

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

夏军强¹,冯基恒¹,徐 政¹,王小杰¹,董柏良²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室,湖北 武汉 430072; 2. 广东省水利水电科学研究院,广东 广州 510635)

摘要:为研究城市地表径流与地下管流双向耦合的水动力学模型中雨水口布设数量对城市排涝能力的影响,构建了地表径流与地下管流双向耦合的水动力模型。通过街区概化模型试验对水动力学模型进行了验证,并应用于英国 Glasgow 市某一典型街区。结果表明:构建的水动力学模型具有较高的精度,各测点模拟结果的纳什效率系数均大于 0.89,模型能够准确模拟城市地表径流与地下管流过程;增加雨水口数量可有效减小淹没水深,缩小最大淹没范围,对重度积水地区的作用最为显著,雨水口数量从 124 增至 244 时,重度积水区域的淹没面积减小了 55%~81%;增加雨水口数量也能缩短淹没历时,随着雨水口数量增加,研究区内测点的淹没历时缩短了 43%~51%;雨水口均匀布置时,排水效率与雨水口数量呈正相关关系,但提高的速率会随雨水口数量的增加逐渐减小;不同区域的洪涝过程对雨水口数量变化的响应有所差异,在布设雨水口时应重点关注局部易淹区域。

关键词:城市洪涝;水动力学模型;雨水口;淹没水深;排水效率;Glasgow

中图分类号:TV131.4;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0106-09

Study on influence of rainwater outlet number arranged in hydrodynamic model on urban drainage capacity// XIA Junqiang¹, FENG Jiheng¹, XU Zheng¹, WANG Xiaojie¹, DONG Boliang² (1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

Abstract: To investigate the impact of the number of rainwater outlets on urban drainage capacity in a hydrodynamic model that couples urban surface runoff and underground pipe flow in both directions, a hydrodynamic model for bidirectional coupling of surface runoff and underground pipe flow was constructed. A block generalized model experiment was conducted to validate the hydrodynamic model, which was applied in a typical block in Glasgow, UK. The results show that the constructed hydrodynamic model has high accuracy, and the Nash efficiency coefficients of the simulation results at each measuring point are all greater than 0.89. The model can accurately simulate the processes of urban surface runoff and underground pipe flow. Increasing the number of rainwater outlets can effectively reduce the submergence depth and the maximum submergence range, with the most significant effect on areas with severe waterlogging. When the total number of rainwater outlets increased from 124 to 244, the submerged area in areas with severe waterlogging decreased by 55% to 81%. Increasing the number of rainwater outlets can also shorten the inundation duration. As the total number of rainwater outlets increases, the inundation duration of measuring points in the study area is shortened by 43% to 51%. When the rainwater outlets are evenly arranged, the drainage efficiency is positively correlated with the number of rainwater outlets, but the rate of improvement gradually decreases with the increase of the number of rainwater outlets. The response of flood processes in different regions to changes in the number of rainwater outlets varies, and when setting up rainwater outlets, special attention should be paid to locally flooded areas.

Key words: urban flooding; hydrodynamic model; rainwater outlet; inundation depth; drainage efficiency; Glasgow

在全球气候变化的背景下,台风、暴雨等极端气候事件频发^[1-2]。近年来,随着城市化进程加快,城市下垫面的不透水面积增大,发生强降雨时地表水

难以下渗,形成更多的地表径流,增加城市洪涝风险^[3-5]。雨水口作为城市地表与地下排水系统进行水流交换的关键节点,直接影响城市洪涝程度的时

空分布。研究表明,雨水口的类型、工作状态、规划布置均会影响其排水效率^[6-8]。当雨水口的排水能力不足时,即使降雨强度未达到城市管网系统的设计暴雨标准,仍会发生局部内涝^[9]。因此,探究雨水口布设因素对城市洪水淹没过程的影响可为城市洪涝研究提供重要参考价值。

目前,国内外已有设计规范描述了不同类型雨水口的过流能力,如美国联邦公路管理局发布的《城市排水设计手册》和我国发行的标准图集 GJBT—1404《雨水口》。部分学者通过开展物理模型试验,发现随着算前水深增大,雨水口的泄流模式会从堰流转变为管嘴出流^[10-12]。由于泄流模式开始发生转变的临界水深难以确定,Xia 等^[13]提出了一种统一的泄流量计算公式,与实测数据吻合较好。考虑到现实生活中雨水口堵塞现象十分常见,影响雨水口的工作状态,Xia 等^[14-15]进一步提出了不同堵塞程度下雨水口的泄流量计算公式。上述研究主要关注不同雨水口设计类型及工作状态对过流能力的影响,然而在实际的洪水演进过程中还应考虑城市地物特征、雨水口布设数量等城市规划方面的影响。Dong 等^[16]利用地表径流与地下管流耦合的物理试验平台,研究了不同城市地物(绿化带、建筑物等)对洪水淹没过程的影响。段园煜等^[17]搭建物理试验平台,研究了道路横纵坡及径流量对雨水口泄流效率的影响。在进行排水设计规划时,雨水口布设数量的合理性同样影响城市排涝能力,较少的雨水口布设数量能节约成本,但在高强度降雨条件下容易形成内涝;增加雨水口数量能增强城市排涝能力,同时也增加施工成本,影响道路美观^[18]。已有学者针做了相关研究,张迪等^[19]采用二维水动力学模型计算了雨水口在不同的道路纵坡、布设数量下的排水效率;王纪军等^[20-21]的研究结果表明雨水口布设应优先保证地势低洼处的雨水口数量,适当增加雨水口支管数量,同时沿途增设雨水口以减轻汇流量。

以往研究较多聚焦于雨水口的类型和工作状态对其过流能力的影响,尚未充分考虑雨水口数量对城市排涝过程的影响。本文采用城市洪涝一二维双向耦合模型,开展街区模型概化试验,利用实测数据对模型进行率定和验证,并将模型应用于英国 Glasgow 市某一典型街区,探究雨水口布设数量对城市排涝能力的影响。

1 模型构建

1.1 二维地表径流模型

地表水动力学模型采用沿水深积分的不可压缩流体的二维浅水方程^[22]。忽略风应力、科氏力和紊

动项的影响,控制方程中连续性方程见式(1),动量方程见式(2)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = q_d \tag{1}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial(\beta q_x^2/h)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta q_x q_y/h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ \frac{g q_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^2 C^2} \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial(\beta q_x q_y/h)}{\partial x} + \frac{\partial(\beta q_y^2/h)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \\ \frac{g q_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{h^2 C^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中: t 为时间; η 为水位; q_x 、 q_y 分别为水流在 x 、 y 方向的单宽流量; q_d 为排水强度,包括单位面积的泄流量和溢流量; h 为水深; β 为动量修正系数; g 为重力加速度; C 为谢才系数。

采用 TVD-MacCormack 格式有限差分方法求解二维浅水方程。MacCormack 格式具有时空二阶精度^[23],通过在其校正步中添加 TVD 限制函数实现激波捕捉,抑制陡坡附近可能产生的数值振荡,适用于急流、缓流并存的地表复杂水流流态^[24]。由于 TVD-MacCormack 格式为显格式,在 x 、 y 方向需同时满足 CFL 限制条件,模型采用自适应时间步长,保证数值计算的收敛性^[23]。

1.2 一维地下管流模型

基于 SWMM 的管网水动力模块模拟地下管流。SWMM 是美国环保署开发的动态降雨-径流模型,具有操作简单快捷、计算高效稳定、源代码开放等优点,在城市暴雨洪涝研究及排水系统规划设计等领域得到广泛应用^[25-26]。SWMM 提供了恒定流、运动波、动力波 3 种模拟方法,其中动力波方法通过求解完整的一维圣维南方程组计算管道蓄水、回水、有压满管流、检查井溢流等,适用于短时间步长的管网流动模拟,因此本文采用动力波方法模拟地下管流。一维地下管流模型将复杂的排水系统概化为管道与节点的集合,在管道上满足连续性方程和动量方程,在节点上满足连续性方程。管道控制方程表达式见式(3)(4)。节点控制体包含节点本身和与其相连的所有管道长度的一半,控制体内的水体体积随时间的变化等于进入控制体的净流量,节点控制方程表达式见式(5)。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial s} + gA \frac{\partial H}{\partial s} + gAS_f = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\Delta Q}{A_s} \quad (5)$$

式中: s 为沿管道方向; A 为过水断面面积; Q 为管道流量; H 为管道水头; S_f 为摩阻坡度; A_s 为控制体的表面积, 包括节点的蓄水表面积和管道在控制体内贡献的表面积; ΔQ 为进入控制体的净流量。

基于有限差分法离散一维渐变非恒定流方程, 采用隐式欧拉法迭代求解, 得到节点水位、管道流量和水深的时间序列。计算前需要设置初始条件和边界条件, 初始条件包括节点和管道的初始水深、管道初始流量等; 边界条件包括节点的外来流量、管网出口处的水头等。

1.3 地表径流与地下管流交互

地表径流与地下管流模型之间的水流交互包括节点处的泄流和溢流。当地表水位大于管网节点水位时, 进行泄流计算, 地表水通过多个雨水口泄流至单个检查井后进入排水管网; 当地表水位小于管网节点水位时, 进行溢流计算, 管网水流直接通过检查井溢流到地表; 当地表水位等于管网节点水位时, 不发生水流交互^[22,27]。采用 Xia 等^[13] 提出的雨水口综合泄流公式计算泄流量(式(6)); 采用孔口流量公式^[22] 计算溢流量(式(7)); 为保证模型计算的稳定性, 对节点处的交互流量添加限制条件^[28]

(式(8))。

$$Q_i = auA_n F_r^b \quad (6)$$

$$Q_o = C_o A_n \sqrt{2g(h_n - h_s)} \quad (7)$$

$$Q_n = \min(Q_e, V_e/\Delta t) \quad (8)$$

其中

$$F_r = u/\sqrt{gh}$$

式中: Q_i 为泄流量; a 、 b 为无量纲参数; A_n 为节点过水面积; u 为算前流速; F_r 为算前弗汝德数; Q_o 为溢流量; C_o 为孔流系数; h_n 为节点水位; h_s 为地表水位; Q_n 为节点泄/溢流量; Q_e 为交互流量; Δt 为时间步长; V_e 为节点所占网格的地表水量/溢流量。

2 模型验证

依托武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室的城市洪涝全过程模拟平台开展物理试验, 并利用实测结果对城市地表径流与地下管流的耦合模型进行验证。

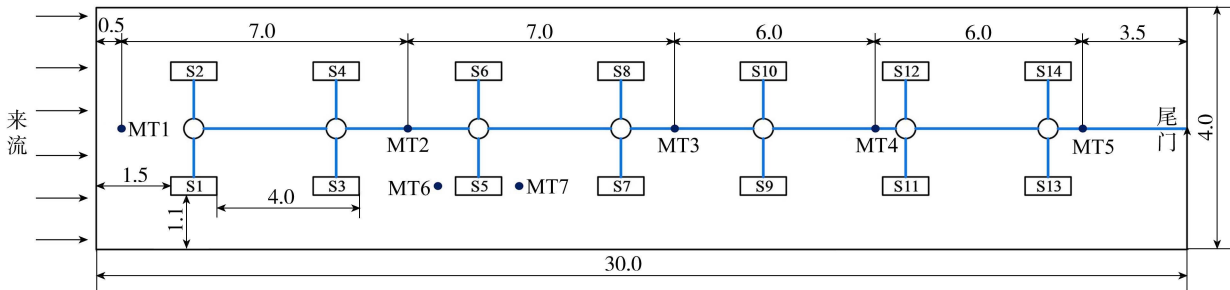
2.1 水槽模型

图 1 为水槽模型示意图。由图 1(a) 可见, 城市洪涝全过程模拟平台由地表和地下两部分组成, 地表部分包含前池、水槽、尾门等, 地下部分包含地下管网、泄水池、回水渠等。平台的前池与地下水库通过泵站相连, 试验开始时, 由泵站从地下水库抽水至



(a) 城市洪涝平台

□ 雨水口 ○ 检查井 — 管道 ● 测点 ▲ 排放口



(b) 水槽平面布置 (单位: m)

图 1 水槽模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sink model

前池,通过调节泵站的功率控制进口流量;水流经地表尾门和地下管网排放口进入泄水池,通过回水渠重新回到地下水库,实现水流循环。由图 1(b)可见,水槽长 30 m,宽 4 m,高 0.8 m,底坡为 0。水槽纵向中轴线两侧对称布置 7 对平算式雨水口,雨水口的平面尺寸为 0.25 m×0.15 m,开孔率为 40%,雨水口下接尺寸为 0.25 m×0.15 m×0.5 m 的长方体雨水井。每对雨水井的横向中间位置设有 1 个底部直径 0.4 m,高 0.8 m 的圆柱体检修井,井盖不透水,不参与地表、地下的水流交互。雨水井与检查井之间由一根管径 0.05 m 的侧支管连接,支管长度为 0.5 m。所有检查井通过 6 根管径为 0.2 m 的干管相连,每根干管长度为 3.6 m,第 7 个检查井另有一根同尺寸的干管连接至下游的泄水池,构成完整的排水系统。

2.2 试验工况

试验设有 7 个超声波液位仪,记为 MT1~MT7。其中 MT1~MT5 用于监测沿程水位随时间的变化情况;MT6、MT7 分别位于某一雨水口前、后 0.4 m 处,以监测雨水口附近的水位过程,液位仪的具体位置见图 1(b)。每根侧支管及排放口处的干管各配备一电磁流量计,可采集整个排水系统管道流量的变化过程。

设计 3 组试验工况,采用不透水的有机玻璃板替换雨算以减少排水系统中参与工作的雨水口数量;通过设置泵站的抽水频率控制进口流量,分别测量 0.14 m³/s 恒定来流条件下,7 对、5 对、3 对雨水口参与泄流时,沿程水深、雨水口前后水深、侧支管流量、排放口泄流量的变化过程。3 组工况记为 E-1、E-2、E-3,从上游至下游将雨水口标记为 S1~S14,E-1 工况中 14 个雨水口均参与排水,E-2 工况中封堵 S11~S14,E-3 工况中封堵 S7~S14。

2.3 模型模拟结果与试验结果对比

将每组工况中 MT1 和 MT5 的水位随时间变化过程作为上、下游的水位边界条件输入模型。排水系统下游出口边界为自由出流,其余边界为固壁边界。模拟时长为 300 s,正方形网格尺寸为 0.025 m×0.025 m。地表的曼宁系数取 0.012 s/m^{1/3},排水管道的曼宁系数取 0.011 s/m^{1/3}。经率定,确定 $a=0.291$, $b=-0.796$, $C_0=0.2$ 。图 2 为 E-1 工况下 4 个测点水位过程模拟值与实测值对比。由图 2 可见,不同测点的水位过程模拟值与实测值变化过程基本一致,纳什效率系数(NSE)均大于 0.950。

图 3 为连接 S9 的侧支管及排放口干管流量过程模拟值与实测值对比。由图 3 可见,支管与干管流量模拟值的纳什效率系数均大于 0.940,流量稳定时的模拟值与实测值吻合较好。图 3(a)中的支

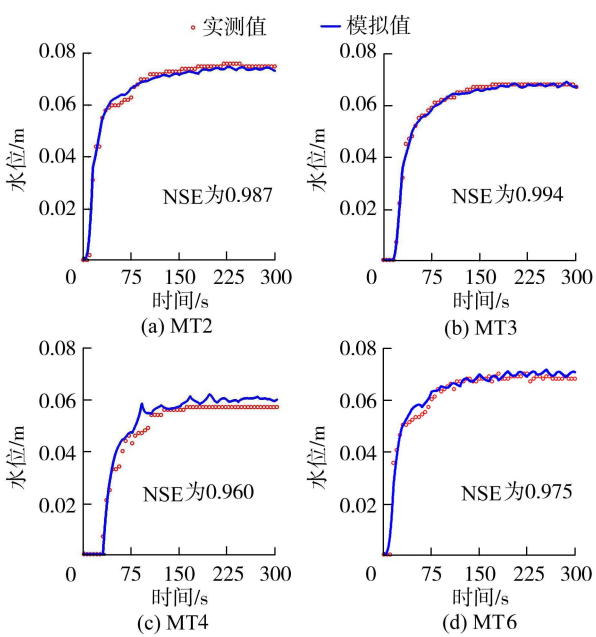


图 2 4 个测点水位过程模拟值与实测值对比
Fig. 2 Comparison between simulated and measured values of water level process at 4 measuring points

管流量的模拟值与实测值在 30~90 s 内存在较明显的差异,原因可能是支管达到满管状态前,电磁流量计无法测得管道流量,因此流量的实测值在前期存在较大的系统误差;而当支管达到满管且流量稳定时,模拟值与实测值基本吻合。当连接排放口的干管流量开始上涨时,大部分支管的流量已达到稳态,因此干管流量的模拟值与实测值误差较小。

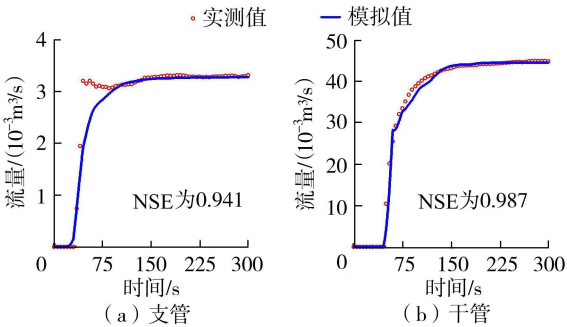


图 3 支管与干管流量过程模拟值与实测值对比
Fig. 3 Comparison between simulated and measured flow process values of branch and main pipes

使用率定后的参数模拟 E-2、E-3 工况,部分测点的纳什效率系数见表 1。由表 1 可见,率定后的耦合模型计算精度较高,能够准确模拟包含地表径流与地下管流的城市洪涝演进过程。当 3 组工况的沿程各测点的水位均达到稳定状态后,E-1 工况的沿程水面线最低;随着参与泄流的雨水口数量减少,E-2、E-3 工况的沿程水面线均有不同程度的抬升;当排放口流量逐渐趋于稳定时,雨水口数量越多,排水系统的泄流量越大。总的来说,雨水口数量变化

会影响淹没水深和泄流量,前者与雨水口数量呈负相关关系,后者与之呈正相关关系。

表 1 不同工况下模型模拟值的纳什效率系数

工况	MT2	MT3	MT4	MT6	干管
E-1	0.987	0.994	0.960	0.975	0.987
E-2	0.986	0.993	0.927	0.956	0.943
E-3	0.982	0.990	0.953	0.940	0.893

3 模型应用

3.1 研究区概况

选取英国 Glasgow 市某一面积为 1.0 km × 0.4 km 典型集水区作为研究区,采用构建的耦合模型模拟 2002 年 7 月 30 日发生在研究区的洪水事件。在该事件中,涵洞 P0 发生溢流,最大流量为 10 m³/s,总溢流量约 8 554 m³,持续时间约 40 min, P0 的溢流量过程^[29]见图 4。由于缺少实际的排水系统设计资料,本文参考 GB 50014—2021《室外排水设计标准》概化地下管网。沿街区主要道路的中轴线每隔约 100 m 布设 1 个检查井,相邻检查井之间由直径为 1.0 m 的圆管相连,南侧边界上设有 2 个排放口。在主要行洪街道和可能的渍水点布置测点,分别记作 P1~P4。为研究雨水口布设数量对城市排涝过程的影响,通过调整雨水口的间距改变雨水口总数。GB 50014—2021《室外排水设计标准》规定雨水口的布设间距宜为 25~50 m,本文设计了 4 组有排水系统的计算工况,其中 3 组为均匀布置,分别沿该街区的主要道路两侧每隔 50、35、25 m 添加 1 对 0.75 m×0.45 m 的平算式雨水口,对应的雨水口总数分别为 124、172、244,记为 M-1、M-2、M-3;另一组在 M-1 工况基础上,于 P3 所在街道以 25 m 为间距布设雨水口,记为 M-4,该工况下雨水口总数为 142。将上述 4 组工况与无排水系统工况 M-0 进行对比。研究区的地形(分辨率为 2 m)及

M-1 工况的排水系统布置如图 4 所示。建筑物采用真实地形法表示,研究区四周为固壁边界。模拟时长为 2 h,正方形网格尺寸为 2 m×2 m。地表的曼宁系数取 0.02 s/m^{1/3},排水管道的曼宁系数取 0.013 s/m^{1/3}。经参数率定,得到 $a = 0.302$, $b = -0.816$, $C_0 = 0.67$ 。

3.2 结果与分析

图 5 为不同工况下各测点的水深对比。由图 5(a)可见,P1 距离洪水源头较近,来流量大,在 4 种工况下,洪水均在 22 min 时抵达 P1,4 min 内水深几乎以相同的趋势急剧增加,30 min 时增至峰值。在无雨水口的 M-0 工况下,P1 的最大水深为 0.67 m,30 min 后水深开始减小,120 min 后形成约 0.40 m 的积水。布设雨水口后,随着雨水口数量增加,M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比, P1 的最大水深分别减小 4.62%、6.11%、8.35%;在 30~120 min 内, M-1~M-3 工况的水深有不同程度的减小,其中 M-1、M-2 工况的水深变化没有明显差异, M-3 工况的地表积水发生更大的幅度减少。由图 5(b)可见,在无雨水口的 M-0 工况下,洪水在 21 min 时到达 P2,最大水深为 0.20 m。由于 P2 位于研究区北侧的一条东西向道路,为主要的行洪通道,且道路纵坡约为 1%,随着时间推进,水流会继续流向下游地势更低处,因此在洪水事件结束后,P2 未出现明显积水。雨水口的数量增加后,M-1、M-2、M-3 工况中洪水抵达 P2 时刻略有推迟,水深在 6 min 内增至峰值,最大水深与 M-0 工况相比分别减小了 9.36%、12.32%、24.14%。与 P1 类似,整个时间轴上 M-1 工况与 M-2 工况的水深变化趋势近似, M-2 工况的水深略小于 M-1 工况;而 M-3 工况的水深与 M-1、M-2 工况相比呈现更明显的差异。增加雨水口数量使该点的淹没历时明显缩减,与无雨水口时 M-0 工况的 56 min 相比, M-1、M-2、M-3 工况分别缩减 43.14%、46.68%、55.13%。P3 位于研究区南侧的

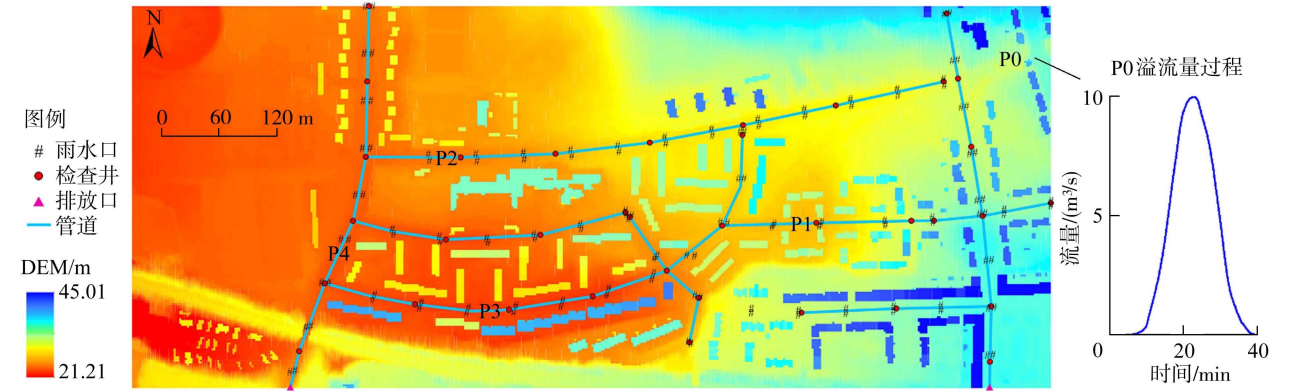


图 4 研究区地形及排水系统布置

Fig. 4 Layout of drainage system and terrain in research area

东西向道路上,该点地势低洼,上游的水流到达后逐渐向此处汇集,无雨水口时,水流难以排出,形成严重内涝,最大淹没水深为 0.76 m。由图 5(c)可见,随着雨水口数量增加,洪水抵达时刻明显延后,M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比,P3 的最大水深分别减小 31.93%、42.71%、56.50%,这说明增加雨水口数量能大幅度减小渍水点的淹没水深,减轻内涝。在 M-3 工况下,100 min 时 P3 水深降至 0.04 m,随后保持不变;同一时刻 M-1、M-2 工况的水深仍在以较缓的趋势减小。由图 5(d)可见,P4 在无雨水口时的最大水深为 0.25 m,由于 P4 所在道路纵坡较小,当 P0 停止溢流后,来流减小,一部分水流继续向南流动,另一部分水流停滞于 P4 附近,形成约 0.12 m 深的积水。布置雨水口后,M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比,P4 的最大水深分别减小 13.83%、21.34%、33.99%;在 75 min 时刻之前,M-1~M-3 工况的水深变化过程呈递减趋势,75 min 后 3 种工况的水深均维持在 0.08 m 左右,增加雨水口数量并不能进一步减小该区域的水深。

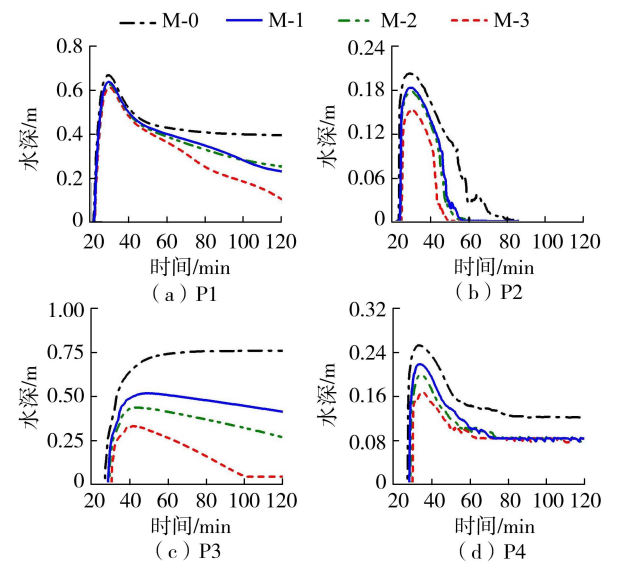


图 5 不同工况下各测点的水深对比

Fig. 5 Comparison of water depth at various measuring points under different operating conditions

由图 5 可见,各测点的水深变化并未呈现统一的规律,不同区域的洪涝过程对雨水口数量变化的响应有所差异。P1、P2 位于洪水演进的上游,径流量大,洪水到来前途径的雨水口数量较少。与 M-1 工况相比,M-2 工况雨水口数量增加较少,而 M-3 工况雨水口数量增加更多,因此 M-1、M-2 工况的差异较小且变化趋势相近,M-3 工况相对于 M-1 工况水深减小更明显。P3、P4 位于洪水演进的下游,洪水行进路程更远,M-1~M-3 工况的雨水口数量有明显增长,水深随时间变化的过程差异也更明显。由此

可见,为了提升城市排涝能力而增加雨水口数量时,还应考虑雨水口的布置位置。上游 P1 处的径流量大,且四周被建筑物围阻,往往容易形成较深的积水,因此在上游布置更密的雨水口才能显著减轻内涝。P2 位于主要行洪通道,且道路纵坡较大,即使不布置雨水口,水流也会随时间推移继续向下游流动,最终不会形成明显积水;布置雨水口后,该区域的淹没历时有明显缩短,对于此类区域,可参考室外排水规范适当布置雨水口加快排水。P3 处地势低,极易出现严重的内涝,此类区域应增加雨水口布置数量,既能显著降低积水深度,还能大大缩短淹没历时。P4 所处道路的纵坡较小,地势平坦,当上游不再有来流时水流容易停滞于此形成积水^[30],布置雨水口虽能减小该类区域的积水深度,但当水深降至某一范围时,增加雨水口数量无法进一步排水,可能原因在于此处的排水管网易发生超载而发生溢流,随时间推进,泄流与溢流逐渐达到平衡状态,因此针对此类区域应首要考虑建设成本,不宜布置较密的雨水口。

图 6 为不同工况下研究区的最大淹没范围及水深。由图 6 可见,M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比,最大淹没面积分别减小了 16.64%、22.33%、28.60%。将渍水程度划分为 3 个等级:水深 $h \leq 0.15$ m 为轻度积水, $0.15 \text{ m} < h \leq 0.40$ m 为中度积水, $h > 0.40$ m 为重度积水^[31]。M-1、M-2、M-3 工况与 M-0 工况相比,轻度积水面积分别减少了 10.14%、12.19%、13.75%,中度积水面积分别减少了 8.90%、18.04%、28.77%,重度积水面积分别减少了 55.56%、69.25%、81.02%。由此可见,增加雨水口数量显著减少了研究区的受淹面积,且对中度积水和重度积水面积的影响更突出。

由图 6(a)可见,P3 所在的街道为主要的中、重度积水地区。M-4 工况在 M-1 工况的基础上,以 25 m 间距在该区域加密布置雨水口,其余地区雨水口间距不变。图 7 为 M-4 工况下研究区的最大淹没范围及水深。由图 7 可见,M-4 工况下 P3 附近的内涝较 M-1 工况有所缓解,整体淹没情况与 M-2 工况近似。将 M-1、M-2、M-4 工况进行对比,表 2 为 3 组工况下最大淹没范围及不同渍水程度积水面积的减小幅度。由表 2 可见,M-4 工况相比于 M-1 工况,仅在 P3 附近增设了 18 个雨水口便有效缓解了中、重度积水地区的内涝;而 M-2 工况相比于 M-4 工况,虽然在总数上增设了 30 个雨水口,但是研究区内的最大淹没范围,尤其是重度积水面积的减小幅度没有明显增加,这进一步说明雨水口总数和布置位置

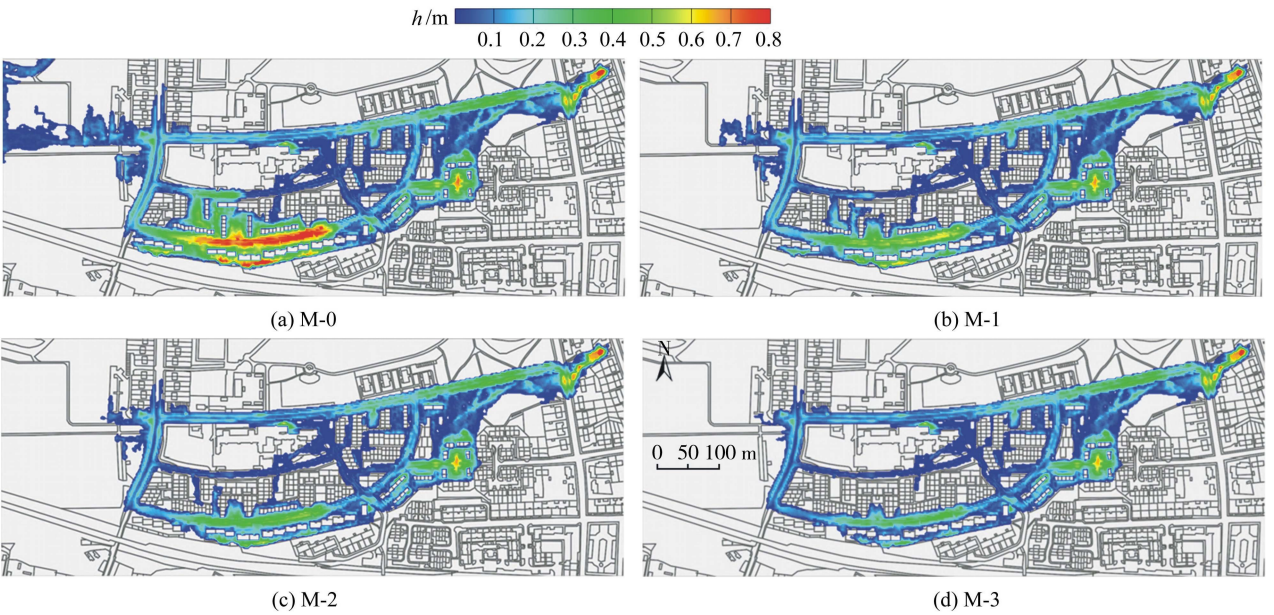


图 6 不同工况下研究区的最大淹没范围及水深

Fig. 6 Maximum submergence range and water depth of the study area under different operating conditions

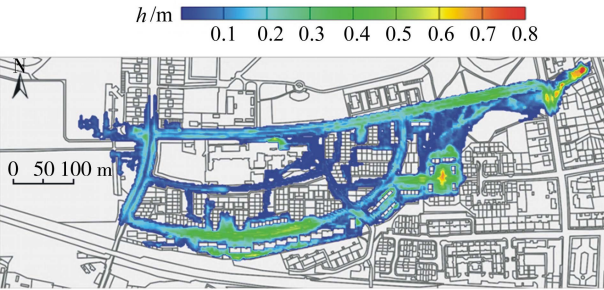


图 7 M-4 工况的最大淹没范围及水深

Fig. 7 Maximum submergence range and water depth of M-4 operating condition

表 2 3 组工况下最大淹没范围及不同等级积水面积的减小幅度

Table 2 Reduce amplitude of maximum submergence range and water accumulation area with different levels under 3 operating conditions

工况	相对于 M-0 的减小幅度/%			
	最大淹没范围	轻度积水面积	中度积水面积	重度积水面积
M-1	16.64	10.14	8.90	55.56
M-2	22.33	12.19	18.04	69.25
M-4	19.91	10.27	13.38	67.53

综合影响街区的排涝能力,布置雨水口时应重点关注有严重内涝的局部地区。

为了更直观地反映雨水口布设数量对城市排涝能力的影响,采用排水效率 E 反映不同工况的优劣,计算公式为

$$E = V_{di} / V_{in} \times 100\% \quad (9)$$

式中: V_{di} 为排水总量; V_{in} 为来流总量,本研究中 $V_{in} = 8\,554\text{ m}^3$ 。

图 8 为不同工况下的排水总量。由图 8 可见,均匀布置雨水口时, M-3 工况的排水总量始终大于 M-2 和 M-1 工况,排水系统的排水总量随着雨水口数量的增加而增加。M-4 工况的排水总量在洪水过程初期介于 M-1、M-2 工况之间;洪水过程后期, M-4 工况的排水总量较 M-1 工况有明显增加,且逐渐逼近 M-2 工况。4 组工况下排水总量随时间的增长均呈现先急后缓的变化趋势, M-3 工况的排水总量在洪水发生 120 min 时已无明显增长,但同一时刻其余 3 组工况的排水总量仍呈现上升趋势,说明 M-3 工况更早到达排水总量的上限。计算 4 组工况的排水效率,洪水事件发生 2 h 后 M-1~M-4 工况的排水效率分别为 63.72%、77.54%、88.81%、76.93%。由此可见,对于 M-1~M-3 工况,在研究区按照固定距离均匀布设雨水口时,随着雨水口间距减小,雨水口数量增加,排水效率提升,但提高的速率却有所下降,说明通过增加雨水口数量虽能提高排水效率,但该作用会随着雨水口数量的增加而受限; M-4 工况

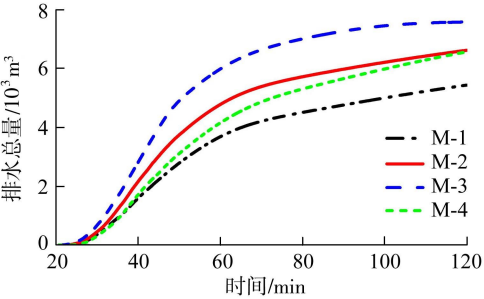


图 8 不同工况下的排水总量

Fig. 8 Total drainage volume under different operating conditions

在 M-1 工况的基础上,在积水严重区域增设了 18 个雨水口,排水效率已有了显著提高,达到了 M-2 工况的排水效率,说明在合适的位置布设雨水口能够在低成本条件下更大地提升街区排涝能力。

4 结 论

a. 构建了地表径流与地下管流双向耦合的水动力学模型,开展了物理试验对耦合模型进行验证,地表径流水位模拟值的纳什效率系数均超过 0.90,管道流量模拟值的纳什效率系数均超过 0.89,耦合模型的模拟值与实测值基本吻合,模型具有较高的精度。

b. 增加雨水口的数量能有效降低研究区的淹没水深、减小淹没面积,尤其是对重度积水地区有更显著的削减作用,增加雨水口数量后,重度积水区域的面积减少了 55.56%~81.02%。同时,增加雨水口数量可以缩短淹没历时,随着雨水口数量增加,P2 测点的淹没历时缩短 43.14%~55.13%。

c. 均匀布设雨水口时,雨水口数量增加,排水效率也随之提升,当雨水口数量从 124 增至 244 时,排水效率从 63.72%提高至 88.81%,但提高的速率会随雨水口数量增加而减小;仅在局部地区合理增设雨水口可节约成本,达到更良好的排水效果。

d. 雨水口数量及其布设位置会共同影响城市排涝过程。在 P1、P3 这类极易形成较深积水的区域附近应布置更密的雨水口以减轻局部内涝;针对 P2 这类在洪水事件结束后未出现明显积水的区域应参考相关规范布置适当数量的雨水口以缩短淹没历时;对于 P4 区域,增加雨水口数量并不能进一步减少局部积水,应综合考虑建设成本,合理布设雨水口。

参考文献:

[1] HAMMOND M J, CHEN A S, DJORDJEVIĆ S, et al. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review [J]. Urban Water Journal, 2015, 12 (1) : 14-29.

[2] 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))

[3] BERTILSSON L, WIKLUND K, DE MOURA TEBALDI I, et al. Urban flood resilience-a multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning [J]. Journal of Hydrology, 2019, 573 : 970-982.

[4] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等.城市洪涝灾害风险分析与

区划方法综述 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (6) : 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6) : 1-6. (in Chinese))

[5] 张金良,罗秋实,王冰洁,等.城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (1) : 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1) : 6-15. (in Chinese))

[6] 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))

[7] PALLA A, COLLI M, CANDELA A, et al. Pluvial flooding in urban areas: the role of surface drainage efficiency [J]. Journal of Flood Risk Management, 2018, 11 : S663-S676.

[8] 高帅领,夏军强,董柏良,等.雨水口泄流对城市洪涝影响的数学模型 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2022, 56 (3) : 590-597. (GAO Shuailing, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Mathematical model for urban flooding with effect of drainage of street inlets [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56 (3) : 590-597. (in Chinese))

[9] TEN VELDHUIS J A E, CLEMENS F H L R, VAN GELDER P H A J M. Quantitative fault tree analysis for urban water infrastructure flooding [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7 (11) : 809-821.

[10] GÓMEZ M, RUSSO B. Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2011, 164 (2) : 81-90.

[11] 李鹏,李曦淳,宋启元,等.雨水篦子水力特性研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2014 (3) : 85-86. (LI Peng, LI Xichun, SONG Qiyuan, et al. Study on hydraulic characteristic of rain oliveri [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2014 (3) : 85-86. (in Chinese))

[12] 吴鹏,杨敏,何京莲,等.雨水口算子的孔口流量系数试验研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12 (6) : 65-68. (WU Peng, YANG Min, HE Jinglian, et al. Experiment on discharge coefficients for orifices of gutter grates [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12 (6) : 65-68. (in Chinese))

[13] 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.

[14] XIA Junqiang, DONG Boling, ZHOU Meirong, et al. A

- unified discharge capacity formula of clogged grate inlets [J]. Urban Water Journal, 2023, 20(5): 564-574.
- [15] HAO Xiaoli, MU Jie, SHI Hongjian. Experimental study on the inlet discharge capacity under different clogging conditions[J]. Water, 2021, 13(6): 826.
- [16] DONG Boliang, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Experimental and numerical model studies on flash flood inundation processes over a typical urban street [J]. Advances in Water Resources, 2021, 147: 103824.
- [17] 段园煜, 郭帅, 王秋萍, 等. 道路雨水口泄流效率关键影响因素研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 7-12. (DUAN Yuanyu, GUO Shuai, WANG Qiuping, et al. Study on key influencing factors of drainage efficiency of street inlets[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 7-12. (in Chinese))
- [18] 宋弘飞. 考虑雨水径流路径的市政道路雨水口设计研究[J]. 现代交通技术, 2022, 19(5): 17-21. (SONG Hongfei. Study on the design of municipal road rainwater inlet considering rainwater runoff path [J]. Modern Transportation Technology, 2022, 19(5): 17-21. (in Chinese))
- [19] 张迪, 侯精明, 宁利中, 等. 道路雨水口布设方案对泄流能力影响的模拟研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(9): 97-102. (ZHANG Di, HOU Jingming, NING Lizhong, et al. Simulation of effect of road rainwater inlet layout scheme on drainage capacity [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(9): 97-102. (in Chinese))
- [20] 王纪军. 关于城镇道路雨水口布置间距、数量设计计算的探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2019(11): 81-85. (WANG Jijun. Discussion on layout distance, quantity and design calculation of rainwater inlet in town road [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(11): 81-85. (in Chinese))
- [21] 郭磊, 刘森彦, 刘雷斌, 等. 城市道路雨水口设置研究[J]. 给水排水, 2017, 53(5): 44-47. (GUO Lei, LIU Senyan, LIU Leibin, et al. Study on the setting of urban road gullies[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(5): 44-47. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 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.
- [24] 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))
- [25] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))
- [26] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 87-94. (in Chinese))
- [27] JANG J H, CHANG T H, CHEN W B. Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 168-180.
- [28] 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))
- [29] HUNTER N M, BATES P D, NEELZ S, et al. Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2008, 161(1): 13-30.
- [30] LIANG Dongfang, FALCONER R A, LIN Binliang. Coupling surface and subsurface flows in a depth averaged flood wave model [J]. Journal of Hydrology, 2007, 337(1-2): 147-158.
- [31] 王小杰, 夏军强, 董柏良, 等. 基于汇水区分级划分的城市洪涝模拟[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 196-207. (WANG Xiaojie, XIA Junqiang, DONG Boliang, et al. Simulation of urban flood using the SWMM with the hierarchical catchment partition method [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 196-207. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-06-24 编辑: 王芳)