

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.008

基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型

李雯¹,姜仁贵^{1,2},解建仓¹,赵勇²,朱记伟¹,杨思雨¹

(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. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:采用系统动力学(SD)方法建立城市内涝灾害应急管理SD模型。在确定模型变量权重的基础上,通过构建模型方程式并绘制内涝灾害因果回路图和存量流量图实现对事件动态模拟仿真和敏感性分析。将构建的SD模型用于西安市一场典型内涝灾害事件的仿真分析,结果表明:随着时间增长,通过模拟仿真增加对技术因素、社会因素、管理因素和自然因素的管控,城市内涝灾害应急管理效果趋于变好;SD模型中不同变量对城市内涝灾害应急管理影响存在差异,需要不断完善应急预案,加强城市排水管网建设,提高应急决策时效性。

关键词:城市内涝灾害;应急管理模型;系统动力学;Vensim软件;西安市

中图分类号:TV212.5⁺3;X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0051-07

Emergency management model of urban waterlogging disaster based on system dynamics // LI Wen¹, JIANG Rengui^{1,2}, XIE Jiancang¹, ZHAO Yong², ZHU Jiwei¹, YANG Siyu¹ (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The system dynamics (SD) model of urban waterlogging emergency management is established by using the method of SD. On the basis of determining the weight of the model variables, the dynamic simulation and sensitivity analysis of the event are realized by building the model equation and drawing the causal circuit diagram and the stock flow diagram of the waterlogging disaster event. The SD model is applied to the simulation analysis of a typical waterlogging disaster event in Xi'an. The results show that with the increase of time, increase the control of technical factors, social factors, management factors and natural factors, and the emergency management effect of urban waterlogging disasters tends to be better. Different variables in the SD model have different effects on the emergency management of urban waterlogging disasters. It is necessary to continuously improve the emergency plan, strengthen the construction of urban drainage network, and improve the timeliness of emergency decision-making.

Key words: urban waterlogging disaster; emergency management model; system dynamics; Vensim software; Xi'an City

气候变化影响下全球和局地极端降水增加,城市化建设加快使得城市不透水面积增大^[1-2],城镇区域土地利用现状显著改变^[3],诸多因素共同作用下,城市内涝灾害事件频发^[4],影响城市健康发展^[5]。受季风气候影响,我国是洪涝灾害最严重的国家之一^[6],2007—2015年,发生过内涝的城市数量超过360个,据《2019年中国水旱灾害防御公报》统计数据,2019年全国因洪涝共造成4766.6万人

次受灾,658人死亡失踪,直接经济损失高达1922.7亿元。“逢雨就涝”和“城市看海”成为城市新常态^[7],造成严重经济损失和人员伤亡^[8-9],危害经济社会的可持续发展。2021年7月,欧洲遭遇“百年一遇”的洪灾,持续强降水席卷德国、比利时、荷兰等国家;我国河南省郑州市、新乡市等城市遭遇极端暴雨袭击造成严重人员伤亡和经济损失,引发相关部门以及广大专家学者关注。城市暴雨内涝事件受

基金项目:国家自然科学基金(71774132);陕西省创新能力支撑计划(2020KJXX-0092);陕西省教育厅重点科学研究计划(21JY028)

作者简介:李雯(1995—),女,博士研究生,主要从事城市防洪减灾研究。E-mail:185166402@qq.com

通信作者:姜仁贵(1985—),男,教授,博士,主要从事城市防洪减灾与管理决策研究。E-mail:jrengui@163.com

到自然和社会影响较大,频发、突发且不确定性大,具备突发事件特征^[10]。通过剖析城市暴雨内涝事件内在演化过程,为城市暴雨内涝灾害的应急管理、救援工作开展提供参考^[11],对保障人民群众生命财产安全有重要作用。

诸多学者针对城市内涝灾害开展了研究,取得大量成果。在应急管理方面,Lu 等^[12]提出了支持水敏感城市设计框架,通过快速评估城市洪水灾损,让城市水资源管理者开展洪水风险管理决策;Yang 等^[13]通过将多智能体系与地理信息有机融合,对动态风险下政府与居民之间相互作用进行模拟,快速准确地收集和分析信息,提高救灾效率和城市防洪减灾能力。在应急决策方面,丁继勇等^[14]基于贝叶斯法则提出了暴雨内涝应急方案动态生成方法,为城市暴雨内涝应急决策提供参考;马文笑等^[15]提出突发环境事件应急决策方法,并在此基础上构建基于案例推理的应急决策模型。在城市排水方面,徐祖信等^[16]引入水质特征因子概念建立雨污水管网化学质量平衡方程,对地下水入渗量进行定量分析;陈义等^[17]构建了考虑管网线混接情况的排水管网有向图集合模型,通过广度搜索和计算机技术,快速计算排水管网水量。在海绵城市方面,李春林等^[18]采用 SWMM 模型对城市化前、城市化后和实施低影响开发措施后 3 种情景的水文水质过程进行模拟对比,为海绵城市建设提供参考;黄绵松等^[19]采用二维水动力雨洪模型,模拟固原海绵城市研究区在典型降雨设计过程下海绵城市建设前后内涝积水情况,分析内涝削减效果;徐宗学等^[20]对国内外城市雨洪模型和水文效应等进行对比分析,提出我国海绵城市建设过程中面临的问题和精细化模拟思路。现有文献主要集中在风险评估、机理分析、数值模拟以及海绵城市建设等工程措施方面^[21],针对城市内涝灾害应急管理方面的研究相对较少。

自 1956 年 Forrester 教授提出系统动力学(system dynamics,SD)后,逐渐形成了集系统理论、信息反馈理论、决策理论、仿真技术和电子计算机理论为一体的学科,为城市内涝灾害应急管理提供理论基础^[22]。本文将城市内涝作为突发事件进行处理,基于 SD 方法,构建城市内涝灾害应急管理 SD 模型,采用 Vensim 软件对城市内涝事件进行模拟仿真和敏感性分析,研究内涝事件内部不同影响因素之间相互关系、作用机理和影响模型变化的敏感因素,以期为城市内涝灾害应急管理和防洪减灾提供支撑。

1 SD 模型构建

1.1 影响因素分析

城市内涝灾害应急管理系统包括:监测预警、应急响应、物资储备和应急救援等一系列环节,是个复杂的大系统。本文在前期研究基础上,将城市内涝灾害应急管理系统划分为事前准备子系统、事中处理子系统和事后处置子系统。通过这 3 个子系统的相互影响、相互作用,共同构成一个有机整体^[23]。城市内涝事件的应急管理是一个动态变化过程,需要综合考虑诸多要素的影响,因此子系统既可以看作复杂系统的输入,也可以看作复杂系统的输出,根据子系统之间相互关系构建事前准备、事中处理和事后处置 3 个环节相互嵌套关联的 SD 模型。

SD 模型由因果回路图和存量流量图构成。因果回路图能够描述系统变量之间的逻辑关系,但是无法表达系统内部构成要素的变量性质;想要定量分析系统内部变量,需要基于因果回路图的因果关系通过模型方程式构建存量流量图。系统存量流量图能够针对系统内部的要素和信息之间的相关关系,结合定量描述,得到全部时间上系统动态变化的行为状态。

1.2 因果回路图

Vensim 软件是美国 Ventana 公司设计的可视化建模工具,用户能够基于该软件快速建立一个新的动态模型^[24],绘制城市内涝灾害事件因果回路图和存量流量图,建立 SD 模型。Vensim 软件提供针对模型的多种分析方法,主要包括结构分析和数据分析,实现对模型的检验和纠正,采用 graph、causes strip、table 和 table time 等数据分析工具对模型进行模拟仿真,模拟变量之间的关系。在因果回路图中,通过不同颜色对事前准备子系统、事中处理子系统和事后处置子系统进行区分,用有向箭头表示因果链,由原因指向结果,每一条因果链都有正负性,分别用“+”与“-”表示。当某一变量增加时其相关某一变量也随之增加,此为变量之间的正相关关系,用正向因果链表示,反之,则用负向因果链表示。城市内涝灾害应急管理系统因果回路图如图 1 所示。

区域 GDP 是对研究区域经济发展水平的直观表征,区域 GDP 越高说明该区域经济发展水平越好,社会投入资金越多,对救援物资和医疗机构的储备和建设也会比较丰富,有利于开展城市内涝灾害事件的应急模拟演练。城市化建设使得城市硬化地面增加,一旦出现短时强降雨,极易形成城市局部地区积水。降雨强度越大,积水程度越严重,受灾面积越大,造成中心城积水断路情况越多。应急响应启

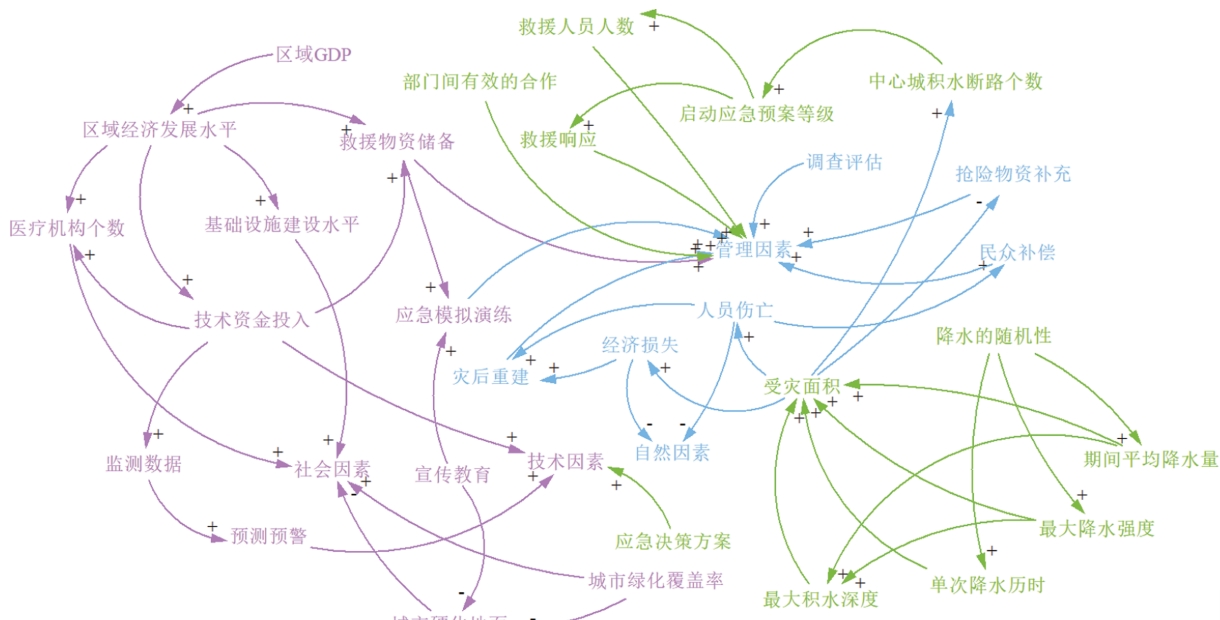


图1 城市内涝灾害应急管理系统因果回路图

Fig.1 Causal circuit diagram of urban waterlogging disaster emergency management system

动的应急预案等级越高,救援人数越多,救援响应时间越短,事中处理效果就越佳。受灾面积会受到最大积水深度、单次降水历时和最大降水强度因素的影响,受灾面积越大,经济损失和人员伤亡越多,这些变量都影响事后处置效果。

1.3 存量流量图

存量流量是SD的核心概念,存量是累积量,表征系统的状态;流量是速率量,表征存量变化的速率,存量的变化由流量引起。采用Vensim软件建立城市内涝灾害应急管理系统存量流量图,如图2所示。

1.4 模型方程式建立

SD模型中管理因素、技术因素、社会因素和自然因素属于状态变量,其余变量作为城市内涝灾害事件应急管理总系统中的辅助变量和常量。管理因素增量、技术因素增量、社会因素增量和自然因素增量分别表示管理因素、技术因素、社会因素和自然因素的速率变量,是描述管理、技术、社会 and 自然变量与辅助变量相互关系的函数方程式^[25]。

城市内涝灾害应急管理系统与事故安全系统结构和内涵相近,因此基于事故安全系统,得到城市灾害内涝应急管理系统应急管理效果的计算公式^[26]:

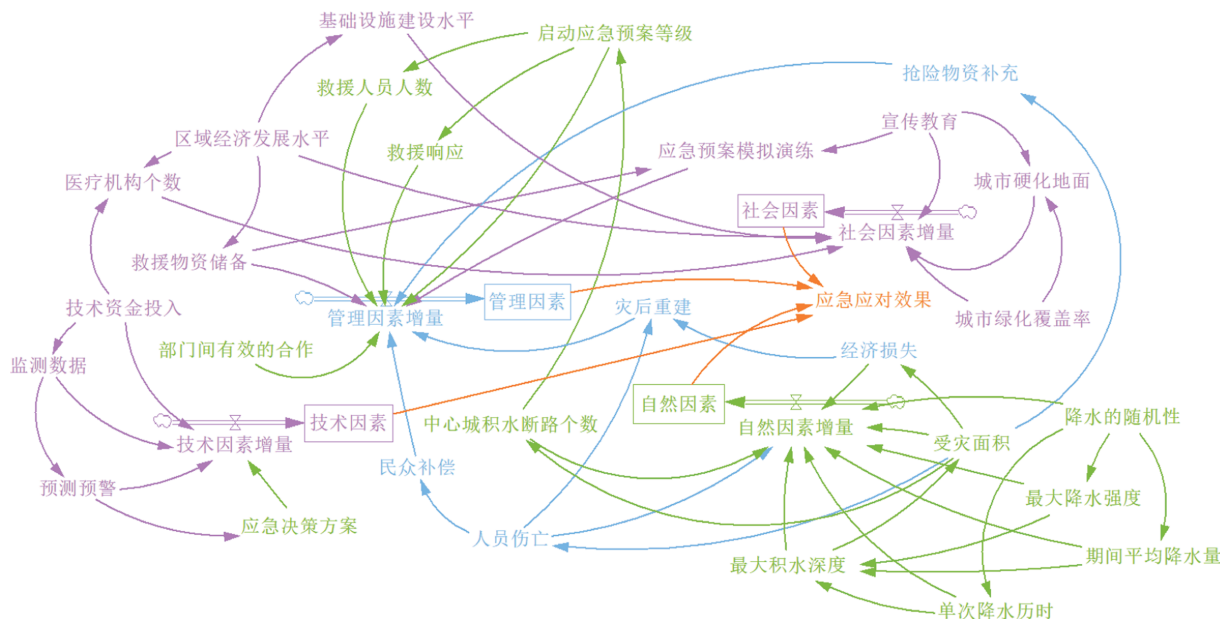


图2 城市内涝灾害应急管理系统存量流量图

Fig.2 Stock flow diagram of urban waterlogging disaster emergency management system

M_s = \sum_{i=1}^4 W_i L_i \quad (i=1,2,3,4) \quad (1)

其中 $L_i = L_{Ti} + R_i T_s$
式中: M_s 为城市内涝应急管理系统应急管理效果; L_1 为管理因素; L_2 为技术因素; L_3 为社会因素; L_4 为自然因素; W_i 为各因素所对应的权重, $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$; L_{iT} 为 T 时刻各因素的变量水平; R_i 为各因素对应增量; T_s 为时间步长。

管理因素包括应急模拟演练、救援物资储备量、救援响应、救援人员人数、启动应急预案等级、部门间有效的合作、抢险物资补充、灾后重建和民众补偿 9 个子变量。技术因素包括监测数据、预测预警、技术资金投入和应急决策方案 4 个子变量。社会因素包括宣传教育、城市硬化地面、区域经济发展水平、基础设施建设水平、城市绿化覆盖率和医疗机构个数 6 个子变量。自然因素包括降水的随机性、期间平均降水量、最大降水强度、单次降水历时、最大积水深度、受灾面积、中心城积水断路数量、经济损失和人员伤亡 9 个子变量。

2 实例仿真分析

选取 2020 年西安市发生的一场典型内涝灾害事件为研究对象,采用构建的 SD 模型进行仿真分析。2020 年 7 月 10 日 14 时 56 分西安市气象台发布暴雨橙色预警,强降雨突袭主城区,造成主城区内 20 多处市政道路和低洼地段严重积水,部分下穿通道积水达到 0.5 m 以上。城市气象、市政和应急等多部门快速联动,开展应急管理。

2.1 模型参数赋值

根据城市内涝事件特点、因果关系与系统模型结构,将模型仿真时间起始点设为降雨发生之际,时间范围设置为 0~1.5 d,时间步长设置为 0.1 d。通过分析确定管理因素、技术因素、社会因素和自然因素各子变量的初始值。首先利用层次分析法确定客观权重,然后利用熵权法对其进行修正^[25],得到系统模型子变量的权重值,结果见表 1。

基于多元线性回归模型,通过所得数据确定辅助变量之间的相对关系,得到 28 个子变量的相对系数,从而根据子变量因果关系确定各子变量间的模型方程式。将城市内涝灾害应急管理 SD 模型的变量分为原因变量和结果变量,将原因变量设为 x ,结果变量设为 Y ,相对系数设为 ζ ,根据因果回路图,设有 n 个原因变量构成结果变量,得到原因变量 x 与结果变量 Y 的关系:

Y = \zeta_0 + \sum_{i=1}^n \zeta_i x_i + e \quad (2)

表 1 子变量权重
Table 1 Weight of sub-variables

状态变量	子变量	修正前权重	修正后权重
管理因素	应急模拟演练	0.103	0.098
	救援物资储备量	0.043	0.037
	救援响应	0.266	0.291
	救援人员人数	0.186	0.198
	启动应急预案等级	0.109	0.105
	部门间有效的合作	0.115	0.116
	抢险物资补充	0.103	0.098
	灾后重建	0.037	0.029
	民众补偿	0.036	0.028
技术因素	监测数据	0.266	0.259
	预测预警	0.266	0.292
	技术资金投入	0.202	0.158
	应急决策方案	0.266	0.292
社会因素	宣传教育	0.060	0.250
	城市硬化地面	0.398	0.353
	区域经济发展水平	0.161	0.122
	基础设施建设水平	0.161	0.122
	城市绿化覆盖率	0.059	0.031
	医疗机构个数	0.161	0.122
自然因素	降水的随机性	0.032	0.023
	期间平均降水量	0.208	0.222
	最大降水强度	0.208	0.222
	单次降水历时	0.079	0.074
	最大积水深度	0.208	0.222
	受灾面积	0.208	0.222
	中心城积水断路数量	0.079	0.074
	经济损失	0.046	0.036
	人员伤亡	0.062	0.055

式中: ζ_0 为常量; e 为随机误差。

2.2 模拟仿真分析

城市内涝灾害应急管理 SD 模型内部结构方程的指标参数确定后,采用 Vensim 软件建立存量流量图,输入各变量函数方程式,进行模拟。得到技术因素、社会因素、管理因素和自然因素 4 个影响因素在 0~1.5 d 时间范围内变化趋势模拟仿真结果,如图 3 所示。

由图 3 可见,技术因素、自然因素和管理因素随着时间增长,投入和管控在不断增加;社会因素随着

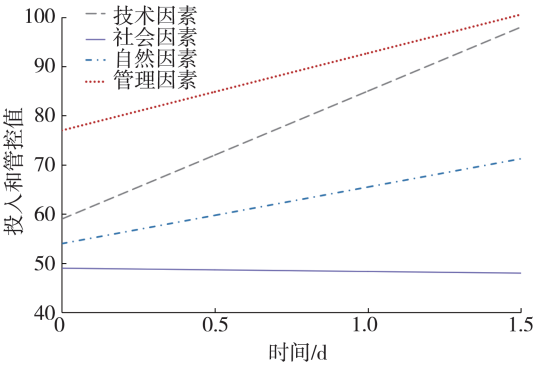


图 3 4 个因素模拟仿真结果

Fig.3 Simulation results of 4 factors

时间增长,投入和管控在不断降低。技术因素和管理因素的投入和管控的增长程度较大,其次是自然因素,最后是社会因素。说明在城市内涝灾害事件发生前后,可以通过迅速提高技术因素中的预测预警能力和防汛人员应急决策方案的有效性、提升管理因素中的防汛人员救援响应的速度等方式来增强城市内涝灾害应急管理效果。自然因素中降水的随机性、期间平均降水量、最大降水强度等变量具有不确定性,难以管控,因此自然因素在短时间内投入和管控值增长程度较小。社会因素中由于市民缺少防汛知识,防灾避险自救知识严重不足,在灾害发生时引起社会恐慌,导致社会因素的投入在短时间内呈下降趋势。

图4为城市内涝灾害事件应急管理效果模拟仿真结果,可见,对于当前城市暴雨内涝灾害事件,随着时间增长,不断增加对技术因素、社会因素、管理因素和自然因素的投入和管控,应急管理效果也逐渐得到改善。

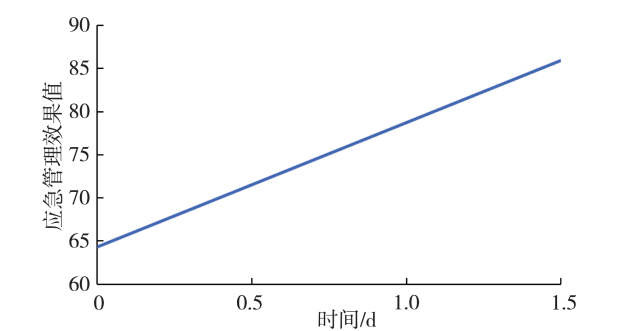


图4 模拟仿真结果
Fig.4 Simulation results

2.3 敏感性分析

在对SD模型进行模拟仿真的基础上,按比例对技术因素、自然因素、社会因素和管理因素进行调整,以便对城市内涝灾害应急管理模型做进一步分析。本文将4个影响因素的投入分别减少20%水平,对比5种情况下应急管理效果的差异,结果如图5所示。由图5可见,对比应急管理初始效果,管理因素投入减少20%而其他因素不变时,应急管理效果降低1.5372;技术因素投入减少20%而其他因素不变时,应急管理效果降低0.5920;社会因素投入减少20%而其他因素不变时,应急管理效果提高0.0045,这是由于社会因素的投入是日积月累的,在城市内涝事件发生至结束的短短2d内社会因素对应急管理效果的影响相对较小;自然因素投入减少20%而其他因素不变时,应急管理效果降低1.4277。

表2为子变量敏感性分析模拟仿真结果。结合图5和表2可知,管理因素敏感度最高,表明在城市

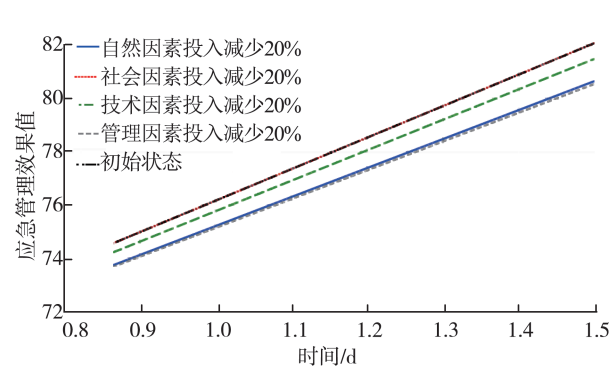


图5 敏感性分析变化趋势
Fig.5 Change trend of sensitivity analysis

表2 子变量敏感性分析模拟仿真结果
Table 2 Simulation results of sub-variable sensitivity analysis

状态变量	子变量	变化量绝对值
管理因素	应急模拟演练	0.1507
	救援物资储备量	0.0563
	救援响应	0.4469
	救援人员人数	0.3040
	启动应急预案等级	0.1615
	部门间有效的合作	0.1785
	抢险物资补充	0.1507
	灾后重建	0.0451
技术因素	民众补偿	0.0435
	监测数据	0.1532
	预测预警	0.1727
	技术资金投入	0.0935
社会因素	应急决策方案	0.1727
	宣传教育	0.0011
	城市硬化地面	0.0016
	区域经济发展水平	0.0005
	基础设施建设水平	0.0005
	城市绿化覆盖率	0.0001
自然因素	医疗机构个数	0.0005
	降水的随机性	0.0328
	期间平均降水量	0.3169
	最大降水强度	0.3169
	单次降水历时	0.1056
	最大积水深度	0.3169
	受灾面积	0.3169
	中心城积水断路数量	0.1056
	经济损失	0.0514
	人员伤亡	0.0785

内涝灾害应急管理过程中,管理因素子变量对应急管理效果的影响较为强烈。管理因素中救援响应、救援人员人数和部门间有效的合作等子变量在应急管理时直接影响城市内涝灾害应急管理总水平,并且应急演练和抢险物资补充等子变量也对应急管理效果产生一定间接影响。技术因素中应急决策方案和预测预警是关键,监测数据和技术资金投入对应急管理效果也有着一定影响。社会因素中城市硬化地面过多、宣传教育不到位以及区域经济发展水平

均是发生城市内涝灾害事件的诱因。自然因素中最大积水深度、最大降水强度、期间平均降水量以及受灾面积等子变量是发生城市内涝灾害事件严重程度的直接体现,因此,防汛部门要注重城市排水管网的建设工作。

3 结 论

a. 根据不同子系统以及系统的不同变量间相互作用关系,建立基于 SD 的城市内涝灾害应急管理模型进行模拟仿真。结果表明,随着时间增长,不断增加对技术因素、社会因素、管理因素和自然因素的投入和管控,城市内涝灾害事件的应急管理效果也逐渐改善。

b. 通过敏感分析得到管理因素中救援人员人数和部门间有效的合作等子变量敏感性较高;技术因素中应急决策方案、预测预警等子变量敏感性较高;自然因素中期间平均降水量、最大降水强度等敏感性较高的子变量是城市内涝灾害事件直接诱因,因此建立完善的城市排水管网体系十分重要。通过事前加强预测预警准确性、事中加快应急救援时间和实施有效可行的应急决策方案对城市内涝灾害事件应急管理和快速应对有较为显著的影响。

参考文献:

- [1] WU X H, CAO Y R, XIAO Y, et al. Finding of urban rainstorm and waterlogging disasters based on microblogging data and the location-routing problem model of urban emergency logistics [J]. Annals of Operations Research, 2020, 290(1/2): 865-896.
- [2] 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))
- [3] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))
- [4] 姜仁贵, 杨思雨, 解建仓, 等. 城市内涝三维可视化应急管理信息系统 [J]. 计算机工程, 2019, 45(10): 46-51. (JIANG Rengui, YANG Siyu, XIE Jiancang, et al. Three-dimensional visualization emergency management information system of urban waterlogging [J]. Computer Engineering, 2019, 45(10): 46-51. (in Chinese))
- [5] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟 [J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))
- [6] 刘志雨, 刘玉环, 孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 1-6. (LIU Zhiyu, LIU Yuhuan, KONG Xiangyi. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 姜仁贵, 王小杰, 解建仓, 等. 城市内涝应急预案管理研究与应用 [J]. 灾害学, 2018, 33(2): 146-150. (JIANG Rengui, WANG Xiaojie, XIE Jiancang, et al. Research on the urban waterlogging emergency preplan management [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 146-150. (in Chinese))
- [9] HU S L, HAN C F, MENG L P. A scenario planning approach for propositioning rescue centers for urban waterlog disasters [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 87: 425-435.
- [10] 冯钧, 王云峰, 邬炜, 等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 479-487. (in Chinese))
- [11] 梁骥超, 解建仓, 姜仁贵, 等. 面向城市内涝的应急管理流程及快速应对方案研究 [J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(2): 10-15. (LIANG Jichao, XIE Jiancang, JIANG Rengui, et al. Study on emergency management process and rapid response plan for urban waterlogging [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(2): 10-15 (in Chinese))
- [12] LU W, QIN X S, JUN C. A parsimonious framework of evaluating WSUD features in urban flood mitigation [J]. Journal of Environmental Informatics, 2019, 33(1): 17-27.
- [13] YANG Q, WANG J M, LIU X X, et al. MAS-based interaction simulation within asymmetric information on emergency management of urban rainstorm disaster [J]. Complexity, 2020, 10: 1-13.

- [14] 丁继勇,王卓甫,郭光祥. 基于贝叶斯和动态博弈分析的城市暴雨内涝应急决策[J]. 统计与决策,2012(23):26-29. (DING Jiyong, WANG Zhuofu, GUO Guangxiang. Emergency decision of urban rainstorm waterlogging based on Bayesian and dynamic game analysis[J]. Statistics & Decision,2012(23):26-29. (in Chinese))
- [15] 马文笑,王德鲁. 基于案例推理的突发环境事件应急决策模型[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(12):85-90. (MA Wenxiao, WANG Delu. Emergency decision-making model of emergency environmental accidents based on case-based reasoning[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(12):85-90. (in Chinese))
- [16] 徐祖信,汪玲玲,尹海龙,等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(4):593-599. (XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, et al. Quantification of groundwater infiltration urban drainage networks based on species approach[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2016,44(4):593-599. (in Chinese))
- [17] 陈义,王建辉,张蒙. 利用有向图进行排水管网自动化流向分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(1):62-67. (CHEN Yi, WANG Jianhui, ZHANG Meng. Automatic flow analysis of drainage pipe network based on directed graph[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(1):62-67. (in Chinese))
- [18] 李春林,刘森,胡远满,等. 基于暴雨径流管理模型(SWMM)的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2405-2412. (LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Simulation on the control effect of low impact development measures of sponge city based on storm water management model (SWMM)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(8):2405-2412. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):53-61. (in Chinese))
- [21] 姜仁贵,韩浩,解建仓,等. 变化环境下城市暴雨洪涝应对新模式研究[J]. 灾害学,2017,32(3):12-17. (JIANG Rengui, HAN Hao, XIE Jiancang, et al. The new response mode of urban storm flood under changing environment[J]. Journal of Catastrophology,2017,32(3):12-17. (in Chinese))
- [22] QU T, THURER M, WANG J H, et al. System dynamics analysis for an internet-of-things-enabled production logistics system[J]. International Journal of Production Research,2017,55(9):2622-2649.
- [23] LEE S, HAN W, PARK Y. Measuring the functional dynamics of product-service system: a system dynamics approach[J]. Computers & Industrial Engineering,2015,80:159-170.
- [24] TENG J, WANG P, WU X, et al. Decision-making tools for evaluation the impact on the eco-footprint and eco-environmental quality of green building development policy[J]. Sustainable Cities & Society,2016,23:50-58.
- [25] SAHOO M, SAHOO S, DHAR A, et al. Effectiveness evaluation of objective and subjective weighting methods for aquifer vulnerability assessment in urban context[J]. Journal of Hydrology,2016,541:1303-1315.
- [26] 昌伟伟. 基于系统动力学的六层次事故分析模型构建研究[D]. 北京:中国矿业大学,2019.

(收稿日期:2021-08-18 编辑:王芳)

(上接第25页)

- [33] 艾亚迪,魏传江,马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):11-16. (in Chinese))
- [34] 张有贤,李二强,罗东霞,等. 基于 AHP-熵权法的兰州市水环境安全模糊综合评价[J]. 安全与环境学报,2020,20(2):709-718. (ZHANG Youxian, LI Erqiang, LUO Dongxia, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water environment safety of Lanzhou based on AHP-entropy weight method[J]. Journal of Safety and Environment,2020,20(2):709-718. (in Chinese))
- [35] 余灏哲,李丽娟,李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学,2020,42(2):358-371. (YU Haozhe, LI Lijuan, LI Jiuyi. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science,2020,42(2):358-371. (in Chinese))

(收稿日期:2021-05-11 编辑:施业)