

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.019

基于降雨情景模拟的排水系统内涝风险评估与分析

王诗婧

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 现今大多数城市建成区雨水管网存在设计标准偏低、源头控制径流能力低等问题,使得内涝风险增加。以某平原水网城市为例,采用地理信息系统(GIS)技术与综合流域排水系统模型 InfoWorks ICM 相结合的方法,对不同降雨重现期进行情景模拟,分析评估内涝风险,并通过对模拟结果进行水量平衡分析,得出需要通过增设源头 LID 设施、管道提标改造、合理布置外围排涝设施等措施有针对性地预防内涝发生、降低内涝风险。

关键词: 城市排水系统; 降雨情景模拟; 内涝风险评估; GIS 系统; 平原水网城市
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0112-05

Waterlogging Risk Assessment and Analysis of Urban Drainage System Based on Rainfall Scenario Simulation

WANG Shi-jing

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: At present, problems of low design standard and low source control capacity exist in storm pipe network in most urban built-up areas, which increases the risk of waterlogging. Taking a plain river network city for example, the geographic information system (GIS) technology combined with integrated catchment drainage system model InfoWorks ICM were applied to simulate scenarios at different rainfall return periods, the urban waterlogging risk was analyzed and assessed, and water balance analysis was carried out on the simulation results. It was concluded that measures should be taken to prevent the occurrence of waterlogging and reduce the risk of waterlogging by adding LID facilities at the source, upgrading pipelines, and reasonably arranging peripheral drainage facilities.

Key words: urban drainage system; rainfall scenario simulation; waterlogging risk assessment; GIS system; plain river network city

雨水管网系统是城市的重要基础设施之一,担负着收集和排除雨水的职责,而现今许多城市的雨水管网由于使用年限长久,存在着设计标准偏低、管道老旧破损淤积等问题^[1];另外,建成区通常存在城镇化建设集约、建设方式粗犷等问题,使得硬化路面比例升高、绿地率下降,进而导致径流系数升高,而且生态的破坏导致对径流的源头调控能力减弱^[2],因此如何有效地预防城市内涝的发生、降低内涝风险是急需解决的问题。

国外学者较早开展对城市暴雨积水的研究,20世纪起,英、美等国在城市雨洪管理方面研发了相关模型并进行应用,随后发展了多种城市雨洪模型,如 MIKE URBAN、SWMM、InfoWorks ICM 等^[3],这些模型软件推动了城市排水系统的研究工作。除相关模型研究外,随着相关技术的发展,国外学者利用地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术对内涝分析开展了一些研究工作,如美国学者在数据筛选的基础上,对有效的气象数据、遥感监测数据、水文数据等进行整

理,建立不同类型的数据集,构建了 FLAZ 模型,利用此模型预测内涝区域^[4]。同时现阶段国内学者也加强了 GIS 与模型结合技术对内涝风险的研究,权瑞松等人基于模型和空间分析功能对上海市城区建立了简化的城市内涝模型^[5];王林等人利用 GIS 空间分析技术结合内涝模型,模拟和预测了城市的内涝灾害有关特征数据^[6]。为分析不同降雨条件下的建成区内涝风险情况,笔者结合 GIS 系统与水力仿真模型软件 InfoWorks ICM,通过设定不同的降雨情景,分析研究区域的内涝风险情况。

1 研究区域概况

研究区域选择位于苏北平原中部的 Y 市核心区的某汇水片区,其排水系统如图 1 所示。Y 市属于北亚热带向暖温带气候过渡地带,历年平均降水量为 1 048.3 mm,区域面积为 108.73 km²。研究区域内部下垫面情况复杂,区域外河包围、区域内河道纵横,属于典型的平原水网城市,采用圩区排水与局部强排的模式,即地表径流经管道排至内河,通过内河水位调度排至外河。研究区域内雨水管道总长为 406 km,管道设计重现期为 3 年,区域共有排涝泵站 14 座,合计排涝流量为 376 m³/s,泵站的最低、最高和起排水位分别为 1.0、2.0、1.5 m。

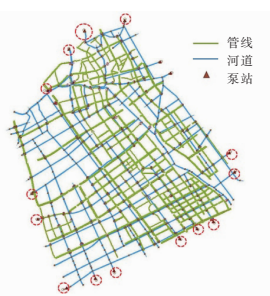


图1 研究区域的排水系统示意

Fig.1 Drainage system of study area

2 分析方法

选用 GIS 与模型软件 InfoWorks ICM 建立研究区域的综合流域排水系统模型,此模型将排水管网水力模型、河道水力模型、二维城市(流域)洪涝淹没模型耦合为一体,并结合外部降雨事件进行模拟分析,形成综合流域排水系统模型^[7]。

2.1 降雨情景设置

设计暴雨的降雨过程(降雨强度随时间的分配)称为设计暴雨时程分配雨型。在小流域洪水计算的推理公式中,常把雨强作均匀概化,即采用均匀

雨型,这与绝大多数实际降雨不符,本研究考虑降水时空分布的变化,降雨雨型分配根据当地暴雨洪水图集中 24 h 降雨设计。因此设计如下 4 种不同降雨情景,以分析不同降雨重现期下研究区域的内涝风险状况:①情景一,3 年重现期持续 24 h 长历时降雨,此情景模拟设计重现期下研究区域的内涝风险情况,以分析研究区域管网在现状设计重现期下能否满足降雨径流排放要求;②情景二,10 年重现期持续 24 h 长历时降雨,此情景模拟在发生超过管网系统设计标准、但不超过内涝防治设计标准降雨的情况下,研究区域的内涝风险情况以及此时外围排涝泵站运行情形;③情景三,30 年重现期持续 24 h 长历时降雨,此情景模拟发生超过排涝泵站设计标准的暴雨时,区域内部由管道、河道、泵站构成的排水防涝系统联合运行,管道排放降雨径流至区域内部河道,内河水位通过外围泵站的运行进行调控,在这种联合运行模式下研究区域的内涝风险情况;④情景四,100 年重现期持续 24 h 长历时降雨,此情景模拟在台风期间城区的内涝风险情况,以分析在台风天气等极端降雨条件下可能带来的自然灾害,并寻求预防与减缓措施。

不同情景的设计降雨雨型如图 2 所示。

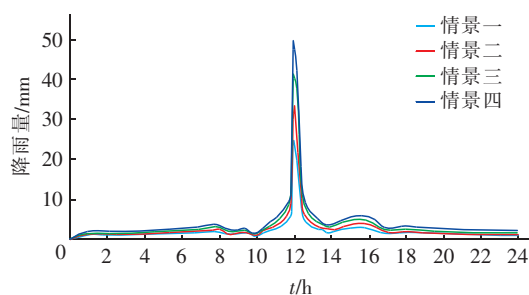


图2 不同降雨情景的设计降雨雨型

Fig.2 Design rain patterns of different rainfall scenarios

2.2 地形分析与下垫面解析

根据收集到的地形实测数据,利用 ArcGIS 进行地面模型的建立与分析。在 GIS 平台中以地形实测数据为依据,通过单独抽取标高点导入 ArcMap 平台,生成带有标高的点要素文件并进行插值,从而得到高程连续曲面,再将其转换为高程栅格数据,即数字高程模型(DEM)。将高程模型导入 InfoWorks ICM 软件,依据实际高程数据进行洪涝淹没模拟。

根据下垫面解析结果发现:研究区域为城市密集建成区,以居民房屋、商业用地为主,建筑密度高,

占总面积的30%,总不透水地面占总面积的近60%,绿地率仅为24.6%。按照加权平均算法得出研究区域的综合径流系数为0.65。

2.3 综合流域排水系统模型的建立

① 模型构建

模型将排水管网水力模型、河道水力模型、二维城市(流域)洪涝淹没模型耦合为一体,通过数据收集与处理概化三大模型,具体的数据收集及模型耦合流程如图3所示。

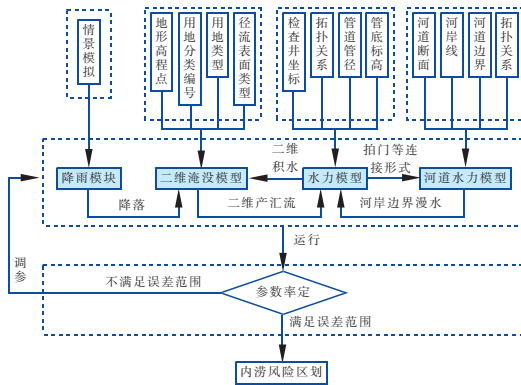


图3 流域综合模型耦合运行流程

Fig.3 Flow chart of integrated catchment model operation

水流在管道内部以一维圣维南方程组为基础依据进行水动力学计算,它们是一组质量守恒和动量守恒等式,可以完整地模拟管道或渠道内的水力学状态,精确模拟回水和溢流现象。

地表水文属性中采用分布式模型模拟降雨-径流,基于详细的子集水区空间划分和不同产流特性的表面组成进行径流计算,主要计算单元包括:初期损失、产流计算、汇流计算。

依据下垫面解析结果将径流表面概括为道路、屋顶、绿地3种类型,道路和屋顶类型代表不渗透表面,采用固定径流模型进行产流计算;绿地类型代表可渗透表面,采用Horton渗透模型进行产流计算;各类型统一采用SWMM径流模型进行汇流计算。

② 模型参数的确定

根据模型手册以及相关文献^[8]得到一定的参数取值范围,同时根据研究区域的综合径流系数,进行参数率定得到最终参数取值:不透水区、透水区、管道的曼宁粗糙系数分别为0.021、0.013、0.013,道路和屋顶的径流系数均为0.9,绿地的最大入渗率为70 mm/h、最小入渗率为3.6 mm/h、衰减系数为4 h⁻¹。

③ 模型模拟运行

本研究基于4种不同降雨情景模拟运行24 h,运行原理为:基于排水管网水力模型通过定义地表属性与二维地面结合,研究区域外围边界设置为常规模式(即水流流到边界按照正常方式流出研究区域),降落到汇水区的雨水,去除下渗及蒸发量,根据地表水文属性转化为地表径流,地表径流汇入管网模型通过水力计算在排放口排入河道,河道水位可以通过泵站来控制。当河道达到最高水位或管道排水能力不足时,即管网达到超负荷状态时,水流从检查井溢出到达地面产生二维积水。

2.4 评估方法的确定

① 内涝风险划分

城市内涝风险的大小取决于多方面因素,包括气候、下垫面、排水能力、地面标高和河道水位控制标高等,可以通过单一指标或多个指标叠加,综合评估城市内涝灾害的危险性。根据研究区域特征,结合城市地表积水时间和积水深度,内涝风险评估采用双因子评估方法,总体划分为3类:低风险、中风险和高风险,划分标准如表1所示。

表1 内涝风险划分标准

Tab.1 Criteria for classification of waterlogging risk

项 目		积水时间/min		
		0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 120
积水深度/m	0.15 ~ 0.25	低风险	中风险	中风险
	0.25 ~ 0.50	中风险	高风险	高风险
	>0.50	高风险	高风险	高风险

② 蓄水量差值分析

系统的水量始终处于平衡状态,降雨导致的地表径流是系统的水量来源,地表径流量 $Q_{\text{径流}}$ 包括管道蓄水量 $Q_{\text{管}}$ 、河道蓄水量 $Q_{\text{河}}$ 以及积水量 $Q_{\text{积}}$,此外还存在一定的外排量 $Q_{\text{排}}$,分析系统在不同时刻的水量累积值,建立平衡关系式即可分析出系统存在的蓄水量差值 $Q_{\text{差}}$,水量平衡关系如下: $Q_{\text{径流}} = Q_{\text{管}} + Q_{\text{河}} + Q_{\text{积}} + Q_{\text{排}} + Q_{\text{差}}$ 。

3 结果与讨论

3.1 内涝风险评估

① 内涝风险空间分布

将模型运行后的2D结果点数据输出为shp文件格式并导入ArcGIS软件,根据内涝风险划分标准筛选成图从而形成内涝风险等级图。情景一条件下的内涝风险分布如图4所示。

同理可得到另外3种情景的内涝风险分布图,

利用 ArcGIS 统计内涝风险区面积,结果见表 2。这 4 种情景下,随着降雨总量的升高,内涝风险总面积逐步增大。在情景一~四条件下,内涝风险区面积分别占总面积的 9.9%、20.0%、27.0% 和 45.2%。

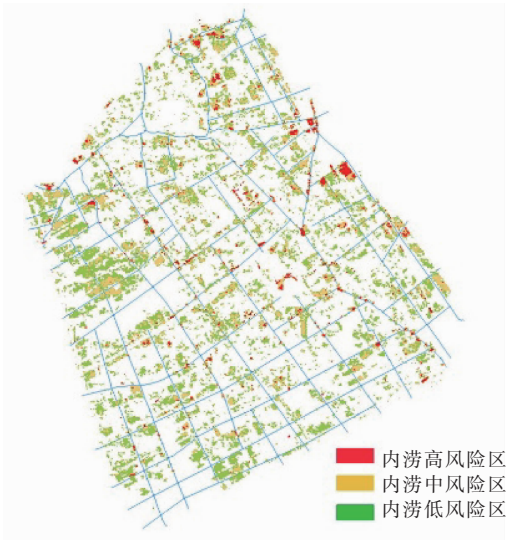


图 4 情景一的内涝风险分布

Fig. 4 Distribution map of waterlogging risk under rainfall scenario 1

表 2 不同降雨情景下的内涝风险区面积

Tab. 2 Waterlogging risk area under four rainfall scenarios hm^2

项 目	情景一	情景二	情景三	情景四
低风险面积	859	1 459	1 847	1 585
中风险面积	185	654	957	2 840
高风险面积	31	65	132	488
总计	1 075	2 178	2 936	4 913

② 蓄水量差值分析

利用 InfoWorks ICM 软件对各降雨情景进行水量平衡分析,由此计算出各降雨情景下的蓄水量差值。情景一条件下的水量平衡分析结果见图 5。

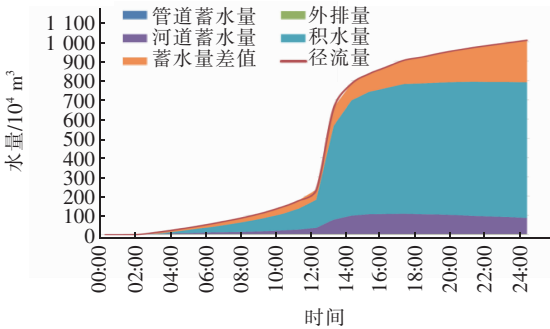


图 5 情景一的水量平衡分析

Fig. 5 Water balance analysis of rainfall scenario 1

同理可得到另外 3 种情景的水量平衡分析结果。在情景一条件下,蓄水量差值为 $219 \times 10^4 \text{ m}^3$,情景二条件下为 $254 \times 10^4 \text{ m}^3$,情景三条件下则增加至 $313 \times 10^4 \text{ m}^3$,情景四为最不利条件,蓄水量差值也大幅度增加至 $575 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。综上可知,在不同降雨情景下水量平衡关系中皆存在一定差值,反映了不同降雨情景下研究区域存在的蓄水量差值或排水量不足,结合内涝风险区的分布及面积大小,可以分析出存在内涝风险的具体原因及有针对性地采取措施,如增加调蓄设施、扩增管径、增加系统外排量等。

3.2 内涝风险分析及措施

在情景一中,在管网设计重现期下,研究区域虽然普遍以内涝低风险为主,但仍有 9.9% 的区域处于内涝风险中,说明现状排水系统不能满足排水要求。这是由于研究区域属于老城区,开发较早导致土地利用集约化,城市建设用地占据农田、填埋河道,导致原有的地表水文条件改变,使得硬化路面比例较大、地表综合径流系数较高、水面率下降、绿地率较低,使其内部对降雨的“蓄、渗、滞”能力下降。由于对径流源头控制不足,产生的径流量增大,此情景下,系统存在 $219 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的蓄水量差值,此蓄水量差值可以通过增设 LID 设施来减少降雨径流并增大调蓄量进行补足。

在情景二中,随着降雨强度的增大,内涝风险区范围逐步增大且程度逐步加深,当降雨强度在圩区周边排涝泵站设计标准以内时,内涝风险区分布较零星,多为局部低洼地区或管网缺失地区,因此研究区域在情景二下的 $254 \times 10^4 \text{ m}^3$ 蓄水量差值主要由于管网排水能力不足导致,此时应逐步完善雨水管网并对局部低洼区进行提升地坪标高改造,在内涝风险严重处增设雨水强排泵站等加快积水的排放。

对比情景二与情景三可知,情景三中降雨超过圩区周边排涝泵站设计标准时,外围河道排涝不畅,对下游管道产生水位顶托作用,使得管网下游无法继续排水,因此内涝风险区范围更广、内涝风险区面积更大,此时存在的 $313 \times 10^4 \text{ m}^3$ 蓄水量差值可以通过增大排涝泵站运行时长、提高泵站流量来解决。

在情景四中,模拟台风期间的强降雨,其内涝风险区范围更加广泛,风险程度更加严重,风险区面积达到研究区域总面积的 45.2%,即近一半区域会发生内涝,且蓄水量差值相比情景一增加了近一倍,因此需要在台风期预防城市内涝灾害的发生,而圩区

排水模式的区域,设置好防洪设施是减少洪涝灾害发生的关键。

4 结论与建议

① 结合水力模型与地理信息系统,并通过模拟不同降雨情景,很大程度上方便了对区域排水系统的整体性分析与总结,但这是一项长期的工作,今后需要不断利用数据与先进的技术进行完善和充实,以满足各种不同的实际需求。

② 城市建成区大多面临管网设计标准偏低、管道老化等问题,因此应实行管网提标改造与新增管网建设,提高雨水管覆盖率、提高管道设计标准以提升排放能力。

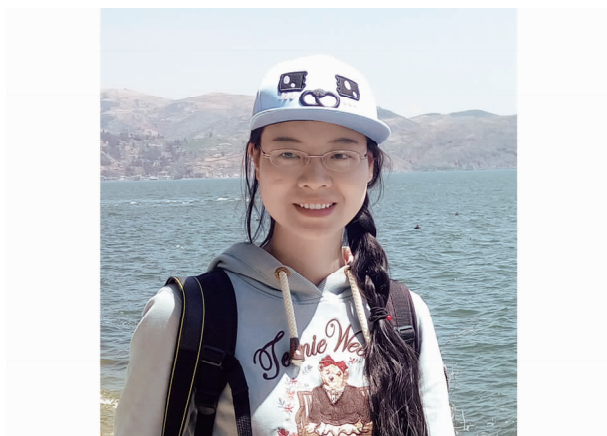
③ 城镇化建设导致的生态破坏使得地表硬化率高、绿地率低,河道填埋使得水面率下降,对于城镇化建设集约的老城区应逐步推行海绵城市建设,进行生态修复,扩增绿地、改造硬化路面、增加湖泊水体提高自我调蓄能力,从源头上对降雨径流进行削减与调蓄。

④ 完善片区周边堤防工程,提高排涝标准,根据排涝量合理分布与扩增排涝泵站,通过调节泵站启闭水位,控制内涝排放,减少城区内部的内涝风险;对于极端自然天气造成的短历时强降雨,应提前预备应急防灾措施。

参考文献:

- [1] 张芹藻. 已建多排水系统联合提标改造方案研究[J]. 中国给水排水,2017,33(15):116-121.
Zhang Qinzao. Integrated upgrading and reconstruction strategy of multiple constructed drainage systems [J]. China Water & Wastewater,2017,33(15):116-121 (in Chinese).
- [2] 王建龙,涂楠楠,席广朋,等. 已建小区海绵化改造途径探讨[J]. 中国给水排水,2017,33(18):1-8.
Wang Jianlong, Tu Nannan, Xi Guangpeng, et al. Discussion of residential district renovation combined with sponge city development [J]. China Water & Wastewater,2017,33(18):1-8 (in Chinese).
- [3] Zhou Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts [J]. Water,2014,6(4):976-992.
- [4] Roberts D W, Dowling T I, Walker J. FLAG: A Fuzzy Landscape Analysis GIS Method for Dryland Salinity Assessment [M]. Canberra: CSIRO Land and Water, 1997.

- [5] 权瑞松,刘敏,张丽佳,等. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝暴露性评价[J]. 地理科学,2011,31(2):148-152.
Quan Ruisong, Liu Min, Zhang Lijia, et al. Exposure assessment of rainstorm waterlogging on buildings in central urban area of Shanghai based on scenario simulation [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2):148-152 (in Chinese).
- [6] 王林,秦其明,李吉芝,等. 基于GIS的城市内涝灾害分析模型研究[J]. 测绘科学,2004,29(3):48-51.
Wang Lin, Qin Qiming, Li Jizhi, et al. Study on the disaster analysis model of water-logging in city based on GIS [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(3):48-51 (in Chinese).
- [7] 陈翠珍,蒋佳鑫,李敏. 基于水力模型的青山海绵示范区排水防涝风险评估[J]. 中国给水排水,2016,32(17):105-108.
Chen Cuizhen, Jiang Jiaxin, Li Min. Risk assessment of drainage and waterlogging prevention system for Qingshan sponge demonstration area based on hydraulic model [J]. China Water & Wastewater,2016,32(17):105-108 (in Chinese).
- [8] 刘小梅,吴思远,云海兰,等. 水力模型在排水防涝规划体系中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(11):133-138.
Liu Xiaomei, Wu Siyuan, Yun Hailan, et al. Application of hydraulic models in drainage and flood control planning systems in small watersheds [J]. China Water & Wastewater,2017,33(11):133-138 (in Chinese).



作者简介:王诗婧(1991-),女,江苏盐城人,硕士,工程师,研究方向为市政规划等。

E-mail:shijing_qing@163.com

收稿日期:2019-11-05