排水能力; 新化县

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)02-0081-08

Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model // LUAN Zhenyu¹, JIN Qiu^{1,2}, ZHAO Siyuan², JIANG Jiao², LU Xiang³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: Based on the MIKE FLOOD platform, MIKE URBAN and MIKE 21 model were coupled to establish an urban waterlogging model. Taking Xinhua County in Hunan Province as an example, the typical regional drainage scenarios are simulated, and the results show that the model is suitable for urban waterlogging risk assessment and management. The evaluation results show that there are still some unreasonable pipe sections in the urban pipe network built in Xinhua County. Water is difficult to be discharged into Zijiang River or Huashan fishing ground immediately, which limits the overall drainage capacity of the old urban area, and some areas cannot meet the design and planning drainage standards. The main storage lakes and culverts in the city can meet the design standard of 20-year return period. Although the existing pumping station system can meet the needs of drainage, the corresponding treatment scheme is still needed for the five waterlogging prone points in the area.

Key words: urban waterlogging; MIKE FLOOD coupling model; urban pipe network; drainage capacity; Xinhua County

由于强降水或连续性降水超过城市排水能力致使城市产生积水灾害的现象, 称之为城市内涝^[1-3]。近年来我国城市内涝灾害频发, 城市化与极端暴雨事件矛盾日益加深, 城市水文学面临巨大挑战^[4-5]。据住建部调研数据, 2008—2010 年全国有 231 个城市发生过不同程度的内涝, 占调查城市的 62%, 其中有 137 个城市一年内涝次数超过 3 次^[6]。城市内涝给居民的生命和财产安全带来了巨大威胁, 已经成为影响城市健康发展的重症之一。关于城市内涝

问题的研究也逐渐增加, 研究热点主要集中在城市内涝过程仿真与模拟、城市内涝应对管理、城市防洪排涝体系建设等方面。目前, 国内外比较成熟的城市内涝仿真模型主要有 SWMM、MIKE 等。曾照洋等^[7]利用 SWMM 一维管网模型及 LISFLOOD-FP 二维水动力模型进行耦合, 模拟了东莞市典型区域暴雨内涝情况, 实现了暴雨区淹没范围和淹没水深的模拟; 栾慕等^[8]通过 SWMM-MIKE11 耦合模型评估了桐庐县城市管网系统排水能力并绘制了内涝风险

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0402202); 湖南省水利科技项目(湘水科计[2017]230-30)

作者简介: 栾震宇(1978—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事防洪水力学研究。E-mail: zyluan@nhri.cn

通信作者: 赵思远(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水土资源规划与利用。E-mail: 15195890526@163.com

图;李品良等^[9]应用 MIKE URBAN 对成都市老城区的排水管网在不同降雨强度下承压运行情况及管点溢流情况进行模拟,并通过设置小型调蓄池和扩增管径两种途径改善城市内涝状况;黄琳煜等^[10]基于 MIKE FLOOD 平台搭建了暴雨洪涝模型,对上海市浦东新区现状雨水管网的排水能力进行评估,为排涝减灾提供对策依据。

针对城市的排水设施,构建基于一维排水管网模型及二维地表漫流模型的耦合数学模型,根据模拟结果对内涝风险进行评估分析,可为城市内涝防治工作提供一定的技术支撑。本文基于 MIKE FLOOD 平台,根据应用情境,将 MIKE URBAN 和 MIKE 21 模型进行动态耦合,从而建立城市内涝模型。选择湖南省新化县的典型区域,模拟城市内涝的演变过程,从地表淹没范围、易涝点的淹没情况及各排水管网过流能力等方面分析城市内涝形成原因,并提出相应对策,以期揭示城市内涝形成机理、查询城区内涝易发区、分析关键因素对洪水过程的影响提供参考。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

新化县地处湖南省中部偏西,资江中游,雪峰山东南麓,地处北纬 $27^{\circ}31' \sim 28^{\circ}14'$ 、东经 $110^{\circ}45' \sim 111^{\circ}41'$,东南与涟源、冷水江市交界,西南与新邵、隆回县为邻,西北与溆浦县接壤,北与安化县毗连。新化县行政区域总面积为 $3\,619.93\text{ km}^2$,县辖 19 个镇、7 个乡上渡办事处和大熊山林场、古台山林场 2 个林场。根据第六次全国人口普查统计数据,2010 年 11 月 1 日新化县域总人口为 138.77 万人。

新化县城位于资江中游河畔,资江从冷水江市的浪石滩流入境内,略呈“Z”字形贯穿城区,把城区分成城东区和城西区两部分。本次研究范围为新化县城西片区(图 1)。城区资江干流长度为 11.67 km ,河道平均坡降 0.25‰ 。老城区为雨污合流制,河东片区大部分为雨污合流制,部分新建管道为雨污分流制。根据《新化县城排水防涝设施普查报告》(2014 年 9 月),新化县城排水管涵长度共计 89.825 km ,其中合流制管道 70.803 km ,雨水管道 12.725 km ,污水管道 6.297 km 。排水管道主要分布于上梅西路、上梅东路、天华北路、城西北路等。

1.2 数据处理

1.2.1 排水管网

完善管道和节点的数据属性及类型,筛选出错误和不合理的数据,并结合实际进行一定的修正。对于管线点,主要为连接各管道的节点,其主要信



图 1 研究区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

息包括:管线点编号、管线点类别(检查井、污篦、进水口、排水口等)、平面坐标、地面高程、底部高程等。对于管线,即主要排水通道,其主要信息包括:管线起点编号、管线连接点编号、管线材料(混凝土、塑料等)、管线埋设方式(方沟、管埋等)、管径或断面尺寸(圆管为直径、方沟为长和宽)等。根据新化县 2014 年 9 月完成的城区排水设施普查工作结果,处理后的城区管网和管线点的分布见图 2。

1.2.2 土地利用类型和高程

从原始地形图中筛选出水系、房屋和街道图层信息作为土地利用类型(图 3(a))。提取 CAD 数据中的高程散点,通过 ArcGIS 对提取的高程散点进行插值,考虑道路宽度大概为 5 m ,取栅格单元尺寸 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$,生成 Raster 栅格数据文件,再将此文件转为 ASC II 格式数据(图 3(b))。

1.3 设计暴雨计算

1.3.1 基础数据导入

利用 ArcGIS、Excel、MATLAB 等对数据进行处理,将数据导入 MIKE URBAN 软件中,构建雨洪综合模型。数据包括:DEM 地形数据、检查井(Manhole)数据(井底标高、井盖高程、井直径等)、管道(Link)数据(管道长度、管道材料、管道断面形状及尺寸、坡度、高程等)、土地利用类型(房屋、道路、河道和湖泊等)、面状水体数据(水体的位置、形状、底宽、深度、边坡等)。

1.3.2 暴雨强度公式

根据新化县气象站 1983—2013 年的雨量资料编制新化县暴雨强度公式,按 GB 50014—2006《室外排水设计规范》的建议,确定暴雨强度公式为

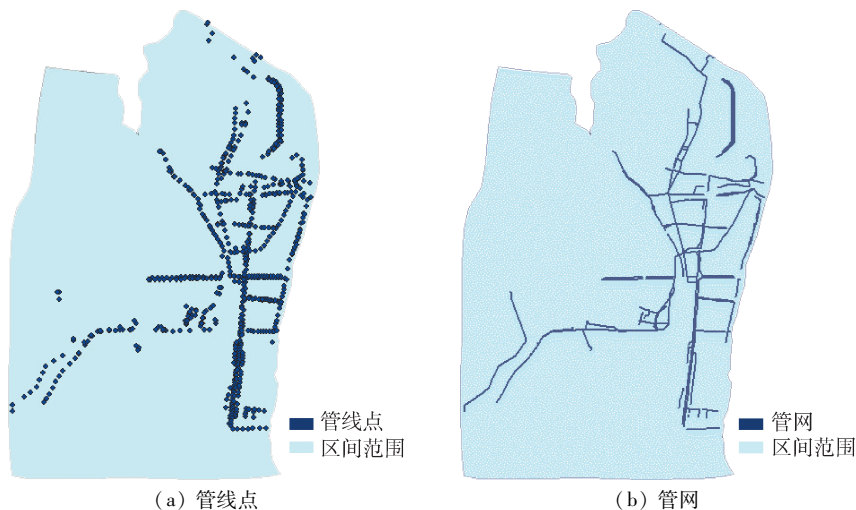


图2 管网和管线点分布

Fig.2 Distribution of pipe network and pipeline points

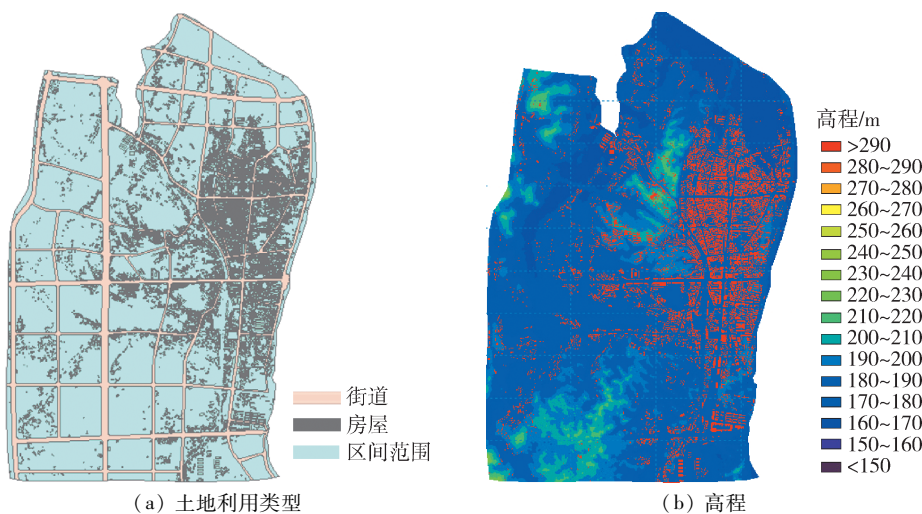


图3 土地利用类型和高程

Fig.3 Land use type and elevation

$$q = \begin{cases} \frac{1204.039(1 + 0.593\lg P)}{(t + 5.7)^{0.577}} & P < 10a \\ \frac{1057.795(1 + 0.669\lg P)}{(t + 4.6)^{0.558}} & P \geq 10a \end{cases} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; P 为设计重现期, a ; t 为降雨历时, min 。

1.3.3 设计暴雨推求

根据 SL 723—2016《治涝标准》和《新化县排水防涝综合规划》,新化县城西片的治涝标准为 10 年一遇,设计暴雨历时和涝水排除时间采用 24 h 降雨在 24 h 内排除。本次新化县城西片模型现状计算采用此标准,计算区域内最高内涝水位控制在设计水位以下,远期标准按 20 年一遇暴雨、24 h 降雨在 24 h 内排除。

为模拟市政排水管网在不同降雨情境下的状态,拟采用芝加哥雨型模型生成降雨过程。该模型

以雨强-历时关系为基础,在表示同频率最大平均强度规律的降雨强度计算模式中,引入降雨强度过程的平均形态和强度高峰位置,获得综合降雨平均强度、最强时段强度及强度过程的瞬时降雨强度,而由该瞬时降雨强度描述的降雨模式概括了强度先大后小和先小后大等特殊雨型,形成更为全面反映降雨各种特征的雨型^[11]。芝加哥雨型模型基于暴雨强度公式和雨峰系数,将国内普遍使用的暴雨强度公式根据设计频率生成动态的降雨过程^[12]。

按照上述方法,推求出 10 年一遇和 20 年一遇 24 h 历时的降雨峰值分别为 4.207 mm/min 和 5.506 mm/min、总降水量分别为 248.8 mm 和 294.8 mm,绘制 24 h 设计暴雨过程如图 4 所示。

2 城市内涝模型

2.1 MIKE URBAN 模型

MIKE URBAN 主要包括两部分^[13]:①降雨径流

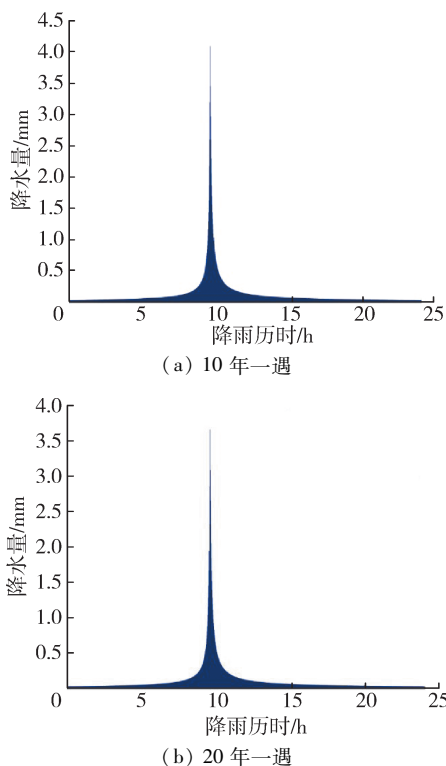


图4 24 h 设计暴雨过程

Fig. 4 24-hour design rainstorm process

模拟,即对于降雨和集水区汇流过程的模拟;②管网水力学模拟,即对于雨水汇流入管道后对水流流态和水质等的模拟。

2.1.1 降雨径流模拟

降雨径流模拟的目的是生成降雨流量过程线(入流流量-时间曲线),为后续的管网水力模拟提供边界条件,在降水量时间序列数据的基础上,通过城市集水区的划分和径流系数等参数的设置,来模拟降雨、产流、汇流等一系列城市地表汇流过程。模拟过程中,将推求的设计暴雨过程作为降雨径流模型计算的边界条件;根据收集到检查井(雨篦子)的位置,按照就近排水和大致均匀分配集水区面积的原则下,划分各个进水口的集水区 693 个。集水区划分情况如图 5 所示。

本次计算,汇流模型采用较为传统的时间-面积模型,可以同时满足模型计算的精度和效率;不透水率根据图层的土地类型进行设置,将建筑物图层、道路图层、砖铺地面、绿地图层加载到图层列中,选择不透水率分别为 0.95、0.85、0.60 和 0.35;加载降雨边界条件,采用降雨径流模型进行计算,将得到的径流模拟结果(主要包括各个集水区的汇流时间序列及径流累积量)作为后续管网水力模型的边界条件。

2.1.2 管网水力模拟

MIKE URBAN 管网水力模型能够较为准确客

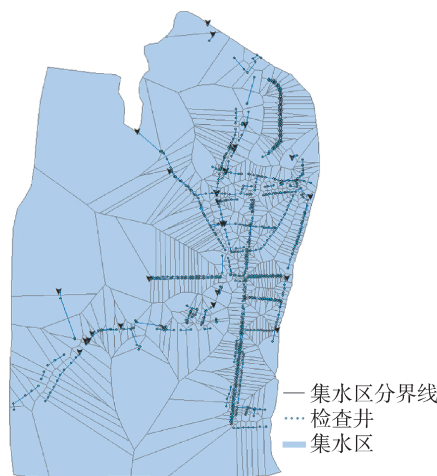


图5 集水区划分情况

Fig. 5 Watershed division

观地描述管网内的各种要素及水流流态,如横截面形状、水流调节构件、检查井以及集水区的各种水头损失等。导入降雨径流模拟的结果,选用管网水力模型重新计算,可得到设计暴雨条件下的管网水力情况。

2.2 MIKE 21 模型

MIKE 21 模型,即二维地表漫流模块,采用水深平均的二维浅水流动质量和动量守恒控制方程组,选择交替方向隐格式(ADI 格式)的有限差分格式进行求解计算^[14]。本文利用 MIKE 21 模型,模拟当管网检查井发生溢流时引起的地表水淹没范围、淹没时间等。建立地表漫流模型的关键步骤是地形处理和网格剖分,进而建立地表高程模型并设置边界条件以及初始条件等。

2.2.1 地形处理和网格剖分

城市内涝发生时,假定涝水会绕过房屋所在地,在建模时,房屋所处的高程拔高至较高值(涝水淹没不到);城市的路面相较周边要低 0.1~0.2 m,道路所在区域的高程在原高程上降低 0.1~0.2 m。二维地表漫流的地形设置见图 6,网格精度为 5 m;房屋高程统一设置为 290 m(红色区域),且不允许水流通过;道路高程相较周围地面低 0.15 m。

2.2.2 初始条件和边界条件

对于道路、房屋和绿地等区域,设定初始水深和流量为 0,初始流速恒为 0。计算区域南部管网较少,区域的产汇流采取直接降雨法,降雨直接进入该区域,流动由二维水动力学模型进行直接模拟。管网汇入内河,通过涵、闸等水利工程与外江连接,内河水位设置为边界。计算区域北部主要为居民区,而南部主要为农田和湖泊,根据相关水动力学模型手册选定糙率范围为 1/30~1/35。

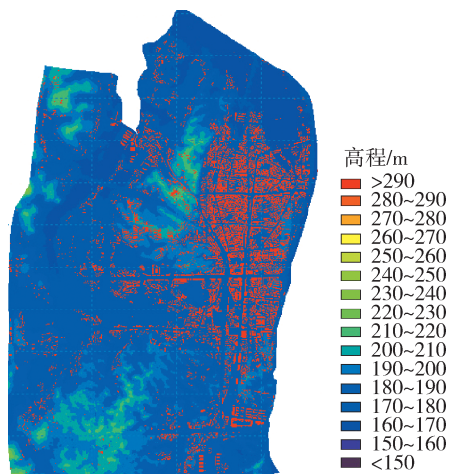


图6 二维地表漫流的地形设置

Fig.6 Terrain setting of 2-D overland flow

2.3 耦合模型

在 MIKE FLOOD 耦合模拟平台上连接闸泵调度嵌入一维排水管网模型 MIKE URBAN 和二维地表漫流模型 MIKE 21,能够反映城区中排水流态在管道及可能的地表积水的表现,这拓展了传统城市排水系统管网模型的模拟能力,能更准确地反映城市排水管网中的水流和地表漫出的水流的交互,模拟地表积水以及退水等情况。MIKE URBAN 和 MIKE 21 通过管网和地形耦合连接,具体见图7。

3 结果与分析

3.1 地表漫流

通过模拟研究区域 10 年一遇和 20 年一遇 24 h 降雨历时暴雨条件下地面淹没水深,可以清晰地体现区域内的最大淹没水深变化,结果见图8。

3.2 易涝点

易涝点是内涝积水的敏感点,也是城市排水防

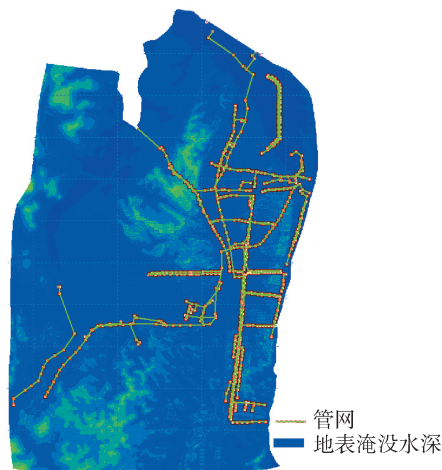
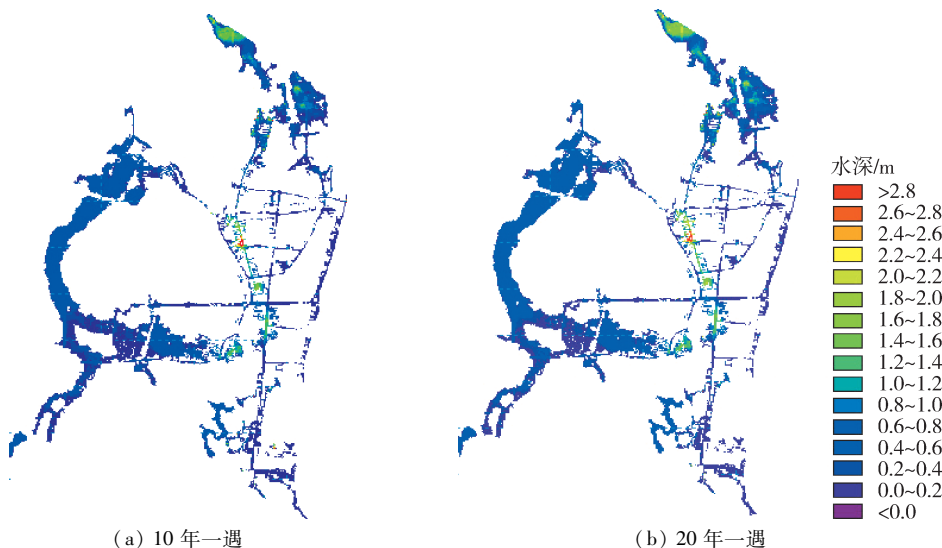


图7 耦合模型示意图

Fig.7 Schematic diagram of coupling model

涝工作的重点研究对象。结合模拟结果和实际情况,本次研究区域内共有 5 处易涝点,分别为永兴街易涝点、立新桥易涝点、滨江北路易涝点、向东街易涝点及工农河路易涝点。在 5 处易涝点选取特征点进行观测,其水深变化过程如图9所示。由图9可见,5 处易涝点均存在一定程度上的积水,且当 20 年一遇降雨来临的时候,积水深度更大。在 24 h 历时的降雨条件下,5 处易涝点反映出了不同的规律,即于永兴街、向东街和工农河路在降雨过程中很快达到水深峰值,然后缓缓下降,滨江北路在降雨峰值过后,水深仍不断增加,但立新桥在降雨过程中,出现了一定程度的下降。各易涝点的最大淹没水深见表1,可见,两种降雨重现期的情况下,5 处易涝点的最大淹没水深具有相同的变化规律,在 20 年一遇降雨强度条件,易涝点最大水深为 1.594 m(滨海北路),大于 10 年一遇降雨条件下的最大水深 1.285 m。

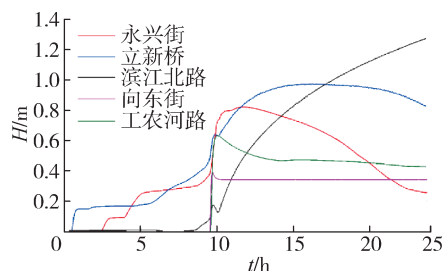


(a) 10 年一遇

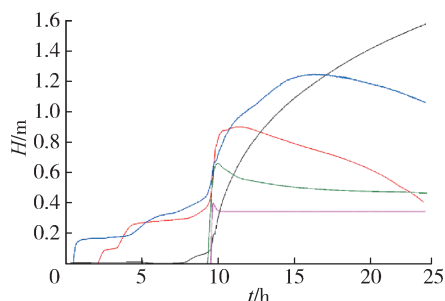
(b) 20 年一遇

图8 最大淹没水深

Fig.8 Maximum submergence depth



(a) 10 年一遇



(b) 20 年一遇

图 9 易涝点水深随时间变化

Fig. 9 Change of water depth with time at waterlogging prone points

表 1 易涝点最大淹没水深

Table 1 Maximum submergence depth of waterlogging

位置	10 年一遇	20 年一遇
永兴街	0.822	0.903
立新桥	0.973	1.251
滨江北路	1.285	1.594
向东街	0.393	0.403
工农河路	0.632	0.664

3.3 管道排水能力

根据模拟得到的管道最大充满度及其长度可以显示管道在降雨过程中的状态,从而进一步评估现状管道的排水能力。各管道最大充满度如图 10 所示。各最大充满度区间的管道总长度统计结果如表 2 所示。由图 10 和表 2 可见,在两种暴雨重现期条件下,绝大多数管道(10 年一遇 82%、20 年一遇 80%)的最大充满度都小于 4,说明这些管道在排水过程中,基本能满足排水需求。但仍有一部分管道(10 年一遇 5%、20 年一遇 8%)的最大充满度大于 6,管道内部压力较大。并且,相较于 10 年一遇的暴雨,20 年一遇的管道平均充满度要略高。选取两条典型管道,管道 a 位于天华北路西侧、管道 b 位于城西北路西侧,两条典型管道的最高水位统计如图 11 和 12 所示,可见城中大多数管道基本能满足城市排水的需求。

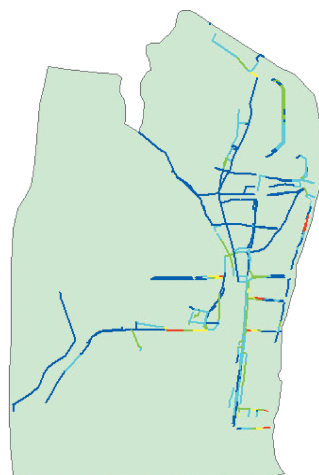
3.4 讨论

新化县作为山区城市,外河洪水陡涨陡落,与半山半湖地区类似,主要采取撇洪和泵站相结合的办

表 2 管网最大充满度区间统计结果

Table 2 Maximum fullness of pipe network

最大充满度	10 年一遇		20 年一遇	
	管道总长度/m	百分比/%	管道总长度/m	百分比/%
<2	22 960	56	22 491	55
2~4	10 520	26	10 069	25
4~6	5 062	12	4 777	12
>6	2 120	5	3 324	8



(a) 10 年一遇



(b) 20 年一遇

图 10 最大管道充满度

Fig. 10 Maximum pipe fullness

法来排涝。通过以上对现状的排水系统的模型计算和分析,可以发现:①由于已经建成城市管网存在一些不合理的管段,如管径设置不合理、坡降不合理等,致使城市内的水量不足以立即排入资江或花山渔场,使得新化县老城区的整体排水能力受到很大影响,部分区域达不到设计规划的排水标准。②城内主要的调蓄湖泊及暗渠均能满足设计标准,当 20 年一遇暴雨来临时,城市内主要湖泊和暗渠水位均在限制水位以下,基本没有洪水风险;特别是工农河暗渠,4.5 m×2 m 的过流断面能满足城市排水的需要,只需要对其进行相应的疏浚和维护。③城市内

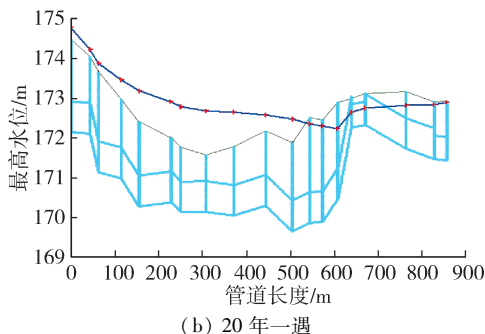
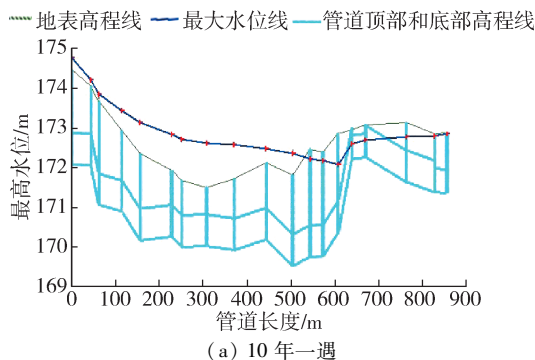


图 11 管道 a 最高水位统计

Fig. 11 Statistics of maximum water level of pipeline a

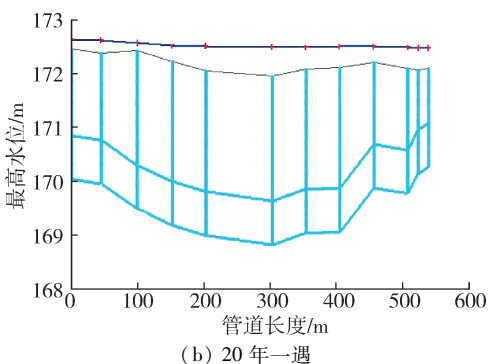
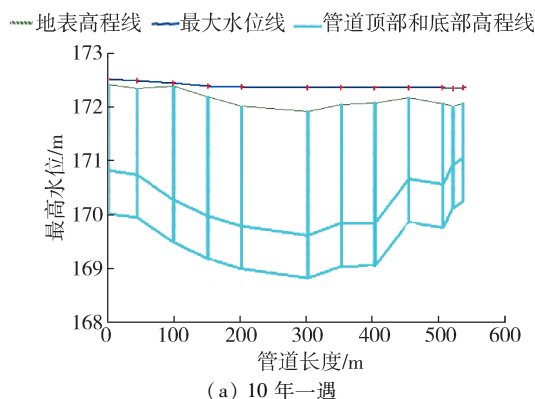


图 12 管道 b 最高水位统计

Fig. 12 Statistics of maximum water level of pipeline b

现有的泵站系统能满足排水的需要,造成计算区域易涝点最大水深大于 0.8 m 的原因大多是因为管线设置不合理及地势较低,仅仅依靠扩容泵站系统,不能从根本上改变上述 5 处易涝点的现状。④针对不同的易涝点,需要采用不同的处理方案,针对立新桥和滨海北路,重点应该在于对周边的雨水管线进行

疏通、改造和升级,使得上游来水能顺利排入资水;针对工农河、永兴街和向东街,应该增设雨水篦、雨水管道,及时清理路面,让雨水能迅速进入下水管道,从而输送至调蓄水体。

4 结 论

a. 基于 MIKE FLOOD 平台,将 MIKE URBAN 和二维模型 MIKE 21 耦合,建立城市排涝数学模型。选取新化县城的部分区域,运用城市内涝模型,对城市内涝情景进行模拟分析。验证结果显示,模拟效果较好,结果与实际发生及调查情况基本吻合,耦合模型适用于城市内涝风险评估管理。评价结果显示,新化县部分地下管网设置不合理,城市内的水量不足以立即排入资江或花山渔场,部分区域达不到设计规划的排水标准;城内主要的调蓄湖泊及暗渠均能满足设计标准;城市内现有的泵站系统能满足排水的需要。

b. 城市内涝的主要原因并非完全因为自然灾害,在很大程度上是不科学的城市开发行为造成的。城市开发不能过分强调经济效益而忽略了社会和生态环境效益,在设计排涝工程总体布局时,需合理划定排涝区,论证自排的概率与可能性,根据不同区域的水系、地形排涝需求等,拟定不同的治理措施。可按照因地制宜、分区治理、统筹兼顾、蓄排结合、防洪安全的原则,制定城市内涝保障方案和工程体系,采取“渗、滞、蓄、排、管”措施,把河湖水系规划、治涝工程建设、排水管网建设和雨水利用、洪水削减结合起来。采用强制性标准,加强精细化管理,科学合理规划建设时序,并协调多部门的力量提高综合应急能力。根据当地城市内涝调研的现状及存在的问题分析,结合地形等具体条件,按“分片排涝、等高截流;留湖蓄涝、排蓄结合;自排为主、辅以抽排;排渗蓄滞、综合治理”的原则合理确定排涝工程。根据实际情况提出工程主要控制指标,如调蓄水面率、承泄区控制水位等参数。同时加强预警和应急系统建设以及相关法律法规的完善。

参考文献:

- [1] WU Jiansheng, WEI Sha, ZHANG Puhua, et al. The spatial non-stationary effect of urban landscape pattern on urban waterlogging: a case study of Shenzhen City [J]. Scientific Reports, 2020, 10(6): 10.
- [2] 陈建刚, 张书函, 王海潮, 等. 北京城区内涝积水成因分析与对策建议 [J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 34-36. (CHEN Jiangang, ZHANG Shuhuan, WANG Haichao, et al. Analysis on causation of urban waterlogging in

- Beijing and its countermeasures and suggestions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46 (6):34-36. (in Chinese))
- [3] 孔锋. 透视变化环境下的中国城市暴雨内涝灾害: 形势、原因与政策建议 [J]. 水利水电技术, 2019, 50 (10):42-52. (KONG Feng. Perspective on urban rainstorm waterlogging disaster in China under changing environment: situation, causation and policy Suggestion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50 (10):42-52. (in Chinese))
- [4] 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. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (4):485-491. (in Chinese))
- [5] 赵思远, 陈菁, 涂建琴, 等. 城镇化进程中低丘山区水系连通性的初步研究与实践 [J]. 中国农村水利水电, 2020 (2): 34-39. (ZHAO Siyuan, CHEN Jing, TU Jianqin, et al. Preliminary research on the connectivity of water system in low hilly areas in the process of urbanization [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020 (2):34-39. (in Chinese))
- [6] 朱颖蕾, 于永强, 俞芳琴, 等. 基于 MIKE21 和 MIKE Urban 耦合的湖区平原城市内涝模拟应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2018 (10): 177-181. (ZHU Yinglei, YU Yongqiang, YU Fangqin, et al. Research on the waterlogging simulation of the lakeshore plain city based on MIKE21 and MIKE Urban [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018 (10):177-181. (in Chinese))
- [7] 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 Zhaoyang, WANG Zhaoli, WU Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (5): 68-77. (in Chinese))
- [8] 栾慕, 袁文秀, 刘俊, 等. 基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (2):57-61. (LUAN Mu, YUAN Wenxiu, LIU Jun, et al. Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based on SWMM-MIKE11 coupled model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (2):57-61. (in Chinese))
- [9] 李品良, 覃光华, 曹冷然, 等. 基于 MIKE URBAN 的城市内涝模型应用 [J]. 水利水电技术, 2018, 49 (2): 11-16. (LI Pinliang, QIN Guanghua, CAO Lingran, et al. Application of MIKE URBAN-based urban waterlogging model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (2):11-16. (in Chinese))
- [10] 黄琳煜, 李迷, 聂秋月, 等. 基于 MIKE FLOOD 的暴雨积涝模型在川沙地区的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28 (3): 127-133. (HUANG Linyu, LI Mi, NIE Qiuyue, et al. Application of rainstorm waterlogging model based on MIKE FLOOD in Chuansha Area [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28 (3): 127-133. (in Chinese))
- [11] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (1):58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (1):58-65. (in Chinese))
- [12] 黄绵松, 杨少雄, 齐文超, 等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5):13-18. (in Chinese))
- [13] 马盼盼, 于磊, 潘兴瑶, 等. 排水模型不同概化方式对模拟结果的影响研究: 以 MIKE URBAN 软件为例 [J]. 给水排水, 2019, 55 (3): 132-138. (MA Panpan, YU Lei, PAN Xingyao, et al. Study on the influence of different generalization methods of drainage model on simulation results: a case study of MIKE URBAN [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55 (3): 132-138. (in Chinese))
- [14] 任杰, 董增川, 徐伟, 等. 基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2019, 47 (5): 420-424. (REN Jie, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Study on influence of river wavebreak forest on flood discharge ability based on MIKE21 FM Model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (5): 420-424. (in Chinese))

(收稿日期:2020-07-17 编辑:王 芳)

