

基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估

卢兴超^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 李永坤^{2,3}, 胡小红^{2,3}

(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. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 围绕城市洪涝灾害过程中对人口动态风险评估的需求, 在城市水文水动力模型基础上, 提出了基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估方法, 分别设置孕灾环境智能体、致灾因子智能体、承灾体智能体的运行规则, 并给出多智能体之间的通信机制, 以实现城市洪涝灾害过程人口动态风险定量评估。以北京市海淀区清河流域某典型排水分区为例, 利用 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型, 模拟 50 年一遇设计降雨情景下的洪涝灾害过程, 并基于 NetLogo 模型构建城市洪涝灾害承灾体动态风险评估模型对研究区中的人口动态风险进行了评估。结果表明: 50 年一遇设计降雨情景下, 研究区洪涝风险面积从降雨历时 $T=4\text{ h}$ 的 0.608 km^2 增加到 $T=30\text{ h}$ 的 2.202 km^2 ; 常规模拟情景下, 研究区低风险人口数持续下降、高风险人口数持续上升, 最终低风险人口数稳定占比为 75.75%, 高风险人口数稳定占比为 22.85%; 在设置救援避险策略后, 研究区低风险人口数先下降后升高, 在 $T=4.5\text{ h}$ 时, 最低人口数占比为 92.30%, 而高风险人口数先升高后降低, 最高人口数占比为 7.07%, 最终低风险人口数稳定占比为 100%。

关键词: 多智能体模型; 城市洪涝灾害; 人口动态风险; 避险策略; 水文水动力模型

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)04-0036-12

Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models// LU Xingchao^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, LI Yongkun^{2,3}, HU Xiaohong^{2,3} (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. Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the demand for population dynamic risk assessment during urban flood and waterlogging disasters, a multi-agent model based dynamic risk assessment method for urban flood and waterlogging disasters was proposed on the basis of urban hydrologic-hydrodynamic models. The operation rules of disaster-producing environment agent, disaster-causing agent and disaster-bearing agent were set, respectively, and the communication mechanism among multiple agents was proposed to achieve the quantitative assessment of population dynamic risk during urban flooding and waterlogging disaster. A typical drainage area of the Qinghe River Basin in Haidian District of Beijing City was selected as an example, SWMM and LISFLOOD-FP models were used to simulate the flood disaster process under the scenario of design rainfall with the return period of 50 a, and based on NetLogo model, the risk assessment model of urban flood and waterlogging disaster victims was developed to assess the population dynamic risk in the study area. The results showed that under the scenario of design storm with the return period of 50 a, the flood and waterlogging risk area in the study area increased from 0.608 km^2 with a rainfall duration of $T=4\text{ h}$ to 2.202 km^2 with $T=30\text{ h}$. Under conventional simulation scenarios, the low-risk population in the study area continues to decline while the high-risk population continues to rise. Ultimately, the stable proportion of low-risk population is 75.75%, while the stable proportion of high-risk population is 22.85%. With the implementation of the risk avoidance strategy, the number of low-risk population in the study area first decreased and then increased, with the smallest number of 92.30% at $T=4.5\text{ h}$ while the number of high-risk population first increased and then decreased, with the highest number of 7.07%, and finally the stable number of low-risk population was 100%.

Key words: multi-agent model; urban flooding and waterlogging disaster; population dynamic risk; risk avoidance

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52239003)

作者简介: 卢兴超 (1989—), 男, 博士研究生, 主要从事城市洪涝灾害防治研究。E-mail: xclu@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 徐宗学 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

我国是全球自然灾害频发的国家之一,其中因极端暴雨事件造成的城市内涝、山洪、泥石流等灾害事件已成为我国防灾减灾的重点对象。在全球气候变化和城市化的共同影响下,暴雨造成了城市内涝灾害的频发^[1],据不完全统计,2000 年以后我国 70% 城市发生过严重内涝,直接经济损失均达到千亿元^[2]。极端暴雨易造成洪涝灾害持续时间长、影响范围广、承灾体损失大,如北京“7·21”暴雨^[3]、武汉“7·6”暴雨^[4]、郑州“7·20”暴雨^[5]以及北京“23·7”极端暴雨事件^[6],这些灾害事件不仅给人民的生命财产带来威胁,也给城市管理部门的防灾减灾工作带来新的挑战。

城市洪涝灾害是灾害因子对承灾体的耦合作用过程,形成的灾害链具有关联性、复杂性的特点^[7],在遭遇城市洪涝灾害时,承灾体的脆弱性是其暴露性、敏感性与适应能力的综合表征^[8]。道路受淹、人员伤亡和财产损失已成为城市洪涝灾害风险评估的重要对象^[9],随着人工智能技术的发展和学科交叉融合研究的需要,一些学者借助多智能体模型研究承灾体动态风险变化特征并制定避险策略,如 Takahashi 等^[10-12]利用多智能体模型分析洪涝对人的影响风险,并设计灾害救援方案;Jenkins 等^[13-15]利用多智能体模型为政府部门制定洪涝救援方案、紧急应对措施、保险补偿措施提供支撑;朱净萱等^[16-17]提出了基于多智能体模型的洪涝灾害动态脆弱性计算模型、洪涝灾害风险动态评估模型,实现了多智能体模型与灾害模型的耦合。

本文基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估方法,通过构建多智能体模型对承灾体风险进行动态评估,以期暴雨洪涝灾害承灾体的避险转移策略和应急救援方案的制定提供参考。

1 城市洪涝灾害承灾体受灾分析

1.1 城市洪涝灾害致灾机理

从全球降雨时空演变来看,全球变暖造成蒸散发增大,水分增多,从而产生更强烈的降水事件^[18]。全球每升温 1°,降雨强度至少增加 6%~7%,进而直接造成洪水风险的增加^[19]。全球 9 个降雨区域中有 4 个区域的降水量呈现增加趋势^[20],气候变化已经造成区域强降雨事件的频率和降雨量级呈现增加态势^[21]。降雨作为城市洪涝灾害的致灾因子,其强度、历时、总量以及分布情况直接影响灾害分布和损失程度^[22]。我国城镇化以每年 1% 的速度推进^[23],城市不透水地表面积增加,湖泊低洼地被填

埋,自然排水通道阻断,河道断面收窄,导致城市水文问题突显^[24-25]。雨水下渗能力降低,城市蓄排能力下降,河道行洪能力减弱,导致“热岛效应”和“雨岛效应”突显,造成城市暴雨洪涝灾害更容易发生^[26-27]。由于城市洪涝致灾过程具有转化、蔓延、衍生和耦合的特点^[28],导致灾害风险呈现连锁性、突变性、传递性的特征^[29]。

1.2 承灾体受灾分析

城市洪涝灾害承灾体受灾程度由其危险性、暴露性和脆弱性共同作用^[30-31]。在发生洪涝灾害过程中,一般很难通过人工现场监测方式获取承灾体的响应行为和受灾程度,无法真实有效评估承灾体的受灾等级。目前部分学者通过物理试验揭示承灾体受灾过程,如 Abt 等^[32-33]基于水槽试验,研究了不同下垫面材料、能见度、行走方向以及街道纵坡下洪水中人体的失稳条件和稳定性;Zhu 等^[34-35]采用不同物理人体模型和不同建筑布局方式,研究了人体受灾失稳阈值;Gou 等^[36]利用熵模型模拟汽车从浅水到深水的稳定性和脆弱性。虽然这些研究从微观尺度揭示了承灾体的受灾机制,但无法从宏观尺度为量化评估城市洪涝灾害承灾体受损程度提供支撑。

1.3 承灾体风险评估

不同学者对灾害风险内涵理解具有差异性,一般将风险归纳为 3 类:致灾因子概率、承灾体损失、灾害系统的组成要素特征^[37],其中承灾体损失评估分为定性评估和定量评估。由于城市洪涝灾害承灾体脆弱性的指标种类多、数据获取难度大、缺乏可指导的取值范围,导致定性评估可操作性差,在实际工作中难度较高。定量评估方法通常采用模型模拟法,包括承灾体多情景模拟和承灾体动态响应模拟,其中前者是基于城市洪涝模型模拟得到的淹没分布^[38],通过叠加承灾体分布,分析不同承灾体的受灾范围、数量和等级^[39];后者以人、建筑物、车辆为研究对象,将多智能体模型与洪涝模型进行松散耦合,模拟承灾体在致灾因子和孕灾环境条件下的动态变化特征,评估承灾体的脆弱性程度^[40-41],并结合预警指令、减灾措施、避险策略等进行动态化调控。

2 多智能体模型构建与参数设置

2.1 构建思路

多智能体是由一系列智能体通过相互间合作、竞争、通信等方式构建形成的复杂庞大系统^[42]。NetLogo 模型是多智能体仿真模型的一种,最早由

Uri Wilensky 在 1999 年提出,之后由美国西北大学互联网学习与计算机建模中心进行升级^[43],该模型适合对随时间演化的复杂系统进行建模分析,在多智能体建模中广泛使用。利用 NetLogo 模型构建基于多智能体的城市洪涝灾害动态风险评估模型,由于城市暴雨洪涝灾害是致灾因子、孕灾环境、承灾体三者共同作用的结果,分别建立城市洪涝灾害致灾因子智能体、孕灾环境智能体、承灾体智能体。致灾因子智能体作为驱动条件由降雨持续时间、降雨强度、降水量与场地环境相互作用形成;孕灾环境智能体作为环境条件由研究区边界、地形高程、建筑物与道路分布等元素组成;承灾体智能体作为受灾主体,包括人、车以及其他基础设施,本文只选择“人”进行研究,如图 1 所示。承灾体智能体在孕灾环境智能体中,受到致灾因子智能体的驱动作用产生响应行为,这个过程是 3 种智能体之间的关联过程。在承灾体产生响应行为的过程中,承灾体根据孕灾环境和致灾因子的变化情况进行实时响应变化,从而对承灾体智能体风险进行定性跟踪和定量评估,为后续制定洪涝灾害避险策略提供依据。

2.2 运行规则设定

a. 孕灾环境智能体。不同孕灾环境的 Patch 也称为“嵌块”或“瓦块”,又或单元格点,其差异性较大主要体现在信息属性、传输方式、通信方式等方面。将孕灾环境 Patch 设定为背景条件,作为承灾

体运动的静置约束条件,其中数字高程经地理信息科学(geographic information science, GIS)技术处理后,以栅格格式文件加载到 NetLogo 模型中,本文选取数字高程空间分辨率为 5 m×5 m 的高精度栅格数据作为研究区孕灾环境条件之一。道路数据和建筑物数据经 GIS 技术提取和处理后,以 shp 格式文件加载到 NetLogo 模型中,为了区分道路和建筑物的类别,方便在 NetLogo 模型中读取显示,分别在二者的 shp 文件属性表格中将属性名称列“name”以“D”和“J”字母为开头进行命名。建筑物风险灾害等级根据历史内涝风险调研情况和内涝风险图淹没情况进行评估获取,划为低风险、中风险、中高风险、高风险,并将建筑物 shp 文件的属性名称对应命名为 JDX、JZX、JZGX、JGX,以便 NetLogo 模型读取与识别。研究区范围经 GIS 技术提取和处理后得到 shp 格式文件,将文件属性表格中名称列“name”以“B”字母进行命名,并加载到 NetLogo 模型中。

b. 致灾因子智能体。城市洪涝淹没范围、淹没时间、淹没深度直接决定着承灾体的风险等级。构建城市水文水动力耦合模型,经参数率定和验证,在高降雨重现期设计情景下模拟得到城市洪涝风险过程。按照城市洪涝风险评估中基于淹没水深和时间的阈值法,将城市洪涝风险划分为 4 个等级:低风险、中风险、中高风险、高风险,在 GIS 中将属性表格的 4 种风险等级名称分别命名为 HR1、HR2、HR3、

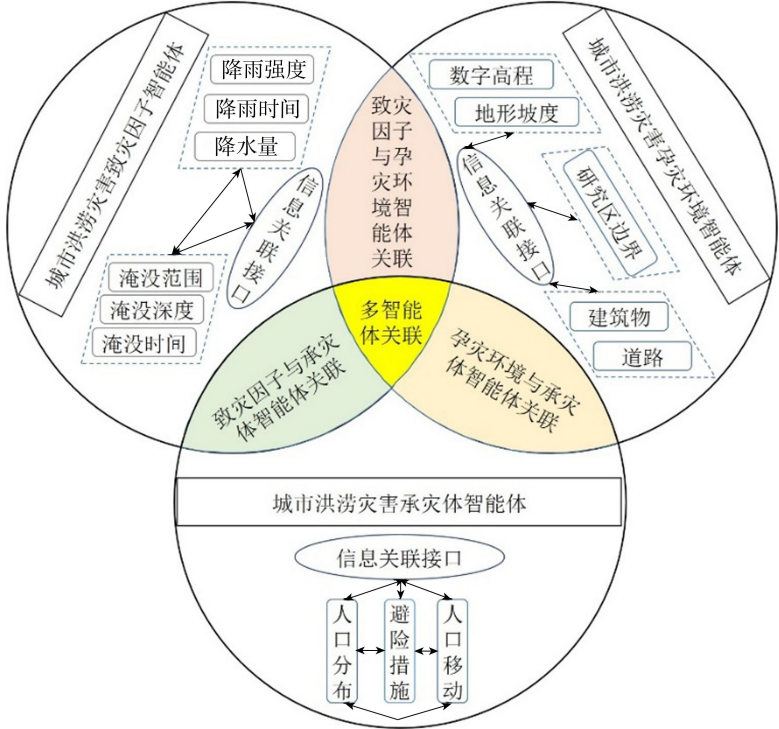


图 1 基于多智能体模型的城市洪涝灾害承灾体风险评估模型

Fig.1 Risk assessment model for urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent model

HR4。参照孕灾环境智能体设定规则,将城市洪涝风险作为 Patch 值,以栅格格式文件加载到 NetLogo 模型中,作为承灾体运动的动态响应条件,实现水文水动力模型与多智能体模型的耦合。

c. 承灾体智能体。在 NetLogo 模型中人口 Turtle 称为“海龟”或“智能体”,又或响应单元。人口智能体在 NetLogo 模型中根据致灾因子 Patch 条件在孕灾环境 Patch 中移动。人口智能体移动受到洪涝灾害风险等级的影响,在不考虑外界救援措施的情况下,根据灾害风险等级进行自我识别和判断,执行随机移动规则。具体规则设置为:①将人口智能体在洪涝风险的 4 个等级对应设置为低风险、中风险、中高风险、高风险,分别用绿色、黄色、橙色、红色表示;②当人口智能体判断自身处于低风险时,则保持随机运动状态;③当人口智能体处于或运动至中风险区域时,可判断安全位置,向低风险区域移动;④当人口智能体处于或运动至中高风险区域时,无法有效判断安全位置,则随机向中风险或高风险区域移动;⑤当人口智能体处于或运动至高风险区域时,已处于危险状态,则面临死亡保持不动。

2.3 通信机制

在 NetLogo 模型中孕灾环境 Patch 作为人口智能体的约束环境,致灾因子 Patch 作为人口智能体的响应条件,与此同时,孕灾环境中建筑物风险等级 Patch 受到致灾因子 Patch 的影响而改变。通过承灾体智能体、孕灾环境智能体、致灾因子智能体三者之间的识别关系和反馈机制,实现智能体之间的协作运行,进而评估不同洪涝风险下人口智能体的动态风险。例如:洪涝灾害风险 Patch 按照周期 Δt 更新一次,人口智能体在运移过程中受到所处的室外洪涝灾害风险 Patch 和室内建筑物灾害风险 Patch

的影响时作出反应,人口智能体根据洪涝风险等级信息进行响应和移动,这个过程即为多智能体之间信息的收集、响应和反馈过程,从而反映洪涝灾害的人口动态风险变化情况。

3 实例应用

3.1 研究区概况与数据准备

研究区位于北京市海淀区清河流域某典型排水分区,面积为 5.82 km²,如图 2 所示。研究区属于高密度建成区,涵盖城镇住宅用地、商业用地、公用设施与公用建筑用地、工况仓储用地等类型,地面高程为-1~50 m,坡度为 0~9°,整体地形为西北高东南低,多年平均降水量 660 mm,降雨主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 64%,具有大陆性季风气候特征。

研究数据包括基础地理信息数据、社会人口数据、历史易涝点数据。其中,基础地理信息数据中下垫面类型数据、5 m×5 m 精度的数字高程数据来自北京市规划局;道路分布(城市主干道)、建筑物分布、地下雨水管渠系统、管道液位和流量监测等数据由北京市水科学技术研究院提供;实测降雨数据来源于北京市水文总站;历史易涝点数据包括易涝点位置、最大淹水深度、最大淹水范围等数据来自研究人员现场调研和北京市水务局发布的《北京城市积水内涝风险地图》。

3.2 城市洪涝模型构建与模拟

暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)属于完全开源软件,可对城市地表水文、管网和河道一维水文水动力过程进行模拟,具有运行稳定、操作方便快捷的优势。LISFLOOD-FP 属于半开源软件,可对河道一维泛洪过程和地表二维

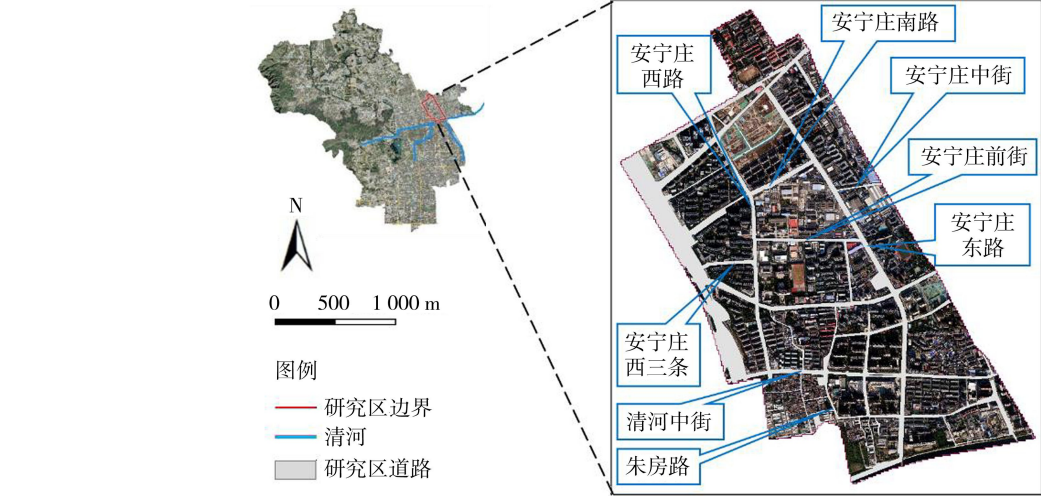


图 2 研究区位置及道路
Fig. 2 Location and roads of study area

漫流过程进行仿真模拟。将 SWMM 得到的节点溢流数据作为 LISFLOOD-FP 模型输入条件,可以实现二者之间相互耦合。由于研究区排水系统简单,附属构筑物较少,没有复杂的运行调度规则,选择 SWMM 与 LISFLOOD-FP 模型可快速建模,经参数率定与验证后,获得城市洪涝水文水动力耦合模型^[44]。根据 DB11/T 969—2016《城市雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》,研究区属于 II 区,为计算研究区洪涝汇流过程,选择以北京市水文手册设计暴雨图集确定的 50 年一遇 24 h 设计降雨情景,作为研究区暴雨洪涝设计暴雨雨型,如图 3 所示。

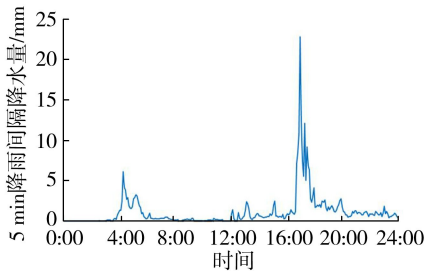


图3 研究区 50 年一遇 24 h 设计暴雨过程线

Fig.3 24 h design rainstorm hydrograph with 50 year return period in study area

通过设计降雨的雨型可以看出,降雨历时 $T=3\text{ h}$ 之后开始有较大降水量,从 $T=4\text{ h}$ 开始出现地面

积水,以 $\Delta t=2\text{ h}$ 作为模拟结果输出时间间隔,考虑到场地最远雨水路径汇流时间约 6 h ,分别得到 $4、6、\cdots、30\text{ h}$,共 14 个洪涝淹没过程,该过程利用二维地表漫流模型进行快速模拟评估与分析。利用基于淹没水深和时间阈值法划分城市洪涝灾害风险等级,其中低风险区为积水深度 $H\leq 0.15\text{ m}$,危险程度为一般积水;中风险区为 $0.15\text{ m}<H\leq 0.5\text{ m}$ 、积水时间大于 15 min ,危险程度为行走困难;中高风险区为积水深度大于 $0.5\text{ m}<H\leq 1.0\text{ m}$ 、积水时间大于 30 min ,危险程度为生命受到威胁;高风险区为 $H>1.0\text{ m}$,危险程度为造成人员伤亡,按照此标准将洪涝淹没过程转化为洪涝风险分布^[45-46],为 NetLogo 模型提供致灾因子,如图 4 所示。在 50 年一遇 24 h 设计降雨条件下,随着降雨时间持续,研究区中的低风险区、中风险区、中高风险区、高风险区面积均显著增大,内涝风险区总面积从 $T=4\text{ h}$ 的 0.608 km^2 增加到 $T=30\text{ h}$ 的 2.202 km^2 。

3.3 洪涝灾害风险评估

3.3.1 风险评估

根据 2022 年《北京统计年鉴》,东城区的人口密度为 $16\,914\text{ 人}/\text{km}^2$,西城区的人口密度为 $20\,848\text{ 人}/\text{km}^2$,海淀区的人口密度为 $7\,267\text{ 人}/\text{km}^2$ 。考虑研究区为高密度建成区,结合西城区和东城区

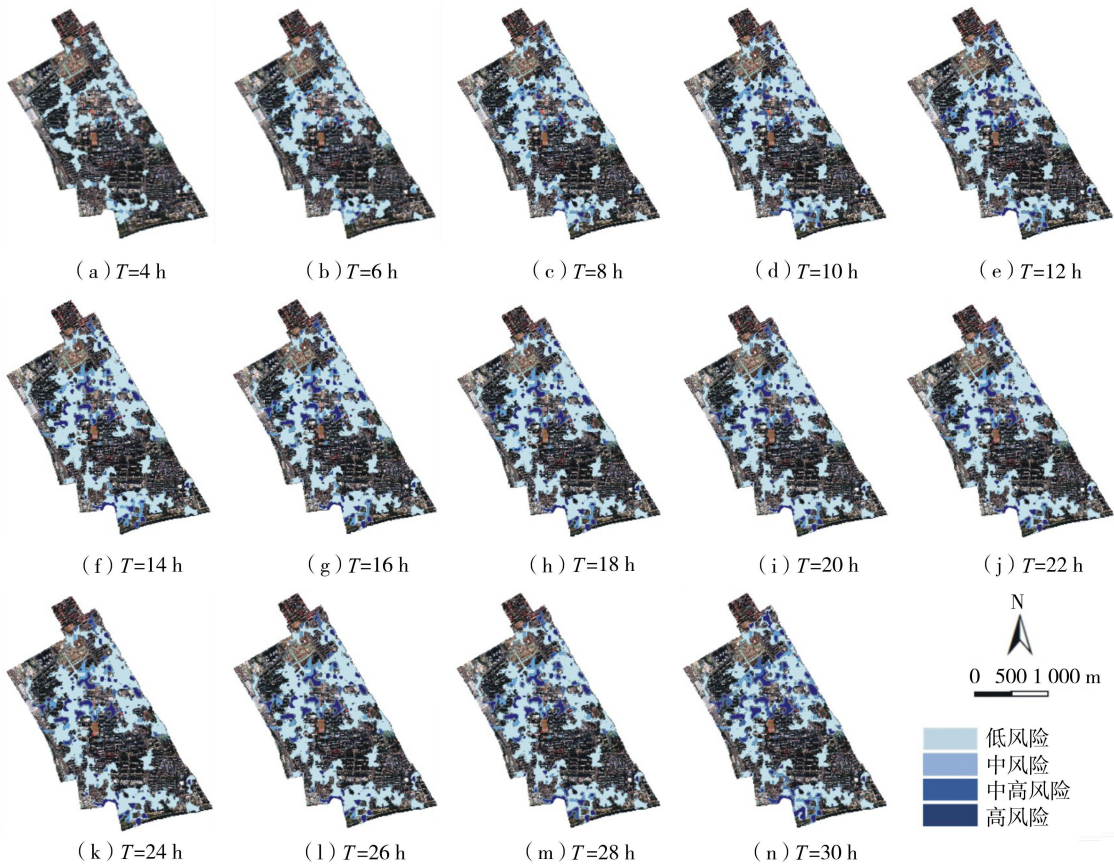


图4 研究区洪涝风险分布

Fig.4 Flooding/waterlogging risk distribution in study area

的人口密度情况,确定研究区常住人口数约为7.92万人。将研究区边界、道路、建筑、数字高程等作为孕灾环境智能体导入 NetLogo 模型中,为多智能体模型提供边界条件;将城市洪涝灾害风险评估结果作为孕灾环境智能体导入 NetLogo 模型中,并以 $\Delta t=2\text{ h}$ 的间隔时间进行更新,作为多智能体模型的驱动要素;按照1:100比例将实际人口数量概化为792个人口智能体,即1个人口智能体代表100人,导入 NetLogo 模型中,作为多智能体模型提供运行主体,从而构建出基于多智能体的城市洪涝灾害动态风险评估模型。

相关研究表明,在城市暴雨内涝发生时75%的人员选择在安全区域避难,25%的人员将不采取避难措施^[47-48]。在常规情景下,人员移动设置为随机运行,根据城市洪涝风险分布与等级进行自我避险自救,基于此情景开展人口受灾风险动态模拟分析,结果见图5。由图5可见,当人员处于中风险区时,由于自我避险意识,会向低风险区域移动;当处于中高风险时,一部分人员移动至中风险区,进一步转移至低风险区,另一部分人员移动至高风险区域,处于危险状态。当 $T=8\text{ h}$ 时,低风险、中风险、中高风险、高风险人口智能体数分别为709、8、5、70,其中高风险人口智能体主要集中在安宁庄前街与安宁庄东路交叉口处、安宁庄西三条、安宁庄西路以及安宁庄南

路等位置,如图6所示。随着降雨历时增加,低风险人口智能体数稳定在600(实际人数约6万人),高风险人口智能体数稳定在181个(实际人数约1.81万人),如图7所示。当降雨结束时, $T=24\text{ h}$,低风险人口智能体数为606,占总人数的76.52%,而高风险人口智能体数为173,占总人数的21.84%;当汇流时间结束时, $T=30\text{ h}$,低风险人口智能体数为600,占总人数的75.75%,而高风险人口智能体数为181,占总人数的22.85%,如表1所示。上述研究表明,50年一遇降雨情景下,研究区中有76%左右的人有自我避险意识,23%左右的人自我避险意识缺乏,与现有研究结果的基本符合。

3.3.2 多智能体受灾救援避险策略

人口智能体受灾救援避险策略根据其所处位置的安全等级给予相应的指令,分为室外位置和室内位置两种情况,人员处于室外时,运移过程根据室外洪涝风险进行判断。当处于低风险时,人员可以随机移动;当处于中高风险或高风险时,人员就地等待救援。当处于中风险时,首先判断周边是否存在建筑物,若周边没有建筑物,人员转移至室外低风险区,若周边存在建筑物,且建筑物为中高风险或高风险,则人员不进建筑物,此时人员也转移至室外低风险区;人员进入建筑物时,判断建筑物是否为低风险,若是,则人员在建筑物内保持不变,若不是,则服

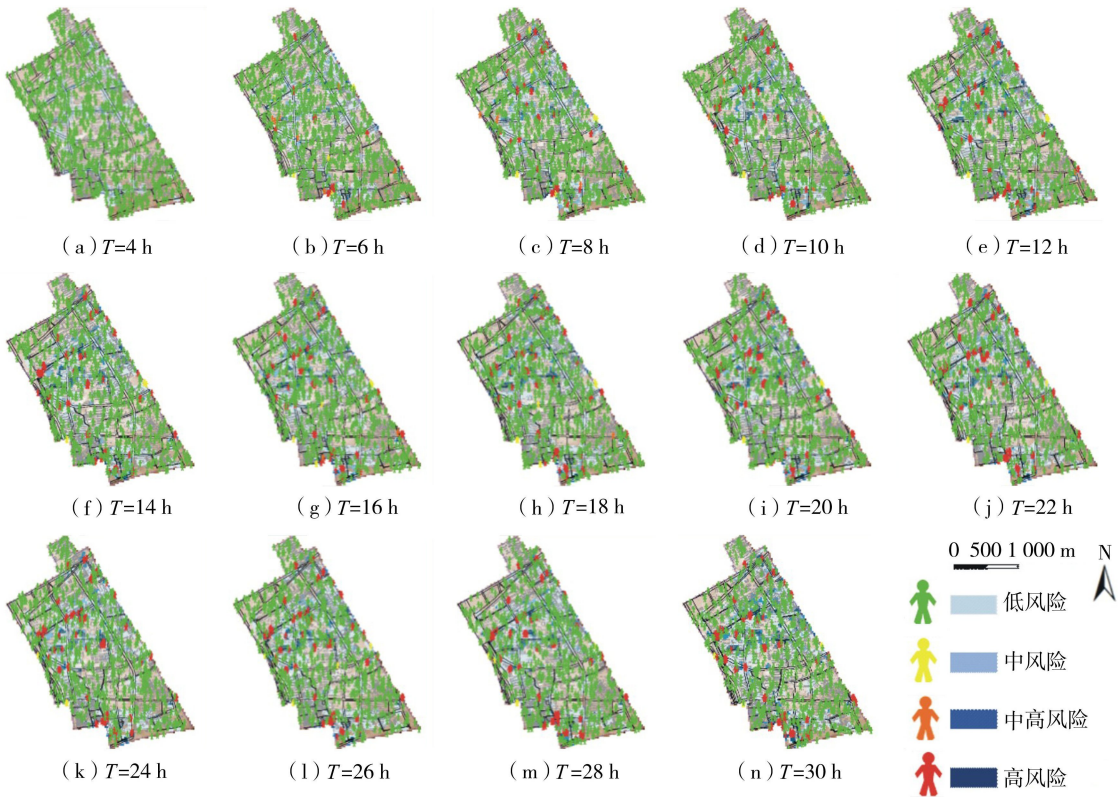


图5 人口智能体灾害风险动态模拟结果

Fig. 5 Dynamic simulation results for population agents disaster risk

从已决策群体。当人员处于室内,建筑物为低风险时,人员在建筑物内等待救援;当建筑物为中风险时,人员随机运动;当建筑物为高风险或高风险时,人员服从已决策群体(图8)。通过给人员避险

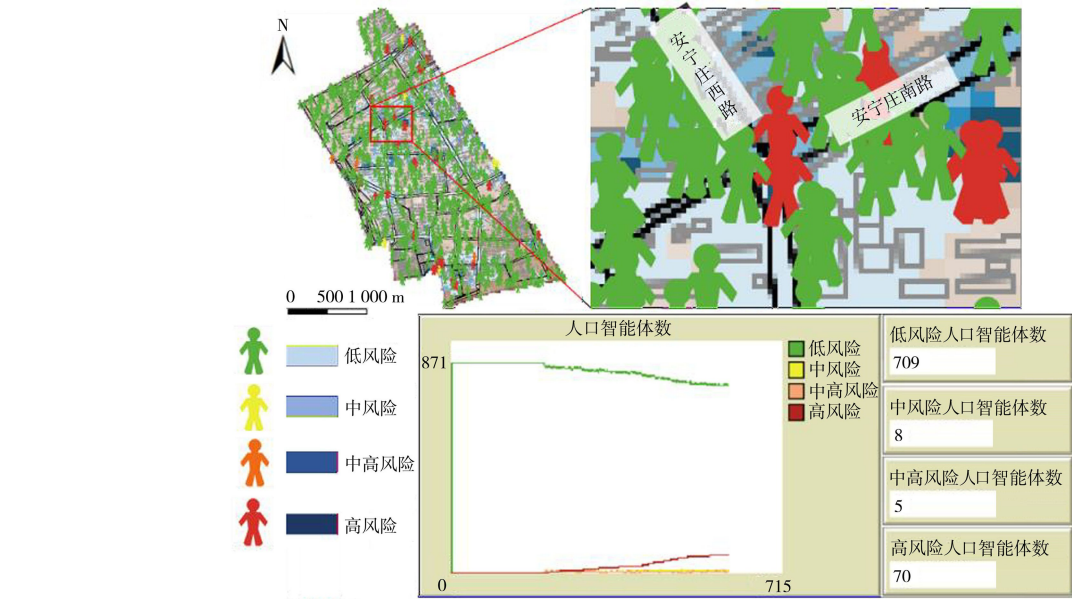


图 6 $T=8\text{ h}$ 时受灾人口智能体风险分析
Fig. 6 Risk analysis of affected population agents at $T=8\text{ h}$

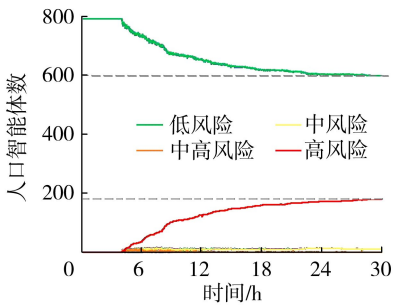


图 7 不同风险区人口智能体数随时间变化
Fig. 7 Population agents in different risk zones with time

表 1 人口智能体数不同风险占比

Table 1 Different risk ratios of population agents				
T/h	低风险 占比/%	中风险 占比/%	中高风险 占比/%	高风险 占比/%
4	100	0.00	0.00	0.00
8	89.52	1.01	0.63	8.84
12	82.58	1.52	0.00	15.90
16	79.29	1.39	0.25	19.07
20	78.03	1.26	0.00	20.71
24	76.52	1.64	0.00	21.84
28	76.01	1.52	0.00	22.47
30	75.75	1.40	0.00	22.85

指令,保证人员在室外和室内遇到暴雨灾害时能够进行有效的避险自救。

3.3.3 救援避险策略下多智能体洪涝风险评估

在多智能体模型基础上输入人员避险策略指令,对人员在 50 年一遇设计降雨情景下的洪涝灾害风险进行模拟,结果如图 9 所示。由图 9 可见, $T\leq 4\text{ h}$ 时,研究区属于低风险区,人员均处于低风险状

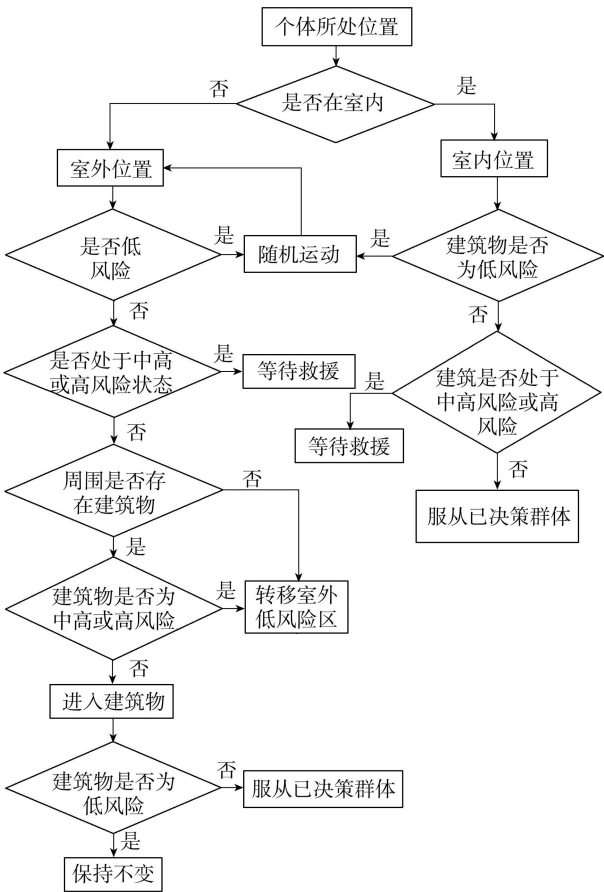


图 8 人口智能体避险策略
Fig. 8 Risk avoidance strategies for population agents
态,随着降雨历时持续到 $T=6\text{ h}$ 时,受室外中高风险区、高风险区以及室内中高风险、高风险建筑物的影响,在避险策略指令作用下,高风险区人员得到救援

后被安置在低风险区。当人员从室外风险区移动到低风险建筑物内时,人员变为低风险且原地保持不

变;当人员从室外中风险区移动到中风险建筑物内时,人员状态随相邻已决策群体的变化而变化,最后

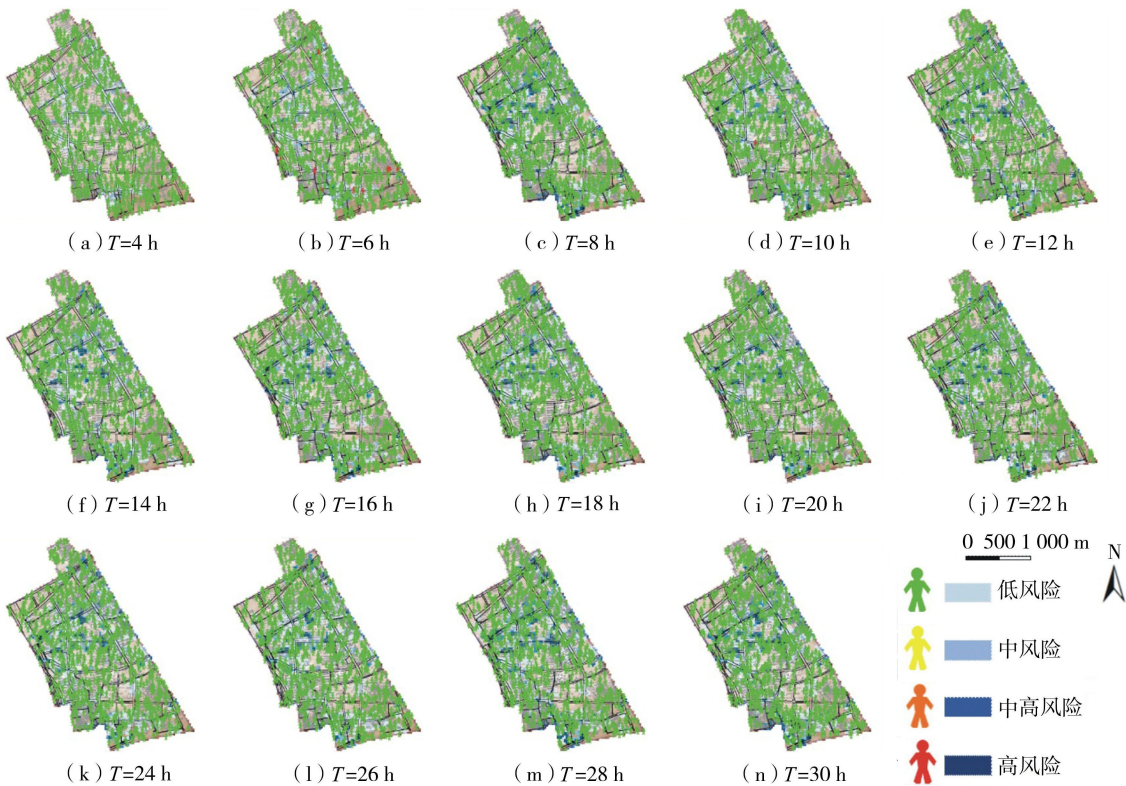


图 9 避险策略下人口智能体灾害风险动态模拟结果

Fig. 9 Simulation results of dynamic risk for population agents disaster under risk avoidance strategies

随着降雨历时的推移,研究区内人员的受灾风险降为 0。

在整个降雨过程中低风险人数先降低后升高,高风险人数先升高后降低,当 $T=4.5\text{ h}$ 时,低风险人口智能体数为 731(实际人口数为 7.31 万人),高风险人口智能体数为 56(实际人口数为 5 600 人),如图 10 所示。当降雨历时 $T=8\text{ h}$ 时,救援避险后模拟得到的低风险、中风险、中高风险、高风险人口智能体数分别为 790、1、0、1,其中高风险人口智能体数占 0.13%,此时位于安宁庄西路和安宁庄南路及交叉

口的人员均处于低风险状态,如图 11 所示。 $T=14\text{ h}$ 后,低风险人数一直保持着较为稳定的状态,说明整个降雨过程中避险措施的制定对人员受灾风险的降低具有重要的指导作用,可以有效降低人员伤亡数量。当降雨结束时, $T=24\text{ h}$,高风险人口智能体数占比为 0;当汇流结束时, $T=30\text{ h}$,高风险人口智能体数占比为 0,如表 2 所示。研究表明,50 年一遇设计降雨情景下,采取避险策略后研究区的所有人员均处于低风险状态。

4 结 论

a. 采用 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型构建水文水动力耦合模型,选用 50 年一遇的设计降雨情景进行模拟,得到不同时段城市内涝风险值,作为 NetLogo 模型的输入文件,实现了水文水动力模型与多智能体模型的耦合以及传统城市洪涝风险定性分析向承灾体风险动态化定量分析转变,为城市洪涝灾害中承灾体损失的量化评估提供了新的方法和路径。

b. 多智能体模型涵盖孕灾环境、致灾因子、承灾体 3 种模块,通过对每种模块中的关键要素设定运行规则,使用多智能体模型中内部通信指令,让智能体之间科学合理地协调运行,将工程技术与系统科学交叉融合,并应用到社会管理实践当中。

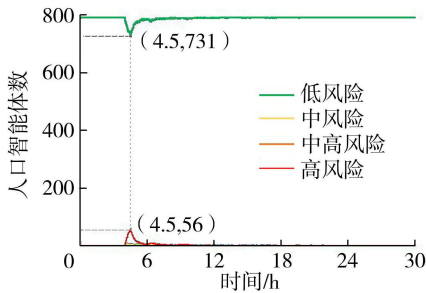


图 10 避险策略下不同风险区人口智能体数随时间变化过程
Fig. 10 Population agents in different risk zones over time under risk avoidance strategies

c. 运用 NetLogo 模型对城市洪涝灾害中常规情况下的人员移动和避险策略下的人员移动过程分别进行模拟评估。通过比较发现,随着降雨历时的推

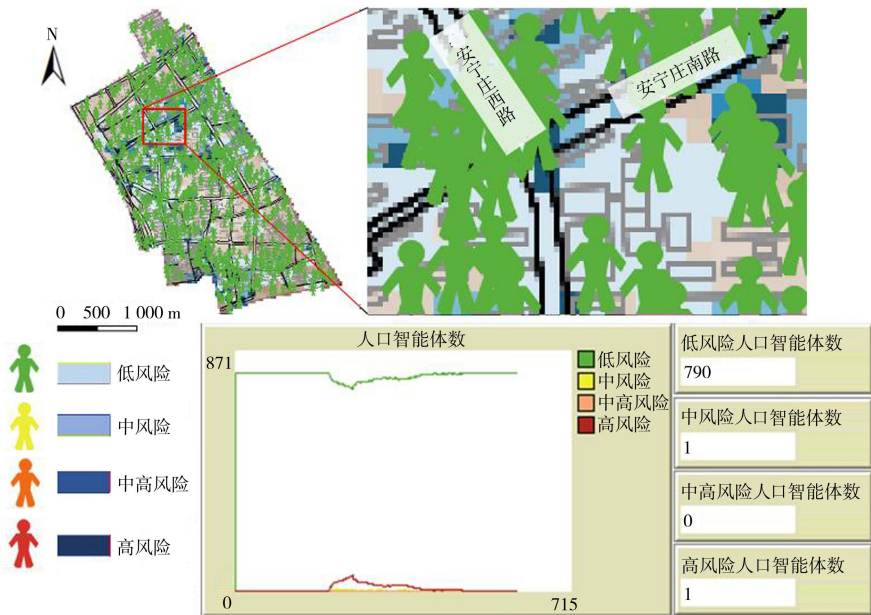


图 11 避险策略下 $T=8\text{ h}$ 时人口智能体受灾风险分析

Fig. 11 Risk analysis of affected population agents under risk avoidance strategies at $T=8\text{ h}$

表 2 避险策略下人口智能体数不同风险占比

Table 2 Different risk ratios of population agents under risk avoidance strategies

T/h	低风险 占比/%	中风险 占比/%	中高风险 占比/%	高风险 占比/%
4	100	0.00	0.00	0.00
8	99.74	0.13	0.00	0.13
12	99.75	0.13	0.00	0.12
16	100	0.00	0.00	0.00
20	99.87	0.00	0.00	0.13
24	100	0.00	0.00	0.00
28	100	0.00	0.00	0.00
30	100	0.00	0.00	0.00

移,常规情况下低风险人数持续下降,人数稳定占比为 75.75% (实际人口数为 6 万人),高风险人数呈持续增加,人数稳定占比为 22.85% (实际人口数约 1.81 万人)。避险策略下低风险人数先降低后增加,高风险人数先增加后降低,在降雨历时为 4.5 h 时出现峰值,最后高风险人口智能体数接近为 0,低风险人数稳定占比为 100%,说明避险策略实施对降低洪涝灾害中人口受灾风险具有重要的指导作用。

参考文献:

[1] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of

Hydraulic Engineering, 2013, 44 (7): 779-790. (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. Advance and prospect in research on causes and countermeasures of urban extreme rainstorm induced flooding disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[3] 姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 北京“7·21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析[J]. 气象学报, 2014, 72 (2): 207-219. (JIANG Xiaoman, YUAN Huiling, XUE Ming, et al. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21-22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(2): 207-219. (in Chinese))

[4] 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): 64-66. (XU Zongxue, CHEN Tao, REN Meifang. When will the “looking at sea in city” stop: on the function and role of sponge city [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(5): 64-66. (in Chinese))

[5] 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))

- [6] 刘家宏,梅超,王佳,等.北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J].中国防汛抗旱,2023,33(9):50-55. (LIU Jiahong, MEI Chao, WANG Jia, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33 (9): 50-55. (in Chinese))
- [7] 刘永志,唐雯雯,张文婷,等.基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述[J].水资源保护,2021,37(1):20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 20-27. (in Chinese))
- [8] DAI Qiang, ZHU Xuehong, ZHUO Lu, et al. A hazard-human coupled model (HazardCM) to assess city dynamic exposure to rainfall-triggered natural hazards [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 127:104684.
- [9] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等.基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J].水资源保护,2022,38(6):31-38. (MEI Chao, CHEN Yufeng, LIU Jiahong, et al. Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 31-38. (in Chinese))
- [10] TAKAHASHI T, TADOKORO S, OHTA M, et al. Agent based approach in disaster rescue simulation- from test-bed of multiagent system to practical application [C]//RoboCup 2001: Robot Soccer World Cup V. Berlin: Springer, 2002: 102-111.
- [11] DAWSON R J, PEPPE R, WANG M. An agent-based model for risk-based flood incident management [J]. Natural Hazards, 2011, 59(1): 167-189.
- [12] LINGHU Bin, CHEN Feng, GUO Xiaotian, et al. A conceptual model for flood disaster risk assessment based on agent-based modeling [C]//2013 International Conference on Computer Sciences and Applications. Wuhan: IEEE, 2013: 369-373.
- [13] JENKINS K, SURMINSKI S, HALL J, et al. Assessing surface water flood risk and management strategies under future climate change: insights from an agent-based model [J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 159-168.
- [14] GHAVAMI S M, MALEKI J, ARENTZE T. A multi-agent assisted approach for spatial group decision support systems: a case study of disaster management practice[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 38: 101223.
- [15] KOC K, İŞİK Z. A multi-agent-based model for sustainable governance of urban flood risk mitigation measures [J]. Natural Hazards, 2020, 104(1): 1079-1110.
- [16] 朱净莹,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))
- [17] 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))
- [18] TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011, 47(1/2): 123-138.
- [19] HO M, WASKO C, O'SHEA D, et al. Changes in flood-associated rainfall losses under climate change[J]. Journal of Hydrology, 2023, 625: 129950.
- [20] KONAPALA G, MISHRA A K, WADA Y, et al. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 30-44.
- [21] SCHUSTER Z T, POTTER K W, LIEBL D S. Assessing the effects of climate change on precipitation and flood damage in Wisconsin [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(8): 888-894.
- [22] 赖成光,廖耀星,王兆礼.不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J].水资源保护,2023,39(3):101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 101-108. (in Chinese))
- [23] 章林伟.中国海绵城市的定位、概念与策略:回顾与解读国办发[2015]75号文件[J].给水排水,2021,57(10):1-8. (ZHANG Linwei. Positioning, concept and strategy of China's sponge city: review and interpretation of document No. 75[2105] of State Council[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57 (10): 1-8. (in Chinese))
- [24] 嵇娟,陈军飞,周子月.江苏省城市洪涝韧性评价及影响因素研究[J].水利经济,2022,40(4):48-54. (JI Juan, CHEN Junfei, ZHOU Ziyue. Research on evaluation and influencing factors of urban flood resilience in Jiangsu Province[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(4): 48-54. (in Chinese))
- [25] 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):485-491. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [26] 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))
- [27] 刘建芬,王慧敏,张行南. 城市化背景下城区洪涝灾害频发的原因及对策[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2012, 14(1): 73-75. (LIU Jianfen, WANG Huimin, ZHANG Xingnan. Causes of flood-stricken urban areas in the context of urbanization and its countermeasures[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2012, 14(1): 73-75. (in Chinese))
- [28] 贺山峰,高秀华. 洪涝灾害成灾机理分析及应对策略研究[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2016, 17(2): 187-192. (HE Shanfeng, GAO Xiuhua. Mechanism of floods and corresponding strategies[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Social Sciences), 2016, 17(2): 187-192. (in Chinese))
- [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] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效果数值模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 13-18. (in Chinese))
- [31] 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))
- [32] ABT S R, WITTIER R J, TAYLOR A, et al. Human stability in a high flood hazard zone[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1989, 25(4): 881-890.
- [33] RUSSO B. Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [34] ZHU Zhongfan, ZHANG Yongpeng, GOU Lufeng, et al. On the physical vulnerability of pedestrians in urban flooding: experimental study of the hydrodynamic instability of a human body model in floodwater[J]. Urban Climate, 2023, 48: 101420.
- [35] ZHU Zhongfan, GOU Lufeng, LIU Shuyou, et al. Effect of urban neighbourhood layout on the flood intrusion rate of residential buildings and associated risk for pedestrians [J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 92: 104485.
- [36] GOU Lufeng, LIU Yun, ZHANG Yongpeng, et al. Estimating the instability criterion of vehicles in urban flooding by an entropic method[J]. Urban Climate, 2022, 41: 101069.
- [37] 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, LU 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))
- [38] 张红萍,李敏,贺瑞敏,等. 城市洪涝模拟应用场景及相应技术策略[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 452-461. (ZHANG Hongping, LI Min, HE Ruimin, et al. Application scenarios and corresponding technical strategies of urban flood modeling[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(3): 452-461. (in Chinese))
- [39] 权瑞松. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝脆弱性分析[J]. 地理科学, 2014, 34(11): 1399-1403. (QUAN Ruisong. Vulnerability analysis of rainstorm waterlogging on buildings in central urban area of Shanghai based on scenario simulation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(11): 1399-1403. (in Chinese))
- [40] 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))
- [41] 赖文泽. 基于多智能体的暴雨洪涝房屋风险动态评估研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [42] 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 Zhan'e, 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))
- [43] 刘小波. 基于 NetLogo 平台的舆情演化模型实现[J]. 情报资料工作, 2012(1): 55-60. (LIU Xiaobo. Netlogo platform-based realization of dynamic model of public opinion[J]. Information and Documentation Services, 2012(1): 55-60. (in Chinese))
- [44] 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): 98-105. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Research on urban block waterlogging simulation based on coupling model of SWMM and LISFLOOD-FP [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 98-105. (in Chinese))
- [45] 程涛. 海绵城市示范区暴雨洪涝模拟与减灾方法研究: 以济南市为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2019.

[46] 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))

[47] 陈鹏,赵洪阳,张硕,等.城市暴雨内涝灾害居民避难行为规律研究[J].吉林师范大学学报(自然科学版),2020,41(2):134-140. (CHEN Peng,ZHAO Hongyang,ZHANG Shuo,et al. Study on the shelter behavior of residents in urban rainstorm and waterlogging disaster[J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition),2020,41(2):134-140. (in Chinese))

[48] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等.社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J].水利水电科技进展,2023,43(5):73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):73-81. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-23 编辑:王芳)

(上接第26页)

[19] 王磊之,崔婷婷,李笑天,等.降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J].水资源保护,2022,38(4):110-116. (WANG Leizhi,CUI Tingting,LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (4): 110-116. (in Chinese))

[20] 赵玲玲,张鑫辉,刘昌明,等.华南中小流域设计暴雨洪水同频率检验与重现水平推算[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):157-163. (ZHAO Lingling, ZHANG Xinhui, LIU Changming, et al. Same frequency test and recurrence level estimation of design storm flood in a small and medium-sized basin of South China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):157-163. (in Chinese))

[21] 韩世亮,陈泰霖.气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测[J].水利水电科技进展,2022,42(3):32-38. (HAN Shiliang, CHEN Tailin. Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(3):32-38. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-14 编辑:王芳)

《水资源保护》征订启事

《水资源保护》(ISSN 1004-6933, CN 32-1356/TV)是教育部主管、河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会共同主办的科技期刊。《水资源保护》以水资源、水环境、水生态为论述主题,以推动水科学技术进步为办刊宗旨,反映在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境和水生态等领域中科学技术的最新成就、重要进展和发展趋势,交流新的科研成果、技术经验和科技动态。收稿范围:水文水资源、水环境、水生态、水安全等相关文章。本刊开设的栏目有特约专家论坛、水文水资源、水环境水生态等。

《水资源保护》1985年创刊,经过近40年的努力,办刊成绩斐然,现为中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国权威学术期刊,已被美国《工程索引》(Ei)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、波兰《哥白尼索引》(IC)等国外重要数据库收录,是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国核心期刊数据库统计源期刊。据中国科学文献计量评价研究中心最新出版的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术·2023版)》,《水资源保护》复合影响因子为6.155,位居79种水利工程类期刊的第1位。

《水资源保护》一直以来都是水利界和环保界备受关注的重点期刊,是国内较有影响的水利期刊之一,主要读者对象是全国从事与水资源保护工作有关的科研技术人员、管理人员以及大专院校师生。

《水资源保护》现为双月刊,160页,30元/册,全年共计180元,每逢单月20日出版,全国公开发行,邮发代号:28-298。

地址:210098 南京市西康路1号
电话:(025)83786642
电子信箱:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn