

丁兆利. 基于 SWMM 和二维水动力模型的城市雨水管网排水能力评估[J]. 净水技术, 2026, 45(7): 154–162.

Ding Z L. Assessment of urban stormwater drainage network capacity based on SWMM and 2D hydrodynamic model[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(7): 154–162.

基于 SWMM 和二维水动力模型的城市雨水管网排水能力评估

丁兆利*

(中节能数字科技有限公司, 北京 100192)

摘要 【目的】随着我国城镇化进程加快,城市热岛效应加剧,加上全球变暖带来的极端天气事件增多,造成内涝灾害频发,给城市安全带来了严重挑战,通过构建城市雨洪数值仿真模型,本文对城市内涝风险进行评估,优化防控预案,可减轻内涝带来的损失。【方法】在前期调研和收集资料的基础上,选取青岛市东岸城区为研究区域,将一维暴雨洪水管理模型(SWMM)和自主二维地表水动力学模型进行耦合,实现2种模型在水文水动力过程上的数据交互与协同计算,在验证耦合模型适应性和准确性的基础上,模拟分析了不同降雨重现期的雨水管渠排水运行工况及地表内涝积水情况。【结果】18.2%的管段满足50年一遇重现期的降雨,积水风险低;43.7%的管段在2年一遇重现期降雨下发生满管,是下一步改造需要重点关注的管段。同时,随着降雨重现期的增大,研究区域的积水范围和积水深度也随之加大,积水区域在整个研究区内分布较为平均。当设计降雨情景为5年一遇时,94.32%的区域始淹没深度未超过0.01 m,当设计降雨情景为50年一遇时,89.73%的区域始淹没深度未超过0.01 m,表明排水管网抵御暴雨的能力较强,容纳能力较好。【结论】一维-二维耦合模型实现了管网溢流与地表积水的双向反馈,提升了城市内涝水文过程的模拟精度,研究结果可作为后期雨水管网改造提升和运行管理优化的参考依据。

关键词 降雨重现期; 排水能力; 管道充满度; 积水范围; 管网评估; 城市内涝

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)07-0154-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.07.018

Assessment of Urban Stormwater Drainage Network Capacity Based on SWMM and 2D Hydrodynamic Model

Ding Zhaoli*

(CECEP Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract [Objective] With the acceleration of urbanization at home, the urban heat island effect has intensified, and the increase in extreme weather events caused by global warming has led to frequent urban flooding disasters, posing a serious challenge to urban safety. This paper aims to assess urban waterlogging risks and optimize prevention and control plans by constructing a numerical simulation model of urban stormwater runoff. [Methods] Based on preliminary research and data collection, the eastern urban area of Qingdao City was selected as the study area. A one-dimensional storm water management model (SWMM) and an autonomous two-dimensional surface water dynamics model were coupled to achieve data interaction and collaborative calculation between the two models in hydrological and hydrodynamic processes. After verifying the adaptability and accuracy of the coupled models, the operation of stormwater drainage pipes and the situation of surface water accumulation under different rainfall return periods were simulated and analyzed. [Results] 18.2% of the pipe sections met the 50-year return period rainfall requirements, indicating a low risk of water accumulation; 43.7% of the pipe sections experienced full-pipe overflow under a 2-year return period rainfall, which were the sections that needed to be focused on for future renovation. Meanwhile, with the increase in the rainfall recurrence period, the area and depth of water accumulation in the study area also increased, and the distribution of water accumulation areas was relatively even across the entire study area. When the design rainfall scenario was a 5-year return period, 94.32% of the area had an initial inundation depth of

[收稿日期] 2025-12-26

[通信作者] 丁兆利(1986—),男,高级工程师,主要从事给排水设计与智慧水务等工作,E-mail:dingzhaoli1986@126.com。

less than 0.01 m; when the design rainfall scenario was a 50-year return period, 89.73% of the area had an initial inundation depth of less than 0.01 m, indicating that the drainage network had a high capacity to withstand heavy rain and good storage capacity.

[Conclusion] The one dimensional-two dimensional coupled model achieves bidirectional feedback between network overflow and surface water accumulation, improving the simulation accuracy of urban flooding hydrological processes. The research result can serve as a reference for subsequent stormwater network reconstruction, upgrading, and operation management optimization.

Keywords rainfall recurrence period; drainage capacity; pipe fullness; waterlogging range; pipe network assessment; urban waterlogging

随着全球气候变暖,极端天气频发,同时快速城市化带来的城市不透水面增加严重影响了城市水文过程,城市热岛效应和雨岛效应显现,使得城市局地突发暴雨增多,导致城市洪涝灾害越来越频繁^[1-2]。据统计,我国大约 2/3 国土面积存在洪涝威胁,2/3 以上的城市发生过较为严重的洪涝。如 2012 年北京市“7·21”特大暴雨、2021 年郑州“7·20”特大暴雨等,均造成重大财产和人员损失^[3]。

城市雨洪模型是依据城市降雨与径流的物理规律,利用水文学水力学原理,并结合气象学、统计学、遥感及空间分析等理论建立的数学物理模型。城市雨洪模型能够模拟城市雨水管网排水过程和地表积水变化,预测城市内涝演进规律,是防治城市内涝灾害的重要工具之一。目前应用最为广泛,效果最好的雨洪数值模拟软件有美国国家环境保护局(US EPA)开发的暴雨洪水管理模型(SWMM)、英国华霖富公司(HR Wallingford Ltd.)开发的 InfoWorks ICM 模型,以及丹麦水资源与水环境研究所研发的 MIKE 系列模型等^[4]。其中,SWMM 因其适用性强、界面友好、操作方便等特点被广泛应用。

SWMM 具有比较完善的产汇流模块,广泛应用于广泛用于城市雨水管理,洪水风险预测、雨水污染控制等多个领域,国内外学者对此进行了较为深入的研究。例如:张金萍等^[5]利用 SWMM 和美国农业部水土保持局径流曲线数模型(SCS),对不同重现期实测降雨条件下的超载管段和积水节点进行模拟分析;李昂等^[6]构建了徐州市某汇水区的排水 SWMM,模拟分析了在不同重现期下汇水区现状排水管网承载能力和内涝程度。但 SWMM 也有一些不足之处,如 SWMM 仅能实现一维管网和河道水动力模拟,缺乏二维地表水动力模块,无法有效模拟洪水淹没、地表积水等内涝过程,使其在内涝模拟场景中的使用受到诸多限制^[7]。

因此,许多学者开始探索将 SWMM 与其他软件

或模块进行耦合,使其具备地表二维淹没模拟的能力,以便同时模拟地下管网的管道流动和地表的淹没情况。如吴俊毅等^[8]构建基于城市暴雨污水及流域雨洪管理建模软件(PCSWMM)的一二维耦合内涝模型,对设计暴雨条件下深圳市南山区某排水片区的道路积水进行模拟。李伟等^[9]以广州市白云区某旧改项目为例,基于 SWMM 和里斯洪水-洪泛区模型(LisFlood-FP)构建耦合雨洪模型,模拟改造前后的内涝情况并分析了内涝风险等级,内涝数值模拟结果较好。王兆礼等^[10]以广州市长湓地区为例,基于 SWMM 和泰莱马克二维水动力模型(TELEMAC-2D)构建一种新的耦合模型城市雨洪耦合模型(TSWM),通过历史暴雨事件验证、模型对比等方式评估了 TSWM 的适用性和可靠性,并对不同重现期暴雨开展了数值模拟。曾照洋等^[11]对 SWMM 一维管网模型及 LisFlood-FP 二维水动力模型进行耦合,模拟东莞市典型区域暴雨内涝,评估研究区排水能力与内涝风险。在国内外学者的努力下,如今城市雨洪耦合模型多达数十种,这些模型被广泛应用于内涝模拟研究,为城市雨洪管理提供了扎实的技术支持。

在梳理总结既有学者研究成果的基础上,本文选取青岛市东岸城区作为研究区域,尝试构建一维 SWMM 与二维地表水动力学模型的耦合体系。在验证耦合模型适应性和准确性的基础上,对不同降雨重现期情景下雨水管渠的排水运行状态及地表内涝积水分布特征开展模拟分析,以期对现有排水管网系统的改造升级与优化调度方案制定提供科学的参考依据。

1 研究区概况

本文的空间范围锁定为青岛市东岸城区,涵盖市南区、市北区、李沧区 3 大核心行政区,区域总占地面积达 197.16 km²。该区域地形呈现东高西低的整体态势,南北两侧呈隆起状,中部区域凹陷,海拔

高程差异显著:最高处位于李沧区百果山,高程为 119 m;最低处为市北区沿海滩涂地带,高程仅为 0.5 m。从水系特征来看,研究区内水系隶属于沿海独立入海的小型河流水系,所有河流均为雨源型季节性河流,具备“源流短促、径流湍急、水位涨落剧烈”的典型特征。气候方面,该区域受大陆性气候与海洋性气候的双重叠加影响,多年平均降雨量为 662 mm,降水时空分布不均,降雨主要集中在 6 月—8 月的汛期,此阶段降雨量占全年总降雨量的 70% 以上。在排水系统方面,研究区域采用完全雨污分流制排水模式,雨水管道以钢筋混凝土材质为主,全区雨水管网总长度约为 2 000 km,划分为前海、海泊河、李村河、楼山河 4 大排水片区。本文在汇水区划分过程中,综合考量地形地貌、水系分布、检查井布设等多重影响因素,最终完成 64 个汇水区的划分工作,研究区域汇水区划分情况如图 1 所示。

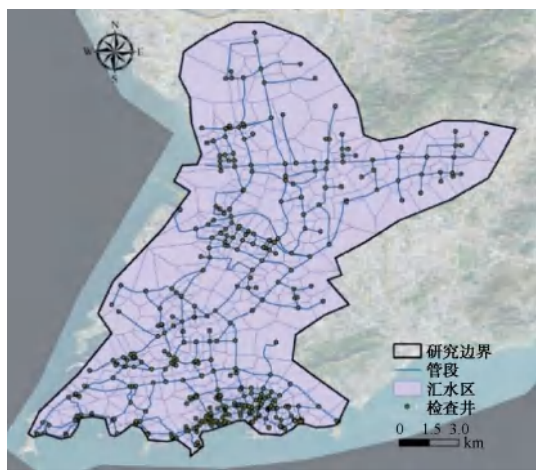


图 1 研究区域汇水区划分示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Watershed Division in Research Area

2 模型构建

2.1 模型原理

2.1.1 SWMM

SWMM 主要由产汇流模拟模块与一维水动力模拟模块构成,其中产汇流模拟模块作为整个模拟流程的前置核心环节,承担着降雨向径流转化全过程的物理模拟任务。本文构建的产流模型采用霍顿下渗理论公式,依托土壤下渗能力随时间动态衰减的核心规律,通过调用基础数据层中的城市下垫面特征参数,将植被截留量、初始填洼容积、下渗速率等关键参数纳入模型输入体系,最终输出结果为地

表实际产流量。汇流模拟采用非线性水库概化法,将各子汇水区分别等效为独立的非线性水库单元,结合曼宁公式开展出流计算,可实现对汇流过程的精准拟合。具体计算过程中,依据子汇水区的特征宽度与曼宁糙率系数,通过耦合求解曼宁方程与水量连续方程完成汇流演算,其输出结果将作为后续一维水动力模型的入流边界条件^[12]。

霍顿产流模型是一种用于描述降雨下渗过程的经验模型,主要用于描述下渗率随降雨时间变化的关系,其核心思路是下渗率随降雨时间的延长而逐渐减小,是一个消退过程。消退速率与剩余下渗能力成正比。霍顿公式如式(1)。

$$f_t = f_f + (f_0 - f_f)e^{-kt} \quad (1)$$

其中: f_t ——历时为 t 的下渗率,mm/h;

f_f ——下渗率最终趋于的值,mm/h;

f_0 ——土壤暴雨开始时的最大入渗率,mm/h;

k ——下渗衰减系数,与土壤的物理性质有关, h^{-1} ;

t ——历时,h。

非线性水库公式用于描述子汇水区的产流过程,其核心是将集水区视为具有调蓄能力的“水库”,通过水量平衡方程和槽蓄方程来计算产流,具体描述如式(2)。

它表明在某一时间段内,进入“水库”的净雨量 I 与流出“水库”的径流量 Q 之差,等于“水库”调蓄量 S 的变化。

$$I - Q = \Delta S \quad (2)$$

其中: I ——净雨量,即降雨扣除蒸发、下渗等损失后剩余的水量, m^3/s ;

Q ——径流量,即最终形成地表径流的水量, m^3/s ;

ΔS ——调蓄量的变化,涵盖了地表所需水量及洼地蓄水量等, m^3/s 。

后续一维水动力模型用于模拟水流在管网、渠道、蓄水池等构成的排水网络中的运动。核心是求解描述一维非恒定流的圣维南方程组,包括连续方程式(3)和动量方程式(4)。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial d} = q_L \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial d} + gA \frac{\partial H}{\partial d} + gAS_f = q_L v_d \quad (4)$$

其中: A ——过水断面的面积, m^2 ;

d ——距离, m ;

q_L ——侧向入流的单宽流量, m^2/s ;

v_d ——侧向入流沿水流方向的分量, m/s ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

S_f ——摩阻比降;

H ——节点水头, m 。

本文假设侧向入流与干流是垂直关系, 即排水管网与地表的连接是垂直的, 因此 $v_d = 0$ 。

采用动力波法完整求解上述方程组, 可模拟回水、逆流、压力流(满管)、明满流过渡等复杂现象, 模拟结果可靠性高, 计算量也相对较大。

2.1.2 地表二维水动力模型

地表二维水动力模型, 又称浅水方程, 其控制方程采用具有完整水动力特征的二维圣维南方程组, 忽略运动黏性项、科氏力、风应力及紊流黏性项。方程组由 3 个偏微分方程组成, 其中一个连续性方程式(5)、2 个动量方程式(6)和式(7), 基本形式如下。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial (\beta q_x^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial (\beta q_x q_y/H)}{\partial y} = \\ -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gq_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{H^2 C^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial (\beta q_x q_y/H)}{\partial x} + \frac{\partial (\beta q_y^2/H)}{\partial y} = \\ -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gq_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{H^2 C^2} \end{aligned} \quad (7)$$

其中: x, y ——水平、垂直方向坐标, m ;

q_x, q_y —— x, y 方向的单宽流量, m^2/s ;

s ——源项, m^2/s^2 ;

η ——水面高程, m ;

β ——因垂向流速分布引起的动量修正系数;

C ——谢才系数, $\text{m}^{0.5}/\text{s}^{-1}$ 。

为便于使用流域数字高程模型(DEM)原始数

据, 模型基于结构化网格建立, 采用基于 Godunov 格式的有限体积法离散公式[式(3)], Godunov 格式守恒性好、天然具备捕捉间断(如涌浪)的能力。通过 Roe 格式求解器求解通过各单元边的数值通量^[13]。

2.1.3 一维-二维耦合模型

为实现降雨径流过程与地表水动力过程的联动模拟, 本文构建 SWMM 与自主研发的地表二维水动力模型耦合体系。耦合模拟的核心逻辑分为两个关键数据交互环节: 其一, 将二维模型运算得到的地表积水深度数据, 作为关键边界条件输入至 SWMM 模型的雨水口节点模块, 以此精准计算雨水口的入流与入渗通量; 其二, 将 SWMM 求解得出的管网节点溢流量, 以点源载荷的形式反馈至二维水动力模型, 从而实现对地表积水扩散过程的动态模拟, SWMM 与二维水动力模型耦合过程, 如图 2 所示。

在耦合驱动机制方面, 本文选取二维水动力模型的计算时间步长作为基准步长, 以此统御整个耦合计算流程, 确保一维管网水文过程与二维地表水流运动在物理时间尺度上完全同步。模型间的数据交互摒弃传统文件读写的方式, 转而采用应用程序编程接口(API)搭建实时通信通道, 实现参数的高效传递与即时反馈。通过这一耦合模式, 二维水动力模型可依托 SWMM 提供的管网溢流数据, 完成地表水流的演进与积水范围的动态推演; 而 SWMM 则能基于二维模型反馈的积水深度数据, 优化雨水口入流过程的计算精度。最终, 该耦合体系可完整复现“降雨-地表积水-雨水入管-管网溢流-地表再积水”的城市内涝全过程演化路径, 为内涝防控与海绵城市规划提供精准的技术支撑^[14]。

2.2 暴雨雨型设计

本文根据《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》, 选取国内适用性良好的芝加哥雨型进行设计降雨^[15], 依据青岛市暴雨强度公式如式(8), 结合当地降雨特性, 设计降雨历时采用 2 h, 利用芝加哥雨型生成器生成重现期分别为 1、2、3、5、10、20、30 a 和 50 a 的设计降雨, 不同重现期 2 h 历时雨量降雨过程如图 3 所示。

$$q = \frac{1\,919.009 \times (1 + 0.997 \lg P)}{(t + 10.740)^{0.738}} \quad (8)$$

其中: q ——降雨强度, mm/min ;

P ——降雨重现期, a 。

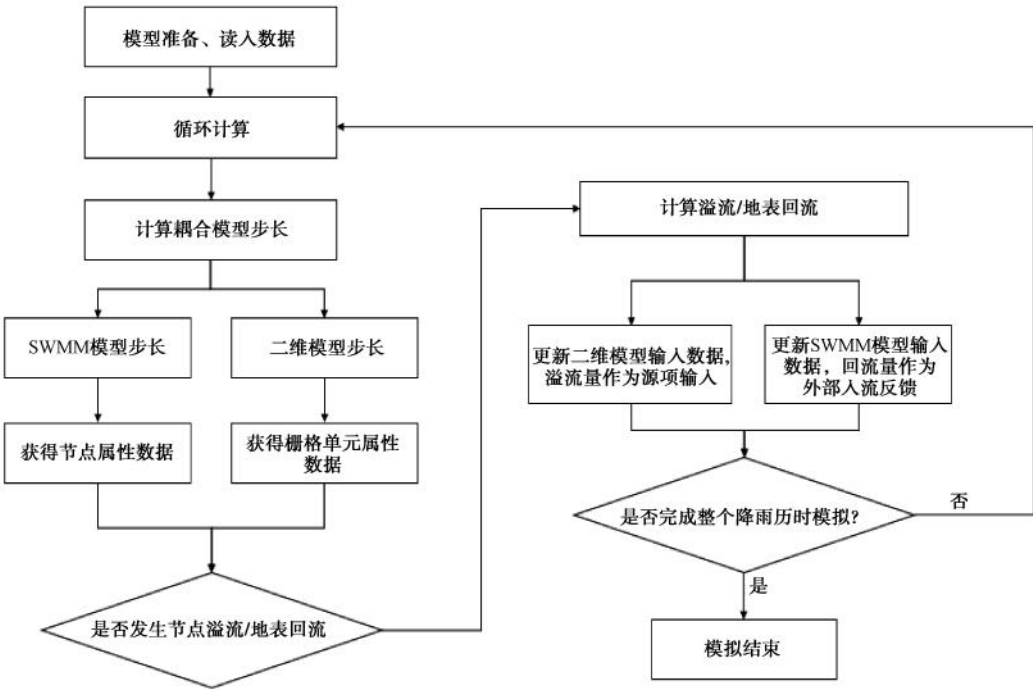


图 2 SWMM 与二维水力模型耦合示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Coupled SWMM and 2D Hydrodynamic Model

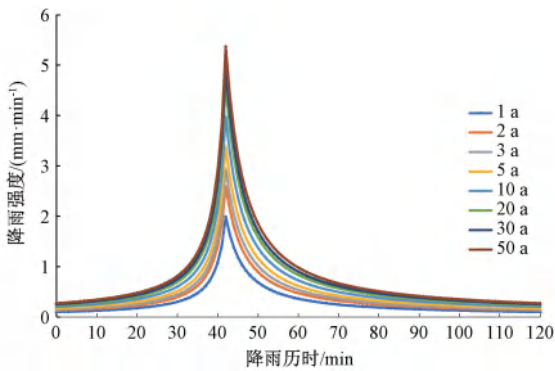


图 3 不同重现期 2 h 历时雨量降雨过程

Fig. 3 Rainfall Process with Different Return Periods of 2-Hour Duration

2.3 边界条件确定

模型构建完成后,分别设定上游、下游及两侧的边界条件,上游边界主要是指流量过程线的获取,用非线性水库模型和霍顿下渗计算,下游边界用非汛期平均水位确定,两侧边界是指划分流域范围时被截断的河流,用上游流量过程数据确定。

2.4 模型率定与验证

构建完成的模型在实际应用前,需开展校核与验证工作以保障其可靠性。本文选取 14 处易涝点位作为验证对象,结合研究片区 50 年一遇暴雨情景

下各易涝点的积水实况,完成模型验证流程。通过对比分析 50 年一遇暴雨情景下易涝点积水特征的模型计算值与实测数据,判定模型模拟结果的合理性,该情景下的具体计算与实测对比数据如表 1 所示。

表 1 降雨过程中内涝点最大积水深度实测值与计算值对比

Tab. 1 Comparison of Maximum Measured and Calculated Waterlogging Depth at Waterlogging Points during Rainfall Process

实测最大深度/m	计算最大深度/m	绝对误差/m	相对误差
0.26	0.250	0.010	3.85%
0.04	0.043	-0.003	-7.50%
0.05	0.050	0	0
0.11	0.100	0.010	9.10%
0.34	0.350	-0.010	-2.94%
0.29	0.320	-0.030	-10.34%
0.37	0.400	-0.030	-8.10%
0.43	0.450	-0.020	-4.65%
0.04	0.039	0.001	2.50%
0.06	0.065	-0.005	-8.33%
0.03	0.028	0.002	6.67%
0.02	0.020	0	0
0.03	0.031	-0.001	-3.33%
0.05	0.048	0.002	4.00%

由表 1 可知,14 个易涝点周围均有不同程度的积水,淹没范围和淹没深度与实测值基本相符。表明模型对于研究区域的地形条件、水文特征和雨水管网的概化是合理的。模型计算的结果满足计算要求。

3 排水模拟结果分析

3.1 管道充满度分析

分别模拟研究区域雨水管网系统在重现期 1、2、3、5、10、20、30、50 a 的运行状态,不同降雨重现期下的管道充满度模拟结果如图 4 所示。

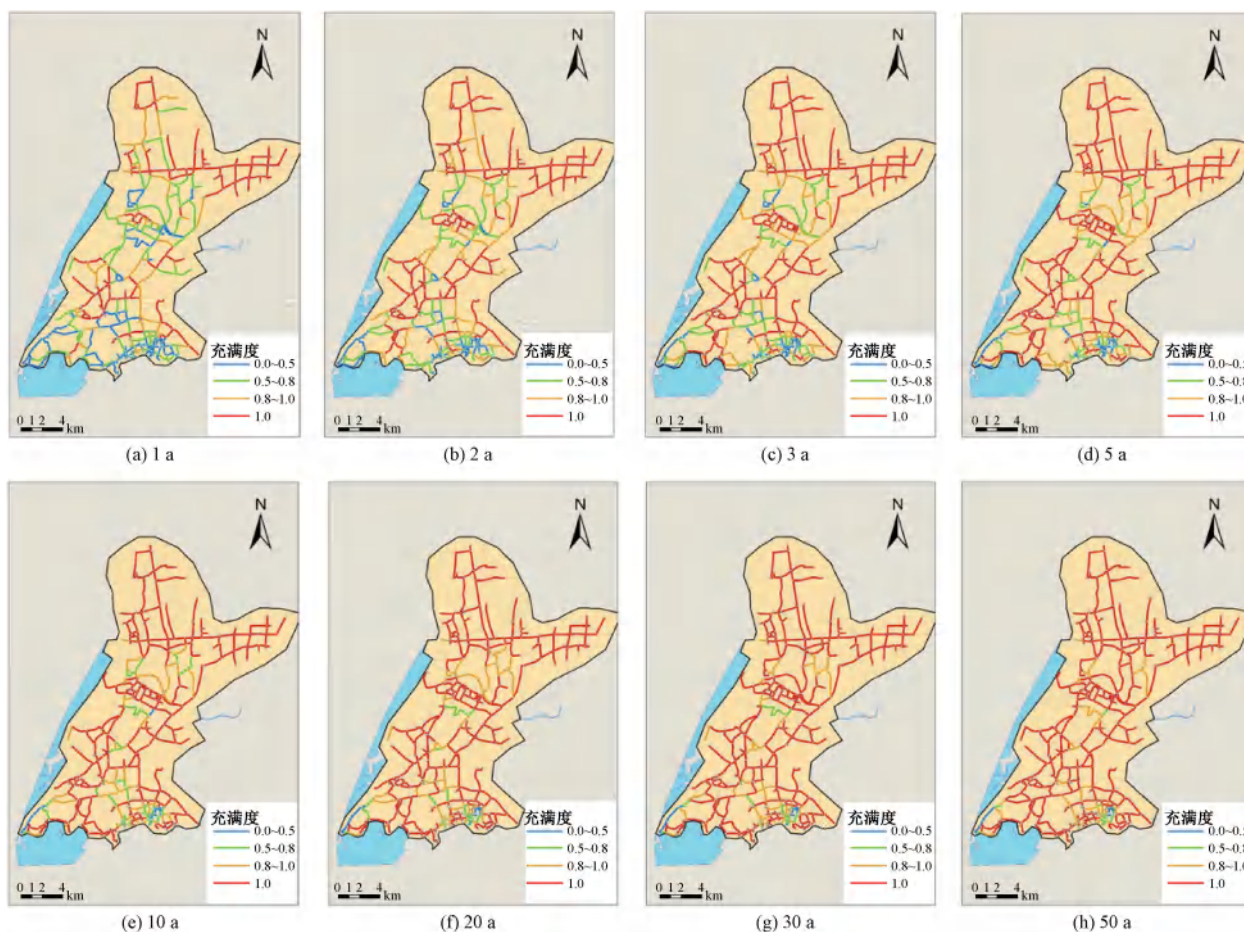


图 4 不同降雨重现期的管道充满度模拟结果

Fig. 4 Simulation Results of Pipeline Fullness under Different Rainfall Recurrence Periods

基于内涝预警预报模型设计降雨情景的模拟结果,提取管道充满度数据对单根管段的排水能力进行评估。评估标准以管段是否满管为核心判定依据(满管状态对应充满度=1);若管段在某一重现期降雨情景下出现满管现象,即判定其排水能力无法匹配该重现期降雨需求(记为 1,代表不满足);若未出现满管现象,则说明其排水能力可满足该重现期降雨要求(记为 0,代表满足)。以具体管段为例,若在 1 年一遇降雨情景模拟中未发生满管,表明该管段可满足 1 年一遇降雨的排水需求;而在 5 年一遇降雨情景模拟中出现满管,则说明其无法满足 5 年

一遇降雨的排水要求。综上,若某管段可满足 1 年一遇、3 年一遇降雨排水需求,却无法满 5 年一遇降雨排水需求,则可确定该管段的排水能力等级为 3 年一遇。

依据此方法,可判断每一个管段的排水能力是几年一遇,得到管网排水能力等级分布如图 5 和表 2 所示。

由图 5 和表 2 可知,排水能力 ≤ 1 年一遇的管道占比最大,为 29.50%;其次为 1~2 年一遇的管道,占比为 14.20%; ≤ 3 年一遇的管道总占比为 52%。根据《青岛市城镇排水和污水处理“十四五”



图5 管道排水能力分布图

Fig. 5 Distribution Map of Pipeline Drainage Capacity

规划》,重要地区的雨水管道设计标准为3~5年一遇,可见研究区管网排水能力整体较低,应及时对排水能力较低的管道进行养护与修缮,以免极端降雨时造成严重的内涝问题。另外,排水能力>30年一遇的排水管道占比为23.40%,主要为入河排水管

表2 不同重现期管道排水能力分布统计

Tab. 2 Distribution Statistics of Pipeline Drainage Capacity for Different Return Periods

管道排水能力/a	管道长度占比
≤ 1	29.50%
1~2	14.20%
2~3	8.30%
3~5	7.20%
5~10	8.30%
10~20	4.20%
20~30	4.90%
30~50	5.10%
>50	18.30%

道,这些管道是城市向外泄洪的主要出口,口径较大,因此排水能力也较强,有利于雨洪及时排泄。

3.2 积水情况分析

分别将重现期1、2、3、5、10、20、30、50 a的2 h降雨历时数据输入模型,统计分析汇水区域的积水面积和淹没深度,以评价研究区域的内涝程度,结果如图6所示。不同降雨重现期下积水深度占比如图7所示。

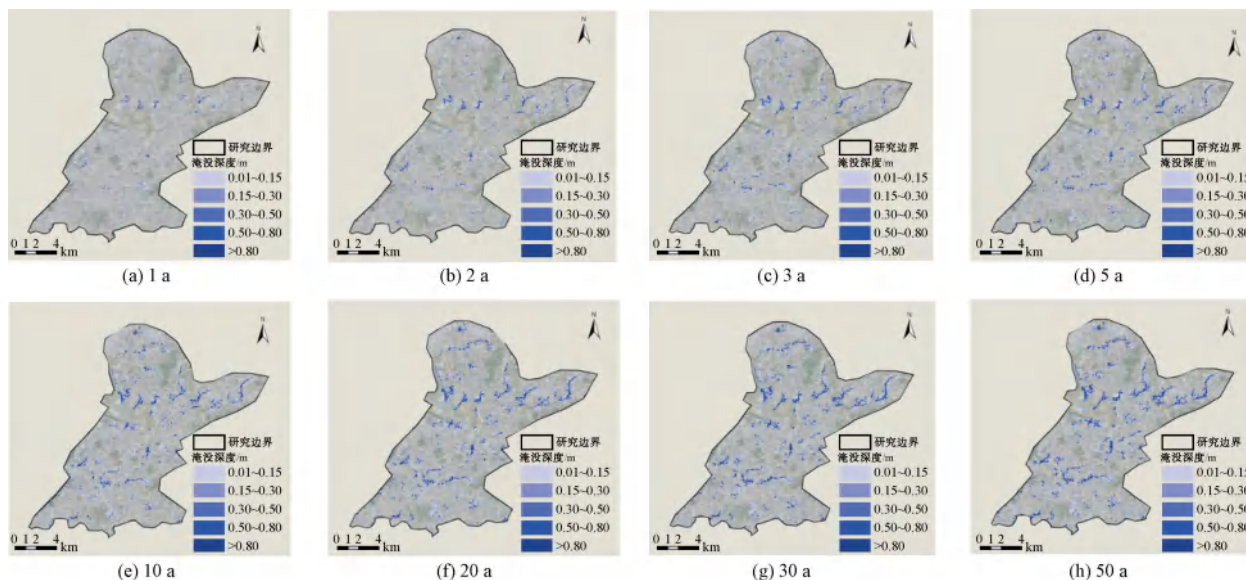


图6 不同重现期汇水区域淹没范围图

Fig. 6 Flooding Area Map of Catchment Region for Different Return Periods

模拟结果显示,随着降雨重现期的延长,研究区域内涝积水的覆盖范围与积水深度呈现同步扩大趋势,且积水区域在全域范围内分布较为零散。强降雨

雨过程中,内涝积水点主要集中于地势低洼区域、下穿胶济铁路的桥涵隧道段以及排水系统受潮汐影响显著的区域,此类区域是防汛管理部门的重点管控

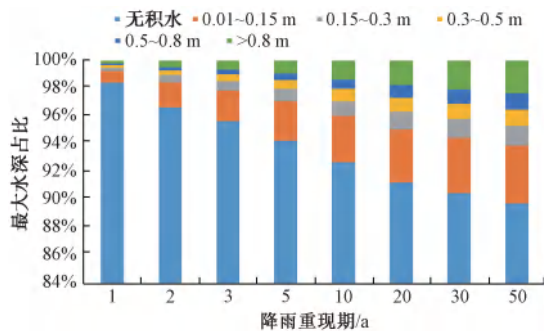


图7 不同降雨重现期下积水深度占比

Fig. 7 Proportion of Waterlogging Depth under Different Rainfall Recurrence Periods

对象。具体情景模拟数据表明:在5年一遇降雨情景下,研究区域内94.23%的范围无积水现象;当降雨重现期提升至20年一遇时,积水范围进一步扩张,其中3.68%的路段积水深度超过0.3 m;而在50年一遇降雨情景下,积水覆盖范围较20年一遇情景显著拓宽,东北部区域积水尤为集中,积水深度大于0.8 m的区域占比约为2.36%。值得注意的是,逍遥二路、逍遥三路、重庆南路局部区域、逍遥一路、胶宁高架路沿线、高田路、上海路、明霞路及敦化路等区域,因自身地势较低,暴雨发生时易成为周边高处径流的汇聚区,即便在低重现期降雨情景下,仍会出现较大的淹没范围与较深的积水深度,属于内涝高风险区域。

4 结论

本文通过耦合SWMM模型与二维地表水动力模型,模拟获取了不同降雨重现期下排水管道充满度及城市内涝积水的空间分布特征,据此得出核心结论。

(1)一维SWMM模型与二维水动力模型耦合体系,在复杂城区内涝数值模拟场景中展现出良好的适配性与较高的模拟精度。该耦合模型可精准输出地面内涝淹没深度、水流运动方向及流速等关键参数,具备较强的推广前景与实践应用价值。

(2)研究区域内涝防治面临山洪侵袭与潮汐顶托的双重压力。作为已成型的老旧城区,其排水管网服役年限较长,在短时强降雨工况下易出现排水不畅问题。模拟计算结果显示,研究区域内雨水管网排水能力可满足1~2年一遇降雨重现期的管段占比达47%,能够承受5年一遇以上降雨重现期的管段占比约为22.5%。需重点管控逍遥二路、逍遥

三路、重庆南路局部路段、逍遥一路、胶宁高架路沿线、高田路、上海路、明霞路及敦化路局部区域的积水风险,可优先考虑对上述区域的雨水管网实施升级改造,或新增排水构筑物以提升排水能力。

(3)高强度降水是诱发城市内涝的核心致灾因素。海绵城市建设、排水管网升级改造等工程性措施,是缓解城市内涝问题的基础支撑,但难以从根本上根除内涝隐患。实践表明,工程性措施需与内涝预警系统等非工程性措施协同配合,才能显著降低内涝灾害造成的人员伤亡与财产损失。

参考文献

- [1] 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 J Y, Wang Y T, He R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491.
- [2] 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. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: Principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392.
- [3] 张建云,宋晓猛,贺瑞敏.新时期大型城市洪涝灾害防控及思考[J].中国水利,2025(17):15-21.
Zhang J Y, Song X M, He R M. Thoughts on urban flood disaster prevention and control in large cities in the new era [J]. China Water Resources, 2025(17): 15-21.
- [4] 臧文斌,赵雪,李敏,等.城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J].中国防汛抗旱,2020,30(11):1-13.
Zang W B, Zhao X, Li M, et al. Research progress and development trend of urban flood simulation technology [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(11): 1-13.
- [5] 张金萍,张浩锐,方宏远.基于SWMM和SCS法的城市内涝模拟及雨水管网系统评估[J].南水北调与水利科技:中英文,2022,20(1):110-121.
Zhang J P, Zhang H R, Fang H Y. Urban waterlogging simulation and rainwater pipe network system evaluation based on SWMM and SCS method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 110-121.
- [6] 李昂,刘加强,汪思颖.基于SWMM模型模拟的现状城市排水管网评估[J].净水技术,2022,41(11):121-126.
Li A, Liu J Q, Wang S Y. Evaluation of existing urban drainage pipelines network based on simulation of SWMM model [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11): 121-126.
- [7] 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. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 33-42.
- [8] 吴俊毅, 秦华鹏. 基于一二维耦合内涝模型的城市道路积水来源量化分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(4): 716-722.
- Wu J Y, Qin H P. Quantitative source analysis of waterlogging on urban roads based on a 1D and 2D coupling waterlogging model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(4): 716-722.
- [9] 李伟, 高俊波, 祁旭阳, 等. 基于耦合雨洪模型的城市内涝数值模拟与风险分析[J]. 水利技术监督, 2021(12): 56-61.
- Li W, Gao J B, Qi X Y, et al. Numerical simulation of urban waterlogging and risk analysis based on a coupled model [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(12): 56-61.
- [10] 王兆礼, 陈昱宏, 赖成光. 基于 TELEMAC-2D 和 SWMM 模型的城市内涝数值模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 117-124.
- Wang Z L, Chen Y H, Lai C G, et al. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM models [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 117-124.
- [11] 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 Z Y, Wang Z L, Wu X S, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77.
- [12] 李小宁, 郑世威, 李宥霖, 等. 基于地表-管道-河道耦合模拟的城市内涝风险评估[J]. 水科学进展, 2024, 35(5): 738-751.
- Li X N, Zheng S W, Li Y L, et al. Urban Flood risk assessment based on integrated simulation of surface-pipe-river [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(5): 738-751.
- [13] 张大伟, 权锦, 马建明, 等. 基于 Godunov 格式的流域地表径流二维数值模拟[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 787-794, 802.
- Zhang D W, Quan J, Ma J M, et al. Two-dimensional numerical simulation for surface runoff in catchments based on Godunov scheme [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7): 787-794, 802.
- [14] 董文斌, 张大伟, 王玮琦, 等. 不同耦合模式下城市洪涝模型的计算精度与效率分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23(3): 307-317.
- Dong W B, Zhang D W, Wang W Q, et al. Computational accuracy and efficiency analysis of urban flood models under different coupling modes [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23(3): 307-317.
- [15] 任泽凌, 李彬权, 王国庆, 等. 城市暴雨强度公式复核——以杭州主城区为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 80-89.
- Ren Z L, Li B Q, Wang G Q, et al. Revisited urban rainfall intensity formula: An example of the main urban area of Hangzhou [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 80-89.