

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

乔贤玲¹, 侯精明¹, 张文晴^{1,2}, 陈光照¹, 马鑫¹, 潘鑫鑫¹, 高徐军^{1,3}, 刘园³

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:以西安一小区居民楼为研究对象, 构建了高精度城市雨洪模型, 并通过实测暴雨内涝监测数据验证了模型的可靠性; 利用构建的模型模拟了6种设计降雨重现期下的居民楼室内动态淹没过程, 并以西安市中等收入家庭的房屋配置为计算单元, 分析了各类居民室内财产的淹没水深阈值, 依此拟合得到了室内财产淹没水深-损失率关系曲线, 结合居民楼在不同降雨重现期下的淹没水深, 计算得到了各居民楼在不同降雨重现期下的内涝淹没财产损失数据。结果表明: 不同降雨重现期下, 同一居民楼一层居民房屋室内进水淹没水深随降雨重现期的增大而增大; 同一降雨重现期下, 各栋居民楼因高程不一致导致内涝淹没过程及最大淹没水深不一样。

关键词:居民楼; 内涝淹没; 室内财产损失; 淹没水深损失率; 城市雨洪模型

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2023)05-0073-09

Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment//QIAO Xianling¹, HOU Jingming¹, ZHANG Wenqing^{1,2}, CHEN Guangzhao¹, MA Xin¹, PAN Xinxin¹, GAO Xujun^{1,3}, LIU Yuan³ (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 3. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Taking the residential buildings within a small community in Xi'an as the study object, a high-precision urban rain-flood model was constructed. The model's reliability was validated using measured data from monitoring instances of urban inundation during heavy rainfall. The dynamic flooding process inside the residential buildings under six different major rainfall return period design scenarios was simulated. Considering the housing configuration of middle-income families in Xi'an City as the computational unit, the depth thresholds for the flooding of various indoor properties were analyzed, and the relationship curve between the depth of indoor property flooding and the corresponding loss rate was derived. By combining this curve with the flooding depths of different residential buildings in the study area under various major rainfall return periods, accurate data on property losses due to flooding were obtained. The results indicate that under different rainfall recurrence intervals, the inundation depth of the ground floor of the same residential building increases with the larger recurrence interval. For the same recurrence interval, the flooding process and maximum inundation depth of houses in different residential buildings vary due to differences in elevation.

Key words: residential house; inundation; indoor property loss; loss rate of inundation water depth; urban rainfall-flood model

近年来全球气候持续变化, 极端暴雨事件频发, 超标降水量使城市内涝引发的灾害日益严峻^[1-3]。严重的内涝积水问题不仅给人们正常生活带来了极

大的不便^[4], 而且造成了巨大社会经济损失^[5], 如2012年7月20日北京遭遇特大暴雨造成直接经济损失百亿元以上, 郑州“7·20”暴雨事件造成的直

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079106); 中德合作交流项目(M-0427); 陕西省自然科学基金基础研究计划-引汉济渭联合基金重点项目(2022JC-LHJJ-09); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BEG02020)

作者简介: 乔贤玲(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事城市水利研究。E-mail: 1633911812@qq.com

通信作者: 侯精明(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事地表水及其伴随过程数值模型研究。E-mail: jingming.hou@xaut.edu.cn

接经济损失高达 532 亿元,因此开展居民室内财产损失评估对防灾决策具有重要意义^[6-7]。

现有的城市居民室内财产损失评估方法已趋于成熟,主要的技术手段可分为两类:一是利用室内财产损失的调查数据构建内涝致灾因子和财产损失之间的函数评估模型^[8]。该评估工作的主要难点在于获得准确的内涝致灾因子与房屋财产损失之间的对应关系,内涝致灾因子主要选取内涝积水深度这一影响最大的因素^[9-10]。在研究初期,相关学者采用灾后内涝洪痕调查与实际财产损失统计的方法评估内涝造成的财产损失,该方法可以得到较为准确的财产损失信息,但调查与统计所需的人工成本较大、效率较低^[11-12]。针对该方法的局限性,近年来大多采用拟合曲线的方式构建内涝致灾因子与财产损失之间的函数评估模型^[13],如廖永丰等^[7]以北京市中等收入家庭为研究单元,考虑居民室内常见财产的高度构建了淹没水深与财产损失之间的评估函数,黄国如等^[14]也采用此种方法得到了深圳市的内涝损失评估模型。该方法可以较为高效地得到淹没水深与财产损失之间的对应关系。二是通过城市内涝二维地表数值模型模拟得到高精度的内涝积水深度^[15-16]。研究表明,只有将准确的房屋淹没水深与内涝财产损失模型相结合才能得到可靠的内涝财产损失评估结果^[7,14]。城市二维水动力数值模型常用的软件有 DHI-MIKE、InfoWorks ICM 等^[17-18],若追求高精度的内涝积水结果,软件需输入高精度的地形高程数据,但城市内部地形复杂、建筑耸立,高精度的地形数据极易导致模型计算结果发散^[19]。因此,为获得准确的内涝积水信息,需要采用计算精度高且稳健的内涝数值模型。

现有的城市内涝模拟都是以城市某一大尺度片区为研究对象,未对房屋、道路等某一特定承灾体进行精细化模拟及对水流演进过程进行分析,对居民室内财产损失评估也都是在城市大尺度范围内进行统计分析。基于现有城市内涝模拟与室内损失研究的不足之处,本文以社区尺度的居民楼内涝淹没过程为研究对象,基于城市雨洪模型和修正重构后的高精度地形数据,得到各设计降雨工况下的居民楼内涝精细化淹没过程,以西安市中等收入家庭为研究单元,构建淹没水深与财产损失的函数关系,计算各降雨工况下不同居民楼一层的居民室内财产淹没损失,并以社区尺度的居民楼淹没效果为例,计算城市中不同居民楼的内涝淹没过程和财产损失,以期为大尺度城市级的内涝模拟和财产损失评估提供一种新方法。

1 城市雨洪精细化数值模拟方法

本文采用耦合了暴雨洪水管理模型(SWMM)一维管网模块和二维地表水动力模型的城市雨洪模型进行分析,该耦合模型计算包括一维管网与二维地表水动力两部分。

1.1 一维管网模型

一维管网模型的计算采用 SWMM,其操作较为简便,且能较为准确地模拟管网排水、水质等,在多种场景下均得到了广泛应用。SWMM 的管网水动力计算方法包括恒定流、运动波、动力波 3 种方法^[20],本文采用动力波方法计算管网的水力信息。动力波方法通过求解完整的一维圣维南方程对管道流态进行数值求解,理论上最符合实际情况。数值方法为有限差分法^[21]。

1.2 二维地表水动力模型

二维地表水动力部分以二维浅水方程作为控制方程^[22-25]。模型采用 Godunov 格式有限体积法^[26]对二维浅水方程进行空间离散;选用近似黎曼求解器(HLLC)^[27]处理计算单元界面上质量与动量通量的急变与非连续问题。洪涝过程中处理干湿交替问题时,在静水重构方法处理的基础上引进精度自适应性方法,即在干湿边界处水深急剧变化时将易失稳的二阶格式自动降为稳定的一阶格式来保证模型计算的稳定性^[28],并采用二阶显式 Runge-Kutta 法来保证时间积分的二阶精度;因城市雨洪过程模拟计算量大,过程复杂,为有效提高计算效率特引入图形处理器(GPU)加速技术^[29],GPU 内数以千计的核提供强劲的并行计算,而且显式 Godunov 格式的有限体积法适合 GPU 并行计算。

1.3 城市雨洪模型一二维耦合方法

城市地表与地下管网耦合最主要的问题是地表水流与管网水量的交换,而水量交换(入流或者溢流)都在雨水节点进行。水量交换具体过程如下:降雨在地表汇流产生地面径流进而通过雨水节点进入管道排入水体;若雨水管道超负荷运行,则会在雨水节点处发生满管溢流现象导致地表积水,在管道排水能力恢复正常时地表积水再经管网逐渐排入水体。

假设已知研究区域某雨水节点水位、对应地表网格水位以及地表网格高程,地表与管网水量交换有两种计算公式:①堰流公式,适用条件为雨水节点水位小于地表网格高程,此时地表水流通过雨水节点进入管网;②孔流公式,适用条件之一为雨水节点水位大于地表网格高程,此时管网中的水经雨水节点溢流至地表,另一适用条件为雨水节点水位在地

表网格高程与所对应的地表网格水位之间^[30],这时地表水流也会通过节点流至管网。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

天福和园小区位于陕西省西咸新区沣西新城丰信路以西、天府路以南、咸户路以东、公园大街以北。小区内共有居民住宅楼 10 栋,如图 1 所示,总面积为 6.02 hm²。区域自然降水量年际变化大,季节分配不均,雨量多集中在 7—9 月,9 月降水量最大,雨季暴雨频率较高,易造成洪涝等自然灾害^[31]。

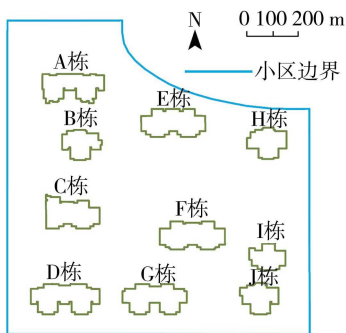


图 1 天福园小区示意图

2.2 数据来源

城市雨洪模型所需数据主要包括降雨数据、地形数据、土地利用类型及管网数据、下渗数据等。

2.2.1 降雨数据

本文设计降雨数据采用芝加哥雨型生成器^[32]依据西咸新区的特征参数生成,降雨总历时为 120 min,雨峰系数为 0.45。具有西咸新区特征参数的芝加哥降雨强度公式为

$$q = \frac{1239.1(1 + 1.9711 \lg P)}{(t + 7.4246)0.8124} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度; P 为重现期; t 为暴雨历时。计算得到各降雨重现期的降雨过程如图 2 所示。

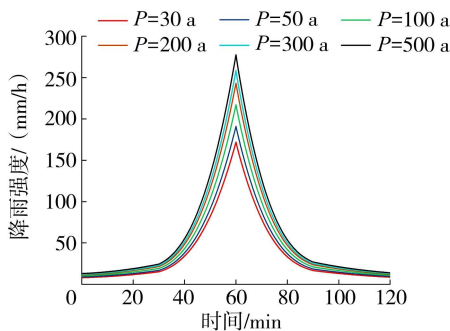


图 2 不同重现期设计降雨过程

2.2.2 地形数据

以往城市洪涝灾害研究中房屋都是不可淹没的建筑物,虽体现了城市地表的高低起伏,但忽略了水流对房屋内部的淹没与损坏^[33]。本文研究的居民

楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估需着重体现水流对房屋内部的淹没,因此对居民楼这类建筑物高程进行修正处理。根据房心回填厚度、GB 50096—2011《住宅设计规范》、GB 50037—2013《建筑地面设计规范》等要求及规范中相应设计取值^[34],将居民楼高程修正至高于房屋地基 15 cm,该处理既能体现城市内部地表高低起伏,又可在水深过高时体现房屋台阶与门槛的阻水作用以及水流流进室内对居民楼内部的淹没高度详情,可实现居民楼内涝淹没过程精细化模拟以及对居民室内财产损失评估提供淹没水深数据,提高了精细化模拟结果的准确性及研究的可靠性。图 3 为高程修正前后水流对房屋内部的淹没示意图。

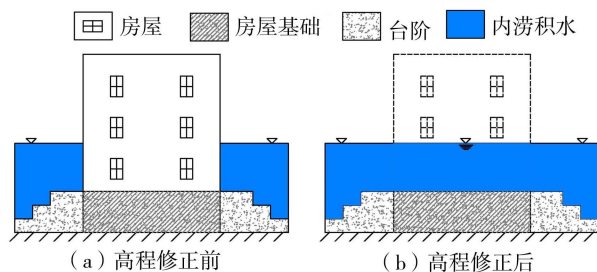


图 3 房屋高程修正前后内涝积水淹没房屋示意图

研究区地形数据通过无人机载激光雷达巡航测绘,最终获得网格大小为 1 m 的高精度地形高程数据(图 4),共计 70 200 个网格。区域呈现西北高东南低的趋势,本文使用的高精度地形能精确反映研究区内的二维水动力过程,体现水流对房屋内部的淹没过程。

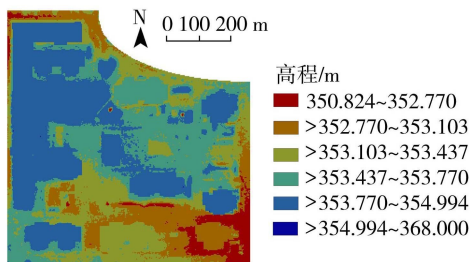


图 4 研究区地形

2.2.3 土地利用类型及管网数据

研究区域土地利用类型包括房屋、道路、绿地、半透水区 4 种,其中房屋总面积为 9 836 m²,道路面积为 5 544 m²,研究所需居民楼占地面积为 8 356 m²。管网根据实际建设资料概化为 57 根雨水管道、56 个雨水节点以及 2 个外排口。根据管道材质,设置雨水管的曼宁系数为 0.015。土地利用及管网分布如图 5 所示。

2.2.4 下渗数据

各土地利用类型的下渗数据根据文献^[32]及实测资料确定,结果如表 1 所示。

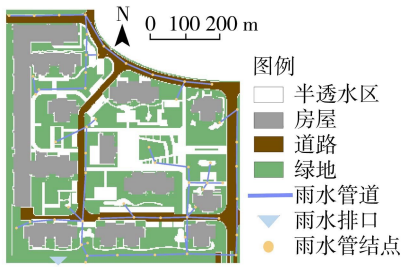


图5 土地利用及管网分布

表1 研究区域不同土地利用类型的下渗速率和曼宁系数

土地利用类型	下渗速率/(cm/h)	曼宁系数/(s/m ^{1/3})
房屋	0.000	0.014
道路	0.000	0.015
绿地	20.000	0.060

小区内布设有自动雨量站和流量计,模型验证和率定实测数据来自自动雨量站记录的降雨数据和相同时段内西南排口的实测流量数据。采用研究区域2017年9月9日和9月26日降雨数据和排口流量数据验证所构建的模型,模拟结果如图6所示。

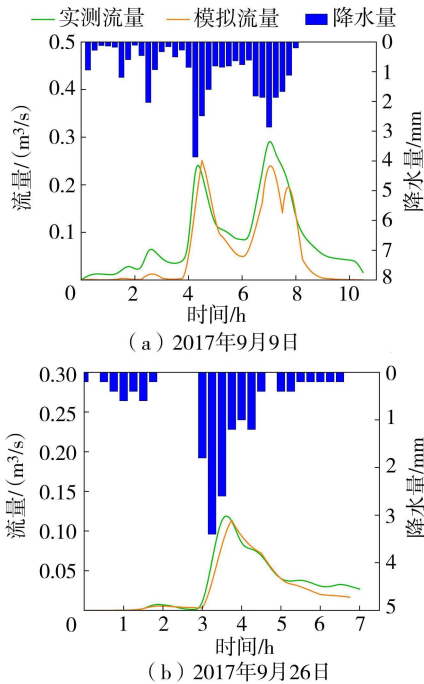


图6 实测流量与模拟流量对比

引进纳什系数来判断模拟结果的准确性,当纳什系数大于0.5时,模型可靠度较高,且数值越大模拟结果更准确。根据表1下渗数据,2017年9月9日场次降雨数据的纳什系数为0.89,9月26日场次降雨数据的纳什系数为0.73,两场雨的纳什系数均大于0.5,可见在该套下渗参数下模型模拟结果良好,可准确模拟研究区域内涝过程。

3 室内财产损失评估流程

3.1 室内财产损失评估基础数据

基于现阶段西安市居民室内财产基本情况,设

计中等收入家庭拥有建筑面积为103 m²的商品房,房屋结构为两间卧室、一间餐厅、一间客厅、一个卫生间、一间厨房和一个阳台,按照西安市居民家庭装修、家用电器、家具等设计室内财产^[7]。

3.1.1 家庭装修损失

根据GB 50327—2001《住宅装饰装修工程施工规范》,城市住宅装修工程包括地面铺装、墙面铺装、涂饰、卫生器具及管道安装、电气、门窗、轻质隔墙等7项主要工程。当房屋进水时,位于高处的窗、防水的洗浴设施等可以忽略淹没损失,故室内装修损失只需考虑墙面铺装、地面铺装及木质门。

每户住宅卫生间和厨房地面为瓷砖铺装,其余房间按木质地板铺装设计。因此,地面铺装损失只计入木质地板损失。室内使用面积按照建筑面积的85%来测算,其中卫生间和厨房共占使用面积的20%。根据《2014年中国地板行业互联网指数研究报告》,居民购买的加权地板平均价格为250元/m²,人工成本为18元/m²。103 m²标准住宅木制地板铺装面积为70 m²,计算得地板铺装总成本为18760元。

卫生间和厨房墙面为瓷砖,其余墙面为墙纸或墙漆铺装。水淹之后墙漆和墙纸会损坏,需要将所有墙面重新铺装粉饰,刷漆部分包括卧室墙面、餐厅墙面、客厅墙面与阳台墙面。根据调查装修市场报价,西安市包工包料的平均刷漆成本为12元/m²,则刷漆总成本为2534元。

房屋卧室门为木质,其余门为合金。木质门在浸水之后会发生变形,更换概率高,因此只考虑两间卧室木质门的财产损失。根据西安市装修报价,实木复合门700~2800元不等,本文选取2550元/樘,共计木质门财产损失为5100元。

3.1.2 家用电器损失

根据《西安统计年鉴(2018)》中的居民电器种类进行家用电器情况分析^[35],共选取与居民生活相关的12种电器。根据各大电子商务平台上家用电器零售价估算家用电器支出,统计得到全市居民家庭家用电器配置及支出如表2所示。

表2 西安市居民家庭家用电器配置及支出统计

家用电器	单户配置/台	单价/元	支出/元
洗衣机	1.003	3281	3291
电冰箱	0.956	3200	3060
微波炉	0.456	640	291
彩色电视机	1.157	3800	4396
空调	1.373	3000	4120
热水器	0.852	1500	1278
洗碗机	0.014	2300	32
移动电话	2.455	3000	7365
照相机	0.746	4625	3450
排油烟机	0.837	2456	2056
钢琴	0.049	36750	1800
打印机	1.010	1040	1050

3.1.3 家具损失

按照西安市居民家庭生活基本生活需求,居民家庭家具主要包括衣柜、床、沙发、橱柜等,价格参照各电子平台上的报价。沙发一般为皮制品或者布艺品,床垫的主要材料为布料,其他常见的家具一般为木质,水淹后不会对其结构功能造成永久性破坏,不影响正常使用,忽略其财产损失,统计得到居民家庭家具配置及支出如表3所示。

表3 西安市居民家庭家具配置及支出统计

家具	单户配置/台	单价/元	支出/元
衣柜	1	4070	4070
床垫	2	2880	5760
橱柜	4	700	2800
沙发	1	2690	2690
茶几	1	1400	1400
床	2	2880	5760
电视柜	1	2000	2000
鞋柜	2	900	1800

3.1.4 生活用品损失

服装、家庭日用杂品、纺织品等日用消费品也是居民室内财产的重要组成部分,极易被淹没损坏。根据《西安统计年鉴(2018)》中的西安市人均消费情况,对每个家庭的生活用品价值进行估算和统计,其中服装、家用纺织品、文化娱乐用品、家庭日用杂品价值分别为3840、500、2616、1150元。

3.2 室内财产淹没水深阈值

墙面装修包括踢脚线和墙面粉饰,西安市目前室内装修设计多取10cm的踢脚线高度,地板高度为4cm,得到一层住宅墙面淹没水深阈值为14cm。水深超过门下边缘高度时木质门产生损失,门与地面铺装之间留1cm空间再计入地板高度4cm,得到门的淹没水深阈值为5cm。

对于家用电器受损情况,手机在水淹时可将其移至高处忽略其损失;电视机置于电视柜上,水深超过电源控制系统便造成电路损坏,电视机的淹没水深阈值为地板高度、电视柜的安装高度、安装底座至电源控制系统距离之和;洗衣机受损是电机浸水,其淹没水深阈值为电机安装高度加地板高度;电冰箱淹没水深阈值取决于压缩机安装高度;空调一般为挂式空调,安装高度为墙壁200cm处;热水器安装在墙壁185cm处;微波炉放置于橱柜上,其淹没水深阈值为橱柜顶面高度加微波炉脚架高度;洗碗机一般嵌入橱柜,淹没水深阈值为地板高度加洗碗机主机高度;排油烟机安装在墙壁70cm高度处,其安装高度即为淹没水深阈值。

家具受损条件是水位超过其木质底部。衣柜高度一般为2.0m,在装修时离地板有10cm的高度且

衣柜较高,房屋进水但水位不超过衣柜的1/2时部分板材完好,后期可修复,将其定损为75%;鞋柜淹没水深阈值为6cm;沙发淹没水深阈值为地板高度4cm;茶几淹没水深阈值为茶几高度与地板高度之和;床的淹没水深阈值为地板高度;床一般高45cm,床垫淹没水深阈值为床高加地板高度;橱柜一般有地柜和壁柜,地柜高度一般为85cm,价值约为总橱柜价值的65%,壁柜高度一般为170cm,价值为35%。

室内日用消费品主要有服装、家用纺织品、文化娱乐用品和家庭日用杂品。服装一般放在衣柜中,淹没水深阈值为45cm;家用纺织品淹没水深阈值为60cm;文化娱乐用品和家庭日用杂品一般置于桌面上,确定淹没水深阈值为80cm。

统计上述各类财产的淹没水深阈值,结合各类财产价值,确定特定水深下财产损失组合、增加财产损失、累计财产损失及损失率如表4所示。

表4 特定水深下室内财产损失及损失率

水深/cm	增加损失财产	增加财产损失/元	累计财产损失/元	财产损失率/%
4	地板、电冰箱、洗碗机、床、沙发	30302	30302	35.62
8	门、鞋柜	6900	37692	44.31
14	墙面、洗衣机、衣柜、橱柜地柜	10697	48371	56.87
20	钢琴、电视柜	3800	52171	61.33
40	打印机、照相机、茶几	5900	58071	68.27
50	床垫、服装	9600	67671	79.55
60	电视机、家用纺织品	4896	72567	85.31
70	排油烟机	2056	74623	87.73
80	文化娱乐用品、家庭日用杂品	3766	78389	92.16
90	微波炉	291	78680	92.50
170	橱柜壁柜	800	79660	93.65
185	热水器	1278	80938	95.16
200	空调	4120	85058	100.00

3.3 室内财产淹没损失及损失率关系

基于表4淹没水深与财产损失率的数据,选取对数函数进行拟合,拟合效果良好,决定系数 $R^2 = 0.983$ 。天福和园居民家庭淹没水深-财产损失率关系式为

$$y = 0.402 + 0.007 \ln(x - 3.25) \quad (2)$$

式中: x 为淹没水深; y 为财产损失率。

若获得某房屋的家庭财产总价值与淹没水深,可以通过式(2)计算该居民室内财产损失值。图7为居民室内财产损失评估流程,通过统计各类数据可逐步得出淹没水深-财产损失率关系曲线。

4 结果与分析

4.1 居民楼内涝淹没过程精细模拟

在选取的各降雨重现期中,500年一遇的设计降雨重现期最大,其最能体现研究区域各栋楼一层

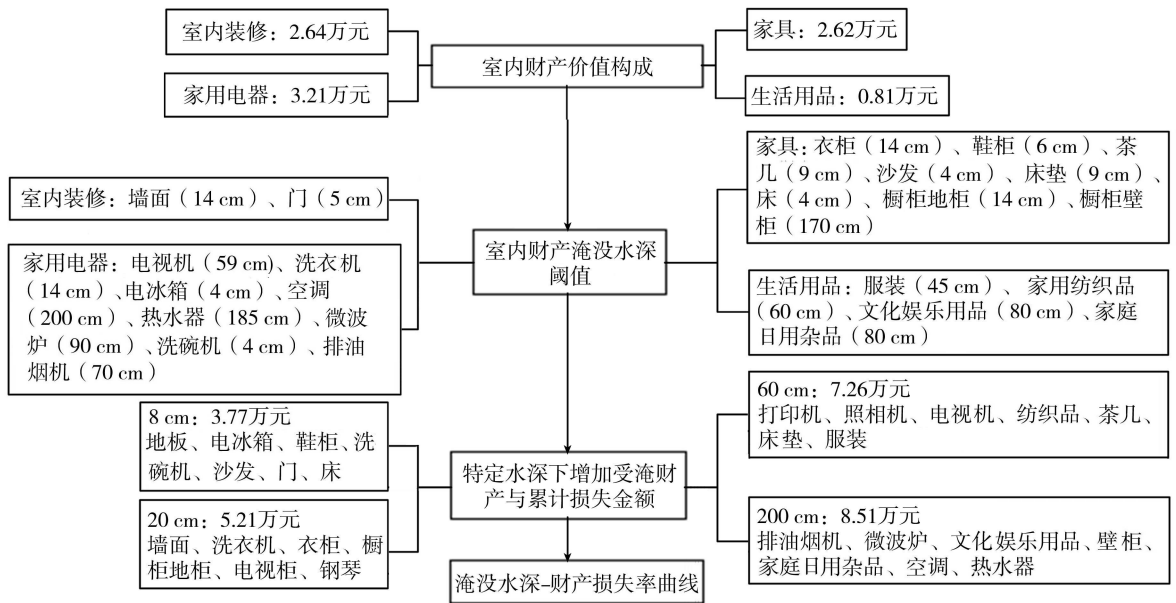


图7 居民室内财产损失评估流程

居民房屋内涝淹没过程,故选取500年一遇降雨重现期下各栋楼一层居民房屋内涝淹没过程进行分析。500年一遇降雨重现期下研究区域的雨洪过程精细模拟结果如图8所示。由于本文研究对象为居民楼,故在模拟结果中仅展示居民楼的淹没积水过程,对道路、绿地等其他土地利用类型的积水过程不进行展示。由图8可知,在500年一遇的降雨重现期下各栋楼一层居民房屋总体内涝淹没演进过程不一样,A~I栋的内涝淹没水深都是呈现先增加后减

小的趋势,J栋淹没水深则是一直增长,其原因是研究区域地形整体东北高西南低且J栋高程修正后在10栋楼中最低,其他地区的地表径流由于重力自然流向J栋所在的低洼区域,从而导致J栋一层房屋的水深一直增加,且最后时刻显著大于其他楼的水深。

对比各栋楼一层居民房屋在各设计降雨重现期下内涝淹没过程的变化情况,如图9所示。由图9可以看出,同一栋楼的一层居民房屋内涝淹没趋势在不同降雨重现期下都相同,只有最大淹没水深会

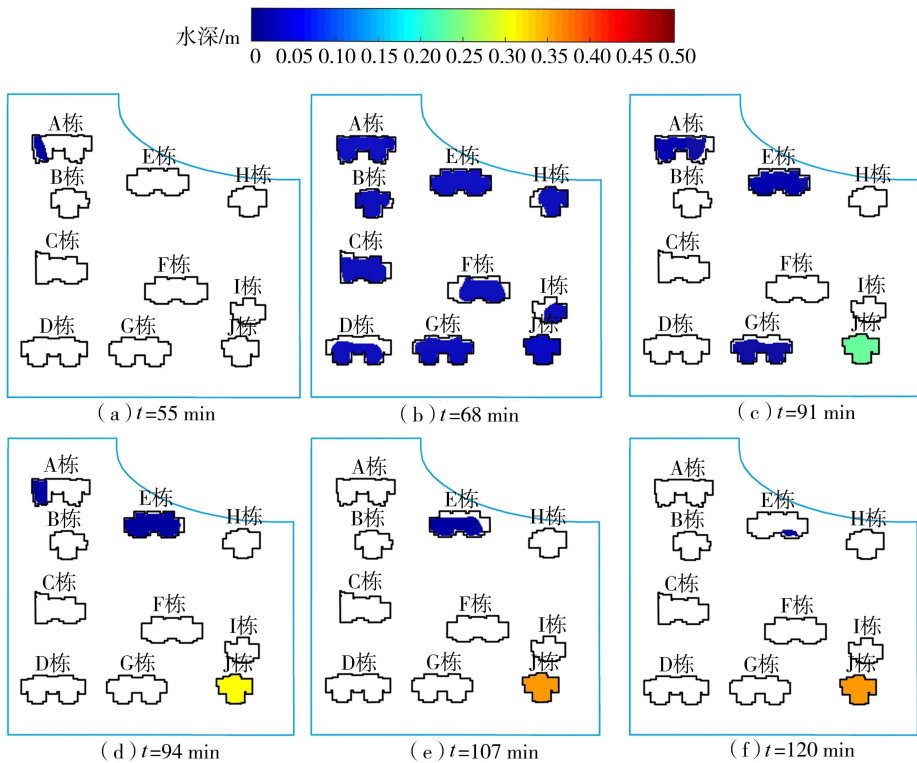


图8 500年一遇设计降雨重现期下各栋楼居民房屋内涝演进过程

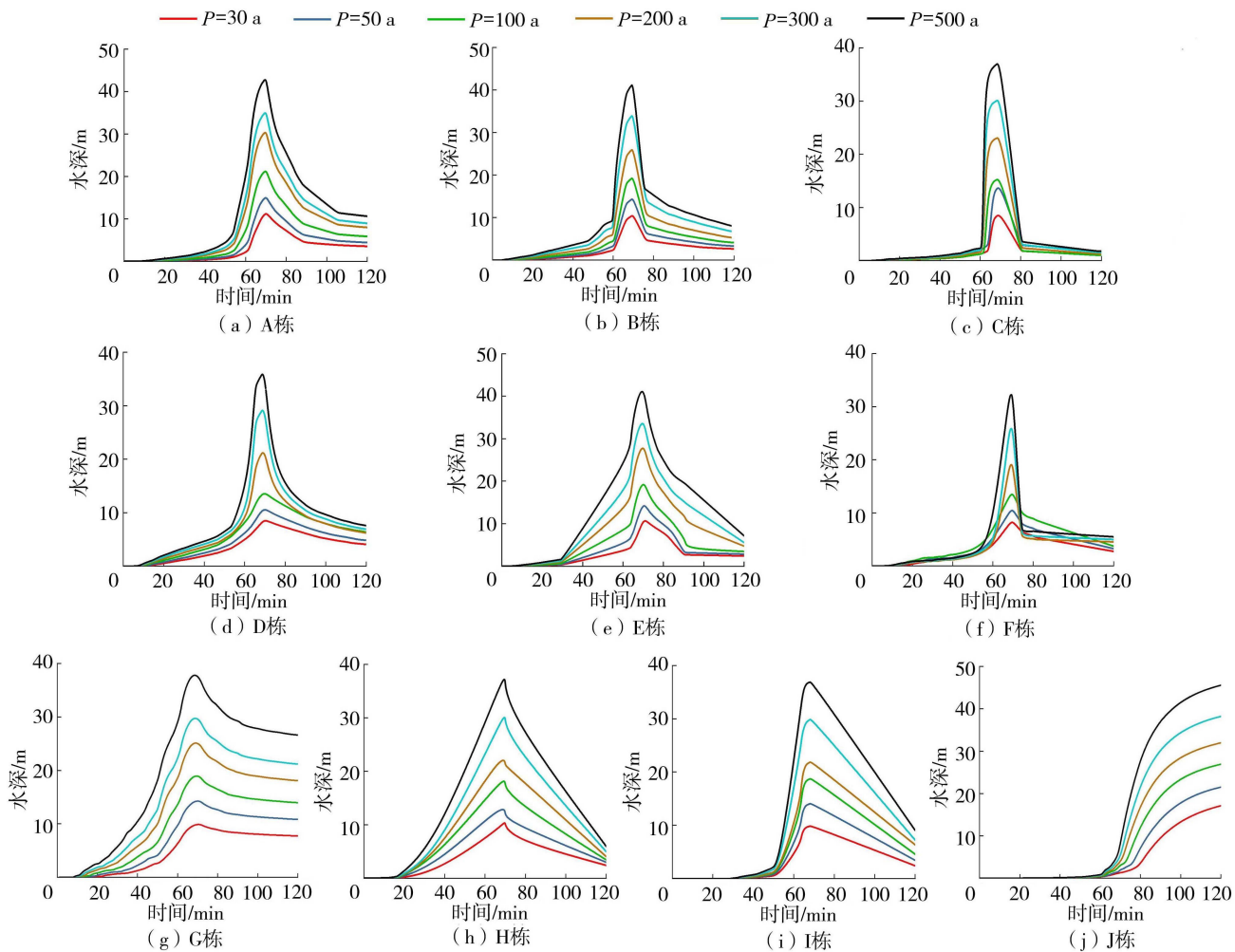


图9 不同降雨重现期下各栋楼一层居民房屋内涝淹没过程

发生变化。随着降雨重现期的增大,各栋楼内一层居民房屋最大淹没水深逐渐增加,如A栋的一层居民房屋最大淹没水深在30、50、100、200、300、500 a降雨重现期条件下分别为11.33、15.12、21.38、30.56、35.20、43.07 cm。此外根据图9还可以得出,不同楼的一层居民房屋在同一降雨重现期下淹没过程呈现不一样的变化趋势,最大水深也不同,如在100年一遇的降雨重现期下A栋、B栋、C栋、D栋、E栋、F栋、G栋、H栋、I栋、J栋内的一层居民房屋达到的最大淹没水深分别为21.38、19.53、15.42、13.84、20.09、13.69、19.16、18.99、14.65、26.92 cm。

4.2 居民室内财产损失评估

根据图9与淹没水深-损失率关系曲线得出研究区域各栋楼一层居民房屋在不同降雨重现期下的室内财产损失及研究区域总财产损失。以居民房屋室内地面为基准,水深超过0 cm即可认为室内进水受淹,水深超过财产淹没水深阈值表明室内财产发生损失。根据建筑使用面积及前文统计的室内财产价值总和,得出居民室内单位面积最大损失财产为970元/m²。在计算各栋楼的一层居民室内财产损失时,先根据模拟得到的各栋楼内一层居民房屋淹

没水深确定财产损失率,然后将不同淹没水深对应的损失率与室内单位面积最大损失财产970元/m²相乘得到不同淹没水深情况下的室内单位面积财产损失数据,最后将其与各栋楼的一层居民房屋面积相乘后得到各栋楼的一层居民室内财产总损失值。

研究区域内共有10栋楼,6种设计降雨重现期下因城市内涝淹没造成的一层居民房屋室内财产总损失如表5所示。由表5可知,随着降雨重现期的增大,各栋楼总居民室内财产损失不断增大。其原因主要是随着降雨重现期的增大,居民楼因内涝淹没进水越多,水深越高,造成的居民室内财产总损失随之增多;在同一降雨重现期下,各栋楼的一层居民楼因内涝造成的室内财产总损失数值不一样,原因主要是各栋楼高程不一致导致淹没水深不同以及各栋楼一层居民房屋室内总占地面积大小不等。不同降雨重现期下各栋楼一层居民房屋室内财产总损失值相差不大是因为在一个淹没水深高度范围内,损失相差不大,即水深在0.1~0.5 m时,主要受损财产为小型家用电器、墙面装修等,其中无高价值的财产,不会引起损失金额大幅度变化,损失率曲线增长幅度缓慢。

表5 不同降雨重现期下各栋楼一层居民房屋室内淹没财产损失最大值

居民楼	室内财产总损失/万元					
	$P=30 a$	$P=50 a$	$P=100 a$	$P=200 a$	$P=300 a$	$P=500 a$
A 栋	47.12	47.43	47.76	48.09	48.21	48.38
B 栋	37.04	37.31	37.54	37.75	37.94	38.07
C 栋	44.34	44.85	44.92	45.30	45.56	45.70
D 栋	56.85	57.16	57.48	58.03	58.37	58.59
E 栋	53.88	54.24	54.58	54.96	55.15	55.34
F 栋	49.41	49.71	50.00	50.36	50.65	50.86
G 栋	21.93	22.10	22.23	22.36	22.45	22.54
H 栋	28.20	28.43	28.61	28.74	28.87	28.98
I 栋	25.72	25.85	26.01	26.23	26.38	26.48
J 栋	31.89	32.04	32.17	32.28	32.38	32.48
合计	396.38	399.12	401.30	404.10	405.96	407.42

5 结 论

a. 本文采用的城市雨洪模型适用于模拟社区尺度房屋内涝淹没过程。考虑到各地情况不同,本文拟合出的天福和园居民室内淹没水深-财产损失率曲线不具有普适性,仅可为西安市内的居民室内财产损失评估提供依据,其他地区的淹没水深-财产损失率曲线需根据当地具体情况进行拟合。

b. 不同降雨重现期下,同一栋楼一层居民房屋室内进水淹没水深随降雨重现期的增大而增大;同一降雨重现期下,各栋楼居民房屋因高程不一致导致内涝淹没过程及最大淹没水深不一样;J 栋一层房屋淹没水深在模拟时间内持续上升,无下降趋势,其原因为 J 栋高程在 10 栋楼中最低,研究区域西北高东南低的地形导致洪水向西南方向汇流。

c. 同一栋楼居民房屋,随着降雨重现期的增大,居民室内财产损失不断增大;在同一降雨重现期下各居民楼因内涝造成的室内财产损失数值不一样。

参考文献:

[1] 曹雪健,戚友存,李梦迪,等. 极端暴雨威胁下的城市内涝风险预警系统研究[J]. 大气科学,2022,46(4):953-964. (CAO Xuejian, QI Youcun, LI Mengdi, et al. Early warning system of urban waterlogging under the threat of extreme rainfall events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(4):953-964. (in Chinese))

[2] 黄华兵,王先伟,柳林. 城市暴雨内涝综述:特征、机理、数据与方法[J]. 地理科学进展,2021,40(6):1048-1059. (HUANG Huabing, WANG Xianwei, LIU Lin. A review on urban pluvial floods: characteristics, mechanisms, data, and research methods [J]. Progress in Geography, 2021, 40(6):1048-1059. (in Chinese))

[3] 张珂. 城市极端暴雨及洪涝灾害防控薄弱环节分析与对策[J]. 中国水利,2021(15):21-23. (ZHANG Ke. Analysis and proposed countermeasures of the weaknesses

of prevention and control for extreme rainfall induced urban flooding and waterlogging [J]. China Water Resources, 2021(15):21-23. (in Chinese))

[4] 吴先华,肖杨,李廉水,等. 大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评[J]. 科学通报,2017,62(9):920-927. (WU Xianhua, XIAO Yang, LI Lianshui, et al. Review and prospect of the emergency management of urban rainstorm waterlogging based on big data fusion [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(9):920-927. (in Chinese))

[5] 傅春,付耀宗,肖存艳,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))

[6] 李雯,姜仁贵,解建仓,等. 基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型[J]. 水资源保护,2022,38(5):51-57. (LI Wen, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Emergency management model of urban waterlogging disaster based on system dynamics [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):51-57. (in Chinese)).

[7] 廖永丰,赵飞,邓岚,等. 城市内涝灾害居民室内财产损失评价模型研究[J]. 灾害学,2017,32(2):7-12. (LIAO Yongfeng, ZHAO Fei, DENG Lan, et al. Research on the urban residential indoor property loss assessment model for urban rainstorm waterlogging [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2):7-12. (in Chinese)).

[8] HSU W K, HUANG P C, CHANG C C, et al. An integrated flood risk assessment model for property insurance industry in Taiwan [J]. Natural Hazards, 2011, 58(3):1295-1309.

[9] NASCIMENTO N, MACHADO M L, BAPTISTA M, et al. The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context [J]. Urban Water Journal, 2007, 4(3):195-210.

[10] MCBEAN E A, GORRIE J, FORTIN M, et al. Flood depth-damage curves by interview survey [J]. American Society

- of Civil Engineers, 1988, 114(6):613-634.
- [11] 莫婉媚,方伟华. 浙江省余姚市室内财产洪水脆弱性曲线—基于台风菲特(201323)灾后问卷调查[J]. 热带地理, 2016, 36(4): 633-641. (MO Wanmei, FANG Weihua. Empirical vulnerability functions of building contents to flood based on post-typhoon (Fitow, 201323) questionnaire survey in Yuyao, Zhejiang [J]. Tropical Geography, 2016, 36(4): 633-641. (in Chinese))
- [12] 曹诗嘉,方伟华,谭骏. 基于海南省“威马逊”及“海鸥”台风次生海岸洪水灾后问卷调查的室内财产脆弱性研究[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 188-195. (CAO Shijia, FANG Weihua, TAN Jun. Vulnerability of building contents to coastal flooding based on questionnaire survey in Hainan after Typhoon Rammasun and Kalmeagi [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 188-195. (in Chinese))
- [13] PENNING-ROUSELL E, VAVATTENE C, PARDOE J, et al. The benefits of flood and coastal risk management: a handbook of assessment techniques [M]. London: Middlesex University Press, 2010.
- [14] 黄国如,李碧琦. 基于 InfoWorks ICM 的深圳市内涝灾害居民室内财产损失研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(2): 71-79. (HUANG Guoru, LI Biqu. Study on indoor property loss of Shenzhen residents caused by waterlogging disaster based on InfoWorks ICM [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(2): 71-79. (in Chinese))
- [15] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 66-70. (HUANG Guoru, WANG Xin, HUANG Wei. Simulation of rainstorm water logging in urban area based on InfoWorks ICM Model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 66-70. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 吴思,王芳,齐同湘,等. DHI MIKE 软件在武汉市典型雨水系统评估中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(19): 113-115. (WU Si, WANG Fang, QI Tongxiang, et al. Application of DHI MIKE software to assessment of typical stormwater systems for Wuhan City [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(19): 113-115. (in Chinese))
- [18] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等. 基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaiyun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_
- ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49. (in Chinese))
- [19] HOU Jingming, LIANG Qihua, SIMONS F, et al. A stable 2D unstructured shallow flow model for simulations of wetting and drying over rough terrains [J]. Computers & Fluids, 2013, 82: 132-147.
- [20] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [21] 侯精明,董美君,李东来,等. 超标暴雨下城市雨水管网排水效果:以西安市沣西新城为例[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 427-436. (HOU Jingming, DONG Meijun, LI Donglai, et al. Drainage effect of urban drainage-pipe network under extreme rainstorms: taking Fengxi new city in Xi'an City, China as an example [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 427-436. (in Chinese))
- [22] 侯精明,李桂伊,李国栋,等. 高效高精度水动力模型在洪水演进中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 96-107. (HOU Jingming, LI Guiyi, LI Guodong, et al. Application of efficient high-resolution hydrodynamic model to simulations of flood propagation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2): 96-107. (in Chinese))
- [23] 陈光照,侯精明,同玉,等. 基于大气-水动力集成模型的城市内涝模拟预报研究[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(3): 330-336. (CHEN Guangzhao, HOU Jingming, TONG Yu, et al. Urban inundation simulation forecasting based on atmosphere-hydrodynamic integrated model [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(3): 330-336. (in Chinese))
- [24] 张文晴,侯精明,王俊琿,等. 耦合 NSGA-II 算法与高精度水动力模型的 LID 设施优化设计方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 133-142. (ZHANG Wenqing, HOU Jingming, WANG Junhui, et al. Optimization design method of LID facilities coupling NSGA-II algorithm and high-precision hydrodynamic model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(4): 133-142. (in Chinese))
- [25] 杨东,侯精明,李东来,等. 基于扩散波方法的管网排水过程数值模拟[J]. 中国给水排水, 2020, 36(15): 113-120. (YANG Dong, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Numerical simulation of pipe network drainage process based on diffusion wave method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 113-120. (in Chinese))

(下转第 106 页)

- [15] 张建伟, 亢飞翔, 边汉亮, 等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2020(增刊2): 1-6 [2022-12-11]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0097>. (ZHANG Jianwei, KANG Feixiang, BIAN Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles [J/OL]. Rock and Soil Mechanics, 2020 (Sup2): 1-6 [2022-12-11]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0097>. (in Chinese))
- [16] 李军海, 接道波, 张涛, 等. 工业副产品木质素的岩土工程应用与发展[J]. 路基工程, 2015(1): 43-47. (LI Junhai, JIE Daobo, ZHANG Tao, et al. Application and development of lignin of industrial by-product in geotechnical engineering [J]. Subgrade Engineering, 2015 (1): 43-47. (in Chinese))
- [17] CHEN Qingsheng, INDRARATNA B, CARTER J, et al. A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 316-327.
- [18] KIM S, GOPALAKRISHNAN K, CEYLAN H. Moisture susceptibility of subgrade soils stabilized by lignin-based renewable energy coproduct [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(11): 1283-1290.
- [19] KONG Xianghui, SONG Shuguang, WANG Mingyue, et al. Experimental research of low liquid limit silt stabilized by lignin in the flooding area of Yellow River [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(6): 5211-5217.
- [20] AL-MUKHTAR M, KHATTAB S, ALCOVER J F. Microstructure and geotechnical properties of lime-treated expansive clayey soil [J]. Engineering Geology, 2012, 139-140: 17-27.
- [21] VINOD J S, INDRARATNA B, MAHAMUD M A A. Stabilisation of an erodible soil using a chemical admixture [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 2010, 163(1): 43-51.

(收稿日期: 2022-11-07 编辑: 俞云利)

(上接第 81 页)

- [26] 齐文超, 侯精明, 刘家宏, 等. 城市湖泊对地表径流致涝控制作用模拟研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(9): 8-18. (QI Wenchao, HOU Jingming, LIU Jiahong, et al. Lake control on surface runoff causing urban flood inundation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(9): 8-18. (in Chinese))
- [27] 潘鑫鑫, 侯精明, 陈光照, 等. 基于 K 近邻和水动力模型的城市内涝快速预报[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 91-100. (PAN Xinxin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Rapid forecasting of urban waterlogging based on K-nearest neighbor and hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(3): 91-100. (in Chinese))
- [28] 侯精明, 王润, 李国栋, 等. 基于动力波法的高效高分辨率城市雨洪过程数值模型[J]. 水力发电学报, 2018, 37(3): 40-49. (HOU Jingming, WANG Run, LI Guodong, et al. High-performance numerical model for high-resolution urban rainfall-runoff process based on dynamic wave method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(3): 40-49. (in Chinese))
- [29] HOU Jingming, LIANG Qihua, ZHANG Hongbin, et al. An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 66: 131-152.
- [30] 侯精明, 张兆安, 马利平, 等. 基于 GPU 加速技术的非结构流域雨洪数值模型[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 567-576. (HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, MA Liping, et al. Unstructured numerical model for rainfall-runoff process in watershed based on GPU acceleration technology [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(4): 567-576. (in Chinese))
- [31] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(1): 45-55. (in Chinese))
- [32] 马鑫, 侯精明, 李丙尧, 等. 建筑小区雨水花园空间布局对径流过程影响规律研究[J]. 环境工程, 2022, 40(12): 105-111. (MA Xin, HOU Jingming, LI Bingyao, et al. Influence law of rainwater gardens spatial layout on runoff process in building communities [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(12): 105-111. (in Chinese))
- [33] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562. (YIN Zhane, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562. (in Chinese))
- [34] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong Basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))
- [35] 西安市统计局, 国家统计局西安调查队. 西安统计年鉴(2018) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.

(收稿日期: 2022-10-08 编辑: 俞云利)