

晋城市洪涝驱动下微观与宏观耦合建模的社会系统响应及韧性分析

舒心怡^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 叶陈雷^{1,2}, 廖如婷^{1,2}, 贾书惠³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要:为深入解析晋城市洪涝复杂系统的自然与社会关系,从微观与宏观视角切入,采用多主体建模的方法对具有异质性的社会主体进行模型构建,捕捉系统的宏观涌现;基于系统动力学方法对社会整体层面的洪涝韧性特征进行演化分析,实现洪涝对社会端造成影响的定量评估。结果表明:随着降雨重现期增加,排水系统压力不断增加,溢流量及地表淹没面积增加,10 年一遇降雨重现期下,水深为 $>0\sim0.15$ 、 $>0.15\sim0.4$ 、 >0.4 m 时的积水面积分别为 2.03、0.29、0.21 km²;全局疏散模式下的疏散主体数呈增长率递减的上升态势,分区疏散模式下疏散主体数增长率先增大后减小,不同降雨重现期下单位距离出行任务数指标随时间推移呈现局部波动、整体增长率递减的上升态势,全局疏散模式下疏散耗时与疏散路程具有更好的均衡性;不同降雨重现期下城市洪涝韧性增量呈现出先增大后减小的趋势,场次暴雨洪涝中的城市洪涝适应能力增量呈增大趋势,抵抗能力增量约在峰现时间达到最小值,而后逐渐增大。

关键词:城市洪涝;多主体建模;系统动力学;社会效益;洪涝韧性;晋城市

中图分类号:TV122.1 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2025)03-0065-10

Analysis of social system response and resilience under flood driving in Jincheng City through micro-macro coupled modeling//SHU Xinyi^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, YE Chenlei^{1,2}, LIAO Ruting^{1,2}, JIA Shuhui³ (1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China)

Abstract: To deeply analyze the natural and social relationships in the complex flood system of Jincheng City, this study adopted aagent-based modeling approach to model heterogeneous social agents from both micro and macro perspectives, capturing the macro-level emergence of the system. Using system dynamics methods, it performed an evolutionary analysis of the flood resilience characteristics at the societal level, enabling a quantitative assessment of the flood’s impact on the social sector. The results show that as the rainfall return period increases, the pressure on the drainage system continuously rises, along with an increase in overflow and surface inundation areas. Under a 10-year rainfall return period, the flooded areas at the water depth of $>0\sim0.15$ m, $>0.15\sim0.4$ m, and >0.4 m are 2.03 km², 0.29 km², and 0.21 km², respectively. Under the global evacuation mode, the number of evacuated agents increases at a decreasing growth rate. Under the zonal evacuation mode, the growth rate of evacuated agents first increases and then decreases. The unit distance travel task indicator under different rainfall return periods shows local fluctuations, with an overall decreasing growth rate over time. The global evacuation mode exhibits a better balance between evacuation time and distance. The increment of urban flood resilience under different rainfall return periods shows an increasing trend followed by a decrease. The adaptive capacity increment for urban flood in heavy rain events shows an increasing trend, while the resistance capacity increment reaches its minimum value at the peak time and then gradually increases.

Key words: urban flooding; agent-based modeling; system dynamics; social benefits; flood resilience; Jincheng City

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239003);国家自然科学基金青年科学基金项目(52409005);中国博士后基金面上项目(2024M750224);粤港水安全保障联合实验室开放基金项目(GHJLWS-08)

作者简介:舒心怡(1998—),女,博士研究生,主要从事城市水文学研究。E-mail:shuxinyi@mail.bnu.edu.cn

通信作者:徐宗学(1962—),男,教授,博士,主要从事城市水文学研究。E-mail:zxxu@bnu.edu.cn

气候变化与快速城市化导致城市水文过程发生显著变化^[1-3],由此引发城市洪涝态势愈发严峻^[4-7],经济社会层面遭受损失^[8-9]。如何采取有效措施缓解城市洪涝问题,提升城市洪涝防控能力和韧性,完善城市防洪减灾体系迫在眉睫^[10-11]。城市洪涝问题兼具自然与社会双重属性^[12],城市防洪减灾问题需要综合考虑自然与社会因素来应对。自然环境的复杂性和城市建设的多样性使得两种属性之间相互影响,彼此制约。城市在遭遇暴雨时往往伴随检查井溢流与地表积水^[13],对行人与车辆安全^[14]、路段通行^[15]、路面污染^[16]以及城市韧性^[17]等方面产生影响。在此背景下,解析洪涝在自然与社会两个层面的规律,是提高城市防洪排涝认识的重要手段。

相关研究^[18-21]对洪涝风险的分析往往着眼于自上而下的范式构建洪涝模拟模型,随着研究尺度的逐步细化,不仅要关注宏观层面的基础设施,还需要重视城市洪涝对微观层面承灾体^[22-23],特别是对交通、建筑以及居民生活的直接影响。在这种背景下,多主体建模(agent-based modeling, ABM)作为一种主体导向的评估方法,受到越来越多的关注。ABM 主要从微观层面来模拟主体的行为和相互作用。每个主体都有自己独特的特征、规则和行为模式,通过这些主体之间的局部互动和决策,模型可以反映出系统整体的复杂动态变化,能够捕捉系统中的非线性动态、涌现特性以及多种可能的情景和结果^[24-25]。ABM 的一个显著优势是能够考虑到主体异质性,即不同受灾体对洪涝风险的响应机制。这种建模方法不仅能够模拟不同主体面对灾害时的决策行为,还可以分析这些行为之间的相互影响,从而解析复杂社会要素构成的动态系统。

城市洪涝风险具有复杂性与不确定性,传统的洪涝风险分析方法通常通过建立一个融合自然气象条件、下垫面特征以及社会经济因素的多元指标体系进行分析^[26],这通常依赖于预先设定的评估单元和固定的指标,尽管能够结合自然与社会因素,但在应对动态数据和复杂洪涝事件方面仍存在一定的局限性^[27]。与 ABM 的微观建模思路不同,系统动力学(system dynamics, SD)方法着眼于从宏观层面分析系统中各个变量之间的相互作用和反馈机制^[28]。通过构建反馈回路和因果关系,SD 能够揭示不同因素如何相互影响,推动城市特征的动态演变,识别系统中可能引发非线性和超出预期结果的反馈回路,提供理解复杂城市洪涝系统、预测未来发展趋势的工具。结合 ABM 和 SD 这两种方法,从微观与宏观的视角全面理解复杂系统,可以更好地应对复杂系

统中的不确定性和挑战,提升对系统动态变化的理解和预测能力。近年来,城市洪涝韧性愈发受到关注^[29-31],本文以晋城市西河排水片区为研究区构建洪涝模拟模型,得到时变的水动力边界,基于 ABM 从微观视角解析社会系统对洪涝过程的响应机制,探索主体特征异质性在宏观涌现下呈现的整体特征演化模式;基于 SD 建模,从宏观视角评估城市洪涝韧性,量化社会系统对城市洪涝韧性的影响程度。

1 研究区概况

晋城市(35°11'N ~ 36°04'N, 111°55'E ~ 113°37'E)位于山西省的东南部,地貌类型包括山地、丘陵、平原、沟壑、高原等多种类型,市区四周多山,与周边市县多以山为界。晋城市属暖温带半湿润大陆性气候区,具有四季分明、昼夜温差大、降水集中的气候特征。据 1985—2015 年历史降雨资料统计结果,晋城市多年平均降水量为 570.9 mm。2022 年 7 月 16 日,横河镇遭遇强降雨,横河、杨柏两站累计降水量超过 100 mm,最大雨强达到 91.2 mm/h,经济损失约 2.08 亿元。2022 年 5 月底,晋城市正式开始实行系统化全域推进海绵城市建设。本文以晋城市西河排水片区为研究区,西河排水片区面积约 11.39 km²,区内高程为 690.5~832.4 m,区内地势西高东低、北高南低,研究区概况见图 1。

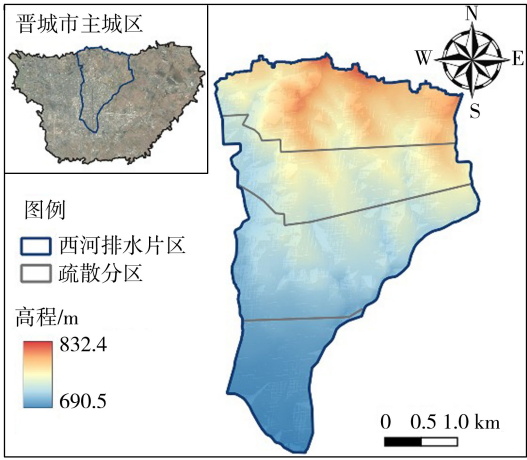


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of research area

2 数据与方法

2.1 建模数据

a. 基础数据。①排水管网数据包括管网布局、管网拓扑结构、管道和雨水井间的连接关系与流向规则、排水管道的物理特性和雨水井参数等,由中国城市规划设计研究院提供。排水管道的物理特性包括长度、管径大小(最大直径为 1.8 m)、管渠形状

(多为圆管)、进水偏移、出水偏移等,雨水井参数包括井底标高、最大深度、进出口直径等。②数字高程数据网格精度为 5 m。③易涝点数据包括实测易涝点位置和水深数据,来源于中国城市规划设计研究院,通过实地调查和监测获得,用于率定模型参数和验证模拟结果的准确性。

b. 设计暴雨。设计暴雨提供雨强、历时与重现期之间的关系^[32]。通过查阅 GB/T 50805—2012《城市防洪工程设计规范》、GB 50318—2017《城市排水工程规划规范》和 GB 50014—2021《室外排水设计标准》等,根据晋城市暴雨强度公式,采用芝加哥雨型分别推求降雨重现期为 1、5、10、20、50、100 a,历时为 120 min 的设计降雨,雨峰系数取 0.398。研究区暴雨强度公式为

$$q = \frac{2437.198(1 + 0.846lgP)}{(t + 15.503)^{0.769}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度; P 为设计降雨重现期; t 为降雨历时。

2.2 洪涝过程耦合模拟

a. 城区水文水动力模型。采用泰森多边形方法划分水文响应单元,在每个子汇水区计算产汇流。在城市区域,由于人类活动和城市化的影响,土地利用类型和土地表面覆盖变化较大,土壤的渗透性质也发生显著变化,城市化还导致大量的地面铺装和建筑物。本文采用描述土壤渗透率随时间变化的 Horton 下渗方程,考虑到土壤不均匀性、异质性,通过参数化方案量化影响,采用非线性水库法实现坡面汇流演算^[33-34]。

b. 一、二维水动力模型计算。受地形条件及城市排水等影响,城市明渠水流一般呈现非恒定流特征,常采用一维圣维南方程组描述。采用有限差分法将控制方程中的微商用差商替代,转换得到代数方程组求得近似解,并进一步采用 Preissmann 格式进行数值离散,进而求解一维水流问题。事实上,当对河漫滩进行简化时,一般不考虑河道与地表的水量交互,考虑到模型的统一构建框架,本文采用管网模型对一维明渠进行概化,以求解调度控制问题。二维水动力过程由浅水方程描述,在 30 m 分辨率下基于 Godunov 型有限体积法数值求解^[33-34],根据检查井水头、地表高程和地表水头 3 个变量之间的关系,在不同情况下分别采用堰流或孔流公式实现管网与地表之间的水量交互。

2.3 基于微观视角的 ABM

在城市洪涝二元系统中,场次暴雨事件引发的洪涝过程将直接影响各类受灾体。利用 ABM,能够通过分析不同类型主体的宏观涌现,解析社会因素

在洪涝影响下的动态变化过程。社会端受洪涝及其防控影响的范畴较大,受到直接影响的方面包括人群疏散和人群出行路径。本文采用 ABM 量化这两个方面的社会响应机制。

2.3.1 城市人群疏散

场次暴雨洪涝事件引发的城市洪涝显然影响城市人群出行模式,本文基于洪涝模拟模型得到洪涝变化特征,以驱动 ABM 运行。

2.3.1.1 主体行为参数化与特定行为模型构建

在 ABM 中,主体(疏散的每个人)具有不同的行为规则和交互机制,每个网格关联多个信息,包括疏散点、水深和土地利用类型等。疏散点基于城市兴趣点数据设置,用以容纳疏散主体,主体进入后不再移动;其他类型区域分为可通行类型和不可通行类型。考虑主体社会异质性,主体行为参数化后呈现初始状态与行为模式的时空差异。在比较严重的洪涝事件中,主体需要紧急避险时,其移动模式影响群体(多个主体构成)疏散效率与疏散差异性。模型将主体分为老年、青年和幼年 3 个类别,受积水与群体密度的影响,疏散指令下达时,青年主体反应时间最短,幼年主体次之,老年主体需要时间更久;青年主体移动速度上下限最大,幼年主体次之,老年主体移速最小。当遇到街道路面积水时,主体速度减小,超过水深阈值的淹没区域无法通行。

主体速度 v 与群体密度 ρ 呈现负相关关系,引入指数衰减函数模拟主体速度随群体密度增加而减小的现象,且保证 v 始终处在一个范围内变化:

$$v = v_0(1 - \rho/\rho_{\max})^\alpha \quad (2)$$

式中: v_0 为主体自由行走速度; $\rho_{\max}$ 为群体密度的最大值,此时 v 接近于 0; α 为调节因子,调节主体速度随群体密度增加的下降程度。

设定积水感知范围参数,表征主体对周围情况的空间感知域。主体感知范围内存在积水影响时,与前述群体群密度对主体速度的影响处理方式相似,采用 v_{t+1} 更新 v_t :

$$v_{t+1} = \max[v_t - e/(d_t + l), v_{\min}] \quad (3)$$

式中: v_t 、 v_{t+1} 分别为当前时刻和下一时刻的主体速度; $v_{\min}$ 为主体速度的最小值; d_t 为当前时刻主体与积水的距离; e 、 l 为参数,用于调整主体速度衰减的敏感度。群体密度和积水的影响均在每一个时间步进行更新,除体现主体速度受群体密度和积水影响而减小外,还保证了主体速度不会超出自身速度的取值范围。

2.3.1.2 评价指标

城市不同区域在社会经济结构、基础环境设施等方面具有较大的差异性,疏散模型配置系统存在

不确定性,在疏散过程中需要确保主体在疏散中的均衡性与效率。利用基尼系数反映群体疏散耗时和疏散路程分布的不均衡性,以量化不同主体之间的资源利用差异性,并采用洛伦兹曲线进行定性分析。

基尼系数计算公式为

$$G=\frac{1}{2n^2\bar{y}}\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n|y_i-y_j| \tag{4}$$

式中: G 为基尼系数; n 为主体数; $\bar{y}$ 为所有主体行程或到达时间的平均值; y_i 、 y_j 分别为主体*i*和主体*j*的行程或到达时间。

2.3.2 人群出行路径

2.3.2.1 模型构建

采用洪涝模拟模型模拟地表洪水演进,为ABM提供动态积水数据,构建人群出行路径模型。结合动态积水数据与最优路径算法,量化评估局部洪涝对人群出行的影响。针对人群出行的起点和终点优选出一条最优路径,对于一定区域内一定时间内所有主体构建起点—终点矩阵,并找到一段时间内所有主体完成的起点—终点的任务数和行程数,通过分析所有主体平均情况量化洪涝的影响。

2.3.2.2 最优路径选择

以主体当前位置为起点,距离最近的疏散点为终点,基于栅格单元的土地利用类型构造节点与边组成的图。通过这种方式,将主体在栅格单元上行走的模式转化为主体在图数据上行走的模式。采用D*算法选择最优路径,指导主体从起点高效移动到终点。D*算法步骤为:①将栅格单元的土地利用类型转化为图,定义节点和连接边,根据不同土地利用类型设置边的权重;初始化所有节点的路径成本值,并建立开放列表和关闭列表。②通过评估节点成本,不断扩展最优节点,直到找到目标节点或确认无路径可达。③主体沿最优路径移动,若环境发生变化,可动态调整路径。④主体到达终点时,路径规划过程结束。

2.3.2.3 评价指标

疏散路径在不同洪涝情境中有不同的表现,采用一定时间内群体完成的出行任务数量(N_C)与总行程距离(N_T)的比值作为单位距离出行任务数指标,以表征洪涝影响下的道路可达性与通行性。其计算公式为

$$\theta=N_C/N_T \tag{5}$$

式中 θ 为单位距离出行任务数,数值介于0~1之间, θ 值越大表示路径的可达性越好。

2.4 基于宏观视角的城市洪涝韧性评估

城市洪涝系统具有典型的“自然-社会”二元性,且在自然端与社会端均具有复杂的组成和结构。在

面向实际问题时,将一个城市区域看成一个整体,基于整体区域的洪涝韧性特征,构建SD模型量化城市洪涝韧性。

2.4.1 城市洪涝韧性评价指标体系

以社会端的洪涝韧性这一宏观特征为出发点,将实际问题抽象化,选取构建SD模型的变量。设定系统研究时间边界与模拟仿真步长,综合考虑洪涝抵抗能力、适应能力、恢复能力等多方面因素,构建城市洪涝韧性评价指标体系,在综合实测数据、机理模型模拟结果以及多主体模型结果的基础上,采用层次分析法^[3]得到模型各指标权重。城市洪涝韧性评价指标体系见图2,括号中为各准则层和指标权重。



Fig.2 Evaluation index system for urban flood resilience and weights of indexes

考虑到SD模型服务于场次暴雨洪涝,根据暴雨事件的时间特征,对时间尺度进行调整,以小时或分钟作为模拟过程中的时间尺度并设置模拟时间段,以反映暴雨事件发生前、中、后各阶段的变化,精细模拟事件驱动对城市洪涝系统的影响,捕捉暴雨事件的全过程及后续影响。城市洪涝韧性受洪涝抵抗能力、适应能力、恢复能力的影响,SD模型的存量微分方程为

$$dC/dt=aR+bA+cF \tag{6}$$

式中: C 为城市洪涝韧性; R 为洪涝抵抗能力; A 为洪涝适应能力; F 为洪涝恢复能力; a 、 b 、 c 为权重参数,表示各因素对整体洪涝韧性的贡献。

2.4.2 因果关系图与存量流量图

构建因果关系图,探索城市洪涝韧性系统各变量间的反馈作用机制,识别关键变量的因果联系和相互影响路径。在此基础上,将因果关系图转化为存量流量图,表征系统整体和局部的动态关系。SD模型的基本组成元素包括:①水准变量,用于反映系统在某一时刻的状态;②速率变量,表示存量的变化速率,是水准变量变化的直接驱动因素;③辅助变量,为介于水准变量与速率变量的中间变量;④常量,即不随时间变化的参数;⑤外部变量,为时变的外部输入变量;⑥反馈循环,即系统内部的因果循环

关系。在 SD 模型中,反馈循环通过上述各类变量之间的相互作用形成,其中正反馈(强化循环)促使系统朝某一方向加速发展,而负反馈(调节循环)则起到抑制和平衡作用,二者共同作用决定了洪涝系统的动态行为特征。

基于构建的存量流量图和结构方程,通过设定初始条件和参数值,开展多情景模拟仿真,以观测系统在不同情境下的动态演化过程。这些情境包括不同的降雨强度、排水能力的变化、社会防灾意识的提升等。通过分析各子系统和整体系统在不同情境下的动态演化过程,量化不同因素对城市洪涝韧性的影响程度。

3 结果与分析

3.1 洪涝特征

西河排水片区排水管网模型包括 636 个节点、641 节管段和 636 个子汇水区^[34]。采用率定的参数组合,模拟相同降雨条件下的地表淹没情况,对比内涝点位置处模拟水深与实测水深数值大小,结果误差在 $\pm 10\%$ 以内,该参数组合下的洪涝模拟模型具有较好的合理性^[33,35]。统计不同降雨重现期下的节点溢流与管道超载情况,结果表明,降雨重现期为 10、20、50、100 a 时,溢流节点数分别为 493、515、536 和 537,超载管道数分别为 612、619、622、630。随重现期增加,溢流节点数和超载管道数不断增加。重现期为

10 a 时溢流节点数占总节点数的 77.52%,而重现期为 100 a 时占比增加为 84.43%,说明在强降雨事件下地下管网系统的排水能力不足;重现期为 10 a 时超载管段数占管段总数的 94.58%,重现期为 100 a 时增加了 2.81%,表明管网的排水效率较差,重现期为 10 a 时系统已开始超负荷运行,严重影响排水效率。

基于构建的排水管网模型,采用双向耦合方式实现地下管网与地表之间的水量耦合,模拟 10、20、50、100 a 降雨重现期下峰现时间 60 min 时的地表淹没情况(图 3)。由图 3 可知,随着重现期的增加,淹没水深呈现显著的加大趋势,积水范围和深度均显著增加。10 a 重现期下水深为 $>0\sim 0.15$ 、 $>0.15\sim 0.4$ 、 >0.4 m 的积水面积分别为 2.03、0.29、0.21 km^2 ;而 100 a 重现期下各水深范围对应的积水面积分别增加 0.17、0.15、0.12 km^2 。

3.2 社会综合效益

3.2.1 不同疏散模式下疏散效率

基于不同疏散模式与降雨情景对暴雨洪涝过程中的社会效率进行分析,研究采用全局疏散和两种分区疏散模式进行比较。分区疏散模式 1 的疏散先后顺序按照淹没程度由高到低;分区疏散模式 2 的疏散先后顺序按照人口密度由高到低。全局疏散模式下,主体同时向疏散口移动;分区疏散模式将排水片区划分为 4 个子区域(图 1),主体按预设等级分阶段疏散,不同分区间存在 20 min 滞后时间。图 4

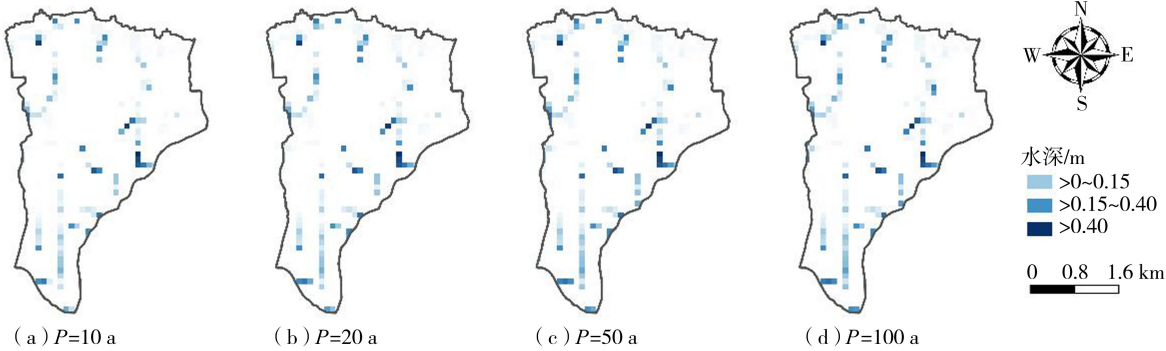


图 3 不同降雨重现期下淹没情况

Fig. 3 Flood Inundation under different rainfall return periods

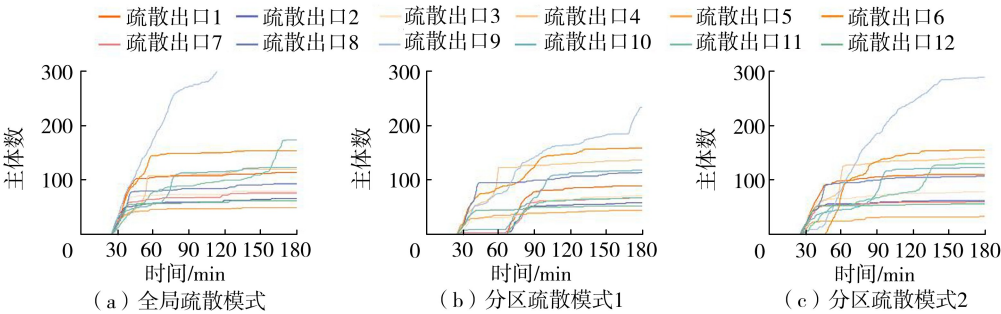


图 4 不同疏散模式下各疏散出口的主体数变化

Fig. 4 Variation of agents at evacuation exits under different evacuation modes

为 10 a 降雨重现期、3 种疏散模式下 12 个疏散出口的主体数变化。在全局模式下,各疏散出口的主体数增长相对稳定和均匀,多数疏散出口的主体数在 180 min 内达到了 50~150 的疏散规模,疏散资源和流量在所有出口间分配均衡。分区疏散模式根据区域风险等级进行疏散,由于疏散出口分区位置不同,分区模式下不同疏散出口容纳主体数的起涨时间有明显的阶段性,高优先级区域的出口响应速度较快。全局疏散模式提供了更为均衡的疏散过程,而分区疏散模式在应对不同风险区的差异方面则更加高效。

图 5 对比了 10 a 降雨重现期暴雨洪涝过程中 3 种疏散模式下不同类别(总体、青年、老年和幼年)的疏散主体数变化情况。从图 5(a)可以看出,不同疏散模式下的疏散主体数变化趋势基本一致,由于疏散指令下达导致的滞后性,疏散主体数从 30 min 后逐步上升至最大值。全局疏散模式下总体疏散主体数在 180 min 时上升至 1 411,其中,青年主体数上升至 945,老年主体数上升至 182,幼年主体数上升至 284。尽管 3 种疏散模式下的疏散主体数都呈现出不断上升的趋势,然而疏散主体数的变化速率存在明显的不同。全局疏散模式下,随着时间的推移,疏散主体数的上升速率呈现持续减小的现象;两种分区疏散模式下,随着时间的推移,疏散主体数的上升速率呈现先增大后减小的特征。全局疏散模式下

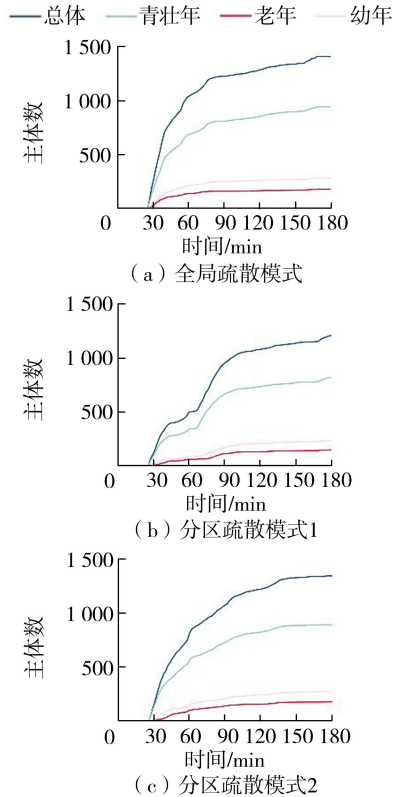


图 5 不同疏散模式下疏散主体数

Fig. 5 Evacuated agents under different evacuation modes

所有主体根据自身异质性同步开始移动,总体上疏散耗时更短,而分区疏散模式的优势在于其将研究区划分为多个优先级,对高风险或高等级的区域优先疏散以高效解决重点区域的应急疏散,而次风险等级区域可以在滞后一定时间再进行疏散。

采用单位距离出行任务数指标表征洪涝影响下的道路可达性与通行性,统计大量社会主体在平均意义上的行为特征,进一步量化城市洪涝中的社会效率。图 6 为 4 种降雨重现期下单位距离出行任务数的变化过程。可以看出,不同重现期下单位距离出行任务数呈现明显波动上升趋势,且随着模拟时间的增加,该指标的增长率持续降低。事实上,如果模拟时间足够长,该指标最终将趋于一个比较稳定的范围。由于洪涝动态条件下的驱动因素具有时变性,该指标呈现出局部波动、整体增长率递减的上升态势。降雨重现期对单位距离出行任务数的影响比较明显,在 60 min 时,10、20、50、100 a 重现期下单位距离出行任务数分别为 0.23、0.22、0.21、0.16 km⁻¹;在 90 min 时,各重现期下该指标分别为 0.27、0.27、0.26、0.20 km⁻¹;而在 180 min 时,10 a 重现期下该指标值最大(0.36 km⁻¹),100 a 重现期下该指标值最小(0.28 km⁻¹)。可以看到,随着重现期增加,尽管局部具有一定的波动性,指标总体上具有变小的趋势。

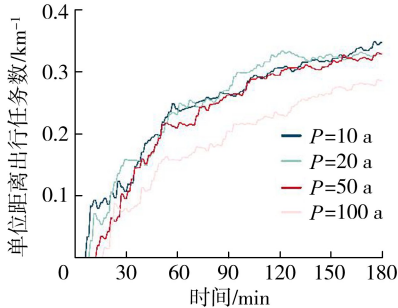


图 6 不同降雨重现期下单位距离出行任务数的变化过程

Fig. 6 Variation of unit distance travel task under different rainfall return periods

3.2.2 不同疏散模式下疏散均衡性

基于不同疏散模式与降雨情景对社会响应的疏散均衡性进行分析,采用疏散耗时基尼系数与洛伦兹曲线、疏散路程基尼系数与洛伦兹曲线进行评估。基尼系数取值范围一般在 0~1 之间,其值越接近 0 表示社会主体之间的特征分配越均匀。洛伦兹曲线可以进一步反映社会综合效益,曲线的弯曲程度表征主体之间的差异,弯曲程度越大代表特征差异性在主体间的分布越不均衡。

图 7(a)和图 8(a)为 3 种疏散模式下疏散耗时

基尼系数与洛伦兹曲线。疏散耗时基尼系数在城市场次暴雨洪涝过程中持续变化,在疏散指令启动 30 min 后,全局疏散模式下基尼系数呈现明显持续上升趋势,且上升速率持续降低,在 180 min 时基尼系数为 0.60。而分区疏散模式下在疏散指令启动后一段时间,基尼系数呈现持续下降,并在约 80 min 后开始上升,此时分区疏散模式 2 的基尼系数为 0.58。总体上,疏散耗时基尼系数在前 90 min 差异较大,而 90 min 后差异相对较小,3 种疏散模式相差不超过 0.03。3 种疏散模式下疏散耗时的洛伦兹曲线有部分重叠,总体上全局疏散模式具有更好的均衡性。图 7(b)和图 8(b)为 3 种疏散模式下疏散路程基尼系数与洛伦兹曲线,其总体规律与疏散耗时类似。在整个洪涝过程中,全局疏散模式下疏散路程基尼系数小于两种分区疏散模式的值,表明全局疏散模式具有更好的均衡性。全局疏散模式下疏散路程基尼系数最终趋于 0.53,分区疏散模式 1 的基尼系数最终趋于 0.48。全局疏散模式下疏散路程洛伦兹曲线与两种分区疏散模式没有重叠部分,在所有主体比例中更接近 45°线。

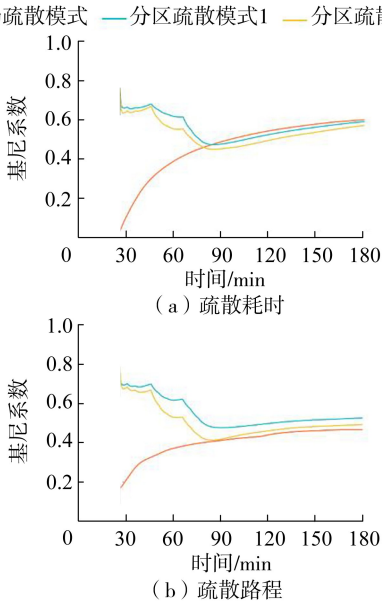


图 7 不同疏散模式下疏散耗时与疏散路程的基尼系数
Fig.7 Gini coefficient of evacuation time and evacuation distance under different evacuation modes

3.3 洪涝韧性

采用 SD 模型对场次暴雨下城市洪涝韧性进行定量分析。将 SD 模型分解为洪涝抵抗能力、洪涝适应能力、洪涝恢复能力 3 个子系统,图 9(a)为 SD 模型因果关系的反馈回路,“→”表明两个变量之间具有因果联系,“+”表示正反馈(加剧系统状态变化),“-”表示负反馈(缓解系统状态变化),RI、ONN、FA、NDVI、SE、TPUD、TAG、DEG、PND、MID 分

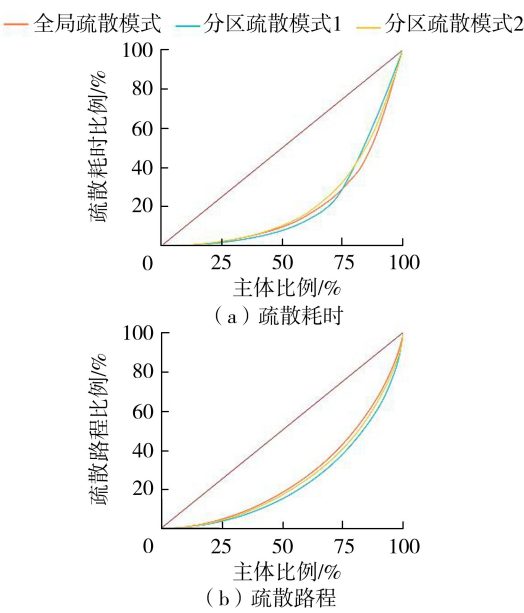


图 8 不同疏散模式下疏散耗时与疏散路程的洛伦兹曲线
Fig.8 Lorenz curve of evacuation time and evacuation distance under different evacuation modes

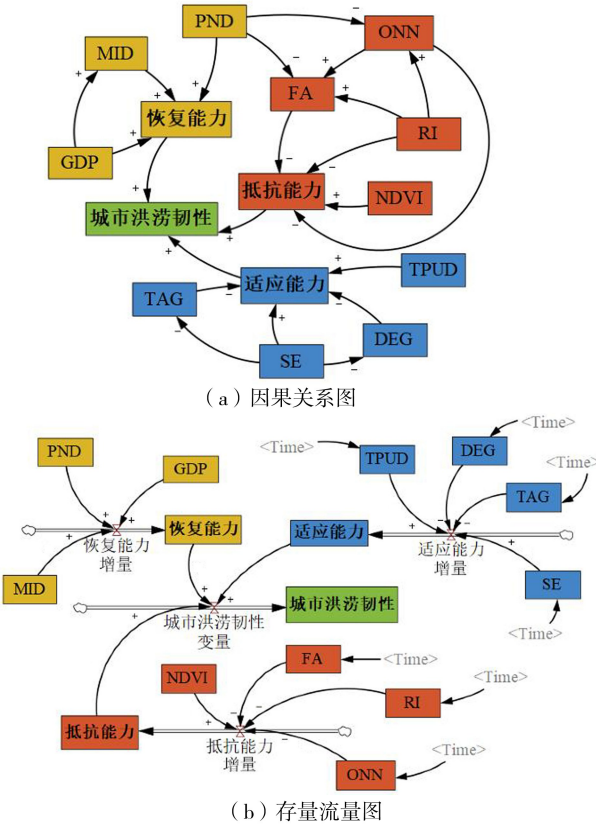


图 9 城市洪涝韧性因果关系与存量流量图
Fig.9 Causal relationship and stock-flow diagrams of urban flood resilience

别为降雨强度、溢流节点数、水深高于 0.4 m 的淹没面积、植被覆盖度、已完成疏散主体数、单位距离出行任务数、疏散耗时基尼系数、疏散路程基尼系数、管网密度和医疗密度。通过 3 个子系统的耦合,模拟城市洪涝各因素动态变化过程以及对洪涝韧性的

影响。暴雨会增加城市内的地表积水(正反馈),而有效的排水系统则会减少积水(负反馈)。洪水引发的交通瘫痪会影响应急响应速度,进一步加剧损失(正反馈);而及时的疏散和防护措施则可以有效减少损失(负反馈)。通过模拟复杂的反馈机制,可以揭示系统在不同情境下的演化模式,动态预测洪涝事件在城市中的传播过程。图9(b)为SD模型的城市洪涝韧性存量流量图。将城市洪涝抵抗能力、适应能力和恢复能力作为3个关键存量变量,通过对应的流量变量实现动态调控。图中<Time>表示随时间变化的变量,这些变量在模拟中随时间动态更新,反映了系统状态随时间推移的演变过程。

模拟10、20、50、100a降雨重现期2h场次暴雨下,3h内城市洪涝韧性增量以及城市洪涝抵抗能力、适应能力和恢复能力增量的变化情况,结果见图10。在极端暴雨情景下,受排水系统容量、雨水管理措施以及恢复机制等多重因素影响,城市洪涝韧性表现出复杂的动态变化。降雨初期地下管网的排水压力不断加大,城市洪涝韧性增量因管网的排水作用不断增加,但随排水压力增加,不同重现期下的洪涝韧性增量呈现出先增加后减小的趋势。约43min后城市洪涝韧性增量达到峰值,约60min后雨强达到峰值,而后城市洪涝韧性增量不断减小,65min后洪涝韧性增量为负,说明当前排水系统可能已接近其容量极限,导致积水无法迅速排出至下游。城市基础设施等在降雨初期的抵御作用较为有效,但随雨强增加和降雨时间的延长,城市绿地和排水系统等蓄存排水设施的承载能力逐渐超出负荷,城市洪涝韧性增量下降,积水情况加剧,进而对城市交通、

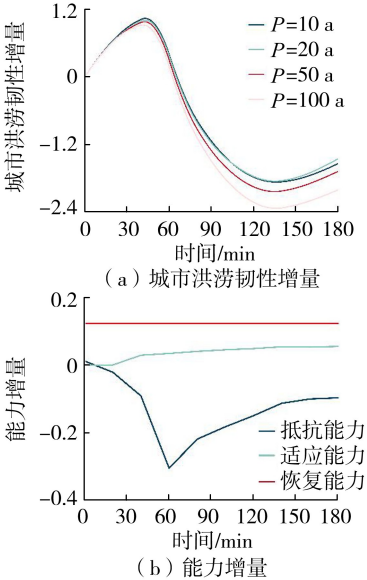


图10 城市洪涝韧性变化

Fig. 10 Changes in urban flood resilience

居民生活以及基础设施的正常运行产生不利影响。场次暴雨过后,城市系统逐步恢复正常运行的能力。不同降雨重现期下城市洪涝恢复能力表现出明显的差异,10、20a重现期下,城市系统能够在相对较短的时间内恢复正常,对低强度暴雨表现出较好的韧性;而对于50、100a重现期,场次暴雨过后城市韧性显著下降,系统恢复速度明显减缓,高强度暴雨下系统的恢复能力较弱。这表明随降雨重现期增加,城市系统需要更多的时间和资源来应对灾后影响。城市洪涝适应能力增量在模拟过程中呈增加趋势;抵抗能力增量在前60min内急剧下降,9min前后变为负值,约在峰现时间达到最小值,而后逐渐增加。

4 结 论

a. 随着降雨重现期增大,晋城市西河排水片区排水系统压力不断增加,溢流量及地表淹没面积增加。降雨重现期为10、100a时,溢流节点数在总节点数中的占比分别为77.52%和84.43%;降雨重现期为10a时,超载管段数在管段总中的占比为94.58%,降雨重现期为100a时占比增加2.81%。强降雨事件中地下管网系统的排水能力不足,排水效率较低。

b. 随着时间的推移,分区疏散模式下疏散主体数上升率先增大后减小;而全局疏散模式下疏散主体数的上升速率持续减小,总体上群体疏散耗时更短。不同降雨重现期下单位距离出行任务数随时间推移呈现出局部波动、整体增长率递减的上升态势。疏散指令启动后,全局疏散模式下疏散耗时基尼系数呈现持续上升趋势,且上升速率持续降低;分区疏散模式下呈现一段时间的持续下降,并在约80min后开始上升。全局疏散模式下疏散路程基尼系数趋于0.53,分区疏散模式1下基尼系数趋于0.48。总体上,全局疏散模式具有更好的均衡性。

c. 不同重现期下城市洪涝韧性增量呈现出先增加后减小的趋势;场次暴雨洪涝中的城市洪涝适应能力增量呈增大趋势;抵抗能力增量在前60min内急剧下降,9min前后变为负值。抵抗能力增量约在峰现时间达到最小值,而后逐渐增大,城市基础设施压力在雨峰过后减弱。

参考文献:

[1] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神扎实推动新阶段水利高质量发展:在2023年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2023, 23(1): 1-11. (LI Guoying. Thoroughly implement the spirit of the 20th National Congress of the Communist Party of China and

- solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage; speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(1): 1-11. (in Chinese))
- [2] 徐千惠,熊林,朱天琳,等. 适应我国不同自然条件类型城市的内涝治理模式研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(1): 11-27. (XU Qianhui, XIONG Lin, ZHU Tianlin, et al. Study on urban waterlogging control modes adapted to cities of different nature condition types in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(1): 11-27. (in Chinese))
- [3] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障:在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10. (LI Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization; speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10. (in Chinese))
- [4] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2): 22-29. (GAO Yuqin, WANG Jian, GAO Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2): 22-29. (in Chinese))
- [5] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [6] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 83-92. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 83-92. (in Chinese))
- [7] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济, 2024, 42(4): 23-29. (LIU Dingrong, YANG Kai, SUN Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))
- [8] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(7): 1618-1626. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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 Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [11] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))
- [12] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 施加福,王昊,周晋军,等. 城市内涝灾害对应应急救援服务可达性的影响评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(2): 27-38. (SHI Jiafu, WANG Hao, ZHOU Jinjun, et al. Assessment of the impact of urban waterlogging disasters on the accessibility of emergency rescue services [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 27-38. (in Chinese))
- [15] 刘非,任春娇,陈垚,等. 山地城市暴雨洪水中人车失稳风险数值模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(2): 62-77. (LIU Fei, REN Chunjiao, CHEN Yao, et al. Numerical simulation study on the flood instability risk of people and vehicles in mountainous cities [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(2): 62-77. (in Chinese))

- [16] 康永德,李伟,许尔文,等. 海绵措施下降雨径流模拟及污染物削减率评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2024,55(2):78-89. (KANG Yongde,LI Wei,XU Erwen, et al. Rainfall runoff simulation and pollutant reduction rate evaluation under sponge measures [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(2):78-89. (in Chinese))
- [17] 陈述,远维康,颜克胜,等. 融合多源数据的湖北省城市洪涝灾害韧性综合评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2024,55(3):51-60. (CHEN Shu,YUAN Weikang,YAN Kesheng,et al. Comprehensive assessment of urban flood resilience in Hubei Province based on multi-source data fusion[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(3):51-60. (in Chinese))
- [18] 叶陈雷,徐宗学. 水工程调度与低影响开发协同作用下典型城市片区洪涝过程模拟:以福州市为例[J]. 水利学报,2022,53(7):833-844. (YE Chenlei,XU Zongxue. Simulation of fluvial/pluvial flooding processes in a typical urban area considering role of low impact development (LID) measures and joint operation for hydraulic structures: case study in Fuzhou City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (7): 833-844. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 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):109-117. (LIAO Ruting,XU Zongxue, YE Chenlei,et al. Simulation of rainstorm waterlogging in Dahongmen Drainage Area based on SWMM and InfoWorks ICM models [J]. Water Resources Protection, 2023,39(3):109-117. (in Chinese))
- [21] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原有水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展,2024, 44 (6): 41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44 (6): 41-47. (in Chinese))
- [22] 黄国如,李梅萍. 基于微观交通仿真的城市内涝对道路交通的影响评估研究进展[J]. 水资源保护,2023, 39 (5): 69-78. (HUANG Guoru, LI Meiping. Research progress on impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on micro traffic simulation [J]. Water Resources Protection,2023,39(5):69-78. (in Chinese))
- [23] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 93-100. (YAO Rui, YANG Quntao,ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):93-100. (in Chinese))
- [24] ZHANG Qifan,HU Tiesong,ZENG Xiang, et al. Exploring the effects of physical and social networks on urban water system's supply-demand dynamics through a hybrid agent-based modeling framework [J]. Journal of Hydrology,2023,617:129108.
- [25] ZHANG Ruikang,LIU Dedi, DU Erhu, et al. An agent-based model to simulate human responses to flash flood warnings for improving evacuation performance [J]. Journal of Hydrology,2024,628:130452.
- [26] YE Chenlei,XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Assessment of urban flood risk based on data-driven models: a case study in Fuzhou City, China [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2022,82:103318.
- [27] BIN Lingling,XU Kui,PAN Hao, et al. Urban flood risk assessment characterizing the relationship among hazard, exposure, and vulnerability [J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(36):86463-86477.
- [28] COLETTA V R,PAGANO A,ZIMMERMANN N, et al. Socio-hydrological modelling using participatory system dynamics modelling for enhancing urban flood resilience through blue-green infrastructure [J]. Journal of Hydrology,2024,636:131248.
- [29] 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): 757-768. (CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(7):757-768. (in Chinese))
- [30] 王凯丰,张洪斌,力刚,等. 城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54 (11): 77-88. (WANG Kaifeng, ZHANG Hongbin, LI Gang, et al. Advances in urban flood resilience study and its key supporting technologies review [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023,54(11):77-88. (in Chinese))
- [31] 尹志国,牛发阳,汤辉. 基于博弈论和后悔理论的城市洪涝灾害韧性评价:以西安市为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55 (1): 74-87. (YIN Zhiguo, NIU Fayang,TANG Hui. Resilience evaluation of urban flood disasters based on game theory and regret theory: a case study of Xi'an City [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(1):74-87. (in Chinese))

(下转第 118 页)

- Resources, 2024, 44(5): 32-40. (in Chinese))
- [11] YUAN Xing, WANG Linying, WU Peili, et al. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4661.
- [12] YANG Liyan, WANG Weiguang, WEI Jia. Assessing the response of vegetation photosynthesis to flash drought events based on a new identification framework [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 339: 109545.
- [13] LIU Yi, ZHU Ye, REN Liliang, et al. Two different methods for flash drought identification: comparison of their strengths and limitations [J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21(4): 691-704.
- [14] XI Xiazhen, YUAN Xing. Significant water stress on gross primary productivity during flash droughts with hot conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 324: 109100.
- [15] ZHANG Xinyu, LIU Yi, ZHU Ye, et al. Probabilistic analysis on the influences of heatwaves during the onset of flash droughts over China [J]. Hydrology Research, 2023, 54(7): 869-884.
- [16] WANG Yumiao, YUAN Xing. Land-atmosphere coupling speeds up flash drought onset [J]. Science of The Total Environment, 2022, 851: 158109.
- [17] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征 [J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 70-77. (JIANG Yutong, HAO Zengchao, FENG Sifang, et al. Spatiotemporal evolution characteristics in compound hot-dry events in Yangtze River and Yellow River basins [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 70-77. (in Chinese))
- [18] 梅梅, 高歌, 李莹, 等. 1961—2022 年长江流域高温干旱复合极端事件变化特征 [J]. 人民长江, 2023, 54(2): 12-20. (MEI Mei, GAO Ge, LI Ying, et al. Change characteristics in compound high temperature and drought extreme events over Yangtze River Basin from 1961 to 2022 [J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 12-20. (in Chinese))
- [19] 董蓉蓉, 粟晓玲, 屈艳萍, 等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系 [J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 61-70. (DONG Rongrong, Su Xiaoling, QU Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 61-70. (in Chinese))
- [20] 郑博福, 肖德利, 万炜, 等. 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展 [J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 18-28. (ZHENG Bofu, XIAO Deli, WAN Wei, et al. Research progress on assessment indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 18-28. (in Chinese))
- [21] 黄涛, 徐力刚, 范宏翔, 等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1677-1684. (HUANG Tao, XU Ligang, FAN Hongxiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1677-1684. (in Chinese))
- [22] 董耀华, 汪秀丽. 长江流域水系划分与河流分级初步研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30(10): 1-5. (DONG Yaohua, WANG Xiuli. Preliminary research on watershed division and stream order classification of the Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(10): 1-5. (in Chinese))
- [23] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(9): 4349-4383.
- [24] ZHANG Shuyi, LI Mingxing, MA Zhuguo, et al. The intensification of flash droughts across China from 1981 to 2021 [J]. Climate Dynamics, 2024, 62(2): 1233-1247.
- [25] OTKIN J A, ANDERSON M C, HAIN C, et al. Examining rapid onset drought development using the thermal infrared-based evaporative stress index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(4): 1057-1074.
- [26] ZHANG Yuqing, YOU Qinglong, CHEN Changchun, et al. Flash droughts in a typical humid and subtropical basin: a case study in the Gan River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 162-176.
- [27] FORD T W, LABOSIER C F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 414-423.
- [28] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [29] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策 [J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese))
- [30] 郝增超, 张璇, 郝芳华, 等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对 [J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 46-52. (HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 46-52. (in Chinese))
- [31] WANG Linying, YUAN Xing. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(12): 1478-1490.

(收稿日期: 2024-09-04 编辑: 王芳)