

# 基于元胞自动机技术的城市洪涝过程模拟 ——以济南市主城区为例<sup>\*</sup>

黄继文<sup>1)</sup> 王京晶<sup>2,3)</sup> 徐宗学<sup>3,4)†</sup> 唐清竹<sup>3,4)</sup> 叶陈雷<sup>3,4)</sup>

(1)山东省水利科学研究院, 250013, 济南; (2)广东省水文局, 510150, 广州; (3)北京师范大学水科学研究院, 100875, 北京;  
4)城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 100875, 北京)

**摘要** 以济南市主城区为研究区, 构建元胞自动机 CAflood 模型, 采用 6 场历史暴雨过程数据验证模型, 并模拟 6 种不同重现期下主城区洪涝过程, 评估受灾状况. 结果表明: 1) 6 场历史暴雨过程实测值与模拟值平均误差为 0.044 m, 表明本文构建的 CAflood 模型模拟效果良好, 可用于济南市城市洪涝淹没模拟; 2) 随着重现期增大, 最大淹没水深  $h \leq 0.5$  m 的安全区域面积占比始终最大, 约 70%, 其他各受灾状态面积均有所增加, 且增长趋势先快后缓. 其中  $>1\sim 2$  m 的中度受灾区面积增速相对最高, 由遭遇 1 a 一遇降雨时的 0.97 km<sup>2</sup> 增大至 100 a 一遇降雨时的 6.15 km<sup>2</sup>, 增加 5.3 倍; 3) 基于淹没深度进行洪涝风险区划, 区划结果可为城市防灾减灾提供一定参考依据, 但区划图中重灾区与历史洪涝灾害伤亡地点有明显差别. 表明在洪涝灾害风险评估中, 仅考虑洪涝模拟结果, 不考虑社会因素, 其结果存在一定的局限性.

**关键词** CAflood 模型; 主城区; 洪涝过程模拟; 济南市

**中图分类号** TV122.1

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022352

快速城市化和气候变化影响的不断加剧, 导致城市洪涝灾害发生频率与强度不断增加<sup>[1-2]</sup>. 城市化速度的不断加快, 致使城区不透水面积比迅速增加, 显著影响城市产汇流过程, 致使高密度人口城市面临的洪涝灾害问题日趋严重、水环境污染加重、水生态恶化和可利用水资源匮乏等<sup>[3-4]</sup>. 同时道路硬化严重, 城市管网系统排涝能力弱, 设计标准多为 2 a 一遇或更低, 根本无法满足城市排水需求<sup>[2, 5]</sup>. 济南(2007-07-18)、北京(2012-07-21)、深圳(2019-04-11)和郑州(2021-07-20)等大中城市接连遭受暴雨袭击, 引发的洪涝灾害危险性大、居民损失惨重. 济南市地势呈南高北低, 是典型山前平原型城市, 特殊的地形地貌使得济南在暴雨侵袭时面临的防洪压力更大, 承受着复杂严峻的洪涝灾害问题<sup>[6-7]</sup>. 2007 年 7 月 18 日济南市遭遇了 200 a 一遇的特大暴雨, 3 h 最大降雨量达 180 mm. 降雨强度大和汇流时间短致使城区出现道路行洪, 低洼地带河道出现漫溢, 市区呈现“城市看海”现象<sup>[8]</sup>. 据有关部门统计, “7·18”洪涝事件致使 208 人伤亡, 超 33 万人不同程度受灾, 间接经济损失数百亿元<sup>[7-8]</sup>.

自 20 世纪中叶, 欧美等国家研发出一系列表征水文水动力过程的数学模型, 为城市水文学发展奠定

了坚实基础<sup>[9]</sup>. 伴随着计算机技术的重大突破与模型理论的不深入, 城市洪涝模型的研发如雨后春笋般发展壮大, 并先后经历了经验模型、概念模型和物理模型等阶段<sup>[10]</sup>. 自进入 21 世纪以来, 城市洪涝模拟逐渐呈现出模拟范围广、计算速度快及精度要求高等特点. 为提高大范围城区的洪涝模拟精度, 如对济南市主城区, 模型采用分辨率高的 DEM 和下垫面数据, 划分网格数量可能高达百万, 乃至上千万, 海量网格使得模型运算时间陡然增加, 而时间过长也会给洪涝灾害预警与制定防灾减灾措施带来巨大压力, 于是有学者开始在模型计算效率方面开展有益探索<sup>[11-13]</sup>. 其中, 较为典型的是英国埃克塞特大学研发的 CAflood 模型, 模型采用元胞自动机技术替代水动力学求解过程, 既可模拟洪水演进过程, 又可满足模拟范围广、精度需求高及计算速度快等需求<sup>[11]</sup>. 在应用方面, 曾照洋等<sup>[13]</sup>在广州市濠江流域构建了 CAflood 模型, 较好地复现了历史暴雨洪涝过程, 模拟效果较好. 虽然近些年来 CAflood 模型在我国城市洪涝模拟中尚处于初步应用阶段, 但其发展前景十分广阔.

“7·18”暴雨洪涝灾害事件对济南人民的危害至今历历在目, 虽然此次灾害的直接致灾因子为极端

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点资助项目(52239003); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401003)

<sup>†</sup> 通信作者: 徐宗学(1962—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 城市水文学. E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-12-17

暴雨事件和城区排水泄洪能力有限,但从城市防洪减灾技术层面来讲,根本原因在于城市洪涝监测—模拟—预报—应急未形成体系,致使无法及时提供防灾预警措施.本文以济南市主城区为例,构建二维洪水淹没模型并进行精细化模拟,评估了主城区不同暴雨情景下的洪涝受灾程度,以期为防洪减灾相关部门制定防洪应对措施提供科技支撑和决策依据.

## 1 研究区概况与数据来源

**1.1 研究区概况** 济南市是山东省省会,位于黄河中下游,属温带季风型气候,地理位置  $36^{\circ}10' \sim 37^{\circ}40'N$  和  $116^{\circ}12' \sim 117^{\circ}44'E$ <sup>[6]</sup>.济南市多年平均气温  $13.8^{\circ}C$ ,多年平均降水量  $647\text{ mm}$ ,具有冬冷夏热和雨热同期的气候特征<sup>[6, 8]</sup>.截至 2021 年 9 月 10 日,济南市共有泉水 1 209 处,故又名“千泉之城”.

主城区面积为  $229\text{ km}^2$ ,水系大多隶属于小清河水系,主要包含小清河及其主要支流.北岸支流受人类活动影响较大,水系多为灌溉尾水渠,坡度小、流速缓慢<sup>[14]</sup>.主城区雨水管网系统排涝能力弱,排水管网过水断面小,遭遇暴雨时极易出现排水不畅甚至堵塞<sup>[7]</sup>.主城区地势南高北低,南北高差极大,区域内降雨时空变化剧烈且集中、暴雨强度大、历时短,南部山区形成的洪水顺着坡度较大道路直接涌入中心城区造成内涝<sup>[8, 14]</sup>.受山洪内涝叠加影响,极易造成河道干支流顶托,引发暴雨洪涝灾害,从而形成“街巷洪水”,因此济南市城区行洪特点也多以南洪北涝为主<sup>[6, 8, 15]</sup>.主城区内共有 3 座雨量站(黄台桥、燕子山、东红庙)及 5 座道路水文站(回民中学、省委二宿舍、赤霞广场、旅游路、山东大厦),主城区高程、雨量站、河流与道路水文站分布见图 1.

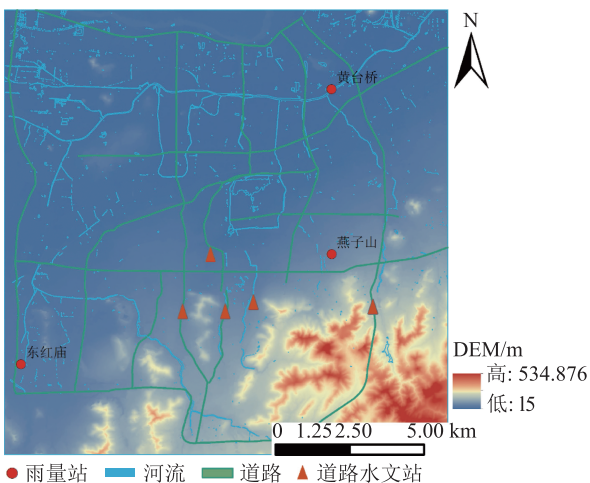


图 1 济南市主城区高程与道路水文站等示意

**1.2 数据来源** 所需数据资料主要包含水文气象数

据、数字高程数据(DEM)与河道管网设计资料等.

水文气象数据:主要有济南市主城区内各站点小时尺度降雨数据,可用于驱动 CAflood 模型;道路水文站的淹没资料(淹没深度),主要用于率定 CAflood 模型.以上数据均来源于济南市水文中心.

管网河道数据:河道及排水管网布设数据主要用于构建 CAflood 模型;河道的部分设计资料也用于设置 CAflood 模型的初始边界条件.

地理信息数据:DEM 为济南市水文中心提供的分辨率为  $10\text{ m}$  勘察实测 DEM 数据;土地利用/覆盖数据采用清华大学发布的  $10\text{ m}$  分辨率数据,其下载地址为 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc2017v1.html>),用于确定 CAflood 模型下渗率和糙率.

## 2 模型原理与概化

**2.1 模型基本原理** CAflood 模型是基于元胞自动机技术的洪涝仿真模型,其采用元胞自动机技术并结合并行算法模拟洪水淹没,元胞自动机是一种基于全局视角的水文过程建模技术,基于演化视角表征城市洪涝演进过程<sup>[11, 16]</sup>.建模计算过程主要有降雨输入、设置边界条件、计算二维洪水淹没和结果输出(如淹没水深、淹没面积范围)等<sup>[16]</sup>.

CAflood 模型的基本原理为水量平衡,其特点如下:1)模型采用元胞自动机技术替代传统城市洪涝模型的浅水方程求解来模拟洪涝演进过程;2)模型可通过元胞演化过程表征复杂物理系统过程,显著降低了模拟计算强度;3)二维洪水淹没的模拟主要依靠水量分配规则和 WCA2D 模块;4)通过 Von-Neumann 4 单元法识别中心元胞邻接单元,单元网格形状为正方形;5)采用 WCA2D 计算元胞传输水量,水流流速受曼宁公式和临界流方程综合约束;6)采用自适应时间步长、并行算法及流速平均化等技术手段提升计算速度. WCA2D 模块前身是 CA2D 模块,CA2D 原理是将中心元胞的邻接元胞按水位高低排序定级,水位低于中心元胞即可获得水量,水量大小则根据“低水位元胞首先充满”这一标准控制.基于 CA2D 模块,埃克塞特大学优化了权重分配方式,研发出进阶版 WCA2D 模块<sup>[11, 13, 16]</sup>.该模块水量传输计算主要有以下 4 步:1)识别下游邻接元胞;2)计算中心元胞向下游邻接元胞水量传输权重;3)计算中心元胞传输总水量;4)权重与传输总水量的乘积即为元胞间传输水量.综合来看,引入了归一化权重方法的 WCA2D 模块计算传输水量更加科学合理,图 2 为水量交换权重示意图.

CAflood 模型模拟洪涝淹没过程主要包括对邻接

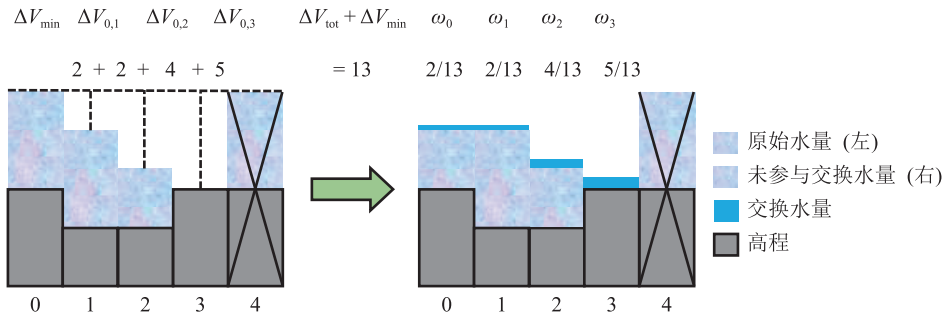


图 2 交换水量计算示意

元胞水量传输权重、元胞间传输水量、淹没深度、水流流速等的计算。

1) 邻接元胞水量传输权重计算式为

$$\omega_i = \frac{\Delta V_{0,i}}{\Delta V_{tot} + \Delta V_{min}}, i \in 1, \dots, m, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{\Delta V_{min}}{\Delta V_{tot} + \Delta V_{min}}, \quad (2)$$

式中： $\omega_i$  为第  $i$  个邻接元胞水量分配权重； $\omega_0$  为中心元胞水量分配权重； $m$  为中心元胞邻接元胞数量； $\Delta V_{tot} = \sum_{i=1}^m \Delta V_{0,i}$ ， $\Delta V_{0,i}$  为邻接元胞间体积差值，单位为  $m^3$ ； $\Delta V_{min} = \min(\Delta V_{0,1}, \Delta V_{0,2}, \dots, \Delta V_{0,i}, \dots, \Delta V_{0,m})$  ( $\Delta Z_{0,i} > \Gamma \cap i \in 1, \dots, m$ )， $\Delta Z_{0,i}$  为中心元胞与第  $i$  个邻接元胞间水位差，单位为  $m$ ，当  $\Delta Z_{0,i} > \Gamma$  (临界值) 时，才认为元胞间发生水量传输，根据模型手册，本文默认  $\Gamma = 0.0001 m$ 。

2) 元胞间传输水量计算式为

$$V_{i,t+\Delta t} = \omega_i V_{tot,t+\Delta t}, \quad (3)$$

式中： $V_{i,t+\Delta t}$  为第  $i$  个元胞在  $t+\Delta t$  时传输给下游邻接元胞的水量，单位为  $m^3$ ； $V_{tot,t+\Delta t} = \min(A_0 d_0, \frac{v_M d_0 \Delta t \Delta l_M}{\omega_M}, \Delta V_{min} + V_{tot})$  为  $t+\Delta t$  时中心元胞输出水量，单位为  $m^3$ ； $A_0$  为面积，单位为  $m^2$ ； $d_0$  为水深，单位为  $m$ ； $v_M = \min\left(\sqrt{d_0 g}, \frac{1}{n} d_0^{2/3} \sqrt{\frac{\Delta Z_{0,M}}{\Delta x_{0,M}}}\right)$ ，为元胞间流速上限，单位为  $m \cdot s^{-1}$ ； $g$  为重力加速度，单位为  $m \cdot s^{-2}$ ； $n$  为糙率； $\Delta Z_{0,M}$  为中心元胞与邻接元胞水位差， $\Delta x_{0,M}$  为中心元胞与邻接元胞中心点距离，单位为  $m$ ； $\Delta t$  为模拟时间步长，单位为  $s$ ； $\Delta l_M$  为元胞间交界长度，单位为  $m$ ； $\omega_M$  为权重最大元胞权重； $V_{tot}$  为中心元胞  $t$  时转移水量，单位为  $m^3$ 。

3) 水深计算式为

$$d_{0,t+\Delta t} = d_{0,t} - \frac{\sum_{i=1}^m V_{i,t+\Delta t}}{A_0} + \frac{\Delta V_{0,in}}{A_0} - \frac{\Delta V_{0,out}}{A_0}, \quad (4)$$

式中： $d_{0,t}$  和  $d_{0,t+\Delta t}$  分别为中心元胞在  $t$  和  $t+\Delta t$  时的水

深，单位为  $m$ ； $\Delta V_{0,in}$  为中心元胞流入水量，如管网溢水与降雨量，单位为  $m^3$ ； $\Delta V_{0,out}$  为中心元胞输出水量，如管网排出水量和土壤下渗，单位为  $m^3$ 。

4) 流速计算式为

$$v_{i,t+\Delta t} = \frac{V_{i,t+\Delta t}}{d_{0,t,t+\Delta t} \Delta l_i \Delta t}, \quad (5)$$

式中： $v_{i,t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时中心元胞水流转移至第  $i$  个邻接元胞时流速，单位为  $m \cdot s^{-1}$ ； $d_{0,i,t+\Delta t}$  为  $t+\Delta t$  时中心元胞与第  $i$  个邻接元胞水深均值，单位为  $m$ ； $\Delta l_i$  为中心元胞与第  $i$  个元胞交界长度，单位为  $m$ 。

模型参数主要有：糙率 (roughness)、平均坡度 (average slope)、更新时段长 (update DT)、忽略计算水深 (ignore water depth)、模型加速参数 (tolerance)、干湿阈值 (raster water depth tolerance)。其中：忽略计算水深为忽略低于此水深的元胞间水流交换来提高计算速度；模型加速参数表示若两相邻元胞水位差小于参数值，即认为元胞间无水流交换。

2.2 模型概化 构建 CAflood 模型所需数据主要有 DEM 数据、土地利用数据和水文气象数据等，其中水深等水文水动力要素数据主要依靠道路水文站监测获取。借助 ArcGIS 软件处理 DEM 和土地利用数据，转为 CAflood 模型输入格式，即 ASCII 码数据，在此过程确保各图层数据分辨率及网格数量保持一致。相关信息见表 1。

表 1 数据基本信息与来源

数据	分辨率	格式	来源
易涝区 DEM	10 m × 10 m	TIFF	济南市水文中心
土地利用数据	10 m × 10 m	GRID	清华大学
水文气象数据	h	xls	济南市水文中心

根据 CAflood 模型手册，将模型参数、计算模块及情景选项等信息保存至 CSV 控制文件中。需设置参数主要包括坡度、输入输出文件指向及边界条件等。

因研究区范围较大，本文将 3 个雨量站的实测降雨数据通过泰森多变形分割法进行雨量分配，得到研

究区雨量数据驱动模型。为提高计算速度,假设 2015—2019 年下垫面不发生变化,参考管网数据,通过处理土地利用数据并对每个网格糙率和恒定下渗率分别赋值,其中恒定下渗率可理解为土壤下渗和管网系统排水,在管网较密的区域相应地增大下渗率。据此,研究区共划分出 2 290 949 个网格。

易涝区内小清河、西洛河、东西工商河及南北太平河等属于常年性河流,河道初始条件采用多年实测平均水深,其他无实测流量数据河流陆面初始水深均设为 0,河流上游边界条件采用实测水位流量数据,其他无实测数据的河流上游流量设为 0,下游边界位置设在市区唯一排洪通道小清河黄台桥水文站处,并采用实测洪水过程数据,其他二维陆面区域不再设置边界条件。

设置好输入文件与控制文件后,在 Windows 系统中调用 CMD 或 Powershell 命令执行运算,同时为提高模拟速度,调用 OpenMP 实现并行算法运算,运行成功后可在输出路径中查看模拟结果。

### 3 结果分析

**3.1 模型率定与验证** 采用 2015—2019 年的 6 场历史洪水过程数据率定验证 CAflood 模型参数,主要采用手动调参法,目标函数为最大淹没水深误差,采用 5 座道路水文站实测最大水深数据调整模型参数,参数率定结果为:平均坡度 1.734%,更新时间 60 s,忽略水深 0.000 1 m,模型加速参数 0.000 1 m,干湿阈值参数 0.01。各土地利用类型糙率和下渗率率定结果见表 2。

表 2 各土地利用类型糙率和下渗率率定结果

参量	土地利用类型							
	农田	林地	草地	灌木丛	湿地	水域	不透水地表	裸地
糙率	0.060	0.550	0.250	0.500	0.130	0.012	0.020	0.050
下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	12	15	12	12	12	8	3	15

经过率定后的模型参数组合可满足精度需求,5 座道路水文站在 6 场暴雨洪水过程下最大水深模拟值与实测值对比见表 3。

从表 3 可明显看出,CAflood 模型模拟值与实测值吻合度较高,6 场历史暴雨洪水过程模拟的最大淹没水深误差基本 <0.08 m,平均误差为 0.044 m,平均

相对误差为 21.85%,均方根误差为 0.003 m,场次暴雨的模拟误差均控制在 <0.08 m,平均误差为 0.048 m,场次相对误差为 28.98%,相对误差控制在 <30%,模拟结果较好。产生误差的原因可能是受建模源数据影响,模型考虑初始边界条件不够充分,部分河道边界因无实测数据将其初始水位设为 0。部分道路水文站

表 3 道路水文站实测与模拟最大水深对比

洪号	测站名称	实测最大水深/m	模拟最大水深/m	误差/m	场次暴雨误差	相对误差/%	场次暴雨相对误差/%
20190621	赤霞广场站	0.12	0.157	0.037	0.029	30.83	25.92
	省委二宿舍站	0.10	0.121	0.021			
20180814	旅游路站	0.10	0.171	0.071	0.071	71.00	71.00
20180625	赤霞广场站	0.26	0.354	0.094	0.074	36.15	45.08
	回民中学站	0.10	0.154	0.054			
20160816	赤霞广场站	0.20	0.176	0.024	0.031	-12.00	19.25
	省委二宿舍站	0.10	0.144	0.044			
	山东大厦站	0.12	0.143	0.023			
20160801	旅游路站	0.12	0.151	0.031	0.021	21.33	7.35
	赤霞广场站	0.14	0.156	0.016			
	省委二宿舍站	0.15	0.182	0.032			
20150803	旅游路站	0.14	0.125	0.015	0.064	22.73	5.26
	赤霞广场站	0.39	0.253	0.137			
	回民中学站	0.11	0.135	0.025			
	省委二宿舍站	0.11	0.142	0.031		28.18	

的实测模拟对比出现异常现象(如20180625和20180814场次暴雨模拟结果),这可能与模型自身结构缺陷相关,模型仅通过下渗率统一表征排水和土壤下渗功能,并着重考虑与下垫面变化关系最为密切的土壤下渗,对城区排水管网的排涝能力考虑略显不足<sup>[17]</sup>.

**3.2 设计暴雨情景** 使用芝加哥雨型法计算各时段雨强<sup>[18]</sup>,本文采用济南市暴雨强度公式

$$q = \frac{11.197(1 + 0.767 \lg T)}{(t + 11.091)^{0.6645}}, \quad (6)$$

式中  $T$  为重现期。

选择  $T = 1、5、10、20、50、100$  a 等 6 种重现期下 2 h 设计降雨用于情景分析. 将时间步长设为 5 min, 推求的设计降雨过程线如图 3 所示.

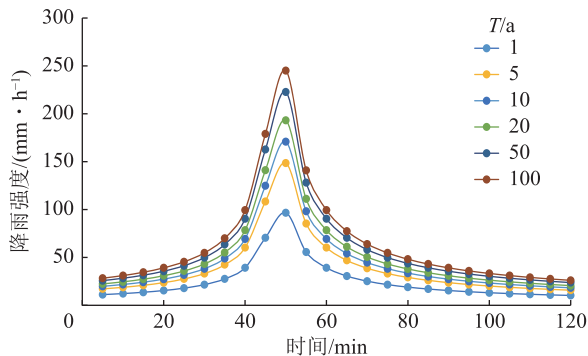


图3 不同重现期下 120 min 设计暴雨过程

**3.3 结果与讨论** 输入设计降雨过程至 CAflood 模型, 可视化处理模型计算结果. 淹没水深与范围是反映城市洪涝灾害程度的重要指标, 其中淹没水深是评估洪涝事件是否发生的最重要指标. 参考文献 [19], 得到济南市城区现行淹没预警等级划分(表 4).

表 4 济南市主城区淹没预警等级划分

预警等级	淹没水深/m	预警等级描述
无预警	≤ 0.2	安全状态, 无预警
IV级	>0.2~0.5	安全状态, 道路发生少量积水, 无灾害损失
III级	>0.5~1	轻度受灾, 交通不便, 出行受阻, 局部区域轻微受灾
II级	>1~2	中度受灾, 淹没损失较大, 或造成基础设施严重损伤, 无人员伤亡
I级	>2	重度受灾, 淹没情况严重威胁生命安全, 或交通濒临瘫痪, 存在人员伤亡

本文将淹没水深引起的洪涝灾害状态分为 4 类, 即: 安全状态 ≤ 0.5 m, 不存在明显受灾风险, 轻度受灾 >0.5~1 m; 中度受灾 >1~2 m; 重度受灾 > 2 m. 依据各淹没预警等级标准可视化处理模拟结果, 结果见图 4. 从图 4 中可以明显看出, 随着重现期增大, 最大

淹没水深和淹没面积也在不断增大, 中度和重度受灾区域范围不断扩大, 且易涝区中最大积水深度 > 2 m 的地方主要集中在顺河高架桥和北园高架桥下附近. 表明在济南市主城区, 人为建设高架桥降低地势是造成城市洪涝灾害的重要原因<sup>[20]</sup>. 南部山区由于其地势较高, 不易遭受暴雨洪涝灾害侵袭, 受灾区域面积相对较小, 但由于英雄山路、舜耕路及二环东路等主干道路坡度较大, 致使洪水也多以道路行洪为主, 受灾区域形状多呈狭长型, 而北部区域由于其地势较低呈现出大面积的区域涝灾现象<sup>[21]</sup>, 且南部洪水沿着坡度较大道路迅速向北部低洼地带集聚, 加剧低洼地带灾害程度, 这也进一步印证了济南市由于其独特地形地貌, 在遭遇暴雨时极易出现“南洪北涝”和“马路行洪”. 这一结果与冯仕远等<sup>[15]</sup>、姜芊孜等<sup>[22]</sup>和曹升乐等<sup>[23]</sup>的研究结论较为一致, 但本文构建的 CAflood 模型糙率和下渗率值并不唯一, 采用高精度的土地利用/覆盖数据确定模型下渗率和糙率, 模拟结果更加精细化且贴近现实.

表 5 代表不同重现期暴雨下各受灾状况面积. 通过图 4 和表 5 可看出, 随着重现期增大, 除安全状态以外的各受灾区域面积不断增加, 且增长趋势呈先快后缓. 淹没深度 ≤ 0.5 m 的安全区域始终在易涝区总面积中占比最大, 约占总面积的 70%, 这表明大部分区域在遭遇暴雨时处于安全状态<sup>[20]</sup>. 从受灾区面积增长速度来看, 遭遇 100 a 一遇降水时的重度受灾区面积和轻度受灾区面积分别为 1.96 和 13.92 km<sup>2</sup>, 是 1 a 一遇降雨时受灾面积的 5.6 和 5.2 倍, 而中度受灾区面积增速最大, 由遭遇 1 a 一遇暴雨时的 0.97 km<sup>2</sup> 增长至 100 a 一遇的 6.15 km<sup>2</sup>, 增长了 5.3 倍, 各受灾面积增速不一, 但较为相近. 往往大多数淹没水深较大和洪涝灾害损失地点多出现在中度和重度受灾区, 这些区域多为城区中围绕在大明湖周边的明显低洼地带及部分湖泊水体, 且由于其本身排水系统相对落后, 排涝能力不足, 极易积水加剧洪涝灾害, 做好这些重点区域的防灾减灾及预警预报十分重要<sup>[21, 24]</sup>.

根据济南市城市水文年鉴中记录的 2007 年 7 月 18 日暴雨洪涝灾害事件调查结果, 以及相关新闻报道记录<sup>[5, 25]</sup>, 历史暴雨洪涝灾害中出现过伤亡事件和受灾情况较为严重的地点, 多为低洼高密度人口聚集地带, 特别是立交桥下发生事故次数较多<sup>[14, 23-24]</sup>. 城市高架桥的建设, 不断降低桥底涵洞、隧洞地势, 这些地方随即成为城市洪涝灾害事件发生的重灾区, 其中以北园高架桥一路事故发生最多, 具体地点分布见图 5.

图 5 显示灾情为 100 a 一遇暴雨情景下的模拟情况. 从图 5 可明显看出, 部分伤亡事故发生地点并非

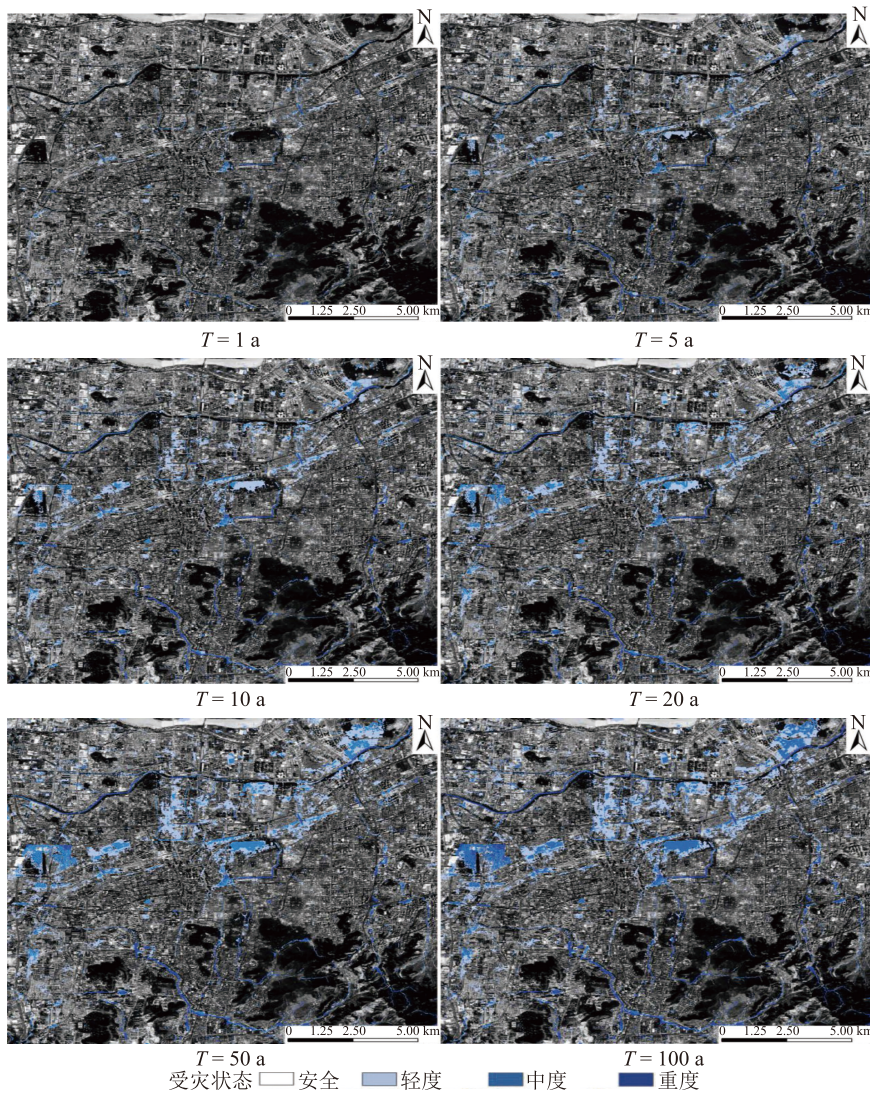


图 4 不同重现期暴雨情景下洪涝淹没情况分布

表 5 不同重现期暴雨情景下各受灾状况面积

重现期/a	受灾状况面积/km <sup>2</sup>			
	安全	轻度	中度	重度
1	218.93	2.66	0.97	0.35
5	213.53	6.48	1.98	0.91
10	210.78	8.38	2.62	1.12
20	207.78	10.31	3.50	1.32
50	203.74	12.55	4.98	1.64
100	200.88	13.92	6.15	1.96

位于重度受灾区,而是位于中度和轻度受灾区,这可能与人的主观预警意识和受灾评价方式有关.因为大多数重灾区域位于城市低洼积水地带,如大明湖附近,湖泊本身具有一定的缓冲滞洪作用,且由于人的主观意识影响,居民群众普遍对明显低洼地带的警惕性较高,这些区域产生的洪涝灾害伤亡事件可能相对较小<sup>[25-26]</sup>.反而是重视程度较低、人们日常不易察

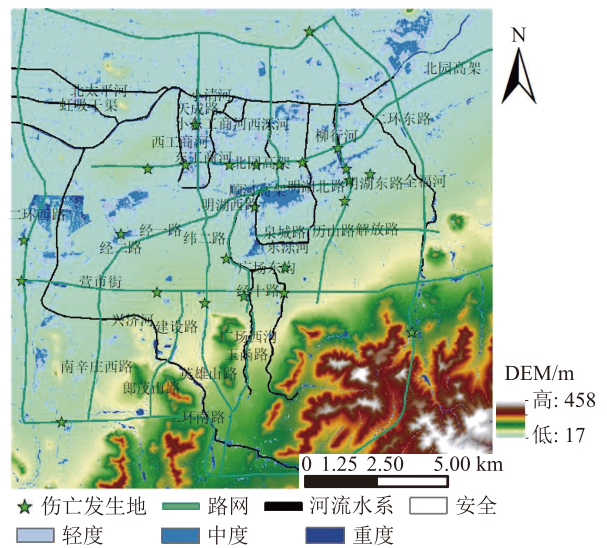


图 5 历史暴雨洪涝灾害部分伤亡发生地分布

觉、防洪意识淡薄、人口密度较大及淹没深度相对较低的中度和轻度受灾区,在遭遇暴雨时更容易出现伤

亡事故<sup>[20, 25]</sup>。例如在人口密集的城市商业区中, 即便淹没水深相对较小, 但由于人口密集、行洪通道狭窄等客观原因, 依然存在较大的洪涝灾害风险<sup>[19, 27-28]</sup>。另一方面, 部分出现过伤亡事件的坡度较陡道路, 由于其水深较小被划分为安全区域, 但该区域因坡度大流速高明显存在较大的洪涝风险, 与现实不符<sup>[27, 29-30]</sup>。城市洪涝灾害的影响因素众多, 仅通过淹没深度评判区域洪涝风险存在明显的局限性, 低估了部分区域洪涝风险, 未来应综合考虑水深、流速及社会因子的多指标洪涝风险评价。

受现有数据限制及模型自身结构缺陷等原因, 本研究仍存在亟待改进的方面: 1) 对假设 2015—2019 这 5 a 间下垫面不变化带来的模拟不确定性, 目前仅采用 2017 年影像数据进行模拟分析, 对于下垫面年际变化的考虑略显不足, 未来应结合逐年高分影像数据开展研究; 2) 对假设不同重现期暴雨的雨峰系数是定值引起的情景模拟不确定性, 针对未来气候变化的不确定性及极端暴雨 ( $T > 100$  a) 与一般暴雨事件 ( $T < 10$  a) 的时空差异性考虑不够, 未来应当结合区域暴雨成因及分布规律进行情景模拟分析。

## 4 结论

本文构建了基于元胞自动机的济南市主城区二维精细化洪水淹没 CAflood 模型, 并采用 5 个道路水文站的 6 场实测洪水淹没数据率定参数并验证模型。模拟了 6 种不同重现期暴雨情景下 ( $T = 1、5、10、20、50、100$  a) 的淹没水深及范围, 并根据相关标准划分受灾预警等级, 分析探讨主城区不同暴雨情景下的洪涝风险, 主要结论如下。

1) CAflood 模型模拟的 6 场历史暴雨洪水过程的平均绝对误差约为 0.044 m, 均方根误差为 0.003 m, 场次暴雨的模拟误差均控制在  $< 0.08$  m, 表明本文构建的 CAflood 模型模拟效果较好, 可用于济南市城市洪涝淹没模拟。20180625 和 20180814 场次暴雨模拟效果欠佳, 可能与模型对城市管网系统排水考虑不足和初始边界条件设置有关。

2) 随着重现期增大, 不同受灾状况的淹没面积也发生明显变化, 除最大淹没深度  $h \leq 0.5$  m 的安全区域外, 其他受灾区淹没面积均有所增加, 增长趋势先快后缓, 且安全区域面积占比始终最大, 约占总面积 70%, 而  $> 1 \sim 2$  m 的中度受灾区面积增速相对最高, 由遭遇 1 a 一遇降雨时的 0.97 km<sup>2</sup> 增长至 100 a 一遇的 6.15 km<sup>2</sup>, 增长 5.3 倍。

3) 基于淹没深度的洪涝受灾评估可为城市防灾减灾提供参考依据, 具有一定的指导意义, 但评价结

果与历史暴雨洪涝灾害伤亡地点存在明显差别。这表明仅从洪涝模拟结果角度评估洪涝风险, 未考虑社会因素, 存在明显的局限性。

## 5 参考文献

- [1] ALLAN R P. Human influence on rainfall[J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 344
- [2] 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
- [3] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. *Nature*, 2018, 563(7731): 384
- [4] ZIEGLER A D. Reduce urban flood vulnerability[J]. *Nature*, 2012, 481(7380): 145
- [5] 陈淑芬, 张克峰, 汪峰. 济南市“7·18”严重洪涝灾害成因分析[J]. *山东师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(4): 81
- [6] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 山前平原型城市雨洪模拟与应用: 以济南市为例[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(5): 107
- [7] 王京晶, 徐宗学, 赵刚, 等. 基流分割对城市雨洪过程模拟的影响研究: 以济南市主城区为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 776
- [8] 王京晶, 徐宗学, 赵刚, 等. 基流分割对城市雨洪模拟不确定性分析的影响[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 65
- [9] 谢莹莹. 城市排水管网系统模拟方法和应用[D]. 上海: 同济大学, 2007
- [10] 胡伟贤, 何文华, 黄国如, 等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 137
- [11] GUIDOLIN M, CHEN A S, GHIMIRE B, et al. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 84: 378
- [12] 刘伊萌, 杨赛霓, 王运涛, 等. 基于CADDIES-2D模型的北京城区暴雨洪涝模拟及验证分析[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(11): 107
- [13] 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
- [14] 窦实. 济南市小清河流域暴雨洪水特性及主河槽水位设计分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2008
- [15] 冯仕远, 李庆国, 赵强. 基于Caflood的济南城区雨洪淹没模拟[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(5): 26
- [16] 王运涛, 刘海星, 张弛, 等. 基于细胞自动机的城市洪水模拟及风险分析[J]. *水资源研究*, 2018, 7(4): 360
- [17] 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
- [18] 上海市市政工程设计研究院. 给水排水设计手册: 第3册: 城镇给水[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004
- [19] 冯仕远. 城市增长背景下济南市城区洪涝模拟研究[D]. 济南: 济南大学, 2019
- [20] 伍谋. 济南市城区内涝多维耦合模拟与风险评估研究[D]. 济南: 山东大学, 2020
- [21] 李怀民, 宋苏林, 李继政. 洪水元胞自动机模型在防洪预警中的应用[J]. 山东水利, 2019(12): 19
- [22] 姜芊孜, 李金煜, 王广兴. 济南市主城区内涝积水特征及成因分析[J]. 水利规划与设计, 2021(3): 47
- [23] 曹升乐, 娄平平. 济南城区洪涝灾害成因分析[J]. 水文, 2009, 29(2): 87
- [24] 杨威. 济南“7.18”暴雨洪涝灾害及其启示[J]. 中国防汛抗旱, 2007(6): 19
- [25] 王京晶. 济南市主城区城市洪涝模拟与风险分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2022
- [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
- [27] 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
- [28] 许静, 孙征, 马宇熹. 济南市“7·18”特大暴雨洪水灾害成因分析及对策[J]. 城市道桥与防洪, 2009(6): 90
- [29] 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
- [30] 程涛. 海绵城市示范区暴雨洪涝模拟与减灾方法研究: 以济南市为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2019

## Simulating urban flooding/waterlogging by cellular automata technique: case of downtown Jinan

HUANG Jiwen<sup>1)</sup> WANG Jingjing<sup>2, 3)</sup> XU Zongxue<sup>3, 4)</sup> TANG Qingzhu<sup>3, 4)</sup> YE Chenlei<sup>3, 4)</sup>

(1) Water Resources Research Institute of Shandong Province, 250013, Jinan, Shandong, China;

2) Guangdong Bureau of Hydrology, 510150, Guangzhou, Guangdong, China;

3) College of Water Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

4) Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Dual influences of global climate change and human activities has led to increasingly prominent urban flooding/waterlogging problems. Jinan is more vulnerable to urban flooding/waterlogging due to high terrain in the south and low terrain in the north. A meta-automata CAflood model was constructed in this work to analyze data from six historical rainstorm processes, to simulate flooding under six different return periods. The average error between measured and simulated values was found to be 0.044 m, indicating very good model performance. With increased return period, area of low risk with maximum submerged depth  $h$  of  $\leq 0.5$  m was found to account for a significant proportion of 70%. Area of other affected states was found to increase, and growth trend was fast at first and then became slower. Moderately affected area with  $1 \text{ m} < h \leq 2 \text{ m}$  showed the highest growth rate, increasing from  $0.97 \text{ km}^2$  at the 1-year return period to  $6.15 \text{ km}^2$  at the 100-year return period, an increase of 5.3 times. Flood risk zoning based on inundation depth provided some reference for urban disaster prevention and mitigation. Significant difference between heavy disaster area in the zoning map and historical flood disaster location was found. If only flood simulation is considered in flood risk assessment, without considering social factors, the gained results would have limitations.

**Keywords** CAflood model; downtown area; flood/waterlogging simulation; Jinan city

【责任编辑: 武 佳】