

基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟

宋 耘¹,李琼芳^{1,2},牛铭媛¹,闫方秀³,和鹏飞¹,陈启慧¹,周正模¹,杜 尧¹

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098;
2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心,江苏 南京 210000;
3. 青岛鸿瑞电力工程咨询有限公司,山东 青岛 266100)

摘要:选取南京市易涝区—鼓楼区广州路段为研究区,构建基于 SWMM 的一维雨洪模型,利用南京市 2011 年“7·18”暴雨资料,模拟暴雨形成的内涝情况,拟合地表积水量与最大积水深度的函数关系,计算得到易涝区积水开始时间、积水持续时间、最大积水深度,并与南京市 100 年一遇设计暴雨形成的积水过程进行比较。结果表明:提出的快速推算最大积水深度的方法能够较高精度地实时动态计算研究区“7·18”暴雨形成的积水过程,及时有效支撑防洪除涝应急决策;相较于“7·18”暴雨,100 年一遇设计暴雨形成的易涝区最大积水深度更深,积水持续时间更长。

关键词:SWMM 模型;城市内涝;“7·18”暴雨;设计暴雨;南京市

中图分类号:TV122;P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0056-06

Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM//SONG Yun¹, LI Qiongfang^{1,2}, NIU Mingyuan¹, YAN Fangxiu³, HE Pengfei¹, CHEN Qihui¹, ZHOU Zhengmo¹, DU Yao¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing 210000, China; 3. Qingdao Hongrui Electric Power Engineering Consulting Co., Ltd., Qingdao 266100, China)

Abstract: As a frequently inundated region in Nanjing, Guangzhou Road and its surrounding area were selected as the study site in which a one-dimensional storm flood model was built based on SWMM. The inundation induced by the storm event occurred in July 18th, 2011 was simulated using the measured rainstorm data. The function relationship between the total cumulative inundation volume and the maximum inundation depth was fitted, and the starting and lasting time of the inundation and the maximum inundation depth were calculated, which were compared to the inundation induced by the design storm with 100-year return period in Nanjing. The results reveal that the fast calculation method for the maximum inundation depth proposed in this paper can dynamically calculate the inundation induced by the storm in July 18th with high simulation accuracy, which can timely and effectively support flood control and drainage emergency decision-making. Compared with the storm in July 18th, the maximum inundation depth and the lasting time of inundation remarkably increase under the condition of the design storm with 100-year return period.

Key words: SWMM model; urban waterlogging; storm in July 18th; design rainstorm; Nanjing City

近年来,随着经济的发展,城市化进程快速推进,人类活动极大地改变了天然的水文循环过程,使得汛期降水量异常增大,城市不透水面积不断扩大,导致城市内涝灾害问题频发^[1-4],对人民生命财产安全和城市的正常运行构成严重威胁,因此受到了很多相关学者的关注并致力于城市暴雨内涝模拟^[5-11]。目前,应用较为广泛的是美国环保署^[12-13]于 1981 年推出的 SWMM 模型,其适用性已在世界范围内得到验证^[14-17]。但作为一维雨洪模型,SWMM 只能模拟得到内涝节点、积水区域、溢流水量,并不能动态地描述地面淹水深度的变化。为了克服单纯使用 SWMM 模型的不足,许多学者结合 GIS 空间分析功能^[18],开展对城市暴雨积水深度的模拟研究。黄国如等^[19-20]以海口市海甸岛片区为研究区,提出基于 SWMM 和 GIS 的暴雨积水计算方法,对不同设计暴雨过程进行了模拟。李智等^[21]以

象山县中心城区为研究对象,利用 GIS 对 SWMM 模拟结果进行空间分析,评估了山地临海城市的排水能力。

大多数学者构建的 SWMM 与 GIS 耦合模型较为复杂,对资料要求较高,计算也相对耗时,在不能满足资料要求的条件下复杂模型的模拟精度可能受到影响。在城市防洪除涝应急决策中,及时高效地动态掌握最大积水深度至关重要。为了降低 GIS 与 SWMM 耦合计算积水深度对资料完整性和计算能力的要求,本文选取南京市鼓楼区广州路段为研究区,构建了基于 SWMM 的一维雨洪模型,结合遥感技术、GIS 技术和函数拟合技术,建立地表积水量与最大积水深度的函数关系,计算得到“7·18”暴雨地表积水开始时间、积水持续时间、最大积水深度等信息,并与模型模拟的南京市 100 年一遇设计暴雨所形成的积水过程进行比较。该方法实用高效,以较少的资料和简单的计算快速构建小范围易涝区暴雨内涝模拟模型,对暴雨积水空间分布进行实时模拟,为分析洪涝情势与风险以及制定洪涝灾害防治措施赢取宝贵时间,在短时内涝预报方面有较好的应用前景。

1 典型易涝区一维雨洪模型构建与验证

1.1 典型易涝区选择

随着南京市城市化进程的加速,人类活动导致汛期降水量异常增加。在遭遇短历时强暴雨期间,排水系统设计标准偏低使得地势相对低洼的易涝区极易发生内涝积水,严重影响交通出行,威胁到人民生命财产安全^[22]。根据南京市易涝点 2011—2016 年最大积水深度统计资料,并综合考虑对居民生活、交通出行的影响程度后,选择鼓楼区上海路至宁海路之间的广州路段为典型易涝区(图 1,其中红色线包围区域为研究区)开展“7·18”暴雨积水模拟研究。利用易涝区排水管网的 CAD 图纸,数字化后得到研究区的外边界。研究区域闭合,总面积



图 1 南京市广州路易涝区域示意图

0.622 km²,设有一处排水口,雨水由此自流至秦淮河。研究区总体地势低洼,不透水面积占比大,易发生内涝现象。

1.2 易涝区一维雨洪模型构建

Huber 等^[23]于 1976 年建立了最早的雨洪模型——SWMM Level 1,在此基础上美国环保署^[24]于 1998 年推出相对完整版本的 SWMM 模型。SWMM 模型是一个动态的降雨-径流模型,适用于水文水力条件比较复杂,以管渠排水为主的城市区域。广州路易涝区一维雨洪模型的构建包括子流域概化、地表产流计算、地表汇流演算、管网汇流计算 4 个方面。

鉴于研究区地形起伏较为平坦,基于分辨率为 5 m 的 DEM,利用传统 GIS 方法生成的子汇水区一般形状破碎,再加上城市地区的各种管网会大大改变自然的汇水路径,从而显著影响集水区的划分。因此本文在以检查井为节点,采用泰森多边形划分法得到的子汇水区的基础上,根据研究区管网的排水路径、地形条件和实际汇水情况等对子汇水区进行综合修改,得到 132 个子汇水区(图 2)。

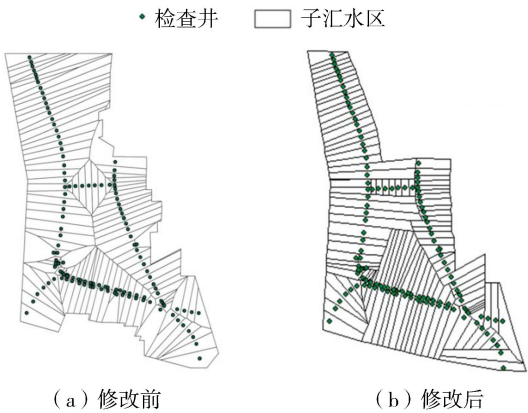


图 2 泰森多边形生成子汇水区

在 GIS 中提取 SWMM 模型所需的子汇水区、管网、检查井的地理位置信息。对于子汇水区来说,首先寻找多边形的顶点,然后提取各个顶点的坐标,最终得到各个子汇水区的形状坐标。

地表产流计算是 SWMM 模型的重要模块之一。在进行地表产流计算时将每个子汇水区分分为透水区、有洼蓄能力的不透水区和无洼蓄的不透水区 3 种类型,基于霍顿产流理论分别对 3 种类型的子汇水区计算地表产流量,然后通过面积加权得到汇水区的产流量^[12-13]。对于透水区,在忽略雨期蒸发的情况下,降雨量减去下渗量,也就是净雨量满足洼蓄量后产生地表径流。本文采用霍顿下渗公式推求下渗过程。

地表汇流演算是 SWMM 模型汇流模块的一个重要组成部分。3 种类型子汇水区的地表产流量均

通过非线性水库法演算到汇水区出口,最后相加得到汇水区的径流出流过程^[12-13]。

管网汇流计算是 SWMM 模型汇流模块的另一个重要组成部分。SWMM 的管网汇流计算的解法有稳定流解法、运动波解法和动力波解法,其中后两种方法的本质就是求解简化或完整的圣维南方程组^[24]。本文采用动力波解法。

1.3 资料收集与处理

1.3.1 暴雨资料

根据南京市城管局统计的近几年主城区积水档案及实测暴雨资料,2011 年 7 月 18 日 8:00—18:30,南京主城区遭受到一次强降雨过程,个别地区最大降水量达到 260 mm,13:00—16:30 的平均降水量约 80 mm。鉴于“7·18”暴雨给南京带来了较为严重的内涝灾害,选取该场暴雨资料用于率定模型。

收集 2011 年 7 月 18 日 12:00—18:00 自记雨量计记录的次暴雨资料,以 5 min 间隔隔取降水数据(图 3)。该次暴雨在 14:35—14:50 期间,暴雨雨强明显增大,5 分钟时段降水量达到了 5 mm 以上。

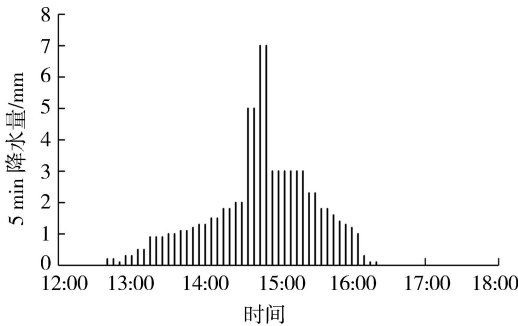


图 3 南京主城区 2011 年“7·18”暴雨过程

1.3.2 数字高程数据与管网资料

数字高程数据(DEM)为分辨率为 5 m 的高精度 DEM;管网数据采用实际的完整的管网资料,利用 GIS 提取相关信息。

1.4 子汇水区特征参数计算

各个子汇水区的面积和平均坡度可通过 GIS 直接获得。根据研究区的土地利用类型,将道路、房屋及硬化地面当作不透水面积进行统计。子汇水区的特征宽度采用面积除以流长计算。这里的流长为最长的坡面流路径即子汇水区检查井到多边形边界的最长距离。

1.5 模型参数确定

模型参数包括透水面积注蓄量、不透水面积注蓄量、透水面积糙率系数、不透水面积糙率系数、管道的糙率系数、霍顿下渗参数等。结合研究区实际情况以及相关文献^[25],参考 SWMM 手册给出的推荐值,首先确定模型的参数初始值,再依据暴雨、积水实

测资料进行调整,得到模型参数取值如表 1 所示。

表 1 SWMM 模型参数取值

注蓄量/mm		糙率系数		霍顿下渗参数		
透水区	不透水区	透水地表	不透水地表	管道	初始下渗率/(mm·h ⁻¹)	稳渗率/(mm·h ⁻¹)
7.62	2.00	0.32	0.011~0.013	0.015	105.74	31.5
					衰减系数/h ⁻¹	
					1.94	

1.6 暴雨积水模拟

地表产汇流计算的时间步长为 5 min,但在管网汇流计算时,为保证水动力学计算模块运行的稳定性,时间步长设定为 1 s,并将地表汇流的计算成果按需进行内插。应用暴雨积水模型计算得到暴雨过程中研究区的主要溢流节点(图 4)。在“7·18”暴雨过程中,溢流节点主要集中在南京住建委大楼至南京脑科医院之间的路段,模拟的积水点分布范围与实际内涝区域较为吻合,说明所构建的模型能较好地模拟计算研究区的暴雨积水分布情况。

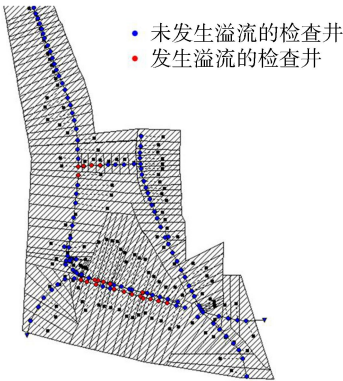


图 4 某时刻溢流节点示意图

一维雨洪模型只能模拟得到内涝节点、积水区域、溢流量,但不能动态描述地面的淹没深度变化情况。考虑到城市暴雨积水档案记录的通常是最大积水深度,有必要将模拟得到的地面积水水量转化为最大积水深度,通过和实测最大积水深度的比较,率定和验证模型。

若基于分辨率为 5 m 的高精度 DEM 可以建立溢流量与最大积水深度的简单函数关系,就能根据模拟计算得到的积水量获得最大积水深度的动态变化。根据实际调查和模型模拟得到的溢流节点分布情况,重点关注位于研究区南部的南京住建委大楼至南京脑科医院之间的低洼路段,选其作为研究区易涝点。首先利用 DEM 生成易涝点 TIN 模型,并通过 ArcGIS 生成等高线,结果如图 5 所示。

借助 ArcGIS,可以求出相应高程下的积水体积,结果见表 2。因为我们关心的是易涝区的平均积水情况,直接从最低点起算最大积水深是不合适的,例如,75 m³ 的水量显然不足以使易涝区最大积水深度达 0.3 m,因此这部分体积作为填注量考虑

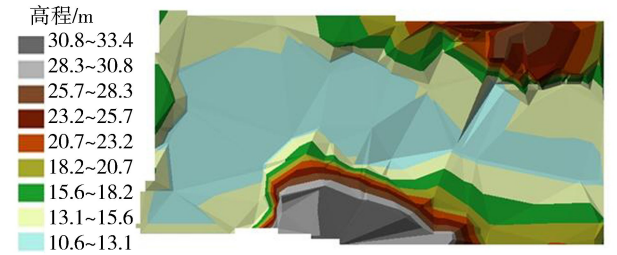


图5 研究区易涝点 TIN 模型

更加合适。根据各个子汇水区的特征参数,计算得到易涝区填洼部分的体积为 673 m³。因此选取高程 12.1 m 为最大积水深的计算起点,将该基准面以下部分的体积作为填洼量扣除。

表2 易涝点高程-体积-最大积水深关系

高程/m	体积/m ³	最大积水深/m	高程/m	体积/m ³	最大积水深/m
11.0	15	0	12.5	1908	0.4
11.3	75	0	12.6	2858	0.5
11.5	156	0	12.7	4493	0.6
11.8	363	0	12.8	6716	0.7
12.0	572	0	12.9	9404	0.8
12.1	702	0	13.0	12498	0.9
12.2	851	0.1	13.1	15938	1.0
12.3	1043	0.2	13.2	19698	1.1
12.4	1357	0.3			

在 MATLAB 中分别用 2 次多项式、3 次多项式以及幂函数拟合地表积水量与最大积水深的关系,计算 3 个拟合函数的拟合误差 (SSE)、均方根误差 (RMSE) 以及方程的确定性系数 (R^2)。由表 3 可知,幂函数的拟合误差、均方根误差最小,方程的确定系数最接近 1,拟合效果最好。基于幂函数的拟合方程如下:

$$h = -14.92V^{-0.02463} + 12.77 \tag{1}$$

式中: V 为积水体积, m³; h 为最大积水深, m。

表3 不同函数拟合效果统计

函数	误差平方和	均方根误差	确定性系数
2次多项式	0.0853	0.0974	0.9403
3次多项式	0.0424	0.0728	0.9703
幂函数	0.0132	0.0383	0.9907

集成 GIS 技术和函数拟合技术,基于式(1),以最简便的方法和最小的计算量得到比溢流量等更直观的暴雨最大积水深度动态变化过程(图 6),避免了对资料要求高的三维雨洪模型的应用。依据图 6,可以得到模拟的最大积水深度、积水开始时间和积水持续时间如表 4 所示。

由表 4 可知,模拟的“7·18”暴雨下最大积水深度、积水开始时间及积水持续时间均与实际的积水情况接近,说明构建的模型具有较高的模拟精度。严格来讲,应该收集更多场次暴雨及相应的积水信息对模型进行验证,但由于暴雨积水的信息往往记

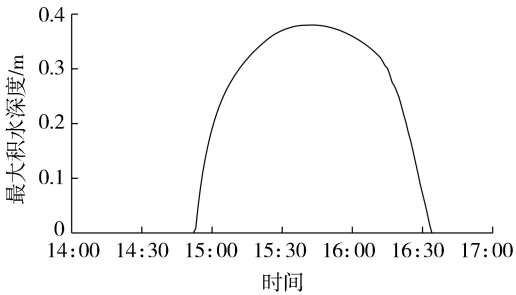


图6 “7·18”暴雨下的最大积水深度过程

表4 “7·18”暴雨积水过程模拟结果

事件分类	最大积水深度/m	积水开始时刻	积水持续时间/min
真实情况	0.40	14:30	90
模拟情况	0.38	14:49	104

载不全,很难获得更多场次的资料。鉴于 SWMM 模型已广泛应用于国内不同城市的内涝积水模拟,其在研究区所取得的成果合理可信。模型可以依据预测的降雨对研究区内涝积水进行预测预报。

2 模拟结果与分析

鉴于“7·18”实测暴雨降雨主要集中在 12:40 到 16:10,历时 3.5 h,本次研究采用《江苏省暴雨参数图集》^[26] 推荐的内插公式由历时 1 h 和 6 h 的 100 年一遇的设计暴雨量推求得到研究区历时 3.5 h、重现期为 100 年的设计暴雨量。参考《江苏省暴雨参数图集》推荐的内插方法,历时 3.5 h 的 100 年一遇设计点暴雨量的计算公式为:

$$H_{3.5} = 3.5^{1-n} H_1 \tag{2}$$

$$n = 1 - 1.2851 \lg(H_6/H_1) \tag{3}$$

式中: H_1 、 $H_{3.5}$ 、 H_6 分别为历时 1 h、3.5 h、6 h 的 100 年一遇设计点暴雨量; n 为设计暴雨递减指数。

依据上式计算得到研究区历时 3.5 h 的 100 年一遇设计暴雨量为 182.2 mm。鉴于研究区面积较小,故选用研究区中心点暴雨参数计算得到的设计点暴雨量代表设计面暴雨量。采用芝加哥雨型对设计暴雨量进行时程分配,其中雨型峰值比例取 0.33,得到研究区历时 3.5 h 的 100 年一遇设计暴雨过程如图 7 所示。

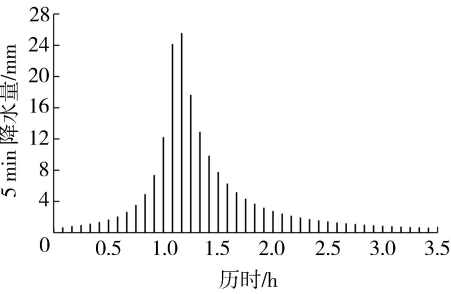


图7 100 年一遇设计暴雨过程

运用模型计算得到 100 年一遇设计暴雨下最大积水深度变化过程(图 8)。可以看出,易涝区若遇 100 年一遇设计暴雨,最大积水深度达 0.92 m,积水持续时间约 4.5 h。

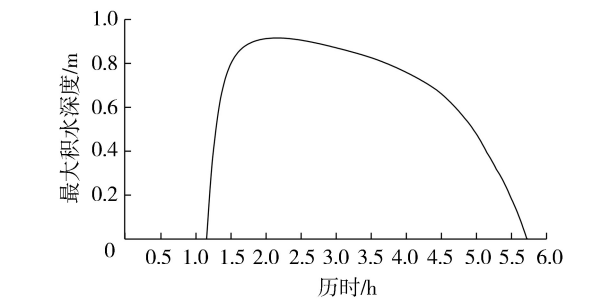


图 8 100 年一遇设计暴雨下的最大积水深度过程

为了更加直观地分析不同暴雨条件下积水情况,将各类情景下的积水信息进行统计整理如表 5 所示。由表 5 可知,相较于“7·18”暴雨,100 年一遇设计暴雨产生的最大积水深度高出 0.54 m,积水持续时间多 170 min,积水深度超过 0.3 m 的时长多 182 min。“7·18”暴雨未形成水深超过 0.4 m 的积水,而 100 年一遇设计暴雨下积水超过该深度的持续时间长达 234 min。因此,100 年一遇暴雨形成的内涝情况更为严重,造成的社会经济损失更为巨大,应引起社会各界的高度关注。

表 5 不同暴雨情景下积水信息统计

暴雨 条件	最大积 水深度/ m	积水持 续时间/ min	积水水深超过某深度的时长/min					
			0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	0.7 m
“7·18” 暴雨	0.38	104	83	64	0	0	0	0
100 年一遇 设计暴雨	0.92	274	257	246	234	220	202	176

3 结 语

以南京市宁海路至上海路之间的广州路段为研究对象,构建基于 SWMM 的一维雨洪模型,利用南京市 2011 年“7·18”实测暴雨和历时 3.5 h 的 100 年一遇设计暴雨资料,模拟暴雨形成的内涝情况,建立地表积水量与最大积水深度的函数关系,计算得到最大积水深度的动态变化过程。结果表明:提出的快速推算最大积水深度的方法能够较高精度地实时动态计算“7·18”暴雨形成的积水过程,为制定防洪除涝应急措施提供及时有效的决策支撑;建立的地表积水量与最大积水深度的函数关系能直观反映研究区积水开始时间、积水持续时间和最大积水深度,突破了一维模型的局限性;与“7·18”暴雨积水相比,历时 3.5 h 的 100 年一遇设计暴雨形成的最大积水深度高出 0.54 m,积水持续时间多 170 min,积水深度超过 0.3 m 的时长多 182 min。

参考文献:

[1] 张存杰,黄大鹏,刘昌义,等. IPCC 第五次评估报告气候变化对人类福祉影响的新认知[J]. 气候变化研究进展,2014,10 (4): 246-250. (ZHANG Cunjie, HUANG Dapeng, LIU Changyi, et al. IPCC AR5 updated understanding of climate change impacts on human well-beings[J]. Climate Change Research,2014,10 (4): 246-250. (in Chinese))

[2] 曹永强,袁立婷,王飞龙. 基于文献计量学的洪涝灾害研究现状及发展趋势分析[J]. 水利经济,2018,36 (4): 33-39. (CAO Yongqiang, YUAN Liting, WANG Feilong. Current research situation and development trend of flood and waterlogging disasters based on bibliometrics [J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36 (4): 33-39. (in Chinese))

[3] 张鑫,王嘉鑫,王全蓉. 洪水灾害的风险特征及保险制度设计[J]. 水利经济,2018,36 (5): 57-60. (ZHANG Xin,WANG Jiaxin,WANG Quanrong. Risk characteristics of flood disasters and design of insurance system [J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36 (5): 57-60. (in Chinese))

[4] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护,2017,33 (2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection,2017,33 (2): 13-15. (in Chinese))

[5] 刘为. 基于 GIS 的城市暴雨积水模拟预测方法及应用研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

[6] 尹占娥,许世远,殷杰,等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报,2010,65 (5): 553-562. (YIN Zhan'e, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65 (5): 553-562. (in Chinese))

[7] 张冬冬,严登华,王义成,等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学,2014,21 (1): 144-149. (ZHANG Dongdong, YAN Denghua, WANG Yicheng,et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 21 (1): 144-149. (in Chinese))

[8] 刘曾美,郑志勤,陈斯达,等. 南方感潮地区水库的挖潜改造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46 (2): 122-127. (LIU Zengmei, ZHENG Zhiqin, CHEN Sida, et al. Study on unearthing and developing the potentialities of a reservoir for the flood detention and storage in the southern tidal area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (2): 122-127. (in

- Chinese))
- [9] 王加虎,梁菊平,李丽,等. 基于 DEM 的城市易涝点集水特征提取与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(5):390-394. (WANG Jiahu, LIANG Juping, LI Li, et al. Deriving and application of the catchment characteristics for urban flood point based on DEM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46 (5): 390-394. (in Chinese))
 - [10] 洪国平,万君,柳晶辉,等. 武汉城区短历时暴雨内涝数值模拟研究[J]. 暴雨灾害, 2018, 37 (1): 83-89. (HONG Guoping, WAN Jun, LIU Jinghui, et al. Rainstorm waterlogging research on numerical simulation for short-duration in the urban area of Wuhan [J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37 (1): 83-89. (in Chinese))
 - [11] HARTNETT M, NASH S. High-resolution flood modeling of urban areas using MSN-Flood[J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(3): 175-183.
 - [12] HUBER W C, HEANEY J P, NIX S J, et al. Storm water management model user's manual[M]. 3rd ed. Georgia: US Environmental Protection Agency, 1984.
 - [13] HUBER W C, DICKINSON R E. Storm water management model user's manual[M]. 4th ed. Georgia: US Environmental Protection Agency, 1988.
 - [14] 石赟赟,万东辉,陈黎,等. 基于 GIS 和 SWMM 的城市暴雨内涝淹没模拟分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32 (6): 57-60. (SHI Yunyun, WAN Donghui, CHEN Li, et al. Simulation of rainstorm waterlogging and submergence in urban areas based on GIS and SWMM [J]. Water Resources and Power, 2014, 32 (6): 57-60. (in Chinese))
 - [15] 李翠梅,罗贤达,黄锐. 基于 SWMM 的低冲击开发雨洪控制过程模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42 (2): 144-147. (LI Cuimei, LUO Xianda, HUANG Rui. Simulation of low impact development of storm-water control process based on SWMM[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42 (2): 144-147. (in Chinese))
 - [16] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33 (2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2): 31-36. (in Chinese))
 - [17] 陈虹,李家科,李亚娇,等. 暴雨洪水管理模型 SWMM 的研究及应用进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43 (12): 225-234. (CHEN Hong, LI Jiake, LI Yajiao, et al. Progress on research and application of storm water management model (SWMM) [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science), 2015, 43 (12): 225-234. (in Chinese))
 - [18] 罗清元,刘丽娜,张成才. 基于 GIS 和 RS 的蓄滞洪区和谐发展的技术路线[J]. 水利经济, 2018, 36 (4): 55-57. (LUO Qingyuan, LIU Lina, ZHANG Chengcai. Technology roadmap of harmonious development for flood storage and detention basins based on GIS and RS [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36 (4): 55-57. (in Chinese))
 - [19] 黄国如,黄维,张灵敏,等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26 (4): 1-6. (HUANG Guoru, HUANG Wei, ZHANG Lingmin, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26 (4): 1-6. (in Chinese))
 - [20] 吴海春,黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32 (5): 11-16. (WU Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (5): 11-16. (in Chinese))
 - [21] 李智,窦玉颖,王昊,等. 基于 GIS 和 SWMM 的山地临海城市内涝模拟分析:以象山县为例[J]. 水利水电技术, 2016, 47 (9): 143-147. (LI Zhi, DOU Yunying, WANG Hao, et al. GIS and SWMM-based simulative analysis on waterlogging in coastal and mountainous cities: by taking Xiangshan County as a case [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47 (9): 143-147. (in Chinese))
 - [22] 林昕,刘嘉熙. 南京市水资源利用效率研究[J]. 水利经济, 2017, 35 (5): 23-27. (LIN Xin, LIU Jiayi. Utilization efficiency of water resources in Nanjing City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35 (5): 23-27. (in Chinese))
 - [23] HUBER W C, SINGH V P. EPA storm water management model: SWMM [J]. Computer Models of Watershed Hydrology, 1995(1):1-5.
 - [24] MCCUEN R H, JOHNSON P A, RAGAN R M. Highway hydrology[M]. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, 2002.
 - [25] LEWIS A R. Storm water management model user's manual[M]. 5th ed. Washington DC: USEPA, 2009.
 - [26] 江苏省水文水资源勘测局. 江苏省暴雨参数图集[R]. 南京:江苏省水文水资源勘测局, 2005.

(收稿日期:2018-09-25 编辑:郑孝宇)