

快速城市化对城市内涝特征的影响分析

王兆礼^{1,2}, 孟德胜¹, 廖耀星¹, 陈昱宏¹, 卢义亮¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 人工智能与数字经济广东省实验室(广州), 广东 广州 510330)

摘要:为了探讨城市化对区域内涝的影响,以广州市南岗河流域为研究区,基于 SWMM 和 WCA2D 模型构建了一二维耦合水文水动力模型,分析了南岗河流域城市化前后在不同降雨重现期下的内涝淹没响应规律。结果表明:模拟的一维河道水位和二维淹没范围与实测结果相近,证明该模型在研究区具有较好的适用性;1990—2020 年间,南岗河流域建设用地面积增长了 4.1 倍;不透水面扩张导致出水口洪峰流量增大、径流系数增大、峰现时间提前、溢流点数量增多、淹没面积大幅增加;与城市化前相比,城市化后 1、20、100 a 重现期暴雨下的内涝淹没面积分别增长了 4.2 倍、1.1 倍和 0.5 倍;不透水面扩张加剧了内涝风险,进一步恶化了城市的防洪排涝能力。

关键词:暴雨内涝;城市化;水文水动力模型;WCA2D 模型;SWMM 模型;南岗河流域

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0041-11

Analysis of impact of rapid urbanization on characteristics of urban waterlogging//WANG Zhaoli^{1,2}, MENG Desheng¹, LIAO Yaoxing¹, CHEN Yuhong¹, LU Yiliang¹ (1. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangdong Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510330, China)

Abstract: To investigate the impact of urbanization on regional waterlogging, taking the Nangang River Basin in Guangzhou as the study area, a coupled one- and two-dimensional hydrological-hydrodynamic model was constructed based on the SWMM and WCA2D models, and the flood inundation response patterns under different rainfall return periods before and after urbanization were analyzed. The results show that the simulated one-dimensional river water levels and two-dimensional inundation extents are in good agreement with the observed data, demonstrating that the proposed model has good applicability in the study area. From 1990 to 2020, the built-up area in the Nangang River Basin increased by 4.1 times. The expansion of impervious surfaces led to higher peak discharges at outlets, larger runoff coefficients, earlier occurrence of flood peaks, an increased number of overflow points, and a significant increase in inundation areas. Compared with the pre-urbanization scenario, the inundated areas under rainstorms with 1-, 20-, and 100-year return periods increased by 4.2, 1.1 and 0.5 times, respectively, after urbanization. The expansion of impervious surfaces has significantly exacerbated flood risks and further weaken the urban flood control and drainage capacity.

Key words: rainstorm waterlogging; urbanization; hydrological and hydrodynamic model; WCA2D model; SWMM model; the Nangang River Basin

全球气候变化和快速城市化进程加剧了极端降水的强度和频率,使许多城市遭受城市内涝的风险增加^[1-3],造成了巨大的经济财产损失和人员伤亡,同时对环境和生态系统造成严重破坏^[4-7]。城市化的快速发展使原有的下垫面硬化,造成地表渗透能力大幅降低,地表不透水面积增大,地表径流增加,加上城市排水管网排水能力不足,导致近年来城市洪涝灾害愈发频繁^[8];与此同时,城市化进程的快速推进造成城区温度升高,使城区与郊区的温差增

大,从而形成“城市热岛效应”,导致城区降雨频率与降雨量增加,进一步加剧极端降雨事件的发生^[9-10]。随着城市化进程快速推进,城区人类活动更为频繁,城区人口密度越来越大,同时,各类资源(如道路、住房、电力、网络等)也不断向城区聚集。因此,城区一旦遭遇严重暴雨内涝,不仅对电力系统、交通系统、网络设施等造成重大影响^[11-13],而且也给城市带来严重的经济财产损失,甚至威胁居民的生命安全^[14]。近年来全球范围内已发生多起典型的洪

基金项目:国家自然科学基金项目(52379010);广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515240071);云南省省市一体化专项(202202AH21007)

作者简介:王兆礼(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: wangzhli@scut.edu.cn

涝灾害事件,如首尔^[15](2020年8月6日)、悉尼^[16](2021年3月19日)、纽约^[17](2021年9月1日)、北京^[18](2016年7月18日)、深圳^[19](2019年4月11日)、广州^[20](2020年5月22日)、郑州^[21](2021年7月20日)等。因此,探讨城市化导致的城市洪涝灾害已经成为城市化发展过程中的重要问题之一。

针对城市化背景下暴雨洪涝频发的问题,国内外学者对城市化水文响应开展了大量研究。Zhang等^[22]揭示了城市化对飓风引发洪水的放大效应,研究表明休斯敦地区的城市化建设使“哈维”飓风引发的极端洪水事件发生概率平均增大了约21倍。Rajib等^[23]和Manaschintan等^[24]分别对密西西比河流域和孟买市进行了研究,发现城市化会增加地表径流和出口洪峰流量。Prosdociimi等^[25]以英格兰北部的两个相似流域为例,研究发现城市化对夏季洪峰流量具有显著增强作用。孙延伟等^[26]和陈佩琪等^[27]分别以南京秦淮河流域和车陂涌流域为例,发现城市化进程中不透水面扩张导致洪峰流量增大、洪量增多及汇流速度加快。尽管前人在城市化水文效应研究领域已积累了丰富成果,但大多数研究仅局限于一维水文过程变化,例如仅关注洪峰流量、峰现时间等的演变规律,而对城市化前后的地表二维内涝淹没情况研究较少,地表淹没状况对城市化前后的响应规律尚缺乏系统性研究。鉴于此,本文拟采用一二维耦合水动力模型模拟城市化前后的内涝淹没情况。

自20世纪以来,国内外学者研发了一系列城市雨洪模型^[28-30],其中城市雨洪管理模型(storm water management model, SWMM)因其开源免费,操作简便得到广泛应用,已被大量应用于城市暴雨内涝模拟、市政管网设计与评估、海绵城市设计等领域^[31-34]。然而,SWMM模型仅能模拟一维水文水力过程,无法模拟二维淹没情况。而复杂城市地形下准确的洪涝评估要求城市雨洪模型能够反映研究区的内涝范围以及淹没水深等情况。因此,国内外学者开始将SWMM模型与二维水动力模型进行耦合,并取得了一系列研究成果。例如Brendel等^[35]、房亚军等^[36]、李国一等^[37]、曾照洋等^[38-39]、雷向东等^[40]、王兆礼等^[41]利用SWMM模型耦合二维水动力模型,成功实现了不同研究区的内涝淹没模拟。WCA2D(weighted cellular automata 2D inundation model)模型具备高效的二维水动力模拟能力,其无需求解复杂的物理方程(如不计惯性项与保证动量守恒等),且可在模拟过程中同时兼顾高精度与高效率,因此在城市内涝模拟中得到了广泛应用。鉴

于此,本文以高度城市化的广州市南岗河流域为研究区,构建SWMM与WCA2D耦合模型模拟城市化前后(1990年和2020年)的内涝淹没情况,探究不透水面扩张对排水管网排涝能力和城市内涝淹没变化的影响,以期为揭示城市化对洪涝过程影响机理、优化城市管网、推动海绵城市建设和减少城市内涝损失等提供参考。

1 研究区概况与数据

图1为广州市黄埔区南岗河流域遥感影像。该流域属于典型的亚热带季风气候,降雨季节分配不均匀、年际变化较大,导致南岗河流域易出现夏洪涝、春秋干旱等灾害。研究区集雨面积为116.26 km²,南岗河自北部木强水库向南流入东江北干流,最终汇入珠江。地形总体呈现明显的北高南低的特点,上游为丘陵地区,下游主要为建设用地区域,地势较为平坦。根据广州市水务局2021年发布的易涝积水点数据,全市93个易涝点中,黄埔区占7个,其中近一半易涝点位于南岗河流域内。1990年和2020年研究区土地利用分类情况和面积分别见图2和表1。由表1可知,南岗河流域城市化进程较快,1990—2020年间,草地、林地所占总面积不断减少,分别从22.96 km²减至20.82 km²、82.96 km²减至56.33 km²,而建设用地和水域面积不断增多,其中建设用地面积增长幅度巨大,从6.84 km²增长至34.90 km²,增长了4.1倍,这种变化导致黄埔区下垫面透水能力与调蓄能力下降,进而加剧了城市洪涝灾害风险。

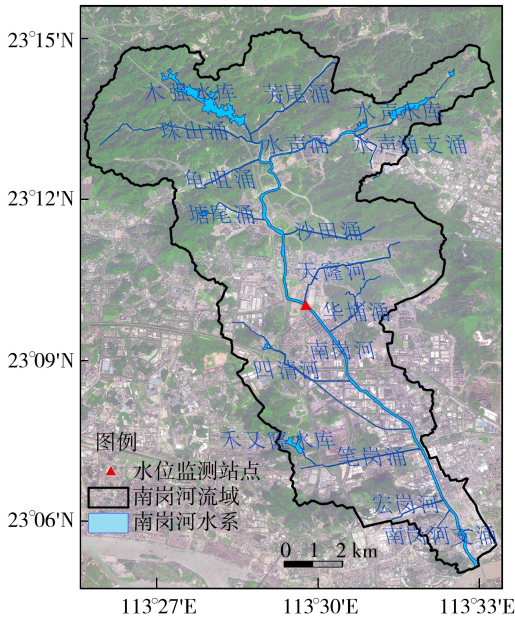


图1 研究区遥感影像

Fig. 1 Remote sensing image of study area

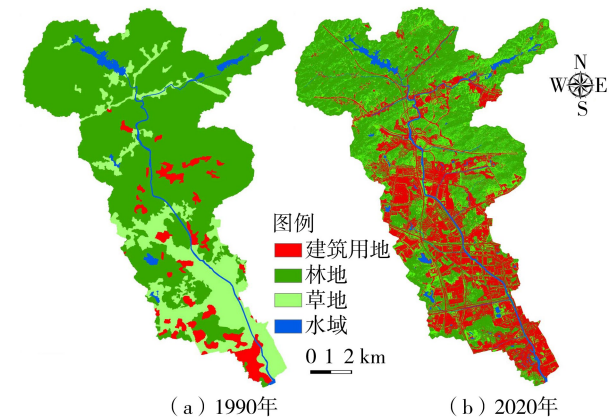


图 2 研究区土地利用分类

Fig. 2 Landuse classification of study area

表 1 1990 年和 2020 年研究区土地利用面积

土地利用 类型	1990 年		2020 年	
	总面积/km ²	面积占比/%	总面积/km ²	面积占比/%
草地	22.96	19.75	20.82	17.91
林地	82.96	71.36	56.33	48.45
水域	3.50	3.01	4.21	3.62
建设用地	6.84	5.88	34.90	30.02
合计	116.26	100	116.26	100.00

本文所用的数据类型和数据来源见表 2。实测降雨和水位数据的时间间隔为 5 min。管网和子汇水区的经验参数,例如管道糙率、曼宁系数、霍顿下渗模型的相关参数等,参考广州市已有暴雨内涝模拟的研究成果进行取值。

表 2 研究数据类型与来源

数据类型	来源	描述
1990 年研究区土地利用类型资料	中国科学院资源环境科学与数据中心	精度:30 m×30 m
2020 年研究区土地利用类型资料	通过卫星图在 ENVI 软件中解译得到	精度:5 m×5 m
“20200522”特大暴雨实测内涝点	黄埔区水务局	数量:75 个
数字高程模型	广州市规划与自然资源局	精度:5 m×5 m
卫星图	利用 ArcGIS 在谷歌卫星地图中截取	精度:5 m×5 m
管网数据	黄埔区水务局	数据格式:CAD
实测暴雨资料	广州市水务局	场次:“20200522”和“20220609”

2 模型构建与验证

2.1 模型介绍

SWMM 模型是由美国环境保护署研发的一种能够动态模拟降雨-径流全过程的模型,其主要用于城市排水、低影响开发、防洪排涝规划、水质模拟等领域^[42]。

WCA2D 模型由 Michele 等^[43]基于简单的过渡规则及权重交互方法在 CA2D 模型的基础上开发改进而成。该模型区别于先前各类 CA 模型及传统的二维水力模型,不但无需求解复杂的物理方程(如不计惯性项与保证动量守恒等),而且具备高精度、高效率、开源成本低等优势。同时,该模型在处理诸如矩形网格、三角网格等多类型网格以及不同的元胞邻域类型时具有较强的适用性。WCA2D 模型在模拟地表水流演进时,首先计算相邻元胞水流交换的权重,进而分析元胞间的交互水量,最后完成水深与流速的计算^[44]。

2.2 模型构建

SWMM 模型构建的流程主要包括管网概化、河道概化、子汇水区划分、模型参数设置。其中管网概化中删减了对排水管网贡献较小的支管以及管径小于 600 mm 的管道;鉴于南岗河流域河道众多,本文仅概化流域内主要河道,并将河道概化成管网,同时将研究区具有蓄水能力的池塘、湖泊等概化为蓄水单元;在子汇水区划分时,本文综合参考了研究区 DEM 高程数据、管道流向、卫星图以及社区单元分布等资料,利用人工手动划分子汇水区,其中最大的子汇水区位于南岗河流域西北部,面积为 359.06 hm²,最小的子汇水区位于南岗河流域中部建筑较密集区域,面积为 0.12 hm²。最终整个研究区共概化得到管点 7316 个、管段 7390 个、出水口 8 个、子汇水区 1223 个,概化后的管网分布见图 3。SWMM 模型所需参数分为测量参数和经验参数两类,其中测量参数主要包括面积、坡度、漫流宽度以及不透水率等,均可在 ArcGIS 软件中获取;经验参数包括管道糙率、曼宁系数、霍顿下渗模型的相关参数等,这些参

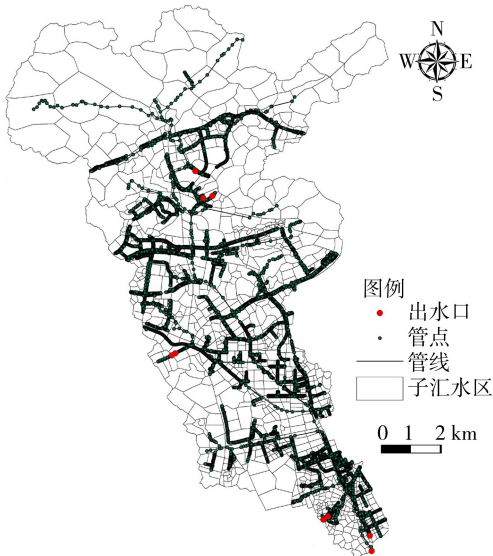


图 3 研究区管网分布

Fig. 3 Pipeline network distribution in study area

数需通过模型率定优化确定。但由于该研究区缺乏长期、全面的监测数据,目前仅有“20220609”和“20200522”暴雨的实测水位和内涝淹没资料,因此先参考邻近研究区的数据^[38]初步确定经验参数取值,然后利用实际降雨数据对SWMM模型中所选的经验参数进行验证,证明所选参数取值的合理性。SWMM-WCA2D模型构建流程如图4所示。

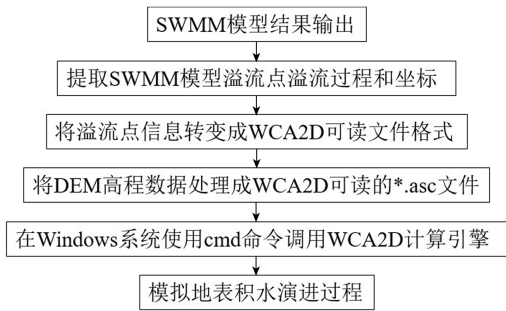


图4 SWMM-WCA2D模型构建流程

Fig.4 SWMM-WCA2D model construction process

2.3 模型验证

本文首先利用“20220609”实测降雨对SWMM模型进行率定,将管网数据和实测降雨数据导入SWMM模型进行模拟,并用河道站点(南岗河中)的实测水位数据对模型进行验证,结果如图5所示。模型模拟值与实测值吻合良好,纳什效率系数(NSE)为0.87,相关系数为0.939,表明该模型参数设定合理,模拟精度较高。然后,利用“20200522”广州特大暴雨事件从溢流点位置分布和淹没范围对SWMM和WCA2D模型进行验证。该场降雨历时约24 h,记录时间步长为30 min,24 h总降水量为334 mm,其中最大3 h降水量达284.56 mm,占总降水量的85.2%。模拟的淹没范围主要分布在萝岗公路街、荔红路、开创大道、开源大道、广海路南岗地铁站、黄埔东路部分片区、埔南路片区、东区街道大部分地区、黄麻村、水西路、永和隧道以及南岗镇西南二街等地区,模拟的溢流点位置分布(图6)与实测内涝黑点位置大致吻合,且模拟淹没范围能准确

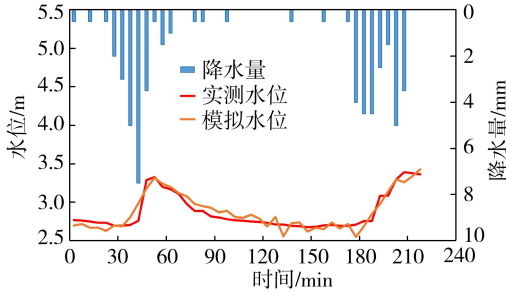
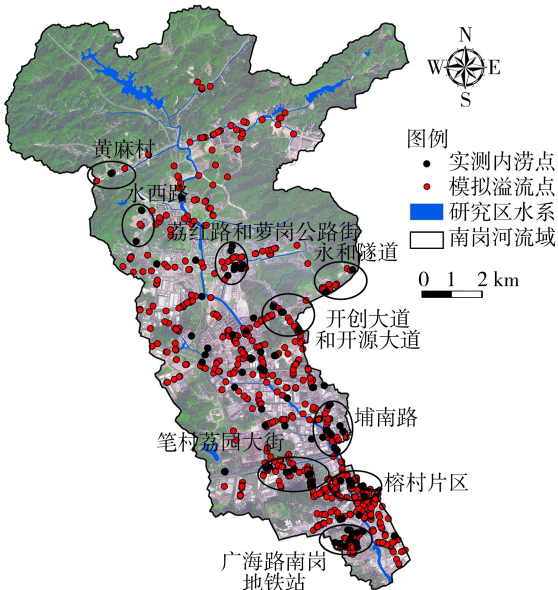


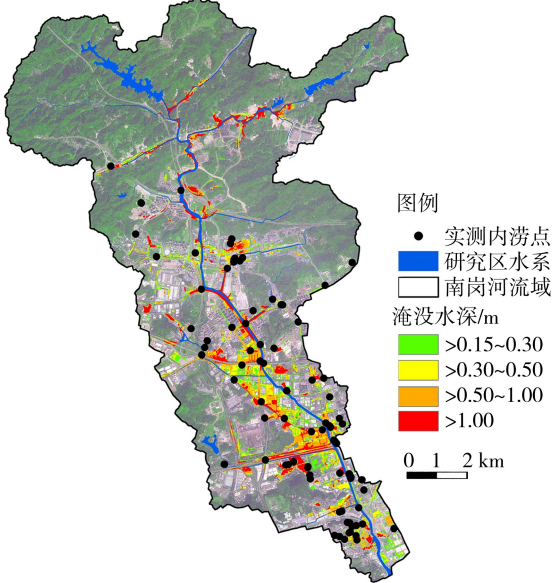
图5 “20220609”降雨河道水位验证结果

Fig.5 Verification results of river water level for “20220609” rainfall event

反映实际积水点的空间分布,表明SWMM模型和WCA2D模型在此研究区内涝模拟中具有较好的适用性,模拟结果科学合理。



(a) “20200522”降雨溢流点分布



(b) “20200522”降雨淹没范围分布

图6 “20200522”降雨实测内涝点分布与模拟的淹没范围

Fig.6 Observed waterlogging point distribution and simulated inundation extent for “20200522” rainfall event

2.4 设计降雨推求

芝加哥雨型是Keifer等^[45]于1957年根据强度-历时-频率关系得到的一种不均匀设计雨型,其具有明显的“尖瘦”特征,对实际工程较为不利,目前在国内外设计雨型中得到广泛应用。相关研究表明,广州市约70%的暴雨事件属于单峰型降雨,这类降雨雨量较为集中,更容易引起较大的洪涝灾害,对城市排水系统较为不利^[46]。因此,本文选取单峰芝加哥雨型作为设计降雨。根据广州市水务局提出的广

州市中心城区暴雨强度计算公式,计算不同重现期下的暴雨强度^[47],具体公式如下:

$$q = \frac{3618.427(1 + 0.438\lg P)}{(t + 11.259)^{0.750}} \quad (6)$$

式中: q 为设计暴雨强度; P 为设计降雨重现期; t 为降雨历时。

本文选取 1、5、10、20、50、100 a 共 6 种重现期进行模拟分析,降雨时长取为 120 min,雨峰系数取 0.4^[48-52],可得降雨峰值发生在第 48 min,由芝加哥雨型推求相应的设计降雨,结果见图 7。

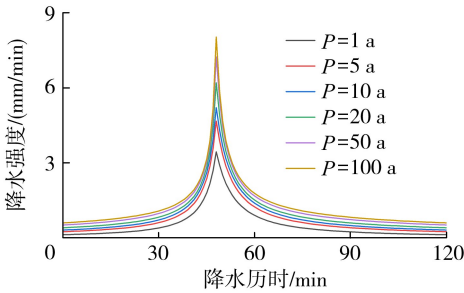


图 7 不同重现期下设计降雨过程线

Fig. 7 Design rainfall hydrograph under different return periods

3 结果与分析

3.1 城市化进程对水文过程变化的影响

为了分析城市化进程对水文响应的影响,本文模拟了不同重现期暴雨情景下南岗河流域城市化前后的产汇流变化情况,结果见表 3,其中洪峰流量和峰现时间为南岗河下游出口断面的模拟结果,可较好地反映整个研究区的水文响应。由表 3 可知,不透水面扩张加剧了南岗河流域内涝风险,具体表现为城市化后,洪峰流量、地表径流和径流系数均显著增大,峰现时间提前。如 1 年一遇降雨情景下,城市化后出水口洪峰流量为城市化前的 1.54 倍,地表径流量为城市化前的 1.72 倍,径流系数从城市化前的 0.37 提高至城市化后的 0.63,城市化后峰现时间较城市化前提前了 34 min。20 年一遇降雨情景下,城市化后出水口洪峰流量为城市化前的 1.16 倍,地表径流量为城市化前的 1.28 倍,径流系数从城市化前的 0.60 提高至城市化后的 0.77,城市化后峰现时间较城市化前提前了 34 min。100 年一遇降雨情景下,城市化后出水口洪峰流量为城市化前的 1.08 倍,地表径流量为城市化前的 1.21 倍,径流系数从城市化前的 0.67 提高至城市化后的 0.81,城市化后峰现时间较城市化前提前了 30 min。随着降雨重现期增大,不透水面扩张对出水口洪峰流量、地表径流量的增长幅度逐渐降低,洪峰流量增幅从 1 年一

遇的 0.54 倍降低至 100 年一遇的 0.08 倍、地表径流量增幅从 1 年一遇的 0.72 倍降低至 100 年一遇的 0.21 倍;径流系数随重现期增大逐渐增大;峰现时间受重现期影响较小,城市化后峰现时间较城市化前提前约 30 min。

表 3 不同降雨重现期下南岗河流域城市化前后产汇流变化

Table 3 Changes in runoff generation and concentration in Nangang River Basin before and after urbanization under different rainfall return periods						
重现期/a	城市化进程	降水量/mm	径流量/mm	径流系数	洪峰流量/(m ³ /s)	峰现时间/min
1	城市化前	66.12	24.28	0.37	427.63	144
	城市化后		41.85	0.63	656.69	110
5	城市化前	95.99	49.17	0.51	780.31	132
	城市化后		68.93	0.72	958.88	107
10	城市化前	110.26	61.75	0.56	967.50	131
	城市化后		82.25	0.75	1139.25	120
20	城市化前	126.28	76.13	0.60	1103.66	135
	城市化后		97.36	0.77	1280.77	101
50	城市化前	145.20	93.54	0.64	1221.45	127
	城市化后		115.45	0.80	1330.47	120
100	城市化前	158.18	105.67	0.67	1281.18	133
	城市化后		127.96	0.81	1378.43	103

3.2 城市化进程对管网溢流的影响

利用 SWMM 模型模拟了城市化前后不同设计降雨重现期下的管网排水能力。图 8 为城市化前后不同设计降雨重现期下的溢流点数量对比。由图 8 可见,随着降雨重现期增大,溢流点数量增多,且溢流点呈现集中和蔓延趋势。当降雨重现期较小时,不透水面扩张对溢流点数增加具有显著促进作用,例如重现期为 1、5、10 a 时,城市化后的溢流点数量比城市化前分别增加 299 个(2.53 倍)、309(1.21 倍)、288(0.86 倍);随着降雨重现期增大,不透水面扩张对溢流点数的增量效应逐渐减弱,例如重现期为 20、50、100 a 时,城市化后的溢流点数量比城市化前分别增加 277 个(0.65 倍)、233(0.44 倍)、209(0.36 倍)。

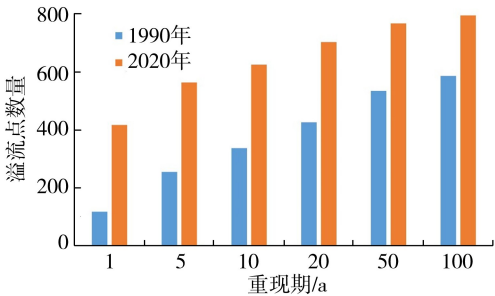


图 8 城市化前后溢流点数量对比

Fig. 8 Comparison of number of overflow points before and after urbanization

图 9 和图 10 分别为城市化前后不同重现期下研究区溢流点空间分布。由图 9 和图 10 可知,城市化后,即使在 1 年一遇降雨下,萝岗公路街、荔红路、

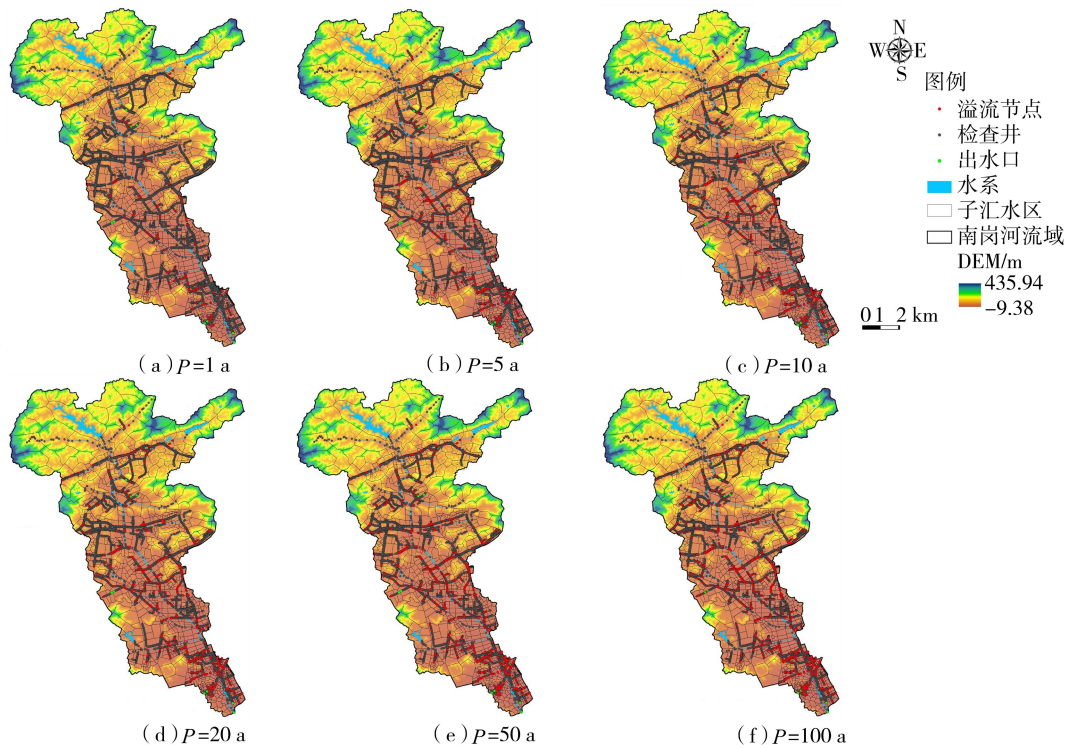


图 9 城市化前不同重现期下研究区溢流点空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of overflow points in study area before urbanization under different return periods

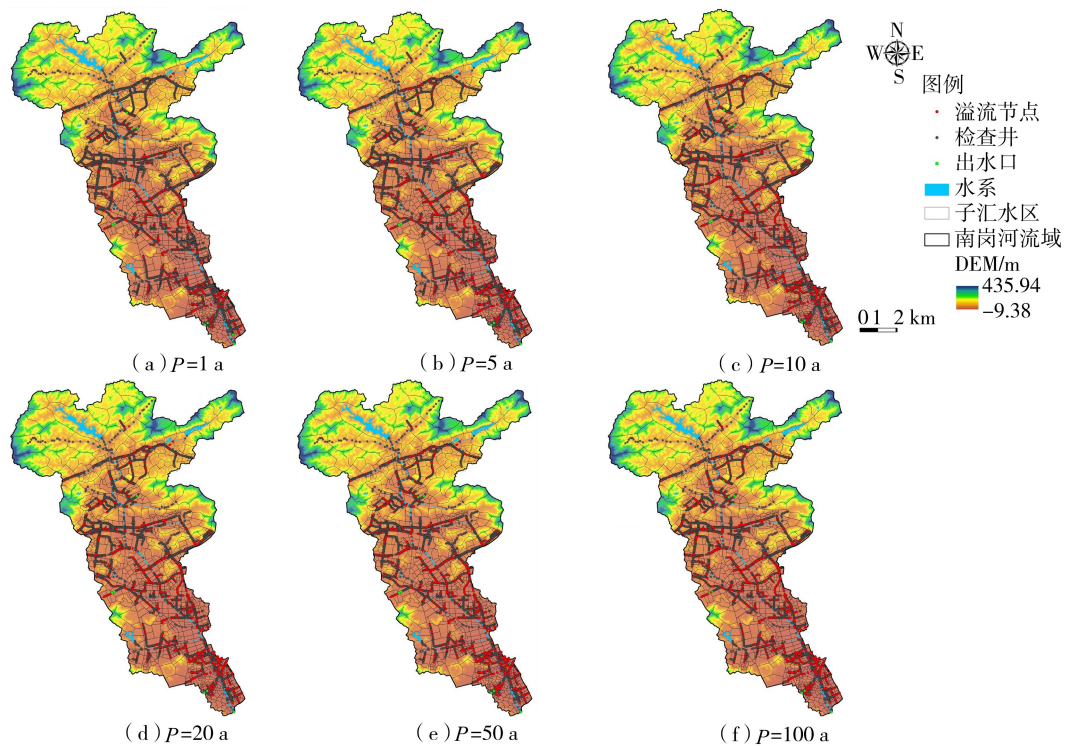


图 10 城市化后不同重现期下研究区溢流点空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of overflow points in study area after urbanization under different return periods

开创大道、开源大道、广海路南岗地铁站、黄埔东路部分片区、东区街道、黄麻村、萝岗水西水源路、永和隧道以及南岗镇西南二街等地区,就已出现较多溢流点,这些地区正是实际易涝点位置,且随着降雨重现期增大,溢流点逐渐向周围扩散,表明上述区域的

管网排水能力不足,需做出相应改善,尽可能减少暴雨必涝的现象。

3.3 城市化进程对地表淹没的影响

为分析南岗河流域城市化对内涝淹没情况的影响,本文利用构建的 SWMM-WCA2D 耦合模型模拟

了城市化前后 1、5、10、20、50、100 a 共 6 种重现期下的淹没情况,结果如图 11、图 12 和表 4 所示。由表 4 可知,随着重现期增大,不同水深的淹没范围均增加,且城市化后淹没范围的增长速率大于城市化前。相同降雨重现期下,城市化后的内涝淹没面积

远大于城市化前,1、5、10、20、50、100 a 重现期降雨下内涝淹没面积分别增长了 4.2 倍、1.8 倍、1.5 倍、1.1 倍、0.9 倍、0.5 倍。在 1990 年土地利用类型下,南岗河流域模拟的内涝淹没范围相对较小,内涝淹没面积从 1 年一遇的 26.5 hm² 增长至 100 年一

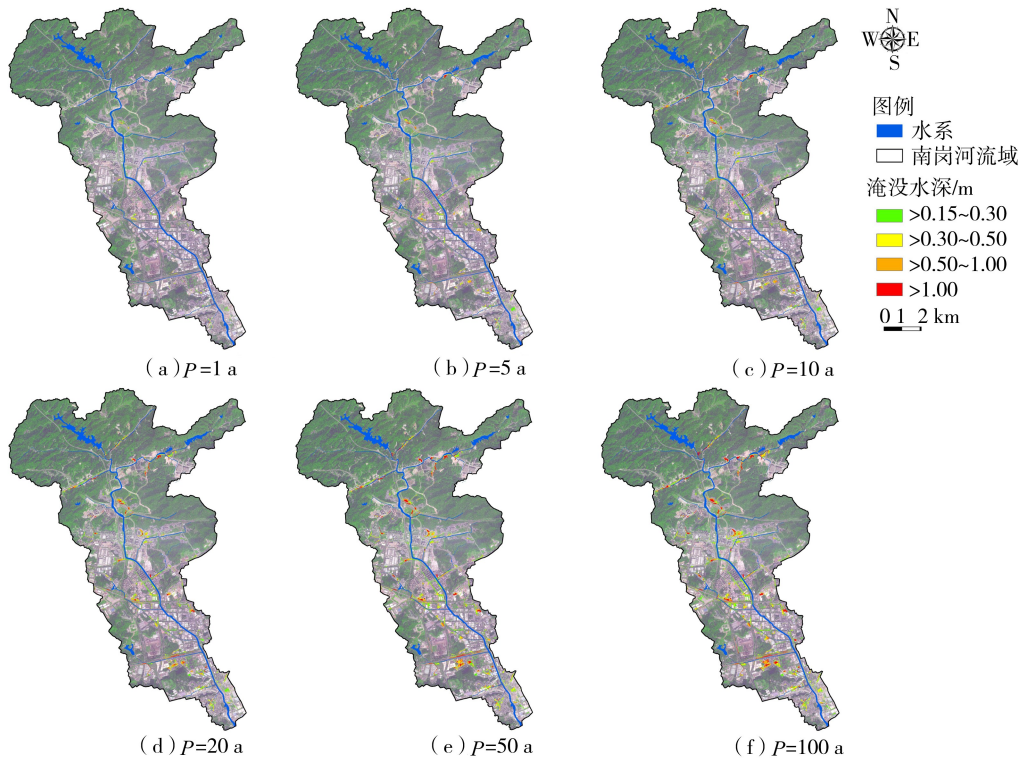


图 11 城市化前不同重现期下研究区淹没水深空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of inundation depth in study area under different return periods before urbanization

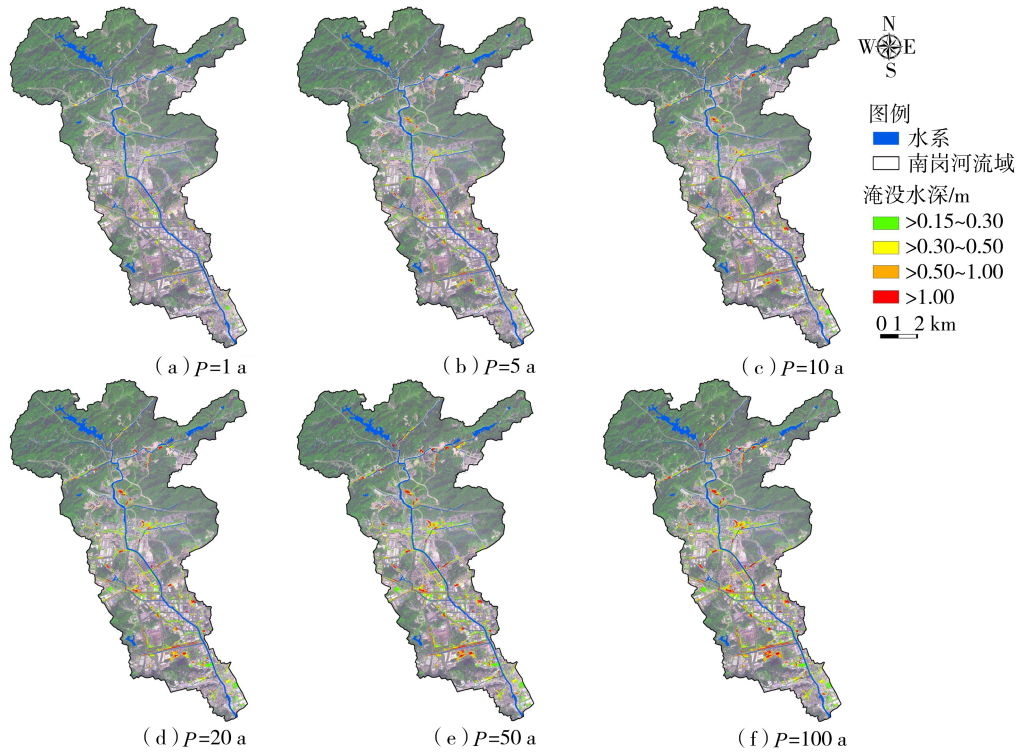


图 12 城市化后不同重现期下研究区淹没水深空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of inundation depth in study area under different return periods after urbanization

表 4 1990 年和 2020 年土地利用类型下淹没面积统计

Table 4 Statistics of inundation area under landuse types in 1990 and 2020

淹没水深/m	淹没面积/hm ²											
	1 年一遇		5 年一遇		10 年一遇		20 年一遇		50 年一遇		100 年一遇	
	1990 年	2020 年	1990 年	2020 年	1990 年	2020 年	1990 年	2020 年	1990 年	2020 年	1990 年	2020 年
>0.15~0.30	14.2	69.7	40.2	111.2	54.7	137.9	76.2	167.5	95.7	192.8	108.0	207.6
>0.30~0.50	7.6	34.3	21.3	64.5	30.2	84.9	45.4	102.3	63.9	119.3	78.8	132.6
>0.50~1.00	3.6	25.4	20.9	51.9	33.1	65.0	44.3	80.7	60.8	106.1	71.8	121.8
>1.00	1.1	7.2	8.5	28.7	15.0	43.2	28.7	59.8	46.7	80.1	61.1	23.6
总计	26.5	136.6	90.9	256.3	133.0	331.0	194.6	410.3	267.1	498.3	319.7	485.6

遇的 319.7 hm²,内涝积水主要发生在南岗河两侧地势低洼处,尽管部分区域出现较严重的内涝淹没情况,但内涝积水可以在短时间内逐渐消退,涝情相对较轻。然而,在 2020 年土地利用类型下,南岗河流域的淹没范围显著增加,内涝淹没面积从 1 年一遇的 136.6 hm² 增长至 100 年一遇的 485.6 hm²,内涝淹没范围主要分布在实际易涝点区域。部分地势低洼处在 1 年一遇(低重现期)降雨下就已出现超过 1 m 的淹没水深,且由于下垫面类型发生较大改变,内涝积水不易快速消退,涝情较为严重,严重影响社会经济发展和居民生命财产安全。

4 结 论

a. 基于 SWMM 与 WCA2D 模型构建了广州市南岗河流域内涝模拟耦合模型,利用两场实测降雨对模型进行验证,结果显示模拟的溢流点位置与实测内涝黑点位置大致吻合,表明构建的模型具有较高的模拟精度和良好的适用性。

b. 1990—2020 年间,南岗河流域建设用地面积扩大了 4.1 倍,不透水面扩张导致洪峰流量和地表径流量大幅增加,峰现时间提前约 30 min,并使溢流点数量及分布范围明显增加,加剧了内涝灾害的发生。

c. 城市化前,该流域淹没范围较小,涝情较轻;城市化后,淹没范围显著增加,部分地区甚至在 1 年一遇的低降雨重现期下就已出现大面积积水,且积水消退缓慢,涝情明显加重。与城市化前相比,城市化后在 1、5、10、20、50、100 a 重现期降雨下内涝淹没面积分别增长了 4.2 倍、1.8 倍、1.5 倍、1.1 倍、0.9 倍、0.5 倍。本研究定量揭示了下垫面变化对内涝特征的影响规律,为快速城市化背景下内涝风险评估、土地利用优化及防洪排涝规划提供了科学依据。

参考文献:

[1] ZHANG X, ZWIERS F, LI G, et al. Complexity in estimating past and future extreme short-duration rainfall [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(4) : 255-259.

[2] LAI C, CHEN X, WANG Z, et al. Flood risk assessment

and regionalization from past and future perspectives at basin scale [J]. Risk Analysis, 2020, 40(7) : 1399-1417.

[3] 黄亦轩,徐宗学,叶陈雷,等. 局部管道改造对内涝风险的影响:以晋城市金村区为例 [J]. 水力发电学报, 2023, 42(6) : 40-52. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Effect of local pipelines reconstruction on waterlogging risk: a case study in Jincun District, Jincheng City [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(6) : 40-52. (in Chinese))

[4] DONAT G, LOWRY L, ALEXANDER V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(5) : 508-513.

[5] LI S, WANG Z, LAI C, et al. Quantitative assessment of the relative impacts of climate change and human activity on flood susceptibility based on a cloud model [J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125051.

[6] ZHANG M, XU M, WANG Z, et al. Assessment of the vulnerability of road networks to urban waterlogging based on a coupled hydrodynamic model [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127105.

[7] 徐奎,鲁志伟,宾零陵,等. 沿海城市暴雨-高潮位复合致涝区划研究 [J]. 水力发电学报, 2022, 41(4) : 18-27. (XU Kui, LU Zhiwei, BIN Lingling, et al. Risk factor zoning of waterlogging in coastal cities caused by compound of rainstorms and high tides [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(4) : 18-27. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施 [J]. 水资源保护, 2022, 38(1) : 7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1) : 7-17. (in Chinese))

[10] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水

- 特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [11] 黄国如,李梅萍. 基于微观交通仿真的城市内涝对道路交通的影响评估研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 69-78. (HUANG Guoru, LI Meiping. Research progress on impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on micro traffic simulation[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 69-78. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 73-81. (in Chinese))
- [14] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))
- [15] LEE Y, KIM Y, LEE H. Framework for selection of temporary disaster waste management sites for post-flood recovery in Seoul, South Korea[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 71: 102832.
- [16] ABBAS E, TANVIR A, FAHIM T. Geophysical and social vulnerability to floods at municipal scale under climate change; the case of an inner-city suburb of Sydney[J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 106988.
- [17] SMITH J A, BAECK M L, SU Y, et al. Strange storms: rainfall extremes from the remnants of Hurricane Ida (2021) in the northeastern US[J]. Water Resources Research, 2023, 59(3): e2022WR033934.
- [18] CHEN Y, PING F, ZHOU S, et al. Influence of microphysical processes on the initiation of the mesoscale convective system of a rainstorm over Beijing[J]. Atmospheric Research, 2021, 254: 105518.
- [19] 李超,陈潜,赵春阳,等. 相似天气背景下深圳两次前汛期降水过程对比分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2): 24-33. (LI Chao, CHEN Qian, ZHAO Chunyang, et al. Comparative analysis of two precipitation events in Shenzhen under similar synoptic background in early rainy season[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(2): 24-33. (in Chinese))
- [20] 靳奎峰,巢惟志,陈虹杏,等. 双偏振天气雷达在灾害性降水估测中的应用:以广州“5.22”特大暴雨灾害为例[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 140-146. (JIN Kuifeng, CHAO Weitan, CHEN Hongxing, et al. Application of dual polarization radar in disastrous precipitation estimation-taking “5.22” Guangdong extreme rainfall event as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 140-146. (in Chinese))
- [21] 刘家宏,裴羽佳,梅超,等. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 38-45. (LIU Jiahong, PEI Yujia, MEI Chao, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of “7.20” torrential rain in Zhengzhou[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 38-45. (in Chinese))
- [22] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. Nature, 2018, 563(7731): 384-388.
- [23] RAJIB A, MERWADE V. Hydrologic response to future land use change in the Upper Mississippi River Basin by the end of 21st century[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(21): 3645-3661.
- [24] MANASCHINTAN S, NALINI S. Effect of land use-land cover change on runoff characteristics in Mumbai City [C]//GHOSH J K, SILVA I D. Applications of Geomatics in Civil Engineering: Select Proceedings of ICGCE 2018. Singapore: Springer, 2020: 183-192.
- [25] PROSDOCIMI I, KJELDSEN T, MILLER J. Detection and attribution of urbanization effect on flood extremes using nonstationary flood-frequency models[J]. Water Resources Research, 2015, 51(6): 4244-4262.
- [26] 孙延伟,许有鹏,高斌,等. 城镇化下流域不透水面扩张对洪峰的影响:以南京秦淮河为例[J]. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1574-1583. (SUN Yanwei, XU Youpeng, GAO Bin, et al. Influence of impervious surface expansion on flood peak under urbanization: a case study of Qinhuai River in Nanjing[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5): 1574-1583. (in Chinese))
- [27] 陈佩琪,王兆礼,曾照洋,等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(9): 67-77. (CHEN Peiqi, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Assessing influence of future urbanization

- on hydrological process in typical river basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 (9) : 67-77. (in Chinese))
- [28] 袁绍春,王怀望,吕波,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计 & 评估[J]. 水资源保护, 2020, 36 (5) : 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (05) : 43-49. (in Chinese))
- [29] 李欣怡,侯精明,潘占鹏,等. 城市更新的雨洪过程动态响应模拟研究——以银川市为例[J]. 水利学报, 2023, 54 (11) : 1347-1358. (LI Yinyi, HOU Jingming, PAN Zhanpeng, et al. Simulation study on dynamic response of rain and flood process in urban renewal: a case study of Yinchuan City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (11) : 1347-1358. (in Chinese))
- [30] 龚斯淇,夏军,余敦先,等. 基于 TVGM-SWMM 模型的城市雨洪模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56 (8) : 901-911. (GONG Siqi, XIA Jun, SHE Dunxian, et al. Urban stormwater simulation based on TVGM-SWMM model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56 (8) : 901-911. (in Chinese))
- [31] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 暴雨洪水管理模型参数敏感性分析[J]. 水力发电学报, 2022, 41 (6) : 11-21. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Parameter sensitivity analysis methods of storm water management model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (6) : 11-21. (in Chinese))
- [32] 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))
- [33] 陈磊,周雪辉,余宇,等. 城镇建成区内涝和非点源污染联合风险评价方法[J]. 水科学进展, 2023, 34 (1) : 76-87. (CHEN Lei, ZHOU Xuehui, YU Yu, et al. A joint risk assessment method of waterlogging and non-point source pollution in urban built-up areas [J]. Advances in Water Science, 2023, 34 (1) : 76-87. (in Chinese))
- [34] LI Q, WANG F, YU Y, et al. Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: a case study in Guangxi, China [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231 : 10-20.
- [35] BRENDEN C E, DYMOND R L, AGUILAR M F. Modeling storm sewer networks and urban flooding in Roanoke, Virginia, with SWMM and GSSHA [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021, 26 (1) : 05020044.
- [36] 房亚军,于川淇,金鑫,等. 基于 SWMM-CCHE2D 单向耦合模型的山地海绵城市内涝管控效果研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54 (10) : 898-906. (Fang Yajun, Yu Chuanqi, Jin Xin, et al. Research on waterlogging control effect of mountain sponge city based on SWMM-CCHE2D unidirectional coupling model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54 (10) : 898-906. (in Chinese))
- [37] 李国一,邵薇薇,刘家宏,等. 基于 TELEMAC-2D 模型的济南市洪涝模拟及淹没分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (5) : 46-52. (LI Guoyi, SHAO Weiwei, LIU Jiahong, et al. Flood simulation and inundation analysis in Ji' nan City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (5) : 46-52. (in Chinese))
- [38] 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 Zhaoyang, 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))
- [39] ZENG Z Y, WANG Z L, LAI C G. Simulation performance evaluation and uncertainty analysis on a coupled inundation model combining SWMM and WCA2D [J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2022, 13 (3) : 448-464.
- [40] 雷向东,王兆礼,曾照洋,等. 基于 ANUGA 和 SWMM 耦合模型的车陂涌流域内涝模拟分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3) : 82-90. (LEI Xiangdong, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Simulation analysis on Chebei watershed waterlogging based on ANUGA and SWMM coupling model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3) : 82-90. (in Chinese))
- [41] 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 Zhaoli, CHEN Yuhong, LAI Chengguang. Numerical simulation of urban waterlogging based on TELEMAC-2D and SWMM model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1) : 117-124. (in Chinese))
- [42] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (4) : 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (4) : 1-5. (in Chinese))
- [43] MICHELE G, ALBERT S, BIDUR G, et al. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis [J]. Environmental Modelling and Software,

2016,84:378-394.

[44] 曾照洋,赖成光,王兆礼,等. 基于 WCA2D 与 SWMM 模型的城市暴雨洪涝快速模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31 (1): 29-38. (ZENG Zhaoyang, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Rapid simulation of urban rainstorm flood based on WCA2D and SWMM model[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 29-38. (in Chinese))

[45] KEIFER C J, CHU H H. Synthetic storm pattern for drainage design[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1957, 83(4): 1332-1-1332-25.

[46] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))

[47] 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. Urban stormwater process simulation research in no pipe network data areas [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(2): 87-96. (in Chinese))

[48] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-

point source pollution[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 131-139. (in Chinese))

[49] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))

[50] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1): 33-39. (FU Chun, FU Yaorong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD Model in Yingtan City[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1): 33-39. (in Chinese))

[51] XU Yu, XU Youpeng, WANG Qiang, et al. Spatial diversion and coordination of flood water for an urban flood control project in Suzhou, China[J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(2): 108-117.

[52] 李雄飞,田甜,程香菊,等. 综合管廊雨水舱缓解城市内涝的效果分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 20-26. (LI Xiongfei, TIAN Tian, CHENG Xiangju, et al. Effects of rainwater tank in integrated pipe gallery on alleviating urban waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 20-26. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 05 - 14 编辑: 雷燕)

+++++

(上接第 40 页)

[34] 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))

[35] 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))

[36] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街洪涝模拟与分析[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))

[37] YUAN Xu, ZHANG Xiaochun, WANG Xiugui, et al. Flood disaster monitoring based on Sentinel-1 data: a case study of Sihui Basin and Huaibei Plain, China[J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(2): 87-96.

[38] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 58-64. (in Chinese))

[39] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1298-1308. (YUAN Ximin, LAN Zhuoqing, WANG Lina, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1298-1308. (in Chinese))

[40] CHEN Juan, ZHANG Lu, LI Guozhi, et al. Perspectives on risk analysis and control for real-time operation of flood control systems [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(4): 319-322.

(收稿日期: 2025 - 03 - 27 编辑: 雷燕)