

基于 MIKE URBAN 的西安市中心城区雨洪过程模拟

张旭^{1,2}, 李占斌^{1,2}, 何文虹³, 霍春平³, 时鹏^{1,2}, 袁水龙^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710048

3. 西安市水利水土保持工作站, 陕西 西安 710016)

摘要: 城市排水管网的分布与建设是城市基础设施建设的重要组成部分, 城市的排水能力关系到城市服务功能的正常运转。通过城市雨洪过程的分析, 可以评价城市洪涝灾害。以西安市中心城区为研究对象, 利用 MIKE URBAN 构建排水管网模型, 根据模拟结果对研究区管网排水能力进行评估, 分析易涝成因。结果表明: MIKE URBAN 能够较好地模拟城市管网水位、流量变化及易涝点的分布情况。根据西安市暴雨强度公式, 设计不同重现期(1、2、3、5a)的降雨过程, 在 1a 降雨过程下, 研究区 90% 以上管道处于满流状态, 60% 以上的检查井发生溢流, 满流管段数和溢流井个数会随着降雨频率的增加而增加, 但增幅相对减少; 管道设计标准普遍偏低、下垫面不透水率增大、地形等因素是导致地面积水的主要原因。研究成果可为城市内涝防治及海绵城市建设提供理论基础和技术支撑。

关键词: 排水系统; 内涝; 中心城区; MIKE URBAN; 雨洪过程模拟; 排水能力; 西安市

中图分类号: TV122.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0157-07

Simulation of flood process in the central urban area of XI'AN based on MIKE URBAN

ZHANG Xu^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2}, HE Wenhong³, HUO Chunping³, SHI Peng^{1,2}, YUAN Shuilong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Soil and Water Conservation Station, Xi'an 710016, China)

Abstract: The distribution and construction of urban drainage network is an important part of urban infrastructure construction, and the drainage capacity of the city is related to the normal operation of urban service function. Urban flood disaster can be evaluated through the analysis of urban flood process. The MIKE URBAN was used to construct a model of pipe drainage network to assess the drainage capacity of the central urban area of Xi'an City based on the simulation results and to analyze the causes of waterlogging. The results showed that MIKE URBAN can simulate the distribution of water level, flow rate and waterlogging point in urban pipeline network. According to the formula of rainstorm intensity in Xi'an, the rainfall process of different return periods (1a, 2a, 3a, 5a) was designed. Under the process of 1a rainfall, more than 90% of the pipeline in the research area is in full flow state, and more than 60% of the inspection wells overflow, and the number of full flow pipes and overflow wells will increase with the increase of rainfall frequency, but the increase speed is relatively reduced. The general low pipeline design standards, the increase of impermeable rate of the underlay surface, topography and other factors are the main causes of water accumulation on the ground. The research results can provide theoretical basis and technical support for urban waterlogging control and Sponge city construction.

Key words: drainage system; waterlogging; central urban area; MIKE URBAN; simulation of flood process; drainage capacity; Xi'an City

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-06-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504704); 西安市城市水土保持关键技术研究项目(104-441118085)

作者简介: 张旭(1992-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为城市雨洪模拟与内涝防治。

通讯作者: 何文虹(1969-), 男, 陕西长安人, 工程师, 主要研究方向为水土保持与荒漠化防治。

1 研究背景

近年来,受全球气候变化影响,暴雨等极端天气增加,再加上城市落后的地下排水系统不能满足当前迅速扩张的城市建设^[1],暴雨一旦来袭,极易造成内涝灾害,给社会管理、城市运行和人民群众生产生活带来巨大影响。作为一座拥有三千多年历史的古城,西安很多地区排水设施老化,排水能力不足,绝大多数排水管道暴雨设计重现期在 0.5 ~ 1a,加上城市热岛效应明显,遭遇强降雨之后,内涝灾害频发,严重影响了人民的生产生活。为了提高城市内涝的应对能力,国内外经过多年研究和实践经验,已经逐步形成了众多模拟城市内涝的分析模型,并得到了广泛应用^[2]。初祁等^[3]应用 MIKE11 和 MIKE21 模型分析了北京市大兴区天堂河下游地区的洪涝灾害危险性;栾慕等^[4]通过 SWMM - MIKE11 耦合模型评估了桐庐县管网系统的排水能力;侯燕等^[5]基于 GIS、MIKE 软件对开封市城市洪水风险进行了分析;黄琳煜等^[6]以 MIKE FLOOD 为平台搭建暴雨洪涝模型,评估了上海市浦东新区现状雨水管网的排水能力,为相关部门提供对策依据。

本文以西安市中心城区为研究对象,根据地区的地形、降雨等数据,利用丹麦水利研究所(DHI)开发的 MIKE 系列模型^[7-9]中的 MIKE URBAN 管网模型对西安市管网分布最密集的地区进行排水能力的评估,根据管网水流状态及溢流点的分布分析积水成因,为减小西安市主城区内涝灾害提供新的思路和方法。

2 研究区域概况及数据来源

将西安市城市区域排水管网和地理地形相结合,可以划分出有明显的地理、地形分水线的排水分区。本文以西安市中心城区的护城河排水分区为研究对象,其人口密集,交通便利,城市基础设施均已建成,面积约为 36.66 km²,地属半湿润季风气候,市区多年平均降水量 629.9mm,主要集中于夏秋两季,夏季强降雨多,秋季多连阴雨。降雨时空分布不均的特点,使得西安市在夏季特别容易出现旱情和强降雨,导致城市内涝频发,主要自然灾害有干旱、低温、冰雹、洪涝等^[10-11]。另外,研究区排水管网分布较为密集,集水井数量较多,雨水大多排放到护城河内,但依然存在排水管网管径小、管网系统建设滞后、新城区扩建管道与老城区衔接不当等主要问题^[12]。目前,西安市城区排水管网普及率仍然很

低,根据《西安市中心市区排水工程详细规划》,排水规划充分考虑到满足环境保护及雨水资源化要求,到 2020 年,雨水管网普及率要达到 95% 以上,以加强地下管网的排水能力^[13]。

研究数据主要来自市政规划、水务局等部门提供的《西安市主城区雨水管网分布图》,包括管道直径、管道流向等信息,高程数据源于地理空间数据云网站下载的 30 m 精度 DEM。其他数据如井底高程、管道高程、管线坡度等参考 2016 版《室外排水设计规范》(GB50014 - 2006)拟定。

3 研究方法

城市管网模型 MIKE URBAN 基于 GIS 开发,使其可以提供强大的 GIS 功能,形成了较为完整的城市水模拟系统。其中,排水管网系统(CS)能够有效地模拟雨水在管道中的流动。本文主要应用到其中的两个模块,即降雨径流模块与管流模块。

为计算城市地表径流,MIKE URBAN 降雨径流模块提供了几种不同的计算方式,分别为时间面积(T-A)模型、单位水文过程线模型、线性水库模型以及非线性水库 - 动力波模型。本文使用最常用、最简单的 T - A 曲线模型,模块中按照汇水面积的增长方式给出了三种时间面积曲线^[14](如图 1)。其中矩形表示汇流面积随时间均匀增加;正三角形代表随时间的推移,汇流面积先以较快的速度增加,然后逐渐减慢并最终趋于稳定,倒三角形则相反。

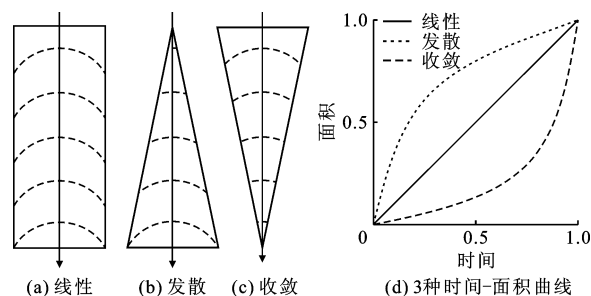


图1 MIKE URBAN 中 3 种时间 - 面积模型

MIKE URBAN CS 管流模块可以模拟排水管网中的水动力情况,管流模块建立在一维自由水面流的圣维南方程组来计算管网中的非恒定流,即连续性方程(质量守恒)和动量方程(动量守恒 - 牛顿第二定律)^[15-16]。方程组应用有限差分数值求解一维水流问题,为管网提供有效而准确的解法。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad (2)$$

式中: Q 为过水断面流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; x 为水流方向的距离, m ; t 为时间, s ; S_0 为管道坡度; S_f 为水力坡度; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为管道水深, m 。

4 模型构建与验证

4.1 数据预处理

MIKE URBAN 基于 GIS 开发, 能够将 Geodatabase 格式数据直接导入模型中, 因此在 GIS 中根据《西安市主城区雨水管网分布图》将排水管网矢量化, 添加节点, 手动输入管道直径等数据, 再批量导入模型中。

管网数据导入完成后, 为保证导入数据的准确性与完整性, 要对节点直径、管线直径、节点地面标高、节点井底标高等基础数据进行拓扑检查, 找出导入的数据是否有缺失。若存在数据缺失, 有必要对缺失的数据重新赋值, 导入后的研究区管网模型见图 2。

4.2 模型的构建与运行

根据雨水进入管网前的地表产汇流的水文过

程, 首先构建降雨径流模型生成降雨流量过程线, 降雨流量过程线为管网水力模型提供了上游边界条件。首先合成降雨过程, 由于缺乏实测降雨数据, 且城区降雨多为短历时强降雨, 长历时降雨对城区影响不大, 综合考虑采用芝加哥雨型合成短历时降雨。根据西安市暴雨强度公式(见公式 3)^[17], 降雨选取 2018 年 7 月 26 日 9 时至 11 时, 历时 2 h, 合成 1 年一遇、2 年一遇、3 年一遇和 5 年一遇的不同重现期的降雨过程, 合成后的降雨过程线如图 3 所示。

$$i = \frac{6.041(1 + 1.475 \lg P)}{(t + 14.72)^{0.704}} \quad (3)$$

式中: i 为暴雨强度, mm/min ; P 为降雨重现期, a ; t 为降雨历时, min 。

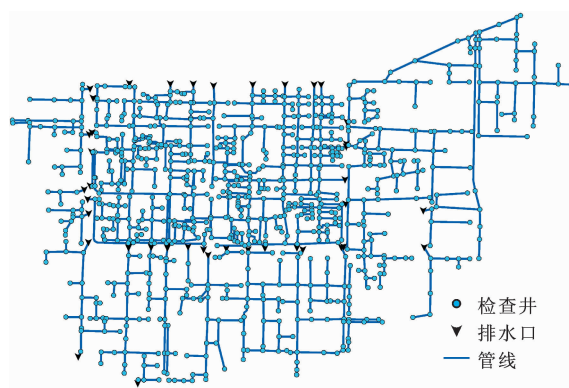
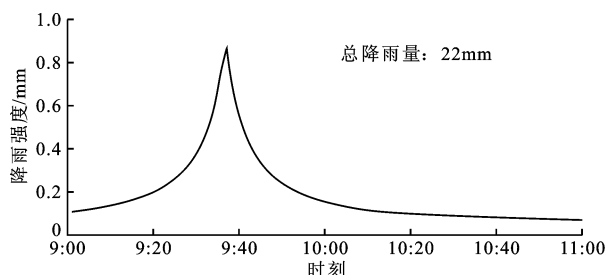
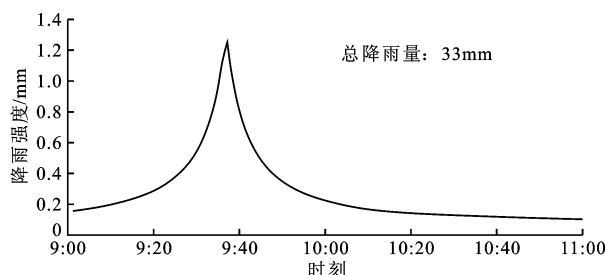


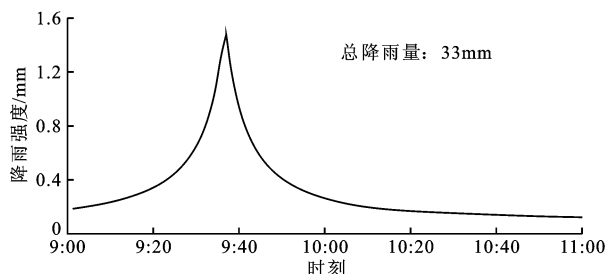
图2 研究区管网模型



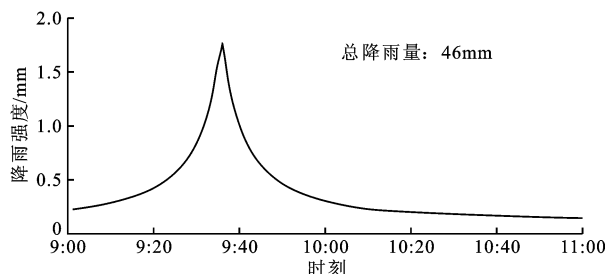
(a) 1年一遇降雨过程线



(b) 2年一遇降雨过程线



(c) 3年一遇降雨过程线



(d) 5年一遇降雨过程线

图3 采用2018年7月26日降雨合成的不同重现期降雨过程线

接下来进行集水区的划分, 为管网分配合理的汇水范围。根据检查井的位置及其分布将整个研究区划分成了 887 个集水区, 以便得到降雨过程中地表径流与各个检查井的雨量流动过程。研究区集水

区的划分与连接见图 4。

最后设置集水区参数, 包括产汇流模型的选取, 以及下垫面不透水系数的设置, 本文将研究区划分为 6 种不同的下垫面类型, 分别为建筑用地、广场用

地、道路、人工绿地、水域、其他。根据相关排水设计规范及设计标准,不同下垫面类型的不透率参数为:建筑用地 95%、广场用地 75%、道路 85%、人工绿地 20%、水域 0%、其他 60%。

降雨径流模型运行完毕后,构建管流模块来客观地描述管网内的各种要素及水流流态,模拟时间设置为与降雨径流模拟结果一致,并加载其生成的结果,即可开始模拟。

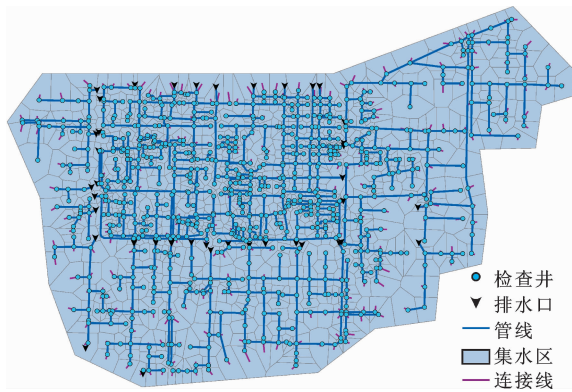


图4 研究区集水区的划分与连接

4.3 模型验证

由于研究区缺乏降雨实时监测资料,依据西安市往年由于暴雨等极端天气导致的城市内涝统计数据,收集到了西安市主城区易涝点的分布资料。对因地势低洼、排水管网老化等容易出现积水的核心区域,共找到 61 个易涝点。模型模拟结果得到的易形成积水的区域基本与调研的易涝点相吻合,模型中显示的其他可能会产生积水的区域,而调研资料中没有记录,主要是这些区域的积水深度较浅,不致引发内涝。总体来说,模拟结果与统计资料基本吻合,可用于城市内涝问题的研究。

5 结果分析与讨论

5.1 不同重现期降水条件下集水区径流过程分析

降雨径流模拟结果统计了每个集水区的最大、最小径流量、达到峰值流量所对应的时间及整个区域的总径流量。在模型中以曲线图的形式显示集水区径流累积量的变化过程(图 5),同时还可以加载图层来显示并计算出每个集水区的径流系数(图 6)。由图 5、6 可以看出,不同集水区因面积不同,相应的径流量也不同,达到峰值流量的时间略有差异;在同一集水区下,随着重现期的增加,径流量也随之增加。

5.2 不同重现期降水条件下管流过程分析

管流模拟结束后同样能生成结果报告,主要包

括管道水位、管道流量、流速、压力及节点水位、溢流情况等。根据统计,模型包含 917 段管线、887 个检查井和 43 个排水口。与降雨径流结果查看方式一样,可以生成检查井与管道水位及流量的变化曲线,以检查井 231 (Node 231) 水位和管道 339 (Link 339) 水位为例,不同重现期下的水位变化曲线如图 7 所示,峰值水位统计结果如表 1、2 所示;同时可以用图层的方式展示,以 1 年一遇管道累积流量为例,结果如图 8 所示。由图 7、8 可看出,检查井和管道水位随着重现期的增加而增加,峰值水位增长幅度趋于平缓,但由于降水量的增多,管网不能及时将雨水排出,导致峰值水位滞后时间延长,在这段时间内,地面就可能形成积水。

表1 检查井 231 (Node 231) 不同重现期下的峰值水位

重现期 P/a	峰值水位/m	水位变化/m	增长率/%
未降雨	423.50	0	0
1	426.64	3.14	0.74
2	427.83	4.33	1.02
3	428.04	4.54	1.07
5	428.18	4.68	1.11

表2 管道 339 (Link 339) 不同重现期下的峰值水位

重现期 P/a	峰值水位/m	水位变化/m	增长率/%
未降雨	424.11	0	0
1	427.42	3.31	0.78
2	428.59	4.48	1.06
3	428.72	4.61	1.09
5	428.82	4.71	1.11

5.3 管网排水能力评估

由于城区降雨较为集中,汇流时间一般较短,通常不超过 2 h,故使用 1 年一遇到 5 年一遇重现期的降雨来对城市排水系统的管网排水能力进行评估^[18]。根据模拟产生的管道充满度及节点溢流结果可以显示管道和节点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,针对不满足标准的管道提出有效的改造方案。管道充满度及节点溢流度的计算方法见公式(4)、(5)^[19]。统计结果如图 9、10 及表 3、表 4。

$$F = \frac{W - P}{P'} \quad (4)$$

式中: F 为管道充满度; W 为水位高程,m; P 为管道底高程,m; P' 为管道高度,m。当 $F \leq 1.0$ 时表示水

位未超过管道顶部,即满足管道排水设计能力,说明其排水能力能够满足当前排水需求;当 $F > 1.0$ 时表示水位超过管道顶部,即超过管道排水设计能力,认为其排水能力已经不能满足当前需求。

$$NF = W - G \tag{5}$$

式中: NF 为节点溢流量, m ; W 为水位高程, m ; G 为节点地面高程, m 。当 $NF \leq 0$ 时表示该节点水位未超过地表高程,不会发生溢流;当 $NF > 0$ 时表示该节点水位高出地表高程,可能产生积水。

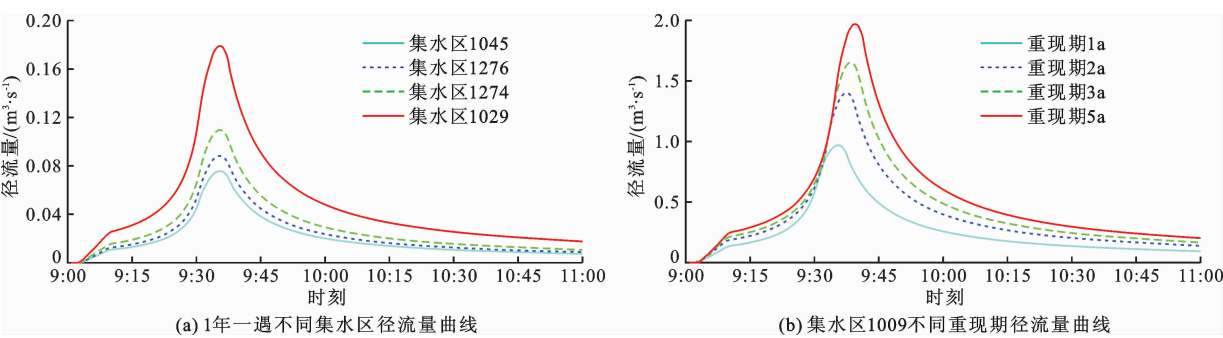


图 5 不同集水区及不同重现期径流量变化曲线

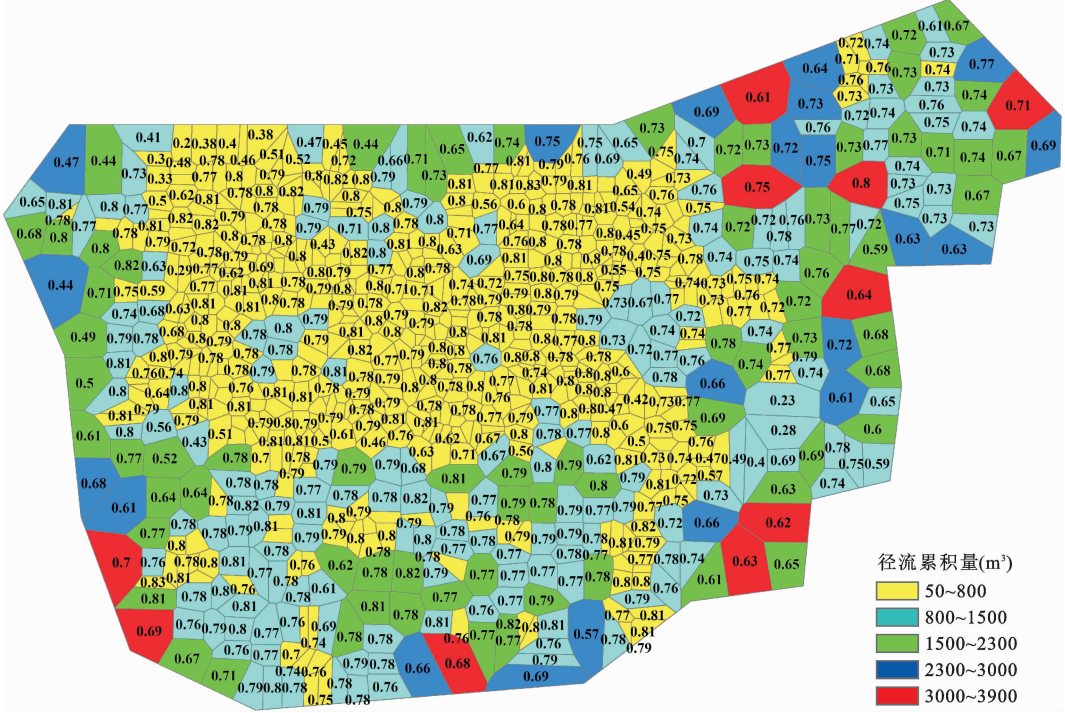


图 6 不同集水区径流累积量及径流系数分布

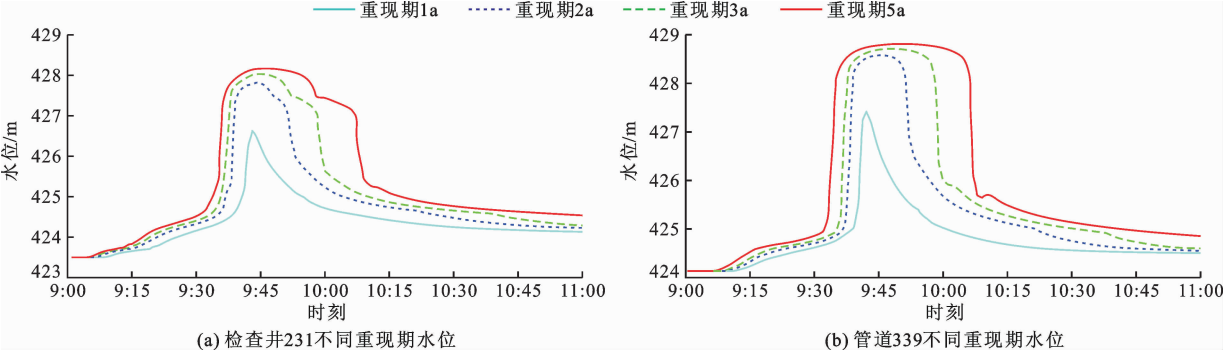


图 7 检查井与管道在不同重现期下的水位变化曲线

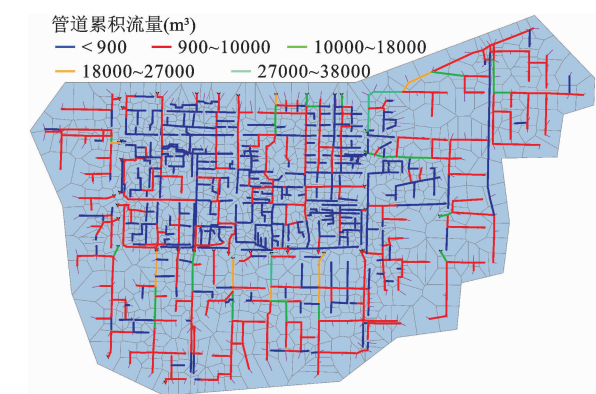


图 8 1 年一遇降雨研究区管道累积流量分布

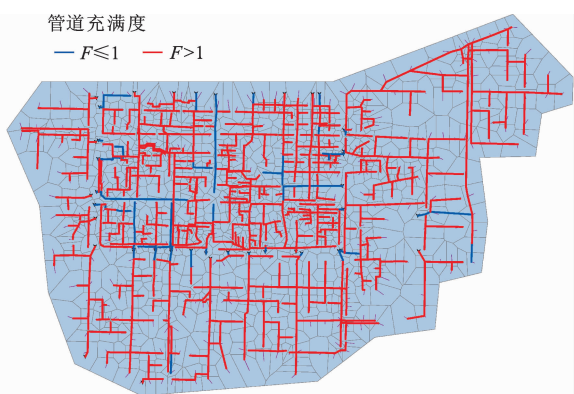


图 9 1 年一遇降雨研究区管道充满度

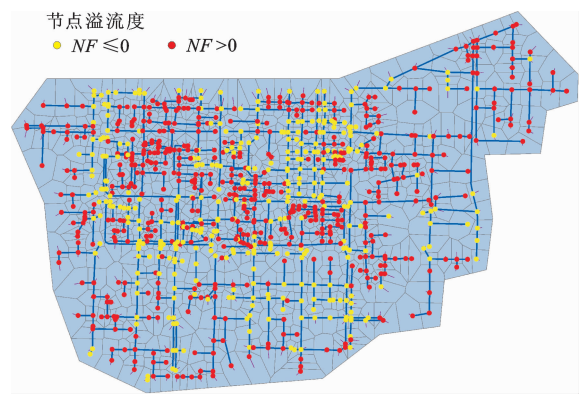


图 10 1 年一遇降雨研究区节点溢流量

表 3 研究区管道充满度统计结果

重现期 P/a	满流管段数	所占比例/%	同比增长/%
1	833	90.84	
2	850	92.69	1.85
3	860	93.78	1.09
5	863	94.11	0.33

表 4 研究区节点溢流量统计结果

重现期 P/a	溢流点数	所占比例/%	同比增长/%
1	595	63.98	
2	664	71.40	7.42
3	690	74.19	2.79
5	724	77.85	3.66

说明随着城市化进程的加快,原始的地下排水系统已不能满足当前的排水标准。另外,研究区85.54%的排水管道排水能力不足1年一遇,排水能力在5年一遇以上的管道仅占6.30%,这是由于传统的管道设计标准普遍偏低所致,也是中心城区频繁产生积水,形成内涝的主要原因。

表 5 研究区管道排水能力分级统计结果

排水能力重现期 P/a	长度/km	比例/%
$P \leq 1$	160.51	85.54
$1 < P \leq 2$	10.59	5.65
$2 < P \leq 3$	2.35	1.25
$3 < P \leq 5$	2.37	1.27
$P > 5$	11.82	6.30

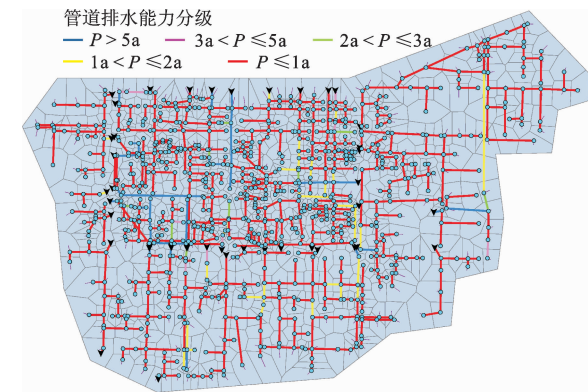


图 11 研究区管道排水能力分级

根据不同重现期下管道充满度的分布情况,利用自动建模与智能分析系统(AMIAS)对城市管道的排水能力按照不同的重现期标准分级,分析得出的结果见表5、图11。

由上述统计结果可知,在降雨过程中,研究区90%以上的管道处于满流状态,随着降雨重现期的增加,溢流井的个数也随之增加,但增幅相对减缓。

6 结 论

本文针对西安市近年来极端天气和内涝灾害频发的现状问题,根据西安市地形及排水系统的分布选择了比较具有代表性的护城河排水分区为研究对象,利用 MIKE URBAN 模型对研究区雨洪过程进行模拟和分析,得到的主要结论如下:

(1) MIKE URBAN 能够较好地反映城市管网水

位、流量变化及易涝点的分布情况。

(2)根据模型的模拟结果,在不同的降雨重现期下,研究区 90% 以上管道处于满流状态,60% 以上的检查井发生溢流,满流管段数和溢流井个数会随着降雨频率的增加而增加,但增幅相对减少。

(3)管道设计标准普遍偏低、下垫面不透水率增大、地形等因素是导致地面积水的主要原因,而且研究区处于中心城区,且大部分均已建成,大面积改造管网设施不切实际,应结合低影响开发措施从源头加以控制,缓解当前管网排水压力,降低内涝风险。

(4)城市雨洪是一个复杂的过程,具有很大的不确定性,还需要进一步加强城市复杂条件下数据采集和监测手段,在 MIKE URBAN 中加入不同的情景进一步模拟,使得城市洪涝模拟模型的构建和应用更加精细化。

参考文献:

- [1] 袁媛. 基于城市内涝防治的海绵城市建设研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [2] 麻蓉, 白涛, 黄强, 等. MIKE 21 模型及其在城市内涝模拟中的应用[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 172-179.
- [3] 初祁, 彭定志, 徐宗学, 等. 基于 MIKE 11 和 MIKE 21 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Danish Hydraulic Institute. MIKE urban user manual[M]. Copenhagen, Denmark, 2012.
- [8] Danish Hydraulic Institute. MIKE flood user manual[M]. Copenhagen, Denmark, 2012.
- [9] Danish Hydraulic Institute. MIKE zero user manual[M]. Copenhagen, Denmark, 2012.
- [10] 计宝鑫. 基于 SWMM 模型的西安市城区汇水区域划分与径流特征研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- [11] 袁黄春. 西安市雨水花园处理屋面降雨径流的试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2013.
- [12] 武大洋. 西安市典型区域暴雨内涝成因分析与模拟研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- [13] 郑琴, 郭平侠, 郑宁, 等. 西安市中心市区排水工程详细规划简介[J]. 给水排水, 2013, 39(S1): 223-225.
- [14] Danish Hydraulic Institute. MIKE11: A modeling system for rivers and channels reference manual[R]. Horsholm, Denmark: DHI, 2004.
- [15] HSU M H, SHE S H, CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(2): 21-37.
- [16] DHI Software. MOUSE pipe flow reference manual[R]. Copenhagen: DHI Software, 2004.
- [17] 王丹. 基于 MIKE 模型的西安市曲江新区城市内涝模拟研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- [18] 许文斌. MIKE FLOOD 模型应用于南昌排水防涝综合规划[J]. 中国给水排水, 2015, 31(9): 132-134.
- [19] DHI Water & Environment. MIKE URBAN 用户帮助手册(2012 版)[Z]. DHI Water & Environment, Denmark, 2012.