

基于 TELEMAC-2D 模型的济南市洪涝模拟及淹没分析

李国一^{1,2}, 邵薇薇², 刘家宏², 宋天旭², 付潇然³

(1. 山东农业工程学院国土资源与测绘工程学院, 山东 济南 250100; 2. 中国水利水电科学研究院
流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要: 基于 TELEMAC-2D 模型构建了济南市洪涝仿真模型, 选取济南市“20070718”实测典型暴雨城市内涝淹没资料对模型进行了验证, 结果表明模拟水深误差较小, 模型具有较高的精度和可靠性。采用构建的模型模拟了不同暴雨重现期下济南市主城区的洪涝演进过程, 并分析了研究区淹没水深、淹没面积和洪水流速等特征, 结果表明: 随着降雨重现期的增大, 研究区淹没水深大于 0.15 m 的面积在总面积中的占比随之增大, 当降雨重现期分别为 1、5、10、20、50、100 a 时, 面积占比分别为 0.05%、1.10%、1.98%、2.89%、4.28%、5.15%, 最大洪水流速分别为 0.478、1.019、1.309、1.494、1.890、2.214 m/s; 根据洪涝淹没特征, 从工程和非工程措施两方面提出了防洪排涝应对举措。

关键词: 城市内涝; 洪涝模拟; TELEMAC-2D 模型; 济南市

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)05-0046-07

Flood simulation and inundation analysis in Ji'nan City based on TELEMAC-2D model//LI Guoyi^{1,2}, SHAO Weiwei², LIU Jiahong², SONG Tianxu², FU Xiaoran³ (1. School of Land and Resources, Surveying and Mapping Engineering, Shandong Agricultural and Engineering University, Ji'nan 250100, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. National Institute of Nature Hazard, Ministry of Emergence Management of China, Beijing 100085, China)

Abstract: A flood simulation model of Ji'nan City was constructed based on the TELEMAC-2D model, and the inundation data of a typical rainstorm of “20070718” in Ji'nan City were selected to validate the model. The results show that the error of simulated water depth is small, indicating that the constructed urban flood simulation model has high accuracy and reliability in flood simulation. The flooding evolution processes under different rainfall return periods were simulated, and the submerged depth, inundated area, and flood velocity in the study area were analyzed. The simulation results show that, with the increase of the rainfall return period, the ratio of area with water depth greater than 0.15 m to the total area also increases. For the rainfall return period of 1, 5, 10, 20, 50, and 100 years, the area ratios were 0.05%, 1.10%, 1.98%, 2.89%, 4.28%, and 5.15%, respectively, and the maximum flood velocities were 0.478, 1.019, 1.309, 1.494, 1.890, and 2.214 m/s, respectively. Based on the characteristics of flood inundation, engineering and non-engineering measures for urban flood prevention and drainage in Ji'nan City were proposed.

Key words: urban waterlogging; flood simulation; TELEMAC-2D model; Ji'nan City

自然灾害给人类社会带来严重的生命威胁和巨大的经济损失。从全球范围来看, 2000—2019 年共发生自然灾害事件 7 348 次, 造成约 120 万人死亡, 40.3 亿人受到不同程度的影响, 经济损失约 2.97 万亿美元, 其中洪涝灾害事件发生次数最多, 占比为 44%, 受灾人口和经济损失远超其他自然灾害事件^[1]。洪涝灾害发生频率上升, 对世界各国社

会稳定 and 经济发展构成了巨大威胁。

20 世纪 90 年代以来, 我国城镇化发展进程不断加快, 加之全球气候变化, 导致原有自然水循环过程发生巨变^[2], 城市“雨岛效应”和“热岛效应”凸显^[3], 使得我国暴雨洪涝灾害发生的频率和强度均有增加的趋势, 洪涝灾害造成的损失进一步增大, 已成为影响社会稳定和发展的主要自然灾害。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3090600, 2022YFE0205200); 国家自然科学基金项目(52192671); 中国水利水电科学研究院
基本科研业务费专项资金资助项目(WR110145B0022022); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金项目(SKL2022TS11)

作者简介: 李国一(1992—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 1969687116@qq.com

通信作者: 邵薇薇(1981—), 女, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: shaoww@iwhr.com

《中国水旱灾害公报 2018》中指出,2000—2018 年我国因洪涝灾害死亡 21 720 人,直接经济损失约 31 639.52 亿元,华中、华南和华东是洪涝灾害事件发生的主要区域。国家住房和城乡建设部对我国 351 个城市的调查结果显示,213 个城市发生过积水内涝事件,占比为 62%,其中,137 个城市发生内涝积水灾害的次数超过 3 次,“逢雨必涝”“城市看海”等是我国亟须解决的重大问题^[4]。2023 年 7 月,在台风“杜苏芮”的影响下,华北地区发生特大暴雨,河北、北京多站均突破历史记录,京津冀地区出现严重洪涝、泥石流和城市内涝等灾害,受灾人口约 100 万人,造成了重大人员伤亡和财产损失^[5];2021 年 7 月 17—23 日,河南省遭遇罕见特大暴雨袭击,引发极为严重的城市内涝灾害,其中郑州市死亡 380 人,直接经济损失高达 409 亿元^[6-7]。城市洪涝灾害频发已成为威胁中国社会安全稳定的突出问题之一,也是制约社会经济发展的重要因素。系统、科学地认识城市洪涝致灾机理,提高城市洪涝灾害风险评估精度,是城市防灾减灾的基础和核心,也是城市水文学的热点问题之一。

开展城市洪涝仿真模拟是城市防洪除涝的关键技术之一,国内外专家在城市洪涝模拟方法和基础理论研究方面开展了大量研究,尤其随着计算机技术的高速发展,城市洪涝数值仿真模型的应用愈加广泛,计算效率更加高效。叶陈雷等^[8]基于 SWMM (storm water management model) 和 InfoWorks ICM (integrated catchment manage) 模型构建城市街区尺度洪涝仿真模型,分析了不同降雨重现期下的淹没过程;梅超等^[9]以上海市中心城区为例构建城市内涝数值模型,模拟了不同降雨重现期下道路淹没与车速衰减之间的关系;王兆礼等^[10]对 TELEMAC-2D 模型和 SWMM 进行耦合,并将耦合模型应用于广州长湴地区城市内涝模拟。

本文采用 TELEMAC-2D 模型对山东省济南市主城区进行暴雨洪涝模拟,开展不同设计暴雨情景下的城市内涝特征分析研究,提出城市防洪排涝应对举措,以为济南市城市洪涝防灾减灾工作提供参考。

1 研究区概况

济南市 (36° 01' N ~ 37° 32' N, 116° 11' E ~ 117° 44' E) 地处山东省中西部地区,地势南高北低,其特殊的地形地貌构造使得境内泉水资源极其丰富,自古有“泉城”之美誉。济南市属于暖温带大陆性季风气候,一年四季分明,年均气温 13.6℃,年均降水量为 614 mm,降雨空间分布呈现由南向北递减的趋势^[11],暴雨事件主要集中在夏季 7、8 月,占暴

雨总量的 80% 以上,暴雨历时多为 12 h 以内^[12]。截至 2022 年,济南市常住人口 941.5 万人,城镇化率 74.3%,地区生产总值超 1.2 万亿元,济南市一旦发生暴雨洪涝灾害,极易造成严重的损失。本文以济南市主城区为研究对象,包括历下区、市中区、槐荫区、天桥区和历城区,面积共计 2 094 km²,研究区概况如图 1 所示。

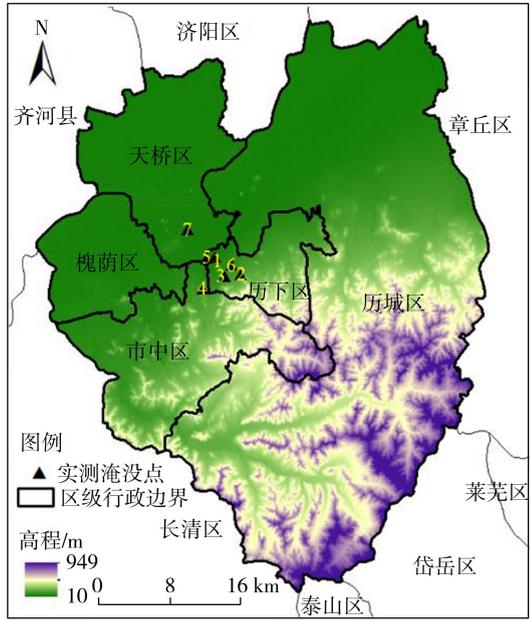


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 TELEMAC-2D 模型构建与验证

TELEMAC-MASCARET 系统是由法国国家水力学与环境实验室开发的用于模拟河流、河口和海岸水动力、泥沙、水质和生态等的一维、二维和三维开源模型系统,主要基于有限单元法和有限体积法进行数值求解。TELEMAC-MASCARET 模型由咨询机构和研究机构共同管理(www.opentelemac.org)^[13],在河流、海洋和湖泊科学等研究领域有广泛的应用,而 TELEMAC-2D 模型是其中一个二维水动力计算模块,可进行降雨产汇流计算,广泛应用于海岸等大范围风暴潮模拟^[14-15],也逐渐应用在中国城市内涝、水库溃坝等方面^[16-18]。

2.1 设计暴雨情景

根据《济南市暴雨强度公式修订报告》中推荐的暴雨强度公式,考虑到短历时强降雨对城市内涝危害最大,采用短历时暴雨强度公式(式(1))生成设计暴雨情景。基于国际上常用的芝加哥雨型对设计降雨过程进行分配,得到雨峰系数 $r=0.4$,重现期分别为 1、5、10、20、50、100 a,降雨总量分别为 53.00、81.04、93.12、105.20、121.17、133.25 mm,共计 6 场短历时设计暴雨,降雨历时均为 120 min。

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

式中： i 为降雨强度； P 为重现期； t 为降雨历时。

2.2 模型构建

基于 TELEMAC-2D 模型进行城市洪涝数值模拟分析,使用 ArcGIS 软件对研究区高程数据、土壤类型数据和土地利用类型数据进行整合,利用 BlueKenue 软件将研究区划分为非结构化三角形网格,网格边长为 90 m,共计 591973 个网格、282420 个节点。模型边界条件设置为自由出流边界条件,即降雨过后的地表积水仅在重力作用下外排,假设初始地表无积水,前期土壤含水量为中等情况,库朗数设置为 0.75。设定降雨持续时间为 120 min,模拟时长为 360 min,时间步长为 0.5 s,在对排水管网进行科学概化的基础上,建立研究区二维洪涝仿真模型。

高程数据通过地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 下载,精度为 30 m×30 m。使用 ArcGIS 软件中的水文分析工具对原始高程数据进行预处理,主要包括洼地填充等。土壤类型数据来源于寒区旱区科学数据中心(westdc.westgis.ac.cn),根据世界土壤数据库和美国 SCS(soil conservation service)模型土壤分类标准,将研究区内土壤分为 B、C 和 D 3 类。土地利用类型基于 ENVI (environment for visualizing images) 模型对高程数据进行遥感解译得到,根据研究需要分为耕地、林地、草地、水体和不透水面 5 类。对不同土地利用类型赋予不同曼宁系数,其中耕地为 0.035、林地为 0.15、草地为 0.035、水体为 0.015,不透水面为 0.20。通过查阅美国农业部 TR-55 手册中的 CN(curve numbers) 值表,结合土地利用类型和土壤水文分组结果,确定本次模拟中 CN 取值,如表 1 所示,研究区下垫面分布如图 2 所示。

表 1 不同土地利用类型和土壤水文分组的 CN 值

Table 1 CN values for different land use types and soil hydrological groups

土壤类型	耕地	林地	草地	水体	不透水面
B	78	60	69	98	98
C	85	73	79	100	98
D	89	79	84	100	98

2.3 模型验证

为了验证所构建的城市洪涝仿真模型的可靠性和准确性,基于收集到的实测降雨资料和积水资料对模型进行验证。选取济南市“20070718”典型暴雨过程进行模拟,对模拟结果与实际调查结果进行对比分析,其中,典型降雨过程和实际调查数据均来自于文献[19]。实测降雨过程如图 3 所示,洪涝模拟结果如图 4 所示,模型模拟结果与实测点位淹没水深对比如

表 2 所示,可见采用洪涝仿真模型得到的淹没水深误差较小,表明该模型具有较高的精度和可靠性。

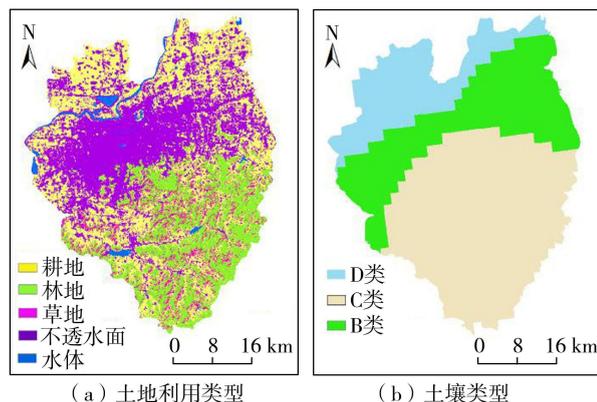


图 2 研究区下垫面分布

Fig. 2 Subsurface distribution in study area

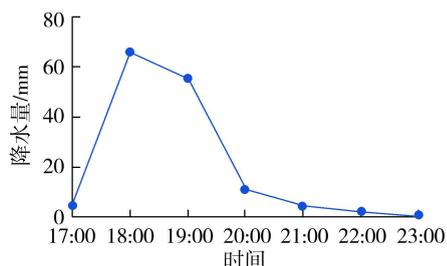


图 3 “20070718”典型暴雨实测降雨过程

Fig. 3 Measured rainfall process of typical rainstorm “20070718”

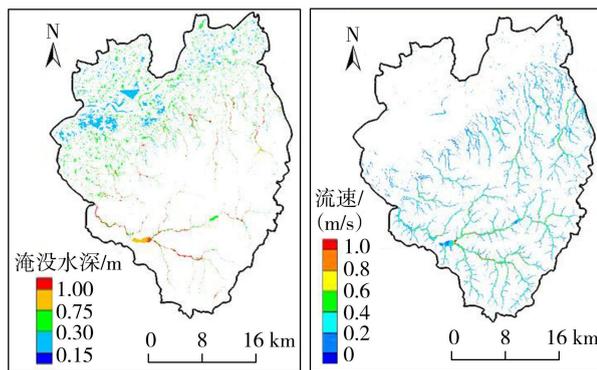


图 4 “20070718”典型暴雨洪涝模拟结果

Fig. 4 Flood simulation results of typical rainstorm “20070718”

表 2 “20070718”典型暴雨过程验证结果

Table 2 Verification results for typical rainstorm process of “20070718”

序号	位置	实测水深/m	模拟水深/m	误差/m
1	趵突泉街道办事处	0.5	0.38	-0.12
2	经十路山师东路	0.5	0.42	-0.08
3	经十路舜耕路交会处	0.4	0.41	0.01
4	刘长山路建设路路口	1.0	0.85	-0.15
5	顺河西街馆驿街路口	0.5	0.46	-0.04
6	文化西路千佛山路口	0.5	0.33	-0.17
7	济南市市立四院	0.2	0.13	-0.07

3 洪涝淹没分析

3.1 淹没水深和淹没面积

在进行城市洪涝模拟分析时,洪水淹没水深和淹没面积是常用的洪涝指标。依据 GB51222—2017《城镇内涝防治技术规范》、GB50014—2021《室外排水设计标准》等设计规范和文献^[20-21],根据对行人和车辆的影响程度,对不同洪水淹没水深进行等级划分。当淹没水深不超过 0.15 m 时,认为积水深度不会对行人和车辆造成影响;当淹没水深处于 0.15~0.3 m 范围时,积水深度会影响行人通行和车辆行驶速度,但通常不会造成人员伤亡和财产损失;当淹没水深处于 0.3~0.5 m 范围时,认为积水深度会对行人和车辆产生较大影响,可能造成人员伤亡和财产损失;当淹没水深超过 0.5 m 时,认为积水深度会影响正常的社会活动,发生人员伤亡和财产损失的概率增大,建议居家不外出。不同设计降雨情景下淹没水深如图 5 所示,随着降雨重现期的增大,最大淹没水深和淹没面积不断增加。不同设计降雨情景下,产生积水的位置具有一致性,主要分布在研究区北部,其主要原因是研究区地势南高北低,且北部地区多为城市建设用地,导致水流在该区域内聚集。不同设计降雨情景下积水总量和淹没面积如表 3 所示,当降雨重现期分别为 1, 5, 10, 20, 50, 100 a 时,研究区内积水总量不断增大,水深超过 0.15 m 的淹没面积不断增加,占研究区总面积的比值不断上升。

表 3 不同设计降雨情景下积水总量和淹没面积

Table 3 Total volumen of water logging and inundated area in different design rainfall scenarios

重现期/a	积水总量/万 m ³	淹没面积/km ²	面积占比/%
1	5 744	1.03	0.05
5	10 151	23.04	1.10
10	12 167	41.45	1.98
20	14 234	60.56	2.89
50	17 031	89.68	4.28
100	19 186	107.77	5.15

3.2 洪水流速

在进行城市洪涝灾害分析时,通常主要关注洪水淹没水深、积水历时和淹没面积等因素,对洪水流速的分析相对较少,而洪水流速也会对行人安全造成很大影响^[22-27],本文对研究区内的洪水流速进行系统分析。经过降雨、蒸发和下渗等过程后形成地面径流,水的流动主要受地形影响,流速和方向与地形和坡度密切相关。图 6 为不同设计降雨情景下洪水流速分布,当流速小于 0.1 m/s 时,不在图中显示,表 4 统计了洪水流速情况。由图 6 和表 4 可知,随着降雨重现期的增大,最大洪水流速相应增大,研究区内洪水流速大于 0.2 m/s 的面积持续增加,最大流速出现在研究区南部多山地区,此地区洪水流速较大,应尽量减少户外运动,避免出现人员伤亡事故;对于研究区北部城市地区,由于地势相对平缓,洪水流速相对较小,此时应结合淹没水深、积水历时等因素综合研判洪涝灾害风险。

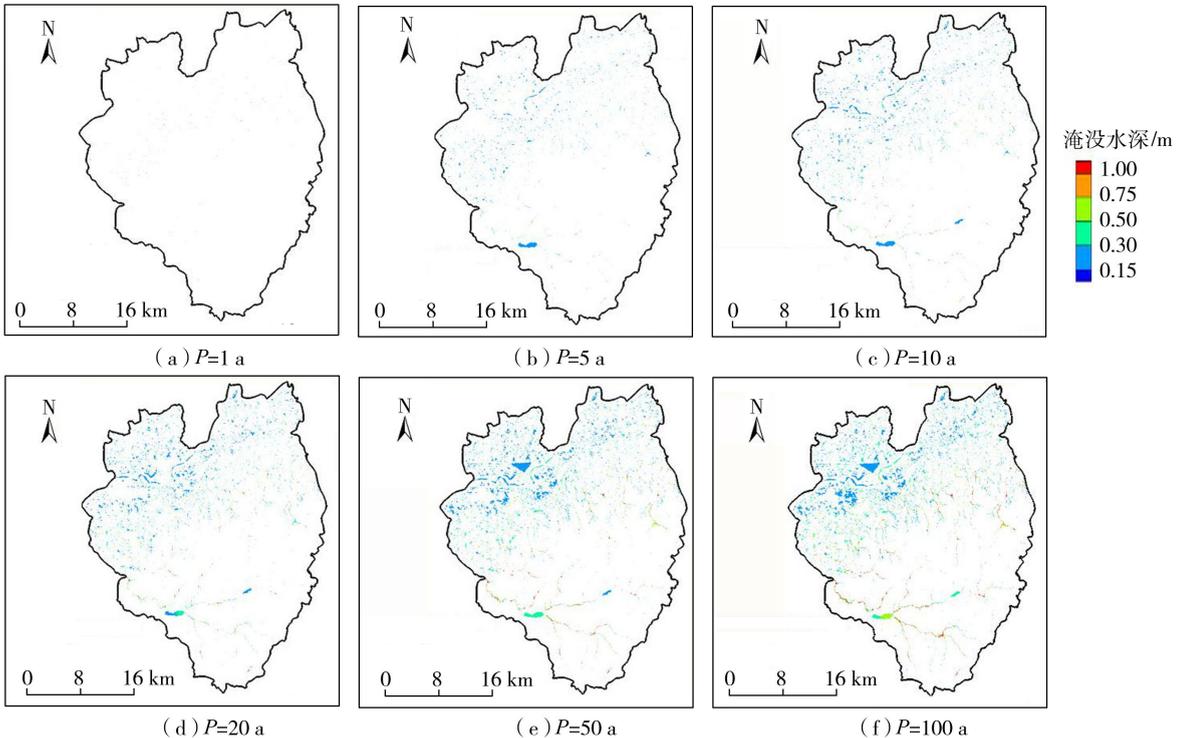


图 5 不同设计降雨情景下的淹没水深

Fig. 5 Submerged depth in different design rainfall scenarios

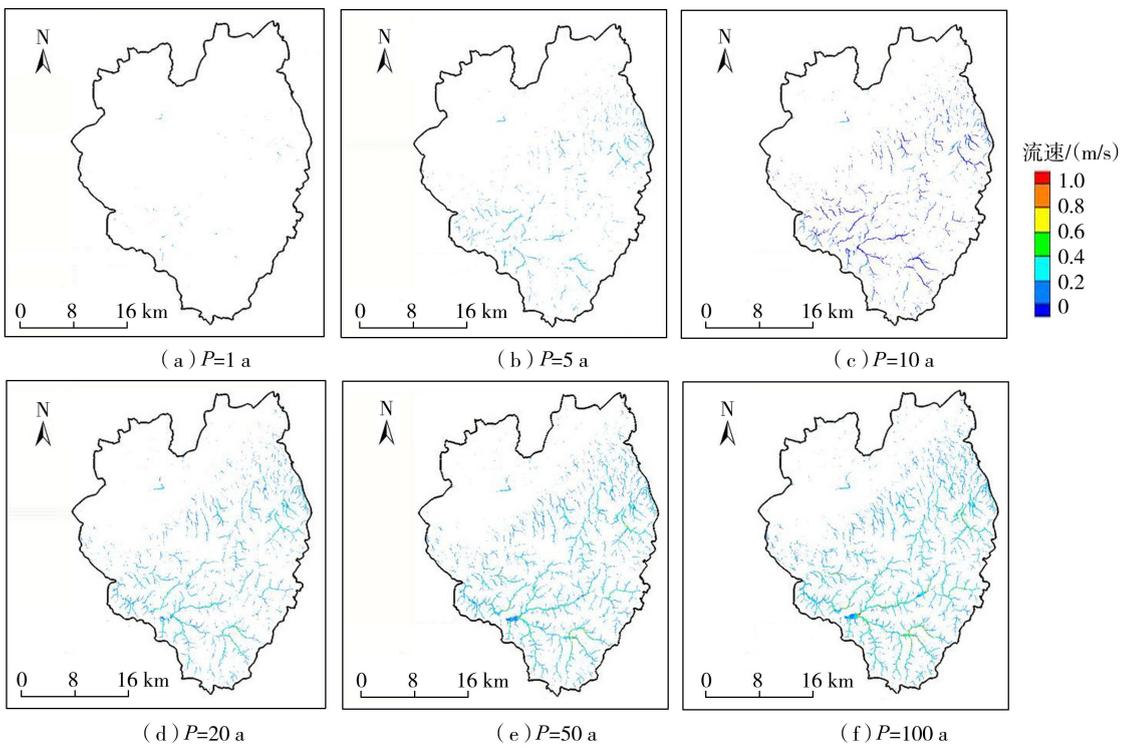


图6 不同设计降雨情景下洪水流速分布

Fig. 6 Flood velocity distributions in different design rainfall scenarios

表4 不同设计降雨情景下最大流速

Table 4 Maximum flood velocity in different design rainfall scenarios

重现期/a	最大流速/(m/s)	流速峰值时刻/s	降雨峰值时刻/s
1	0.478	4680	2880
5	1.019	13500	2880
10	1.309	11160	2880
20	1.494	9720	2880
50	1.890	12960	2880
100	2.124	14400	2880

4 济南市洪涝应对举措

4.1 工程措施

a. 加强城市防洪工程体系建设,提升工程抗灾能力。济南市主要由其特殊的地形地势引发暴雨洪涝灾害,加之气候变化、城市化发展、支流河道阻塞和中心城区雨污管道老化严重等问题,加剧了暴雨洪涝灾害发生的概率。构建城市防洪工程体系可提高抗灾能力,具体措施主要包括进一步提高城市上游水库的防洪能力,科学优化水库运行调度方式,减少上游来水进入城区,避免与城市内涝叠加造成更大的灾害;在城区内部开发新的雨水调蓄空间较为困难,应充分发挥城市现有公园、河湖等空间或者修建地下蓄水空间,用以消纳多余的洪水,减轻城市内部防洪压力;提高城市内部河道过流能力和行洪能力,保障行洪顺畅。

b. 增强城市韧性,减小洪涝灾害的影响。应进一步提高城市防洪排涝设施标准,使其与城市人口、经济、重要程度等相匹配,主要措施包括加强巩固现有水利工程设施的防洪能力,确保在面对设计标准洪水时具有有效抵御洪水的力量;提高防洪措施的应急处理能力,保障其安全运行或及时修复运转。城市生命线设施是现代城市生活运行的基本条件,包括供电、供水、通信、交通等基础设施,如果这些措施受到洪水的冲击而失效,会极大加重城市洪涝灾害的后果。保障城市生命线设施安全,及时修复受损设备,是提升城市韧性的关键。

4.2 非工程措施

a. 加强洪灾预警,精准预报,减少洪灾损失。建立暴雨预报系统与决策支持系统相互协作的工作模式,提高城市洪涝预报的精度和效率。加强气象卫星对暴雨的监测,精准分析未来天气情况,有效预防洪涝灾害的发生。通过建立城市暴雨洪涝模型,对城市洪涝风险进行评估和分区,确定洪涝灾害的易发区,提前设置洪涝风险应对措施。可通过构建济南市防汛抗旱决策支持系统、水雨情自动化监测系统、城市防洪排涝系统,引入最新的人工智能和深度学习算法,提高城市洪涝预报的精度,全面提升水利管理信息化水平,最大程度减轻洪灾带来的损失。

b. 建立科学的城市洪灾应急救援体系。建立救灾保障体系是防洪减灾的关键环节,建立有效的

应急防御对策和人员队伍是减少洪涝灾害的有效手段。应建立包括应急管理、气象、水利、市政、消防、公安和武警等多单位合作的应急救援队伍,各部门各司其职、协调联动,最大程度保障人民生命财产安全。

5 结 论

a. 基于 TELEMAC-2D 模型,构建了济南市主城区洪涝仿真模型,并根据实测暴雨淹没资料对模型进行验证,结果表明构建的洪涝仿真模型具有较高的精度和可靠性,可用于研究区洪涝模拟。

b. 利用构建的模型模拟重现期分别为 1、5、10、20、50、100 a 不同设计降雨情景下的洪涝淹没过程,结果表明,随着降雨重现期增大,淹没水深、淹没面积和洪水流速均显著增大,水深超过 0.15 m 的淹没面积占研究区总面积的比值也随之增加,分别为 0.05%、1.10%、1.98%、2.89%、4.28% 和 5.15%;研究区南部山区洪水流速较大,北部城市地区较为平缓,洪水流速相对较小。

c. 针对济南市主城区洪涝灾害淹没特征,提出应对城市洪涝的工程措施和非工程措施,为城市防洪抗灾决策提供科学支撑,以期减少洪涝灾害造成的人员伤亡和财产损失。

参考文献:

[1] 黄远东,杨志强,许冲. 灾害造成的人类损失(2000—2019)[J]. 中国应急管理,2023(8):46-51. (HUANG Yuandong, YANG Zhiqiang, XU Chong. The human cost of disasters; an overview of the last 20 years (2000-2019) [J]. China Emergency Management, 2023(8):46-51. (in Chinese))

[2] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7):779-790. (in Chinese))

[3] 李娜,张念强,丁志雄. 我国城市内涝问题分析与对策建议[J]. 中国防汛抗旱,2017,27(5):77-79. (LI Nan, ZHANG Nianqiang, DING Zhixiong. Analysis of urban flooding problems in China and countermeasure [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(5):77-79. (in Chinese))

[4] 马雨露,赖成光,习树峰,等. 南方高度城市化地区极端降雨特征分析及阈值确定:以深圳市为例[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):76-81. (MA Yulu, LAI Chengguang, XI Shufeng, et al. Analysis and determination of extreme precipitation threshold in highly urbanized

areas of Southern China; a case from Shenzhen [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(2):76-81. (in Chinese))

[5] 张江涛,何丽华,李江波,等. 河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 大气科学学报,2023,46(6):884-903. (ZHANG Jiangtao, HE Lihua, LI Jiangbo, et al. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23·7” extreme rainstorm in Hebei [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(6):884-903. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 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))

[8] 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))

[9] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护,2022,38(6):31-38. (MEI Chao, CHEN Yufeng, LIU Jiahong, et al. Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):31-38. (in Chinese))

[10] 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))

[11] 杨文泰,赵汝鹏,徐震,等. 基于元胞自动机理论的济南市城区洪涝灾害弹性评价[J]. 中国农村水利水电,2023(12):33-41. (YANG Wentai, ZHAO Rupeng, XU Zhen, et al. Resilience evaluation of flood disaster in Ji'nan City based on cellular automata [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12):33-41. (in Chinese))

[12] 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. (CHENG Tao, XU Zongxue, HONG Siyang, et al. Simulating rainstorm waterlog in piedmont plains in Ji'nan City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2): 246-253. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] ANH L N, TRAN D D, THONG N, et al. Drastic variations in estuarine morphodynamics in Southern Vietnam: investigating riverbed sand mining impact through hydrodynamic modelling and field controls [J]. Journal of Hydrology, 2022, 608: 127572.
- [15] LI Guoyi, LIU Jiahong, SHAO Weiwei. Flood risk assessment using TELEMAC-2D models integrated with multi-index analysis in Shenzhen River Basin, China [J]. Water, 2022, 14(16): 2513.
- [16] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69. (SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2022, 62(1): 60-69. (in Chinese))
- [17] 刘家宏, 李泽锦, 梅超, 等. 基于 TELEMAC-2D 的不同设计暴雨下厦门岛城市内涝特征分析[J]. 科学通报, 2019, 64(19): 2055-2066. (LIU Jiahong, LI Zejin, MEI Chao, et al. Urban flood analysis for different design storm hyetographs in Xiamen Island based on TELEMAC-2D [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(19): 2055-2066. (in Chinese))
- [18] 都利亚, 王兆礼, 祁旭阳, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型的城区水库溃坝洪水数值模拟: 以广州市龙洞水库为例[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(5): 850-859. (DU Liya, WANG Zhaoli, QI Xuyang, et al. Numerical simulation of dam-break flood in urban area based on TELEMAC-2D model: a case study for Longdong Reservoir in Guangzhou, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(5): 850-859. (in Chinese))
- [19] 冯仕远, 李庆国, 徐震, 等. 济南市城区增长背景下洪涝模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 93-98. (FENG Shiyuan, LI Qingguo, XU Zhen, et al. Simulation of flood under the background of urban growth in Ji'nan City [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(7): 93-98. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 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))
- [22] 宋瑞宁, 任梦瑶, 闫攀, 等. 基于行人安全的城市内涝风险等级评估[J]. 给水排水, 2021, 47(2): 40-45. (SONG Ruining, REN Mengyao, YAN Pan, et al. Urban waterlogging risk level assessment from the perspective of pedestrian safety [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(2): 40-45. (in Chinese))
- [23] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 晋城市片区洪涝过程响应分析与马路行洪模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 176-186. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Flooding/waterlogging process response analysis and road flooding simulation in urban area of Jincheng City [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 176-186. (in Chinese))
- [24] JONKMAN S N, PENNING-ROWSELL E. Human instability in flood flows [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 44(5): 1208-1218.
- [25] 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))
- [26] 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 Yaozong, 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))
- [27] 宋耘, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-07 编辑: 施业)