

城市洪涝快速建模中的排水管网概化方法及其应用

王小杰¹, 夏军强¹, 何 用², 陈文龙², 宋利祥²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院)

摘要:针对城市洪涝建模过程中管网结构复杂导致的建模效率低下的问题,综合考虑城市水文特征、管管网径、排水流向及主干道路分布等因素对排水支管进行概化,提出了一种水文分析与雨水口结合的排水管网概化方法,并应用于广州市黄浦区。该方法将原先与排水支管相连的雨水口入流转移至对应排水分区的主干管网节点进行汇流计算,有助于城市洪涝快速建模。将分别基于该方法、黄浦区现状排水管网(未概化)、传统雨水井等效排水管网概化方法所构建的地表径流与地下管流耦合水动力模型模拟的洪涝过程进行对比,结果表明:相较于黄浦区现状排水管网,本文方法概化后的排水系统中管道数量、长度分别减少 39.4%、38.7%,窨井数量减少 38.3%;不同降雨重现期下,与基于现状排水管网模拟得到的地表积水面积、排口总水量、典型单个排口流量峰值相比,本文方法模拟的相对误差分别为 1.90%~4.53%、1.11%~4.79%、3.05%~18.81%,传统雨水井等效排水管网概化方法模拟的相对误差分别为 2.79%~5.57%、3.32%~10.60%、56.22%~60.59%。

关键词:排水管网概化;城市洪涝;快速建模;广州市

中图分类号:TV877 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2026)05-0062-10

Generalization method and application of drainage network for rapid modeling of urban floods and waterlogging// Wang Xiaojie¹, Xia Junqiang¹, He Yong², Chen Wenlong², Song Lixiang² (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University; 2. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission)

Abstract: In response to the problem of low modeling efficiency caused by complex drainage network structure in urban flood modeling, a drainage network generalization method combining hydrological analysis and rainwater inlets was proposed by comprehensively considering factors such as urban hydrological characteristics, pipeline diameter, drainage flow direction, and distribution of main roads, and applied in Huangpu District, Guangzhou City. This method transfers the inflow from the rainwater inlet connected to the drainage branch pipe to the main pipe network node of the corresponding drainage zone for confluence calculation, which helps rapid modeling of urban flood. Based on the coupled hydrodynamic model of surface runoff and underground pipe flow, the flood process simulated by models constructed using this method, the current drainage network (not generalized) of Huangpu District, and the generalized method of equivalent drainage network of traditional rainwater wells are compared. The results show that compared to the current drainage network of Huangpu District, the method proposed in this paper reduces the number and length of pipes in the generalized drainage system by 39.4% and 38.7%, respectively, and reduces the number of manholes by 38.3%. Under different rainfall return periods, compared with the simulated surface water accumulation area, total water volume of all outlets, and peak flow of typical single outlet based on the current drainage network, the relative errors of the proposed method in this paper are 1.90%-4.53%, 1.11%-4.79%, and 3.05%-18.81%, respectively. The relative errors of the generalized method of equivalent drainage network of traditional rainwater wells are 2.79%-5.57%, 3.32%-10.60%, and 56.22%-60.59%, respectively.

Key words: drainage network generalization; urban flood; rapid modeling; Guangzhou City

洪涝灾害是发生频率最高、影响范围最广的自然灾害之一^[1-3]。城市防洪排涝问题已成为全球范围内亟待解决的重大公共安全问题^[4-6]。根据国际灾害数据库(EM-DAT)的统计,2000—2022 年全球共记录了 9 215 次自然灾害事件,其中洪涝灾害事件达到 4 201 次,占自然灾害事件总数的 45.6%,是

基金项目:国家自然科学基金项目(52509111)
作者简介:王小杰(1995—),女,博士,主要从事城市洪涝研究。E-mail:wangxiaojie@whu.edu.cn
通信作者:夏军强(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:xiajq@whu.edu.cn

发生频率最高的自然灾害类型^[7]。特别是在极端降雨事件频发的背景下,突发性洪涝灾害频次显著增加^[8]。城市洪涝模拟已成为揭示城市受灾机制、防治洪涝灾害、评估城市排水系统效能以及制定防洪减灾措施的重要手段,及时准确地模拟城市洪涝过程,对于提高洪涝风险防范能力、降低洪涝灾害损失具有重要意义。

排水管网是城市洪涝模拟的关键要素,由于管网系统普遍分布于地下且具有复杂的拓扑结构,给城市洪涝模拟的准确性和有效性带来了挑战。针对城市洪涝模拟过程中存在的排水管网结构复杂、精细管网资料缺失等问题,在保障管网系统排水能力不发生显著变化的基础上,通常需要进行概化处理。近年来,诸多学者对如何准确概化排水管网系统开展了一系列研究。例如:吕恒等^[9]根据管径对管网进行分级概化处理,设置了4种管网结构概化情景,分析了排水管网结构概化对城市暴雨洪涝模拟的影响;张傲等^[10]提出了结合地形因子的雨水管网结构概化方法;都利亚^[11]结合遥感卫星图、DEM数据及研究区主干路网图,对研究区内的管网进行了概化;杜佳锴等^[12]基于研究区的主要道路网络以及河流水系的位置和高程等信息,构建了虚拟管网模型,从而完成了城区虚拟管网的概化;李东来等^[13]提出了基于雨水井与主干管网联合排水的城市洪涝过程近似模拟方法。目前,排水管网系统的概化研究主要集中在根据管径大小或主干路网来概化管网结构,且概化时没有考虑实际汇水过程等因素。

鉴于此,本文依据排水管道出口、排水流向、管径、主干道路分布等确定主干管网结构,结合雨水井、DEM数据及实际汇水过程等对支管进行概化,提出一种水文分析与雨水井相结合的管网概化方法,并应用于广州市黄埔区,采用城市地表径流与地下管流耦合水动力学模型,将提出的方法、现状排水管网(未概化)和传统雨水井等效排水管网概化方法进行对比,以分析所提出方法的适用性。

1 研究方法

1.1 城市地表径流与地下管流耦合模型

1.1.1 二维地表径流模块

本文采用 DIVAST-TVD 模型^[14]作为耦合模型的二维地表径流模块。DIVAST-TVD 模型能在急流、缓流、临界流等各种流态条件下进行精确求解,可用于模拟复杂情况下的地表径流^[15],模型控制方程为忽略风应力、科氏力和紊动项影响的二维浅水方程^[16],采用 TVD-MacCormack 格式有限差分法进行求解。TVD-MacCormack 格式属于显式数值格式,

其计算时间步长需严格满足 CFL 条件。因此,模型通过自适应动态调整时间步长,在保证数值稳定性的前提下提高计算效率^[17]。下渗计算采用霍顿方程,该方程中入渗率随时间呈指数衰减,适用于城市区域的下渗模拟,已在国内外得到广泛应用^[18]。

1.1.2 一维排水管网模块

暴雨洪水管理模型(SWMM)的管网水动力模块适用于多种复杂工况下的一维水流数值模拟,能够有效表征明渠流、有压流及明满交替流等典型流态,已在城市复杂排水管网模拟领域获得广泛应用^[19-21]。SWMM 在水动力模拟方面具有显著优势,能够精确模拟泵站、水闸、堰等多种水工建筑物的水力特性,支持圆形、矩形、三角形等多种几何断面的管渠计算,对连接方式复杂的人工管网系统具有优异的适应性和模拟精度^[22]。此外,其代码开源特性为模型的二次开发和功能扩展提供了重要技术支撑。因此,本文采用 SWMM 的管网水动力模块作为耦合模型的一维排水管网模块。

1.1.3 地表径流与地下管流交换模块

地表径流与地下管流通过在雨水口或雨水井处发生的泄流和溢流现象交换水流^[23]。采用 Xia 等^[24]基于水槽试验和理论分析提出的雨水口泄流量公式(式(1))计算泄流量。采用孔口流量公式(式(2))计算溢流量^[25]。为保证模型计算的稳定性,对泄流量和溢流量添加限制性条件见式(3)、式(4)^[26]。

$$Q_s = auAF_r^b \quad (1)$$

$$Q_o = C_o A_m \sqrt{2g(z_n - z_s)} \quad (2)$$

$$Q_s = \min \{ auAF_r^b, A_c h / \Delta t \} \quad (3)$$

$$Q_o = \min \{ C_o A_m \sqrt{2g(z_n - z_s)}, V_o / \Delta t \} \quad (4)$$

式中: Q_s 为泄流量; a 、 b 为雨水口泄流参数; A 为雨算子的过水面积; u 为算前流速; F_r 为算前弗劳德数; Q_o 为溢流量; C_o 为孔流系数; g 为重力加速度; A_m 为雨水口或雨水检查井面积; z_n 、 z_s 分别为管网节点水位、地表水位; A_c 为雨水口或雨水井所在地表网格的面积; h 为地表水深; V_o 为排水管网节点的溢流水量; Δt 为地表径流与地下管流交换的时间步长。

本文构建的地表径流与地下管流耦合模型采用双向动态耦合,即地表径流与地下管流通过节点(雨水口或雨水井)进行水流实时交换。具体而言,降雨在地表二维网格上产生径流,地表径流通过节点泄流至排水管网;当管网内水位超过地表水位时,水流将从节点溢流至地表;待管网水位下降至低于地表水位后,地表水流又重新泄流至排水管网,模型耦合的具体过程可参考文献[17]。

1.2 水文分析与雨水井结合的排水管网概化方法

针对排水管网结构复杂、建模效率低下等问题,本文提出一种水文分析与雨水井结合的管网概化方法。先依据排水管道出口、排水流向、管径和主干路网等确定主干管网结构,再结合雨水井、DEM 数据及实际汇水过程等对排水支管进行概化。具体而言,将原先与排水支管相连的雨水口的入流直接转移至排水支管所对应排水分区的主干管网节点,其中雨水口位置可参考 GB 50014—2021《室外排水设计标准》、高清影像图和现场调研等确定(图 1)。

排水支管的概化过程为:①根据排水管道出口位置及排水流向确定排水管网拓扑结构,在此基础上综合考虑主干道路的空间分布及管道管径来确定主干管网,此处主干路网的划分可依据城市道路等级体系中的“主干路”层级确定;②主干管网确定后,将其余排水管道视为支管并进行简化(即“概化掉”),将原先与这些支管相连的雨水口入流转移至主干管网节点。另外,当研究区(如街道、社区等)范围较小且 DEM 精度较高时,可将小区外的城市道路划分为主干道路,其内部道路划分为支路,在此基础上进行排水管网概化,即概化掉小区内部管网。同时,对研究区进行水文分析,划分排水分区,将小区内雨水口的入流转移至其所对应排水分区的主干管网节点。

排水分区的划分过程为:①结合地形、排水管道、排水流向和遥感影像图,采用水文分析和人工调整划分出较大的子汇水区,使已概化的排水支管与流入的主干管网位于同一汇水区;②在每个子汇水区内以主干管网节点为采样点,采用泰森多边形法划分排水分区;③按照邻近原则将每个排水分区的

雨水口和主干管网节点进行连接,使原本进入排水支管的水流直接转移至主干管网节点,并确保与排水支管相连的雨水口入流流量及汇流路径与实际排水管道系统基本一致。

此外,在进行排水支管概化后,不考虑实际汇水过程,直接采用泰森多边形法划分排水分区,将每个排水分区内的所有雨水口和该分区内的主干管网节点连接的方法,称为雨水井等效排水管网概化方法^[27]。将该方法作为对照组,以分析排水分区划分准确性对结果的影响。

需要特别注意的是,当排水支管满足下列条件之一时,应在概化过程中予以保留:①直接连接出水口的终端支管;②全程作为出水通道的支管(从连接点至出水口);③作为关键过渡支管连接主干管。两种排水管网概化方法的地表径流与地下管流均通过在节点处发生的泄流和溢流来交换水流。

2 实例应用

2.1 研究区概况

广州市位于广东省中南部、珠江三角洲北缘,下辖天河、白云、黄埔等 11 个行政区。黄埔区是广州市重要的工业基地、商贸港口所在地,处于珠三角核心地域,区域内河流较多,洪涝灾害频发。本文选择广州市黄埔区内笔岗涌以下、东江北干流以上排水片区作为研究区,构建典型街区洪涝模型,研究区面积为 16.7 km²(图 2)。

2.2 数据资料

研究使用的数据主要包括构建洪涝模型的排水管网、土地利用和 DEM 数据。排水管网数据和 DEM 数据均来源于珠江水利科学研究院,DEM 数

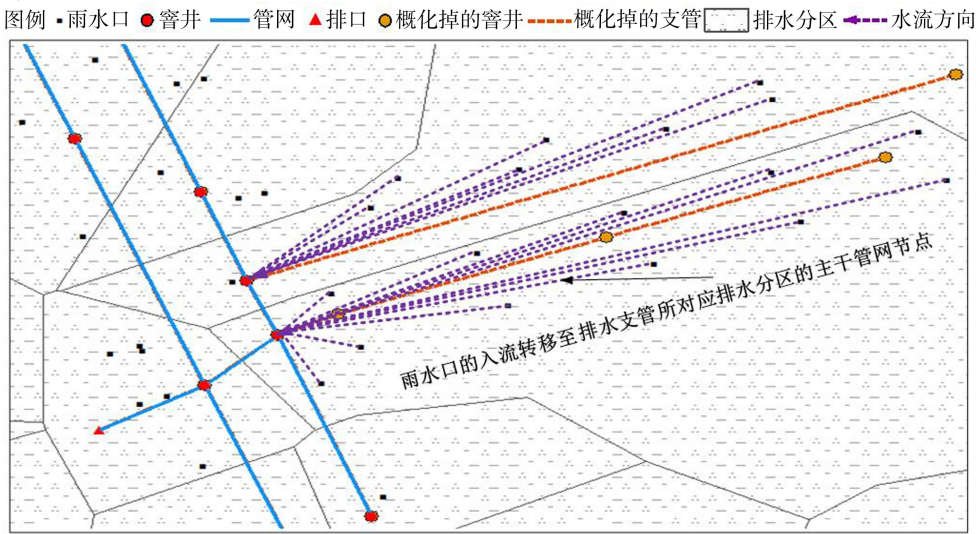


图 1 水文分析与雨水井结合的排水管网概化方法示意图
Fig.1 Schematic diagram of drainage network generalization method that integrates hydrological analysis with stormwater inlets

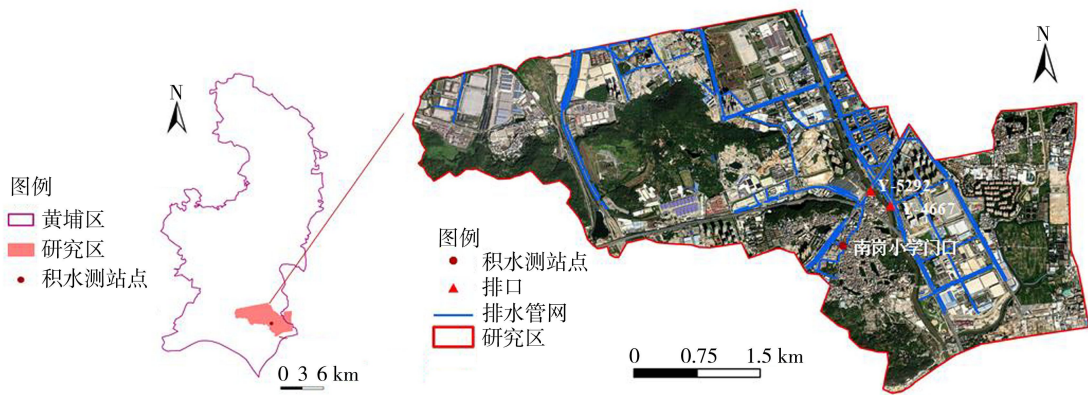


图2 研究区概况

Fig.2 Overview of study area

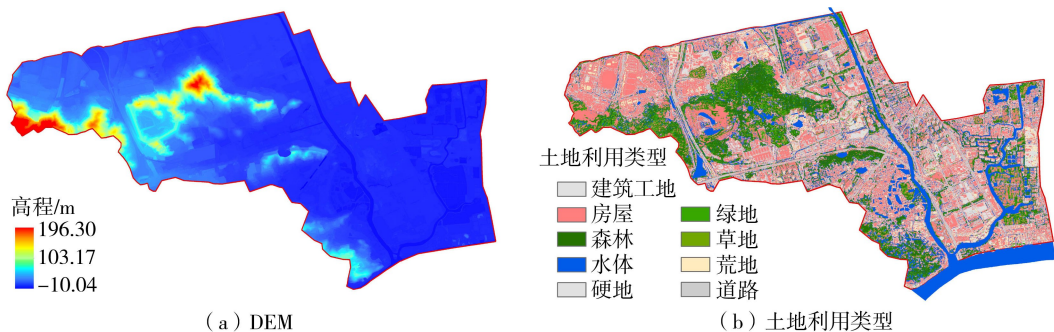


图3 研究区 DEM 及土地利用类型

Fig.3 DEM and land use types of study area

据空间分辨率为 1 m;土地利用数据根据遥感影像数据提取了 9 种类型(图 3)。研究区整体地势西北高、东南低,地表总体起伏不大,存在局部地形陡峭地段,最大高程为 196.30 m。土地利用类型主要分为水体、不透水面(房屋、道路、硬地)和透水面(森林、绿地、草地、荒地、建筑工地)3 类。其中,水体面积为 1.1 km²,占研究区总面积的 6.6%;透水面面积为 6.0 km²,占研究区总面积的 35.9%;不透水面面积为 9.6 km²,占研究区总面积的 57.5%。研究区内的地表径流可在透水面入渗,采用霍顿入渗经验公式进行计算。

2.3 洪涝模型构建

构建研究区洪涝模型时,通过雨水口、窨井实现地表径流与管道水流的交换,即地表径流通过雨水口流入距离最近的窨井,管道水流通过窨井溢出到地表^[17]。因难以通过实地调查获得研究区的雨水口数据,本文根据 GB 50014—2021《室外排水设计标准》,在城市主要道路两侧每隔 50 m 添加一对尺寸为 0.75 m×0.45 m 的雨水口。最终,研究区排水系统由 710 个窨井、45 个排口、3 023 个雨水口和 725 条排水管道组成(图 4)。

二维地表径流模块计算网格尺寸设置为 5 m×5 m,网格数量为 1 341 786,柯朗数 C_r 为 0.5。研究区地面积为 13.5 km²,建筑物面积为 3.2 km²

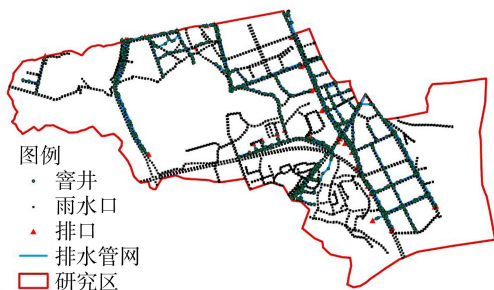


图4 研究区排水系统

Fig.4 Drainage system of study area

(图 5(a)),建筑物采用 building-hole (BH) 形式表示,即建筑物被设置为四周是固壁边界的空洞,在建筑物入口,地表水流以宽顶堰流形式流入建筑物内^[28-29]。地表曼宁系数和管渠曼宁系数等经验参数根据 SWMM 用户手册和文献[17]确定,其中,管道的曼宁系数取 0.011 s/m^{1/3},荒地、绿地、道路曼宁系数分别取 0.05、0.24、0.011 s/m^{1/3}。采用本文提出的排水管网概化方法对研究区排水管网进行概化,概化后的排水系统由 438 个窨井、45 个排口、3 023 个雨水口和 439 条排水管道组成(图 5(b))。相较于现状排水管网,概化后的排水系统中管道数量、长度分别减少了 39.4%、38.7%,窨井数量减少了 38.3%,管网拓扑数据的处理时间减少了 40%。

参考《广州市暴雨强度公式编制与设计暴雨雨

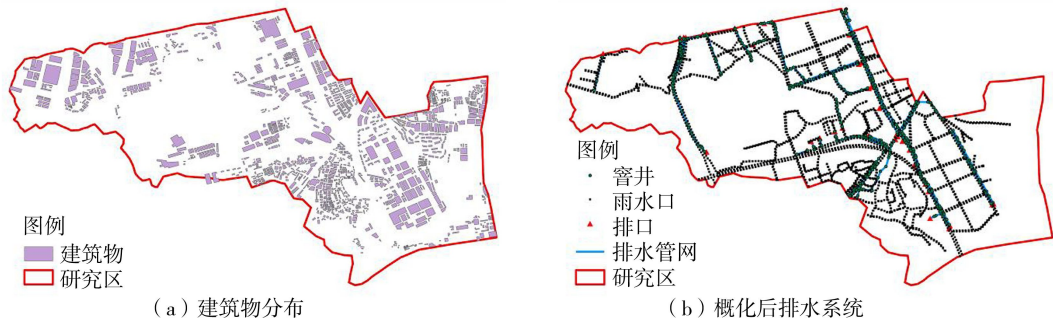


图 5 研究区建筑物分布及概化后排水系统

Fig. 5 Building distribution and generalized drainage system of study area

型研究技术报告简本》，设置了降雨重现期 P 分别为 5、10、20、30、50、100 a 的 6 种暴雨情景，设计暴雨雨型均采用芝加哥雨型，综合雨峰系数 r 统一取 0.289，降雨时长 t 为 120 min (图 6)。

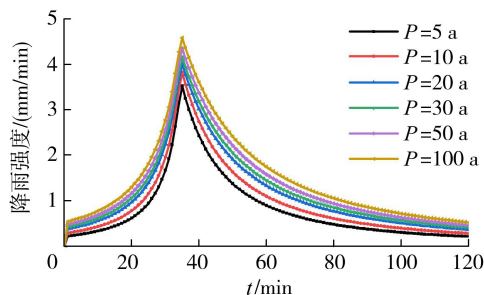


图 6 不同降雨重现期下的设计暴雨过程

Fig. 6 Design storm hyetographs of different rainfall return periods

2.4 洪涝模型率定及验证

2024 年 4 月 20 日和 5 月 4 日广州市遭遇了暴雨洪涝灾害，选取这两场降雨事件对研究区洪涝模型进行率定及验证，两场降雨事件的实际降雨过程如图 7 所示。由图 7 可见，4 月 20 日降雨从 12 时开始，5 月 4 日降雨从 7 时开始，因此洪涝模型也从相应时刻开始模拟。

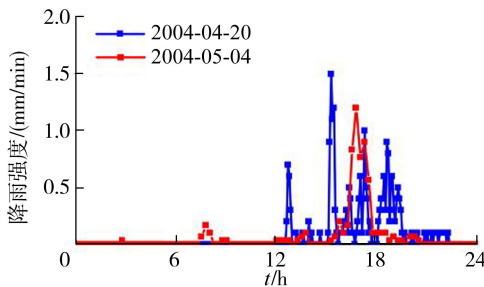
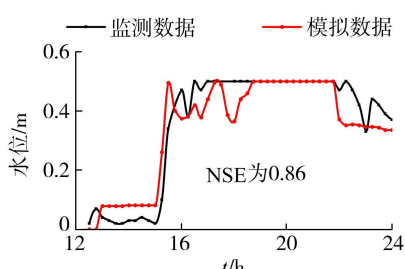


图 7 2024 年 4 月 20 日和 5 月 4 日降雨过程

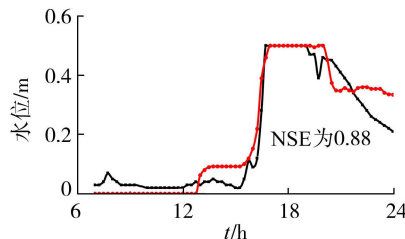
Fig. 7 Rainfall hydrographs on April 20 and May 4, 2024

根据收集的积水液位监测点数据，选取南岗小学门口 (图 2) 作为两场暴雨内涝的验证点。验证点洪涝模型模拟管道水位与实测水位变化过程对比如图 8 所示，可见，模拟管道水位变化过程与实测结果

基本一致。2024 年 4 月 20 日和 5 月 4 日两场降雨模拟结果的纳什效率系数 (NSE) 分别为 0.86 和 0.88，表明构建的洪涝模型能够较准确地模拟研究区暴雨洪涝过程。



(a) 2024 年 4 月 20 日



(b) 2024 年 5 月 4 日

图 8 验证点洪涝模型模拟管道水位与实测水位变化过程对比

Fig. 8 Comparison of simulated and measured pipe water level processes at verification point

2.5 模拟效果对比

2.5.1 历史降雨事件下不同排水管网概化方法模拟效果对比

选取 2024 年 5 月 4 日降雨事件作为历史降雨事件，分别基于研究区现状排水管网构建模型 (以下简称“现状模型”)、基于本文提出的水文分析与雨水井结合的排水管网概化方法构建模型 (以下简称“方法 1”)、基于雨水井等效排水管网概化方法构建模型 (以下简称“方法 2”) 进行洪涝过程模拟，对比不同方法模拟的地表积水及管网排水过程。

图 9 为历史降雨事件下不同方法模拟的地表积水量对比。根据地表水深定义积水程度，0.10 ~ 0.15 m、>0.15 ~ 0.40 m、>0.40 m 分别为轻度积水、

中度积水、重度积水^[17,30],表 1 为历史降雨事件下各方法模拟的不同程度地表积水面积对比。可以看出,相较于方法 2,方法 1 模拟的地表积水面积和地表积水量与现状模型更为接近。具体而言,方法 2 与现状模型的地表积水面积和最大积水量相对误差分别为 2.41%和 5.28%,方法 1 与现状模型的地表积水面积和最大积水量相对误差分别为 0.03%和 1.73%。

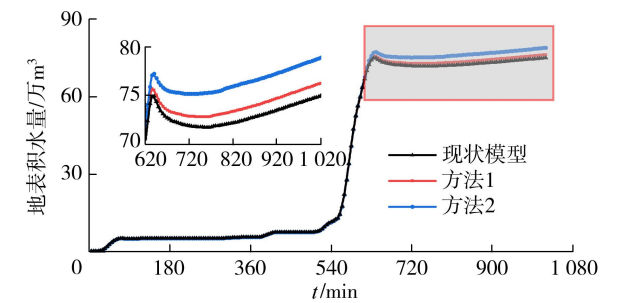


图 9 历史降雨事件下不同方法模拟的地表积水量对比

Fig. 9 Comparison of surface water accumulation simulated by different methods under historical rainfall

表 1 历史降雨事件下各方法模拟的不同程度地表积水面积对比

积水程度	面积占比/%			与现状模型的相对误差/%	
	现状模型	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
轻度	8.70	8.69	8.89	-0.14	2.27
中度	9.47	9.42	9.58	-0.56	1.08
重度	1.89	1.96	2.07	3.78	9.67
合计	20.06	20.07	20.54	0.03	2.41

图 10 为历史降雨事件下不同方法模拟的泄流量与溢流量对比。选取 Y-5292 和 Y-4667 (图 2) 为典型单个排口,图 11 为历史降雨事件下不同方法模拟的排口流量与水量对比,其中排口总流量、排口总水量为所有排口的流量、水量之和。由图 10、图 11 可见,方法 1 和方法 2 模拟的泄流量、溢流量和排口

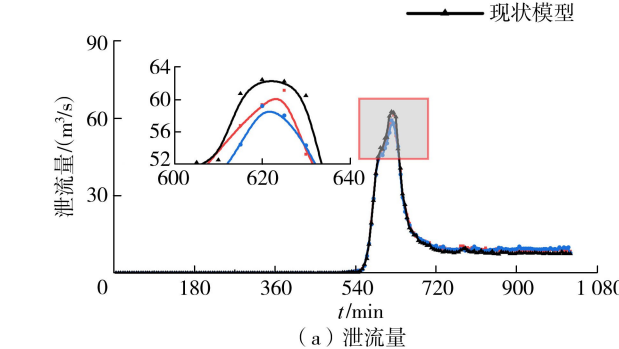


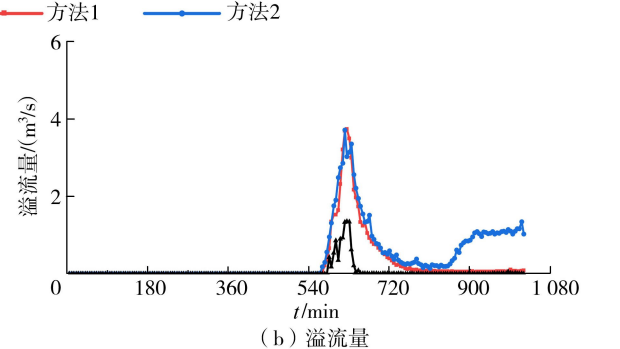
图 10 历史降雨事件下不同方法模拟的泄流量与溢流量对比

Fig. 10 Comparison of discharge flow and overflow simulated by different methods under historical rainfall

流量随时间变化的趋势与现状模型模拟结果基本一致,溢流量的绝对误差较大,泄流量和排口总流量绝对误差较小。与现状模型相比,方法 1 模拟的泄流量峰值、排口总流量峰值、排口总水量相对误差分别为 2.12%、3.49%、0.14%,方法 2 的相对误差分别为 5.21%、9.27%、5.46%,方法 1 和方法 2 模拟的泄流量、排口总流量、排口总水量均低于现状模型,而溢流量则高于现状模型。这可能是因为概化后的排水系统缺少支管存储水量,导致溢流量增加,泄流量减少。此外,分析不同方法模拟的单个排口流量和峰值流量变化过程(图 11(c)(d)),可以看出,方法 1、方法 2 与现状模型模拟的典型单个排口流量变化趋势基本一致,但其模拟值小于现状模型,相比方法 2,方法 1 与现状模型模拟的排口流量更为接近。具体而言,与现状模型模拟的 Y-5292、Y-4667 排口流量相比,方法 1 模拟结果的 NSE 分别为 0.97、0.92,流量峰值相对误差分别为 7.95%、5.60%;方法 2 模拟结果的 NSE 分别为 0.83、0.42,流量峰值相对误差分别为 17.16%、67.41%。综上所述可知,方法 1、方法 2 的模拟结果与现状模型吻合良好,且方法 1 模拟精度更高。

2.5.2 不同降雨重现期下各排水管网概化方法模拟效果对比

图 12、图 13 为不同降雨重现期下各方法模拟的地表积水面积、地表积水量对比。由图 12、图 13 可见,与现状模型相比,方法 1 模拟的地表积水面积和最大积水量相对误差分别为 1.90%~4.53%和 3.24%~8.26%,方法 2 的相对误差分别为 2.79%~5.57%和 3.29%~8.71%,且随降雨重现期增大,误差总体呈增大趋势。此外,随着降雨重现期增大,方法 1、方法 2 与现状模型相对误差的差值也呈增大趋势,具体而言, $P=5\text{ a}$ 时,方法 1、方法 2 的地表积水面积和最大积水量相对误差的差值分别为 0.26%、0.05%,而 $P=100\text{ a}$ 时,该差值分别为 1.33%、1.41%。综上所述可知,相较于方法 2,方法 1 的



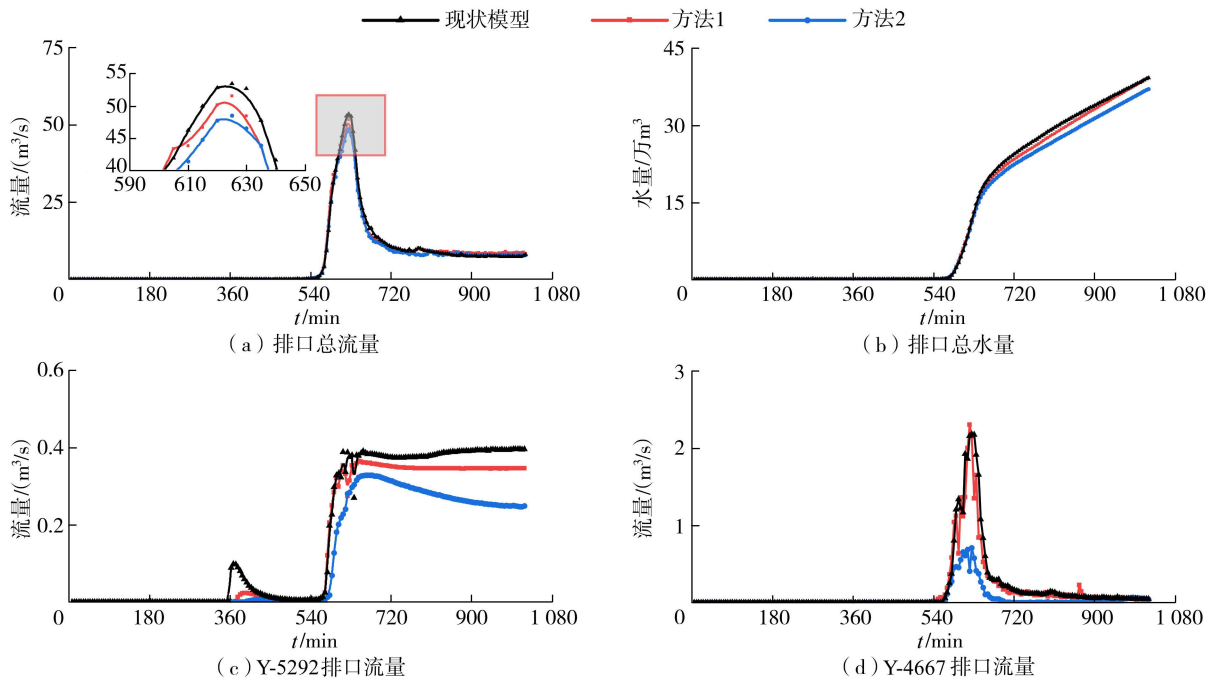


图 11 历史降雨事件下不同方法模拟的排口流量和水量对比

Fig. 11 Comparison of outlet flow and water volume simulated by different methods under historical rainfall

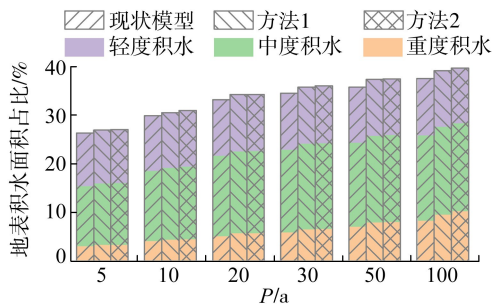


图 12 不同降雨重现期下各方法模拟的地表积水面积对比

Fig. 12 Comparison of surface water accumulation area simulated by each method under different rainfall return periods

模拟结果与现状模型更为接近。

图 14 为不同降雨重现期下各方法模拟的排口总流量峰值和总水量对比,图 15 为不同降雨重现期下各方法模拟的排口总水量变化过程。由图 14、图 15 可见,与现状模型相比,方法 1 模拟的排口总流量峰值和总水量相对误差分别为 2.07%~8.41%和 1.11%~4.79%,方法 2 的相对误差分别为 3.73%~8.45%和 3.32%~10.60%,且随降雨重现期增大,误差总体呈增大趋势。此外,随着降雨重现期增大,两种方法误差的差值也呈增大趋势。

图 16 为不同降雨重现期下各方法模拟的 Y-4667 排口流量变化过程。由图 16 可见,方法 1、方法 2 与现状模型对于单个排口流量模拟结果的变化趋势基本一致,均呈先增大后减少的特征,且相较于方法 2,方法 1 的模拟结果与现状模型更为接近。此外,随着降雨重现期增大,方法 1 与现状模型的相

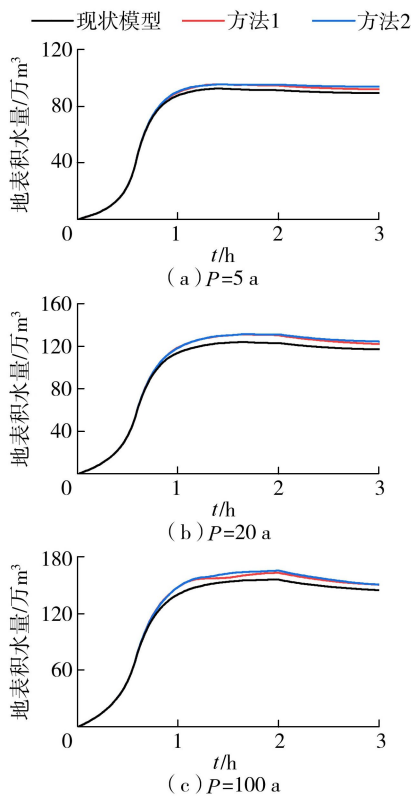


图 13 不同降雨重现期下各方法模拟的地表积水量对比

Fig. 13 Comparison of surface water accumulation simulated by each method under different rainfall return periods

对误差呈增大趋势,而方法 2 的相对误差变化不大。具体而言,与现状模型相比,在降雨重现期分别为 5、20、100 a 时,方法 1 的流量峰值模拟相对误差分别为 4.94%、3.05%、18.81%,方法 2 的相对误差分

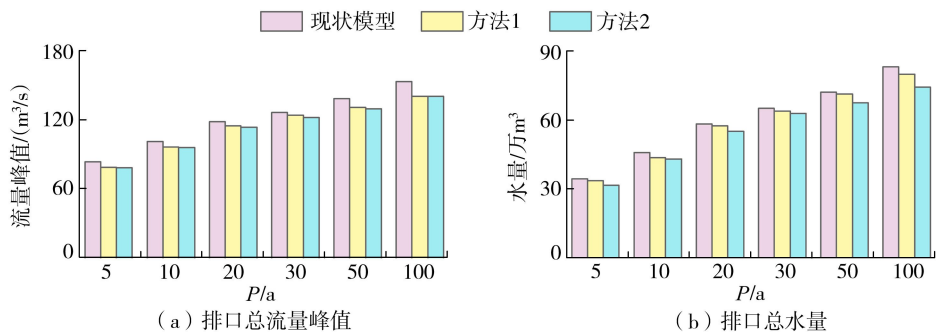


图 14 不同降雨重现期下各方法模拟的排口总流量峰值和总水量对比

Fig. 14 Comparison of peak flow and water volume of all outlets simulated by each method under different rainfall return periods

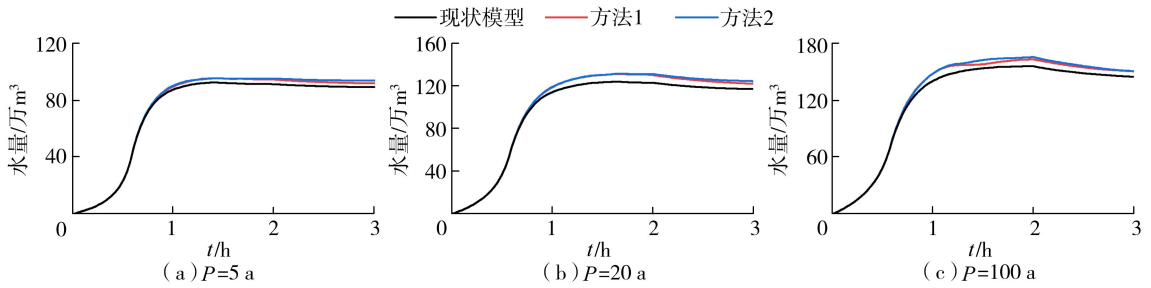


图 15 不同降雨重现期下各方法模拟的排口总水量变化过程

Fig. 15 Total water volume change processes of all outlets simulated by each method under different rainfall return periods

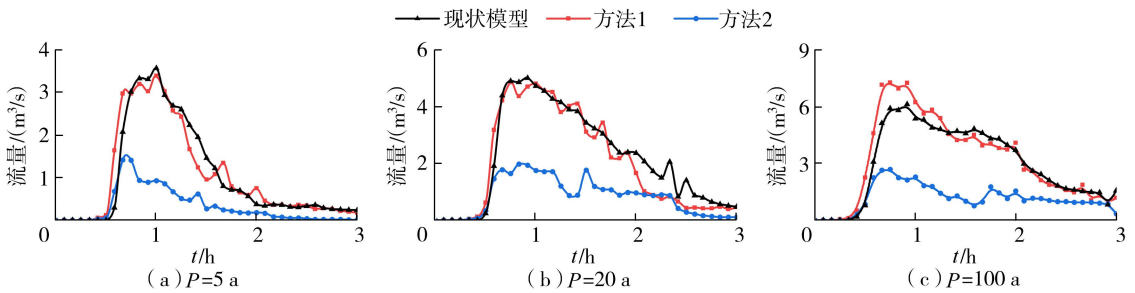


图 16 不同降雨重现期下各方法模拟的 Y-4667 排口流量变化过程

Fig. 16 Outlet discharge change processes at Y-4667 simulated by each method under different rainfall return periods

别为 60.36%、60.59%、56.22%。这可能是因为方法 1 将原先与排水支管相连的雨水口的入流直接转移至排水支管所对应排水分区的主干管网节点,使得雨水口入流的排口与实际汇水过程基本一致,而方法 2 雨水口的入流直接转移至其最近的主干管网节点,导致雨水口入流的排口与实际汇水过程不一致,使单个排口流量误差较大。总体而言,方法 1 的模拟结果更优,更符合实际水文过程。

3 结 论

a. 基于排水管道出口、排水流向、管径和主干路网等确定主干管网结构,结合雨水井、DEM 数据及实际汇水过程,提出了一种水文分析与雨水井结合的排水管网概化方法。将该方法应用于广州市黄埔区,基于城市地表径流与地下管流耦合水动力学模型开展洪涝过程模拟,并与现状排水管网、雨水井

等效排水管网概化方法进行了对比分析。

b. 相较于现状排水管网,基于本文提出的方法概化的排水系统中管道数量、长度分别减少了 39.4%、38.7%,窨井数量减少了 38.3%,管网拓扑数据的处理时间减少了 40%。

c. 利用 2024 年 4 月 20 日和 5 月 4 日两场降雨数据对研究区洪涝模型进行率定及验证,南岗小学门口管道水位模拟的 NSE 分别为 0.86 和 0.88,说明构建的洪涝模型能够较准确地模拟研究区的暴雨洪涝过程。

d. 不同降雨重现期下,与现状模型相比,方法 1 模拟的地表积水面积、排口总水量、典型单个排口流量峰值的相对误差分别为 1.90%~4.53%、1.11%~4.79%、3.05%~18.81%,方法 2 模拟的相对误差分别为 2.79%~5.57%、3.32%~10.60%、56.22%~60.59%。本文所提出方法的模拟结果更优,更符合

实际。

参考文献：

[1] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (Xu Zongxue, Ren Meifang, Chen Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2) : 10-14. (in Chinese))

[2] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 长江中下游各省市洪涝灾情时空变化及影响因素[J]. 水资源保护,2023,39(2):78-86. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Spatiotemporal variation of flood distribution and influencing factors in provinces in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2) : 78-86. (in Chinese))

[3] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1) : 1-9. (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] Tellman B, Sullivan J A, Kuhn C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods[J]. Nature,2021,596(7870):80-86.

[6] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (4) : 23-29. (in Chinese))

[7] Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Assessment of the joint impact of rainfall and river water level on urban flooding in Wuhan City, China [J]. Journal of Hydrology, 2022, 613 : 128419.

[8] 刘志雨,夏军. 气候变化对中国洪涝灾害风险的影响[J]. 自然杂志,2016,38(3):177-181. (Liu Zhiyu, Xia Jun. Impact of climate change on flood disaster risk in China [J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38 (3) : 177-181. (in Chinese))

[9] 吕恒,倪广恒,田富强. 排水管网结构概化对城市暴雨洪水模拟的影响[J]. 水力发电学报,2018,37(11):97-106. (Lyu Heng, Ni Guangheng, Tian Fuqiang. Impacts of drainage pipe network complexity on urban stormwater modeling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (11) : 97-106. (in Chinese))

[10] 张傲,马立山,杨国丽,等. 结合地形因子的雨水管网结构概化方法及应用[J]. 河北建筑工程学院学报,2020,38(1):126-132. (Zhang Ao, Ma Lishan, Yang Guoli, et al. Simplification method of stormwater pipe network combined with terrain factors and its application [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2020, 38 (1) : 126-132. (in Chinese))

[11] 都利亚. 管网资料缺失城区内涝数值模拟及风险评估研究[D]. 广州:华南理工大学,2023.

[12] 杜佳锴,徐梦华,陈昱宏,等. 无管网资料地区城市雨洪过程模拟研究[J]. 水力发电学报,2023,42(2):87-96. (Du Jiakai, Xu Menghua, Chen Yuhong, et al. Study on urban stormwater process simulations for areas with no sewer network data [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42 (2) : 87-96. (in Chinese))

[13] 李东来,许钰,侯精明,等. 精细管网资料缺失城区雨洪过程近似模拟方法[J]. 水科学进展,2024,35(6):960-971. (Li Donglai, Xu Yu, Hou Jingming, et al. Approximate simulation method for stormwater process in urban areas with missing data of fine pipe network [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (6) : 960-971. (in Chinese))

[14] Liang Dongfang, Falconer R A, Lin Binliang. Comparison between TVD-MacCormack and ADI-type solvers of the shallow water equations [J]. Advances in Water Resources, 2006, 29 (12) : 1833-1845.

[15] Liang Dongfang, Lin Binliang, Falconer R A. Simulation of rapidly varying flow using an efficient TVD-MacCormack scheme [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2007, 53 (5) : 811-826.

[16] 刘璐,孙健,袁冰,等. 城市暴雨地表积水过程研究:以清华大学校园为例[J]. 水力发电学报,2019,38(8):98-109. (Liu Lu, Sun Jian, Yuan Bing, et al. Surface flooding in urban areas under heavy downpours: case study of Tsinghua University campus [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (8) : 98-109. (in Chinese))

[17] 王小杰,夏军强,李启杰,等. 考虑不同水流交换模式的城市洪涝一维二维双向耦合模型[J]. 水科学进展,2024,35(2):244-255. (Wang Xiaojie, Xia Junqiang, Li Qijie, et al. Study on the bidirectional coupling 1-D and 2-D model of urban flood based on different flow exchange modes [J]. Advances in Water Science, 2024, 35 (2) : 244-255. (in Chinese))

[18] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5 (C) : 399-417.

- [19] Rossman L A. Storm water management model user's manual version 5. 1 [M]. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2015.
- [20] 王心舒, 江思珉, 郑茂辉, 等. 城市高密度区域排水系统优化方案模拟评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 49-56. (Wang Xinshu, Jiang Simin, Zheng Maohui, et al. Simulation evaluation of drainage system optimization schemes in urban high-density areas [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (6): 49-56. (in Chinese)).
- [21] 陈同庆, 陈家宇, 王明娜, 等. 基于非结构化网格的地表水流和管网水流双向动态耦合模型开发[J]. 水利水电科技进展, 2026, 46(3): 80-87. (Chen Tongqing, Chen Jiayu, Wang Mingna, et al. Development of a bidirectional dynamic coupled surface water flow and pipe network flow model based on unstructured grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2026, 46 (3): 80-87. (in Chinese)).
- [22] Rossman L A. Storm water management model reference manual volume II-hydraulics [M]. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency, 2017.
- [23] 陈倩, 夏军强, 董柏良. 城市洪涝中雨水口泄流能力的试验研究[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 10-17. (Chen Qian, Xia Junqiang, Dong Boliang. Experimental study on discharge capacity of street inlet in urban flooding [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (1): 10-17. (in Chinese)).
- [24] Xia Junqiang, Dong Boliang, Zhou Meirong, et al. A unified formula for discharge capacity of street inlets for urban flood management [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127667.
- [25] 姚飞骏. 雨水口的流量计算方法探讨[J]. 中国给水排水, 2013, 29(14): 45-48. (Yao Feijun. Discussion on calculation method of flow rate at rainwater inlet [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29 (14): 45-48. (in Chinese)).
- [26] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334-344. (Huang Guoru, Chen Wenjie, Yu Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (3): 334-344. (in Chinese)).
- [27] 杨东, 侯精明, 李丙尧, 等. 无资料城区管网排水过程概化模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 139-144. (Yang Dong, Hou Jingming, Li Bingyao, et al. Generalized simulation of drainage process in urban networks without data [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31 (3): 139-144. (in Chinese)).
- [28] Dong Boliang, Xia Junqiang, Zhou Meirong, et al. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles [J]. Science of the Total Environment, 2022, 827: 154098.
- [29] 董柏良, 夏军强, 王小杰, 等. 地表径流与地下管流耦合的城市暴雨洪涝动力学模型[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 95-103. (Dong Boliang, Xia Junqiang, Wang Xiaojie, et al. Urban rainstorm flood dynamic model coupled with surface runoff and sewer flow [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6): 95-103. (in Chinese)).
- [30] 夏军强, 冯基恒, 徐政, 等. 水动力学模型中雨水口布设数量对城市排涝能力的影响研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 106-114. (Xia Junqiang, Feng Jiheng, Xu Zheng, et al. Study on influence of rainwater outlet number arranged in hydrodynamic model on urban drainage capacity [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 106-114. (in Chinese)).

(收稿日期: 2026 - 01 - 26 编辑: 王芳)

