

基于多智能体系统的城市极端暴雨内涝风险动态评估

李孟泽¹, 褚俊英¹, 周祖昊¹, 唐 明², 原康琦¹, 许文斌³, 唐佐槐^{1,4}

(1. 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;
2. 南昌工程学院水利工程学院, 江西 南昌 330099; 3. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330038;
4. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为有效识别和评估城市内涝风险,提出了针对人类、车辆、普通建筑物、基础设施等不同个体的风险计算与评级方法,构建了基于危险性、暴露性与脆弱性的多层次动态评估模型,该模型集成了包括风险、人类、车辆、建筑和政府的五大智能体系统,并应用于南昌市乌沙河流域。结果表明:南昌市乌沙河流域的地形条件和排水系统特征是影响内涝风险的主要因素;人员和车辆的时空分布进一步影响了内涝风险等级,其中凤凰洲排水区和新建区排水区的风险等级较高;内涝风险的时间分布呈现明显的双峰特征,风险值的峰值在工作日主要集中在早、晚高峰期,节假日则在午间达到峰值,政府预警可有效调节研究区内涝风险水平。

关键词:城市内涝;极端暴雨;多智能体系统;内涝风险值;动态评估;乌沙河流域

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)02-0095-11

Dynamic assessment of urban extreme rainstorm waterlogging risk based on multi-agent system//LI Mengze¹, CHU Junying¹, ZHOU Zuhao¹, TANG Ming², YUAN Kangqi¹, XU Wenbin³, TANG Zuohuai^{1,4} (1. State Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. The School of Hydraulic Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 3. Nanchang Urban Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330038, China; 4. School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To effectively identify and assess urban waterlogging risks, a risk calculation and rating method targeting different units such as humans, vehicles, ordinary buildings, and infrastructure was proposed. A multi-level dynamic assessment model based on hazard, exposure, and vulnerability was constructed. This model integrated a multi-agent system comprising risk, humans, vehicles, buildings, and government, which was used in the Wusha River Basin in Nanchang City. The results indicate that the topographic conditions and drainage system characteristics of the Wusha River Basin are the primary factors influencing urban waterlogging risks. The spatiotemporal distribution of people and vehicles further affects the risk levels, with higher risk levels observed in the Fenghuangzhou drainage zone and the Xinjian District drainage zone. The temporal distribution of waterlogging risks exhibits a distinct bimodal pattern, with peak risk values concentrated during the morning and evening rush hours on weekdays and reaching a peak at noon on holidays. Government warnings can effectively regulate the urban waterlogging risk levels in the study area.

Key words: urban waterlogging; extreme rainstorm; multi-agent system; waterlogging risk value; dynamic assessment; the Wusha River Basin

在全球气候变化与城市化加速的双重压力下,极端暴雨引发的城市内涝灾害已成为全球共同面临的紧迫挑战。这些极端天气事件对城市基础设施、生态系统、居民安全与生活质量构成了显著威胁。近年来极端暴雨事件频发,例如:2021 年,河南郑州“7·20”特大暴雨造成的重大人员伤亡和财产损

失^[1];2023 年,受台风“杜苏芮”等多重因素影响京津冀地区遭遇了严重的暴雨灾害^[2-3]。这些灾害不仅造成了重大的人员伤亡和经济损失,而且凸显了准确评估城市内涝风险的迫切性。

自 20 世纪 70 年代以来,极端暴雨下城市内涝风险评估模型得到了快速发展,其主要框架包括危

基金项目:江西省“科技+水利”联合计划重大专项项目(2022KSG01007)
作者简介:李孟泽(2000—),男,硕士研究生,主要从事水资源综合调控研究。E-mail:lmz1.thaa@vip.163.com
通信作者:褚俊英(1976—),女,正高级工程师,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:jchu@iwhr.com

险性-暴露性-脆弱性 (hazard-exposure-vulnerability, H-E-V)、危险性-脆弱性 (hazard-vulnerability, H-V)^[4]、危险性-暴露性-脆弱性-防灾减灾能力 (hazard-exposure-vulnerability-disaster prevention and reduction, H-E-V-R)。虽然 H-E-V-R 框架在评估中加入了防灾减灾能力,具有更强的全面性,但 H-E-V 框架简洁且评估内容明确,操作性更为突出,广泛应用于学术研究和实际操作。目前,面向宏观尺度的极端暴雨下城市内涝风险主要评估方法包括指标体系评估法^[5]、历史灾情评估法^[6]、基于 GIS 的评估方法^[7]和基于情景的模拟分析法^[8-10]。Shi 等^[11]利用上海市洪水风险信息中心的暴雨模拟模型,对上海市的旧式住宅区进行了降雨重现期分别为 20 a 和 50 a 条件下的内涝风险模拟,揭示了该地区的总风险特征,并对不同地区的灾害状况进行了比较。Mei 等^[12]在厦门市建立了数值模型,使用 12 种设计降雨模拟了不同降雨重现期、降雨雨型和持续时间条件下的内涝风险,发现在相同降水量条件下,降雨强度是影响淹没面积、深度和损失的关键因素,降雨雨型对内涝影响显著。田子阳等^[13-14]以宁市市为例开展了多尺度城市内涝风险评价研究,采用熵权法进行宏观尺度评价,采用水文水动力模型进行中观尺度评价,采用灾损曲线方法进行微观尺度评价。陈前虎等^[15]集成了元胞自动机系统,结合水文水力学原理定义元胞及其规则,建立了城市内涝风险识别模型,为缺乏资料的区域提供了风险评估的工具。尽管近年来评估方法逐渐从单一尺度转向多尺度,现有研究仍主要聚焦于宏观尺度的静态评估,较少涉及灾害过程中的动态性和复杂环境下的多维度风险演化问题。

多智能体系统 (multi-agent system, MAS) 可以有效模拟微观个体的具体位置,从而分析该个体的综合风险。MAS 是由多个互相协作或竞争的自治智能体组成的系统,旨在通过集体行为解决复杂问题。在 MAS 中,每个智能体都具有一定程度的自主性,能够感知环境、做出决策,并与其他智能体交互。许多学者对 MAS 开展了研究,例如:黄河等^[16]采用了 MAS 建模技术,对内涝灾害中的人口风险进行了动态评估,区分了 5 种受灾状态:安全状态、轻度受灾状态、中度受灾状态、重度受灾状态以及完全受灾状态;朱净萱等^[17]以丽水市莲都区为研究区,开展了基于 MAS 的城市洪涝灾害脆弱性计算;徐俊杰^[18]基于人口承灾智能体的洪涝灾害损失评估方法,对荆江分洪区的埠河镇开展了多情景研究;卢兴超等^[19]以北京市海淀区城区为例,构建了基于 MAS 的城市洪涝灾害动态风险评估模型,实现了城市洪

涝灾害过程人口动态风险定量评估。这些研究将所有智能体均视为同一种类型,且研究中认为整个降雨过程中全部人类为随机运动,尚未综合考虑人类、建筑物、车辆等风险,也未能与区域风险相结合。

鉴于此,本文基于 H-E-V 框架,分析城市居民、交通、建筑物及基础设施的属性、风险计算及风险扩散机制,给出极端暴雨下城市内涝动态风险计算方法,并建立基于 MAS 的城市极端暴雨内涝风险动态评估模型,引入人类智能体、车辆智能体、建筑智能体、政府智能体和风险智能体并定义其属性、行为以及交互规则,以期动态评估极端暴雨对个体的影响以及宏观汇总的效果。

1 极端暴雨下城市内涝风险值计算方法

1.1 城市内涝风险基本概念与 H-E-V 框架

城市内涝风险指由于极端降雨或其他水文事件超出城市排水系统的容量,导致对人类、财产、基础设施等潜在损害的可能性。基于此,提出了一种结合微观与宏观视角的风险动态评估方法,强调宏观与微观指标的相互依赖性。在宏观层面,通过对气候变化、城市基础设施等因素进行量化分析,作为微观风险值计算的输入条件,为微观评估提供必要的环境和背景信息。在微观层面,运用 H-E-V 框架对每个个体(包括人类、车辆、建筑物等)的风险进行精确评估,包括识别可能导致城市内涝的降雨事件(危险性)、分析位于高风险区的资产和人群分布(暴露性)以及评估城市在面临内涝灾害时可能遭受损害的程度(脆弱性)。为了全面掌握区域内的风险情况,在宏观层面进行综合统计分析,确定高、中、低风险区域;将单个个体的风险分析与区域整体的风险评估相结合,从而提供更全面的风险评估视角,有效支持更精细化的风险分析。

1.2 内涝风险值计算方法

基于相关研究^[19-21],提出自下而上的综合城市内涝风险值计算方法,涉及人类、车辆、普通建筑物、基础设施等关键个体。针对不同个体的特点,从 3 个维度进行风险评估:危险性主要体现为积水深度和水流速度对各要素的威胁,对人类而言主要威胁其人身安全,对车辆而言主要影响其发动机系统和通行能力,对普通建筑物而言主要损害其结构稳定性,对基础设施而言则可能导致功能失效并产生连锁影响;暴露性关注不同个体在城市空间的分布特征,人类和车辆具有动态分布特点,其暴露程度随时间和空间变化,普通建筑物和基础设施则具有固定位置,其暴露性主要取决于所处位置的地形特征和排水条件;脆弱性反映不同个体自身的抗风险能力,

人类的脆弱性受年龄、健康状况等个体特征影响,车辆的脆弱性与其类型和防水能力相关,普通建筑物的脆弱性取决于其结构特征和使用功能,基础设施的脆弱性则与其服务功能和系统冗余度有关。城市极端暴雨内涝风险计算框架见图 1,其中建筑物包括普通建筑物和基础设施。

1.2.1 人类和建筑物风险

参考 2006 年英国关于洪水对人类和建筑物的风险评价研究^[22]中的划分原则,将城市极端暴雨内涝中人类和建筑物(普通建筑物和基础设施)的暴露度定义为流速和水深的函数,计算公式为

$$P = (v + C)D + F \tag{1}$$

式中: P 为暴露度; D 为所在格网的积水深度; v 为所在格网的径流流速; C 为流速因子,本文取 0.5; F 为地表因子,与所在网格的积水深度和径流流速有关,草地、林地、城市建筑等不同土地利用类型的地表因子见表 1。

表 1 不同土地利用类型的地表因子

Table 1 Surface factors of different land use types			
条件	草地	林地	城市建筑
$D \leq 0.25\text{ m}$	0	0	0
$0.25\text{ m} < D \leq 0.75\text{ m}$	0	0.5	1.0
$D > 0.75\text{ m}$ 或 $v > 2\text{ m/s}$	0.5	1.0	1.0

考虑到不同性别、年龄人类的脆弱性存在显著差异,采用脆弱性系数量化人类在城市内涝风险下的脆弱程度。将成年人的脆弱性系数定为 1 作为基准,其他人的脆弱性系数进行一定调整,确定成年女性、老人、儿童的脆弱性系数分别为 1、0.5、0.5。基于澳大利亚相关规范^[23]确定儿童与成人涉水避难

参数的比例,儿童的极限深度为成人的 0.5 倍、极限流速为成人的 0.6 倍,设定所有建筑物脆弱性系数为 1。基于此,人类和建筑物的内涝风险值计算公式为

$$S_p = \begin{cases} 0 & H_p < 0.75 \\ 1 & 0.75 \leq H_p < 2.5 \\ 2 & H_p \geq 2.5 \end{cases} \tag{2}$$

$$S_b = \begin{cases} 0 & H_b < 1.5 \\ 1 & 1.5 \leq H_b < 3.5 \\ 2 & H_b \geq 3.5 \end{cases} \tag{3}$$

其中 $H_p = PV_p$ $H_b = PV_b$
式中: H_p 为人类的危险度; V_p 为人类的脆弱度; H_b 为建筑物的危险度; V_b 为建筑物的脆弱度; S_p 为人类的内涝风险值; S_b 为建筑物的内涝风险值。0 代表低风险,1 代表中风险,2 代表高风险。

基础设施主要包括地铁站、水厂、电厂、污水处理厂等,其内涝风险值的计算方法与普通建筑相同,但不同种类的基础设施会对作用范围内个体产生不同影响。当各类基础设施处于超标准积水情况下,会对其他个体造成不同程度的影响。具体而言,当地铁站处于高风险状态时,地铁站内的人将面临生命威胁,也处于高风险状态,即地铁站内涝风险值 $S_s = 2$,则其服区内的 $S_p = 2$;当水厂、电厂、污水处理厂处于高风险状态时,其服务区内的居民虽然不会面临生命威胁,但生活中会遭遇较大的不便。设正常情况下服务区内居民生活便利程度 $C_p = 1$,当水厂、电厂、污水处理厂处于高风险状态,不会影响服务区内人风险的等级,但会影响其生活便利程度,即水厂、电厂、污水处理厂内涝风险值 $S_i = 2$,则 $C_p = 0$ 。

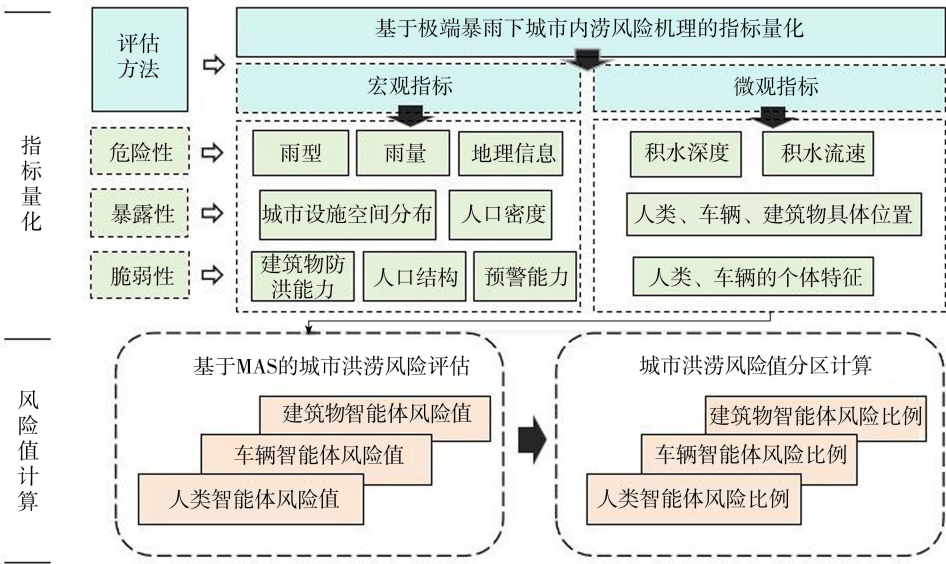


图 1 城市极端暴雨内涝风险计算框架

Fig. 1 Calculation framework of urban extreme rainstorm waterlogging risk

1.2.2 车辆风险

城市极端暴雨对车辆的影响比较复杂,主要威胁包括降低驾驶视野清晰度、削弱轮胎与地面的摩擦力以及增加水面打滑等危险。此外,极端暴雨的高水流可能导致较小车型受困或被卷走,极大地威胁乘客的生命安全。为了精确评估这些风险,将车辆的排气管高度和淹没深度作为关键参数,考虑到汽车排气管通常距离地面 25~35 cm^[24],本文设定 30 cm 作为中、低风险阈值,根据车辆淹没深度来设定高风险阈值,并假设同一车型的脆弱度相同。基于此,车辆内涝风险值的计算公式为

$$S_{cc} = \begin{cases} 0 & d < 0.3\text{ m} \\ 1 & 0.3\text{ m} \leq d < 1\text{ m} \\ 2 & d \geq 1\text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{cb} = \begin{cases} 0 & d < 0.3\text{ m} \\ 1 & 0.3\text{ m} \leq d < 1.5\text{ m} \\ 2 & d \geq 1.5\text{ m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: S_{cc} 为私家车的内涝风险值; S_{cb} 为公交车的内涝风险值; d 为车辆所在位置的积水深度。

1.2.3 宏观尺度动态风险

宏观层面的动态风险评估通过统计不同区域内中、高风险个体的比例,加权计算得到各区域的内涝风险值,从而绘制研究区的风险区划图。区域内涝风险值的计算公式

$$H = w_1 R_p + w_2 R_c + w_3 R_b \quad (6)$$

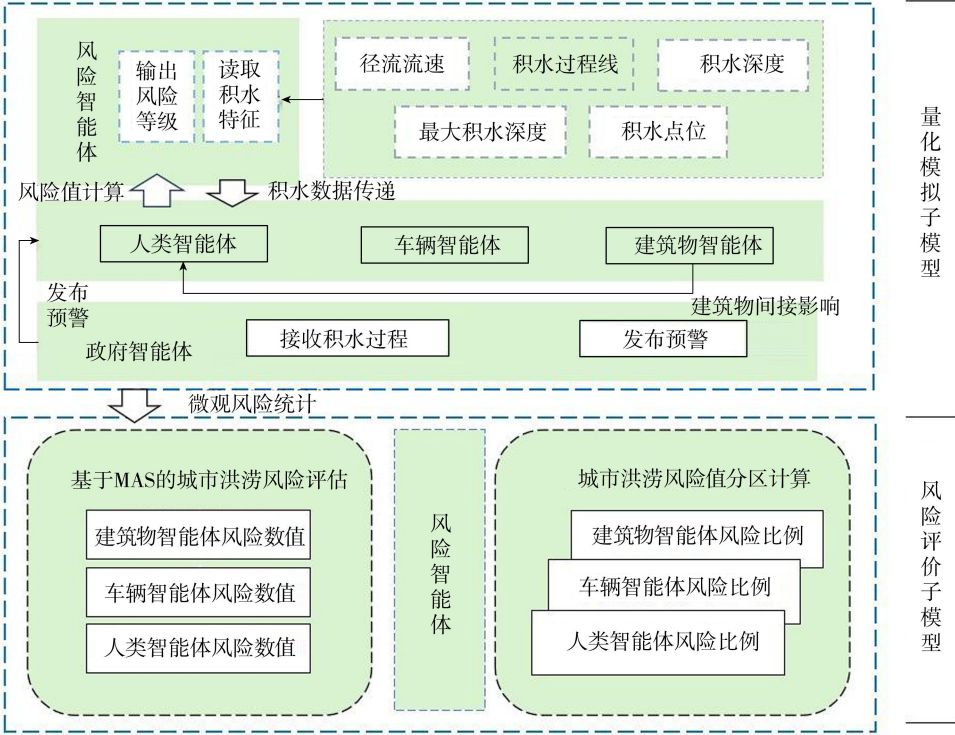


图2 城市极端暴雨内涝风险动态评估模型结构

Fig. 2 Dynamic assessment model of urban extreme rainstorm waterlogging risk

其中 $R_p = (w_4 h_p + w_5 m_p) / t_p$
 $R_c = (w_4 h_c + w_5 m_c) / t_c$ $R_b = (w_4 h_b + w_5 m_b) / t_b$
式中: H 为区域综合风险值; w_1 为人类风险的权重; w_2 为车辆风险的权重; w_3 为建筑物风险的权重; w_4 为高风险权重; w_5 为中风险权重; R_p 为区域人类风险值; h_p 为区域高风险人数; m_p 为区域中风险人数; t_p 为区域总人数; R_c 为区域车辆风险值; h_c 为区域高风险车辆数量; m_c 为区域中风险车辆数量; t_c 为区域车辆总数量; R_b 为区域建筑物风险值; h_b 为区域高风险建筑物数量; m_b 为区域中风险建筑物数量; t_b 为区域建筑物总数量。根据综合风险值将区域进行划分, $H \geq 0.15$ 表示区域为高风险区, $0.1 \leq H < 0.15$ 表示区域为中风险区, $H < 0.1$ 表示区域为低风险区。

2 基于 MAS 的城市极端暴雨内涝风险动态评估模型

2.1 模型结构

图2为城市极端暴雨内涝风险动态评估模型结构。由图2可见,模型整合了危险性、脆弱性与暴露性的综合分析,旨在提供全面评估城市内涝灾害整体风险水平的方法。模型包括量化模拟子模型和风险评价子模型两部分。量化模拟子模型通过多智能体模型中的风险、政府、人类、车辆、建筑五大智能体进行构建。其中人类、车辆和建筑物智能体是反应类的智能体,是可行动的智能体,有行为轨迹;风险

智能体属于计算类智能体,提供积水信息;政府智能体属于条件类智能体,发布预警信息。风险评价子模型基于风险智能体,通过模拟智能体的交互行为和内涝演进动态计算预测城市内涝风险,在个体层面分析智能体数量变化,在区域层面计算风险比例,并设置多种情景以覆盖不同事件。

2.2 MAS 构建

2.2.1 运行环境

智能体运行环境构成了智能体存在及活动的场景,不仅限定了智能体的移动范围,也是智能体行为发生的物理基础。在构建城市极端暴雨内涝风险动态评估模型时,通过融合路网、地形等数据信息来打造智能体的运行环境,确保其与真实世界的相似度。为准确计量模型模拟过程中智能体移动的距离,将运行环境划分为均匀分布的节点和节点之间的连接线,以此模拟现实世界的空间结构。

2.2.2 智能体定义

a. 人类智能体。人类智能体按照性别(男、女)、性格(理性、非理性)、年龄(儿童、成年人、老年人)的社会属性进行划分,共分为 12 种类别。基于对城市居民出行行为的分析,将人类智能体的行为模式归纳为工作、学习、休闲娱乐以及返回住所等。其中,工作、学习、休闲娱乐等空间的分离意味着人类智能体需要在不同的空间之间进行日常通勤,导致其时空动态变化。因此,模拟人类智能体的日常行为是捕捉城市内涝风险动态的关键环节。人类智能体的初始化位置随机分布于居住地点位,日常行为规则以概率的形式描述,具体的行为发生时间和概率设置基于问卷调查。本文根据年龄分为 4 种不同的行为模式,如图 3 所示,图中休息代表一天行程结束。人类智能体是否为理性行为者,影响着其在接收到政府的预警信息及周遭人群的避险行动时是否能够做出恰当的反应决策,一般来说,在日常行为

中,接收到政府预警的情况下,理性性格的人 would 进行动态响应,非理性性格的人行为保持不变。在极端暴雨事件发生时,人类智能体根据自身状态或政府指示采取避险策略。首先,风险智能体实时向人体智能体传达周围的信息,包括地形、降水量、淹没面积、径流流速、积水深度等,这些信息是人体智能体做出响应决策的基础;其次,人体智能体根据自身所处的位置、周围的环境状态、积水深度和径流流速对人可能造成的影响了解自身的暴露风险,这是人体智能体识别危险程度和确定应对策略的前提;再次,人体智能体依据收集到的环境信息和自身的知识库,利用预设的反应规则来制定行动计划,包括选择保持原地不动或确定向安全地区移动的最佳路径,这一决策过程涉及对各种可能行动的效果评估,选择最能确保安全的策略;最后,人体智能体实施其行动决策,执行移动以规避内涝风险,包括寻找和移动到安全建筑物或向地势较高或积水较浅的区域转移。

b. 车辆智能体。将车辆分为大型公交车和小型私家车两个类别。公交车的行动轨迹遵循固定的交通路线和时间往返于公交车站之间;私家车的行驶路径则与成年人的日常行为模式保持一致。车辆智能体的活动受道路网络状况的直接影响。

c. 建筑物智能体。建筑物智能体在 MAS 中用于模拟城市中不动产在极端降雨内涝事件中的状态变化。通过模拟建筑物对内涝事件的响应,可以更好地理解内涝事件对城市基础设施和居民住宅的潜在影响,从而为城市规划和风险管理提供重要信息。建筑物智能体不仅包括住宅、商业建筑等城市普通建筑物,也包括对城市运行至关重要的基础设施,包括地铁站、污水处理厂、电力设施、供水系统等。当基础设施处于高风险状态时,会对其服务范围内的智能体产生级联影响,这种交互规则反映了

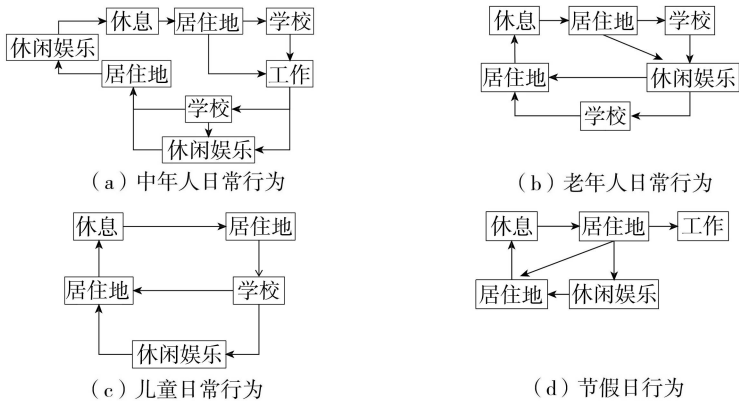


图 3 不同类型人体智能体的行为模式

Fig. 3 Behavior mode of different types of human intelligent agents

基础设施在城市系统中的关键作用及其对城市韧性的影响。

d. 政府智能体。政府智能体是城市内涝风险管理中的关键角色,综合承担着行政决策、预警发布职能。政府智能体不仅能对城市内涝过程进行感知和预测,还能精准掌握城市居民受灾状况,依据各区域的具体受灾情况及时发布预警。具体功能包括:①与风险智能体交互,感知积水信息并分析、综合考察城市整体环境;②通过分析地面径流速度和积水深度对人类、建筑智能体的潜在影响,实时评估城市风险程度,决定是否发布内涝预警;③通过输出预警系统将决策信息传达给各类智能体。

e. 风险智能体。风险智能体在城市极端降雨内涝风险动态评估模型中负责桥接物理环境与智能体之间的互动,兼具数据处理和风险评估的职能。在模型的设计中,风险智能体作为环境块部分,具体工作流程和功能包括:①数据整合与处理,将积水过程线数据整合到系统中,包括积水深度、流速等;②智能体数量读取,读取模型中不同风险等级区域内智能体数量,分析各类智能体空间分布情况和风险敞口;③风险汇总与输出,实时计算和汇总各类智能体风险等级并输出整体结果;④基于不同情景的多智能体城市内涝风险评估,分析不同极端暴雨降雨情景、发生时间和政府响应情境下的城市内涝风险。风险智能体与其他智能体的交互遵循“信息共享-风险评估-状态更新”的闭环机制。

3 实例应用

3.1 研究区概况与数据来源

3.1.1 研究区概况

南昌市乌沙河流域位于昌北,地理坐标范围为北纬 28°36′~28°46′、东经 115°42′~115°53′,由中堡水、前湖水、龙潭水、青岚水等支流汇合而成,流域面积 263.3 km²,涉及红谷滩区、新建区以及经济开发

区的主城区。乌沙河流域地形较为平坦,但局部地势起伏,河道蜿蜒曲折。流域内水系网络发达,支流众多,河网密度较高,为流域的水资源调配和洪水排泄提供了良好的条件。作为南昌市的重要水源,乌沙河流域为南昌市提供了农业、生活、工业等多方面用水,同时构成了南昌市部分河流沿岸的重要景观带。依据水文地理特征和城市排水设施布局,将研究区划分为 9 个排水区:红角洲排水区、凤凰洲排水区、红谷滩排水区、乌沙河上游排水区、望城排水区、西客站排水区、前湖上游排水区、经开区排水区和新建区排水区,排水区位置如图 4 所示。

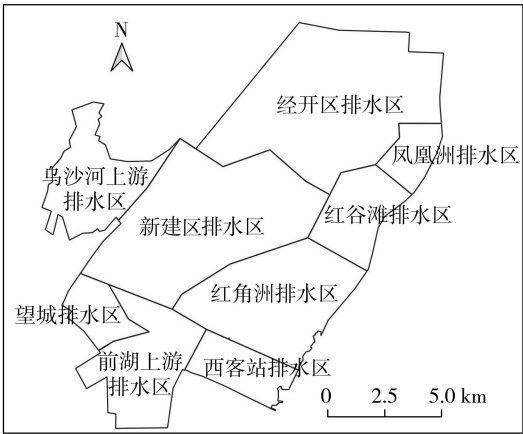


图 4 排水区位置

Fig. 4 Location of drainage area

3.1.2 数据来源

城市极端暴雨内涝风险动态评估模型所需数据包括基础地理信息数据、社会经济数据、气象数据、历史灾情数据、社会学调查数据,具体情况如表 2 所示。

3.2 模型参数设置与验证

进行模型初始化时,需将居民社区、办公场所、学校、娱乐场所、关键基础设施的地理位置导入模型,基于这些地点,设定人类和车辆智能体的初始位置及目的地。利用问卷调查结果确定不同情景下人

表 2 数据信息

Table 2 Data information

数据类型	数据名称	数据来源
基础地理信息数据	DEM	天地图
气象数据	极端暴雨雨型和降水量	《极端暴雨条件下城市内涝风险预警与防范技术研究》
历史灾情数据	南昌市极端暴雨积水点	《极端暴雨条件下城市内涝风险预警与防范技术研究》
社会学调查数据	南昌市民城市内涝情况下的行为和决策	实地问卷调查
社会经济数据	人口及人口结构特征	《2023 年江西省年鉴》《2022 年南昌市常住人口年报》
	城市路网	高德地图
	城市兴趣点	高德地图
	城市交通概况	江西南昌公共交通运输集团有限责任公司、南昌市公安局交通管理局
	城市建筑物分布	高德地图
	南昌市排水分区划分	南昌市城市规划设计研究总院
	城市基础设施分布	南昌市城市规划设计研究总院
	主干道交通流量	实地测量

类和车辆智能体的行为选择概率,以反映研究区居民的日常行为和生活状态。问卷调查以南昌市为目标区域,共收集了1 230份有效问卷。研究区总人口为134.02万人,男性比例为52%,老年人比例为11%,儿童比例为16%,理性人比例为90%,每个人类智能体代表2 000实际人口。公交车数量为770辆,私家车数量为26.98万辆,每个私家车智能体代表1 000辆实际车辆。人类智能体出行时间及比例分别为:34.9%于7:00出行、53.6%于8:00出行、11.5%于9:00出行;回家时间及比例分别为:24.7%于17:00回家、50.4%于18:00回家、24.9%于19:00回家。工作日晚外出、节假日外出及需接送儿童的概率分别为34.4%、63.3%和20.5%。

模型初始时间设为00:00,此时人和车辆均处于初始化位置(家),没有室外活动。早上8:00,人和车开始按照行为轨迹活动,如儿童上学、成年人送儿童上学或上班、老年人送儿童上学或休闲娱乐,室外活动人数显著增加。这些活动导致个体从居住空间流向工作、学习、休闲娱乐区域,形成明显的人口流动模式。下午17:00,随着一天活动结束,个体智能体开始陆续返回居住区,室外活动人数再次急剧上升,展现出从公共空间流向居住和休闲区域的流动模式。下午18:00,室外活动人数达到峰值。晚上22:00,智能体基本回到居住空间,结束一天活动。研究区智能体在不同时间 T 的位置模拟结果如图5所示。

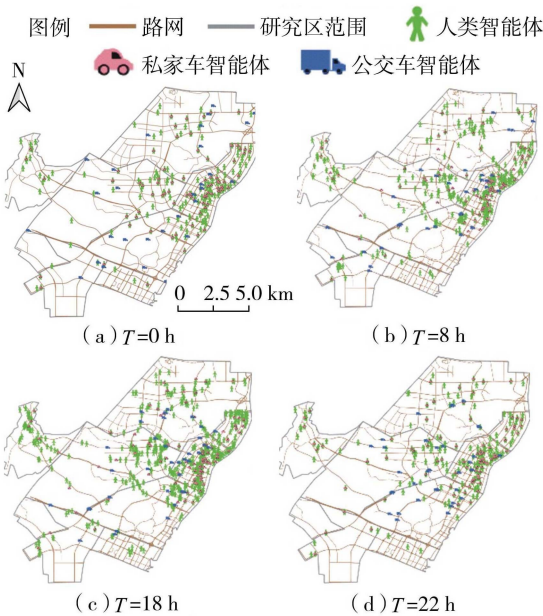


图5 研究区智能体在不同时间的位置模拟结果
Fig.5 Simulation results of intelligent agent positions in study area at different times

利用南昌市中心城区的实际交通流量数据对模型车辆智能体的模拟进行验证。选择丰和中大道

与庐山南大道交界处及会展路与丰和中大道交界处作为监测点,在60 min的车流高峰期,这两个监测点的交通流量分别达到3 210辆和4 680辆;模型模拟结果显示这两个监测点高峰期的车辆智能体均值为3.5和4.1,与实测值基本一致,表明构建的模型能准确模拟研究区主要道路的交通状态。图6为百度地图引擎提供的研究区18:00人口活动热力图。将图6与图5(c)进行对比,可见模型模拟结果的人口流动情况与实际情况基本一致,表明构建的模型能准确模拟研究区人口流动情况。

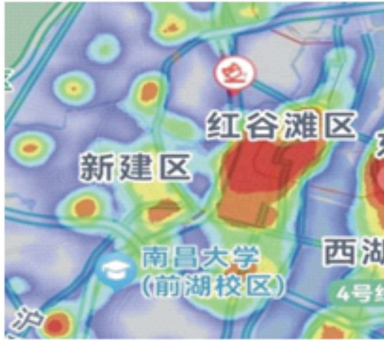


图6 研究区18:00人口活动热力图
Fig.6 Population activity heat map at 18:00 of study area

基于政府响应及工作日与非工作日的差异,开展多情景研究。设置的3种情景均采用100年一遇的降雨强度,降水量为311.05 mm,降雨雨型采用Wu等^[25]在南昌市极端暴雨研究中的常见雨型,情景A为工作日且无政府响应的情况,情景B为节假日且无政府响应的情况,情景C为工作日且有政府响应的情况。

3.3 结果与分析

3.3.1 情景A

图7为情景A不同时间智能体的空间分布。由图7可见,在情景A中,积水开始形成的时间为早上6:00,主要集中在乌沙河上游、红角洲、凤凰洲、新建区排水区。早上7:00—9:00,智能体开始了一天的活动,暴露性显著增大。早上8:00时,高风险人类智能体数量为2,中风险人类智能体数量为140。中午12:30时,随着降水量减少,积水深度和流速下降,风险指数降低,大部分高风险智能体转为中风险。然而,新建区排水区的积水未有效排除,相关智能体风险等级未明显变化。傍晚18:00时,外部智能体数量达到峰值,中、高风险智能体显著增多。晚上22:00时,大部分智能体已返回住所,但乌沙河上游和新建区排水区仍有中、高风险智能体,特别是在新建区排水区,由于积水未排干,该区域持续存在风险。情景A中,整个研究区基础设施未受损。图8为情景A不同排水区的动态风险值。由

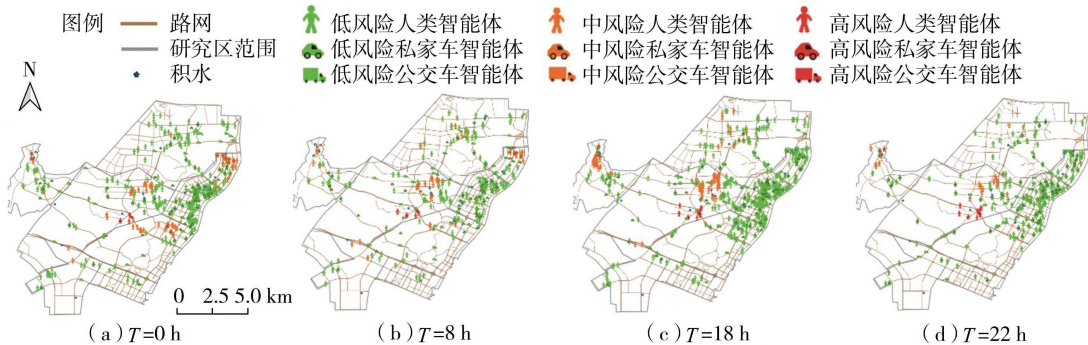


图 7 情景 A 不同时间智能体的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of intelligent agents at different times in scenario A

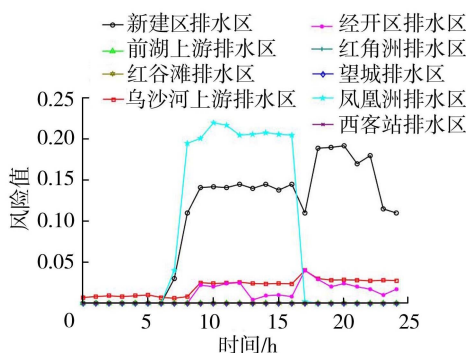


图 8 情景 A 不同排水区的动态风险值

Fig. 8 Dynamic risk values of different drainage areas in scenario A

图 8 可见,新建区排水区在整个降雨过程中都处于中风险状态,凤凰洲排水区在 9:00—17:00 处于中风险状态,西客站排水区在 10:00—11:00 处于中风险状态,其他区域均为低风险。

3.3.2 情景 B

图 9 为情景 B 不同时间智能体的空间分布。与图 7 相比,显示出工作日与节假日活动差异对风险分布的显著影响。由图 9 可见,在情景 B 中,积水于早上 6:00 开始形成,智能体在活动前状态与情景 A 相同,只有少数建筑智能体处于中风险。早上 8:00 时,随着节假日活动开始,部分人类和车辆智能体移动至积水区附近,处于中、高风险状态,出行

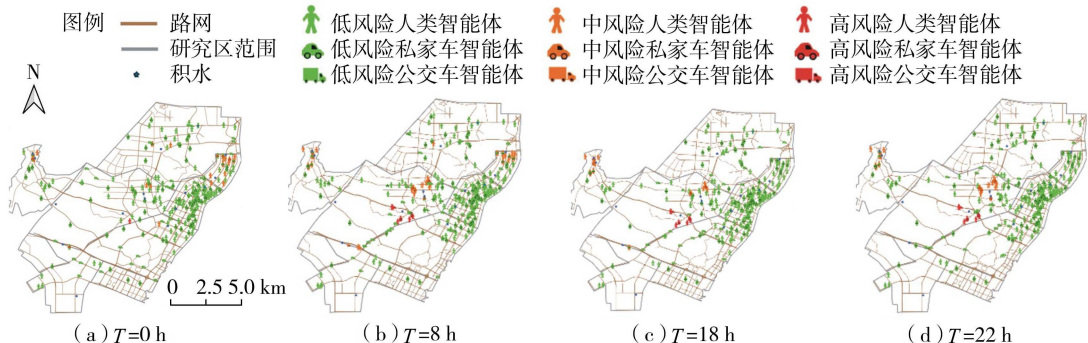


图 9 情景 B 不同时间智能体的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of intelligent agents at different times in scenario B

量低于工作日,中、高风险智能体数量比情景 A 减少。中午 12:30 时,流量较大导致风险智能体数量达到峰值,乌沙河上游、凤凰洲、新建区排水区为中、高风险区域。红角洲排水区因娱乐场所的存在,也有一些中风险智能体,中风险人类智能体数量为 21,但无高风险人类智能体。傍晚 18:00 时,智能体再次出行,主要前往娱乐场所,与情景 A 相比,这一变化显著降低了乌沙河上游和凤凰洲排水区的风险,而红角洲和新建区排水区的风险有所上升。晚上 22:00 时,人类智能体陆续返回居住地,各排水区的风险均有所减少。图 10 为情景 B 不同排水区的动态风险值。由图 10 可见,各排水区风险值高低有明显变化,其中新建区、凤凰洲、经开区排水区风险值明显随时间上升,在中、高风险阈值附近波动,红谷滩排水区风险值下降,全程为低风险。

3.3.3 情景 C

图 11 为情景 C 不同时间智能体的空间分布。由图 11 可见,在情景 C 中,模型运行开始时研究区内各智能体相对稳定,仅有少数建筑智能体处于中风险状态。早上 6:00 时,研究区产生积水,政府发布预警。早上 8:00 时,随着智能体开始日常活动,部分人类智能体与车辆智能体出现在较危险的位置,主要集中在乌沙河流域上游和凤凰洲排水区。中午 12:30 时,中、高风险智能体数量变化不大。傍

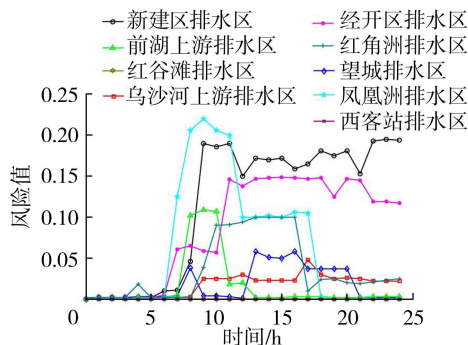


图 10 情景 B 不同排水区的动态风险值

Fig. 10 Dynamic risk values of different drainage areas in scenario B

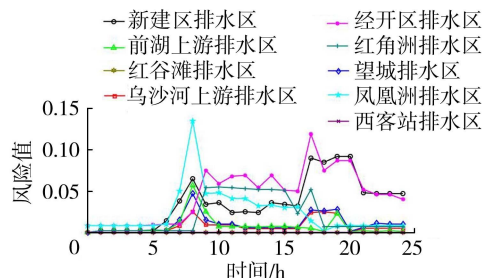


图 12 情景 C 不同排水区的动态风险值

Fig. 12 Dynamic risk values of different drainage areas in scenario C

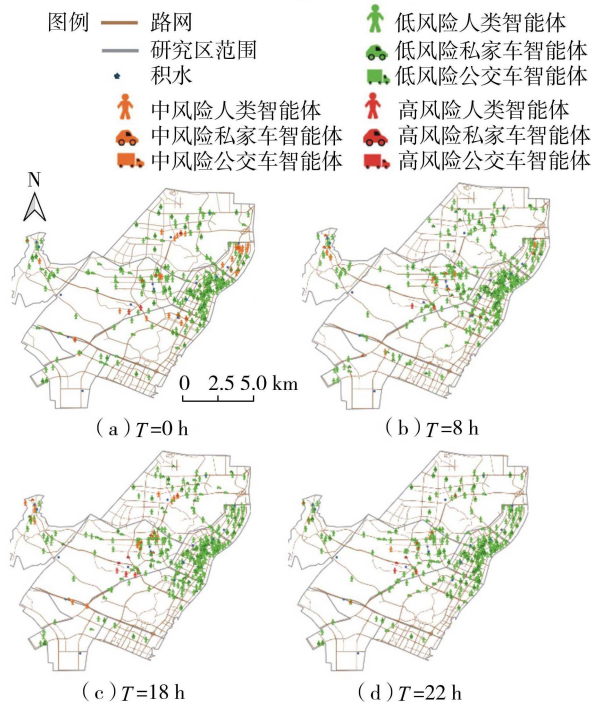


图 11 情景 C 不同时间智能体的空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of intelligent agents at different times in scenario C

晚 18:00 时,风险的空间分布与无预警时相似,但受影响的智能体数量和风险等级有所降低。与情景 A 相比,在政府及时预警的情况下,中、高风险智能体数量大幅减少,其中高风险人类智能体数量平均减少 6.1,中风险人类智能体数量平均减少 64.9。可见在情景 C 下,研究区内中、高风险的人类智能体和车辆智能体数量有明显降低,峰值较情景 A 降低了 79.6%。尽管如此,情景 C 中仍存在少量高风险人类智能体和车辆智能体,政府需进一步发起救援行为。图 12 为情景 C 不同排水区的动态风险值。由图 12 可见,与情景 A 相比,情景 C 下各排水区风险值均有降低,凤凰洲、经开区排水区分别在 9:00 和 17:00 达到中风险状态。在情景 B 下,由于智能体的活动轨迹与积水点不重合,因此中、高风险的人

智能体和车辆智能体分布峰值不同,风险值也有较大差异,节假日的风险峰值出现在 11:00—13:00,而工作日的风险值峰值出现在早高峰和晚高峰。

4 结 论

a. 基于 H-E-V 框架,提出了一种针对不同个体(人类、车辆、普通建筑物和基础设施)的城市内涝风险值计算与评级方法。通过将微观个体风险评估与宏观区域风险分析相结合,实现了风险评估的多维度集成。与传统评估方法相比,该方法既考虑了淹没水深和流速等水文因素,也融入了个体脆弱性差异和时空分布特征,能够更精准地量化和表征内涝风险的时空动态变化。

b. 构建了基于 MAS 的城市极端暴雨内涝风险动态评估模型,集成了风险、人类、车辆、建筑和政府五大智能体系统,通过定义各智能体的属性、行为规则和交互机制,模拟了极端暴雨过程中城市系统的动态响应。模型突破了传统静态评估方法的局限,能够捕捉人口流动、交通变化和政府干预等动态因素对风险分布的影响,实现了从单一尺度向多尺度、从静态分析向动态评估的方法论转变。

c. 将构建的模型应用于南昌市乌沙河流域,利用交通流量数据和人口热力图对模型进行了验证,并设置了工作日无政府响应、节假日无政府响应、工作日有政府响应 3 种情景对研究区极端暴雨的内涝风险进行了评估。结果表明,南昌市乌沙河流域的地形条件和排水系统特征是影响内涝风险的主要因素;人口和车辆的时空分布进一步影响了内涝风险等级,其中凤凰洲排水分区和新建区排水分区的风险等级较高;内涝风险的时间分布呈现明显的双峰特征,风险值的峰值在工作日主要集中在早、晚高峰期,在节假日则在午间达到峰值;政府预警可有效调节研究区内涝风险水平,最大可使中高风险智能体数量减少 79.6%。

参考文献:

[1] 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))
- [2] 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))
- [3] 应急管理部. 应急管理部发布 2023 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. [2024-03-12]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202401/content_6927328.htm.
- [4] 张会, 李钺, 程炯, 等. 基于“H-E-V”框架的城市内涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2019, 38(2): 175-190. (ZHANG Hui, LI Cheng, CHENG Jiong, et al. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability [J]. Progress in Geography, 2019, 38(2): 175-190. (in Chinese))
- [5] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 王德运, 冀承泽, 张露丹, 等. 城市洪涝风险的多方法组合评估与应用[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 96-103. (WANG Deyun, JI Chengze, ZHANG Ludan, et al. Risk assessment of urban flood disasters in Hubei Province based on composite weight evaluation method [J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 96-103. (in Chinese))
- [8] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))
- [9] 郑德凤, 高敏, 李钰, 等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 1-8. (in Chinese))
- [10] 高玉琴, 王慧, 刘钺, 等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 6-12. (in Chinese))
- [11] SHI Y, SHI C, XU S Y, et al. Exposure assessment of rainstorm waterlogging on old-style residences in Shanghai based on scenario simulation[J]. Natural Hazards, 2010, 53(2): 259-272.
- [12] MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Urban flood inundation and damage assessment based on numerical simulations of design rainstorms with different characteristics [J]. Science China-Technological Sciences, 2020, 63(11): 2292-2304.
- [13] 田子阳, 褚俊英, 林永寿, 等. 西宁市多尺度城市内涝风险评价方法[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 72-79. (TIAN Ziyang, CHU Junying, LIN Yongshou, et al. Multi-scale urban waterlogging risk assessment method in Xining City [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 72-79. (in Chinese))
- [14] 田子阳, 褚俊英, 周祖昊, 等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市内涝水文规律分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(10): 18-24. (TIAN Ziyang, CHU Junying, ZHOU Zuhao, et al. Hydrologic Analysis of urban waterlogging based on GIS and SWMM model [J]. Yellow River, 2022, 44(10): 18-24. (in Chinese))
- [15] 陈前虎, 沈铷桑, 陈甜甜, 等. 基于元胞自动机的城市内涝风险识别模型研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(8): 1-12. (CHEN Qianhu, SHEN Yusang, CHEN Tiantian, et al. Study on urban waterlogging risk identification model based on cellular automata [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(8): 1-12. (in Chinese))
- [16] 黄河, 范一大, 杨思全, 等. 基于多智能体的洪涝风险动态评估理论模型[J]. 地理研究, 2015, 34(10): 1875-1886. (HUANG He, FAN Yida, YANG Siqian, et al. A multi-agent based theoretical model for dynamic flood disaster risk assessment [J]. Geographical Research, 2015, 34(10): 1875-1886. (in Chinese))
- [17] 朱净萱, 戴强, 蔡俊逸, 等. 基于多智能体的城市洪涝灾害动态脆弱性计算模型构建[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1787-1797. (ZHU Jingxuan, DAI Qiang, CAI Junyi, et al. An agent-based computing model of urban vulnerability to flood hazard [J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(10): 1787-1797. (in Chinese))

[18] 徐俊杰. 基于智能体的洪涝灾害损失评估研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2023.

[19] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护, 2024, 40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding/waterlogging disaster based on multi-agents models[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))

[20] 张伟,庄子孟,孙慧超,等. 我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(5):58-68. (ZHANG Wei, ZHUANG Zimeng, SUN Huichao, et al. Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):58-68. (in Chinese))

[21] 李宛谕,黄显峰,金国裕,等. 基于 ANP-PP-SPA 的区域洪灾风险评价模型研究[J]. 水利经济, 2020, 38(4):45-50. (LI Wanyu, HUANG Xianfeng, JIN Guoyu, et al. Assessment model for regional flood risks based on ANP-PP-SPA[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4):45-50. (in Chinese))

[22] Department for Communities and Local Government. Planning policy statement 25: development and flood risk [R]. London: Department for Communities and Local Government, 2006.

[23] Standing Committee on Agriculture and Resource Management. Floodplain management in Australia: best practice principles and guidelines [R]. Zealand: Standing Committee on Agriculture and Resource Management, 2000.

[24] 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):27-33. (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):27-33. (in Chinese))

[25] WU Y, TANG M, ZHOU Z, et al. Rainfall pattern construction method based on DTW-HCA and urban flood simulation; a case study of Nanchang City, China [J]. Water, 2024, 16:65.

(收稿日期:2024 - 07 - 11 编辑:王芳)

(上接第 94 页)

[20] BAO Weimin, SI Wei, QU Simin. Flow updating in real-time flood forecasting based on runoff correction by dynamic system response curve[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(4):747-756.

[21] WANG Jian, BAO Weimin, XIAO Zhangling, et al. Objectivity verification experiment of the dynamic system response curve method for streamflow simulation [J]. Journal of Hydrology, 2023, 617:128969.

[22] WANG Jian, BAO Weimin, XIAO Zhangling, et al. Multi-model integrated error correction for streamflow simulation based on Bayesian model averaging and dynamic system response curve [J]. Journal of Hydrology, 2022, 607: 127518.

[23] 蒋语珣,瞿思敏,蒋思军,等. 系统微分响应误差修正方法在 VIC 模型中的应用与研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(10):96-103. (JIANG Yuxun, QU Simin, JIANG Sijun, et al. Application of and research on system differential response error correction method in VIC model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(10):96-103. (in Chinese))

[24] ZHANG Xiaoqin, BAO Weimin, SUN Yiqun. Enhancing the hydrologic system differential response method for flood forecasting correction [J]. Journal of Hydrology, 2021, 592:125793.

[25] SI Wei, GUPTA V H, BAO Weimin, et al. Improved dynamic system response curve method for real-time flood forecast updating[J]. Water Resources Research, 2019, 55(9):7493-7519.

[26] 张小琴,吴成城,余亮亮,等. 基于微分响应的流域产流分单元修正方法[J]. 湖泊科学, 2021, 33(6):1906-1913. (ZHANG Xiaoqin, WU Chengcheng, SHE Liangliang, et al. A spatial distributed runoff correction approach based on differential response [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6):1906-1913. (in Chinese))

[27] 包为民,阙家骏,赖善证,等. 洪水预报自由水蓄量动态系统响应修正方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):365-371. (BAO Weimin, QUE Jiajun, LAI Shanzheng, et al. Free-water storage error correction based on dynamic system response in flood forecasting [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3):365-371. (in Chinese))

[28] 刘可新,李匡,梁犁丽,等. 产流误差平稳矩阵的系统响应修正方法参数分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(1):53-61. (LIU Kexin, LI Kuang, LIANG Lili, et al. Parameters analysis on the error correction method with runoff error smooth matrix based on system response [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(1):53-61. (in Chinese))

[29] SUN Y, BAO W, JIANG P, et al. Development of multivariable dynamic system response curve method for real-time flood forecasting correction[J]. Water Resources Research, 2018, 54(7):4730-4749.

(收稿日期:2024 - 05 - 10 编辑:施业)