

洪涝灾害人口生命损失风险动态评估

高玉琴,王 辰,谢梦瑶,袁晨禹,李易佳

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究暴雨洪涝灾害中人口动态变化对生命损失风险的影响,从动态角度对洪涝灾害情景下人口生命损失风险开展了精准评估,通过界定人口生命损失风险概念及其特征,分析了其在洪涝灾害情景下的影响因素,搭建了洪涝灾害人口生命损失风险评估框架,利用多智能体建模与仿真技术及 MIKE 一、二维耦合模型构建了人口生命损失风险评估模型。以南京市主城区为例进行了模拟分析,结果表明:暴雨重现期越长,人口生命损失风险越高;降雨过程中室外暴露人数先增多、后减少,人口生命损失风险先增大、后缓慢减小;评估模型可动态计算洪涝灾害情景下人口生命损失风险,直观呈现不同洪涝灾害情景下人口的分布变化及人口生命损失风险的演进过程。

关键词:洪涝灾害;人口生命损失风险;多智能体建模;MIKE 一、二维耦合模型;南京市

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0079-10

Dynamic assessment of population life loss risk due to flood disasters//GAO Yuqin, WANG Chen, XIE Mengyao, YUAN Chenyu, LI Yijia(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: To study the impact of population dynamic changes on the life loss risk in rainstorm and flood disasters, a precise assessment of the population life loss risk in flood disasters was conducted from a dynamic perspective. By defining the concept and characteristics of population life loss risk and analyzing its influencing factors in flood disaster scenarios, a framework for assessing the population life loss risk in rainstorm and flood disasters was established. A dynamic assessment model of population life loss risk was constructed using multi-agent modeling, simulation technology, and one- and two-dimensional coupled MIKE model, and applied to the main urban area of Nanjing City. The results show that a longer rainstorm return period leads to a higher population life loss risk, the number of people exposed outdoors increases first and then decreases during the rainfall process, and the population life loss risk increases first and then decreases slowly. The assessment model can dynamically calculate the population life loss risk due to flood disasters and illustrate the changes in population distribution and evolution process of the population life loss risk under different flood disaster scenarios.

Key words: flood disaster; population life loss risk; multi-agent modeling; one- and two-dimensional coupled MIKE model; Nanjing

洪涝灾害是全球范围内极为严重的自然灾害类型之一,对人民的生命和财产安全产生了巨大的影响^[1]。随着洪涝灾害的频繁发生,研究人口动态分布以评估人口损失风险对于保障人民生命安全尤为重要。虽然基于栅格的人口数据可以揭示人口的空间分布特征,但这些数据通常缺乏表现时间序列变化的能力,无法充分捕捉人口随时间的动态变化^[2-3]。为了克服这一难题,多智能体仿真技术成为一种有力的工具,通过结合基于栅格的人口数据和多智能体仿真技术,可以更全面地理解人口在时间和空间上的分布及其演变^[4]。这种综合方法不仅

能够弥补单一方法的不足,还可以为分析人口时空格局提供更为准确的方法支持,对于洪涝灾害情景下人口生命损失风险的研究具有重要意义,且可以在理论和方法上为类似研究提供参考。

目前,常用的洪水人口灾害系统模拟模型有 HAZUS(hazard US)模型、生命模拟模型、生命安全模型等。随着计算机语言的发展,有学者提出可以通过智能体模型来描述和分析人口行为,如疏散行为、避难选择、救援资源的获取和使用等^[5-8],并已有学者利用多智能体仿真技术深入探究了暴雨洪涝灾害发生时承灾体、致灾因子与孕灾环境间的交互作

用关系^[9-12],如郭啸天等^[13]构建了基于 ABM(agent-based modeling)的暴雨洪涝人口风险动态评估模型,该模型能够对暴雨灾害的全过程进行动态、量化的风险评估,但并未对模型的准确性进行验证。

本文针对洪涝灾害频发背景下人口生命损失风险评估精度不足的问题,分析其关键影响因素,利用多智能体建模与仿真技术构建人口生命损失风险评估模型,并以南京市主城区为例,模拟洪涝灾害情景下人口行为动态响应过程,总结人口生命损失风险演变规律,评估洪涝灾害人口生命损失风险。

1 洪涝灾害人口生命损失风险评估框架

1.1 评价指标体系构建

综合分析洪涝灾害影响因素^[14-15],以洪涝灾害情景下人口生命损失风险评价为目标层,以致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、人口脆弱性和防灾减灾能力为准则层,构建洪涝灾害人口生命损失风险评估指标体系,如图 1 所示。

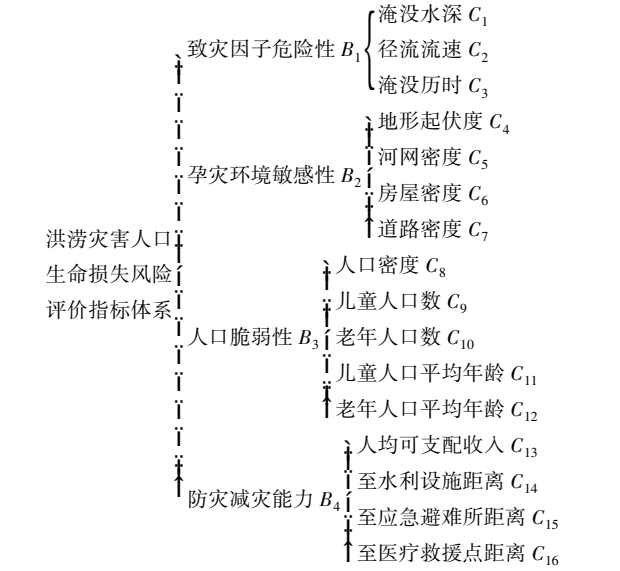


图 1 洪涝灾害人口生命损失风险评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system for population life loss risk in flood disasters

1.2 评估模型构建

采用层次分析法确定指标权重,构建洪涝灾害人口生命损失风险评估模型。通过加权综合评价计算人口生命损失风险综合指数,用以反映人口生命损失风险。根据综合指数值将人口生命损失风险划分为低风险、较低风险、中风险、较高风险、高风险 5 个等级,对应的综合指数值分别为 0~0.2、>0.2~0.4、>0.4~0.6、>0.6~0.8、>0.8~1.0。人口生命损失风险综合指数的计算公式为

$$R=B_1+B_2+B_3+B_4 \tag{1}$$

其中

$$B_1=\sum_{i=1}^{m_1}x_{1i}w_{1i} \quad B_2=\sum_{i=1}^{m_2}x_{2i}w_{2i}$$

$$B_3=\sum_{i=1}^{m_3}x_{3i}w_{3i} \quad B_4=\sum_{i=1}^{m_4}x_{4i}w_{4i}$$

式中: R 为洪涝灾害人口生命损失风险综合指数; w_{1i} 、 w_{2i} 、 w_{3i} 、 w_{4i} 分别为致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、人口脆弱性和防灾减灾能力 4 类指标中的第 i 项指标权重; x_{1i} 、 x_{2i} 、 x_{3i} 、 x_{4i} 分别为相应第 i 项指标因素标准化处理后的数值; m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 分别为各类指标的数量。

2 基于多智能体的洪涝灾害人口生命损失风险计算

选择 Netlogo 多智能体模型平台进行人口生命损失风险仿真计算,基于基础数据资料进行智能体的初始化、设计人口行为模式和制定人口移动规则,进行洪涝灾害情景下人口转移应急响应模拟。

2.1 多智能体模型构建

将各类因子处理后作为初始化数据输入多智能体中构建模型,进行受灾情况下人口行为模拟。

2.1.1 致灾因子智能体初始化

采用芝加哥降雨过程线法估计特定时间和空间尺度上的降水量分布。设计不同暴雨重现期的模拟情景,预测不同降雨强度下的洪水响应。

依据 GB 50014—2016《室外排水设计规范》的暴雨强度公式推求设计降雨强度:

$$q=A(1+C\lg P)/(t_d+b)^n \tag{2}$$

式中: q 为设计暴雨强度; P 为暴雨重现期; t_d 为降雨历时; n 为暴雨衰减系数; A 、 C 、 b 为地区参数。

对区域长系列暴雨资料进行系统分析,计算出不同历时暴雨的雨峰位置,并通过加权平均法确定具有代表性的雨峰比例系数 r 。对于芝加哥雨型,平均暴雨强度 $\bar{q}$ 与降雨历时 t_d 之间的关系可用以下经验公式计算:

$$\bar{q}=a/(t_d+b)^c \tag{3}$$

式中 a 、 c 为常数,由暴雨强度公式中的地区系数与暴雨重现期决定。

瞬时雨量过程线为

$$q_a=\frac{a[(1-c)t_a/r+b]}{(t_a/r+b)^{c+1}} \tag{4}$$

$$q_b=\frac{a[(1-c)t_b/(1-r)+b]}{[t_b/(1-r)+b]^{c+1}} \tag{5}$$

式中: t_a 、 t_b 分别为峰前、峰后暴雨历时; q_a 、 q_b 分别为峰前 t_a 历时和峰后 t_b 历时暴雨强度。

2.1.2 孕灾环境智能体初始化

a. 地形智能体。使用 ArcGIS 求得的地形起伏

度,处理后导入 Netlogo 平台,用来描述研究区域地形高程变化程度,向其他智能体提供所处区域的地形环境信息。

b. 房屋智能体。基于建筑数据的高程属性,按照层高 3 m 计算出建筑层数和居住容量。根据研究区内的用地规划现状,将房屋分为住宅类和非住宅类两类,并结合 POI (point of interest) 数据将非住宅类房屋分为学校、医疗站、救援单位及其他。

c. 道路智能体。将路网转换为面数据,并将路宽统一概化为 10 m,导入 Netlogo 平台。

2.1.3 人口智能体初始化

人口是洪涝灾害的承灾体,人口分布情况对洪涝灾害人口生命损失风险具有显著影响。人口分布是时刻变化的,人口日间大多在外工作、学习或进行休闲娱乐活动,夜间则大多在家休息。因此,以 worldpop 人口栅格数据代表人口智能体日间的位置分布,基于计算的建筑层数和居住容量,在 Netlogo 平台中为每个人口分配住所,以研究区内任意一所住宅作为家,代表人口智能体初始位置分布。

2.1.4 防灾减灾能力初始化

a. 人均可支配收入智能体。对年鉴统计数据处理后利用 ArcGIS 将文件导入 Netlogo 平台。

b. 水利设施智能体、应急避难所智能体及医疗救援站智能体。所选的至水利设施、应急避难所和医疗救援点距离指标的原始数据均为点要素数据,在 ArcGIS 中采用欧氏距离法进行空间分析,分别得到不同点位分布指标的空间密度分布,重采样至 10 m 分辨率的计算栅格,进而导入 Netlogo 平台。

2.2 行为模拟

人口移动行为可分为两种模式:①日常出行模式。没有灾情时,人口的移动行为取决于人口类型及其所在的位置和时间。②洪涝灾害响应模式。人口面对洪水淹没情况时采取避难行为,采用概率有限状态机模拟不同时刻和不同洪涝灾害情景下人口的位置分布情景。

2.2.1 人口日常出行模式

人口日常出行模式因人口类型和出行需求的差异而不同,根据高德地图发布的我国部分城市主城区出行大数据统计报告,人口日常出行需求主要有工作通勤、上学、休闲娱乐、接送人、商务或公务等。为反映不同人口类型出行需求的差异性及不确定性,采用概率有限状态机模拟人口的日常出行模式,根据未成年人、成年人和老年人 3 类人群总结出人口日常出行模式,

未成年人基本均为学生,7:00 左右学生开始陆续从家出发前往学校,7:50 到达学校。成年人与老

年人出行模式如图 2 所示,图中 p_i 表示事件发生概率。成年人的出行需求主要分为接送学生上下学、工作通勤和休闲娱乐,如图 2(a) 所示,7:00 左右开始陆续从家出发,送学生上学后前往工作地点或进行休闲娱乐活动,或直接前往工作地点或外出进行娱乐活动,上班通勤的人群在 9:00 前到达工作地点。老年人的出行需求主要为接送学生上下学和进行休闲娱乐活动,如图 2(b) 所示,7:00 左右送学生上学的老年人开始陆续从家出发,送学生到达学校后回到家中或前往休闲娱乐区域。

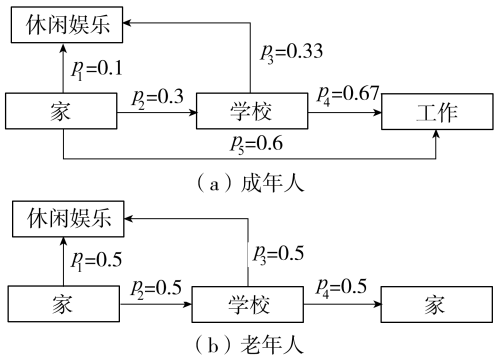


图 2 人口日常出行模式

Fig. 2 Routine travel patterns of population

2.2.2 人口对洪涝灾害的动态响应模式

洪涝灾害发生时,处于受灾区域的人口会根据自身所处的环境作出对应的洪涝灾害响应决策,其响应机制如下:①人口智能体实时感知自身所处位置的致灾因子信息;②人口智能体根据自身人口类型设定危险与安全状态的临界值,结合所处位置的致灾因子信息判断自身是否处于安全状态;③分析周围环境的洪涝灾情,作出是否转移的决策。在洪涝灾害发生过程中,人口智能体主要遵循“向周围最安全位置移动”的原则进行转移。

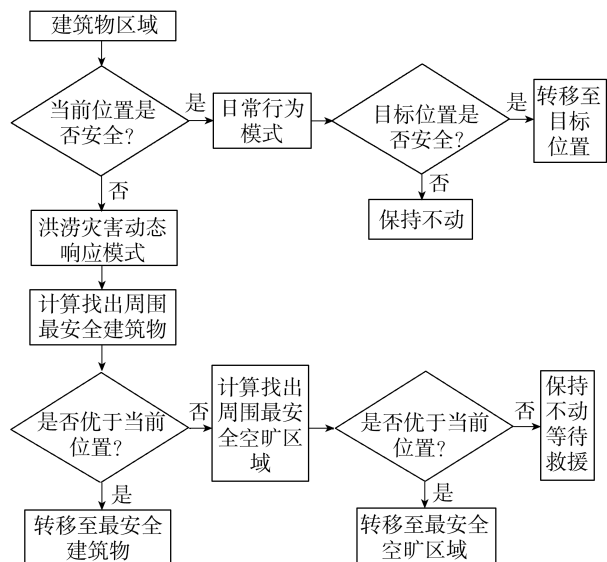
人口是否处于安全状态可根据其所处位置是否有建筑物分成两种情况:①当人口处于建筑物内时,人口是否处于安全状态由建筑物的状态决定;②当人口处于空旷的非建筑物区域时,人口是否处于安全状态根据其所处位置的淹没水深(h)和径流流速(v)共同判断^[16],当 $vh \geq 0.22$ 时处于危险状态,当 $vh < 0.22$ 时处于安全状态。

建筑物安全状态表达式^[17]为

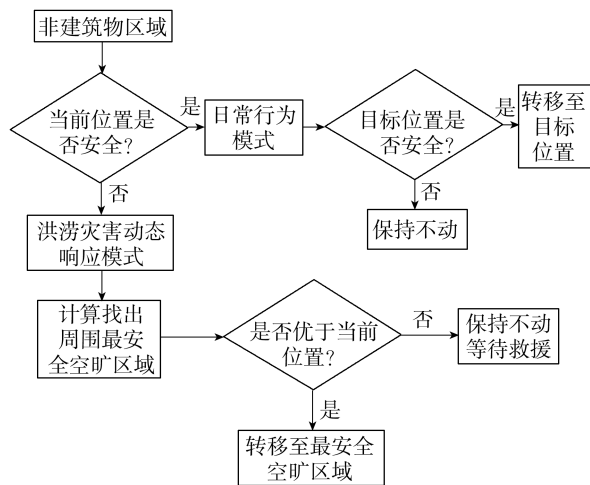
$$S_b = \begin{cases} 0 & 0 < (v + 0.5)h < 2.5 \\ 1 & (v + 0.5)h \geq 2.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中 S_b 为建筑物的状态, $S_b = 0$ 表示安全, $S_b = 1$ 表示危险。

位于建筑物区域和非建筑物区域的人口智能体分别采用图 3(a) 和图 3(b) 的策略避险。



(a) 建筑物区域



(b) 非建筑物区域

图3 避险策略流程图

Fig. 3 Flowchart for risk avoidance strategies

2.3 洪涝灾害人口生命损失风险计算

将洪涝灾害人口生命损失风险评估指标与各网格中人口智能体的动态变化结合,基于洪涝灾害人口生命损失风险评估模型,动态计算人口生命损失风险。

2.3.1 致灾因子危险性指标计算

致灾因子危险性指标均为动态指标。淹没水深和径流流速由 MIKE 一、二维耦合模型模拟得出,并导入 Netlogo 平台为每个嵌块赋以水深和流速属性值。

根据 GB 50014—2021《室外排水设计标准》和 GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》,城市中积水深度超过 15 cm 时有内涝风险,当积水超过 40 cm 时有严重内涝风险,基础建筑物受到威胁。因此,设置区域淹没水深大于 15 cm 时,淹没历时随时间不断累计^[18]。

2.3.2 孕灾环境敏感性指标计算

a. 地形起伏度。采用均值变点法确定计算尺度,计算公式为

$$C_4 = Y/1000 + (Y_{\max} - Y_{\min})(1 - Q_A/Q_B)/500 \quad (7)$$

式中: Y 、 $Y_{\max}$ 、 $Y_{\min}$ 分别为以某一栅格单元为中心的最佳分析窗口下的平均海拔、最高海拔和最低海拔; Q_A 为平地(相对高差<30 m 的区域)面积; Q_B 为区域总面积。

b. 河网、房屋、道路密度。分别对河网、房屋、道路密度数据进行核密度分析,再进行数据标准化后得到研究区对应数值。

2.3.3 人口脆弱性指标与防灾减灾能力指标计算

a. 人口脆弱性指标。人口脆弱性指标均随着洪涝灾害进程和人口的动态响应发生变化,因此,在多智能体建模中,对每个区域实时计算出 5 个承灾体脆弱性指标值。

b. 防灾减灾能力指标。收集研究区域各类设施位置信息,分别计算出研究区内各点至水利设施、应急避难所、医疗救援点的欧式距离,再将数据进行标准化处理后计算出对应防灾减灾能力指标值。

3 实例分析

3.1 研究区概况

选取南京市秦淮区大光路街道、光华路街道、红花街道、秦虹街道、瑞金路街道、月牙湖街道和玄武区孝陵卫街道 7 个相邻街道进行实例分析,具体区域位置如图 4 所示,该区域地处南京市中心城区,人口密集。根据南京市水务局 2016—2020 年对全市进行的积淹水整治记录,该区域包含多个积淹水整治点。将该地区作为洪涝灾害人口生命损失风险动态评估的典型区域,具有显著代表性。

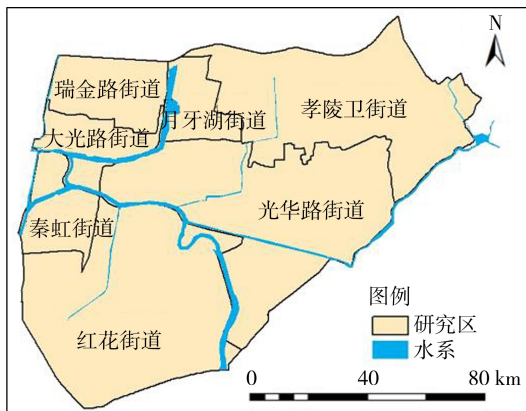


图4 研究区概况

Fig. 4 Overview of study area

3.2 数据来源

研究区数据来源如下:DEM、河系水网、路网数据来源于 91 卫图,建筑物高程数据来源于 Zenodo 平台中国首套 10 m 分辨率的建筑高度数据集,人口数据来源于 100 m 分辨率的 worldpop 人口栅格数据集,年龄划分依据南京市统计年鉴,水文数据来源于长江流域水文年鉴。

3.3 不同暴雨情景下的洪水淹没模拟与分析

3.3.1 情景设计

早高峰(7:00—9:00)时段是人口出行量最大的时段之一,涵盖大部分人口的出行模式,最具典型性。根据南京市暴雨强度公式查算表,南京市地区参数分别取 $A=10\ 716.7$, $C=0.837$, $b=32.9$, 并取 $n=1.011$ 。采用芝加哥雨型,参考相关学者的研究成果^[19-20], r 值取为 0.4。设计 4 个情景研究洪涝灾害人口生命损失风险的动态变化特征,暴雨重现期分别取 10、20、50、100 a,设计暴雨历时为 2 h。设计暴雨过程线如图 5 所示。

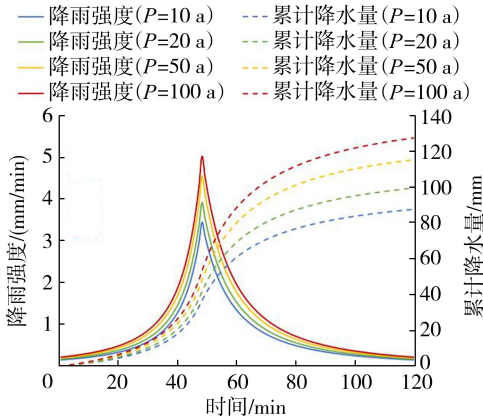


图 5 设计暴雨过程线

Fig. 5 Design storm hyetograph

3.3.2 MIKE 一、二维耦合模型构建

3.3.2.1 MIKE11 一维模型

模型研究区上游边界采用东山站的实测水文资料,下游边界采用武定门闸站的实测水文资料,其他支流的边界条件由其所在子流域的径流量决定。

选取典型洪水实测水位与流量数据构建一维水动力模型,采用下游武定门闸站 20170608 号洪水实测流量数据率定模型的参数,并使用武定门闸站 20170922 号洪水进行验证。模型共包括 6 条河道,分别为秦淮河、秦淮河(支)、运粮河、响水河、友谊河、月牙湖,糙率率定结果分别为 0.031 8、0.028 2、0.024 6、0.023 1、0.035 7、0.023 5。

采用决定系数(R^2)、纳什效率系数(NSE)和峰值相对误差(PE)3 项指标评估模型的模拟精度,率定期和验证期模拟结果如图 6 所示。结果显示洪水

模拟结果均合格,率定期 $R^2=0.95$ 、NSE 为 0.84、PE 为 6.62%,验证期 $R^2=0.98$ 、NSE 为 0.88、PE 为 11.63%。模型整体模拟效果较好,可用于洪水淹没模拟。

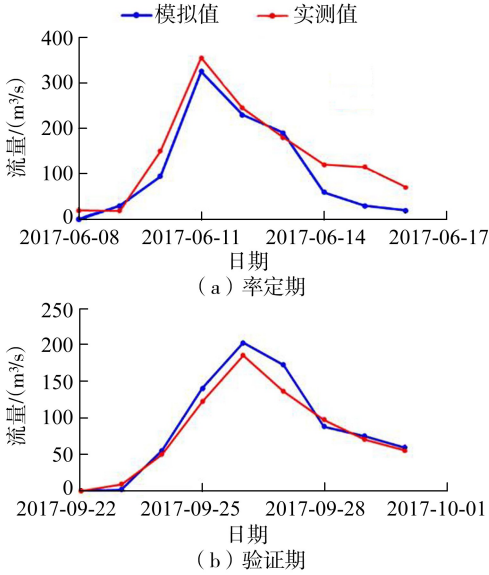


图 6 率定期和验证期模拟结果

Fig. 6 Simulation results during calibration and validation periods

3.3.2.2 MIKE21 二维模型

根据城市建筑物和道路的布局规则,选择 MIKE21 的 Flow Model 模块进行城市洪水漫流模拟,将 DEM、建筑高度和道路等数据通过 ArcGIS 进行处理后,作为地形文件输入 MIKE21,通过计算得到时间步长为 0.5 s、涡黏系数为 13.122。设干水深为 0.002 m、湿水深为 0.003 m、初始水位为 0,由曼宁数表征糙率,并根据常用的标准值,取值为 32。

选用 2017 年 6 月 10 日 08:00—10:00 实测降雨数据进行洪水淹没模拟,并与历史灾情数据进行对比验证。将日均排水能力作为地下管网排水能力的指标之一,并将其并入蒸发项,输入的降雨时间序列为净雨过程,根据研究区上游东山站的实测逐日水面蒸发量,计算得到包含蒸发量与日均排水能力的蒸发项为 430.5 mm/d。

依据南京市水务局公开的全市积水水整治清单,对研究区的历史积水点信息进行了全面梳理,得出 12 个历史积水点,分别为光华路匝道口、商院路铁路桥涵、象房南村、紫杨路、观门北村、友谊村、苜蓿园大街梅花山庄、梅家廊路银龙六期段、石杨路银龙花园、银城东苑、卡子门高架、制药厂路。MIKE21 二维模型模拟结果显示有 9 个积水点与实际匹配,合格率为 75%,表 1 给出了 4 个积水点水深模拟值与实测值的对比结果,可以看出误差较小,MIKE21 二维模型可用于洪水淹没模拟。

表 1 积淹水点水深模拟值与实测值

Table 1 Simulated and measured water depths at waterlogging points

积淹水点	实测水深/mm	模拟水深/mm	误差/%
商院路铁路桥涵	50	55.2	10.4
苜蓿园大街梅花山庄	25	22.9	8.4
梅家廊路银龙六期段	30	32.8	9.3
石杨路银龙花园	30	27.7	7.7

3.3.2.3 MIKE 一、二维耦合模型

采用 MIKE FLOOD 通过侧向连接的方式将一、二维水力模型进行耦合,利用 2017 年 6 月 10 日 08:00—10:00 实测降雨数据进行洪水淹没模拟,一、二维耦合模型模拟结果中的积淹水点匹配数由 9 个上升为 10 个,合格率由 75%上升为 83.33%,模拟结果精确度更高。

3.3.3 洪水淹没模拟结果

将不同重现期设计暴雨过程线作为二维模型的降雨源项,利用 MIKE 一、二维耦合模型模拟研究区不同暴雨重现期情景下的洪水淹没情况,选取最大淹没水深分布、模拟时段末淹没水深分布及最大径流流速分布进行分析。

a. 最大淹没水深分布。洪水淹没过程中最大淹没水深分布如图 7 所示,随着暴雨重现期增大,最大淹没水深逐渐增加,各级水深区域的面积呈线型增长。 $P=10\text{ a}$ 情景下超过 84% 的区域淹没水深小

于 15 cm; $P=100\text{ a}$ 情景下超过 74% 的区域淹没水深小于 15 cm,且超过 15 cm 水深的范围中,超 50 cm 水深的区域不到 1/2,说明超过 15 cm 的水深值大部分为 15~40 cm。

b. 模拟时段末淹没水深分布。模拟时段末的淹没水深分布如图 8 所示,可以看出,随着暴雨重现期增大,模拟时段末仍未消退的积淹水点明显增多,同一积淹水点的淹没范围和最大淹没水深明显增加。

c. 最大径流流速分布。模拟过程中最大径流流速分布如图 9 所示,绝大部分区域的径流流速小于 0.5 m/s,北部月牙湖街道和孝陵卫街道地势较高,最大径流流速主要为 0.3~0.5 m/s,其余区域的最大径流流速基本小于 0.3 m/s。建筑物周围的最大径流流速普遍大于 1 m/s。

3.4 人口智能体行为模拟

根据南京市年鉴统计的各街道内的人口数设置人口智能体,并在各行政区划范围内随机分布。根据 2.1.3 节进行人口初始分布设置,部分老年人智能体以老年公寓或养老机构为家,作为早高峰出行的起点;设定所有未成年人智能体根据年龄在家附近选择一所学校作为学习场所,学校包括幼儿园、小学、初中和高中;接送小孩上下学的成年人智能体和老年人智能体以家附近的一所幼儿园或小学作为接送目的地。设定学生到达学校的时间为 7:50,成年

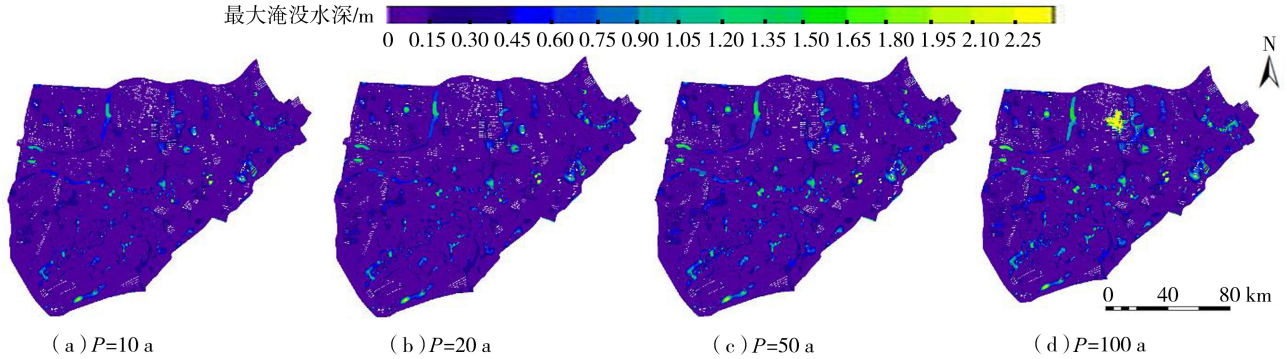


图 7 不同暴雨重现期最大淹没水深分布

Fig. 7 Distributions of maximum inundation depth under different rainstorm return periods

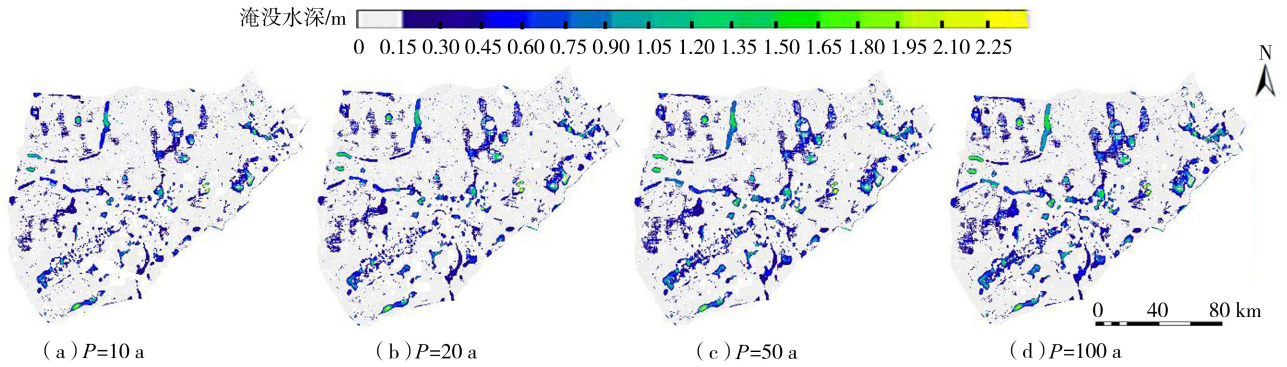


图 8 不同暴雨重现期模拟时段末淹没水深分布

Fig. 8 Distributions of inundation depth at end of simulation period under different rainstorm return periods

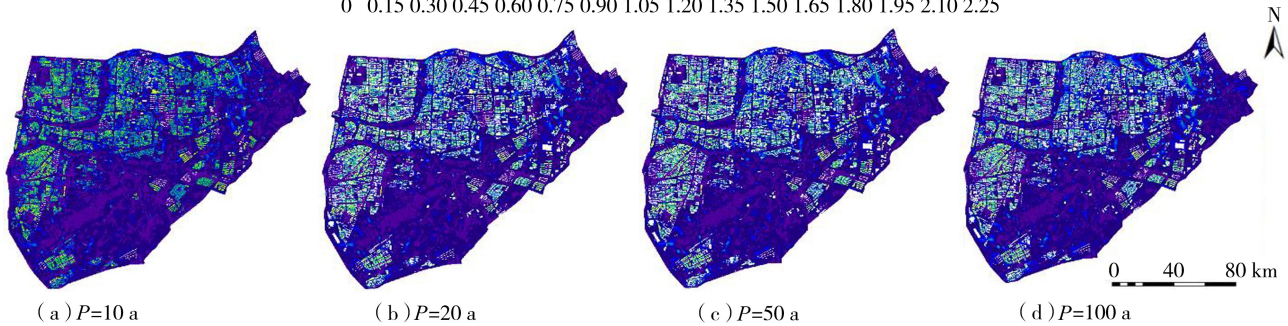


图 9 不同暴雨重现期最大径流流速分布

Fig. 9 Distributions of maximum runoff velocity under different rainstorm return periods

人上班时间为 9:00。人口日常出行模式下不同时段人口分布如图 10 所示。7:00 左右人口智能体陆续开始出门,户外暴露人数开始逐渐增多;7:50 左右户外暴露人数达到顶峰。此后,各类人口智能体陆续到达目的地,户外暴露人数逐渐减少,9:00 左右大部分人口智能体进入室内,少数人口智能体仍在户外活动。

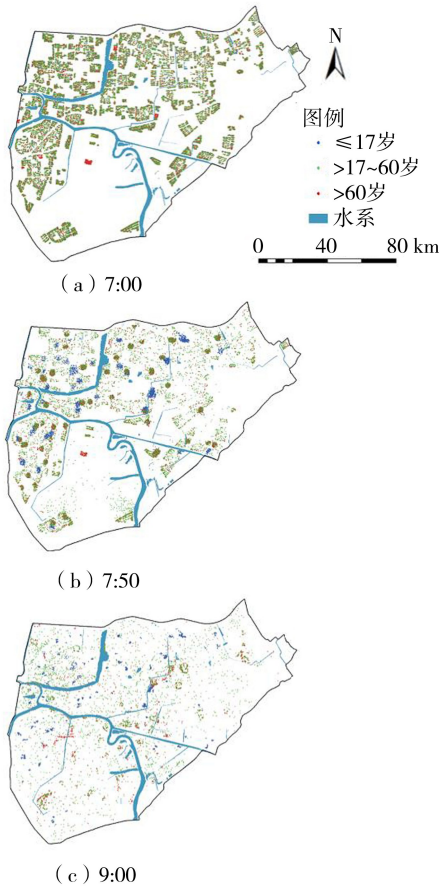


图 10 人口日常出行模式下不同时刻人口分布

Fig. 10 Population distributions at different times under routine travel patterns

将人口分布模拟结果与 2024 年 3 月 6 日早高峰 7:50 时的人口热力图数据进行对比,模拟的人口密集区域与热力图人口密集区域大致吻合,表明人

口智能体行为模拟结果具有较高的可靠性和准确性,能够用于洪涝灾害人口生命损失风险评估。

3.5 洪涝灾害人口生命损失风险动态评估与分析

3.5.1 确定权重

根据建立的评价指标体系构建判断矩阵,并利用 MATLAB 程序进行一致性检验,结果为一致性指数 $C_1=0.0092$ 、一致性比例 $C_R=0.0103$ 且 $C_R<0.1$,表明通过一致性检验,层次分析法的结果具有较高可靠性。由层次分析法确定的准则层 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 的权重分别为 0.4005、0.0809、0.3788、0.1397,各准则层评价指标权重如表 2 所示。

表 2 评价指标权重

Table 2 Weight of indexes

指标	权重	指标	权重
C_1	0.5396	C_9	0.4174
C_2	0.2970	C_{10}	0.2634
C_3	0.1634	C_{11}	0.0975
C_4	0.4005	C_{12}	0.0615
C_5	0.3788	C_{13}	0.1414
C_6	0.1397	C_{14}	0.3463
C_7	0.0809	C_{15}	0.2212
C_8	0.1602	C_{16}	0.2912

3.5.2 早高峰情景下风险定性分析

以早高峰情景下 7:00 作为洪涝灾害的发生时间,不同暴雨重现期情景下,研究区洪涝灾害人口生命损失风险综合指数的空间分布格局基本一致,以 50 年一遇设计暴雨情景下的模拟结果为例进行分析,主要表现为如下规律:

a. 7:00 降雨开始,绝大部分区域处于低风险或较低风险;极少区域处于中风险、较高风险或高风险,这些区域主要集中在老年公寓、养老院等老年人聚集的区域,如图 11(a) 所示。

b. 降雨前期(7:00—7:40),降雨强度较低,主要出行的群体是上学的学生、送学生的成年人和老年人。随着出行人数的增加,研究区处于低风险的区域逐渐减少,处于较低风险的区域随之增加。

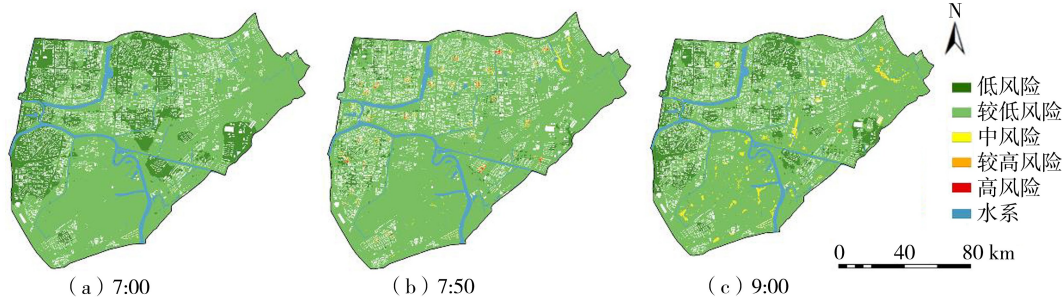


图 11 不同时刻人口生命损失风险空间分布

Fig. 11 Spatial distributions of population life loss risk at different times

c. 降雨中期(7:40—8:00),降雨强度增大,室外暴露人口主要为上学的学生、送学生的成年人和老年人以及通勤的成年人。该时段内,学生和送学生的成年人、老年人基本达到学校附近,学校附近的人口聚集明显,人口生命损失风险急剧升高,如图 11(b)所示。其中较高风险和高风险区较集中的地点为小学和幼儿园,在这些区域集中的学生年龄普遍较小,且送学生的家长较多,因此人口生命损失风险高。

d. 降雨后期(8:00—9:00),降雨强度逐渐减弱,室外暴露人口主要为通勤的成年人。低风险区和中风险区逐渐增多,较低风险区逐渐减少,中风险、较高风险、高风险区主要分布在中南部的红花街道、光华路街道和东部的孝陵卫街道,多为地势低洼和河道两岸,如图 11(c)所示。

3.5.3 早高峰情景下风险定量分析

统计不同情景下不同风险区网格数在研究区总网格数中的占比,结果如图 12 所示。

a. 降雨开始时,4 种暴雨重现期情景下的人口生命损失风险分布相同,研究区绝大部分区域处于

低风险区或较低风险区,分别约占研究区网格数的 24%和 75%,处于中风险及以上等级区域的网格数占比不足 1%。

b. 降雨前期(7:00—7:40),随着暴雨重现期增大,低风险区逐渐减少,较低风险区和中风险区逐渐增多,较高风险区和高风险区变化很小。7:40 左右低风险区、较低风险和低风险区网格数占比分别约为 6%、93%和 1%,较高风险区和高风险区网格数占比均接近于 0。低风险区和较低风险区网格数占比变化曲线基本呈相反态势,说明随着暴雨重现期增大,越来越多的低风险区风险值升高,进而转化为较低风险区,期间约有 20%的网格由低风险变为较低风险。

c. 降雨中期(7:40—8:00),低风险区先减少后增多,在 7:50 左右达到最小值,网格数占比约为 5%;较低风险区、较高风险区和高风险区先增多后减少,在 7:50 左右达到峰值,网格数占比分别约为 93%、0.3%和 0.2%;中风险区略有减少。

d. 降雨后期(8:00—9:00),降雨强度逐渐减弱,较低风险区逐渐减少,模拟时段末网格数占比约

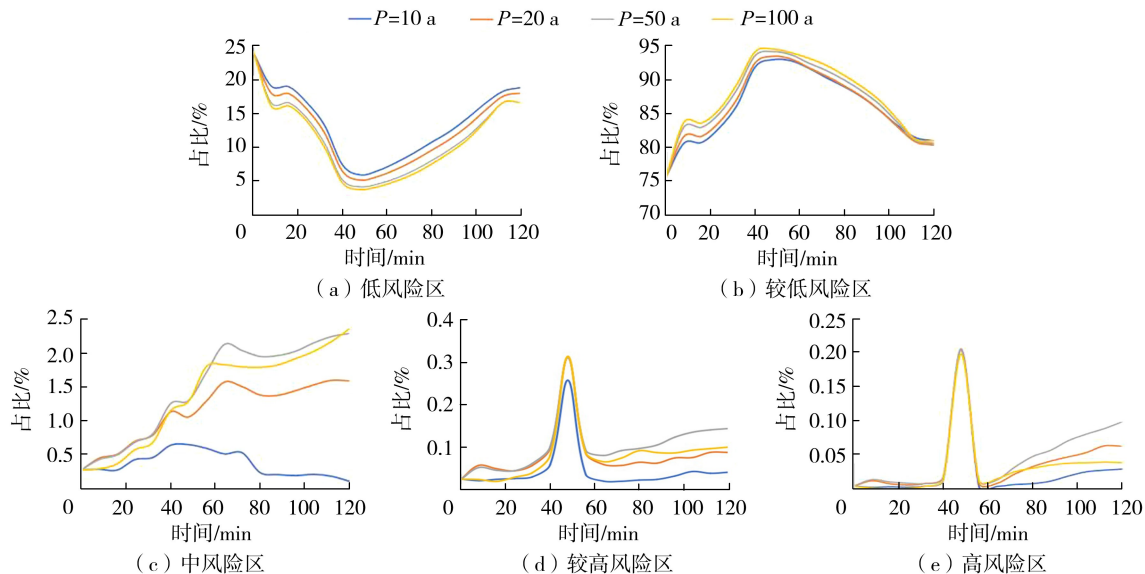


图 12 各风险等级网格数占比统计结果

Fig. 12 Statistical results of proportion of grid numbers at each risk level

为 81%,低风险区、中风险区、较高风险区和高风险区逐渐增多,模拟时段末网格数占比分别约为 18%、2%、0.1%和 0.1%。除 100 年一遇外,暴雨重现期越长,中风险区、较高风险区和高风险区网格数占比越大;而 100 年一遇暴雨情景下,出行人口相较于其他 3 个情景较少,削弱了人口脆弱性指标对人口生命损失风险的影响,因此,中风险区、较高风险区和高风险区网格数占比有所减小。

4 结 论

a. 不同暴雨重现期和不同暴雨发生时段对人口生命损失风险影响显著,且遵循一定规律,主要表现为暴雨重现期越长,人口生命损失风险越高;降雨过程中室外暴露人数先增多、后减少,人口生命损失风险先增大、后缓慢减小。

b. 评估模型可动态计算洪涝灾害情景下人口生命损失风险,能够直观地展现不同洪涝灾害情景下人口的分布变化及人口生命损失风险的演进过程,克服了精细化人口展布数据不足的问题,能够为城市洪涝灾害防灾减灾工作的开展提供理论支撑和参考依据。

参考文献:

[1] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等. 海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深-流速联合分布特征[J]. 水资源保护,2025,41(1):76-84. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1) : 76-84. (in Chinese))

[2] 王霞,王瑛,林齐根,等. 气候变化背景下中国滑坡灾害人口风险评估[J]. 气候变化研究进展,2022,18(2):166-176. (WANG Xia, WANG Ying, LIN Qigen, et al. Projection of China landslide disasters population risk under climate change [J]. Climate Change Research, 2022, 18 (2) : 166-176. (in Chinese))

[3] 季孔阳,李学明,高见,等. 城市暴雨洪涝灾害脆弱性评价[J]. 水利水电科技进展,2024,44(3):13-20. (JI Kongyang, LI Xueming, GAO Jian, et al. Assessment of urban vulnerability to heavy rain and flood disasters [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (3) : 13-20. (in Chinese))

[4] 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))

[5] 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))

[6] 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.

[7] 陈婧. 基于多主体仿真的功能湿地动态模拟研究:以华侨大学为例[D]. 泉州:华侨大学,2018.

[8] 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))

[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] 薛联青,潘桐,刘远洪. 基于 C-Vine Copula 的城市洪涝多致灾因子遭遇风险分析[J]. 水资源保护,2025,41(2):77-87. (XUE Lianqing, PAN Tong, LIU Yuanhong. Encounter risk analysis of multi-hazard factors of urban flood based on C-Vine Copula [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2) : 77-87. (in Chinese))

[12] 袁旭山,刘京会,宋珂. 基于 BP 神经网络的洪涝灾害承灾体脆弱性评估[J]. 人民长江,2024,55(2):26-34. (YUAN Xushan, LIU Jinghui, SONG Ke. Assessment on vulnerability of flood disaster bearing body based on BP neural network [J]. Yangtze River, 2024, 55 (2) : 26-34. (in Chinese))

[13] 郭啸天,李文波,王海雷,等. 基于 ABM 与 ABS 的暴雨洪涝人口风险动态模拟[J]. 计算机系统应用,2015,24(12):10-17. (GUO Xiaotian, LI Wenbo, WANG Hailei, et al. Population risk dynamic simulation for rainstorm flood disaster based on ABM and ABS [J]. Computer Systems & Applications, 2015, 24 (12) : 10-17. (in Chinese))

[14] 高玉琴,徐诺,汪键,等. 基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J]. 水资源保护,2025,41(2):115-122. (GAO

Yuqin, XU Nuo, WANG Jian, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 115-122. (in Chinese)

[15] MARTÍNEZ-GOMARIZ E, GÓMEZ M, RUSSO B. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding[J]. Natural Hazards, 2016, 82 (2): 1259-1278.

[16] 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.

[17] 侯俊, 陈诚, 郑玉磊, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原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))

[18] 韩亚静, 吴泽宁, 郭元, 等. 芝加哥雨型与城市灾害性降

水的比较研究[J]. 人民长江, 2022, 53 (5): 35-40. (HAN Yajing, WU Zening, GUO Yuan, et al. Comparative study on Chicago rainstorm pattern and urban disastrous precipitation[J]. Yangtze River, 2022, 53 (5): 35-40. (in Chinese))

[19] 杜晓丽, 郭闯, 杨明哲, 等. 不同降雨特征下透水沥青的径流系数变化[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 30-37. (DU Xiaoli, GUO Chuang, YANG Mingzhe, et al. Variation of runoff coefficient of permeable asphalt under different rainfall characteristics [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 30-37. (in Chinese))

[20] 高长松, 肖洋, 许栋, 等. 暴雨雨型对城市排水管网和地表洪涝过程的联合影响[J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 60-70. (GAO Changsong, XIAO Yang, XU Dong, et al. Combined impact of rainstorm patterns on urban drainage network and surface flooding process[J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 60-70. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 03 - 06 编辑: 施业)

(上接第 78 页)

[17] 殷兆凯, 廖卫红, 王若佳, 等. 基于长短时记忆神经网络 (LSTM) 的降雨径流模拟及预报[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17 (6): 1-9. (YIN Zhaokai, LIAO Weihong, WANG Ruojia, et al. Rainfall-runoff modelling and forecasting based on long short-term memory (LSTM) [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17 (6): 1-9. (in Chinese))

[18] 徐嘉远, 邹磊, 夏军, 等. TVGM-LSTM 耦合模型及其径流模拟效果分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 104-110. (XU Jiayuan, ZOU Lei, XIA Jun, et al. TVGM-LSTM coupling model and its runoff simulation effect analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 104-110. (in Chinese))

[19] 林康聆, 陈华, 陈清勇, 等. 耦合 Encoder-Decoder 的 LSTM 径流预报模型研究[J]. 武汉大学学报 (工学版), 2022, 55 (8): 755-761. (LIN Kangling, CHEN Hua, CHEN Qingyong, et al. Research on LSTM runoff forecast model coupled with Encoder-Decoder [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55 (8): 755-761. (in Chinese))

[20] 岳甲寅, 刘招, 毛钦男, 等. 结合 CNN-LSTM 模型融合卫星降水的洪水模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2025 (7): 52-59. (YUE Jiayin, LIU Zhao, MAO Qinnan, et al. Research on flood simulation by integrating satellite and ground precipitation with CNN-LSTM model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2025 (7): 52-59. (in Chinese))

[21] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323 (6088): 533-536.

[22] BENGIO Y, SIMARD P, FRASCONI P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5 (2): 157-166.

[23] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9 (8): 1735-1780.

[24] KRATZERT F, KLOTZ D, BRENNER C, et al. Rainfall-runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018, 22 (11): 6005-6022.

[25] 瞿思敏, 陆威村, 蒋思军, 等. 洪水预报的比例系数系统响应误差修正方法[J]. 水资源保护, 2025, 41 (2): 88-94. (QU Simin, LU Weicun, JIANG Sijun, et al. Proportional coefficient system response error correction method for flood forecasting [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2): 88-94. (in Chinese))

[26] 李琼芳, 许树洪, 周正模, 等. 基于系统微分响应的暴雨强度公式参数优化[J]. 水资源保护, 2022, 38 (5): 8-16. (LI Qiongfang, XU Shuhong, ZHOU Zhengmo, et al. Parameter optimization of rainstorm intensity formula based on system differential response method [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (5): 8-16. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 03 - 13 编辑: 施业)