

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 23. 023

超标降雨下城市复杂微地形精细化水力模型的构建

孙卓^{1,2}, 邵知宇^{1,2}, 詹子逸^{1,2}, 陈磊^{1,2}, 何强^{1,2}

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045)

摘要: 超标降雨是指降雨强度和总量超出城市现有雨水系统排放能力的降雨。在超标降雨情景下,大量雨水溢流至地表,导致城市下穿道、道路低洼路段等微地形区域积水,威胁城市安全运行。由于汇流路径复杂、流量叠加以及系统边界条件的动态变化,立交下穿道和低洼路段等在超标降雨下的精确模拟难度增加,进而影响内涝风险的预判和预警。为此,以城市立交下穿道和低洼路段这两类常见微地形为研究对象,解析了超标降雨下精细化水力模型的构建要素与概化方法,探讨了基于雨洪管理模型(SWMM)的双排水系统和蓄水设施等应对策略。通过对历史降雨事件的复刻验证,检验了所提出的精细化内涝模型构建方法,并深入分析了致涝原因。该精细化内涝模型构建技术耦合了多种关键水力要素,实现了城市复杂微地形在超标降雨下集水、积水、蓄水与排水的全过程动态模拟,能够精准识别雨水口排水瓶颈、顶托及泵站异常等细节对内涝的影响,可为制定内涝改造方案及高精度内涝风险预警提供重要依据。

关键词: 城市排水; 洪涝模型; 雨洪管理模型(SWMM); 超标降雨; 微地形

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)23-0156-07

Development of Refined Hydraulic Model for Urban Complex Micro-topographies under Extreme Rainfall Conditions

SUN Zhuo^{1,2}, SHAO Zhi-yu^{1,2}, ZHAN Zi-yi^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, HE Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Extreme rainfall refers to precipitation events where both the intensity and total amount exceed the drainage capacity of the existing urban rainwater system. Under such conditions, a significant volume of rainwater overflows onto the surface, leading to waterlogging in micro-topographic depressions such as urban underpasses and low-lying roads, thereby posing a risk to the safe and efficient operation of urban infrastructure. Due to the complexity of confluence patterns, the superposition of flow rates, and dynamic variations in system boundary conditions, accurate simulation of underpasses and low-lying roads during excessive rainfall events becomes increasingly challenging, thereby impacting the prediction and early warning capabilities for urban flooding risks. This study selected two common micro-topographies, namely urban underpasses and low-lying roads, to examine the construction components and

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3800502); 重庆市重点研发计划项目(CSTB2023TIAD-KPX0079)

通信作者: 邵知宇 E-mail: shaozhiyu@cqu.edu.cn

generalization approaches for developing refined hydraulic models under conditions of extreme rainfall. Furthermore, adaptive strategies, including dual drainage systems and water storage facilities, were evaluated using storm water management model (SWMM). The proposed method for constructing a refined urban flooding model was evaluated through the replication and validation of historical rainfall events, enabling a comprehensive analysis of the underlying causes of urban flooding. This refined flood modeling framework integrated multiple critical hydraulic components, enabling a dynamic simulation of the complete urban stormwater cycle including runoff generation, accumulation, storage, and drainage within complex micro-topographical environments under extreme rainfall conditions. The model accurately captures the influence of localized features such as drainage inlet bottlenecks, backwater flooding, and malfunctioning pumping stations on urban flooding, thereby providing a robust foundation for developing targeted flood mitigation strategies and high-precision flood risk early warning systems.

Key words: urban drainage; flood model; storm water management model (SWMM); extreme rainfall; micro-topography

近年来,气候变化和城市化进程叠加影响导致城市超标降雨频发^[1]。超标降雨是指降雨强度和总量超出城市现有雨水系统排放能力的降雨,具有致灾速度快、空间局部性显著的特点。在超标降雨情景下,大量雨水溢流至地表,并在城市下穿道、道路低洼地带等区域汇集,形成内涝重灾区^[2]。特别是立交下穿道,由于地势低、坡度大,极易在短时间内积水成灾,影响交通和居民生活,严重威胁城市安全^[3]。因此,有必要对超标降雨下城市下穿立交、道路低洼地带等敏感区域的洪涝风险进行精准预测,并及时发出预警及实施交通管制措施,以减少内涝灾害带来的人员伤亡和财产损失。

现有研究在应用雨洪管理模型(SWMM)模拟立交排水状况和积水变化方面取得了一定进展,但针对超标降雨下立交排水系统与地表道路排水、泵站作用的综合考虑尚不充分^[4-6]。在超标降雨情景下,由于汇流路径复杂、流量叠加和系统边界条件变动,下穿道和道路低洼点的精确模拟变得困难。超标降雨时,大量雨水通过地表行泄通道与地下管网耦合,形成联合排涝系统,压力流与重力流并存。此外,微地形区域的内涝成因复杂,涉及地形、管网、泵站等多方面因素。因此,笔者以城市复杂下穿道和道路低洼路段两类微地形为研究对象,分析了超标降雨下精细化水力模型的特征,并探讨了基于SWMM模型的双排水系统和蓄水节点等模拟策略。本研究构建的精细化内涝模型耦合了多种水力要素,实现了城市复杂立交及道路低洼地带在超

标降雨下集水、积水、蓄水、排水的全过程动态模拟,能够精准识别雨水口排水能力、洪水顶托及泵站异常等细节对内涝的影响,可为制定内涝改造方案和高精度内涝风险预警提供重要依据,具有重要的防灾减灾指导意义。

1 模型概化原理与研究方法

1.1 SWMM动力波算法

为了精确模拟城市内涝情景下的压力流、地表溢流及下游顶托等复杂水力工况,SWMM模型采用动力波算法进行水力汇流演算。该算法求解完整的圣维南方程,能够精确处理非稳态过程,并识别水流流态变化。在模拟城市复杂排水系统工况时,动力波算法具有显著优势^[7]。

1.2 模型概化要点

在城市易涝点精细化模型的构建中,实际的雨水排放系统包含大量检查井、雨水口及管道,导致模型构建过程烦琐且计算负荷较重。如果对所有管道全面建模,不仅工作量庞大,且数据难以完整收集。因此,在节点精细化模型构建时,对排水系统进行适当的概化成为关键步骤。合理筛选建模元素有助于平衡SWMM模型的计算精度与构建效率。通过识别核心建模单元,可以简化模型结构,提高构建速度及计算效率,同时保证计算精度。这一过程在城市尺度的内涝风险预警中尤为重要。

模型边界界定:根据易涝点的具体位置及管网地形资料,确定积水点检查井的位置,优先选择能反映主要道路流向的干管。通过CAD数据和现场

勘察,追踪管道的上、下游起始点或分界点,并结合地形、汇水状况及雨水口汇流能力,明确模型的上游和下游边界。

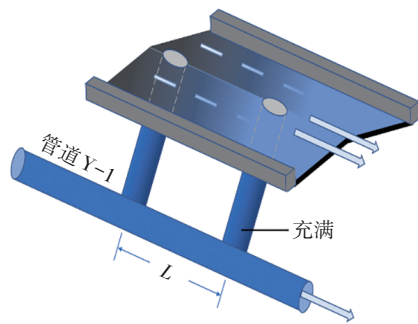
建模元素筛选:在保证模型准确性的基础上,尽量简化管道网络中的节点和管段数量。初步判定积水点附近具备蓄水或排放功能的区域,并对其功能进行针对性概化。对于影响较小的区域,仅保留关键节点,如管径变化处、转弯处及多管道连接处,同时在地势低洼处保留模型节点。直径 <400 mm且未连接积水节点的管道通常被省略,以简化模型。

汇水区域概化:根据地形特征和排水管网的拓扑关系,确定检查井节点的汇水区域。对于管径较大的易涝点,其上游汇水区域可概化为一个子汇水区,仅在该区域内构建降雨-径流水文模型,以获取流量过程线。针对超标降雨的模拟,还应考虑地表汇流路径变化导致的流域汇流边界调整。

1.3 道路与管道联合排涝模拟技术

在超标降雨事件中,城市道路的连通性可能导致雨水汇流路径发生改变。在洪涝模型中考虑这些路径的变化,有助于还原因管道堵塞或排水系统超负荷等问题导致的水流汇流变化。

传统排水系统设计通常使用明渠流公式计算道路的排水能力,但该方法未能充分考虑道路表面作为地表排水通道与地下管网系统之间的动态流量交换过程,也无法反映雨水管道在降雨期间的排放动态。在超标降雨情况下,市政管道常处于承压满流状态,管道流态从重力流转变为压力流,排放能力急剧增加,能够接纳更多道路上的涝水。然而,当出现下游顶托现象时,管道排放能力又急剧下降,导致涝水溢流至地面。为更全面地反映这一动态排放过程,可在实际模拟中采用“道路大排水+管道”双排水模型^[7]。该模型将道路和管道整合为一个垂直连通的水力耦合排涝系统,确保管道排放与道路溢流排放同步计算,实现了质量守恒和能量守恒。双排水模型的原理如图1(a)所示。在SWMM模型中,创建管道对象为“街道”以模拟道路作为行泄通道的功能,雨水管道根据设计资料配置在下层,道路断面形状和尺寸可在横断面编辑器中按照设定进行设置,具体如图1(b)所示。道路与管道通过检查井连接,实现流量交换。



a. 双排水模型原理

Required		Optional	
Road Width (Tcrown)	7 m	Gutter Depression (a)	0 m
Curb Height (Hcurb)	0.15 m	Gutter Width (W)	0 m
Cross Slope (Sx)	2 %	Backing Width (Tback)	7 m
Road Roughness	0.016	Backing Slope (Sback)	2 %
☐ One Sided ☒ Two Sided		Backing Roughness	0

b. 道路大排水参数设置

图1 道路-管道双排水模型参数设置

Fig.1 Setting of road-pipe dual drainage model

1.4 低洼地形积水模拟技术

一些城市因局部地形高差大而地势起伏显著,许多区域存在低洼地形。在超标降雨事件中,这些低洼区域常发生严重的局部积水现象,周边地形形成类似天然蓄水设施的结构,出水口为雨水口或下游管道。当雨水口的排水能力不足,或排水量超过系统向下游的输水能力时,溢出的水量会暂时储存在雨水口上方的道路,待系统输水能力恢复后,这些水会重新回流进入管道系统。

针对这种情况,采取了相应策略以提高模拟精度。首先,在SWMM模型中,对雨水口的类型和参数进行精确设定,以准确反映其泄水能力,这一步骤对于模拟城市排水系统中雨水口的流量动态至关重要;其次,将易涝点的局部积水地形概化为蓄

水池,这能够模拟在节点处水面高度超过路面时积水演进的过程。主要步骤包括:

① 雨水口设置:创建雨水口设计对象,并将特定的雨水口设计放入选定的街渠中,为其分配一个接收捕获流量的排水管道节点,结合实际地形指定雨水口放在坡面或低洼位置,能够更加准确地模拟雨水口的流量捕获情况。考虑到雨水口常见的堵塞情况,在模型中设置堵塞百分比参数,以反映每个雨水口的实际堵塞程度。通过设置这一参数,能够模拟雨水口在不同堵塞情况下的排水效能。

② 低洼点概化:利用地形数据(如数字高程模型 DEM)识别模型中的低洼点,并在 SWMM 中将这些点概化为蓄水设施。这些区域因地势较低,易于在大雨时形成积水点。根据低洼地区的面积、形状及与周边地形的相对高度,确定蓄水设施的特征曲线,包括水深-面积曲线和水深-流量曲线。

③ 出水口设置:根据蓄水设施与下游排水系统(如雨水管网、河流或其他排水通道)之间的水力连接模式,选择适当的出水口形式,如孔口、管道或泵。如果出水口设计较为复杂,例如雨水塘中常见的多级出水口^[8],则可以采用出水口设置出流曲线的方式,并单独计算蓄水设施的水深-流量曲线。

2 精细化水力模型构建方法应用及效果

2.1 区域概况

选择某城市的复杂下穿立交和低洼道路这两类常见的城市微地形作为研究区域,构建精细化模型,并对模拟结果进行内涝成因分析。

两个微地形案例分别位于该城市某下穿立交匝道和城市干道路段,均是历史易涝点。研究区域建模所需的基础管网数据主要包括排水管道和排水节点,由主管部门提供。管线的属性信息涵盖名称、长度、起始节点和终止节点的名称;节点的属性信息包括名称、坐标及高程。土地利用数据源于高德卫星地图和谷歌地图的高精度图像,用于设置汇水区的不透水面积比例。地形图则由主管部门提供的点高程数据支持。子汇水区的面积、坡度、宽度等参数直接从实际地形图和管网图中获得。其他模型参数,如入渗参数、不透水区和透水区的洼地蓄水深度、粗糙系数等,尽管对流量峰值及积水深度计算的影响较小,仍根据手册推荐值进行设置。

由于易涝点具有历史积水记录,本研究选用实

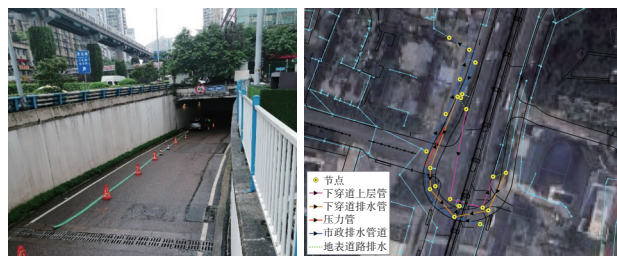
测降雨数据来运行模型,利用同步监测的积水深度和持续时间对模型的水文、水力参数进行率定。根据气象局提供的 2023 年 7 月 21 日和 25 日以及 9 月 11 日的《雨情通报》,将 3 场历史降雨事件的数据用于模型的率定与验证。降雨雨型依据地方设计标准确定,同时,历史积水数据来自区县管理部门整理的内涝台账记录表及积水现场图片,进一步支持模型的准确性验证。

2.2 复杂下穿立交的水力模型

2.2.1 模型构建

该城市复杂下穿立交的易涝点具有典型的三层排水结构,历史最大积水深度约为 300 cm。通过解析排水管网的拓扑结构可知,该立交的排水系统分为上、中、下三层,分别负责排放下穿道上层地表客水、中层市政系统排水以及下穿道下层内部道路雨水。立交内部的雨水通过泵抽排方式排放,在下穿道底部设置有集水池,收集下穿道两侧坡道的雨水,再由提升泵将雨水排入下游市政管网。

根据排水管网的拓扑结构、实际调研资料、研究区域的地形和雨水口位置,最终将汇水区域划分为 10 个子区域。概化后的管网系统(如图 2 所示)包含 20 根管道,其中包括 1 根压力管道。利用 SWMM 模型,将上、中、下三层排水系统在节点处耦合,并在易涝点处设置蓄水池,模拟下穿道的积水过程。蓄水池的最大水深依据立交的结构设为 5.5 m。在 SWMM 模型中加入泵站作为管线要素,并设置泵站的工况曲线(如图 3 所示)。这种模型构建方法能够动态模拟立交的集水、积水、蓄水和排水全过程,考虑了洪水顶托及泵站运行等动态因素对内涝积水的影响,涵盖了超标降雨下地表汇流区域及路径变化引发的峰值增加、管网承压、压力流与重力流转化等复杂水力现象。



a. 下穿立交实景图

b. 排水系统拓扑结构解析

图2 立交下穿道的水力模型概化

Fig.2 Generalization of hydraulic model for underpass

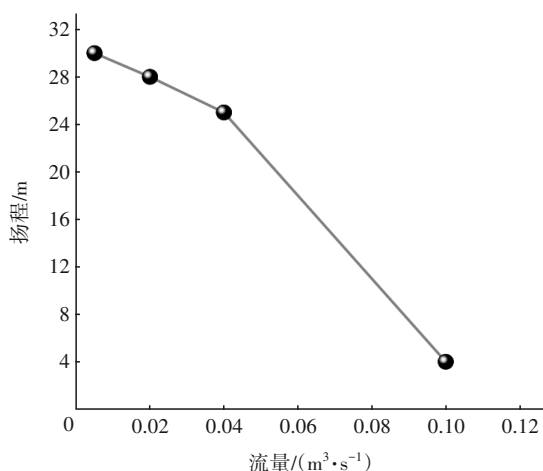


图3 立交下穿道的提升泵站性能曲线设置

Fig.3 Performance curve setting of lift pump station for underpass

表1 立交下穿道水力模型的率定及验证结果

Tab.1 Calibration and verification results of hydraulic model for underpass

项目	降雨场次	历史积水深度/m	模拟积水深度/m	历史积水时长/min	模拟积水时长/min
率定	2023-07-21	3.00	2.80	240	220
验证	2023-07-25	0.40	0.40	60	80
	2023-09-11	0.30	0.35	60	55

2.2.3 内涝成因解析

根据模型结果及历史资料分析,该易涝点的内涝原因主要有两个方面:

① 泵站运行维护。雨水泵站是排除下穿立交积水的关键设施^[9]。在模型模拟中基于节点的水位、流量或其他条件来开启/关闭泵站,或者通过调整泵站的运行状态来实现。在本研究中,泵站未运行状态下的模拟结果接近实际情况。暴雨期间泵站集水井被泥沙和垃圾等严重堵塞,可能导致泵不能正常启动和运转,进而造成地面积水严重。

② 外来客水接入。通过对排水管网的细致解析,在模拟过程中采用了“道路大排水”的方法,将部分市政雨水引入下穿立交排水系统。模拟结果与实际内涝情况高度吻合。考虑到立交周边的道路和广场地势相对较高,分析得出,在暴雨期间,外部市政雨水很可能顺着道路表面流入下穿立交的排水系统。这一现象不仅扩大了下层管网的汇水区域,而且增加了内涝风险。

2.3 城市低洼道路的水力模型

2.3.1 模型构建

某城市干道路段存在地势低洼问题,强降水时道路纵向凹点易发生内涝。基于排水系统和地形

2.2.2 模型率定及验证

通过收集和分析历史暴雨数据,利用2023年7月21日的降雨事件对模型进行率定。SWMM参数敏感性分析表明,径流峰值对汇水区不透水面积比例、汇水区宽度及坡度的敏感性最大。因此,在调试水文水力参数时需重点关注这3个参数的精确性。

表1展示了水力模型模拟的积水点积水深度和持续时间与历史观测数据的对比情况。结果表明,模型率定及验证的连续性方程误差均小于5%,符合《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》(T/CECS 647—2019)对模型率定精度的要求,即模拟值与实测值的峰值偏差不得超过25%。综上所述,该模型能够较好地反映立交下穿道的实际内涝积水及溢流状况,模型构建合理。

因素,将易涝点概化为蓄水设施,重点对道路干管及支路末端接入干管的约200 m管段进行建模,具体见图4,管网概化为37根管道、4个子汇水区。

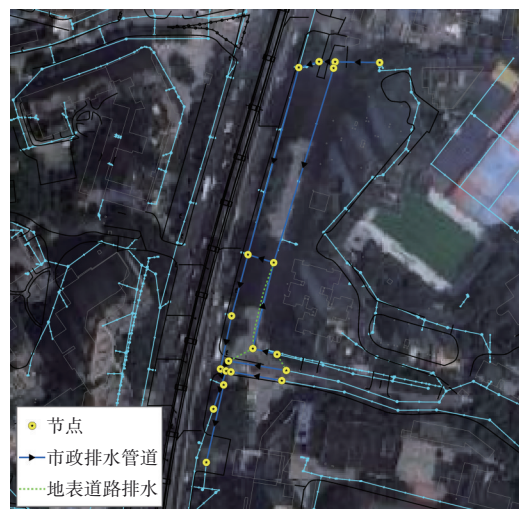


图4 低洼路段水力模型概化

Fig.4 Generalization of hydraulic model for low-lying road

依据积水记录和实地测量数据,确定了蓄水设施的特征曲线。模型设计考虑了常规和极端降雨的需求,包括模拟洪水溢流沿道路排放的情况。由于道路具有坡度,暴雨期间可以有效引导未进入地

下管道的地表径流及检查井溢出的水沿路面流动,使道路在洪涝管理中充当“非设计洪涝通道”的角色。因此,在节点间设置了道路双排水模型,更加真实地反映了超标降雨时地表和地下雨水径流的汇集路径。

2.3.2 模型率定及验证

通过收集和分析历史暴雨数据,利用2023年7月21日的降雨事件对模型进行率定。将水力模型模拟的易涝点积水深度和积水时长与实际观测的

历史积水数据进行对比,以检验模拟值与实测值的吻合程度。进一步使用2023年7月25日和9月11日的降雨数据及内涝结果对模型进行验证,率定及验证结果如表2所示。可以看出,在7月25日和9月11日的内涝事件中,模型系统的连续性方程误差均小于5%,模拟结果能够较好地反映实际内涝积水和溢流状况。验证结果符合《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》(T/CECS 647—2019)对模型验证的误差要求。

表2 低洼路段水力模型的率定及验证结果

Tab.2 Calibration and verification results of hydraulic model for low-lying road

项目	降雨场次	历史积水深度/m	模拟积水深度/m	历史积水时长/min	模拟积水时长/min
率定	2023-07-21	0.40	0.58	192	165
验证	2023-07-25	0.40	0.50	240	220
	2023-09-11	0.30	0.35	72	70

2.3.3 内涝成因解析

根据模型结果及历史资料考证,该易涝点的内涝原因主要来自3个方面:

① 陡坡接缓坡地形。该易涝点上游是典型山地城市地形,道路坡度较陡。通过设置雨水口参数,增加道路设置作为行泄通道,观察和分析积水动态变化,发现由于上游区域的道路坡度较大,地表径流速度加快,而上游陡坡道路上的雨水口由于收水效率有限,无法有效应对快速汇集的径流量,使得雨水径流会汇集到下游的低洼区域,超出了下游雨水口的设计收水能力,从而引发短时内涝积水问题。

② 雨水口堵塞。通过在模型中对雨水口的堵塞百分比进行设置,可以得到研究区域范围内各个雨水口的出流曲线,通过对比分析出流曲线发现,由于雨水口堵塞,局部排水受限,发生溢流现象。这可能是由于上游地形坡度较大,而易涝点处地形相对平缓,降雨时泥沙和垃圾等容易在雨水口堆积,形成堵塞,进而加剧了局部排水不畅和积水问题。

③ 下游顶托。通过调整模型的边界条件,可以模拟下游边界作为自由出口或水位控制出口的情况。在该研究区域,下游市政管道坡度较小,排放能力有限,可能导致下游顶托现象,进一步限制了排水能力,增加了内涝风险。

3 结论

针对城市中不同复杂微地形的暴雨内涝问题,

采用双排水和概化蓄水池的方法,分别对立交下穿道和山地低洼道路两种易涝点微地形构建了SWMM精细化水力模型。模拟结果与内涝发生时观察到的实际情况较为吻合,验证了模型构建方法的精确性,为多情景、多角度分析内涝成因提供了有效的模型工具。具体如下:

① 考虑了道路的地表排水功能。在超标降雨情景下,需重视道路的排涝作用。传统SWMM水力模拟中设置的单排水系统无法有效分析超负荷排水导致的雨水地表漫流问题。因此,采用“道路大排水+管道”的双排水模型构建模式,可以模拟地表径流路径改变的水文效应,并准确反映地下管网与地表系统之间的连通关系。

② 构建了精细化的城市复杂立交排水模型。针对城市立交的下穿道,将复杂的多层排水系统模型解析为上、中、下三层,并在节点处进行耦合。下穿道被概化为蓄水节点,同时结合道路大排水,以反映极端降雨情景下汇流面积改变的情况,从而显著提升模型模拟的精确性。

③ 构建了城市道路低洼区域水力模型。对于城市的低洼区域,通过识别低洼点和溢流点的位置,并将这些点在SWMM中概化为蓄水设施,简化了模型计算,保证了精度的同时实现了高效性。

基于SWMM模型的易涝点积水模拟能够有效动态评估雨水管网和水泵的运行工况,较准确地预测积水深度和积水时长。这一方法有助于分析内涝成因,为后续城市道路内涝风险指标体系的建立

提供重要支持。

参考文献:

- [1] KOTZ M, LEVERMANN A, WENZ L. The effect of rainfall changes on economic production [J]. *Nature*, 2022, 601: 223-227.
- [2] 陈文龙, 夏军. 广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J]. *中国水利*, 2020(13): 4-7.
CHEN Wenlong, XIA Jun. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd, May, Guangzhou [J]. *China Water Resources*, 2020 (13): 4-7 (in Chinese).
- [3] 张辰, 吕永鹏, 邹伟国, 等. 下穿式立体交叉道路排水防涝设计的若干思考[J]. *城市道桥与防洪*, 2014 (11): 5-7.
ZHANG Chen, LÜ Yongpeng, ZOU Weiguo, *et al.* Some thoughts to design of drainage and waterlogging prevention for underpassing interchanges [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2014 (11): 5-7 (in Chinese).
- [4] 王兆斌, 王彬, 吕梅, 等. 利用双排水系统理论对城市下穿隧道进行雨水内涝模拟分析[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(4): 127-130.
WANG Zhaobin, WANG Bin, LÜ Mei, *et al.* Dual-drainage system theory-based simulation analysis on rainfall-waterlogging from urban underpass tunnel [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2016, 47(4): 127-130 (in Chinese).
- [5] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博, 等. 城市立交桥暴雨积水数值模拟[J]. *城市道桥与防洪*, 2006(2): 52-55.
CONG Xiangyu, NI Guangheng, HUI Shibo, *et al.* Simulation of storm waterlogging value of urban interchange bridges [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2006(2): 52-55 (in Chinese).
- [6] 张尚义, 李霜, 邵知宇, 等. 基于SWMM的下穿式立交排水防涝设计研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33 (19): 120-124.
ZHANG Shangyi, LI Shuang, SHAO Zhiyu, *et al.* Numerical simulation of local flooding under overpass drainage using dynamic hydraulic models based on SWMM [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (19): 120-124 (in Chinese).
- [7] 徐雷, 吴正松, 邵知宇, 等. 基于SWMM耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 114-120.
XU Lei, WU Zhengsong, SHAO Zhiyu, *et al.* Design method and application of roadway drainage path based on coupled hydraulic SWMM model [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 114-120 (in Chinese).
- [8] 邵知宇, 郑卓乐, 李霜, 等. 多功能雨水塘水位-流量曲线的构建及水力学原理[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 128-132.
SHAO Zhiyu, ZHENG Zhuole, LI Shuang, *et al.* Hydraulic computation of stage-discharge curves for multi-stage outlets used in stormwater retention basin [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(9): 128-132 (in Chinese).
- [9] 葛学伟, 邓卫东, 王宁. 新建下凹桥区雨水调蓄泵站的优化设计[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(14): 91-95.
GE Xuewei, DENG Weidong, WANG Ning. Optimal design of stormwater regulation and storage pumping station in newly-built concave bridge area [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39 (14): 91-95 (in Chinese).

作者简介: 孙卓(2001-), 女, 安徽桐城人, 硕士研究生, 从事城市排水防涝模型研究。

E-mail: sunzhuo0312@163.com

收稿日期: 2024-10-09

修回日期: 2024-11-23

(编辑: 刘贵春)