

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0111

李鹏,徐宗学,赵刚,等.基于SWMM与LISFLOOD-FP模型的城市暴雨内涝模拟:以济南市为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1083-1092. LI P, XU Z X, ZHAO G, et al. Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: Case study in Jinan City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6):1083-1092. (in Chinese)

# 基于SWMM与LISFLOOD-FP模型的城市暴雨内涝模拟

——以济南市为例

李鹏<sup>1</sup>,徐宗学<sup>1</sup>,赵刚<sup>2</sup>,左斌斌<sup>1</sup>,王京晶<sup>1</sup>,宋苏林<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院,城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京 100875;  
2. 布里斯托大学地理科学学院 英国布里斯托, BS8 1SS; 3. 济南市水文局, 济南 250013)

**摘要:**将开源的SWMM一维管网模型与半开源的LISFLOOD-FP二维水动力模型耦合,对济南市黄台桥流域进行暴雨内涝模拟,基于实测场次降水、流量及淹没情况对模型进行率定与验证。统计分析20130723实测场次降水和不同重现期设计降水下研究区溢流节点分布和地表淹没情况,并分析其原因,得出以下结论:20130723实测场次暴雨模拟结果表明耦合模型在研究区具有较好的适用性,可以用于城市流域暴雨内涝的模拟;随着降水重现期的增加,溢流节点数目及各个淹没水深范围的面积均呈增加趋势,总淹没面积从8.18 km<sup>2</sup>增加到21.92 km<sup>2</sup>,其中水深范围在0.1~1.0 m的淹没面积占比最大。研究探索城市流域尺度的暴雨内涝模拟,相关结果可为研究区防洪减灾工作提供一定的科技支撑。

**关键词:**暴雨;内涝;耦合;SWMM;LISFLOOD-FP;济南市

中图分类号:TV124;P338 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



改革开放以来,我国经济社会发展迅速,城市化进程不断加剧,引发了以水资源短缺、城市暴雨内涝、水环境污染及水生态破坏等为代表的一系列城市水问题<sup>[1-3]</sup>。由短历时强暴雨造成的城市内涝问题尤其显著,其造成的灾害损失大、影响范围广,已成为社会和科学界广泛关注的焦点<sup>[4-5]</sup>。根据住房和城乡建设部统计,2008—2010年全国62%的城市发生过内涝事件,其中137个城市遭受内涝事件超过3次<sup>[6]</sup>。研究<sup>[7-8]</sup>表明,城市暴雨内涝事件有两方面的原因:一方面气候变暖和城市化改变了局地的降水过程,增加了短历时强降水在城市区域发生的概率;另一方面城市化造成透水面积急剧减少,洪峰

流量增大,峰现时间提前,加之城市排水能力滞后<sup>[9-11]</sup>,更加剧了城市暴雨内涝的影响。在此背景下,加强城市暴雨内涝研究并提出相应的防灾减灾对策具有重要的现实意义。

城市暴雨内涝模拟技术是目前应对突发暴雨内涝灾害的有效手段,同时,也是合理规划城市布局并制定相应治理城市内涝措施的主要工具<sup>[12-13]</sup>。自20世纪50年代以来,国外就开始了城市雨洪模型的开发工作,并取得了许多重要进展,为城市防洪规划、排水管道设计与管理提供了有利条件。其中最具有代表性的模型有英国华霖富公司推出的InfoWorks ICM、美国环保署开发的SWMM、丹麦水力研究所开

收稿日期:2021-06-01 修回日期:2021-09-03 网络出版时间:2021-09-23

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210920.0151.002.html

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1502701);城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室研究生创新基金(HYD2021IFDC01)

作者简介:李鹏(1994—),男,河北邯郸人,博士研究生,主要从事城市暴雨内涝模拟研究。E-mail:pli@bnu.edu.cn

通信作者:徐宗学(1962—),男,山东淄博人,教授,博士生导师,主要从事城市水文学研究。E-mail:zxu@bnu.edu.cn

发的 MIKE 系列模型和加拿大水力计算研究所基于 SWMM 研发的 PCSWMM 模型等<sup>[14]</sup>。其中,SWMM 模型对管网汇流计算表现良好,但缺乏二维地表汇流模块,无法实现对淹没范围和水深的模拟,而一些商业软件虽然可以实现一维水动力与二维水动力耦合模拟,但费用昂贵<sup>[15]</sup>。国内对于城市雨洪模型的研发工作起步较晚,1990 年岑国平<sup>[16]</sup>开发出我国第一个城市雨水径流计算模型 SSCM,随后诞生出一系列城市雨洪模型,然而我国还需要在高集成度和良好界面等方面进一步探索<sup>[17]</sup>。在众多开源或半开源的二维水动力模型中,LISFLOOD-FP 模型因其计算效率较高而使用较为广泛<sup>[18-20]</sup>。国内对 LISFLOOD-FP 的使用相对较少:曾照洋等<sup>[21]</sup>使用 LISFLOOD-FP 对东莞市某区域进行了二维洪涝模拟,认为耦合模型在研究区具有一定的适用性;吴旭树<sup>[22]</sup>对东莞市某小区开展了暴雨内涝危险性研究,取得了较好的模拟效果。

济南市由于其气候与地理位置特点,易遭受暴雨内涝灾害,对人民生命财产安全造成了严重威胁<sup>[23-24]</sup>。伴随城市化的迅速发展,济南市原有的透水地表硬化,蓄滞洪区被开发利用,对城市防洪排涝工作造成了很大的挑战。国内众多学者开展了济南市暴雨内涝的模拟研究工作,取得了大量成果。程涛等<sup>[25-26]</sup>基于 InfoWorks ICM 建立了济南市海绵城市示范区一维管网模型,分析了内涝产生的原因,

并进一步构建二维淹没模型,模拟分析了不同降雨情景下海绵示范区的淹没过程。王世旭<sup>[27]</sup>利用 MIKE FLOOD 对济南市主城区雨洪事件进行了模拟,并划分了灾害风险分区。然而,这些商业软件价格较高,而且对于济南市中较大流域的内涝过程的模拟相对较少。

本文利用 SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型各自的优势,耦合研究区一维管网和二维淹没模型,采用历史降雨、洪水流量摘录数据和淹没情况资料对模型进行率定与验证,分析不同暴雨情景下的研究区溢流节点分布特征、淹没水深及范围,以期为济南市防洪减灾提供一定的科技支撑。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源及处理

本文研究对象为济南市黄台桥流域,位于济南市中西部,包含济南市中心城区、西北郊区和南部山区,地势由东南向西北逐渐坦化,详细情况见图 1。研究区边界以济南市水文局所提供的黄台桥流域边界为参考,并基于地形图及城区影像手动调整,总面积约 300 km<sup>2</sup>。研究所使用的管网资料、场次暴雨积水资料来源于济南市水文局与历史新闻报道;研究区数字高程模型(DEM)来源于 BIGMAP 地图下载器,分辨率为 5 m,为了提高计算效率,将其重采样为 10 m 分辨率。

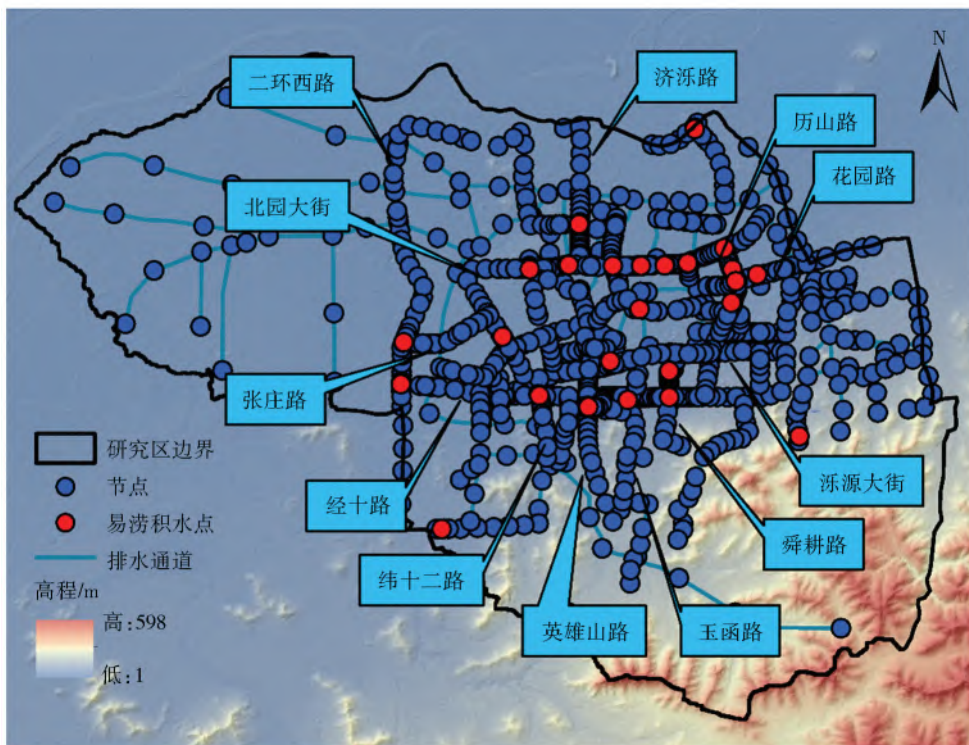


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

## 1.2 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型简介

SWMM 模型于 1971 年由美国环保署开发,并经历了多次完善与升级,最新版本为 SWMM5.1,可以实现地表产汇流模拟、管网一维水动力模拟及水质模拟。其中,地表产流模块可选择 3 种方法(Horton、Green-Ampt、SCS 径流曲线)模拟下渗过程,地表汇流采用非线性水库法,管网一维水动力可选择运动波或动力波模拟。SWMM 模型在城市排水系统模拟中适用性良好,并且具有简便、易上手及开源的特点,在城市排水系统中得到了广泛应用<sup>[28-30]</sup>。

LISFLOOD-FP 模型是由英国布里斯托大学开发的洪水淹没二维水动力模型,它以正方形栅格为计算单元,可以实现一维河道及二维洪泛区水动力模拟。LISFLOOD-FP 为半开源模型,其可执行文件可在网站(<http://www.bristol.ac.uk/geography/research/hydrology/models/lisflood/>)获取。研究<sup>[31]</sup>表明,在经过改进后,LISFLOOD-FP 模型可用于城市区域,其构建难度不大,计算效率较快,并且能够模拟积水过程。然而,LISFLOOD-FP 模型在我国的运用相对较少。

LISFLOOD-FP 模型的一维河道求解器包括运动波求解器和扩散波求解器,其本质都是简化的一维圣维南方程组:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$S_0 - \frac{n^2 R^{4/3} Q^2}{A^{10/3}} - \left[ \frac{\partial h}{\partial x} \right] = 0 \quad (2)$$

式中: $Q$  为河道流量,  $m^3/s$ ;  $A$  为河道过水断面面积,  $m^2$ ;  $q$  为侧向入流量,  $m^3/s$ ;  $S_0$  为河床坡度;  $n$  为曼宁粗糙系数;  $R$  为湿周,  $m$ ;  $h$  为水深,  $m$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $x$  为距固定断面距离,  $m$ 。

二维洪泛区求解器包括汇流求解器(Routing)、限流求解器(Flow-limited)、自适应求解器(Adaptive)、加速求解器(Acceleration)和 Roe 求解器。同样,将水流运动过程离散在正方形网格上,用连续性方程和动量方程描述:

$$\frac{dh_{i,j}}{dt} = \frac{Q_{x_{i-1,j}} - Q_{x_{i,j}} + Q_{y_{i,j-1}} - Q_{y_{i,j}}}{\Delta x \Delta y} \quad (3)$$

$$Q_{x_{i,j}} = \frac{h_{flow}^{5/3}}{n} \left( \frac{h_{i-1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} \right)^{1/2} \Delta y \quad (4)$$

式中: $h_{i,j}$  为  $i, j$  网格交界处的自由水面高度,  $m$ ;  $\Delta x, \Delta y$  为网格尺寸,  $m$ ;  $n$  为曼宁粗糙系数;  $Q_x, Q_y$  描述网格间流量,  $m^3/s$ ,  $Q_y$  与式(4)相似;  $h_{flow}$  为水深,  $m$ , 表示两个网格间水流深。

## 1.3 模型耦合原理

模型耦合方式可分为单向耦合与双向耦合。单

向耦合是将第 1 个模型运行结果作为第 2 个模型的驱动数据;而双向耦合是通过修改模型源代码使得模型间在特定时间步长内运行并交换数据。

由于 LISFLOOD-FP 模型不提供模型源代码,采用单向耦合方式将 SWMM 模型与 LISFLOOD-FP 模型进行耦合,以获取城市淹没过程。整体思路如下:首先,构建研究区 SWMM 模型,对于易涝积水点处的节点不做或少做概化处理;其次,基于 Pyswmm 库提取溢流节点的溢流过程;最后,将溢流节点的溢流过程作为点源边界条件驱动 LISFLOOD-FP 模型,模型求解获得淹没范围、淹没水深及过程。图 2 为耦合过程原理图。

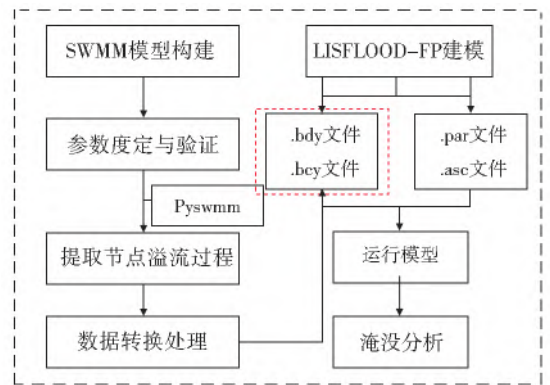


图 2 模型耦合过程原理

Fig. 2 The principle of model coupling

## 1.4 暴雨情景设计

基于芝加哥雨型计算不同重现期设计降雨,采用《济南市暴雨强度公式修订报告》中的推荐公式

$$i = \frac{1869.916(1+0.7573 \lg P)}{(t+11.0911)^{0.6645}} \quad (5)$$

式中: $i$  为降雨强度,  $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;  $P$  为重现期,  $a$ ;  $t$  为降雨历时,  $\text{min}$ 。

芝加哥雨型计算降雨峰前、峰后公式为

$$i_b = \frac{a \left[ \frac{(1-c)t_b}{r} + b \right]}{\left[ \left( \frac{t_b}{r} \right) + b \right]^{c+1}} \quad (6)$$

$$i_a = \frac{a \left[ \frac{(1-c)t_a}{1-r} + b \right]}{\left( \frac{t_a}{1-r} + b \right)^{c+1}} \quad (7)$$

式中: $i_b$  为雨峰前的降雨强度,  $\text{mm}/\text{min}$ ;  $i_a$  为雨峰后的降雨强度,  $\text{mm}/\text{min}$ ;  $t_b$  为雨峰前降雨历时,  $\text{min}$ ;  $t_a$  为雨峰后降雨历时,  $\text{min}$ ;  $a, b, c$  为设计降雨参数;  $r$  为雨峰系数。

设计降雨历时采用 2 h, 雨峰系数  $r$  取 0.5, 根据公式计算获取研究区 1 a、5 a、10 a 和 20 a 一遇的设计降雨过程, 见图 3。



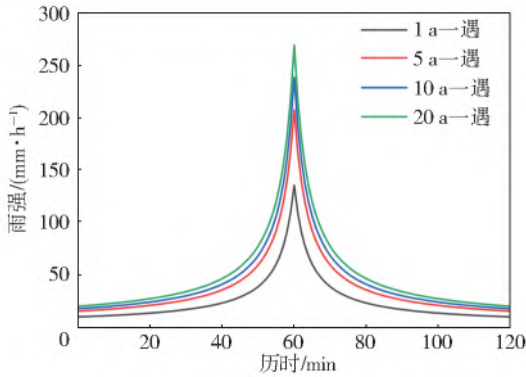


图 3 不同重现期的设计降雨过程

Fig. 3 Hydrographs of design rainfall events with different return periods

## 2 模型构建及其率定与验证

### 2.1 SWMM 模型构建

SWMM 模型的构建可概括为以下步骤:根据下垫面类型、街道及水系初步划分子汇水区;对管网及检查井数据进行概化,研究对易涝积水点处的节点概化较少,以获取较真实的溢流过程;对子汇水区进行调整,并对管网及节点数据进行拓扑检查;计算模型可获取参数,如子汇水区坡度、不透水率等,生成 SWMM 模型的 .inp 文件。研究基于 ArcGIS 软件完成以上工作,最终划分得到 477 个子汇水区,其中最大面积为 1 109.1 hm<sup>2</sup>,最小面积为 2.05 hm<sup>2</sup>,并概化为 803 个节点和 802 条排水通道,其中包括 99 条河道与 703 根管道,研究区排水口为黄台桥水文站,见图 4。

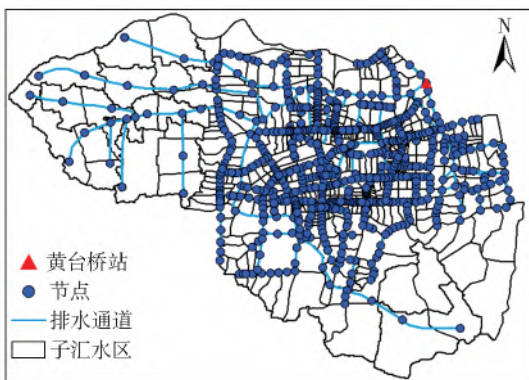


图 4 研究区 SWMM 模型概化

Fig. 4 Generalization of SWMM model in the study area

### 2.2 SWMM 模型率定与验证

SWMM 模型参数可分为两类,一为可获取参数,二为待率定参数。对于可获取参数,在 ArcGIS 平台中对其进行分区统计计算,其值较为客观,而对于待率定参数,如不透水区曼宁  $n$  值、透水区曼宁  $n$  值、管道曼宁  $n$  值、河道曼宁  $n$  值、透水区注蓄深、不透水区注蓄深以及下渗模型中的相关参数等,根据模型手册对其赋初始值,再对其进行率定。

研究采用发生于 20050630、20060731 和 20130723 三场降雨事件驱动模型,利用黄台桥水文站的流量摘录数据对模型参数进行率定和验证,其中,20050630 场次降雨与 20060731 场次降雨用于参数率定,20130723 场次降雨用于验证。参数率定结果见表 1。

表 1 模型参数率定结果

Tab. 1 Results of parameter calibration

参数	含义	取值范围	率定结果
$R_{river}$	河道糙率	0.010~0.140	0.040
$R_{pipe}$	管网糙率	0.010~0.140	0.011
$n_{imperv}$	不透水区曼宁系数	0.005~0.050	0.005
$n_{perv}$	透水区曼宁系数	0.05~0.50	0.330
$S_{imperv}/mm$	不透水区注蓄量	1~20	2.540
$S_{perv}/mm$	透水区注蓄量	1~50	7.600
$r_{max}/(mm \cdot h^{-1})$	最大入渗率	80~150	96.500
$r_{min}/(mm \cdot h^{-1})$	最小入渗率	1~50	9.300
$D$	衰减系数	1~10	5.440
$T_{dry}$	干燥时间	3~10	7.850
$K_{width}$	特征宽度系数	0.2~5.0	4.800

经过参数率定后,模拟得到的研究区出口洪水流量过程线见图 5。可知,模拟的洪水流量过程与实测的洪水流量过程分布特征较为一致,基本可以捕捉到洪水过程开始与消退的过程。通过计算误差评估指标值,率定期与验证期的纳什效率系数 NSE 均在 0.7 以上,洪峰流量相对误差 REP 在 20% 以内,满足《水文水情预报规范》的精度要求,见表 2。

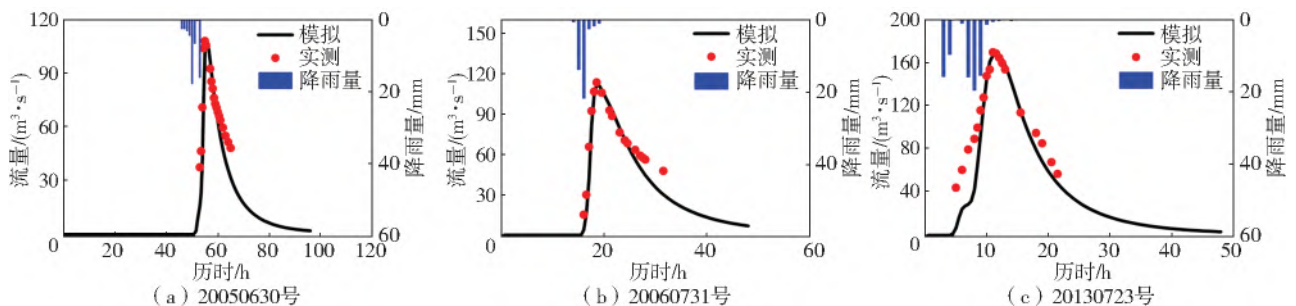


图 5 率定期(20050630 号、20060731 号)与验证期(20130723 号)洪水过程模拟结果

Fig. 5 Simulations for model calibration(NO. 20050630,NO. 20060731) and validation(NO. 20130723)

表 2 模拟结果误差统计

Tab. 2 Error statistics for simulation results

项目	场次	降雨量/mm	NSE	REP/%
率定期	20050630	53.4	0.779	0.55
	20060731	40.6	0.857	1.76
验证期	20130723	78.9	0.706	1.41

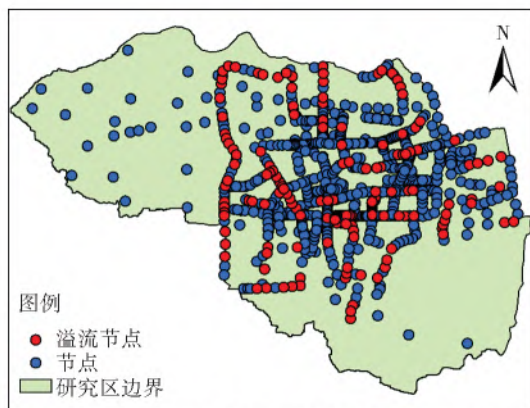
### 2.3 LISFLOOD-FP 建模及耦合处理

LISFLOOD-FP 模型所需的主要输入文件有 .asc、.par、.bci 和 .bdy 等 4 个文件。 .asc 文件为模型的地形文件,本研究将 5 m 分辨率 DEM 原始数据重采样为 10 m,以提高计算效率。为了获得更好的模拟效果,将研究区边界外小部分的 DEM 也作为模型输入。 .par 文件是模型的参数文件,包含相关输入文件、模型运行控制参数、输出位置及名称等,其格式见图 6(a)。 .bci 与 .bdy 文件是模型耦合的关键,其中 .bci 文件指定边界条件及坐标信息,本文对溢流节点采用点源边界标识符(P),其格式见图 6(b)。而 .bdy 文件指定并链接 .bci 文件中的时变边界,即各节点溢流流量过程,其格式见图 6(c)。

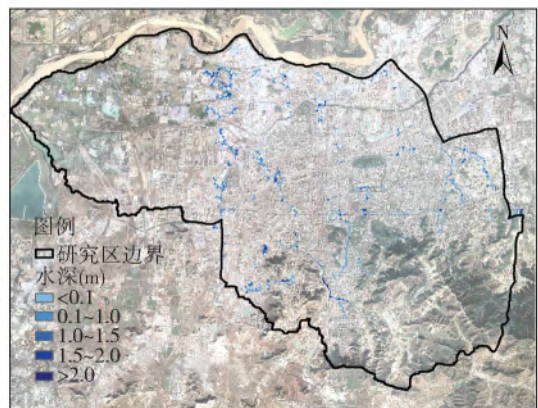
采用加速求解器(acceleration)进行二维水动力模拟,将模型所需的文件及参数写入 .par 文件中,提取 20130723 场次降水的 SWMM 模型的溢流节点编号及流量过程,分别写入 .bci 和 .bdy 文件中,完成 LISFLOOD-FP 建模及耦合工作。

### 2.4 二维模拟结果验证

根据 LISFLOOD-FP 模型输出的 .max 文件(最大积水深度),绘制模拟淹没效果图,见图 7(b)。



(a) 实测降水溢流节点分布



(b) 地表淹没范围

图 7 实测降水溢流节点分布(a)和地表淹没范围(b)

Fig. 7 Distribution of flooding nodes (a) and 2D simulation inundation results (b) using observed rainfall

## 3 结果与分析

基于 SWMM 模型模拟结果,分析 20130723 实测降水场次和不同重现期设计降水下的溢流节点数量及其空间分布特征。同时,借助 ArcGIS 平台,基

于统计计算,总淹没面积为 6.71 km<sup>2</sup>。同时,从图中可以看出,二环西路与张庄路交叉口、二环西路与经十路交叉口、纬十二路与经十路交叉口附近、玉函路与经十路交叉口、舜耕路与经十路交叉口附近、历山路与北园大街交叉口、经十路与舜耕路交叉口等易涝积水点都出现了不同程度的内涝情况。同时,二环西路与张庄路交叉口的实测最大水深为 0.34 m,与模拟结果的范围(0.1~1.0 m)较为相符。因此,可以认为 LISFLOOD-FP 模型的二维模拟结果能够反映实际易涝点情况,具有较好的模拟精度。

注释行		注释行		
DEMfile	dem.asc	J100		
resroot	rst	4	seconds	
dirroot	result	0.20	0	
bcifile	test.bci	0.50	1800	
bdyfile	test.bdy	0.90	3600	
sim_time	3600	0.50	5400	
mas sint	360	J101		
saveint	100	4	seconds	
fpfric	曼宁 n 值	0.40	0	
initial_tstep	初始步长	0.60	1800	
acceleration	采用求解器	1.10	3600	
		0.70	5400	
		.....		
(a) .par 文件格式		(c) .bdy 文件格式		
标识符号	X坐标	Y坐标	边界条件类型	节点号
P	498971.67	4062063.71	QVAR	J100
P	498976.53	4062379.02	QVAR	J101
.....				
(b) .bci 文件格式				

图 6 模型文件格式

Fig. 6 The format of model file

于 LISFLOOD-FP 二维模拟结果,分析实测降水和不同重现期设计降水下的地表淹没情况。

### 3.1 实测降水模拟结果分析

图 7 为 20130723 实测降水模拟结果。经过统计,发生溢流的节点有 147 个,占总节点数的 18.3%,



溢流节点主要分布在二环西路、纬十二路、经十路、泺源大街、北园大街和济泺路,其他路段的溢流节点较少(见图 7(a))。根据实际调研的易涝积水点位置可知,以上这些路段分布较多易涝点,可再次证明 SWMM 模型的模拟结果具有较好的精度。

从图 7(b)可以看出,淹没范围与实际易涝积水点位置较为相符,证明了构建的 LISFLOOD-FP 模型在研究区适用性较好。经统计,各水深范围的淹没面积分别为 2.23、3.48、0.53、0.25 和 0.22 km<sup>2</sup>。然而,模拟结果还存在一些相对不合理的地方,如有

些积水位置为地势低洼的河道,城市区域中河道一般会设置河堤来预防洪水漫堤情况的发生,因此较难出现地表水流涌入河道的情况。这主要与模型采用的 DEM 数据有关,如果能对 DEM 数据进行进一步加工处理,模拟结果将更能贴近实际地表淹没过程。

### 3.2 设计降水模拟结果分析

基于不同重现期设计降水模拟结果,统计分析设计降水条件下节点溢流及地表淹没情况,结果见图 8、图 9 和表 3。

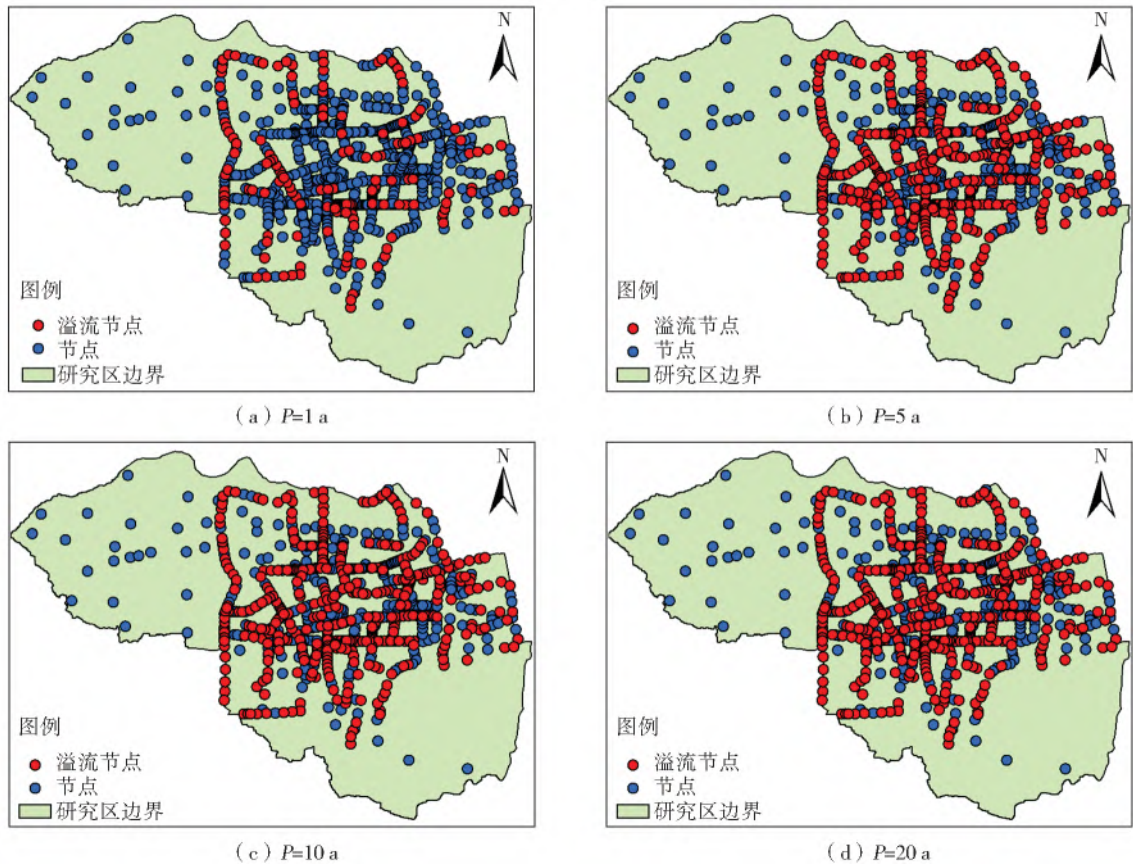


图 8 不同重现期设计降水溢流节点分布

Fig. 8 Distribution of flooding nodes simulated by rainfalls with different return periods

结合图 8 和表 3,在溢流节点数目方面,随着降水重现期的增大,溢流节点的数目呈现明显的上升趋势,当降水从 1 a 一遇上升到 20 a 一遇时,溢流节点个数从 148 个增加到 414 个,增加了近 1.8 倍。值得注意的是,重现期从 1 a 到 5 a 的溢流节点增加比例最高,溢流节点占比从 18.4% 增加到 46.2%,增加了 27.8%,而从 5 a 一遇到 10 a 一遇和从 10 a 一遇到 20 a 一遇,溢流节点占比仅分别增加了 4.1% 和 1.3%,这可能跟节点的概化结果有一定关系。同时,从溢流节点占比可以推断,济南市排水能力存在一定的滞后现象。在溢流节点分布方面,二环西路、北园大街、经十路、纬十二路和济泺路在重现期为 1 a 时溢流节点较多,随着重现期的提高,北

园大街、张庄路、花园路、泺源大街和英雄山路的溢流节点数目明显增加。

结合图 9 和表 3,随着降水重现期的增大,降水量由 52.88 mm 增加到 104.98 mm,各个淹没水深范围的面积均有所增加,总淹没面积从 8.18 km<sup>2</sup> 增加到 21.92 km<sup>2</sup>,增幅近 1.7 倍。在不同重现期降水下,淹没水深范围在 0.1~1.0 m 的面积占比最大,其次是小于 0.1 m 的水深范围,而水深超过 1.0 m 的淹没面积相对较小。水深范围在 1.5~2.0 m 的淹没面积从 0.33 km<sup>2</sup> 增加到 0.92 km<sup>2</sup>,超过 2.0 m 水深的淹没范围从 0.34 km<sup>2</sup> 增加到 1.01 km<sup>2</sup>,相关决策者应加强对该范围内的暴雨内涝预警工作。



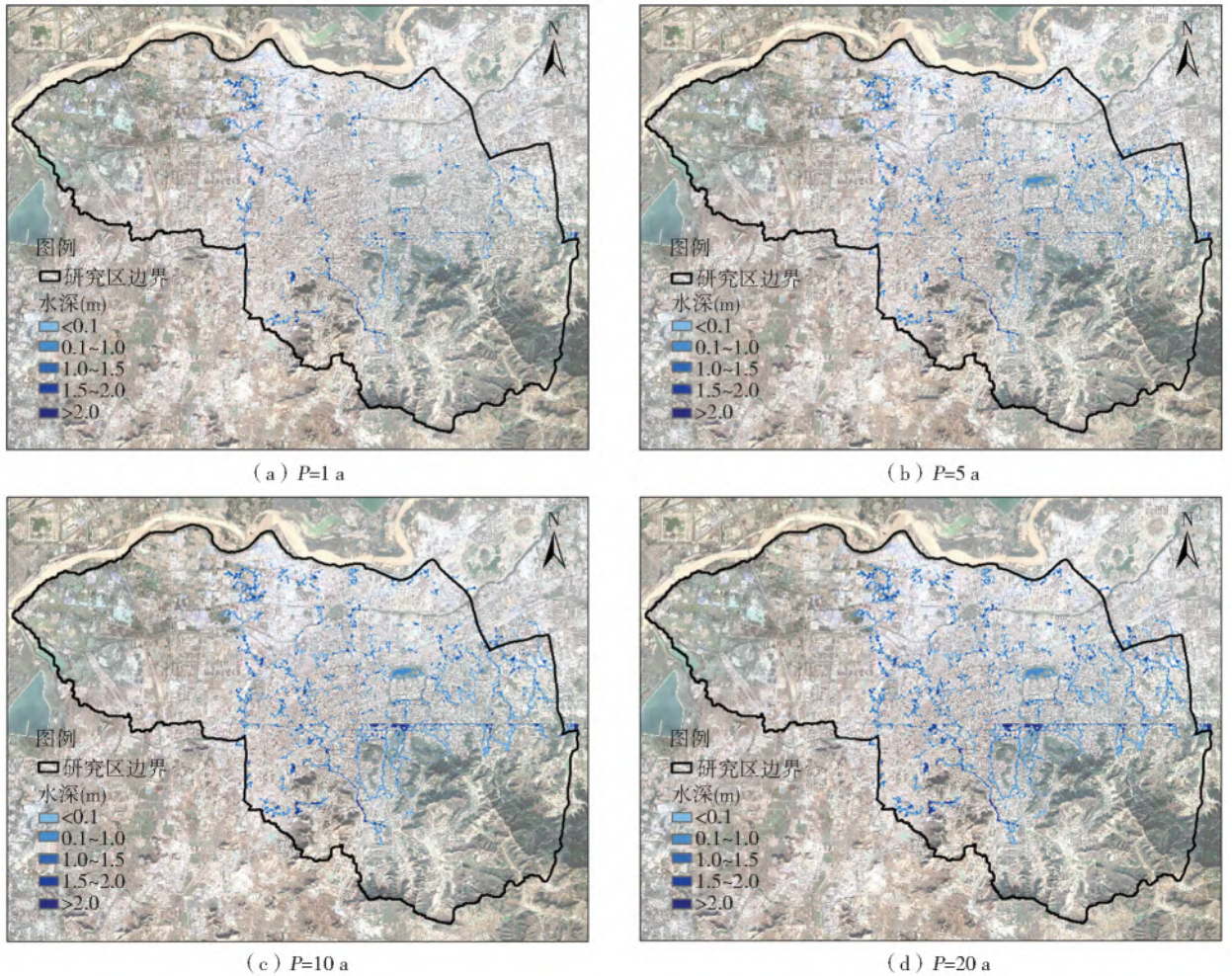


图9 不同重现期设计降水地表淹没范围

Fig. 9 2D simulation inundation results by using rainfalls with different return periods

表3 不同重现期设计降水节点溢流及地表淹没情况

Tab. 3 Flooding nodes and inundation results under rainfalls with different return periods

重现期/ a	降水量/ mm	最大降水强度/ ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	溢流节点个数 及比例	水深范围/m					总淹没面积/ $\text{km}^2$
				<0.1	0.1~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0	
1	52.88	135.79	148(18.4%)	2.53	4.27	0.71	0.33	0.34	8.18
5	80.87	207.67	371(46.2%)	4.52	7.26	1.07	0.45	0.37	13.67
10	92.93	238.62	404(50.3%)	5.91	10.51	1.59	0.74	0.74	19.49
20	104.98	269.58	414(51.6%)	6.09	11.97	1.93	0.92	1.01	21.92

当重现期达到 5 a 一遇时,研究区大部分街道都存在不同程度的淹没情况,说明研究区排水能力的不足,对于 5 a 一遇的降水已不堪重负。另外,二维模拟结果显示,一些地势低洼的河道和城区湖泊存在积水现象,这可能与输入的 DEM 数据有关,这些地方的 DEM 较低,在二维模拟计算时,雨水从高地漫流到这些地势低洼的地方。实际上,城市规划建设中会对河道和湖泊等地方进行加提处理,很少存在地表水流入河道和湖泊的情况,因此,进一步精细化处理 DEM 数据可更好地反映实际地表淹没过程。

## 4 结论

以济南市黄台桥流域为例,构建了 SWMM 一维管网模型与 LISFLOOD-FP 二维地表淹没模型,并实现了 2 个模型间的单向耦合。使用实测降水径流及淹没情况对模型进行率定与验证,并利用 1 a、5 a、10 a 和 20 a 一遇的设计降水模拟分析研究区节点溢流及地表淹没情况,主要结论如下:

(1) SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型模拟结果显示,模拟结果可以较好地反映研究区易涝积水点的位置,二环西路与张庄路交叉口处大部分网

格的淹没水深为0.1~1.0 m,实际监测的最大水深0.34 m在该范围内,表明耦合模型在研究区的适用性较好,可运用此模型开展相关研究工作。

(2)随着设计降水重现期的增加,研究区的溢流节点及淹没范围呈现明显增加趋势。当设计降水重现期从1 a增加到5 a时,研究区的溢流节点增加最多,同时主要街道均出现不同程度的淹没情况,5 a一遇设计降水已使得研究区存在较为严重的内涝状况,表明研究区排水能力存在一定滞后现象。

(3)LISFLOOD-FP二维模拟结果显示,研究区中一些河道和湖泊等地势低洼地区存在积水情况,与实际情况存在一定差异,原因可能与输入的DEM数据精度有一定关系,对于这种情况,进一步精细化处理研究区DEM数据可以更好地刻画实际地表淹没过程。

#### 参考文献(References):

- [1] 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 J Y, WANG Y T, HE R M, 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)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.001.
- [2] 宋全香,左其亭,杨峰.城市化建设带来的水问题及解决措施[J].水资源与水工程学报,2004(1):56-58. (SONG Q X, ZUO Q T, YANG F. Water problems brought out by citifying construction and measures[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2004(1): 56-58. (in Chinese)) DOI: 1672-643X(2004)01-0056-03.
- [3] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J].水利学报,2019,50(1):53-61. (XU Z X, CHENG T. Basic theory for urban water management and sponge city-review on urban hydrology[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20181056.
- [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 S F. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 13-15. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;SZYB.0.2017-02-003.
- [5] 朱思诚,任希岩.关于城市内涝问题的思考[J].行政管理改革,2011(11):62-66. (ZHU S C, REN X Y. Thinking about the problem of urban waterlogging[J]. *Administration Reform*, 2011(11): 62-66. (in Chinese)) DOI: Doi: 10.14150/j.cnki.1674-7453.2011.11.003.
- [6] 陈秀洪,刘丙军,陈刚.城市化建设对降水特征的影响[J].自然资源学报,2017,32(9):1591-1601. (CHEN X H, LIU B J, CHEN G. Effects of urbanization on precipitation characteristics [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1591-1601. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;ZRZX.0.2017-09-012.
- [7] 李鹏,徐宗学,张瑞,等.济南市极端降水特性与雨岛效应分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(6):822-830. (LI P, XU Z X, ZHANG R, et al. Extreme precipitation and rainfall island effect in Jinan City[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(6): 822-830. (in Chinese)) DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020139.
- [8] 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 P Q, WANG Z L, ZENG Z Y, 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)) DOI: 10.11660/slfdbx.20200907.
- [9] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战:I.城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605. (ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environmental: I. Hydrological response to urbanization[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.04.020.
- [10] 徐光来,许有鹏,徐宏亮.城市化水文效应研究进展[J].自然资源学报,2010,25(12):2171-2178. (XU G L, XU Y P, XU H L. Advance in hydrologic process response to urbanization [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2171-2178. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;ZRZX.0.2010-12-018.
- [11] 仇劲卫,李娜,程晓陶,等.天津市城区暴雨内涝仿真模拟系统[J].水利学报,2000(11):34-42. (QIU J W, LI N, CHENG X T, et al. The simulation system for heavy rainfall in Tianjin City[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(11): 34-42. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2000.11.006.
- [12] 解以扬,李大鸣,李培彦,等.城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J].水科学进展,2005(3):384-390. (XIE Y Y, LI D M, LI P Y, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm waterlogging [J]. *Advances in Water Science*, 2005(3): 384-390. (in Chinese)) DOI: CNKI;SUN;SKXJ.0.2005-03-013.



- [13] ZOPPOU C. Review of urban storm water models[J]. Environmental Modelling and Software, 2001, 16(3): 195-231. DOI:10.1016/S1364-8152(00)00084-0.
- [14] 夏军,张印,梁昌梅,等.城市雨洪模型研究综述[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(2):95-105. (XIA J, ZHANG Y, LIANG C M, et al. Review on urban storm water models[J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Science), 2018, 51(2): 95-105. (in Chinese)) DOI: 10.14188/j.1671-8844.2018-02-001.
- [15] 李建勇. Infoworks ICM 在城市排水系统分析中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(8): 21-24. (LI J Y. Application of Infoworks ICM in analysis of urban drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(8): 21-24. (in Chinese)) DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2014.08.006.
- [16] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. 水利学报, 1990(10): 68-75. (CEN G P. A model to simulate storm-water runoff in urban area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(10): 68-75. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SLXB. 0. 1990-10-010.
- [17] 王海潮,陈建刚,张书函,等.城市雨洪模型应用现状及对比分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(11): 10-13. (WANG H C, CHEN J G, ZHANG S H, et al. Application status and comparative analysis of urban storm water models [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(11): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.11.005.
- [18] BATES P D, DAWSON R J, HALL J W, et al. Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications [J]. Coastal Engineering, 2005, 52(9): 793-810. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.06.001.
- [19] HUNTER N M, BATES P D, NEELZ S, et al. Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding [J]. Water Management, 2008, 161(1): 13-30. DOI: 10.1680/wama.2008.161.1.13.
- [20] SOSA J, SAMPSON C, SMITH A, et al. A toolbox to quickly prepare flood inundation models for LISFLOOD-FP simulations [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 123(1): 104561. 1-104561. 9. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104561.
- [21] 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 Z Y, WANG Z L, WU X S, et al. Rainstorm waterlogging simulations based on SWMM and LISFLOOD models [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(5): 68-77. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SFXB. 0. 2017-05-010.
- [22] 吴旭树. 变化环境下珠江三角洲地区暴雨内涝危险性时空演变研究:以东莞市典型小区为例[D]. 广州:华南理工大学, 2016. (WU X S. Research on spatiotemporal variability of urban waterlogging hazards in the Pearl River Delta under changing environment: A case study in a typical district, Dongguan [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [23] 徐帮树,贾超,王育奎,等.城市防汛预警决策支持系统研究及应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(2): 167-172. (XU B S, JIA C, WANG Y K, et al. Study of urban early-warning decision-making support system of flood control and its application [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(2): 167-172. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDGY. 0. 2011-02-034.
- [24] 胡伟贤. 山前平原型城市雨洪模型构建及应用研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2010. (HU W X. Research on the development of storm water model and its application in piedmont cities [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [25] 程涛,徐宗学,宋苏林.济南市海绵城市建设兴隆示范区降雨径流模拟[J]. 水力发电学报, 2017, 36(6): 1-11. (CHENG T, XU Z X, SONG S L. Rainfall-runoff simulations for Xinglong sponge city pilot area of Jinan [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(6): 1-11. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SFXB. 0. 2017-06-001.
- [26] 程涛,徐宗学,洪思扬,等.济南市山前平原区暴雨内涝模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 246-253, 148. (CHENG T, XU Z X, HONG S Y, et al. Simulating rainstorm waterlog in piedmont plains in Jinan City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2): 246-253, 148. (in Chinese)) DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2018.02.016.
- [27] 王世旭. 基于 MIKE FLOOD 的济南市雨洪模拟及其应用研究[D]. 济南:山东师范大学, 2015. (WANG S X. The study of simulation and application of rainwater and flood based on MIKE FLOOD model in Jinan City [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015. (in Chinese))
- [28] 郭禹含,王中根,姜爱华,等.济南主城区不透水地表分布分析及其水文效应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 87-96. (GUO Y H, WANG Z G, JIANG A H, et al. Analysis of the impervious land surface pattern distribution and its hydrological effects in the main urban area of Jinan [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Tech-

- nology, 2020, 18(4): 87-96. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0075.
- [29] 李家科, 李亚, 沈冰, 等. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 60-67. (LI J K, LI Y, SHEN B, et al. Simulation of rain garden effects in urbanized area based on SWMM[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(4): 60-67. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SFXB. 0. 2014-04-010.
- [30] 姜体胜, 孙艳伟, 杨忠山, 等. 基于 SWMM 的不同降水量对城市降雨径流 TSS 的影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(5): 55-58. (JIANG T S, SUN Y W, YANG Z S, et al. Simulation of urban runoff quality based on Stormwater Management Model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 55-58. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.05055.
- [31] 刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述[J]. 地理科学进展, 2015, 34(4): 494-504. (LIU Y, ZHANG S Y, LIU L, et al. Research on urban flood simulation; a review from the smart city perspective[J]. Progress in Geography, 2015, 34(4): 494-504. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DLKJ. 0. 2015-04-012.

### Simulation of urban rainstorm waterlogging processes based on SWMM and LISFLOOD-FP models: Case study in Jinan City

LI Peng<sup>1</sup>, XU Zongxue<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>2</sup>, ZUO Binbin<sup>1</sup>, WANG Jingjing<sup>1</sup>, SONG Sulin<sup>3</sup>

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 2. School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol BS8 1SS, England; 3. Jinan Hydrology Bureau, Jinan 250014, China)

**Abstract:** The process of urbanization continue to intensify due to China's rapid economic and social development, resulting in a series of urban water problems, such as the shortage of water resources, urban rainstorm waterlogging, water environmental pollution and water ecological damage. Urban waterlogging problem caused by short-term rainstorms is particularly significant, which causes great losses and has a wide range of impact, and has become the focus of social and scientific circles.

Based on the advantages of the SWMM model and LISFLOOD-FP model, coupling one-dimensional pipe network and two-dimensional inundation model, calibration and verification was carried out using historical rainfall, flood flow extract data, and inundation data to analyze the distribution characteristics of overflow nodes, inundation depth and range under different rainstorm scenarios to provide some scientific and technological support for flood control and disaster reduction in Jinan City.

Validation of coupling model showed good applicability in the study area; With the increase of precipitation return period, the number of flooding nodes and water depth range of inundation showed an increasing trend. The total inundation area increased from 8.18 km<sup>2</sup> to 21.92 km<sup>2</sup>, and the inundation area with a water depth range of 0.1-1.0 m showed the largest proportion. The results can provide scientific and technological support for flood control and disaster reduction in the study area.

The simulation results of the SWMM and LISFLOOD-FP coupling model show the location of waterlogging prone points in the study area. The submergence depth of most grids at the intersection of 2nd Ring West Road and Zhanghuang Road is between 0.1 m and 1.0 m, and the maximum water depth monitored is 0.34 m, which indicates that the coupling model has good applicability. The model can be used to carry out relevant research work. With the increase of design precipitation return period, the overflow node and inundation range show a significant increasing trend. When the design precipitation return period increases from 1 year to 5 years, the overflow nodes increase the most, and the main streets are flooded to varying degrees. The 5-year return period design precipitation has caused serious waterlogging, which indicates that the drainage capacity of the study area lags. LISFLOOD-FP two-dimensional simulation results show that there is water accumulation in some low-lying areas such as rivers and lakes in the study area, which is different from the actual situation. The reason may be related to the accuracy of input DEM data. In this case, further fine processing of DEM data can better describe the actual surface flooding process.

**Key words:** rainstorm; waterlogging; coupling; SWMM; LISFLOOD-FP; Jinan City