

济南市小清河黄台桥以上流域城市洪涝过程模拟与风险分析^{*}

胡嘉玮^{1,2)}, 徐宗学^{1,2)†}, 陈浩^{1,2)}, 黄亦轩^{1,2)}, 宋苏林³⁾

(1)北京师范大学水科学研究院, 北京; 2)城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京;
3)济南市水文中心, 山东济南)

摘要 为探究济南市小清河黄台桥以上流域洪涝过程演化规律及洪涝风险, 构建 SWMM 和 InfoWorks ICM-2D 耦合洪涝模型, 采用保留精英策略的遗传算法率定 SWMM 模型主要参数, 模拟分析不同降雨重现期下管网排水能力、地表淹没特征及风险分布特征。结果表明: 改进后的遗传算法可使模型精度在短时间内达到较优水平, 显著提升参数率定效率; 该耦合模型在研究区展现出良好的适用性。随降雨重现期增大, 超载管道数与溢流节点数显著增加, 10 a 重现期时地下管网容量基本饱和, 超过 10 a 后内涝风险快速上升; 流域淹没总面积从 5 a 的 573.38 hm² 增至 100 a 的 956.26 hm², 高水深区集中于二环南路、经十路、腊山立交等主干道; 洪涝风险等级随重现期增大而不断提高, 高风险区面积不断增加, 流域对短重现期降雨有一定抗风险能力, 但极端降雨情况下需重点开展内涝防范工作。

关键词 洪涝模拟; 淹没水深; 洪涝风险; 遗传算法; 小清河流域

中图分类号 TV122+1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2025212

0 引言

近几十年来, 随着全球气候变化加剧及城市化进程的快速推进, 极端天气事件频发, 城市洪涝灾害日益严重^[1]。济南 2007 年“7·18”、北京 2012 年“7·21”、武汉 2015 年“7·23”、郑州 2021 年“7·20”等特大暴雨引发城市严重内涝, 造成重大人员伤亡与财产损失^[2]。以济南“7·18”特大暴雨为例, 该次暴雨呈现出极强的短时降雨特征, 市区 1 h 最大降水量达 151 mm, 3 h 最大降水量则高达 180 mm, 突破了当地有气象观测记录以来的历史极值。此次极端降雨事件引发了严重的洪涝灾害, 造成 30 余人死亡、170 余人受伤, 约 33 万名群众受灾; 城市内部交通系统一度陷入全面瘫痪, 该次暴雨导致全市直接经济损失约为 13.2 亿元。可以说, 城市“看海”已成为大中城市内涝防治的棘手难题^[3]。此外, 城市开发过程中大量河湖及低洼区域被填埋, 导致自然蓄滞洪空间被压缩; 城区老旧排水管网不仅建设标准偏低, 清淤维护工作也存在滞后问题。同时, 我国多数大城市依托大江大河发展, 城市排水防涝基础设施与江河连通, 这一特点使其易面临外洪内涝的双重威胁^[4]。通过城市暴雨内涝模拟

研究, 可以揭示不同降雨情景下城市内涝的时空演变特征, 为城市排水管网改造及布局优化、城市洪涝风险评估、制定针对性内涝应急响应方案、因地制宜推进韧性提升的洪涝防治策略^[5]提供基本依据。

目前, 已有大量学者在城市洪涝模拟技术领域开展了相关研究。其中, 借助水文模型以及水动力模型对降雨-径流-内涝的完整过程进行模拟, 已成为该领域的主流研究手段, 常用的模型有 SWMM、MIKE、InfoWorks ICM、IFMS Urban、LISFLOOD-FP、CAflood 等^[6], 其中 SWMM 模型已在洪涝过程模拟和风险评估等领域得到广泛应用^[7-11]。SWMM 的参数分为 2 类: 1) 物理参数, 这类参数多通过实地测量或地理空间分析获取, 例如子汇水区面积、特征宽度、不透水率及平均坡度等, 均可借助 ArcGIS 软件分析计算得出^[12]; 2) 过程参数(如糙率、下渗率等), 需通过率定调试确定^[13]。参数率定的方式主要有手动率定、自动优化算法和机器学习算法等, 其中手动率定方法依据经验反复调整敏感参数, 使模拟结果逼近观测值, 这种方法主观性强, 效率较低, 且难以应对多参数率定问题, 已经不能满足模型的应用需求^[14]; 自动优化算法则具备效率高、率定精度高、能够处理较多参数的优点^[15];

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目(52239003)

[†] 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: 2025-11-16

机器学习同样具备自动优化算法所具有的优点, 却对数据有更高的要求. 在自动优化算法中, 遗传算法凭借全局寻优能力突出、适应范围广、鲁棒性强等优点, 被众多学者应用于 SWMM 模型的参数率定研究中, 并取得了丰富的成果^[16-17]. 不过该方法收敛速度偏慢, 在一定程度上限制了其寻优效率. 保留精英策略通过将每一代的最优解直接传递给下一代, 有效弥补了传统遗传算法因随机操作可能导致的优质解丢失、收敛慢、稳定性差等问题, 是提升算法性能的有效思路^[18].

SWMM 模型采用水位-体积曲线法模拟地表水深^[19], 但其无法准确刻画水流在二维空间的扩散、漫溢等动态过程, 也无法输出水深、淹没范围等二维淹没特征. 同样地, 依靠水动力学模型也可能无法完全捕捉流域内的关键水文要素, 从而导致潜在的局限性^[20]. 因此, 当前研究多利用 SWMM 与其他水动力模型耦合以实现较为准确的地表二维淹没模拟. 卢兴超等^[21]构建了基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型的水文水动力耦合模型, 在北京清河流域某典型排水分区实现了较高精度的内涝模拟; 王兆礼等^[22]基于 SWMM 和 TELEMAC-2D 模型开发新型耦合模型 TSWM, 验证显示该模型可精准模拟研究区内涝, 满足精细化模拟需求; 曾照洋等^[23]以广州市长湓片区为研究对象, 尝试耦合 WCA2D 与 SWMM 模型, 探究暴雨洪涝快速二维模拟技术, 结果证实模型精度良好; 廖如婷等^[24]则在北京大红门排水区构建 SWMM 和 InfoWorks ICM-2D 耦合模型, 分析不同重现期降雨下的管网排水能力、地表淹没及内涝风险, 并证明该模型具有较好的模拟效果.

济南市作为中国北方的重要城市, 其地形特征南高北低, 发生强降雨时, 南部山区形成的山洪迅速下泄至北部济南市区, 受限于排水系统排涝能力不足, 洪水无法被及时容纳与外排, 致使市区内多处积水, 形成“外洪内涝”现象, 可能造成严重的人员伤亡和财产损失, 因此该地成为内涝防控与模拟研究的重点区域. 已有学者在该市构建 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型、CAflood 等洪涝模型开展模拟研究^[25-26], 但尚未有研究应用 SWMM 与 ICM-2D 耦合方案, 且参数率定多依赖传统方法、效率与精度有限, 难以满足当地精细化防洪决策需求. 鉴于 ICM-2D 模块可精准计算洪水淹没范围、水深及淹没历时, 还可通过灵活的网格划分适配复杂城市的下垫面情况^[27], 有效弥补 SWMM 模型在二维模拟上的缺陷, 因此本文选用 SWMM 与 ICM-2D 松散耦合的方式在济南市小清河黄台桥以上流域开展洪涝过程模拟研究, 使用保留精

英的遗传算法优化 SWMM 参数率定过程, 再通过耦合二者构建洪涝模型并验证其可靠性, 在此基础上, 对不同设计暴雨情景下城市管网排水能力、地表淹没特征及洪涝风险情况进行定量模拟分析, 为相关部门进行土地利用规划和制定针对性防洪措施提供参考, 同时验证这一组合方法在“依山傍城”典型流域的适用性与可靠性, 以期为同类型城市流域提供可复制的技术路径.

1 研究区概况与方法数据

1.1 研究区概况

研究区为山东省济南市小清河黄台桥以上流域(图1), 地理位置为 116°47'~117°07'E, 36°33'~36°45'N. 流域面积 326 km², 包含济南市主城区, 主要有小清河、北太平河、兴济河等支流. 研究区属暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 13.6 °C, 多年平均降水量为 580~750 mm, 主要集中在夏季, 占全年降水量的 64.5%^[28].

1.2 SWMM 模型

SWMM 模型由美国环境保护署研发, 是一款用于动态模拟城市雨水径流和水质过程的开源软件, 本文借助该模型对研究区的降雨径流过程展开模拟分析. 结合管网数据, 研究区被概化为 477 个子汇水区、811 个节点与 801 条管渠(含 98 条河道及 703 条城市管道), 流域出口设定为黄台桥水文站(图2), 模拟过程中, 选取参数较少且适用于城市区域的 Horton 模型计算地表产流, 其计算公式为

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}, \quad (1)$$

式中: f_t 为 t 时刻的下渗率, mm · h⁻¹; f_0 为初始土壤下渗率, mm · h⁻¹; f_c 为土壤稳定下渗率, mm · h⁻¹; k 为下渗衰减系数; t 为下渗时间, h.

考虑到本文所构建的 SWMM 模型具有复杂的管网系统和河道, 因此采用精度较高的动力波法求解管网汇流, 其数学表达式为

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial Z}{\partial x} + gn^2 \frac{Q|Q|}{SR^{4/3}} = 0, \quad (3)$$

式中: S 为过水断面面积, m²; Q 为过流量, m³ · s⁻¹; t 为时间变量, s; x 为空间变量, m; Z 为水位, m; R 为水力半径, m; n 为糙率; g 为重力加速度, m · s⁻².

1.3 保留精英策略的遗传算法

采用保留精英策略的遗传算法对 SWMM 进行自动率定, 并以纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)作为目标函数评估模拟效果. 该算法

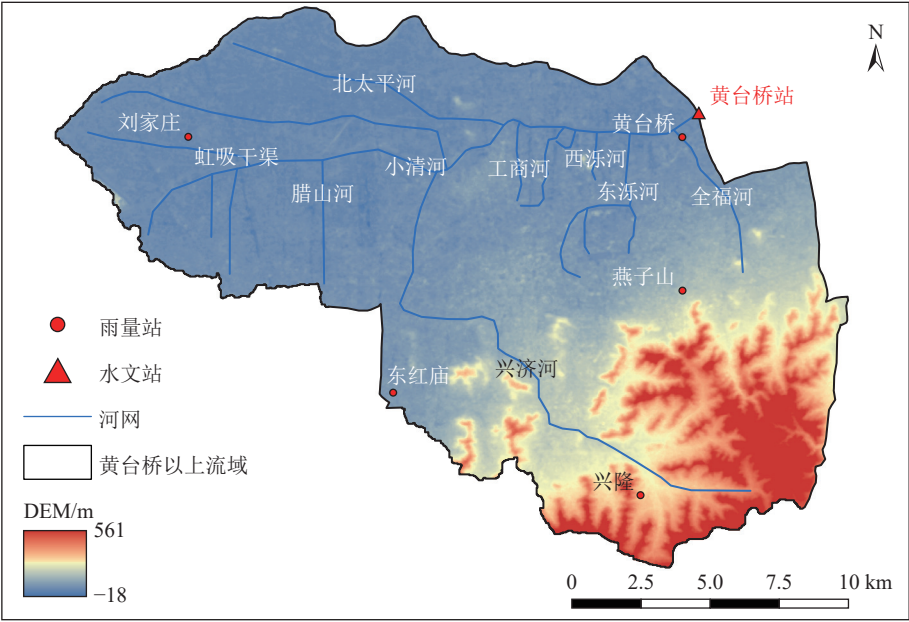


图 1 研究区概况

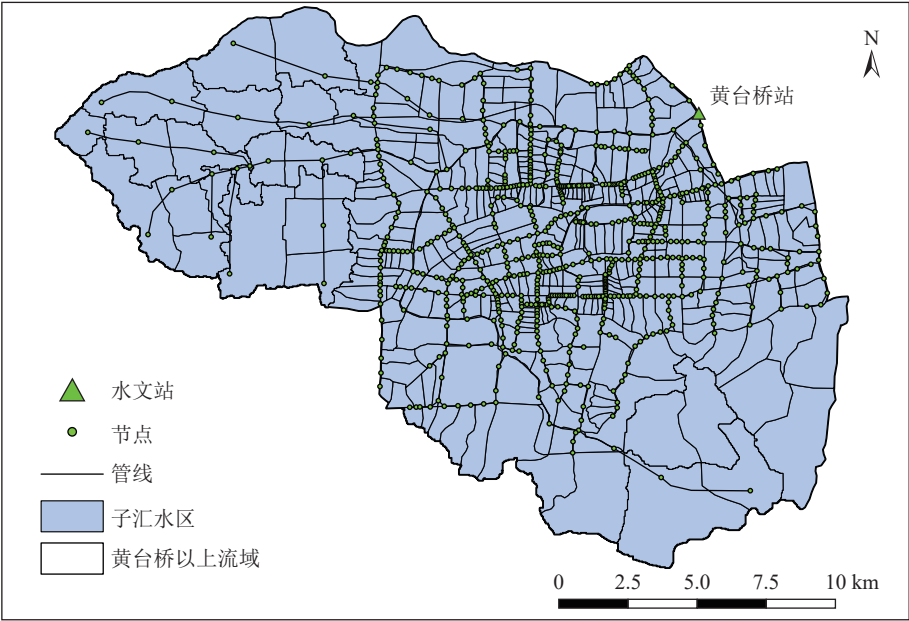


图 2 研究区概化结果

是传统遗传算法的改进形式,核心是在迭代中保留种群内适应度最优的个体(精英),不参与交叉、变异等可能破坏优良基因的操作,直接进入下一代种群.该策略弥补了传统算法随机操作易丢失最优解的缺陷,能加快收敛速度,提升算法稳定性,具体算法流程如下:

1)种群初始化.明确待优化 SWMM 模型参数的取值范围,确保参数符合水文物理意义,随后采用随机生成的方式,在参数取值范围内生成一定数量的个体,每个个体对应一组完整的待率定参数组合,所有个体共同构成初始种群.

2)计算种群适应度(目标函数).针对初始种群或

每一代新生成的种群,将个体对应的参数组合输入 SWMM 模型,运行模型得到模拟值后,计算适应度值,量化评估该组参数的优化效果.

3)判断迭代终止条件.计算种群个体适应度函数值,判断是否满足迭代终止条件:若达到预设的最大遗传代数或连续多代精英个体的适应度值无显著提升,则认为算法已收敛,停止迭代,此时当前种群中的精英个体对应的参数组合即为 SWMM 模型的最优率定参数.若未满足终止条件,则执行步骤 4).

4)筛选精英个体.根据步骤 2)计算得到的适应度函数值,对当前种群中的个体进行排序,筛选出适应度最高的个体作为这一代的“精英个体”,确保其保留

当前种群的最优参数组合,避免优质基因在迭代中丢失。

5)对剩余个体进行遗传操作。对筛选出精英个体后剩余的个体,依次执行选择、交叉、变异3类遗传操作,生成新的个体。

6)合并精英与新个体构成新一代种群。将步骤4)筛选出的精英个体,与步骤5)通过遗传操作生成的新个体进行合并,组成新一代种群,实现种群的迭代更新,然后转到步骤2)。

停止迭代后,所得种群中的精英个体对应的参数组合即为SWMM的参数取值,模型参数的优化过程详见图3。

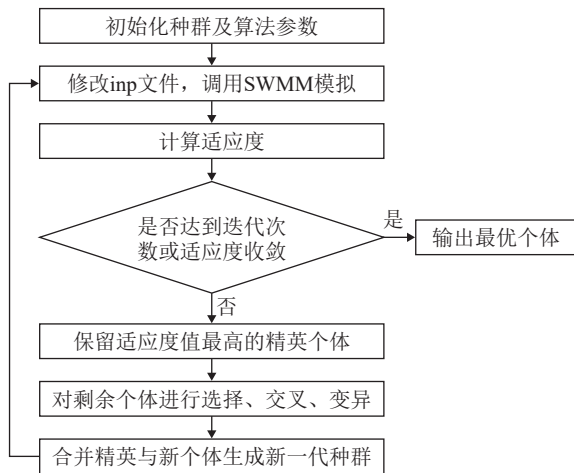


图3 保留精英策略的遗传算法优化模型参数流程

1.4 二维水动力模型

InfoWorks ICM是一款由英国Wallingford公司开发的用于城市水系统模拟软件,能够模拟降雨、地表径流、管网排水、河道洪水等城市水系统的全过程,现已广泛应用于城市防洪排涝规划、水资源管理以及基础设施设计等方面^[29-30]。ICM-2D是InfoWorks ICM内置的二维水动力模块,能精细模拟地表洪水的空间分布与演进过程,尤其适用于积水范围、水深及淹没历时的计算。该模块的淹没模拟采用Godunov型有限体积法数值求解浅水方程,表达式^[31]为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{ID}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + Q_{ID}u_{ID}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + Q_{ID}v_{ID}, \quad (6)$$

式中: t 为时间, s; h 为水深, m; u 和 v 分别为 x 、 y 方向的流速分量, $m \cdot s^{-1}$; $S_{0,x}$ 和 $S_{0,y}$ 分别为 x 、 y 方向的底坡分量, $m^2 \cdot s^{-2}$; $S_{f,x}$ 和 $S_{f,y}$ 分别为 x 、 y 方向的摩阻分

量, $m^2 \cdot s^{-2}$; Q_{ID} 为面积出流量, $m \cdot s^{-1}$; u_{ID} 和 v_{ID} 分别为 Q_{ID} 在 x 、 y 方向的速度分量, $m \cdot s^{-1}$ 。

1.5 模型耦合

SWMM本质是聚焦城市排水管网的一维水力模型,无法刻画水流在二维空间的扩散、漫溢等动态过程,也无法输出水深、淹没范围等二维关键参数,而ICM-2D模块可较为精准地计算洪水的淹没范围、水深以及淹没历时等参数,弥补了SWMM的不足。因此,本文采用SWMM与ICM-2D松散耦合的方式,将SWMM输出的节点溢流数据作为点源输入ICM-2D,后者根据研究区高程数据、排水管网节点位置以及溢流节点的流量过程,进一步模拟溢流在地表的扩散过程,得到最大淹没水深、淹没范围、最大流速等结果。在划分网格时,单个网格面积越小,其刻画立交桥、道桥、铁路、小区房屋等区域的微地形阻水、导水作用^[27]就越精细,然而更细的网格意味着更高的计算负担和资源消耗^[32],考虑到流域面积较大,为在保证地表模型精度的同时提升计算效率,将非结构网格的最小单元面积设为 $50 m^2$,最大单元面积设为 $150 m^2$,最终生成3 414 951个三角形网格。此外,将ICM-2D的模拟时间步长设置为10 s,步长乘子设置为5,模拟时间设置为8 h。

1.6 数据来源

本文构建模型需要河道管网数据、下垫面数据、降雨径流数据、城市行洪及积水数据等。其中河道管网数据由济南市水文局提供;DEM数据获取自星图云开放平台,分辨率为30 m;土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心,分辨率为30 m;坡度和不透水率数据通过ArcGIS软件分析处理生成;降水数据来自流域内黄台桥、燕子山、兴隆、东红庙和刘家庄5个雨量站逐小时降雨量观测数据,选取20040810和20050630这2场降雨事件用于参数率定,20070718和20130723这2场降雨事件用于验证,经泰森多边形划分后,分配至对应的子汇水区;径流数据来源于黄台桥水文站;水位站、低洼地积水站积水数据来源于济南城市水文年鉴,与降雨数据同步用于模型率定与验证。

2 结果与分析

2.1 参数率定与验证

设置遗传代数50代,种群数为40,交叉概率为0.7,变异概率为0.2。以20040810和20050630这2场洪水事件用于SWMM核心参数率定,以20070718和20130723这2场洪水事件进行验证,参照文献^[33],对4场实测洪水过程预先进行基流分割处理。参数率

定范围参照文献 [34], 率定与验证结果分别见表 1 与表 2、图 4。由表 2 可知, 率定期与验证期的 NSE 均 >0.8 , 洪峰流量相对误差 R_{Ep} 均控制在 $<20\%$, 洪峰出现时间绝对误差 A_{Ep} 均 ≤ 1 h, 符合 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》的精度标准, 证明参数设置合理且模型具备可靠性。值得注意的是, 针对 20050630 号洪水事件的率定结果显示: 传统遗传算法迭代 100 代耗时 52 967 s, 平均迭代时间 529.67 s; 而改进遗传算法后仅迭代 50 代, 耗时 25 991.5 s, 平均迭代时间 519.83 s。相较于传统算法, 保留精英策略每代迭代时间更短, 并能以相对较低的迭代次数使模型精度达到较优水平, 率定期 NSE 仍高于 0.910、验证期 NSE 高于 0.840。较传统算法整体率定效率显著提升。

将率定后的 SWMM 模型与 ICM-2D 进行耦合, 并利用 2007 年济南“7·18”暴雨观测数据进行验证, 图 5 为此次暴雨下黄台桥以上流域模拟积水情况, 可以看出模拟积水位置与银座购物广场、顺河高架、北园高架、民生大街等重灾区实际积水点空间匹配度较高, 表明模拟结果在关键积水区域、积水范围等方面, 与“7·18”暴雨洪涝灾害的实际情况吻合度较高。但受限于 DEM 精度, 对流域下垫面的刻画不够准确, 导致部分地区洪涝模拟不够精准, 在今后的研究中将采用更高精度的 DEM 数据, 并加入市区建筑物轮廓,

表 1 SWMM 参数率定结果

模块	模型参数	取值范围	优化结果
子汇水区模块	不透水面曼宁系数	0.005~0.050	0.005 0
	透水面曼宁系数	0.1~0.5	0.328 1
	不透水面洼蓄深度/mm	0.1~50.0	0.316 4
	透水面洼蓄深度/mm	0.1~50.0	19.728 1
	最大下渗率/(mm·h ⁻¹)	50~100	95.921 1
下渗模块	最小下渗率/(mm·h ⁻¹)	0~50	22.684 1
	衰减系数	2~7	5.337 3
	干燥时间/d	0~10	0.600 1
管道模块	管道糙率系数	0.01~0.20	0.051 9
	河道糙率系数	0.01~0.09	0.010 8

表 2 率定期与验证期洪水过程模拟结果

时期	洪号	NSE	$R_{Ep}/\%$	A_{Ep}/min
率定期	20040810	0.913	9.62	6
	20050630	0.933	12.27	48
验证期	20070718	0.844	12.78	30
	20130723	0.840	18.18	0

提高建模精度。综合来看, 本文所构建的流域暴雨洪涝模型, 能够较为准确地反映积水点的实际情况, 具有较好的模拟效果。

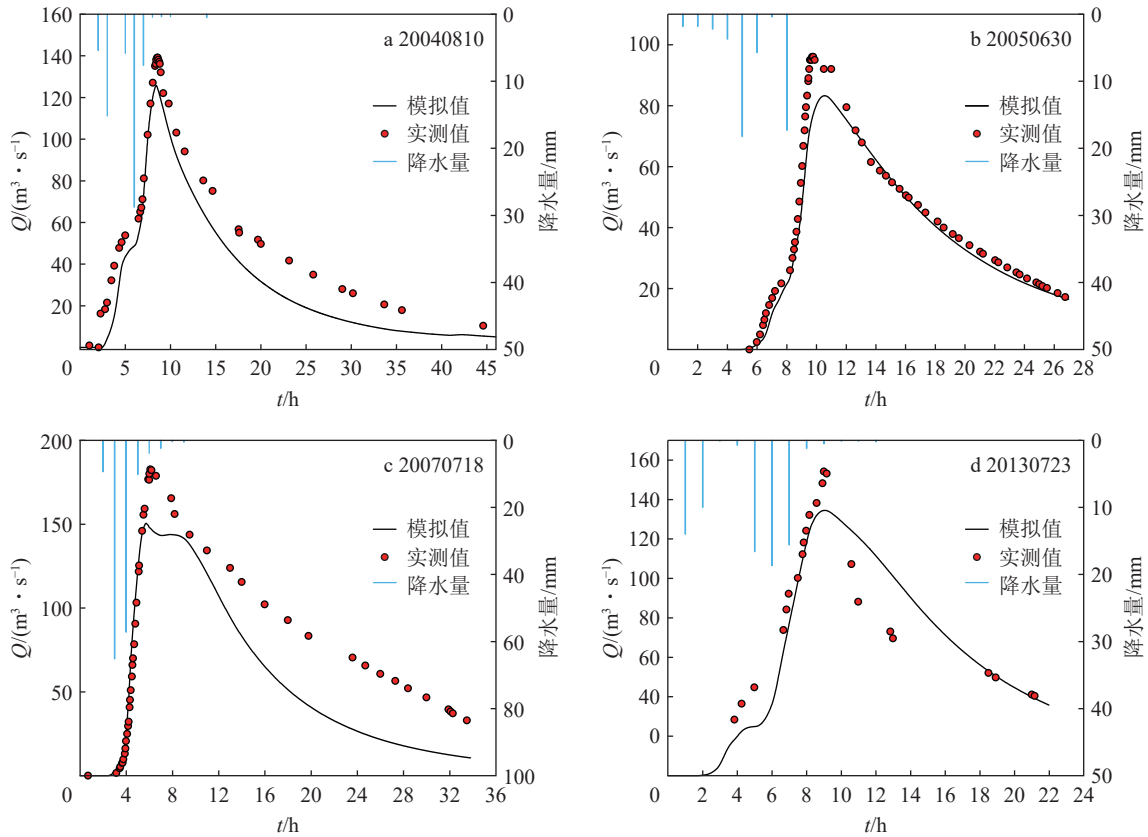


图 4 流量过程模拟与实测对比

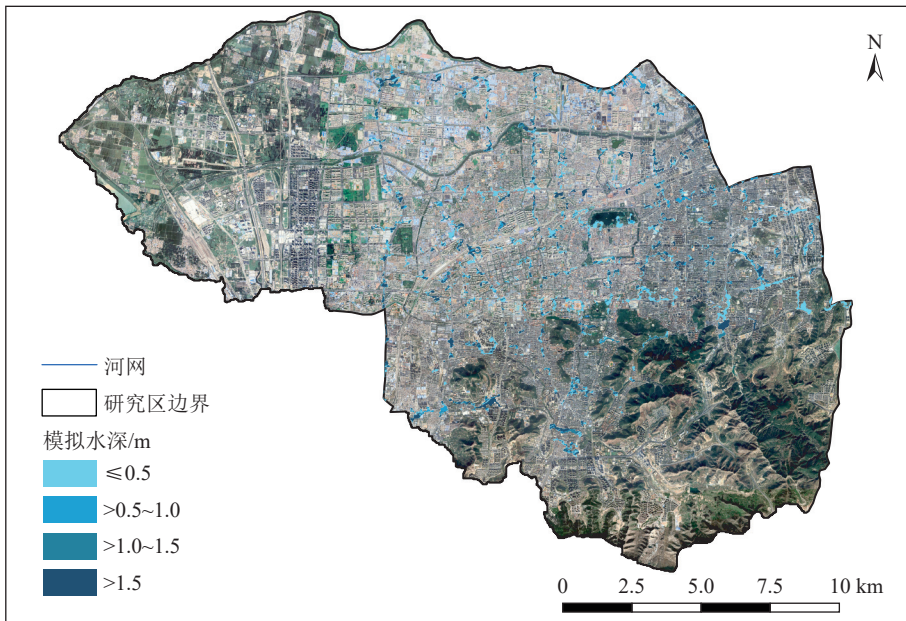


图5 济南“7·18”暴雨小清河黄台桥以上流域模拟积水情况

2.2 设计暴雨

济南市降雨强度公式为

$$i = \frac{8.5119(1+0.932\lg P)}{(t+7.347)^{0.617}} \quad (7)$$

芝加哥雨型是《城市暴雨强度公式编制和设计暴雨雨型确定技术导则》所推荐的雨型,能灵活反映不同暴雨的时程分布特征,因此本文选取该雨型设计降雨情景,设计重现期为5、10、50、100 a,降雨时间为120 min,结合相关学者研究结果^[35-36],将设计雨型雨峰位置系数设置为0.4,时间步长选为5 min.暴雨过程如图6所示.

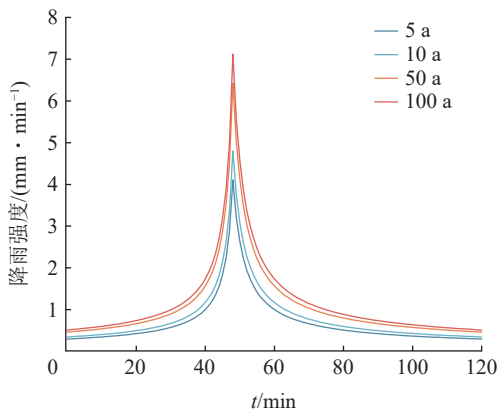


图6 不同重现期下研究区设计暴雨过程

2.3 管网排水能力

济南现有多数排水管道按照3~5 a重现期标准设计,本文利用构建的暴雨洪涝模型模拟5、10、50、100 a重现期设计暴雨条件下管网运行情况,并选取超载管道数和溢流节点数作为评估区域管网排水能

力的关键指标,根据SWMM模拟结果,统计不同重现期的管网排水情况如表3所示.

表3 不同重现期设计暴雨条件下管网排水情况

重现期/ a	降水量/ mm	超载 管道数/条	超载管道 比例/%	溢流 节点数/个	溢流节点 比例/%
5	85.3	594	74.2	550	67.8
10	99.8	608	75.9	566	69.8
50	133.5	615	76.8	586	72.3
100	148.0	625	78.0	599	73.9

统计结果显示,随降雨重现期增大,超载管道与溢流节点数量均呈上升趋势.其中,排水能力不足5、100 a重现期设计暴雨条件的管道占比分别为74.2%、78.0%;5 a重现期时67.8%的节点已发生溢流,100 a重现期时溢流节点占比升至73.9%.这与廖如婷等^[24]在北京大红门排水区的研究结果相似.

为直观呈现管网超载空间分布特征,基于上述模拟结果绘制不同重现期下管网超载情况示意图(图7).由图7可知,流域中部大部分管段排水能力不足5 a一遇,相比之下,城市东侧管网的强降雨应对能力略优于西侧,但当重现期>10 a时,也基本达到饱和和运行状态,这一空间分布特征与前述超载管道数量的统计规律高度吻合.

综合统计分析结果与不同重现期下管网超载情况图可知,随重现期增大,溢流节点数与超载管道数呈同步上升趋势,出现这一结果的原因可能是研究区旧排水管网设计标准低且存在老化现象,因此排水管

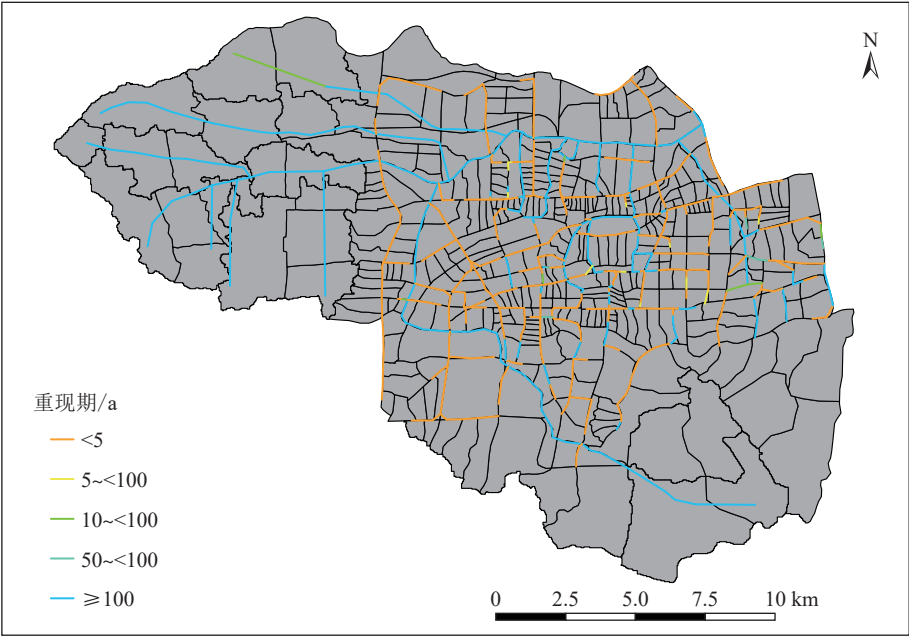


图 7 不同重现期设计暴雨条件下管网超载情况

网系统整体排水能力不足,当遭遇 5 a 重现期设计暴雨时,流域内大部分管道已处于超载状态,相应下游节点随之产生溢流.当重现期达到 10 a 时,管网内大量节点持续溢流、管道长时间超载,进一步导致排水能力逐步衰减,造成流域洪涝风险增大.

2.4 地表淹没特征

利用构建的流域洪涝模型,模拟不同重现期暴雨下的地表淹没状况.参考 GB 51222—2017 及相关文献 [24, 37],依据不同水深对行人、车辆的影响及对建筑物的破坏程度,将淹没水深划分为 0~0.2、>0.2~

0.5、>0.5~2.0、>2.0 m 共 4 个区间.不同重现期下流域地表淹没情况见图 8,不同重现期条件下洪涝区域在济南市区内呈零星分布,高水深区域主要集中在二环南路、二环东高架路、经十路、浆水泉路、济南天桥立交、经二路下凹立交等地,这些地区出现高水深区域的原因可能如下:1)上述大部分路段位于城区南侧,靠近南部山区,强降雨发生时,南部山区的洪水迅速下泄,使得这些路段成为行洪通道;2)高架桥和立交桥下位置路段地势低洼,且多为下凹桥区,易形成深度积水;3)城区旧排水管网设计标准较低,管线系

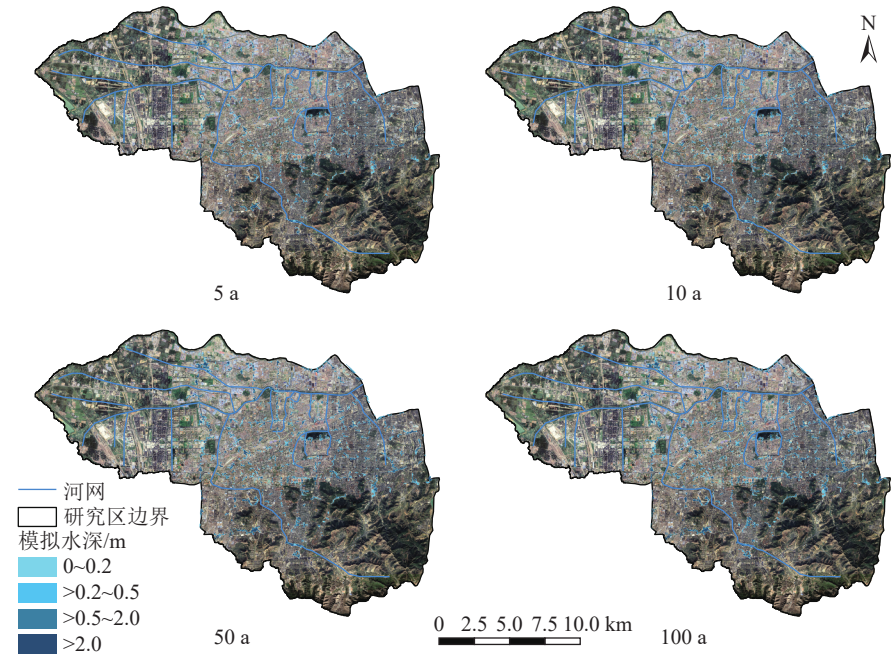


图 8 不同重现期设计暴雨条件下地表淹没情况

统老化,发生强降雨时,排水系统难以及时排除涝水;4)这些地区多为道路,下垫面不透水率高,积水难以通过入渗消减。具体来看,在5~10 a重现期,积水点主要位于纬十二路与胶济高铁交会的下凹立交桥、昆仑小学、济南大学和经十路,这时积水点呈散点状分布;在10~50 a重现期,新增的积水点主要是济南天桥立交、北坦立交桥、腊山立交桥和浆水泉路,此时,部分积水已有相连成片的趋势;在50~100 a重现期下,新增的积水点主要是生产路立交、济南青少年宫、二环南路,此时大部分积水点已相连成片,在城市中沿主干道呈线状分布。对照济南水文年鉴所提供的低洼积水站积水概况,常年积水较深(>1.00 m)的有北坦立交桥、济南青少年宫站、生产路立交站、昆仑小学站、腊山立交桥,与本研究结果的积水点吻合度较高,且与李鹏等^[25]的研究结果相似,这表明模拟结果具有合理性,同时也说明内涝易发点主要分布在城市交通主干道及立交桥下。

进一步统计不同重现期下地表淹没情况(表4),数据表明:流域总淹没面积随重现期增大呈显著上升趋势,流域内总淹没面积由5 a重现期的573.38 hm²增加至100 a重现期的956.26 hm²,对应占流域面积比重由1.76%提升至2.93%,提高1.17个百分点;且各水深区间的淹没面积均随重现期增大有所增加。重现期为5 a时,0.2 m以下的低水深区域面积占比最大,为33.9%,随着重现期增大,低水深区域面积虽有增加,但其占比持续减少,而高水深区域的面积及其占比逐渐增加,说明低水深区域逐步向高水深区域转化,流域洪涝风险也随之上升。需要说明的是,由于本模型对流域管网进行了概化处理,道路上的节点数量会相应减少,有些非主干道路可能存在没有设置节点的情况,使得一些原本会发生溢流的节点被遗漏,部分实际存在的积水点未在模拟中呈现,研究区实际的内涝状况可能比模拟结果更严重,需要对易涝区域加以关注,并及时采取合理的应对措施。

表4 不同重现期设计暴雨条件下地表淹没面积统计

重现期/a	不同水深淹没面积/hm ²				总淹没面积/hm ²	占流域面积比例/%
	0~0.2 m	>0.2~0.5 m	>0.5~2.0 m	>2.0 m		
5	194.61	70.34	182.20	126.23	573.38	1.76
10	203.96	81.43	212.30	159.97	657.66	2.02
50	227.57	104.34	284.45	249.71	866.07	2.66
100	235.26	114.58	314.51	291.91	956.26	2.93

2.5 流域洪涝风险分析

本文采用英国环境、食品和农村事务部使用的洪水中人或物安全计算的风险评价方法^[38]计算风险值 H_R ,以量化研究区域的洪涝风险,计算公式为

$$H_R = h(v + 0.5) + F, \quad (8)$$

式中: H_R 为风险值; h 为水深,m; v 为流速, $m \cdot s^{-1}$; F 为泥石因子,当 $h \leq 0.25$ m时, $F = 0$;当 0.25 m < $h \leq 0.75$ m时, F 在耕地或草地取0、林地取0.5、建设用地取1;当 0.75 m < h 或 $v > 2$ m · s⁻¹时, F 在耕地或草地取0.5、林地或建设用地取1。

依据ICM-2D模拟的水深和流速结果,利用式(8)计算风险值并对研究区域进行风险等级划分,根据相关研究^[39],将风险值为0~0.75, >0.75~1.25, >1.25~2.50, >2.50划分为低、中、较高、高风险。得到不同重现期下的洪涝风险空间分布(图9)。结果显示,各重现期洪涝风险区零星分布在研究区中部、南部、北部,其中天桥立交、二环南路、浆水泉路等区域存在大面积高风险区,这些区域地势低洼,下垫面以不透水面为

主,先天具备易积水的条件,发生强降雨时,南部山区洪水受地形影响快速汇流至北部市区,管网系统排水能力有限,无法及时排出超额雨水,进而产生较多溢流节点,最终在上述若干主干道路形成“马路行洪”现象,对行人和车辆安全构成直接威胁,导致风险值及等级均偏高。进一步统计分析不同重现期下洪涝风险分区面积,结果如表5所示。当重现期从5 a增至10 a时,低、中风险区向较高、高风险区转化,低、中风险区面积减少,较高、高风险区面积则快速增加。重现期从10 a到100 a的阶段,低、中风险区面积缓慢上升,而主要由低、中风险区转化而来的较高、高风险区面积仍保持快速增长。整体来看,5~100 a重现期内,中风险区外各风险等级区域面积均有增长,但100 a重现期低、中风险区面积占比较5 a时分别下降14.68个百分点、9.40个百分点,较高、高风险区面积占比则分别提升3.81百分点、20.27百分点。该结果表明,面对较短重现期的降雨,黄台桥以上流域具备一定抗风险能力,但面对极端降雨时,易出现较高、高风险区域,需重点关注该地区城市内涝防治问题。

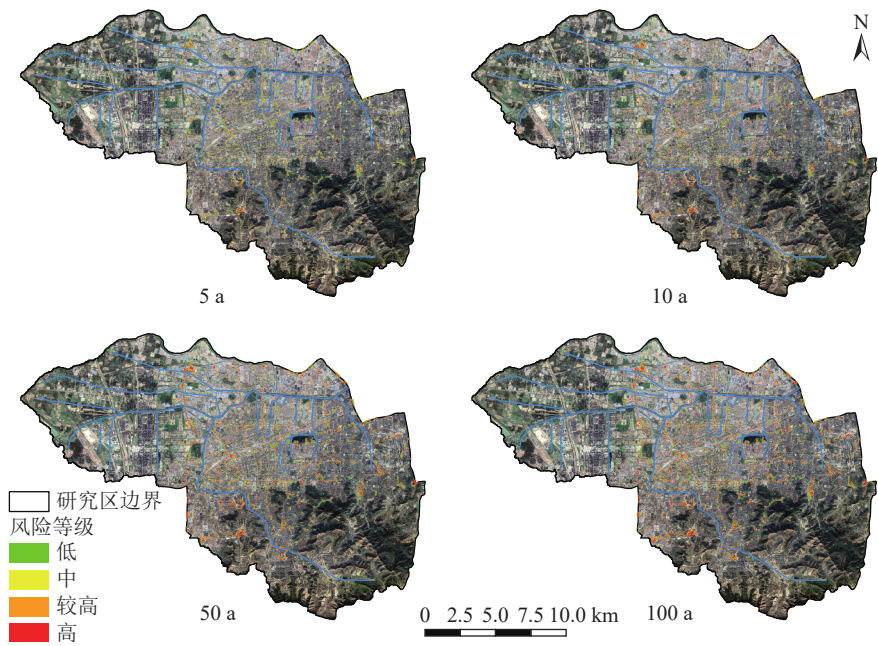


图 9 不同重现期下洪涝风险空间分布

表 5 不同重现期下洪涝风险分区面积

重现期/a	不同风险区域面积/hm ²				总淹没面积/hm ²	不同风险区域面积占比/%			
	低	中	较高	高		低	中	较高	高
5	225.96	71.25	171.79	104.38	573.38	39.41	12.43	29.96	18.20
10	208.08	20.74	221.36	207.48	657.66	31.64	3.15	33.66	31.55
50	230.08	26.45	293.43	316.11	866.07	26.57	3.05	33.88	36.50
100	236.51	28.96	322.90	367.88	956.26	24.73	3.03	33.77	38.47

3 结论

本文在济南市小清河黄台桥以上流域构建了 SWMM 与 ICM-2D 耦合模型,实现了对该区域洪涝过程的模拟,并基于模拟结果开展了洪涝风险分析,主要结论如下:

1)在小清河黄台桥以上流域的暴雨洪涝模拟研究中,保留精英策略的遗传算法能够使模型精度在短时间内快速达到较优水平,显著提升参数率定效率.率定 SWMM 与 ICM-2D 耦合模型展现出良好的适用性,所输出的模拟结果能够较为真实地呈现研究区的洪涝实际状况,这一方法组合能够为其他类似城市流域提供可复制的技术路径.

2)随降雨重现期增大,超载管道数、管网溢流节点数不断上升,地下管网容量在重现期为 10 a 时基本接近饱和,重现期超过 10 a 时,内涝风险快速上升.在排水管网概化的情况下,研究区 70% 以上的管段遇到 5 a 一遇降雨时即发生超载现象,部分老旧管网设计标准低,需对易超载排水管段进行优化改造.

3)不同重现期洪涝区域在济南市区呈零星状分布,流域总淹没面积从 5 a 的 573.38 hm² 增加至 100 a 的 956.26 hm²,且低水深区逐步向高水深区转化.高水深区集中于二环南路、经十路、腊山立交等主干道,与实测积水点位吻合.洪涝风险等级随重现期增大而不断提高,5~100 a 重现期间较高、高危险区面积分别提升 151.11、263.50 hm²,流域对短重现期降雨有一定抗风险能力,但极端降雨情况下需重点防范城市内涝.

4)为提升研究精细化水平与应用价值,未来可从两方面深化:引入更高分辨率 DEM 数据,提升淹没模拟精度;耦合地形、人口、GDP、防灾减灾设施等多源数据,构建“致灾因子-孕灾环境-承灾体-防灾减灾能力”综合评估体系,使风险分析更加全面,为防洪决策提供更为科学的研究支撑.

4 参考文献

[1] 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
[2] 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
- [3] 徐宗学, 程涛, 任梅芳. “城市看海”何时休: 兼论海绵城市功能与作用[J]. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(5): 64
- [4] 刘家宏, 梅超, 刘宏伟, 等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. *水科学进展*, 2023, 34(2): 172
- [5] 程晓陶, 刘昌军, 李昌志, 等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 757
- [6] 臧文斌, 赵雪, 李敏, 等. 城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(11): 1
- [7] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析: 以福州市白马河片区为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(6): 784
- [8] Ma B Y, Wu Z N, Hu C H, et al. Process-oriented SWMM real-time correction and urban flood dynamic simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127269
- [9] Zhao L D, Li J Z, Zhang T, et al. Multi-method combined analysis of urban flood risks and its influencing factors under low impact development[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130927
- [10] Wang Z L, Chen Y H, Zeng Z Y, et al. A tight coupling model for urban flood simulation based on SWMM and TELEMAC-2D and the uncertainty analysis[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 114: 105794
- [11] 张传兴, 王占金, 孙彤, 等. 雨洪管理模型应用关键问题探析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(3): 370
- [12] 施奇妙, 徐宗学, 卢兴超, 等. 基于局部和全局方法的 SWMM 模型参数敏感性分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(10): 58
- [13] 黄亦轩, 徐宗学, 廖如婷, 等. 城市密集建成区暴雨洪水管理模型参数敏感性分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(5): 698
- [14] 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
- [15] 石朋, 陆美霞, 吴洪石, 等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 19
- [16] 王菲菲, 卿晓霞, 杨森雄, 等. 基于 PySWMM 的 SWMM 参数自动率定研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(21): 124
- [17] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 SWMM 的城市社区尺度管网排水模拟: 以福州市某排水小区为例[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 271
- [18] 田梦阳, 刘建闽. 基于改进遗传算法优化化学反应条件[J]. *应用化学*, 2025, 42(5): 675
- [19] Chen W J, Huang G R, Zhang H, et al. Urban inundation response to rainstorm patterns with a coupled hydrodynamic model: a case study in Haidian Island, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1022
- [20] Zhu Y L, Gao Y, Wang B N, et al. Distributed simulation of fully coupled hydrological-hydrodynamic model for predicting rainfall-induced runoff/flood in small watersheds[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 59: 102450
- [21] 卢兴超, 徐宗学, 李永坤, 等. 基于 SWMM 与 LISFLOOD-FP 耦合模型的城市街区内涝模拟研究[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 98
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 廖如婷, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的大红门排水区暴雨内涝模拟[J]. *水资源保护*, 2023, 39(3): 109
- [25] 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
- [26] 王京晶, 徐宗学, 李福林, 等. 济南市主城区城市洪涝风险分析[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(1): 22
- [27] 刘媛媛, 刘业森, 郑敬伟, 等. BP 神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(3): 284
- [28] 李鹏, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 济南市 1972—2016 年降水特性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2): 237
- [29] Yang K X, Hou H, Li Y, et al. Future urban waterlogging simulation based on LULC forecast model: a case study in Haining city, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104167
- [30] Lou Y H, Wang P, Li Y, et al. Management of the designed risk level of urban drainage system in the future: evidence from Haining city, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119846
- [31] 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
- [32] Shen Y X, Xu Z M, Zhou Q, et al. A direct two-way coupling of the hydrologic and 1D-2D hydrodynamic models for watershed flood simulation[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 639: 131606
- [33] 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
- [34] 唐清竹, 徐宗学, 王京晶, 等. 基于全局和局部方法的城市雨洪模型参数敏感性: 以济南市主城区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(4): 713
- [35] 宋鹏越, 徐宗学, 李鹏, 等. 土地利用变化对流域产汇流的影响: 以济南市黄台桥以上流域为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(12): 143
- [36] 侯精明, 郭凯华, 王志力, 等. 设计暴雨雨型对城市内涝影

- 响数值模拟 [J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820
- [37] 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
- [38] Zheng J X, Huang G R. A novel grid cell-based urban flood resilience metric considering water velocity and duration of system performance being impacted[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 128911
- [39] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 考虑空间异质性特征的城市洪涝动态风险分析 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(3): 375

Urban flood simulation and risk analysis in upstream Huangtaiqiao area of the Xiaoqinghe River basin, Jinan city

Hu Jiawei^{1, 2)}, Xu Zongxue^{1, 2)}, Chen Hao^{1, 2)}, Huang Yixuan^{1, 2)}, Song Sulin³⁾

(1) College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing, China; 2) Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing, China; 3) Jinan Hydrology Center, Jinan, Shandong, China)

Abstract To investigate evolution laws of flood processes and status of flood risk in upstream Huangtaiqiao area of the Xiaoqinghe River basin, Jinan city, a coupled flood model integrating SWMM and InfoWorks ICM-2D was developed. The main parameters of the SWMM model were calibrated using a genetic algorithm with an elite retention strategy. The model was used to simulate and analyze pipeline network drainage capacity, surface inundation status, and hazard distributions under different rainfalls with various return periods. The improved genetic algorithm could quickly optimize model accuracy to a high level in a short time, significantly improving efficiency of parameter calibration. The coupled model exhibited good applicability in the study area. With an increase of rainfall return period, number of overloaded pipes and overflow nodes in the pipeline network increased significantly. Capacity of underground pipeline-network was basically saturated at 10 a return period; the water-logging risk rose rapidly when return period exceeded 10 years. The total inundated area of the river basin increased from 573.38 hm² at a 5 a return period to 956.26 hm² at a 100 a return period, with areas of high water depth concentrated on major roads such as Erhuan Road (S), Jingshi Road, and Lashan Interchange. The flood risk level continuously increased with extension of return period, and area of high-risk areas continued to increase - with return periods from 5 a to 100 a, the area of relatively high-risk zones and high-risk zones increased by 151.11 hm² and 263.50 hm², respectively. This study area showed a certain risk resistance capacity against short-return-period rainfall, but targeted water-logging prevention measures should be prioritized under extreme rainfall conditions.

Keywords flood simulation; inundation depth; flood risk; genetic algorithm; Xiaoqinghe River basin

【责任编辑: 武 佳】