

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0118

陶伯钧, 桑国庆, 张永平, 等. 基于 SWMM 的平原区小城镇排涝体系评估与优化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1197-1207. TAO B J, SANG G Q, ZHANG Y P, et al. Evaluation and optimization of village drainage system based on SWMM in plain area [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1197-1207. (in Chinese)

基于 SWMM 的平原区小城镇排涝体系评估与优化

陶伯钧¹, 桑国庆¹, 张永平², 王海军³

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 257000; 2. 水发规划设计有限公司, 济南 257000; 3. 山东省水文中心, 济南 257000)

摘要: 针对我国平原区小城镇面临严重内涝灾害威胁的问题, 结合平原区小城镇的排涝体系特点, 探索一种简便的平原区小城镇排涝体系评估和优化方法。基于暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)建立平原区典型小城镇排涝模拟模型, 并采用历史洪涝数据对模型进行率定和验证。在此基础上, 通过对典型重现期暴雨下的内涝模拟, 评估典型城镇排涝能力。根据管渠超载时间、节点积水时间和积水量, 找出排涝体系薄弱环节, 提出有针对性的排涝体系优化方案, 并对优化效果进行评估。结果表明: 建立的排涝模拟模型基本可靠, 模拟结果与实际情况基本相符; 典型小城镇排涝体系薄弱点主要为主干管渠排涝压力大, 蓄水池未得到有效利用; 据此提出的优化方案效果明显, 在 20 年一遇暴雨情况下, 可以减少典型小城镇 90% 的积水时间和 67% 的积水量, 显著提高城镇排涝能力。

关键词: 洪涝灾害; SWMM; 平原区小城镇; 排涝体系; 评估与优化

中图分类号: TV212.5 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



长久以来, 平原区内涝问题一直是洪涝灾害防治的焦点。平原区河网密集, 有复杂的水文特性^[1-2], 导致内涝影响因素复杂多变。目前城市洪涝灾害是研究重点^[3-8], 由于城市化程度不同, 城镇地区的内涝灾害与城市中心城区有明显区别^[9-11]。相比城市, 平原区小城镇汇水面积和人口密度较小, 内部排涝设施建设不完善, 多利用地上沟渠进行排水, 缺乏统一规划, 且通常存在局部低洼区域, 保留了部分坑塘。虽然相对城市其内涝损失相对较小, 但由于小城镇数量众多, 分布范围广, 全面治理难度大。此外, 许多城镇位于中小河道沿线或者低洼易涝区, 受河道洪水顶托的影响严重, 在河道水位较高时排涝受阻^[12]。频发的内涝灾害已经制约了平原区小城镇的经济社会发展, 随着美丽乡村、乡村振兴项目推进, 平原区小城镇的防汛和内涝治理问题将得到更多的关注。

城市洪涝灾害的主要成因之一是城市化建设侵

占了原有天然河道、坑塘、湖泊, 导致城市区域蓄水能力降低^[13]。在城市中心城区的洪涝灾害研究中, 许多学者都对蓄水池和河道顶托现象进行了研究。张勤等^[14]以昆明某片区为例, 采用暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)模拟低影响开发(low impact development, LID)措施与雨水调蓄池联合运作效果, 结果表明, 雨水调蓄池可以有效提高防涝能力。与中心城区不同, 小城镇区域由于城市化程度较低, 仍然留存大量坑塘, 但由于缺乏水系连通和合理规划, 并没有起到应有的作用。因此, 在小城镇区域, 将现存坑塘、湖泊纳入到排水体系, 是一种经济实用的排水体系优化方法。

目前对于非城市中心区域的洪涝灾害研究多数集中在流域尺度上^[15-19], 关注河流漫溢而产生的洪水淹没情况及小城镇内部的内涝灾害研究较少。小城镇排涝体系优化主要面临两个方面的问题: 在工程措施方面, 由于尺度小、人口少, 需要考虑经济

收稿日期: 2022-03-28 修回日期: 2022-09-16 网络出版时间: 2022-11-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221107.1622.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909104); 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME249)

作者简介: 陶伯钧(1998—), 男, 山东东营人, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 1186637356@qq.com

通信作者: 桑国庆(1981—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: sangguoqing@163.com

适用性,大规模的排涝工程建设并不适用;在非工程措施方面,建立精细化水文水动力耦合模型虽然能够较好描述内涝过程,但其模型相对复杂,所需资料多,且成本较高。因此,需要一种简单有效的方法评估城镇的排涝能力,并提出有针对性、经济合理的优化方案。

针对小城镇内涝灾害的特点,选取山东省平原区典型小城镇作为研究对象,基于 SWMM 模型,通过对不同频率暴雨下的典型城镇排涝模拟,对城镇排涝体系进行评估,分析排涝薄弱点和易积水区,在此基础上构建优化模型,提出排涝体系优化方案。

1 研究区概况

研究区位于山东省广饶县大码头镇南部。广饶

县年平均降雨量 587.4 mm,平均气温 12.3 ℃,属季风性气候,雨、热同期,四季分明。区域地势平坦,汇流速度慢,洪水历时长,夏秋雨季局部易发生内涝灾害。

选取的典型城镇 2018—2020 年均发生过内涝灾害。根据广饶县相关河道治理报告,研究区附近永红沟的河道防洪设计标准为 20 年一遇。因此,在发生重现期小于 20 年一遇的暴雨时,一般无外洪威胁。城镇内有一定规模的排涝设施,但存在排涝体系不连通、管渠淤积等问题,且现有小型蓄水池缺乏与排涝体系的有效联通,导致蓄水池内常年积水,有效滞蓄容积大大降低,没有发挥其应有的滞蓄效果,在一定程度上降低了城镇的防洪排涝能力。研究区排涝设施情况调查结果见表 1。

表 1 研究区排涝设施情况调查结果

Tab. 1 Survey results in the study area

管渠总长度/m	管渠淤积长度/m	蓄水池总面积/m ²	蓄水池总容积/m ³	蓄水池常年积水量/m ³	蓄水池常年积水深/m	控制断面排水口高程/m
5 548	759	25 490	60 264	34 823	1.09	5.56

2 模型构建

2.1 SWMM 简介

SWMM 是一款开源的雨水径流模型,在国内外洪涝模拟中应用广泛^[20-27],其对于管道和渠道有较好的模拟效果^[22]。该模型将子汇水区作为基本的水文单元,以非线性水库法进行求解。模型提供了可选择的下渗计算方式(Horton、Green-Ampt、SCS 曲线法)和管网一维水动力计算方式(稳定流、运动波、动态波)。基于研究区现状,选择 Horton 模型为下渗计算方法,管网汇流采用动态波法。

SWMM 模型在计算积水时以节点为计算单元,根据节点水头判定是否产生积水。当计算节点新水头 H_{new} 大于最大深度 H_{max} 时,将水头设置为 H_{max} ,排水管网开始满溢积水,表示为

$$Q_{\text{out}} = \frac{1}{2} \left(\sum Q_t + \sum Q_{t+\Delta t} \right) \quad (1)$$

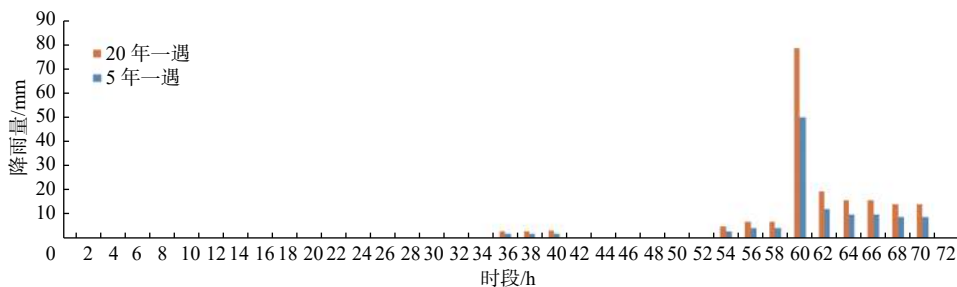


图 1 不同重现期设计暴雨过程

Fig. 1 Design of rainstorm process with different frequencies

式中: Q_{out} 为节点满溢量, m^3/s ; $\sum Q_t$ 、 $\sum Q_{t+\Delta t}$ 分别为 t 和 $t + \Delta t$ 时刻的节点净流量(进流量-出流量), m^3/s 。

2.2 设计暴雨洪水计算

基于区域周边雨量站 30 a 实测雨量资料,采用频率分析方法计算不同频率的最大 72 h 降雨。在 n 项连序降雨系列内,按年最大 72 h 降雨量大小顺序排位第 m 项的经验频率计算公式为

$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad m = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

采用 P-III 型频率曲线进行适线,通过调整 C_s 、 C_v 的倍比,确定拟合最佳的频率曲线,相应的分布参数为总体分布参数的估计值,根据频率曲线可得各频率 72 h 降雨量。同时采用研究区流域雨型分配表,进行暴雨时程分配,不同频率设计暴雨时程分配成果见图 1。

根据排水口高程和相应控制断面测量,结合当地历史洪水位和设计水位,可知在排涝过程中研究区存在河道顶托风险,在城镇排水口附近设置控制断面,见图2。研究区外围河道断面不规整,无堤防,周边地形采用1:5000地形图数据。根据河道断面调查情况,设置糙率为0.035,根据河道设计流量计算控制断面水位过程,结果见图3。

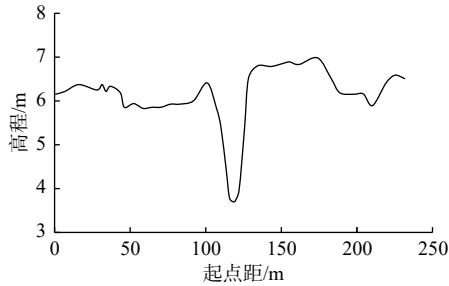


图2 控制断面

Fig. 2 Schematic diagram of control section

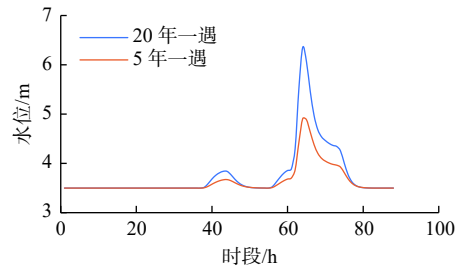


图3 排水口水位时间序列

Fig. 3 Time series of water level at outfall

2.3 模型构建

由于城镇面积较小,在城镇尺度上,大面积的土地利用类型精度不足,而土地利用类型对于模型参数的确定至关重要,故综合实地调查结果和高分辨率遥感影像,对研究区的城镇用地类型进行统计,具体结果见图4。



图4 城镇用地类型

Fig. 4 Schematic diagram of land use types in villages

根据实地调查数据和遥感影像,将研究区划分为214个子汇水区,初步设定不同用地类型的不透水面积比、曼宁系数、各子汇水区的面积、特征宽度等参数。各子汇水区坡度由1:5000地形图数据计算。参考SWMM模型用户手册,设定最大、最小入渗率分别为73、10 mm/h,衰减系数为4,透水、不透水地面的地面注蓄分别为5.62、1.05 mm。不同用地类型的参数见表2,子汇水区划分见图5。

根据现场调查和实地测量结果,对研究区内排

水管渠和蓄水池进行概化。根据其材料、长度和形状等特性,将排水管渠分为7种规格,共概化排水管渠102段。同时设置了2个蓄水单元的容积、连通节点和初始水深。参考SWMM模型用户手册,初设子汇水区和排水管渠的糙率等参数。在模型中通过设置排水口水位的时间序列,模拟河水顶托。排水管渠基本参数见表3,蓄水单元参数见表1,河道水位时间序列见图4。根据上述数据和方法建立基于SWMM模型的排涝模拟模型,见图6。

表 2 不同用地类型参数
Tab. 2 Parameters of different land types

用地类型	总面积/hm ²	衰减系数	最大入渗率/(mm·h ⁻¹)	最小入渗率/(mm·h ⁻¹)	不透水百分比/%	曼宁系数 <i>n</i>
居住用地	25.0715	4	50.8	7.62	50	0.150
透水空地	7.3219	4	101.6	10.70	20	0.012
不透水空地	1.0045	4	76.2	3.81	80	0.120
交通用地	3.3765	4	25.4	0.25	80	0.019

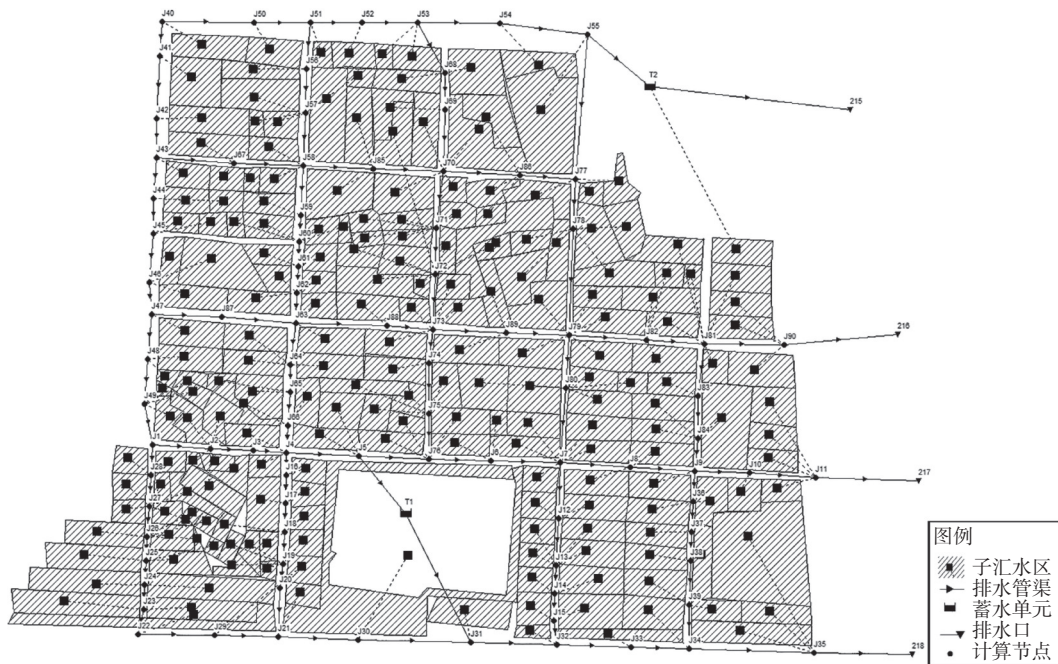


图 5 研究区排涝模拟模型概化
Fig. 5 SWMM model map of study area

表 3 排水管渠基本参数
Tab. 3 Basic parameters of drainage pipes

管渠位置	形状	高度/m	宽度/m	材质
南部路边沟	梯形明渠	0.40	上宽0.55 下宽0.35	水泥
中部路边沟	封闭矩形渠	0.50	0.90	水泥
北部路边沟	梯形明渠	0.50	上宽0.60 下宽0.30	水泥
部分管涵	圆形管涵	0.40		水泥
南部排水沟	不规则	0.40	0.50	泥土
入河排水口	圆形管涵	0.40		水泥
淤积管涵	不规则圆形管涵	0.20		水泥

2.4 模型参数率定及验证

选取研究区内 5 个易积水区域进行率定和验证, 见图 6。

调查典型城镇 20190811“利奇玛”台风和 20190706 降雨、20180820“温比亚”台风情景下的内涝情况, 搜集实测降雨资料, 现场调查统计典型城镇内 5 个易积水区域积水面积和最大积水深, 并将局部积水体积等效概化为棱台, 根据现场调查积

水范围、水深推求积水量。积水量计算公式见式 (3), 各区域调查积水面积和积水深见表 4。

$$\omega = \frac{1}{3} \left[S + \left(\frac{h}{s} \right)^2 + \sqrt{S \left(\frac{h}{s} \right)^2} \right] h \quad (3)$$

式中: ω 为积水量, m³; h 为调查积水深度, m; S 为调查积水面积, m²; s 为区域平均坡度。



图 6 验证区域

Fig. 6 Schematic diagram of verification area

表 4 调查积水情况

Tab. 4 Survey of water accumulation table

区域	20190811		20180706		20180820	
	积水面积/m	积水深度/m	积水面积/m	积水深度/m	积水面积/m	积水深度/m
1	7048	0.70	10564	0.70	2520	0.20
2	6658	0.50	9876	0.60	789	0.20
3	7669	0.60	8458	0.65	1975	0.20
4	2429	0.40	15946	0.60	2251	0.13
5	2787	0.3	5765	0.55		

选取 20190811 “利奇玛” 台风和 20190706 降雨及内涝数据作为模型率定数据, 20180820 “温比亚” 台风降雨及内涝数据作为验证数据。

不透水面积比、特征宽度和曼宁系数对积水量模拟结果呈现较大的敏感性^[19]。模型中特征宽度可

根据研究区实测数据计算提取, 因此仅率定曼宁系数和不透水面积比两个参数。反复调整各参数, 使验证区域 ω 和 ω' 最为接近为止。不同验证区域 ω 和 ω' 比较及误差见表 5。各参数初始值和率定值见表 6。

表 5 模型率定成果

Tab. 5 Model calibration comparison table

区域	20190811			20190706		
	计算积水量/m ³	模拟积水量/m ³	相对误差/%	计算积水量/m ³	模拟积水量/m ³	相对误差/%
1	8959	8791	1.88	408	397	2.62
2	4136	3896	5.80	234	230	1.77
3	6515	6018	7.63	357	337	5.69
4	1703	1680	1.34	180	192	6.91
5	955	993	3.94		21	

表 6 模型率定参数

子汇水区曼宁系数				
类型	居住用地	透水空地	不透水空地	交通用地
范围	0.10 ~ 0.20	0.011 ~ 0.015	0.08 ~ 0.18	0.015 ~ 0.023
初设值	0.15	0.012	0.12	0.019
率定值	0.15	0.014	0.10	0.019

排水体系曼宁系数				
类型	封闭矩形渠	梯形明渠	圆管涵	不规则排水沟
范围	0.012 ~ 0.016	0.010 ~ 0.013	0.011 ~ 0.014	0.016 ~ 0.033
初设值	0.016	0.012	0.012	0.018
率定值	0.016	0.012	0.014	0.017

不透水面积比/%				
类型	居住用地	透水空地	不透水空地	交通用地
初设值	50	20	80	80
率定值	55	26	76	85

将 20180820 降雨数据输入率定后的模型,其积水量比较及误差分析见表 7。各验证区域积水量的相对误差在 10% 以内,其中 80% 的验证区域误差不得超过 5%,因此,所建立的模型可以较好反应研究区内涝过程。

表 7 模型验证成果

区域	20190811		
	调查积水量/m ³	模拟积水量/m ³	相对误差/%
1	10395	10102	2.82
2	7240	7467	3.14
3	8084	8392	3.81
4	9099	8907	2.11
5	4806	4460	7.19

3 排涝体系评估与优化

3.1 排涝体系评估

根据付潇然等^[24]对无数据城区 SWMM 模型建立及模拟研究中提出的方法,可以将 SWMM 模拟的积水概化为圆锥体,由此推导出积水深度,推导公式为

$$\omega = \frac{1}{3}\pi\left(\frac{h}{s}\right)^2 h \quad (4)$$

式中: ω 为模拟积水量, m³; h 为模拟最大积水深度, m; s 为平均坡度。

利用上述模型,模拟不同频率设计暴雨条件下的城镇内涝受灾情况,见表 8。其中最大积水深度大于 0.2 m 且积水时间超过 1 h,即视为其受灾,见图 7。



图 7 20 年一遇暴雨内涝模拟结果

Fig. 7 Schematic diagram of simulation results of two-year rainstorm and waterlogging

表 8 不同频率设计暴雨城镇受灾情况

Tab. 8 Villages affected by design rainstorms of different frequencies

设计暴雨频率	总积水量/m ³	最大积水深/m	积水点个数	最大积水时间/h	超载管渠长度/m	蓄水池利用率/%
5年一遇	5965	0.22	31	9.58	693	25
20年一遇	16081	0.27	40	12.57	2342	48

由模拟结果可知,该城镇在遭遇 5 年一遇暴雨时已经开始受灾,积水量为 5965 m³,最大积水深度 0.22 m。其实际排涝能力低于 5 年一遇。当遭遇 20 年一遇暴雨时,城镇受灾程度加剧,积水量为 16081 m³,最大积水深度 0.27 m,积水点和超载管渠的位置见图 7。在本次模拟中,该城镇管渠排水压力主要集中于南部和东部,蓄水池充满度较低,并未很好发挥防洪排涝功能。

3.2 排涝体系优化

通过模拟结果分析可知,干渠排涝压力大,部分管渠淤积对排涝影响显著,且蓄水池未充分利用,因此,初步制定优化方案为局部管渠拓宽和挖深,同时增设泵站和管涵连通坑塘滞蓄涝水。

3.2.1 优化模型

以方案总成本最小为目标,构建排涝体系优化模型,以改造管渠长度和尺寸、泵站台数为变量,以排涝能力满足 20 年一遇标准为约束条件,即最大积

水深度不超过 0.2 m、积水时间不超过 1 h,推求排涝体系的优化方案。

$$U_s = \text{Min}U \quad (5)$$

$$U = an + bl_g + cl_q h_q d_q + dl_r [h_r d_r - h'_r d'_r] \quad (6)$$

$$\max h < 0.2 \quad (7)$$

$$\max t < 1.0 \quad (8)$$

式中: U_s 为最优方案成本,元; U 为方案总成本,元; a 、 b 、 c 、 d 分别为抽水泵站、排水管、排水渠和排水沟的成本系数; l_g 、 l_q 、 l_r 分别为排水管、排水渠和排水沟的优化长度, m; h_q 、 h_r 分别为排水渠和排水沟优化后的深度, m; d_q 、 d_r 分别为排水渠和排水沟优化后的深度, m; h'_r 、 d'_r 分别为优化前排水沟的深度和宽度。 $\max h$ 为最大积水高度, m; $\max t$ 为最大积水时间, h。

模型采用枚举法求解,生成若干个模拟方案,筛选模拟符合约束条件的方案,并核算其成本,选择成本最低的方案为优化方案,见表 9。

表 9 优化方案枚举分析

Tab. 9 Optimization scheme enumerate and analysis table

方案	20年一遇模拟结果		是否满足约束条件	优化成本/元
	最大积水深/m	最大积水时间/h		
方案1	0.25	2.3	否	159520
方案2	0.25	2.1	否	194450
方案3	0.24	1.8	否	209430
方案4	0.22	1.7	否	234760
方案5	0.22	1.4	否	251070
方案6	0.21	1.3	否	271860
方案7	0.21	1.1	否	283930
方案8	0.20	1.0	是	344120
方案9	0.15	0.8	是	364460
方案10	0.10	0.5	是	394120
方案11	0.09	0.5	是	424750
方案12	0.07	0.4	是	442670
方案13	0.05	0.3	是	496790
方案14	0.02	0.1	是	552140

最终选择的优化方案为方案 9: 主干排水渠挖深至 0.8 m, 拓宽至 0.6 m, 共需优化排水渠 377 m; 排水沟挖深至 1 m, 拓宽至 0.8 m, 共 677 m; 对所有淤积管涵进行清淤处理; 增设直径为 0.7 m 管涵 60 m, 连接蓄水池, 提高排涝体系的连通性, 增设一台抽水泵在汛期抽排蓄水池内积水, 发挥蓄水池

的排涝能力。

3.2.2 优化方案分析

5 年一遇和 20 年一遇设计暴雨情景下, 对优化前后排涝体系模拟结果分析对比可得, 优化方案提高了城镇排涝能力, 提升了蓄水池调蓄能力, 减少了积水点数量、积水量和积水时间, 见表 10 和图 8。

表 10 优化前后典型城镇排涝能力数据对比

Tab. 10 Optimize before-after comparisons

	5年一遇设计暴雨					20年一遇设计暴雨				
	总积水量/ m ³	最大积水深/ m	积水点 数量	最大积水时间/ h	蓄水池利用率/ %	总积水量/ m ³	最大积水深/ m	积水点 数量	最大积水时间/ h	蓄水池利用率/ %
	优化前	5965	0.22	31	9.6	25	16081	0.27	40	12.6
优化后	417	0.09	22	0.2	74	5353	0.18	33	0.9	93

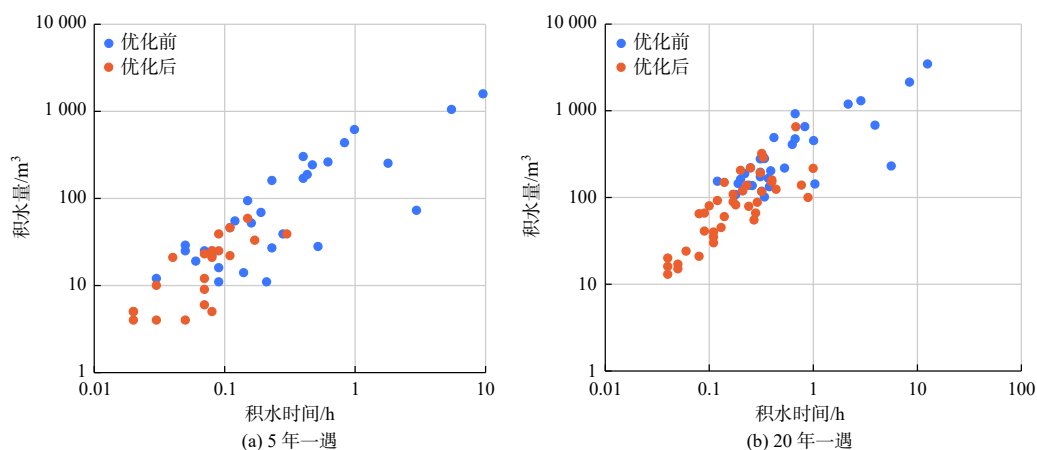


图 8 积水点优化结果对比

Fig. 8 Comparison of optimization results of ponding points

由图 8 可知, 城镇内各个积水点的积水时间和积水量都有所减少。遭遇 5 年一遇暴雨时, 城镇总积水量和积水时间均减少 90% 以上, 最大积水深度减少 59%; 遭遇 20 年一遇暴雨时, 总积水量减少 67%, 积水时间减少 90%, 最大积水深度减少 33%。

4 结论

以山东省平原区典型小城镇为例, 在对城镇排涝体系概化处理的基础上, 建立基于 SWMM 模型的平原区小城镇排涝模拟模型, 并对平原区典型小城镇的排涝能力进行综合评估, 提出切实有效的优化方案。主要结论如下:

基于 SWMM 建立的内涝模型可以较好地模拟城镇内涝积水时间、积水量等情况, 模型模拟结果与调查情况相差不大, 模型具有一定的可靠性和适用性。

通过该模型发现平原区城镇排涝体系中薄弱环

节, 研究区排涝体系评估结果表明: 在遭遇 5 年一遇和 20 年一遇暴雨时, 研究区排水管渠超载长度分别为 693 m 和 2 342 m, 蓄水池有效利用率不超过 50%, 主要成灾原因为管渠淤积、干渠排涝能力不足和蓄水池未有效利用。

在排涝体系评估的基础上, 提出拓宽主干和排水压力过大的管渠, 增设蓄水池与排水体系的连接通道, 在汛期抽排积水等措施, 以成本最低为目标, 构建了排涝体系优化模型, 选取最优方案。研究区优化结果表明: 20 年一遇降雨情况下, 在成本最低情况下, 优化后的方案较优化前可减少 90% 的积水时间和 67% 的积水量, 有效完善了该典型城镇的排涝体系, 并降低了其受灾程度。

历史内涝数据的可靠性直接影响到本文的计算结果。在后续的研究中, 应当设法获取更加准确和可靠的实测数据, 以提高模型模拟的准确度。

参考文献(References):

- [1] 徐羽, 许有鹏, 王强, 等. 太湖平原河网区城镇化发展与水系变化关系[J]. *水科学进展*, 2018, 29(4): 473-481. (XU Y, XU Y P, WANG Q, et al. The relationship between urbanization development and water system changes in the river network area of the Taihu Plain[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(4): 473-481. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.04.003.
- [2] 徐慧, 杨姝君. 太湖平原圩区河网演变模式探析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 366-371. (XU H, YANG S J. Analysis on the evolution model of river network in the polder area of Taihu Plain[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 366-371. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.03.005.
- [3] MILLER J D, HESS T. Urbanization impacts on storm runoff along a rural-urban gradient[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 474-489. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.025.
- [4] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. *水利学报*, 2017, 48(9): 1009-1014, 1022. (WANG H, MEI C, LIU J H. Construction mode of sponge city system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(9): 1009-1014, 1022. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20170308.
- [5] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 381-392. (XU Z X, YE C L. Urban rainstorm and flood simulation: principle, model and prospect[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20200515.
- [6] AHAD H T, ERFAN G. Developing a hybrid modeling and multivariate analysis framework for storm surge and runoff interactions in urban coastal flooding[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 595: 125670. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125670.
- [7] 王静, 李娜, 程晓陶. 城市洪涝仿真模型的改进与应用[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1393-1400. (WANG J, LI N, CHENG X T. Improvement and application of urban flood simulation model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1393-1400. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.2010.12.002.
- [8] 陈文龙, 徐宗学, 宋利祥, 等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(6): 659-672. (CHEN W L, XU Z X, SONG L X, et al. Research on urban flood control based on the holistic view of watershed system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(6): 659-672. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.20200750.
- [9] 胡庆芳, 张建云, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研
- 究综述[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 138-150. (HU Q F, ZHANG J Y, WANG Y T, et al. Review on the impact of urbanization on precipitation[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 138-150. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.01.016.
- [10] 宋文峰. 农村地区洪涝脆弱性研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. (SONG W F. Study on flood vulnerability in rural areas [D] Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [11] JAMSHED A, JOERN B, DANIEL F, et al. A conceptual framework to understand the dynamics of rural-urban linkages for rural flood vulnerability[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2894-2894. DOI: 10.3390/su12072894.
- [12] 陆露, 赵冬泉, 陈小龙, 等. 城市排水管网与内部河道耦合模拟研究[J]. *给水排水*, 2014, 50(10): 103-107. (LU L, ZHAO D Q, CHEN X L, et al. Study on coupling simulation of urban drainage network and internal river[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 50(10): 103-107. (in Chinese)) DOI: 10.13789/j.cnki.wwe1964.2014.0280.
- [13] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳, 等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 713-724. (XU Z X, CHEN H, REN M F, et al. Research progress on the mechanism and risk assessment of urban flooding in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.008.
- [14] 张勤, 陈思飘, 蔡松柏, 等. LID措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(9): 134-138. (ZHANG Q, CHEN S Y, CAI S B, et al. Simulation study on combined operation of LID measures and rainwater storage tank[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(9): 134-138. (in Chinese)) DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.09.027.
- [15] 牛帅, 崔信民. 村镇易涝区动态洪水风险分析模型研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(4): 80-83. (NIU S, CUI X M. Research on dynamic flood risk analysis model in flood-prone areas of villages and towns[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019 (4): 80-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.04.016.
- [16] 申邵洪, 江炎生, 蔡斌, 等. 城镇区域洪水风险分析研究: 以湖北省保康县为例[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(11): 109-115. (SHEN S H, JIANG Y S, CAI B, et al. Analysis and study of flood risk in urban areas: A case study of Baokang County, Hubei Province[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(11): 109-115. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20160850.

- [17] 杨培生,付佳伟. 江西省农村基层洪涝灾害监测预警平台设计及应用[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(6): 42-45. (YANG P S, FU J W. Design and application of rural grassroots flood disaster monitoring and early warning platform in Jiangxi Province[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(6): 42-45. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2020-06-01.
- [18] 王晶,薛联青,张敏,等. 不同降水频率下淮河流域洪涝灾害风险评估[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(9): 1-5. (WANG J, XUE L, ZHANG M, et al. Risk assessment of flood disasters in the Huaihe River basin under different precipitation frequencies[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(9): 1-5. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2019-09-001.
- [19] 姜婧婧,杜鹏飞. SWAT模型流域划分方法在平原灌区的改进及应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(10): 866-872. (JIANG J J, DU P F. Improvement and application of SWAT model watershed division method in plain irrigation areas[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2019, 59(10): 866-872. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.22.033.
- [20] 李美水,杨晓华. 基于Sobol方法的SWMM模型参数全局敏感性分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 95-102. (LI M S, YANG X H. Global sensitivity analysis of SWMM model parameters based on Sobol method[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(17): 95-102. (in Chinese)) DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.017.
- [21] 李璟冉,周毅,李哲,等. 基于SWMM的管道淤积对排水能力影响的模拟分析[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(3): 118-125. (LI J R, ZHOU Y, LI Z, et al. Simulation analysis of the influence of pipeline sedimentation on drainage capacity based on SWMM[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(3): 118-125. (in Chinese)) DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.019.
- [22] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM原理解析与应用展望[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(5): 33-42. (MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Analysis and application prospect of SWMM principle[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(5): 33-42. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.05.006.
- [23] LUAN Q H, FU X R, SONG C P, et al. Runoff effect evaluation of LID through SWMM in typical mountainous, low-lying urban areas: A case study in China[J]. *Water*, 2017, 9(6): 439. DOI: 10.3390/w9060439.
- [24] 付潇然,王东,栾清华,等. 大尺度无管流数据城区SWMM构建及模拟: II. 模型参数校验及暴雨径流模拟分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(1): 51-60. (FU X R, WANG D, LUAN Q H, et al. Construction and Simulation of large scale urban SWMM without pipe flow data: II. Calibration of model parameters and simulation analysis of rainstorm runoff[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(1): 51-60. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.01.006.
- [25] 李怀民,常晓栋,徐宗学,等. 基于SWMM模型的坡地小区海绵城市改造效果评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 43-49, 82. (LI H M, CHANG X D, XU Z X, et al. Effect evaluation of sponge city reconstruction in sloping plot based on SWMM model[J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 43-49, 82. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0004.
- [26] DELL T, MOSTAFA R, SYBIL S, et al. Development and application of a SWMM-based simulation model for municipal scale hydrologic assessments[J]. *Water*, 2021, 13(12): 1644-1644. DOI: 10.3390/w13121644.
- [27] 马勇,顾正华,王庭辉,等. 基于SWMM的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 499-505. (MA Y, GU Z H, WANG T H, et al. Analysis on flood control and drainage capacity of hilly urban area based on SWMM[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2021, 49(6): 499-505. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.10001980.2021.06.003.

Evaluation and optimization of village drainage system based on SWMM in plain area

TAO Bojun¹, SANG Guoqing¹, ZHANG Yongping², WANG Haijun³

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 257000, China; 2. Shuifa Planning & Design Co., Ltd, Jinan 257000, China; 3. Shandong Hydrological Center, Jinan 257000, China)

Abstract: The specific requirement of the major historical task of building a new socialist countryside is

constructing beautiful countryside. However, frequent waterlogging disasters restrict the economic and social development of the small villages and towns in the plain areas in China. Therefore, it is particularly necessary to strengthen the flood control and drainage capacity of the small villages and towns in rural areas. The drainage system inside and around the village is an important measure for flood control and waterlogging removal, which needs to be scientifically evaluated and optimized. However, recently, there are few studies on the drainage system in rural plain areas. The stormwater management model is an open-source model developed by the U.S. Environmental Protection Agency. It has been applied to storm runoff and drainage simulation by researchers for a long time.

A typical plain village is chosen as the research object to explore a scientific and convenient method to evaluate and optimize the drainage system of small villages in the plain area. First, the basic situation, drainage system, and historical waterlogging disasters of the village are investigated, and remote sensing images of the region are referenced. This survey considers various situations such as the siltation of peripheral rivers and pipes and canals. 30-year rainfall observation data of the surrounding area is collected. Frequency analysis method is used to calculate the maximum 72-hour rainfall with different frequencies and predict the rainstorm time through the distribution table of rainfall patterns in the basin. A stormwater management model suitable for this village is established based on the investigated data. Most parameters in the stormwater management model are measured to avoid calibration. However, the roughness parameters and the impervious area ratio in the model are very sensitive and need to be calibrated accurately to ensure the accuracy of the model simulation. The historical waterlogging disaster data are used to calibrate and verify the model. This model is used to simulate and evaluate the village waterlogging in different rainstorm return periods. According to the simulation results, some targeted optimization measures are proposed, and the optimization effect is also analyzed.

The results show that the village has been affected by the once-in-five-year rainfall. Its maximum ponding time is up to nine hours and the maximum volume is nearly 6 000 cubic meters. Through the analysis, it is revealed that the main drainage channel is overloaded and the detention tank has not been effectively utilized. Given the above problems, some optimization measures, such as digging deep trunk and drainage channels with high drainage pressure and increasing the connectivity of the detention tank are put forward. After optimization, the disaster situation of the village is effectively alleviated. The maximum ponding time is reduced to 0.2 hours and the maximum ponding volume is reduced to 417 cubic meters. Under different rainfall conditions, the optimized ponding time and ponding volume of the village have been effectively improved.

Furthermore, taking the typical villages in the plain area of Shandong Province as an example, this study the village waterlogging simulation model is established by SWMM model. The drainage capacity of the village is evaluated, and a practical and effective optimization scheme is put forward. Thus, some conclusions can be put forward. The waterlogging situation of this village can be better reflected by the waterlogging model based on the stormwater management model. There are many weak points in the drainage system of villages, and the ability to prevent waterlogging is low. However, through targeted optimization measures, its ability to prevent waterlogging can be effectively improved.

Key words: flood disaster; SWMM; plain area; drainage system; evaluation and optimization