

基于多智能体模型的城市洪涝行人风险动态评估

许红师¹, 邓宇赫¹, 王慧亮¹, 张津维², 胡 炜³

(1. 郑州大学水利与交通学院; 2. 辽宁省水利厅; 3. 上海建工(浙江)水利水电建设有限公司)

摘要:针对城市洪涝风险评估中对行人动态变化刻画不足的问题,提出了基于多智能体模型的城市洪涝行人风险动态评估方法。基于人口热力图建立行人智能体初始空间分布,将基于兴趣点划分的城市功能区作为行人智能体活动的基础环境层,结合概率有限状态机和速度衰减曲线刻画洪涝情景下行人行为规则;耦合一二维水动力模型建立城市洪涝多智能体模型,利用历史降雨及人口热力图验证模型的可靠性,并对不同降雨重现期和降雨时机下的行人风险进行动态评估。郑州市金水区花园路片区应用评估结果表明:建立的模型模拟结果与实际热力图相对误差小于 15%;当降雨重现期大于 50 a 时,中高风险行人智能体数目显著增加,增幅达 143%;工作日因刚性出行需求导致的中高风险行人智能体数目显著高于周末,增幅为 49%;早高峰和晚高峰中高风险行人智能体数目达到峰值。

关键词:城市洪涝;多智能体模型;行人风险;人口热力图;郑州市

Dynamic assessment of pedestrian risk in urban flood based on multi-agent model//Xu Hongshi¹, Deng Yuhe¹, Wang Huiliang¹, Zhang Jinwei², Hu Wei³ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University; 2. Liaoning Provincial Department of Water Resources; 3. Shanghai Construction Group (Zhejiang) Water Conservancy and Hydropower Construction Co., Ltd.)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient characterization of pedestrian dynamic changes in urban flood risk assessment, a multi-agent model based dynamic assessment method for urban flood pedestrian risk is proposed. The initial spatial distribution of pedestrian agents is established based on population heat maps. Urban functional zones are delineated based on points of interest to serve as the base environment layer for pedestrian agent activities. A probabilistic finite state machine and velocity decay curves are combined to characterize pedestrian behavior rules under flood scenarios. A 1D-2D hydrodynamic model is coupled to establish an urban flood multi-agent-based model. Historical rainfall data and population heat maps are used to verify model reliability, and the dynamic changes in pedestrian risk under different rainfall return periods and rainfall occurrence time are assessed. The method is applied to the Huayuan Road area in Jinshui District, Zhengzhou City. The evaluation results show that the relative error between the simulated results of the established model and the actual heat map is less than 15%. When the rainfall return period exceeds 50 a, the number of medium-to-high-risk pedestrian agents increases significantly by 143%. The number of medium-to-high-risk pedestrian agents on weekdays is significantly higher than on weekends due to rigid travel demand by 49%. The number of medium-to-high-risk pedestrian agents peaks during the morning rush hour and evening rush hour.

Key words: urban flood; multi-agent model; pedestrian risk; population heat map; Zhengzhou City

近年来,全球气候变化导致极端天气事件发生频次增加,城市洪涝风险日趋严重,已成为威胁城市公共安全和居民生活的重大问题^[1-4]。根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第六次评估报告,全球变暖正在加剧极端降水事件的频率和强度。国家统计局数据显示,2020 年我国城市化率已达到 63.89%,较 2010 年提高了 13.46%^[5]。快速

城市化进程导致城市不透水面积的增加、城市产汇流方式改变,增加了城市洪涝灾害风险^[6]。

城市洪涝灾害是典型的“自然-社会”复杂系统,包括暴雨引发的产汇流、地面积水等自然过程,还涉及行人行为、交通运行等社会活动过程^[7]。洪涝积水过程的动态变化与行人、车辆等承灾体的动态响应决定了城市洪涝风险的动态转移与时空分异特

基金项目:国家自然科学基金项目(52507925);河南省杰出青年基金项目(242300421038);河南省科技攻关项目(252102321020)
作者简介:许红师(1992—),男,副教授,博士,主要从事洪涝灾害智能模拟与调控研究。E-mail:xuhongshi@zzu.edu.cn
通信作者:王慧亮(1982—),男,教授,博士,主要从事城市洪涝与水资源配置研究。E-mail:wanghuiliang@zzu.edu.cn

征。以往研究侧重于城市洪涝积水过程的精确模拟^[8-9]或耦合静态社会经济指标的城市洪涝风险评估,忽略了降雨过程中行人的动态变化,限制了城市洪涝风险评估的准确性。多智能体模型是复杂系统理论中的计算建模范式,主要通过模拟复杂系统组成要素的行为来描述或预测复杂系统的演进,其本质是由局部智能体的行为及其与其他智能体、环境之间的相互作用涌现出全局系统的复杂变化^[10]。多智能体模型采用自下而上的建模策略,具有强大的复杂网络计算能力和时空动态模拟优势,已在地震灾害^[11]、海洋灾害^[12]等领域成功应用,近年来也逐渐被运用于洪涝灾害领域^[13-15]。例如,Zhang等^[16]运用智能体模型模拟了人类活动对山洪灾害预警的响应,提出了山洪灾害应急疏散策略;杨宇涵等^[17]构建了城市暴雨洪涝灾害人群应急疏散主体模型,以河南郑州“7·20”暴雨洪涝灾害为例,分析了决策者占比和响应等级对应急疏散效率的影响。但还存在一些不足:多智能模型构建中,行人在灾害初期空间分布的刻画直接影响模型模拟的准确性,但由于行人出行的复杂性和动态变化,已有研究主要采用人口普查数据或随机模拟等简化方法处理,如Zhu等^[18]采用随机模拟的方式生成每次模拟初始时刻的行人空间分布,尽管上述简化方式提供了可行的模拟思路,但与实际还有差距。另外,多智能体模型中行为规则和参数的设置也存在不确定性,已有研究较少关注模型验证问题。随着大数据技术的快速发展,人口热力图、兴趣点数据等为以上问题的解决提供了新的途径,如Wang等^[19]基于兴趣点和移动信令数据识别了人类活动的复杂模式和动态变化。因此,综合运用大数据,挖掘智能体空间分布及行人出行规律,校正多智能体模型参数和规则,提升城市洪涝多智能体模拟准确度,开展城市洪涝风险动态演化研究是目前的发展趋势。

鉴于此,本文开展基于多智能体模型的城市洪涝行人风险动态评估研究,利用人口热力图数据刻画行人智能体初始空间分布,基于兴趣点数据划分城市功能区,构建基于Netlogo平台的城市洪涝智能体模拟模型,评估不同降雨重现期和降雨时机下城市洪涝行人风险动态变化,以期为城市洪涝风险管理提供更为精确和动态的决策支持工具。

1 评估方法

1.1 评估框架

城市洪涝行人风险动态评估框架主要由3个核心模块组成:城市洪涝模拟模型、多智能体模型、风险评估模块(图1)。城市洪涝模拟模型通过整合河

道管网数据驱动的一维水动力模型、高程数据支撑的二维地表淹没模型、子汇水区数据关联的产汇流模型,耦合形成二维城市洪涝模型;模型采用一二维动态耦合机制实现管网与地表洪涝过程的协同模拟,通过接口实时交互流量、水位数据,同步时间步长与边界条件,经率定与验证后,用于模拟历史及设计降雨场景下的城市洪涝演进过程。多智能体模型基于NetLogo平台开发,包括3个核心环节:①基于人口热力图数据提取人口空间分布特征,明确典型日(工作日/周末)人口逐时空间位置分布,完成行人智能体初始空间分布构建;②通过矢量路网划分街区地块、兴趣点分类及权重赋值、街区系数与类型比例构建,形成城市混合功能区,作为智能体活动的基础环境层;③基于行人日常行为规则、决策规则(如向低水深区域转移、积水阈值下的行为转换),结合速度衰减曲线模型(描述移动速度随水深的动态变化),构建行人行为与水动力交互规则,进而完成多智能体模型构建(含智能体空间分布、行为规则、交互规则),并实现积水水深与智能体状态的同步更新,同时完成多智能体模型率定。风险评估模块基于城市洪涝模拟与多智能体模型的耦合结果,从3个维度开展分析,包括不同重降雨现期(20、50、100、150、200 a)、典型日差异(工作日/周末)、不同时刻(6:00、9:00、12:00、15:00、18:00)。

1.2 城市洪涝模拟

采用PCSWMM(personal computer storm water management model)进行城市洪涝过程模拟,PCSWMM是基于SWMM开发的水文-水动力学模型,通过添加二维功能,能够有效模拟降雨引起的洪涝演进过程。该模型综合了水文和水力建模过程,能够模拟洪水淹没深度、流速和体积等关键参数^[20]。PCSWMM采用一二维动态耦合机制实现管网与地表洪涝过程的协同模拟,通过接口实时交互流量、水位数据,同步时间步长与边界条件,一维与二维之间的连接通过模型专属构件“孔口”实现,根据区域不同可选择“直接连接到一维检查井”和“使用底部孔口”两种连接方式,因研究区为非河网区域,因此选择“使用底部孔口”进行连接,模型检查井间设底部孔口,一维管网超水位时通过孔口溢流至二维地表。

建模过程中,选用霍顿入渗模型来模拟降雨径流入渗过程,地表径流计算采用曼宁公式。在水动力建模过程中,采用动力波法进行水动力模拟^[21]。

1.3 多智能体模型

1.3.1 模型介绍

多智能体模型是复杂系统研究中的一种自下而

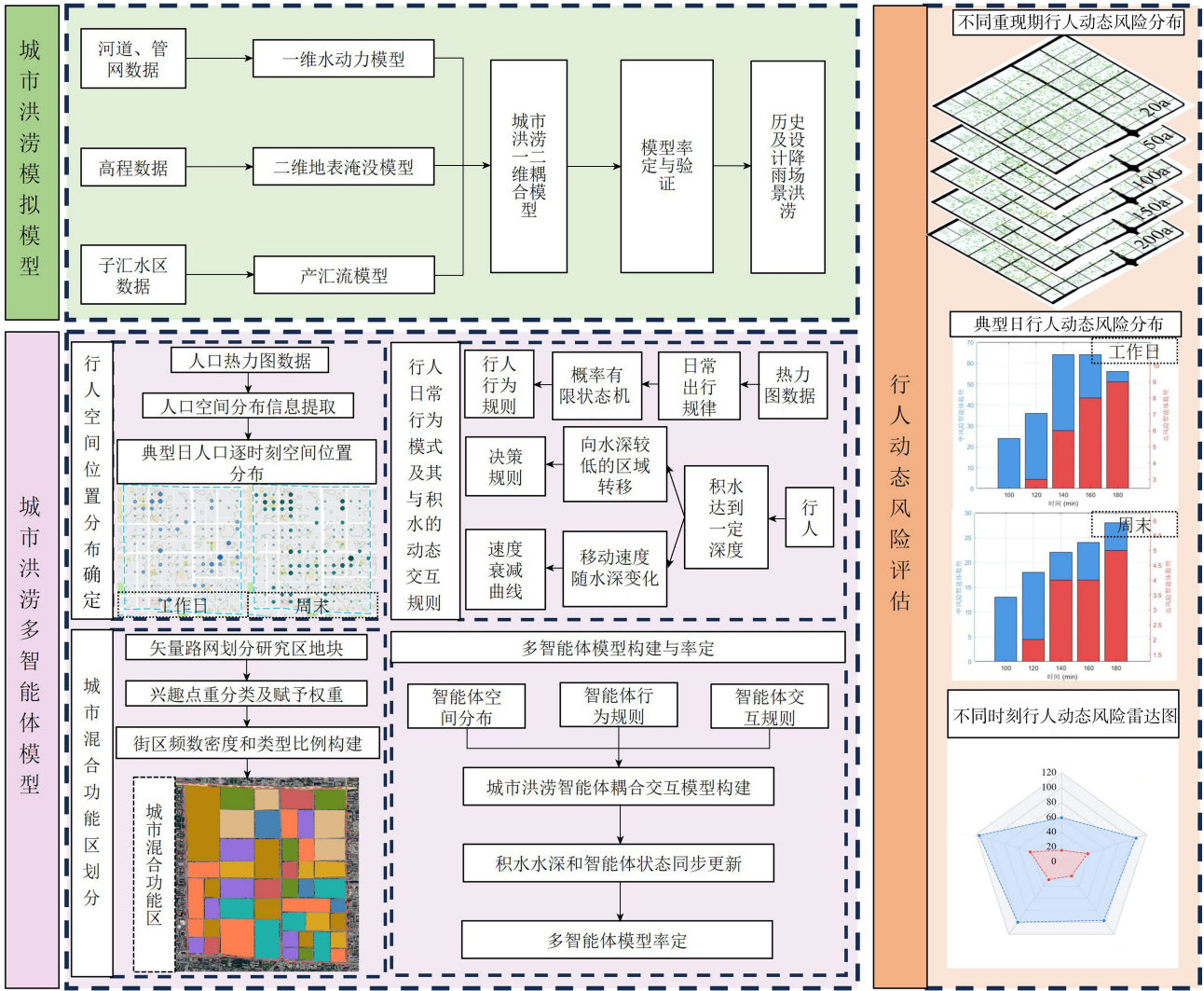


图 1 城市洪涝行人风险动态评估框架

Fig. 1 Dynamic assessment framework for pedestrian risks in urban flood

上的计算建模与仿真方法,其基本构成单元为智能体,能够感知环境、做出决策并与其他智能体交互^[22]。通过在微观层面定义智能体的行为规则和交互机制,系统会在宏观层面涌现出新的整体性质,这种自组织特征使其特别适合模拟具有非线性动力学特性的复杂系统^[23-24]。多智能体模型能够有效刻画个体的异质性特征,描述局部交互作用产生的涌现效应,并反映系统演化过程中的动态性和非线性特征。城市洪涝风险是一个复杂巨系统,各要素之间相互作用的空间尺度和时间尺度不统一,且要素行为无法用统一的数学公式或模型形式化。城市洪涝风险由积水淹没的动态变化和承灾体的动态响应决定,其动态评估的关键在于积水过程和承灾体的动态交互模拟,符合多智能体模型的建模逻辑与动态仿真优势。

1.3.2 智能体空间分布

1.3.2.1 行人空间位置

利用百度慧眼人口热力图数据获取研究区的人

口时空分布特征^[25]。热力图数据基于百度地图定位 SDK 的终端位置数据统计生成,采用坐标系统 bdmc09 对研究区进行网格划分。如图 2 所示,每个网格由蓝色经线和横向虚线围成的矩形区域构成,在每个网格内,通过统计逐小时的终端定位数据量,获得该网格的热力值。质心点作为该网格数据提取和分析的依据。

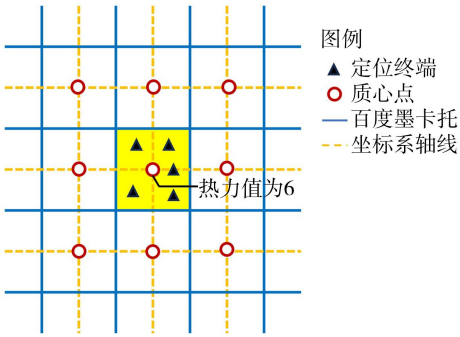


图 2 热力图提取原理

Fig. 2 Principle of heat map extraction

1.3.2.2 城市功能区划分

为刻画行人智能体在城市中移动的起点、终点等活动特征,提出基于兴趣点数据的城市功能区划分方法,将划分结果作为多智能体模型的环境层,为智能体提供活动场所属性信息。兴趣点数据可将真实地理实体抽象为含位置信息和属性类型的点数据,直观地描述区域功能属性。但原始数据存在“一物多类”和“一物多点”的问题,为避免功能属性重复统计,参考《城市用地分类与规划建设用地标准》及研究区特点,将其重分为住宅类、商务办公类、生活服务类、休闲娱乐类、绿地广场类、公共服务类6类;同时,考虑到兴趣点数据仅表征位置,忽略了占地规模和公众使用程度,池娇等^[26]引入影响系数量化不同类型兴趣点的重要性,将原始兴趣点数据与对应的影响系数相乘,即可得到修正后的兴趣点数据。本文中各类兴趣点数据的影响系数设定为:生活服务类中,购物服务为70,餐饮服务为50,住宿服务为45,停车场为40,加油站及汽车服务为10;公共服务类中,科研教育为65,医疗服务为55,公安交警与政府机关均为40,金融服务为35,居委会为30;在休闲娱乐类中,大型购物广场为60,一般休闲娱乐为45;此外,绿地与广场(风景名胜)为75,商务办公(大厦)为30,住宅(居民小区)为25。采用街区频数密度(B_{FD})和街区类型比例(B_{CR})表征功能区特性,计算公式见式(1)、式(2)。街区频数密度反映某类兴趣点在街区内的集聚程度, $B_{FD} \geq 0.5$ 表示该街区表现为单一功能属性;街区类型比例反映不同类型兴趣点的相对比例,当所有类型 B_{FD} 值均小于0.5且存在多个非0值时,根据街区类型比例最大的3类兴趣点确定混合功能区类型。

$$B_{FDi} = n_i / N_i \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \quad (1)$$

$$B_{CRi} = B_{FDi} / \sum_{i=1}^m B_{FDi} \quad (i = 1, 2, \cdots, m) \quad (2)$$

式中: n_i 为该街区内第*i*种类的兴趣点的数量; N_i 为第*i*种类类型的兴趣点的总数; m 为兴趣点种类数。

1.3.2.3 动态环境模拟

本文采用城市洪涝模型模拟的淹没水深数据构建多智能体模型的动态环境层。考虑到研究区的实际情况以及模型模拟的效率,以每20 min为时间节点导出洪涝模型模拟的水深结果,作为多智能体模型的淹没环境输入,实时更新,以实现多智能体模型内积水深度的动态变化。

1.3.3 智能体行为规则设计

1.3.3.1 日常行为模式

采用概率有限状态机来设定行人日常出行的行为规则。有限状态机由状态、转移及转移条件组成。

通过设置行人的主要活动状态代表行人在特定时间和空间位置上的活动类型。状态之间的转移则由时间、位置等因素共同决定,例如,位于住宅区的行人在早晨有较大概率转移到工作状态,在傍晚则更可能转向购物或回家状态。这种基于概率的状态转移机制可以较好地模拟城市居民的日常活动规律。

基于概率有限状态机的核心逻辑,为精准模拟研究区行人的日常活动规律,首先提取百度慧眼人口热力图数据,得到研究区的2023年3月27日(周一)至2023年4月2日(星期日)的人口空间分布数据。基于对中国城市居民出行行为的调查和出行特征的分析,以及研究区所承担的城市功能类型,参考蔡俊逸^[27]的研究,将个体的日常行为主要划分为工作/学习、购物/休闲、社交以及回家等几类活动。据此构建刻画行人活动规则的概率有限状态机模型,考虑时间、位置等因素,模拟行人在不同城市功能区之间的转移。图3为行人智能体典型日活动规则(图中*P*为智能体从一个地点前往另一个地点的概率),模型区分工作日和周末两种模式,通过设定不同的转移概率来反映行人在不同时段的活动偏好实现对城市居民日常活动规律的模拟。

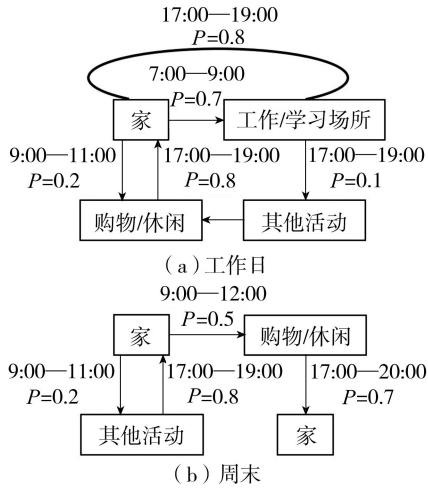


图3 行人智能体典型日活动规则

Fig. 3 Typical daily activity rules of pedestrian agents

1.3.3.2 与积水交互作用规则

行人与积水的交互作用规则是指当行人遇到积水时,其避险决策和行进速度如何刻画。以往有较多研究分析了行人在积水中的稳定性以及积水水深对行进速度的影响^[28],基于此,本文在设置行人智能体与水深的交互规则中引入速度衰减曲线,建立水深与行人速度之间的关系。同时,当积水水深达到一定的阈值时,智能体会启动避险规则^[29]。通过感知周围环境状况做出避险决策,如就近避险、返回原地、向水深较低区域移动等避险行为。

确定水深阈值应以行人安全性为核心,参考夏

军强等^[28]对城市洪涝中人体失稳机理的研究和卢兴超等^[30]的城市洪涝风险评估成果,结合水动力学分析划分洪涝风险等级:积水深度 $H\leq 0.15\text{ m}$ 时,行人步态基本不受影响,判定为低风险; $0.15\text{ m}<H\leq 0.5\text{ m}$ 时,行人步频降低且存在滑倒、重心失衡风险,判定为中风险; $H>0.5\text{ m}$ 时,行人下肢受力超过稳定临界值,易发生跌倒或被水流冲击,判定为高风险。

智能体通过实时感知当前位置及周边 8 个相邻区域的积水水深数据,结合上述阈值触发分层避险决策:积水深度处于低风险区间时,智能体维持原有日常行为模式,移动速度按正常步行速度执行,不启动额外避险程序;积水深度处于中风险区间时,智能体通过比对周边区域水深值,优先选择水深最低的路径继续移动;积水水深处于高风险区间时,智能体终止原有出行计划,比较周围相邻区域的水深,选择水深最小的区域作为下一个移动方向。若没有比当前更浅的方向,则会保持原地不动。

城市洪涝发生时,积水会通过“水阻力”及“失稳风险”双重作用降低行人移动能力,为了避免模型中行人速度与洪涝环境脱节的问题,通过量化积水深度对移动能力的影响,参考 Lee 等^[31]通过物理试验得出的不同积水深度对行人步行速度影响的结果,引入速度衰减曲线(图 4),作为城市洪涝造成的积水水深对行人步行速度的影响依据,实现积水深度与行人步行速度间的交互。

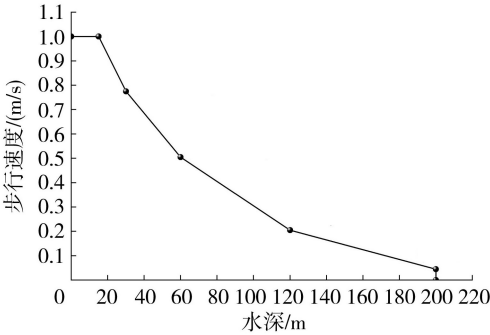


图 4 速度衰减曲线
Fig. 4 Velocity decay curve

2 实例应用

2.1 研究区概况

以郑州市金水区的花园路片区为研究区进行应用,研究区位于郑州市中心城区东部,地理位置为 $34.78^{\circ}\text{N}\sim 34.81^{\circ}\text{N}$ 、 $113.68^{\circ}\text{E}\sim 113.72^{\circ}\text{E}$,总面积约 9.83 km^2 ,如图 5 所示。研究区北至科学大道,南至农业路,西至东风路,东至东风东路,是郑州市重要的商业和居住区域之一。郑州市属暖温带季风气候,年平均气温 14.3°C ,年平均降水量 640.9 mm ,降

水主要集中在 6—9 月。根据数位观察数据统计,研究区常住人口高达 21 万人,呈现高密度人口分布和频繁人口流动的特征。研究区内建筑类型主要包括住宅区和办公楼,其中住宅区主要分布在中部和东部,办公楼集中在西部和南部,属于典型的城市功能复合格局。

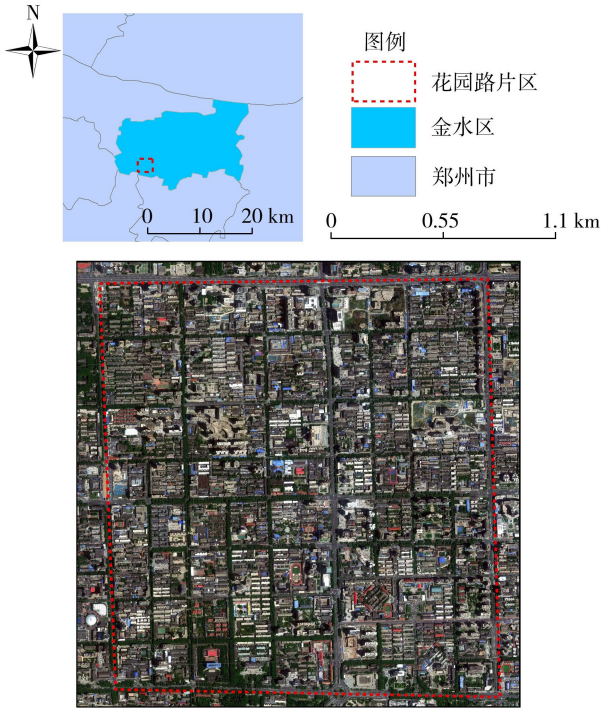


图 5 研究区位置
Fig. 5 Location of study area

2.2 数据来源

研究数据主要包括城市洪涝模拟和多智能体模型构建所需的致灾因子、孕灾环境、承灾体等数据。致灾因子的历史降雨数据由郑州气象局提供;孕灾环境中 5 m 分辨率 DEM 基于 InSAR 遥感处理获取,河道断面、排水管网、 5 m 分辨率建筑物及路网数据均源自郑州市城管局;承灾体所用 2023 年人口热力图、兴趣点数据分别取自百度慧眼与百度地图。

2.3 评估结果与分析

2.3.1 典型降雨重现期下研究区洪涝过程模拟

考虑到城市洪涝模拟模型排水系统的完整性,利用 Xue 等^[32]所构建的金水区一二维耦合洪涝模型进行洪涝过程模拟,该模型已经过率定与验证,结果可靠。采用郑州市自然资源与规划局在 2023 年修正的暴雨强度公式,得到降雨重现期分别为 20、50、100、150、200 a 的设计暴雨过程,如图 6 所示(图中 T 为降雨历时)。以降雨重现期为 50 a 的设计暴雨为例,利用上述城市洪涝模拟模型对研究区进行洪涝模拟,得到研究区不同时刻洪涝风险等级分布,如图 7 所示。

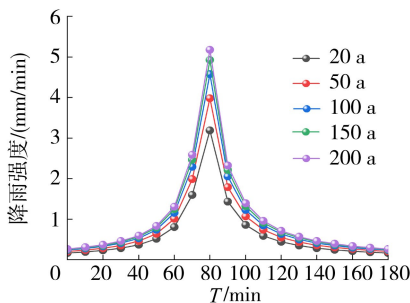


图 6 不同重现期下设计暴雨过程

Fig. 6 Designing rainstorm processes under different return periods

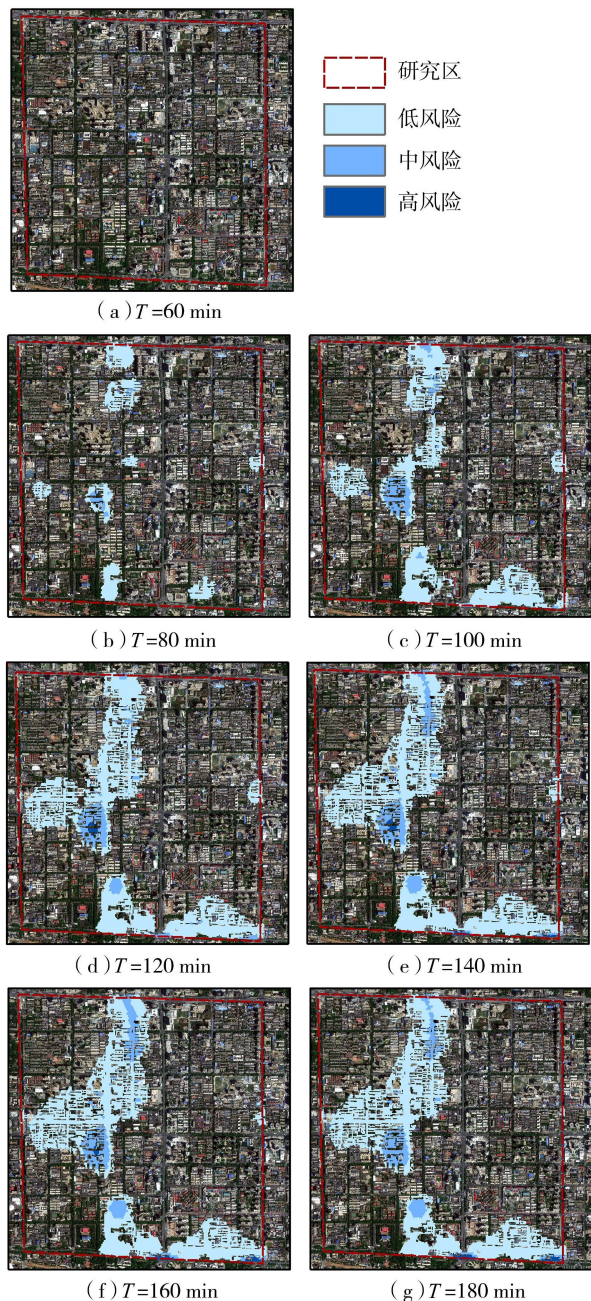


图 7 研究区不同时刻洪涝风险等级分布

Fig. 7 Distribution of waterlogging risk at different moments in study area

2.3.2 城市洪涝多智能体模型模拟

2.3.2.1 基于兴趣点的城市功能区划分

基于街区频数密度 (B_{FD}) 和街区类型比例 (B_{CR}) 的计算结果,当街区被判定为混合功能区时,其功能属性由街区频数密度最大的 3 类兴趣点的类别决定。为简化混合功能区的命名,仅考虑这 3 类兴趣点的组合而不考虑其排序,选取这 3 个兴趣点类别的“首字”组合进行命名。例如,若某街区 B_{FD} 值最大的 3 类依次为休闲娱乐类、公共服务类、绿地与广场类,则记为“休公绿”,与“公休绿”“绿休公”表示相同的功能组合。这种命名方法避免了因排序不同而产生的重复类型,使功能区分类更加简洁。图 8 为研究区城市功能区划分结果。

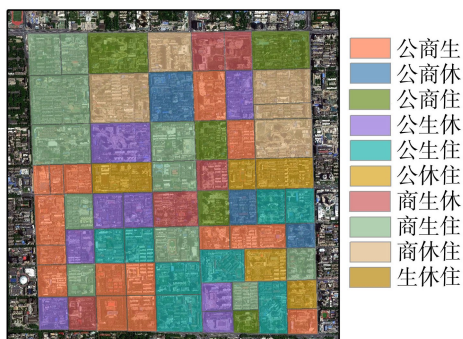


图 8 研究区城市功能区划分结果

Fig. 8 Division results of urban functional zones in study area

2.3.2.2 模型耦合与率定

采用松散耦合框架实现城市洪涝模型与多智能体模型的动态交互。考虑到洪涝过程的连续性和人群行为响应特征,设定统一的模拟时间步长为 20 min。将 PCSWMM 模拟获取的动态城市淹没数据导入到 NetLogo 平台中,用于驱动多智能体模型与孕灾环境的实时交互。

选取 2024 年 7 月 22 日的真实降雨事件对模型进行率定。将该降雨事件发生前 (16:00) 的人口热力图数据导入 NetLogo 模型作为初始行人智能体空间分布,为兼顾模型运行效率与模拟精度,按 1 : 100 比例生成行人智能体,数量为 2178,对应现实中约 21.78 万人常住人口。运用多智能体模型模拟降雨过程中行人的动态变化 (17:00—20:00)。将多智能体模型所模拟的不同风险等级的人数与基于实际热力图的逐时刻人数进行比较,结果表明,低、中、高风险等级的人数平均误差为 14.75%,在可接受的范围内,可见所构建的多智能体模型满足城市洪涝行人风险动态分析的要求^[33]。

2.3.3 不同降雨重现期下城市洪涝行人风险评估

以典型工作日的人口热力图数据作为行人智能

体初始空间位置分布的依据,随着降雨重现期的增加,处于中、高风险的行人智能体数量呈现出明显的增加趋势。在降雨重现期为 20~50 a 的区间,中高风险行人智能体数量的增长相对平缓,从 48 增加至 65,增幅约为 35%;而在降雨重现期为 50~100 a 的区间,中高风险智能体数量从 65 显著上升至 158,增幅达到 143%。这一数据变化表明,当降雨重现期超过 50 a 时,由于地面积水逐渐突破各类人群的安全阈值,研究区的行人暴露风险呈现出明显的非线性突增特征。

2.3.4 降雨发生时机对行人洪涝风险的影响

2.3.4.1 降雨发生在不同典型日

以降雨重现期为 50 a 的设计暴雨、降雨开始时间为早上 6 时为例,通过改变多智能体模型中行人日常行为模式,分析降雨发生在工作日和周末时行人风险的动态差异。图 9 和图 10 分别为工作日和周末不同降雨历时的模拟结果。表 1 为工作日和周末不同降雨历时行人智能体风险等级占比。经过对比分析发现,相同降雨强度和降雨历时的条件下,工作日的中高风险行人占比显著高于周末,增幅约为 49%。这种差异在降雨历时 140 min(对应现实时间为 8:20)时表现最为明显,工作日中高风险行人占比为 3.22%,而周末仅为 1.19%,差距达到 1.7 倍。

由图 9 可见,在工作日情景下,随着降雨历时的增加,中高风险行人智能体数量明显上升。在降雨历时为 100 min 时,几乎所有行人智能体均处于低风险等级;到降雨历时为 140 min 时,中风险行人智

能体占比上升至 2.94%,高风险行人占比达到 0.28%;降雨历时为 180 min 时,中高风险行人智能体占比分别为 2.57%、0.41%,总占比为 2.98%。从空间分布上看,中高风险行人主要集中在商务办公区和公共服务区,这与工作日上班人群的出行目的地密切相关。

由图 10 可见,在周末情景下,同样时段内中高风险行人智能体的数量明显少于工作日。在降雨历时为 100 min 时,所有行人智能体同样处于低风险状态;到降雨历时为 140 min 时,中风险行人智能体占比仅为 1.01%,高风险行人智能体占比为 0.18%;降雨历时为 180 min 时,中高风险行人智能体占比分别为 1.29%、0.23%,总占比为 1.52%。从空间分布上看,周末的中高风险行人主要集中在休闲娱乐区和生活服务区,这与周末居民休闲购物的活动偏好相符。

形成这种差异的主要原因在于工作日与周末的出行行为模式存在根本性差异。首先,工作日出行具有较强的刚性需求,即使在降雨条件下,上班族仍需按时到达工作地点,难以灵活调整出行计划;而周末出行多为弹性需求,居民可根据天气状况自主决定是否外出或调整出行时间。其次,工作日出行呈现明显的高峰集中性,导致大量人群同时暴露于风险环境中;而周末出行时间分布较为均匀,避免了人群的集中暴露。最后,由于工作日出行目的地主要为商务办公区和公共服务区,这些区域往往位于城市中心,道路网密集但排水能力有限,更易形成积水

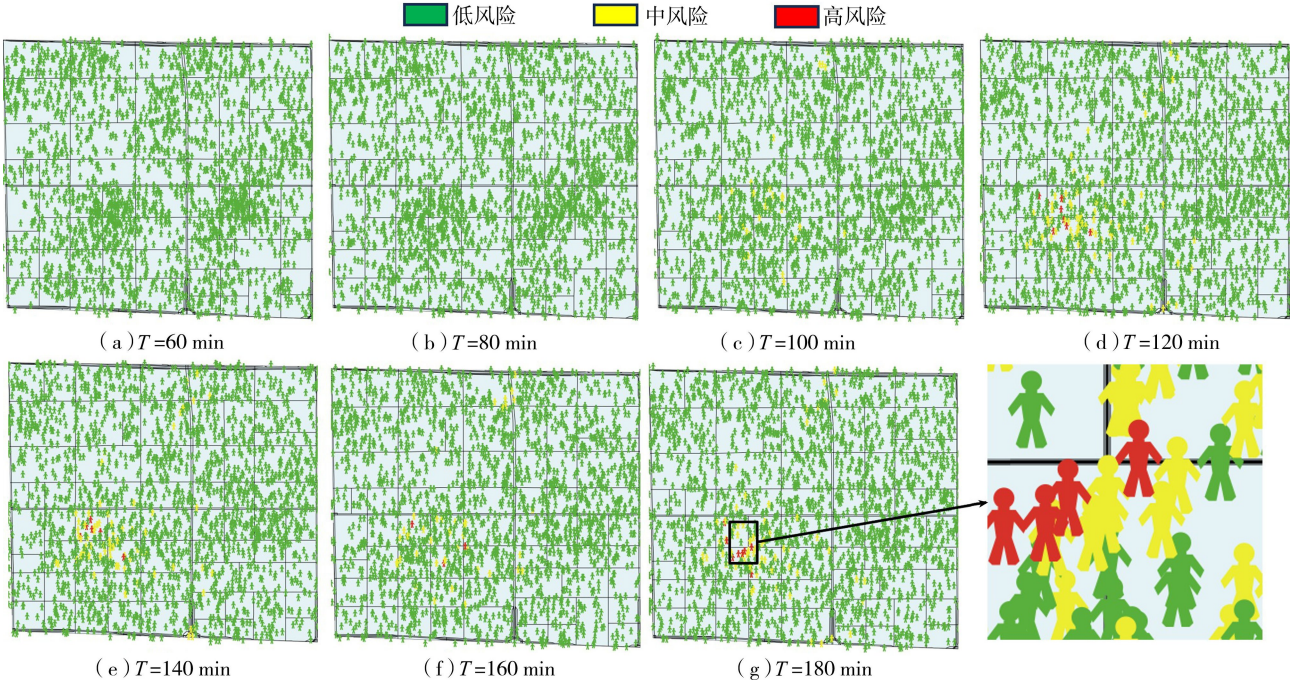


图 9 工作日不同降雨历时行人智能体风险模拟结果

Fig. 9 Simulation results of pedestrian agent risk at different rainfall duration on weekdays

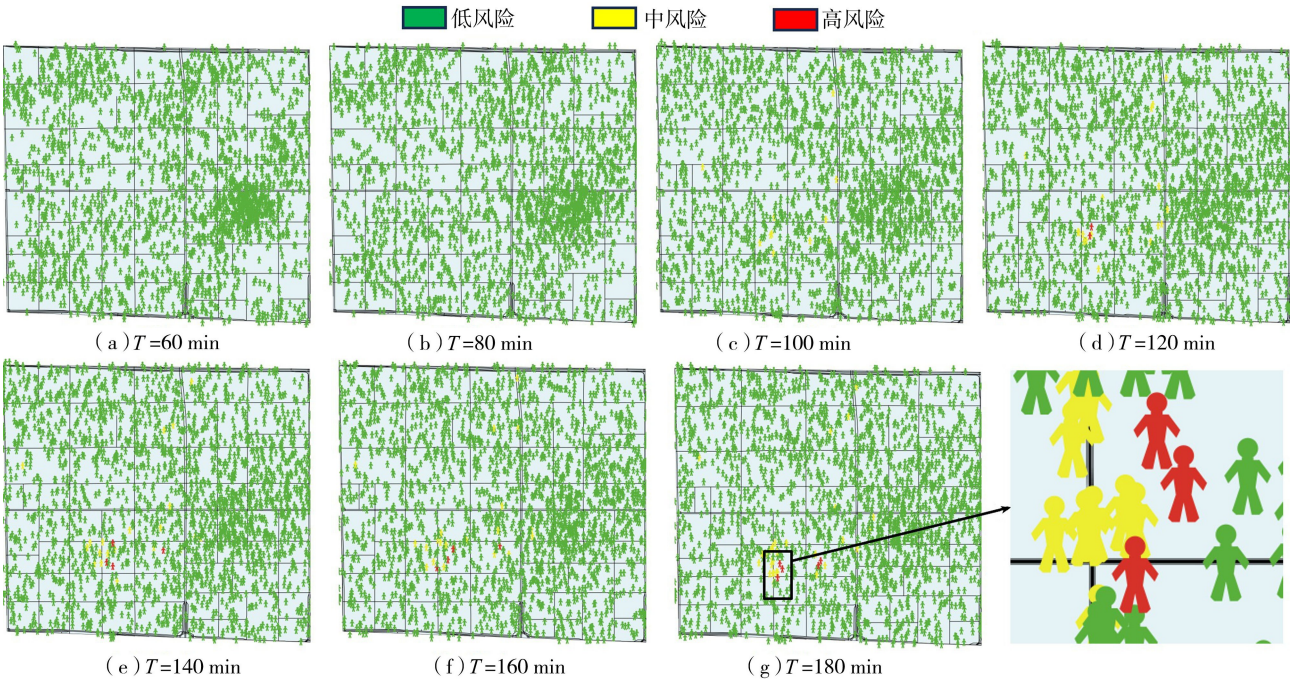


图 10 周末不同降雨历时行人智能体风险模拟结果

Fig. 10 Simulation results of pedestrian agent risk at different rainfall duration on weekends

表 1 工作日和周末不同降雨历时行人智能体的风险等级占比

Table 1 Proportion of risk levels for pedestrian agents at different rainfall duration on weekdays and weekends

T/min	低风险占比/%		中风险占比/%		高风险占比/%	
	工作日	周末	工作日	周末	工作日	周末
100	100.00	100.00	0	0	0	0
120	98.21	99.08	1.65	0.83	0.14	0.09
140	96.79	98.81	2.94	1.01	0.28	0.18
160	96.69	98.71	2.94	1.10	0.37	0.18
180	97.02	98.48	2.57	1.29	0.41	0.23

区域;而周末主要前往的休闲娱乐区通常具有更多的开放空间,有利于分散洪涝风险。

2.3.4.2 降雨发生在不同时刻

城市居民日内活动具有明显时间规律,不同时刻人口流动特征差异明显,直接影响降雨时居民风险水平。以降雨重现期为 50 a 的设计降雨为背景,设定降雨分别发生于工作日 3:00、6:00、9:00、12:00、15:00 5 个时刻,分析工作日 6:00、9:00、12:00、15:00、18:00 5 个时刻的行人智能体的风险差异,得到不同时刻行人智能体洪涝风险模拟结果,如图 11 所示。由图 11 可见,在同一场降雨条件下,居民日常活动规律是风险差异的核心成因,降雨分别发生于 6:00、15:00 时,早晚高峰(9:00、18:00)为风险集中时段。早高峰中高风险行人智能体达最大数量为 144(中风险 108、高风险 36),为上班人流与积水叠加所致;晚高峰 18:00 出现次高峰,中高风险行人智能体数量为 160(中风险 115、高风险 45)。12:00—15:00(降雨分别发生于 9:00、12:00)时段

积水深度稳定,但因人口流动强度较低,中高风险行人智能体维持在较低水平(中风险数量 95~98、高风险数量 25~27)。

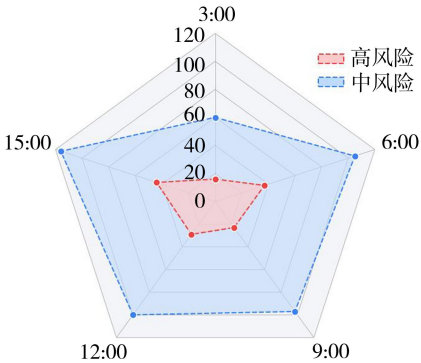


图 11 降雨发生在不同时刻行人智能体数量中高风险分布雷达图

Fig. 11 Radar map of middle high-risk distribution of pedestrian agent number with rainfall occurrence at different moments

降雨在 15:00 发生时所产生的行人风险最高,主要由于 18:00 正值晚高峰,此时大量上班人群下班通勤,导致户外活动人口达到日内高峰,大量人群同时暴露于已形成积水的环境中。降雨在 6:00 发生时的行人风险次之,主要由于 9:00 是工作人群通勤早高峰时段,上班人群集中出行导致风险人群占比增加。相比之下,降雨在 3:00 发生时行人风险最低,主要由于 6:00 时大部分城市居民还处于休息阶段,仍处于室内环境,减少了风险暴露。

不同降雨发生时刻行人智能体中高风险等级占

比如表 2 所示。由表 2 可见,在相同降雨条件下,居民日常活动行为会对行人风险的变化产生很大影响。同样强度的降雨,如果其产生显著积水的时段与城市人口流动高峰重合,将导致更高比例的行人面临风险。特别发生在下午的降雨,产生全天最高的行人风险暴露。

表 2 降雨发生在不同时刻行人智能体中高风险等级占比
Table 2 Proportion of middle high-risk levels in pedestrian agents with rainfall occurrence at different moments

降雨发生时刻	中风险占比/%	高风险占比/%
3:00	2.75	0.55
6:00	4.96	1.65
9:00	4.36	1.14
12:00	4.50	1.24
15:00	5.28	2.07

3 结 论

a. 基于人口热力图和兴趣点数据分别刻画了行人智能体空间分布及城市功能区,结合速度衰减曲线和概率有限状态机确定行人行为规则,构建了城市洪涝多智能体模型。应用于郑州市金水区花园路片区,利用 2024 年 7 月 22 日的实际降雨事件对模型进行了率定,模型模拟的行人风险结果与实际热力图数据的相对误差小于 15%,验证了模型在研究区城市洪涝行人风险动态评估中的可靠性。

b. 利用构建的模型评估了不同降雨重现期下研究区行人的洪涝风险。当降雨重现期从 20a 增加至 50 a 时,中高风险行人智能体数量增长相对平缓(增幅 35%);当降雨重现期从 50 a 增加至 100 a 时,中高风险行人智能体数量急剧上升(增幅 143%),表明研究区在遭遇降雨重现期超过 50a 暴雨时行人风险显著跃升。

c. 量化了降雨发生时机对行人洪涝风险的影响。由于刚性出行需求,工作日中高风险行人智能体相较于周末增加 49%。早晚高峰期(9:00、18:00)是中高风险行人智能体出现最多的时刻,数量分别为 144、160;而在中午和夜间时段,中高风险行人智能体数量维持在较低水平(80~100)。

参考文献:

[1] 徐宗学,陈浩,任梅芳. 变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J]. 水资源保护,2025,41(5):33-40. (Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (5) : 33-40. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 段亭亭,李鹏峰,邱顺添,等. 基于多源数据的城市洪涝灾害应对能力评估与提升[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),(2025-02-05). <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250205.1506.020>. (Duan Tingting, Li Pengfeng, Qiu Shuntian, et al. Assessment and enhancement of urban flood and waterlogging disaster response capabilities based on multi-source data [J/OL]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), (2025-02-05). <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250205.1506.020>. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 张可云,戴美卉,王洋志. 中国城市型政区调整与城市化的适应性分析[J]. 地理学报,2023,78(12):3129-3143. (Zhang Keyun, Dai Meihui, Wang Yangzhi. Adjustment of city-type administrative region and its adaptability to urbanization in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78 (12) : 3129-3143. (in Chinese))

[6] 许红师. 沿海城市多维致灾洪涝风险分析与灾防决策模型研究[D]. 天津:天津大学,2018.

[7] 王晓哲,陈韬,李俊奇,等. 城市洪涝中人员疏散过程特征及其模拟研究进展[J]. 水利水电技术(中英文),2025,56(2):15-29. (Wang Xiaozhe, Chen Tao, Li Junqi, et al. Research progress on characteristics and simulation of personnel evacuation process in urban floods [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56 (2) : 15-29. (in Chinese))

[8] 侯精明,王俊辉,同玉,等. 基于非均匀网格的高效高精度洪涝过程模拟[J]. 工程科学与技术,2021,53(4):53-62. (Hou Jingming, Wang Junhui, Tong Yu, et al. High-efficient and high-precision flood process simulation based on the non-uniform grid [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53 (4) : 53-62. (in Chinese))

[9] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护,2022,38(5):58-64. (Li Guoyi, Liu Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5) : 58-64. (in Chinese))

- [10] Wu Zening, Xue Wanjie, Xu Hongshi, et al. Urban flood risk assessment in Zhengzhou, China, based on a D-number-improved analytic hierarchy process and a self-organizing map algorithm [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 (19): 4777.
- [11] Hori M, Wijerathne M L L, Ichimurs T, et al. On multi agent simulation for estimation of human action against earthquake disasters [J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2013, 7(2): 1350008.
- [12] Rasoulkhani K, Mostafavi A, Reyes M P, et al. Resilience planning in hazards-humans-infrastructure nexus: a multi-agent simulation for exploratory assessment of coastal water supply infrastructure adaptation to sea-level rise [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2020, 125: 104636.
- [13] Du Erhu, Cai Ximing, Sun Zhiyong, et al. Exploring the role of social media and individual behaviors in flood evacuation processes: an agent-based modeling approach [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53 (11): 9164-9180.
- [14] 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))
- [15] Matsuki A, Hatayama M. Identification of issues in disaster response to flooding, focusing on the time continuity between residents' evacuation and rescue activities [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 95: 103841.
- [16] 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.
- [17] 杨宇涵, 殷杰, 王丹丹, 等. 基于 ABM 的城市暴雨洪涝灾害应急疏散仿真研究: 以河南郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害为例 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 2023, 53 (2): 267-276. (Yang Yuhan, Yin Jie, Wang Dandan, et al. ABM-based emergency evacuation modelling during urban pluvial floods: a “7.20” pluvial flood event study in Zhengzhou, Henan Province [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2023, 53(2): 267-276. (in Chinese))
- [18] Zhu Xuehong, Dai Qiang, Han Dawei, et al. Modeling the high-resolution dynamic exposure to flooding in a city region [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23 (8): 3353-3372
- [19] Wang Ting, Wang Huimin, Wang Zhiqiang, et al. Dynamic risk assessment of urban flood disasters based on functional area division: a case study in Shenzhen, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118787.
- [20] Guan Xinjian, Yu Fengjiao, Xu Hongshi, et al. Flood risk assessment of urban metro system using random forest algorithm and triangular fuzzy number based analytical hierarchy process approach [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 109: 105546.
- [21] 王飞, 尹占娥, 温家洪, 等. 基于多智能体的自然灾害动态风险评估模型 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25 (2): 85-88. (Wang Fei, Yin Zhane, Wen Jiahong, et al. Assessing model for dynamic risk of natural disasters based on multi-agent system [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(2): 85-88. (in Chinese))
- [22] 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))
- [23] 李文波, 郭啸天, 毛雪岷, 等. 基于多智能体的暴雨洪涝人口风险动态评估 [J]. *灾害学*, 2015, 30 (3): 80-87. (Li Wenbo, Guo Xiaotian, Mao Xuemin, et al. The dynamic population risk assessment model for rainstorm-flood utilization multi-agent [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(3): 80-87. (in Chinese))
- [24] 张海林. 基于百度热力图的人口活动数量提取与规划应用 [J]. *城市交通*, 2021, 19 (3): 103-111. (Zhang Hailin. Extracting active population data based on Baidu heat maps for transportation planning applications [J]. *Urban Transport of China*, 2021, 19 (3): 103-111. (in Chinese))
- [25] De Marchi Scott, Page Scott E. Agent-based models [J]. *Annual Review of Political Science*, 2014, 17(1): 1-20.
- [26] 池娇, 焦利民, 董婷, 等. 基于 POI 数据的城市功能区定量识别及其可视化 [J]. *测绘地理信息*, 2016, 41 (2): 68-73. (Chi Jiao, Jiao Limin, Dong Ting, et al. Quantitative identification and visualization of urban functional area based on POI data [J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41 (2): 68-73. (in Chinese))
- [27] 蔡俊逸. 基于多智能体的城市洪涝灾害脆弱性计算: 以丽水市莲都区为例 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [28] 夏军强, 董柏良, 周美蓉, 等. 城市洪涝中人体失稳机理与判别标准研究进展 [J]. *水科学进展*, 2022, 33 (1): 153-163. (Xia Junqiang, Dong Boliang, Zhou Meirong, et al. Review on instability mechanisms and criteria of human body in floodwaters [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(1): 153-163. (in Chinese))

(下转第 149 页)

studies[J]. Weather and Climate Extremes, 2016, 14: 1-16.

[9] Zou Qiang, Liao Li, Ding Yi, et al. Flood classification based on a fuzzy clustering iteration model with combined weight and an immune grey wolf optimizer algorithm[J]. Water. 2019, 11(1): 80.

[10] 甘甜,郑英,蒋云钟,等. 基于 DBSCAN-RF 洪水分类的洪水预报应用研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55 (3): 77-89. (Gan Tian, Zheng Ying, Jiang Yunzhong, et al. Application research on flood classification-prediction based on DBSCAN-RF[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(3): 77-89. (in Chinese))

[11] Huang Minmin, Wang Ying, Jin Shuanggen, et al. Spatial-temporal variations and severity of the 2020 catastrophic floods in the Yangtze River Basin from Sentinel-1 SAR data[J]. Water, 2024, 16(23): 3445.

[12] 丁启,杨汉波,卢韦伟,等. 长江上游支流区域洪水频率分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53 (11): 50-59. (Ding Qi, Yang Hanbo, Lu Weiwei, et al. Regional flood frequency analysis in tributaries of the upper reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 (11): 50-59. (in Chinese))

[13] 赵圆元,张行南,黄钰凯,等. 基于动态权重的水文时间序列相似性分析方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39 (2): 9-12. (Zhao Yuanyuan, Zhang Xingnan, Huang

Yukai, et al. Similarity analysis method of hydrological time series based on dynamic weight[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(2): 9-12. (in Chinese))

[14] Zhang Yongyong, Zhang Yongqiang, Zhai Xiaoyan, et al. Predicting flood event class using a novel class membership function and hydrological modeling [J] Earth's Future, 2024, 12(6): e2023EF004081.

[15] Jia Benjun, Zhou Jianzhong, Zhang Yongchuan, et al. System dynamics model for the coevolution of coupled water supply-power generation-environment systems: Upper Yangtze River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125892.

[16] 张为,李昕,翟少军,等. 三峡水库次洪期间降雨特征对洪水过程的影响[J]. 水利学报, 2025, 56(5): 576-586. (Zhang Wei, Li Xin, Zhai Shaojun, et al. Influence of rainfall characteristics on the flooding process during flood events in the Three Gorges Reservoir [J]. Shuili Xuebao, 2025, 56(5): 576-586. (in Chinese))

[17] Sam'an M, Farikhin, Munsarif M. An improved decision tree model through hyperparameter optimization using a modified gray wolf optimization for diabetes classification [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2026, 29(8): 1843-1859.

[18] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The elements of statistical learning[M]. New York: Springer, 2001.

(收稿日期: 2025 - 10 - 27 编辑: 王芳)

(上接第 138 页)

[29] 高玉琴,王辰,谢梦瑶,等. 洪涝灾害人口生命损失风险动态评估[J]. 水资源保护, 2025, 41 (5): 79-88. (Gao Yuqin, Wang Chen, Xie Mengyao, et al. Dynamic assessment of population life loss risk due to flood disasters[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (5): 79-88. (in Chinese))

[30] 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 and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 36-47. (in Chinese))

[31] Lee H K, Hong W H, Lee Y H. Experimental study on the influence of water depth on the evacuation speed of elderly people in flood conditions [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 39: 101198.

[32] Xue Wanjie, Wu Zening, Xu Hongshi, et al. A framework for amplification flood risk assessment and threshold determination of combined rainfall and river level in an inland city[J]. Journal of Hydrology, 2024, 640: 131725.

[33] 薛万杰. 城市暴雨-外河水位联合致涝规律及阈值研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2023.

(收稿日期: 2025 - 10 - 04 编辑: 王芳)

