

城市暴雨洪涝全过程模拟及其在洪涝风险评估中的应用

臧文斌, 刘 妍, 张红萍, 肖程之, 徐 珊, 李 敏, 郝晓丽

(中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心)

摘要:针对城市地表排水过程复杂、排水管网资料难以全面获取的问题,基于雨水算/检查井/排水口的“地表积水↔管网↔河网”物理机制排水、雨水算/检查井汇水区的“地表积水→管网”概化排水和排水口汇水区的“地表积水→河道”概化排水 3 种地表排水模拟方法,构建了深圳市沙湾河流域暴雨洪涝全过程精细化模型,并利用设计资料和 2023 年“9·7”特大暴雨资料对模型进行了合理性分析与验证。结果表明:丹竹水文站水位模拟结果的绝对误差为 0.37 m,相对误差为 6%,模型具有较好的适用性;随着降雨重现期增大,沙湾河流域淹没面积不断增加,淹没水深不断增大,积水主要分布在流域的北部、东部和东南部,管段满管数量和节点溢流数量呈增加趋势,且趋于集中分布;当降雨重现期小于 20 a 时,河道行洪压力较小,最高水位明显低于堤顶高程,当降雨重现期大于 50 a 时,河道水位较高,河道行洪压力较大。

关键词:城市暴雨洪涝;城市地表排水;全过程模拟;洪涝风险评估;沙湾河流域;深圳市

Whole process simulation of urban rainstorm and flood and its application in flood risk assessment//Zang Wenbin, Liu Yan, Zhang Hongping, Xiao Chengzhi, Xu Shan, Li Min, Hao Xiaoli(*Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research*)

Abstract: In response to the complex process of urban surface drainage and the difficulty in obtaining comprehensive data on drainage networks, a refined model of the whole process of rainstorm and flood in the Shenzhen Shawan River Basin of Shenzhen City was built based on three simulation methods, including physical mechanism-based drainage “surface water ↔ drainage network ↔ river channel” using inlets/inspection wells/drainage outfalls, simplified drainage “surface water → drainage network” based on catchment areas of inlets/inspection wells, simplified drainage “surface water → river channel” based on catchment areas of drainage outfalls. The rationality of the model was analyzed and verified by using the design data and the “9·7” extremely heavy rainstorm data in 2023. The results show that the absolute error of the water level simulation result at Danzhu Hydrological Station is 0.37 m, and the relative error is 6%, indicating that the model has good applicability. As the rainfall return period increases, the submerged area and depth of the Shawan River Basin continue to increase, and the accumulated water is mainly distributed in the northern, eastern, and southeastern parts of the basin. The number of full pipes in the pipeline section and the number of overflow nodes show an increasing trend and tend to be concentrated in distribution. When the rainfall return period is less than 20 a, the flood pressure in the river channel is relatively low, and the highest water level is significantly lower than the elevation of the embankment top. When the rainfall return period is greater than 50 a, the water level in the river channel is higher, and the flood pressure in the river channel is greater.

Key words: urban rainstorm and flood; urban surface drainage; whole process simulation; flood risk assessment; the Shawan River Basin; Shenzhen City

在全球气候变化和快速城市化共同作用下,极端天气事件频繁发生^[1-2],暴雨洪涝灾害呈现趋多、趋频、趋强、趋广的态势^[3-5]。近年来,国内外多座城市相继发生了多起历史罕见的暴雨洪涝灾害。国内

影响较大暴雨洪涝事件如北京“2021.7.21”“2016.7.20”“2023.7.31”暴雨^[6-8]、广州“2020.5.22”暴雨^[9]、郑州“2021.7.20”暴雨、2023 年香港、深圳“9·7”暴雨^[10]等;国外较为典型的暴雨洪涝事件如

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3008502)
作者简介:臧文斌(1986—),男,正高级工程师,博士,主要从事城市洪涝模拟及智慧水利研究。E-mail:zangwb@iwhr.com
通信作者:张红萍(1976—),女,正高级工程师,博士,主要从事城市洪涝模拟及洪水风险分析研究。E-mail:hpzhang@iwhr.com

美国纽约的“2021. 9. 3”“2023. 9. 29”暴雨、利比亚德尔纳“2023. 9. 10”特大洪水^[11]等。极端暴雨洪涝灾害往往带来重大经济损失,严重威胁人们生命安全^[12-13]。可见,提前掌握城市暴雨洪涝风险,科学指导防灾减灾工作,对城市防洪减灾具有重要意义。

国内外专家学者围绕城市暴雨内涝风险评估进行了深入研究,根据其原理分为水文学方法、水动力学方法和水文水动力耦合方法^[14-17]。水动力学方法在水流运动规律的精细化模拟方面具有显著优势。水文水动力耦合方法兼顾了水文学方法、水动力学方法的优点,评估结果更准确、适用性更广,近年来被广泛采用。从基本机理、数值离散方法、高性能计算、模型敏感性、模型适用性等方面,国内外学者对城市洪涝数值模拟开展了研究,常用暴雨洪水模型包括 SWMM、MIKE、InfoWorks ICM、IFMS 等^[18]。例如,曾照洋等^[19]基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 的水文水动力耦合模型,模拟了东莞市典型区域暴雨内涝情况。廖如婷等^[20]基于 SWMM 和 InfoWorks ICM-2D 耦合模型分析了北京市大红门区不同重现期降雨下管网排水能力以及地表淹没情况。帅伟等^[21]基于 MIKE 平台搭建了一二维耦合水动力暴雨洪涝模型,模拟了不同暴雨设计频率下渚淶江流域的洪水淹没面积及淹没水深。整体而言,上述城市暴雨洪涝模型的计算原理差别不大,但由于城市暴雨洪涝过程和数据资料条件复杂,在确定模型构建范围、产汇流模拟、构筑物概化、工程调度模拟方式等方面存在较大差异。并且,上述城市洪涝模型多基于现有数据条件采用物理机制或者概化模式模拟城市雨洪排水过程,未考虑数据资料复杂条件下的精细模拟,尤其是没有考虑社区内部管网资料难以获取、市政雨水排水设施资料的缺失、断头管等复杂情况,导致模型模拟效果欠佳。

鉴于此,本文以暴雨洪涝频繁发生的深圳市沙湾河流域为研究区,基于“地表积水↔管网↔河网”思想的地表排水物理机制与基于雨水算/检查井汇水区的“地表积水→管网”概化排水和排水口汇水区的“地表积水→河道”概化排水相结合的方法,构建沙湾河流域暴雨洪涝全过程精细化模型(简称“洪涝全过程模型”),评估不同降雨条件下的洪涝风险,以期在城市风险管理提供参考。

1 研究区概况与数据资料

1.1 研究区概况

沙湾河位于深圳水库上游,流经深圳市龙岗区南湾街道和平湖街道,最后经沙湾水闸汇入深圳水库,河道长 10.5 km,主要支流包括李朗河、白泥坑

河、东深供水渠、简坑河等(图 1),流域面积为 26.10 km²。此外,沙湾河下游建有沙湾截污隧洞,经污水处理厂净化后排入莲塘河(深圳河上游)。沙湾河干流末端建有沙湾泄洪闸和沙湾截排闸,沙湾泄洪闸为沙湾河与深圳水库的联通闸,沙湾截排闸为沙湾截污隧洞的入口控制工程。沙湾河流域内土地利用类型以商务政务用地、居住用地为主,如图 2 所示。

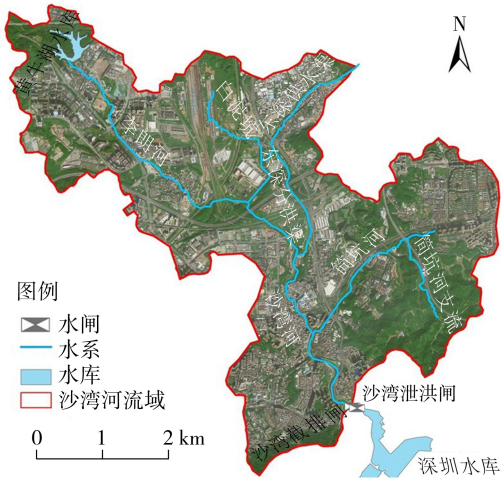


图 1 沙湾河流域水系

Fig. 1 Water system of the Shawan River Basin

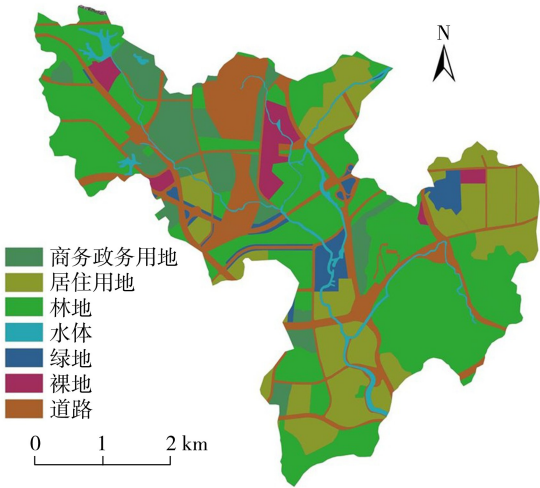


图 2 沙湾河流域土地利用类型分布

Fig. 2 Land use type distribution in the Shawan River Basin

深圳市地处我国东南沿海台风频繁登陆地区,属亚热带海洋性气候,降雨充沛相对集中,受锋面雨、台风雨影响,暴雨内涝频繁发生^[22]。近年来,较为典型如 2018 年 8 月 29—30 日的连续大暴雨,平均累计降水量为 269 mm,其中龙岗区上李朗站最大 1 h 降水量达到 97 mm,龙岗区布吉站最大 24 h 降水量达到 413 mm,造成了巨大的经济损失;2023 年 9 月 7 日受台风“海葵”残余环流、季风和弱冷空气共同影响,7 日 17 时至 8 日 06 时平均降水量 202.8 mm,全市最大累计降水量 469.0 mm,打破了

深圳市 1952 年有气象记录以来 7 项历史极值,分别为最大滑动 2 h (195.8 mm, 盐田正坑站)、3 h (246.8 mm, 盐田正坑站)、6 h (355.2 mm, 罗湖东门站)、12 h (465.5 mm, 罗湖小梧桐站)、24 h (559.6 mm, 罗湖小梧桐站)、48 h (615.4 mm, 罗湖小梧桐站)、72 h (616.4 mm, 罗湖小梧桐站) 平均降水量,受此次暴雨侵袭,深圳市多地发生内涝,街道成河,水位暴涨,公共交通停摆。

1.2 数据资料

本文构建暴雨洪涝模型所需数据资料包括流域水系、雨水排水设施、防洪工程、河道断面、地形、土地利用类型、水文气象等。其中,流域水系数据包括河流、分洪通道、流域等;雨水排水设施数据包括雨水排水管(渠)、雨水检查井、雨水算、排水口、泵站等基本信息及调度规则;防洪工程数据包括水库、水闸、堤防等基本信息及调度规则;河道断面数据包括沙湾河及其支流的河道中泓线、横断面、纵断面等;地形数据为 1 : 1 000 的高程点及 2 m 分辨率的 DEM 数据;土地利用类型为基于 0.8 m 高分二号遥感影像提取的土地利用分布数据;水文气象数据包括降雨、河道水情、地面积水、工程调度等数据。

2 研究方法

2.1 研究思路

本文基于中国水利水电科学研究院自主研发的城市洪涝水文水动力模型进行模拟,该模型由地表产汇流水文模型、地表水文水动力模型、河道一维水

动力模型、管网一维水动力模型、水工程调度模型等构成,结构如图 3 所示,模型原理详见文献[23-24]。该模型具有完全自主知识产权,实现了城市降雨产流-坡面汇流-管网汇流-河网汇流-水工程调度全过程计算,兼顾物理机制与不同概化方式模拟,同时支撑洪涝统一计算和微地形精细化模拟,已在北京^[25]、深圳^[26]、昆明^[27]、郑州^[28]等多座城市的洪涝模型构建中得到成功应用。本文在收集与处理沙湾河流域资料的基础上,综合分析流域内蓄洪、滞洪、行洪等防洪工程以及雨水排水管网、雨水泵站等排涝工程现状,构建沙湾河流域洪涝全过程模型。

2.2 城市地表排水模拟方法

a. 当雨水排水管网数据条件较好时,在复杂地形下城市地表汇流物理过程分析的基础上,采用基于物理机制的城市洪涝模型模拟城市地表排水过程^[29],包括基于精细地形的地表汇流过程、管网排水过程、河网排水过程、基于雨水算/检查井/排水口的“地面积水↔管网↔河道”物理机制耦合等,如图 4 所示。其中,管网系统通过雨水算/检查井与地面连接,实现水量交换的双向耦合。当地面积水高于雨水算相连管网水头时,地面积水通过雨水算进入管网,入流过程采用堰流或孔流方式计算;当地面积水低于雨水算相连管网水头时,管网内部水体通过雨水算/检查井溢流至地面。

b. 当雨水排水管网数据缺失较多时,采用基于雨水算/检查井汇水区(或排水口汇水区)的城市地表排水概化模式模拟方法。在雨水算/检查井汇水

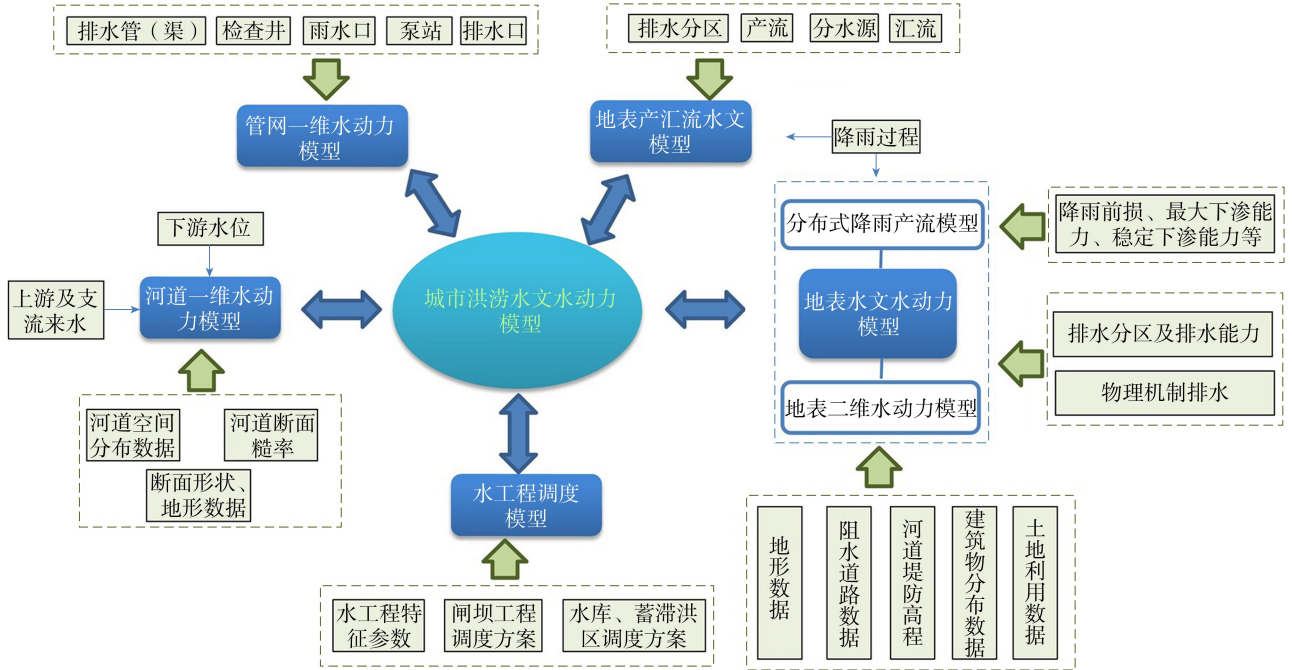


图 3 城市洪涝水文水动力模型结构

Fig.3 Structure of urban flood hydrodynamic model

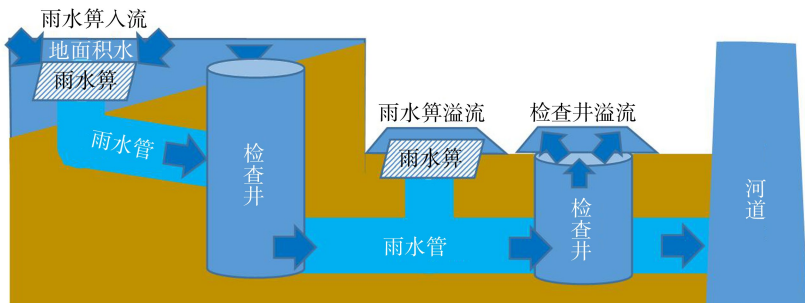


图 4 基于物理机制的城市地表排水示意图

Fig. 4 Schematic diagram of urban surface drainage based on physical mechanisms

区分^[30]的基础上,通过设置雨水算/检查井汇水区的排水能力近似模拟雨水算实际排水过程,基于雨水算/检查井汇水区的“地面积水→管网”概化模式如图 5(a)所示。在排水口汇水区划分^[30]的基础上,通过设置排水口汇水区的排水能力近似模拟该排水分区对应地表雨水排入河道过程,基于排水口汇水区的“地面积水→河道”概化模式如图 5(b)所示;根据入河方式,基于排水口汇水区的“地面积水→河道”概化模式又可分为均匀排水和单点排水两种模拟方法。

2.3 洪涝全过程模型构建

构建沙湾河流域洪涝全过程模型,包括河道一维模型构建、地表产汇流模型构建、管网一维模型构建、地表排水方法设置、水工程调度模型构建、模型耦合等。

a. 河道一维模型构建。构建沙湾河干支流河道一维模型,建模河道总长 22.35 km,有 267 个断面,结合河道下垫面信息设置河道糙率。其中,沙湾河干流建模河长 6.54 km,有 75 个断面,糙率为 0.025~0.031;白泥坑建模河长 2.66 km,有 25 个断面,糙率为 0.025;李朗河建模河长 4.35 km,有 56 个断面,糙率为 0.025;东深供水渠建模河长 4.15 km,有 61 个断面,糙率为 0.025~0.029;东深分流渠建模河长 0.3 km,有 4 个断面,糙率为

0.025;简坑河建模河长 2.8 km,有 33 个断面,糙率为 0.03~0.031;简坑河左支流建模河长 1.55 km,有 13 个断面,糙率为 0.03。

b. 地表产汇流模型构建。包括网格剖分、高程模型构建、产汇流参数设置。网格剖分针对重点关注对象(公路、铁路、桥涵等阻水导水建(构)筑物)等进行边线控制,采用非结构网格,控制网格边长 5~50 m 进行网格剖分,共剖分 335 773 个网格。高程模型构建针对阻水、导水建(构)筑物,采用特殊网格边构建线性建(构)筑物模型,借助 DEM 及高程点数据分别对网格及网格边进行赋值。采用初损与后损结合方法计算地表产汇流过程,利用土地利用类型数据对地表产汇流模型参数进行赋值,如表 1 所示。

c. 管网一维模型构建。包括针对管线和节点两种空间实体对象的模型构建。其中,管线分为排水管和排水渠,管线信息包括管线半径、长度、上下游高程等;节点分为检查井、雨水算及排水口,节点信息包括连接管段编号、耦合类型、底高程、顶高程、面积等。管线和节点的拓扑关系模型用于描述排水管网系统中各对象间的拓扑关系。构建沙湾河流域管网一维模型,包括 5401 条排水管段(总长 112.672 km)、3911 个雨水检查井、1456 个雨水算、184 个雨水排水口。

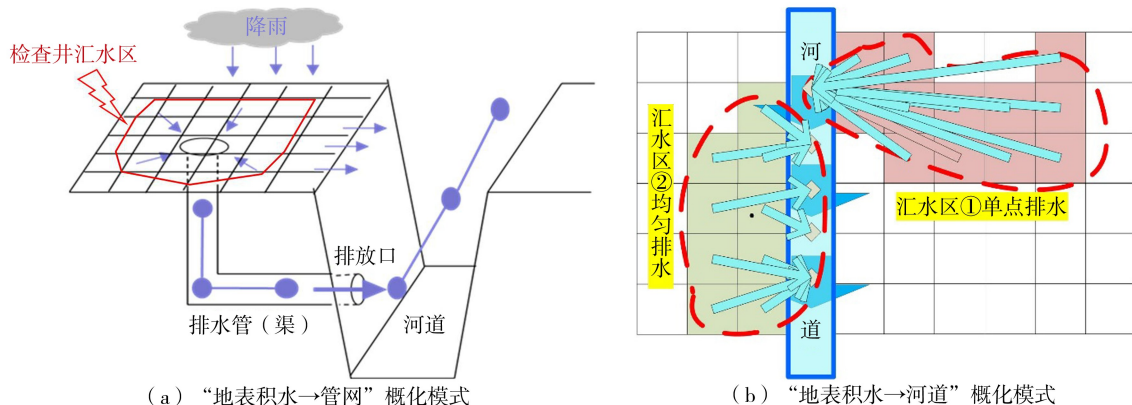


图 5 基于概化模式的城市地表排水示意图

Fig. 5 Schematic diagram of urban surface drainage based on generalization pattern

表 1 不同土地利用类型的参数值

Table 1 Reference parameter values of different land use types			
土地利用类型	前期损耗/mm	初始下渗能力/(mm/h)	稳定下渗能力/(mm/h)
裸地	3~5	20~30	10~20
绿地	8~12	10~25	10~15
林地	10~15	10~20	10~15
居住用地	4~8	5~15	5~10
商务政务用地	4~6	5~10	2~5
道路	2~4	0~2	0~2
水体	0	0	0

d. 地表排水方法设置。本文采用物理机制与概化模式相结合的地表排水模拟方法。对于管网资料条件良好区域^[29],采用“地表积水↔管网↔河道”的物理机制排水模拟方法;对于管网资料条件一般区域^[29],则采用“地表积水→管网”的概化排水模拟方法;对于管网资料条件差区域^[26],采用“地表积水→河道”的概化排水模拟方法。参照臧文斌等^[30]的研究,将研究区划分为 39 个排水分区,如图 6 所示。

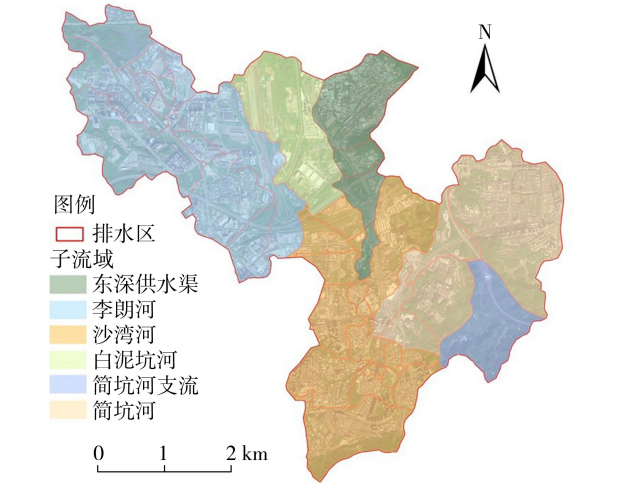


图 6 排水分区划分
Fig. 6 Drainage zoning division

e. 水工程调度模型构建。收集了深圳水库、黄牛湖水库、沙湾泄洪闸、沙湾截排闸等防洪工程的调度运行规则构建水工程调度模型。深圳水库坝址以上集雨面积为 60.5 km²,水库正常蓄水位 27.60 m (本段为珠江基面高程),相应库容为 3348.41 万 m³;设计洪水位 28.83 m,相应库容 3854.72 万 m³。调度方案为:若未来 1~2 d 内流域遭遇特大暴雨,将水库水位预泄至 26.6 m 以下;当水位低于设计洪水位 28.83 m 时,最大控泄流量为 270 m³/s;当水位超过设计洪水位时,完全开启泄水建筑物进行敞泄。黄牛湖水库位于李朗河上游,属小(二)型水库,集雨面积为 0.97 km²,汛限水位 77.0 m (本段为 1956 年黄海高程),相应正常库容 53.0 万 m³;设计洪水位 78.12 m,相应库容 65.51 万 m³。调度方案为:当水

库水位超过溢洪道进口高程即汛限水位 77 m,水库溢洪道自由溢流。沙湾泄洪闸汛期保持关闭,当闸前水位达到 29.31 m (1956 年黄海高程)时,开闸泄洪。沙湾截排闸为现状沙湾截排隧洞进口闸,汛期保持开启,最大泄洪流量 25 m³/s。

f. 模型耦合。通过建立各模型间的耦合关系构建沙湾河洪涝全过程模型,包括河道一维模型与地表产汇流模型耦合、河道一维模型与管网一维模型耦合、地表产汇流模型与管网一维模型耦合。利用河道断面与网格边关系实现河道一维模型与地表产汇流模型耦合,利用断面与排水口的连接关系实现河道一维模型与管网一维模型耦合,地表产汇流模型与管网一维模型则通过管网节点与地表网格关系进行耦合。

3 结果与分析

3.1 洪涝全过程模型的合理性分析与验证

沙湾河流域洪涝全过程模型的上边界为建模河道各节点 100 年一遇洪水过程,沙湾河干、支流共有 18 个节点来水;下边界采用深圳水库调度方案(《深圳市沙湾河流域水环境综合整治初步设计报告》(2016 年)中的起调水位,为 28.186 m (1956 年黄海高程))。表 2 为沙湾河流域洪涝全过程模型模拟结果与设计值对比,可见沙湾河干流 6 个断面的洪峰流量绝对误差均小于 3 m³/s,相对误差基本在 1% 以内,6 个断面中有 4 个断面的设计值与模拟值的最高水位绝对误差均在 0.2 m 以内。分析表明构建的沙湾河流域洪涝全过程模型模拟结果基本与设计工况吻合。

表 2 沙湾河流域洪涝全过程模型模拟结果与设计值对比
Table 2 Comparison between simulation results and design values of flood and waterlogging whole process model in the Shawan River Basin

断面	洪峰流量/(m ³ /s)			最高水位/m		
	设计值	模拟值	绝对误差	设计值	模拟值	绝对误差
水官高速公路	187.4	187.21	-0.19	37.81	38.01	0.20
丹竹头水电站上游	200.01	200.13	0.12	31.92	32.06	0.14
旭联工业城	238.57	240.11	1.54	31.6	31.94	0.34
简竹河口	264.83	267.57	2.74	30.64	30.48	-0.16
南岭桥	351.92	352.33	0.41	30.22	29.78	-0.44
沙湾水闸	385.86	388.22	2.36	29.78	29.66	-0.12

利用深圳市 2023 年“9·7”特大暴雨对沙湾河流域洪涝全过程模型进行验证。图 7 为丹竹水位站模拟水位与实测水位对比,图 8 为地表淹没水深模拟结果与积水调查结果对比。由图 7、图 8 可见,模

拟最高水位较实测水位偏低 0.37 m, 相对误差约 6%, 基于已获取的历史积水点信息, 地表积水模拟结果与积水调查信息基本吻合。可见, 沙河湾流域洪涝全过程模型有效考虑了管网排水资料缺失条件下排水影响, 对河道水情、地表积水等的模拟结果合理, 具有较高模拟精度。

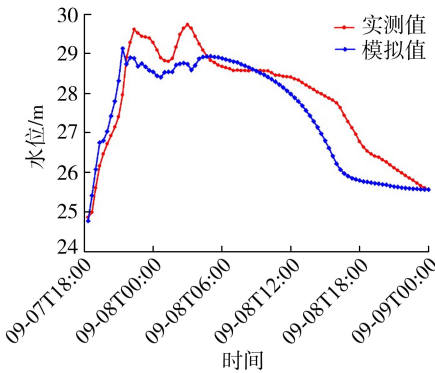


图 7 丹竹水位站模拟水位与实测水位对比
Fig. 7 Comparison of simulated and measured water levels at Danzhu Water Level Station

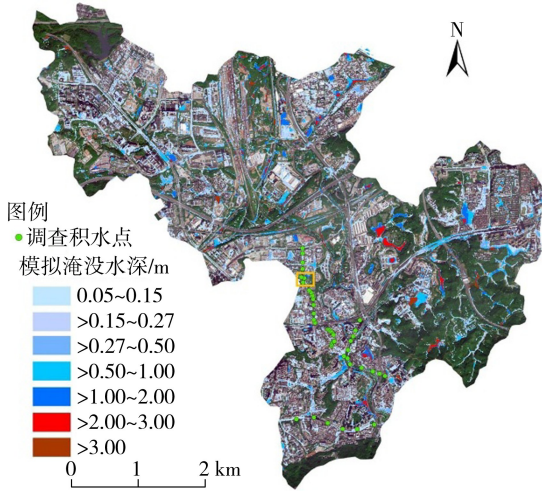


图 8 地表淹没水深模拟结果与积水调查结果对比
Fig. 8 Comparison of inundation data collection and simulation results

3.2 基于洪涝全过程模型的洪涝风险评估

3.2.1 设计降雨情景

本文采用芝加哥雨型, 按照《深圳河流域排水(雨水)防涝综合规划(2015)》中深圳河流域典型暴雨过程的最大 1、6、24 h 设计降水量成果进行同频率缩放, 得到沙河湾流域降雨重现期 P 分别为 10、20、50、100 a 的 24 h 设计暴雨过程, 如图 9 所示。

3.2.2 地表积水风险

图 10 为不同降雨重现期下淹没范围和水深的空间分布。由图 10 可见, 不同降雨重现期下淹没范围和水深较大的区域主要分布在沙河河流域北部、东部和东南部。具体而言, $P=10$ a 时, 淹没范围位于流域北部、东部少量区域; $P=20$ a 时, 淹没范围逐

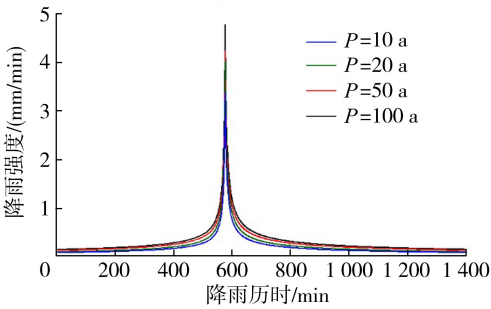


图 9 不同降雨重现期的 24 h 设计暴雨过程
Fig. 9 Design rainstorm process with 24 h duration under different rainfall return periods

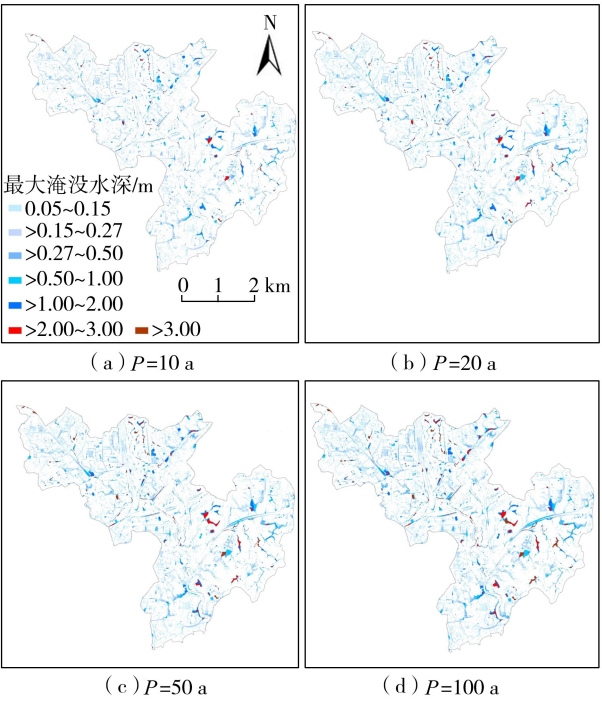


图 10 不同降雨重现期下淹没范围和水深的空间分布
Fig. 10 Spatial distribution of inundation area and water depth under different rainfall return periods

渐扩大, 东部区域积水明显增多; $P=50$ a 时, 流域整体都有不同程度的淹没; $P=100$ a 时, 淹没范围增加不明显, 但淹没水深有增加较为明显。经分析, 沙河河流域地势西北高、东南低, 中部和东南部地势较低, 且上述区域多为城市建设用地, 不透水率较高, 易形成积水。

表 3 为不同降雨重现期下各水深区间的淹没面积统计, 可见随着降雨重现期增大, 地表淹没面积和水深均呈上升趋势, 总淹没面积由 4.64 km^2 上升至 6.42 km^2 , 增长幅度为 7.1%。从各水深区间的淹没面积变化来看, 水深 0.15 m 及以下的淹没面积约占 50%; 随着降雨重现期增大, 水深 0.15 m 及以下的淹没面积占比逐渐缩小, 水深 0.15 m 及以上的淹没面积占比逐渐变大, 水深 3 m 以上的淹没面积变化最为明显, 增幅近 4 倍。

表 3 不同降雨重现期下各水深区间的淹没面积统计

Table 3 Statistics of inundation area across water depth intervals under different rainfall return periods																
P/a	淹没面积/ km^2	淹没面积占比/%	各水深区间淹没面积/ km^2							各水深区间淹没面积占比/%						
			$\leq 0.15\text{ m}$	$>0.15\sim 0.27\text{ m}$	$>0.27\sim 0.5\text{ m}$	$>0.5\sim 1\text{ m}$	$>1\sim 2\text{ m}$	$>2\sim 3\text{ m}$	$>3\text{ m}$	$\leq 0.15\text{ m}$	$>0.15\sim 0.27\text{ m}$	$>0.27\sim 0.5\text{ m}$	$>0.5\sim 1\text{ m}$	$>1\sim 2\text{ m}$	$>2\sim 3\text{ m}$	$>3\text{ m}$
10	4.64	18.6	2.60	0.85	0.48	0.35	0.27	0.08	0.03	55.9	18.2	10.3	7.6	5.8	1.6	0.6
20	5.39	21.6	2.90	1.02	0.59	0.40	0.32	0.11	0.04	53.8	18.9	10.9	7.5	6.0	2.1	0.8
50	5.85	23.5	3.05	1.12	0.66	0.46	0.34	0.15	0.07	52.0	19.1	11.3	7.9	5.8	2.6	1.3
100	6.42	25.7	3.24	1.25	0.74	0.54	0.37	0.17	0.11	50.5	19.5	11.5	8.4	5.7	2.7	1.7

3.2.3 管道排水风险

表 4 为不同降雨重现期下满管管段和溢流节点数量统计,可见管线满管数量和雨水算/检查井溢流节点数量随降雨重现期的增大而增加。降雨重现期由 10 a 增大至 100 a 时,满管管段数量由 1484 增加至 1982,增幅为 25.1%;雨水算/检查井溢流节点数量由 184 增加至 385,增幅超过 100%。

图 11 为不同降雨重现期下溢流节点的空间分布
表 4 不同降雨重现期下满管管段和溢流节点数量统计

Table 4 Statistics on number of full-flow pipes and node overflows under different rainfall return periods				
P/a	满管管段数量	满管管段占比/%	溢流节点数量	溢流节点占比/%
10	1484	27.5	184	3.3
20	1710	31.7	244	4.4
50	1855	34.3	317	5.7
100	1982	36.7	385	6.9

布。由图 11 可见, $P=10\text{ a}$ 时,雨水算/检查井溢流节点在沙湾河流域西北部零星分布,在中部区域较密集,说明流域中部发生内涝的可能性较高。 $P=100\text{ a}$ 时,流域东部、东南部溢流节点增多且分布较为密集。总体上,随着降雨重现期增大,溢流节点增多且呈现集中分布趋势。

3.2.4 河道行洪风险

图 12 为不同降雨重现期下沙湾河干流最高水位沿程分布。由图 12 可见,沙湾河干流的河道水位与降雨重现期呈正相关关系,最高水位随着降雨重现期的增大而增大。其中,降雨重现期为 10、20 a 时,河道行洪总体平稳,最高水位明显低于堤顶高程,全线未发生漫堤;当降雨重现期为 50、100 a 时,河道水位显著升高,部分河段水位接近堤顶高程,行洪压力较大,尤其在里程为 2500 m 附近河道水位高于堤顶高程,可能发生河水漫溢出槽现象。

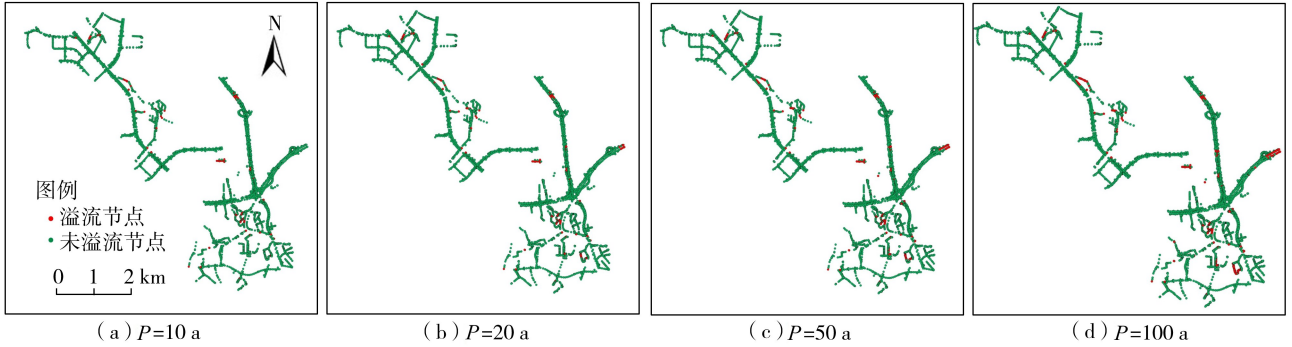


图 11 不同降雨重现期下溢流节点的空间分布

Fig. 11 Distribution of overflow nodes under different return periods

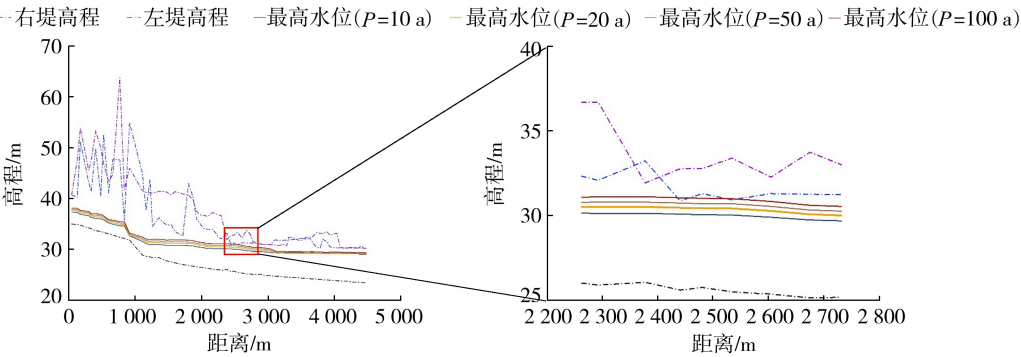


图 12 不同降雨重现期下沙湾河干流最高水位沿程分布

Fig. 12 Distribution of the highest water level along main stream of the Shawan River under different rainfall return periods

4 结 论

a. 本文以深圳市沙湾河流域为研究区,结合雨水市政排水管网资料情况,基于 3 种地表排水模拟方法构建了沙湾河流域洪涝全过程模型,利用设计资料和 2023 年“9·7”特大暴雨资料对模型合理性展开分析与验证,结果表明模型具有较高模拟精度。

b. 沙湾河流域洪涝全过程模型模拟结果表明,随着降雨重现期增大,淹没范围不断增加,淹没水深不断增大,积水主要分布在流域的北部、东部和东南部。降雨重现期由 10 a 增加至 100 a,满管管段数量由 1 484 增加至 1 982,雨水算/检查井溢流节点数量由 184 增加至 385,且趋于集中分布。

c. 沙湾河流域在遭遇降雨重现期为 20 a 及以下暴雨时,河道行洪压力较小,最高水位远低于堤顶高程;在遭遇降雨重现期为 50 a 及以上暴雨时,河道水位较高,河道行洪压力较大,部分河道水位超过堤顶高程。

参考文献:

[1] Berndtsson R, Becker P, Persson A, et al. Drivers of changing urban flood risk: a framework for action [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 240: 47-56.

[2] 林琿,吴贤宇,潘家祎,等. 中国城市洪涝实时预报研究:现状与挑战 [J]. 测绘学报, 2022, 51 (7): 1306-1316. (Lin Hui, Wu Xianyu, Pan Jiayi, et al. Real-time forecast of urban flood in China: past, present and future [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51 (7): 1306-1316. (in Chinese))

[3] 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))

[4] 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 Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (5): 713-724. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 孔锋,王一飞,吕丽莉,等. 北京“7·21”特大暴雨洪涝特征与成因及对策建议 [J]. 人民长江, 2018, 49 (增刊 1): 15-19. (Kong Feng, Wang Yifei, Lyu Lili, et al. Genesis analysis and countermeasures on huge rainstorm and flooding on 21st Aug. in Beijing [J]. Yangtze River, 2018, 49 (Sup 1): 15-19. (in Chinese))

[7] 张启义. 北京房山区“23·7”特大暴雨灾害的成因及启示 [J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33 (10): 43-47. (Zhang Qiyi. The cause and enlightenment of the “23. 7” extremely rainstorm disaster in Fangshan District of Beijing City [J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33 (10): 43-47. (in Chinese))

[8] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (5): 13-19. (Li Zhijia, Zhang Xinyuan, Bai Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 13-19. (in Chinese))

[9] 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))

[10] 吴辉明,陈文龙,杨芳,等. 深圳龙岗区 2023 年“9·7”极端特大暴雨洪涝灾害风险评估与对策 [J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34 (1): 36-40. (Wu Huiming, Chen Wenlong, Yang Fang, et al. Risk assessment and countermeasures of flood and waterlogging caused by “9·7” extreme heavy rainstorm in Longgang District of Shenzhen City in 2023 [J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34 (1): 36-40. (in Chinese))

[11] 刘家宏,宋天旭,梅超,等. 利比亚德尔纳 2023 年极端洪水模拟复盘分析 [J]. 水利学报, 2024, 55 (6): 723-734. (Liu Jiahong, Song Tianxu, Mei Chao, et al. Retrospective simulation and analysis of 2023 extreme flood in Derna, Libya [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55 (6): 723-734. (in Chinese))

[12] 张长征,沈婷,徐慎晖,等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究 [J]. 水利经济, 2023, 41 (1): 55-61. (Zhang Changzheng, Shen Ting, Xu Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41 (1): 55-61. (in Chinese))

[13] 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))

- [14] 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))
- [15] 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 Zongxue, Ye Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [16] 高玉琴,王慧,刘钺,等.基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J].水利水电科技进展,2024,44(6):6-12. (Gao Yuqin, Wang Hui, Liu Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))
- [17] Qi Wenchao, Ma Chao, Xu Hongshi, et al. A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies[J]. Natural Hazards, 2021, 108(1): 31-62.
- [18] Li Cailin, Sun Na, Lu Yihui, et al. Review on urban flood risk assessment[J]. Sustainability, 2022, 15(1): 765.
- [19] 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 Zhaoyan, Wang Zhaoli, Wu Xushu, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese))
- [20] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等.基于SWMM和InfoWorks ICM模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J].水资源保护,2023,39(3):109-117. (Liao Ruting, Xu Zongxue, Ye Chenlei, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 109-117. (in Chinese))
- [21] 帅伟,周淑梅,张竞楠,等.设计暴雨下的淠涘江流域洪水模拟及损失评估[J].水利水电技术(中英文),2023,54(增刊):120-127. (Shuai Wei, Zhou Shumei, Zhang Jingnan, et al. Flood simulation and loss assessment of Luzhu River basin under design rainstorms [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(Sup2): 120-127. (in Chinese))
- [22] 程晓陶,仇劲卫,陈喜军.深圳市洪涝灾害的数值模拟与分析[J].自然灾害学报,1995,4(增刊1):202-209. (Cheng Xiaotao, Qiu Jingwei, Chen Xijun. Numerical simulation of flood hazard in Shenzhen City [J]. Journal of Natural Disasters, 1995, 4(Sup1): 202-209. (in Chinese))
- [23] Zhang Hongping, Wu Weimin, Hu Chunhong, et al. A distributed hydrodynamic model for urban storm flood risk assessment[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126513.
- [24] 臧文斌.城市洪涝精细化模拟体系研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2019.
- [25] 徐美,刘舒,孙杨,等.利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1185-1194. (Xu Mei, Liu Shu, Sun Yang, et al. Rapid identification and early warning of urban waterlogging risk using flooding model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1185-1194. (in Chinese))
- [26] 刘业森,刘舒,刘媛媛,等.降雨移动对河道洪峰影响研究:以深圳为例[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2022,20:306-314. (Liu Yesen, Liu Shu, Liu Yuanyuan, et al. Influence of rainfall movement direction on flood peak in urban river with Hewan district in Shenzhen as a case study [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(4): 306-314. (in Chinese))
- [27] 李敏,柏平,洪学智,等.基于两种建模方式的嵌套式城市雨洪模型研究与应用[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2023,21:412-421. (Li Min, Bai Ping, Hong Xuezhi, et al. Research and application of nested urban rainstorm modeling based on two modeling approaches [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(5): 412-421. (in Chinese))
- [28] 臧文斌,柴福鑫,刘昌军,等.2021年郑州“7·20”特大暴雨五龙口停车场内涝及地铁隧洞进水分析[J].中国防汛抗旱,2022,32(5):16-22. (Zang Wenbin, Chai Fuxin, Liu Changjun, et al. Analysis of waterlogging in Wulongkou parking lot and subway tunnel flooding of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou City in 2021 [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(5): 16-22. (in Chinese))
- [29] 臧文斌,陈胜,朱吉生,等.面向城市排水计算的市政排水资料质量综合评估方法研究[C]//2021首届城市水利与洪涝防治研讨会论文集.南京:河海大学,2022:1-10.
- [30] 臧文斌,张红萍,张东,等.城市雨水汇水区的静态分区与动态分区研究[J].给水排水,2022,58(增刊1):730-737. (Zang Wenbin, Zhang Hongping, Zhang Dong, et al. Study on static and dynamic division of urban rainwater catchment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(Sup1): 730-737. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-04 编辑:王芳)