

城市暴雨洪涝灾害链风险评估方法

杨芳^{1,2}, 李旭东¹, 宋利祥¹, 胡豫英¹, 陈玉超¹, 杨蕊¹

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;
2. 水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室, 广东 广州 510611)

摘要:针对当前城市洪涝风险评估中对城市洪涝的级联效应关注不足的问题,提出了一种面向城镇重要基础设施的城市暴雨洪涝灾害链风险评估方法。该方法耦合了洪涝模拟模型与系统动力学模型,利用洪涝模拟模型提供的洪水淹没时空信息驱动系统动力学模型动态评估洪涝灾害链风险。以广州市南岗河流域 2020 年“5·22”暴雨洪涝事件为实例进行了灾害链风险评估,结果表明:不同承灾体的暴露度与危险性呈现差异化演变特征,水利工程设施、主要化工厂、医院和地下空间等承灾体的暴露度相对较高,暴露度峰值达 0.65 以上,而桥隧等承灾体虽然暴露度不高,但其受淹部分的危险性较高,高达 5.63;城市洪涝综合风险对降水呈现非线性响应关系,22 日凌晨强降水过程中,累计降水量增加了 138%,而综合洪涝风险指数增长了 816%,远高于承灾体暴露度的增幅 215%。该评估方法增强了对城市洪涝灾害链风险的认知,可为城市关键基础设施的防洪减灾策略制定与应急响应提供有效的决策支持。

关键词:城市洪涝;灾害链;关键基础设施;系统动力学;风险评估

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0052-09

Risk assessment methodology for rainstorm-induced urban flood disaster chain//YANG Fang^{1, 2}, LI Xudong¹, SONG Lixiang¹, HU Yuying¹, CHEN Yuchao¹, YANG Yui¹(1. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of Water Security Guarantee in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

Abstract: To address the insufficient attention to cascading effects in current urban flood risk assessments, a risk assessment method for urban flood disaster chains with critical municipal infrastructure as the main disaster-bearing bodies is proposed. This method couples a flood simulation model with a system dynamics model, where the flood simulation model provides spatial and temporal inundation data to drive the system dynamics model for dynamic risk evaluation. A case study was conducted on the May 22 flood event in 2020 within the Nangang River Watershed of Guangzhou City. The results show that the exposure and hazard levels of different disaster-bearing bodies evolve differently. Water conservancy infrastructure, major chemical plants, hospitals and underground spaces showed high exposure, with peak values exceeding 0.65. Although bridges and tunnels showed lower exposure, the hazard level of their inundated parts can reach 5.63. A non-linear relationship was found between the comprehensive urban flood risk and precipitation. During the heavy rainfall on the early morning of May 22, the cumulative precipitation increased by 138%, while the comprehensive flood risk index increased by 816%, far exceeding the 215% increase in the exposure of disaster-bearing bodies. This method enhances the understanding of disaster chain risk and provides decision-making support for the formulation of flood alleviation strategies and emergency actions for critical urban infrastructure.

Key words: urban flooding; disaster chain; critical infrastructure; system dynamics; risk assessment

暴雨洪涝灾害是全球范围内有重大社会经济影响的自然灾害之一。城市区域基础设施密布,承灾体类型复杂且相互关联^[1-2],因此城市暴雨容易引发“级联效应”,形成灾害链,造成严重的灾害影

响^[3-5]。美国联邦紧急事务管理署将级联事件定义为“作为一个初始事件的直接或间接结果出现的事件”^[3]。例如,城市暴雨内涝损毁电力设施,造成电力供应中断,进而引发更广泛、更严重的后果,这就

基金项目:北京江河水利发展基金会项目(JHYC202205)
作者简介:杨芳(1978—)女,正高级工程师,硕士,主要从事水旱灾害防御、河口治理与保护研究。E-mail:yangf21@tsinghua.org.cn
通信作者:李旭东(1991—)男,工程师,博士,主要从事水旱灾害防御研究。E-mail:xdli1991@163.com

是城市暴雨引发的典型级联事件。城市暴雨引发的级联事件共同构成了城市暴雨洪涝灾害链。越是极端暴雨事件,越容易引发更多的级联事件,形成更为复杂的灾害链。这一特征在 2020 年广州“5·22”暴雨洪涝事件、2023 年深圳和香港“9·7”特大暴雨事件、2024 年 4 月 16 日迪拜暴雨洪涝事件等极端天气事件中体现得尤为显著。

国内外学者已针对暴雨级联灾害及灾害链的传递与演变机制开展了探索性研究^[6-8]。近年来,暴雨洪涝灾害链更是成为研究热点。刘家宏等^[9]系统梳理了特大城市外洪内涝灾害链联防联控涉及的关键科学问题和关键技术。靳文波等^[10]梳理了城市暴雨链生灾害体系,从应急管理角度提出了以“预案”“监测”“推演”“协同”“救援”为基础的特大城市暴雨链生灾害总体应对思路。王浩等^[11]基于知识图谱方法解析了郑州“7·20”特大暴雨洪涝灾害中地铁 5 号线被淹和京广快速路隧道被淹 2 个案例的暴雨灾害链传递规律,重点对比了这两个案例的灾害扩散点和放大点的差异。卢兴超等^[12]分析了暴雨洪涝灾害链传递机制及演变特征,对郑州市“7·20”特大暴雨洪涝灾害的灾害传递演变过程进行了详细解析,并探讨了相应的断链机制。这些研究丰富了对暴雨洪涝灾害链的传导及成灾机制的认识,为断链决策提供了重要参考。

尽管城市暴雨洪涝灾害链或级联效应已经受到学界的广泛关注,但现有的洪涝风险评估方法对暴雨洪涝级联效应的考虑仍显不足。基于危险性-暴露度-脆弱性(hazard-exposure-vulnerability, H-E-V)框架的自然灾害风险评估方法已广泛应用于洪涝风险评估^[13-15]。该方法从灾害的危险性、承灾体的暴露度与脆弱性三方面构建指标体系,以综合评估洪涝灾害风险。然而,现有的洪涝风险评估方法主要针对人口、经济规模(GDP)等承灾体对象,对地铁、桥隧、医院、地下空间等城市重要基础设施的考虑不足,难以有效评估城市暴雨洪涝灾害链的风险。高玉琴等^[16]提出了基于复杂网络的洪涝灾害链综合风险评估方法,并通过案例研究表明洪涝灾害链综合风险远高于原生灾害风险。因此,亟须结合城市洪涝演进过程和暴雨洪涝灾害链承灾体的空间分布,评估暴雨洪涝事件中城市洪涝灾害链风险的动态变化,为洪涝灾害防御和应急决策提供参考。

洪涝灾害链风险分析方法目前仍处于探索阶段^[17]。现有用于级联灾害分析的方法主要包括知识图谱^[11]、复杂网络^[18]、贝叶斯网络^[19]、异质函数图论(heterogeneous functional graph theory)^[20]、图形评审技术(graph evaluation and review

technique)^[21]、马尔科夫链^[22]、匹特里网(Petri net)^[23]、情景推理模型(scenarios inference model)^[24]以及社交网络分析(social network analysis)^[25]等。这些方法各有优势,在一定程度上为风暴潮、暴雨、地震等触发的灾害链推演和断链决策提供了支撑,但它们不能很好地将具体暴雨洪涝事件中的洪涝淹没的时空演进信息纳入推演和风险评估。当前,能够同时考虑洪涝演进过程和链生灾害发生可能性的暴雨洪涝灾害链的风险定量评估方法仍较为缺乏。

鉴于此,本文基于数值模拟模型模拟城市暴雨洪涝发展过程,结合城市重要基础设施等主要承灾体的空间分布,分析主要承灾体的洪涝风险信息,构建暴雨洪涝灾害链系统动力学模型,评估城市暴雨洪涝灾害链风险,并以广州市南岗河流域为研究区开展实例研究,以期对定量评估城市暴雨洪涝灾害链风险提供技术支持。

1 级联效应分析

洪水淹没可能引发多重级联效应,而关键基础设施正是其中的重要承灾体^[26]。易受城市内涝影响并遭受损害的基础设施主要包括:交通基础设施、电力设施、通信设施、供水系统、地下空间、学校、医院、水利设施以及化工企业等。地铁站进水可能导致乘客被困,甚至造成人员伤亡;在郑州“7·20”特大暴雨灾害中,某铝制品工厂因洪水引发爆炸事故致 5 人遇难,这是化工企业因内涝引发安全事故的典型次生灾害案例^[27]。此外,道路和街道的淹没积水会阻碍疏散进程,从而降低应急疏散能力^[28];医院因洪水淹没而停诊会削弱医疗救治能力,可能加剧伤亡后果。这些与基础设施相关的级联效应最终决定了洪水事件的综合影响与损失程度。而级联效应的演变过程及其与人类活动的相互作用,又取决于洪水淹没的动态特征。由级联效应构成的灾害链^[17,29]可以表达为

$$D = \{E, H, S, R\} \tag{1}$$

式中: D 为灾害链系统; E 为孕灾环境; H 为致灾因子; S 为承灾体; R 为三者之间的复杂耦合作用。

系统动力学作为理解复杂系统非线性动态的通用工具已被广泛认可^[30-31]。该方法通过因果回路图(casual loop diagram, CLD)和存量流量图(stock flow diagram, SFD)两种核心工具,描述并量化系统关键变量间的相互作用关系。本文将暴雨设为致灾因子,考虑 18 类常见承灾体,构建了城市内涝事件的因果回路图(图 1)。该因果回路图纳入了暴雨洪涝直接引发的灾害事件及其次生灾害。城市洪涝常

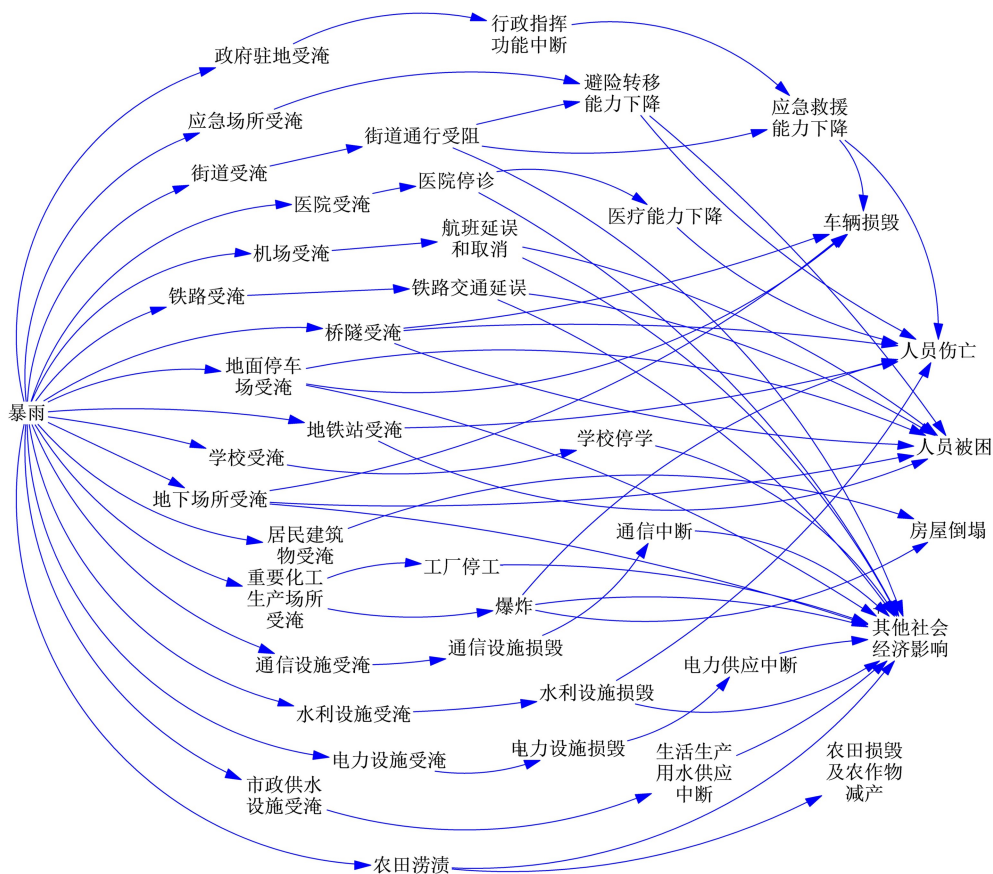


图 1 城市暴雨内涝事件的因果回路图

Fig. 1 Causal loop diagram for urban flooding event

见的危害后果包括:人员伤亡、居民受困、车辆损毁、农业减产、建筑倒塌损坏以及城市基础设施中断引发的舆情和各类社会经济影响(本文统一表述为“其他社会经济影响”)。这 18 类承灾体涵盖了在城市暴雨洪涝事件中容易受灾的重要城市基础设施以及公共场所,主要不利事件也是在以往的暴雨洪涝事件中常见的灾害后果。对承灾体和不利事件的归纳具有较好的通用性,在具体应用中可根据城市实际情况进行调整。

因果回路图中还考虑了灾害响应阶段最重要的人类活动——应急救援与疏散撤离,及其与相关承灾体受淹状况的交互作用。通过分析六类主要不利事件与不同承灾体受灾情况之间的关联,确定导致这六类不利事件的关键致灾路径。例如道路积水、地铁进水、医院停诊、水利设施损毁以及爆炸事故均可能造成人员伤亡。

2 暴雨洪涝灾害链风险评估方法

尽管链式灾害的演化过程具有高度不确定性,其事件与衍生事件之间的转移概率难以确定,但其链生灾害发生的可能性仍与致灾因子的危险性和承灾体的暴露度有关。因此,本文基于经典的 H-E-V 框架进行城市洪涝灾害链风险评估。采用联合国政

府间气候变化专门委员会(IPCC)报告中对这 3 个概念的界定^[32]:危险性通常指致灾因子对承灾体的危险程度(本文指承灾体因致灾因子影响而丧失自身功能或发生结构损毁的危险);暴露度指承灾体暴露于危害的程度;脆弱性则主要指承灾体在暴露于危害时造成损失的倾向(本文指承灾体遭受危险后引发各类不利事件的倾向)。

承灾体的暴露度和危险性均取决于承灾体的空间分布和洪涝淹没的发展过程。而洪涝淹没的发展过程是致灾因子和孕灾环境交互作用的结果,可以通过城市洪涝精细化模拟模型模拟得到。为此,需构建具有足够空间分辨率,且经过参数率定和验证的城市洪涝模拟模型,使其能够精准评估暴雨情景下研究区内不同空间分布的承灾体的洪涝淹没深度的动态过程,为后续的风险评估奠定基础。

2.1 风险计算方法

2.1.1 暴露度

暴露度的计算公式为

$$E_{i,t} = I_{i,t} / N_i \quad (1 \leq i \leq N) \quad (2)$$

式中: $E_{i,t}$ 为第 i 类承灾体在 t 时段的暴露度; $I_{i,t}$ 为第 i 类承灾体在 t 时段处于洪涝淹没区的数量; N_i 为第 i 种承灾体的总数; N 为承灾体的类型总数。暴露度的取值范围为 $[0, 1]$ 。 $I_{i,t}$ 的量化方法如下:

基于洪涝模拟模型输出的逐小时淹没水深空间分布,对第*i*类中每个承灾体在*t*时段是否处于淹没范围(淹没水深不小于0.05 m)进行逐个识别。

2.1.2 危险性

危险性的计算公式为

$$H_{i,t} = \frac{\sqrt{D_{i,t,ave}^2 + D_{i,t,max}^2}}{\sqrt{2D_{i,thr}^2}} \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3)$$

式中: $H_{i,t}$ 为暴露于洪涝状态中的第*i*类承灾体在*t*时段的危险性; $D_{i,t,ave}$ 、 $D_{i,t,max}$ 分别为第*i*类承灾体在*t*时段处于洪涝淹没范围内的平均淹没水深和最大淹没水深,m; $D_{i,thr}$ 为第*i*类承灾体容易发生危险的水深的阈值,m,该阈值通过专家经验法确定。 $D_{i,t,ave}$ 和 $D_{i,t,max}$ 的量化方式如下:基于洪涝模拟模型输出的逐小时淹没水深空间分布,对第*i*类承灾体进行逐个判别,对于在淹没范围内的单个承灾体,记录其*t*时段的淹没水深值,最终分别取该淹没水深样本序列的平均值和最大值。

理论上,针对任意一类承灾体,其危险性评估结果的取值可为大于0的任意值。实际情况下,该值一般在[0,10)之间,数值越大,表明该类承灾体面临的危险性越高。

2.1.3 脆弱性

考虑到不同类型承灾体受洪涝影响的状态可能引发不同的不利事件,本文采用专家打分法评估各承灾体针对不同不利事件的脆弱性,建立承灾体与几类典型不利事件的关联。鉴于交通、电力、通信、供水等城市基础设施中断所造成的社会经济影响难以直接量化,本文采用专家评估法对各类承灾体面向其他社会经济影响的脆弱性进行评估。各类承灾体对不同不利事件的脆弱性评分在1~10之间,分值越高,脆弱性越强。脆弱性评分结果见表1。

2.1.4 应急救援因素

在极端暴雨引发洪涝的情况下,应急避险及救援等行动会相应启动。但应急避险能力和应急救援能力也会因城市重要基础设施的损毁而受到削弱。主要相关的承灾体包括行政中心驻地、医院、街道和应急避险场所。这些承灾体一旦遭受洪涝淹没,将直接影响应急避险和应急救援能力。本文通过以下方程考虑应急避险及救援能力的影响:

$$C_{t+1} = (1 - B_{2,t})(1 - B_{4,t}) \quad (4)$$

$$A_{t+1} = (1 - B_{1,t})(1 - B_{3,t}) \quad (5)$$

$$R_{1,t} = R_{1,t}(1 - C_t)(1 - A_t) \quad (6)$$

$$R_{2,t} = R_{2,t}(1 - C_t) \quad (7)$$

$$R_{3,t} = R_{3,t}(1 - A_t) \quad (8)$$

式中: $B_{1,t}$ 为行政单位在*t*时段受洪涝淹没影响的风

表1 各类承灾体针对不利事件的脆弱性评分结果
Table 1 Vulnerability rating results of disaster-bearing bodies to various adverse events

受洪涝影响状态	脆弱性					
	人员 伤亡	人员 被困	车辆 损毁	房屋 坍塌	农田冲毁 及农作物 减产	其他社会 经济影响
政府驻地受淹	1	2	2			5
应急避险场所受淹						4
医院受淹	5	4				6
街道受淹	3	8	6			2
桥隧受淹	5	8	6			5
铁路中断		5				5
停车场被淹		2	8			4
地下空间受淹	3	5	4			6
地铁站受淹	6	6				8
学校受淹及停课	2	4				4
水利设施损毁	5	4				6
农村居民区受淹	3	5		4		3
重要化工生产场所 受淹发生爆炸	4	2		2		5
电力中断						3
通信设施中断						3
机场受淹	2	6	2			8
生活生产用水供应 中断						4
农田受涝					5	2

险; $B_{2,t}$ 为应急避险场所在*t*时段受洪涝淹没影响的风险; $B_{3,t}$ 为医院在*t*时段受洪涝淹没影响的风险; $B_{4,t}$ 为街道在*t*时段受洪涝淹没影响的风险; C_{t+1} 为*t*+1时段的避险转移能力,为无量纲参数,取值范围为0~1; A_{t+1} 为*t*+1时段的应急救援能力,为无量纲参数,取值范围为0~1; $R_{1,t}$ 为*t*时段的人员伤亡风险; $R_{2,t}$ 为*t*时段的人员受困风险; $R_{3,t}$ 为*t*时段的车辆损毁风险。

2.1.5 承灾体级联灾害风险

承灾体级联灾害风险的计算公式为

$$R_{j,t} = \sum_{i=1}^N E_{i,t} H_{i,t} V_{i,j} \quad (9)$$

式中: $R_{j,t}$ 为*t*时段发生第*j*类不利事件的风险; $V_{i,j}$ 为第*i*类承灾体受城市洪涝影响后引发的第*j*类不利事件的倾向性。

2.1.6 综合洪涝风险指数

构建了综合洪涝风险指数表征城市洪涝灾害链风险,其计算公式为

$$F_t = \sum_{j=1}^J R_{j,t} w_j / \sum_{j=1}^J w_j \quad (10)$$

式中: F_t 为*t*时段的综合洪涝风险指数;*J* 为不利事件的种类数; w_j 为第*j*类不利事件风险在综合洪涝风险指数评估中的权重,该权重通过调研或专家经验法确定,结果见表2。

表 2 综合洪涝风险指数评估中城市洪涝引发的不利事件风险的权重

Table 2 Weights of flood-induced adverse event risks in comprehensive flood risk index assessment

不利事件	不利事件风险权重
人员伤亡	10/37
人员被困	6/37
车辆损毁	4/37
房屋坍塌	8/37
农田损毁及农作物减产	4/37
其他不利社会经济影响	5/37

2.2 基于系统动力学的洪涝风险评估模型

基于前文所述的因果回路图,本文通过存量流量图构建了城市洪涝灾害链风险评估模型(图 2),以实现暴雨洪涝事件中洪涝风险的动态评估。该模型中,各类承灾体在洪涝淹没状态下的对应风险由

其暴露度和危险性共同决定,而二者通过前文所述的各承灾体的暴露度和危险性的定量评估方法进行参数化。承灾体的洪涝淹没风险通过脆弱性指标与六类主要不利事件关联。综合洪涝风险则由六类不利事件的风险加权计算得出。此外,前文所述的应急救援因素与相关变量的数学表达也被纳入该模型中。该存量流量图模型构建在经典的系统动力学建模软件 Vensim PLE9.3.5 中实现。图 2 中箭头表示变量之间的关联,箭头旁的“+”或“-”表示正相关或负相关关系。由于洪涝演进是一个动态过程,在模型中引入“<time>”作为影子变量以表征时间,使整个模型成为一个随时间变化的动态系统。

综上,可得到城市暴雨洪涝灾害链风险分析的流程如图 3 所示。

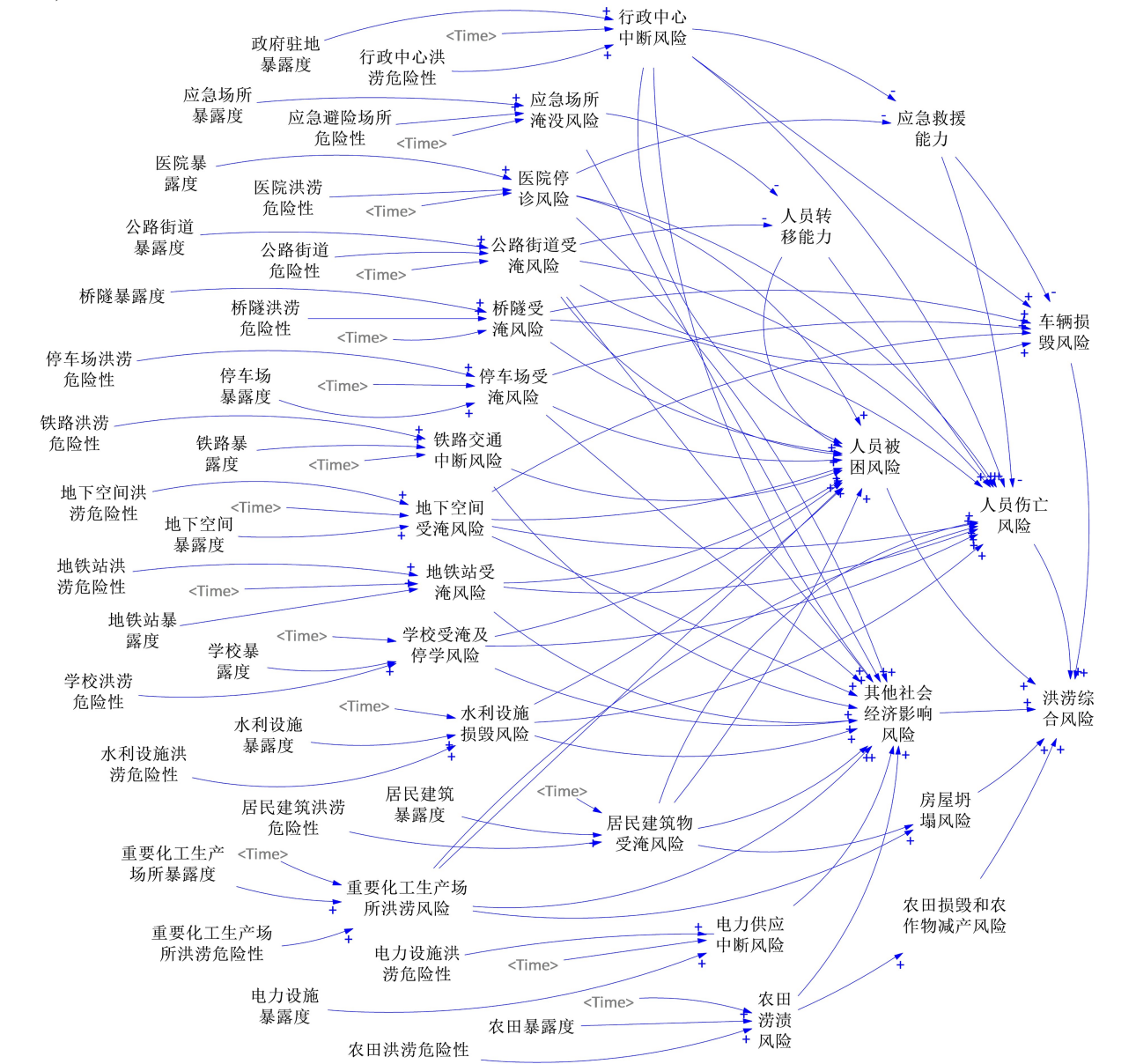


图 2 城市暴雨洪涝灾害链风险评估系统动力学模型

Fig. 2 System dynamics model for risk evaluation of urban flood disaster chain

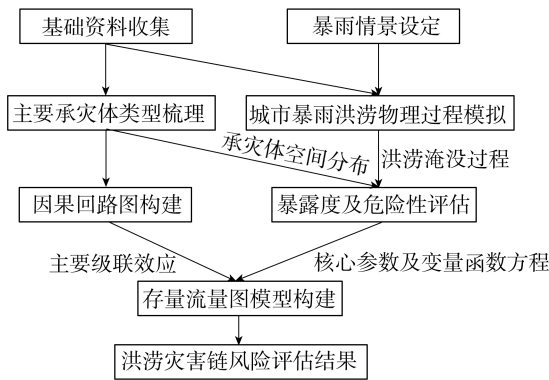


图 3 城市洪涝灾害链风险评估流程

Fig. 3 Risk evaluation process for urban flood disaster chain

3 实例应用

3.1 研究区概况及典型暴雨事件

南岗河流域位于广州市黄埔区,流域总面积为 116.0 km²,地势自北向南逐渐降低。流域中南部为高度城市化区域,建成区面积达 66.6 km²。受亚热带季风气候影响,该流域气候湿润,暴雨洪涝灾害频发。2020 年 5 月 21—22 日,广州遭遇了特大暴雨袭击。5 月 21 日起开始降水,21 日夜至 22 日凌晨出现持续强降水。其中,流域内禾叉窿水库站点 6 h 雨量达 286.5 mm,突破黄埔区 100 年一遇暴雨水平(273.6 mm);南岗河河口、永和河等站点 6 h 雨量介于 50 年一遇(241.6 mm)至 100 年一遇(273.6 mm)水平之间;这些站点的 24 h 雨量多在 280~312 mm 之间,接近 50 年一遇水平(326.1 mm)。据雨量站点资料统计,南岗河流域建成区累计降水量约 300 mm。此次暴雨导致南岗河发生了超标准洪水(南岗河流域干支流的现状防洪标准为 20 年一遇),中下游堤防漫溢,造成大范围淹水。与此同时,城区也发生大面积的内涝积水。

图 4 为流域内主要关键基础设施的空间分布,涵盖多个重要设施类别。鉴于研究区域在近年极端洪水事件中未出现城市供水和通信服务中断情况,本文未采集与这两类级联效应相关的承灾体数据。研究数据主要来源于地方政府部门,部分信息(如学校、医院、行政中心和地铁站的位置信息)则通过公共在线地图获取。

3.2 暴雨洪涝物理过程模拟

本文采用 SWMM 模型模拟水文过程,将实测降雨数据转化为地表径流,并将其作为水动力模型 HydroMPM 的输入边界条件^[33]。基于 HydroMPM 模型平台构建研究区河道一维水动力模型、地表二维水动力模型和管网排水水动力模型相耦合的城市

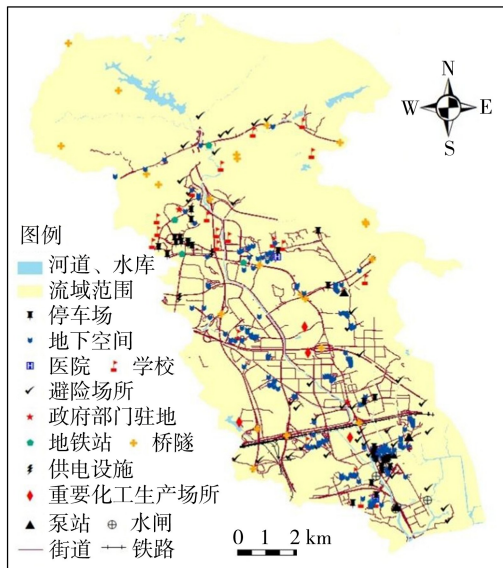


图 4 南岗河流域重要城市基础设施空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of critical urban infrastructure in Nangang River Watershed

洪涝模拟模型^[34]。建模所需的实测降水数据、排水管网、河道地形等基础资料均来自黄埔区水务部门。

本文使用的模型经过参数率定和验证后,已集成到广州市黄埔区相关系统,为相关业务运行提供支撑,其中模型参数率定与验证的效果可详见文献^[34]。一共模拟了 34 h 的洪涝过程,直至暴雨结束后洪涝已处于消退状态,模型输出的时间间隔为 0.5 h。

3.3 暴露度及危险性评估结果分析

基于城市洪涝模型模拟得到的不同类型承灾体的暴露度变化见图 5。总体而言,承灾体暴露度对暴雨过程呈现显著响应。在 5 月 21 日凌晨的数小时降水后,部分承灾体的暴露度提升至 0.2 以上,其中行政机关的暴露度上升至 0.4 以上。在 22 日凌

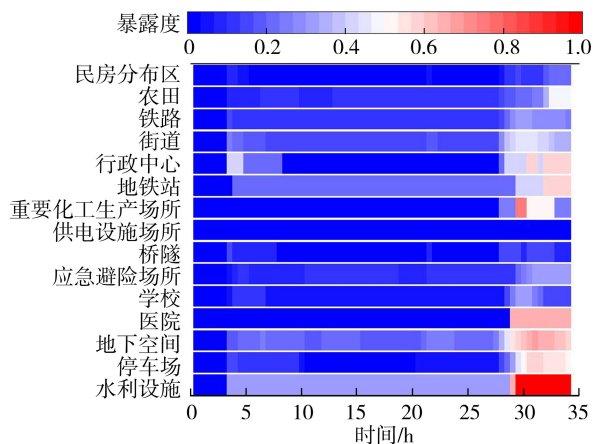


图 5 各类承灾体暴露度演变过程

Fig. 5 Evolution of exposure levels for various disaster-bearing bodies

晨遭遇强降雨后,多数承灾体的暴露度急剧增加。与此同时,不同类型承灾体的暴露度存在差异。水利工程施工、主要化工厂、医院和地下空间等的暴露度相对较高。以主要化工厂为例,其暴露度最大值达到 0.75。此外,停车场的最大暴露度也达到 0.6,且暴露度峰值出现的时间更早。从模拟结果可知,地下空间、地铁站、停车场和街道等承灾体均面临较大比例的洪涝淹没影响。

不同承灾体的洪涝灾害危险性也存在显著差异(图 6)。例如,在这些承灾体中,街道的危险性最高,其次是农田和地下空间。街道、地下空间和农田的危险性在第一波降水后便上升至较高水平,而停车场、主要化工厂和水利工程施工的危险性则主要在 22 日凌晨第二波降水发生后上升至较高水平。

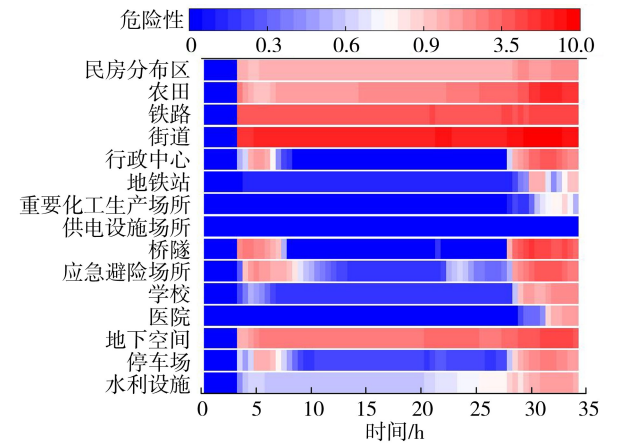


图 6 受洪涝淹没影响的各类承灾体的危险性演变过程
Fig. 6 Evolution of risk for various disaster-bearing bodies within inundated area

承灾体的危险性高低与暴露度高低并不一致。部分承灾体虽然暴露度不高,但危险性较高。以桥隧为例,其整体暴露度处于相对较低的水平(意味着多数桥隧并未暴露于洪涝灾害),然而暴露于洪涝灾害的桥隧危险性则极高。事实上,在本次事件中,南岗河流域开源大道桥隧发生严重淹没,造成了人员伤亡。

3.4 灾害链风险评估结果及讨论

将各承灾体的暴露度和危险性作为输入写入灾害链风险评估的 SFD 模型中,得到了该事件的灾害链风险评估量化结果。图 7 给出了综合洪涝风险指数和承灾体总暴露度随时间的变化过程。由图 7 可见,综合洪涝风险指数对降水过程呈现非线性响应。在 22 日凌晨的强降水过程中,累计降水量从 124 mm 增至 295 mm,增幅为 138%,而综合洪涝风险指数则从 0.072 增至 0.669,增幅达 816%。与此同时,所有承灾体的总暴露度从 0.092 增长至

0.290,增长了 215%。

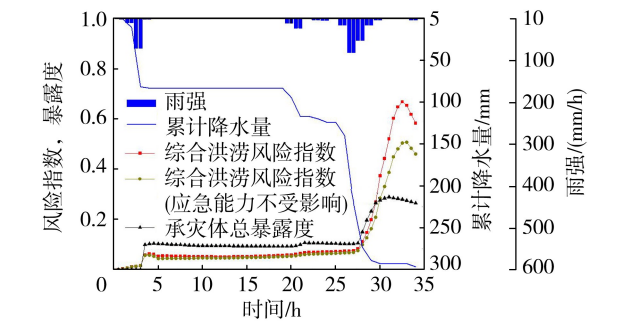


图 7 综合风险指数演变过程
Fig. 7 Evolution of comprehensive risk index

从时间上看,综合洪涝风险指数的峰值出现时间(第 33h)较承灾体总暴露度的峰值出现时间(第 31h)更晚。这一时间差表明,部分衍生灾害可能发生在最大洪涝淹没面积出现之后。这与相关研究结论一致^[14]。此外,如果不考虑应急救援能力和避险撤离能力受洪涝淹没的影响,综合洪涝风险指数的最大值将从 0.669 降至 0.508,降幅约 24%。由此可见,洪涝灾害对城市重要基础设施的破坏会降低应急反应能力,这正是增加洪涝灾害链风险的重要成因。

在各类不利事件的风险中,农业减产风险和其他社会经济影响风险尤为突出(图 8);车辆损毁风险和人员被困风险处于中等水平,最大值分别为 0.509 和 0.605;房屋垮塌风险和人员伤亡风险相对较低,最大值分别为 0.268 和 0.121。需要指出的是,在 H-E-V 框架下,风险评估结果并非承灾体受到损坏、功能发生损失的概率或者损失的期望值,但不利事件的风险值越高,该类不利事件发生的可能性越大,造成的影响也越大。因此,该评估结果可为暴雨条件下主要级联效应的研判提供重要参考。

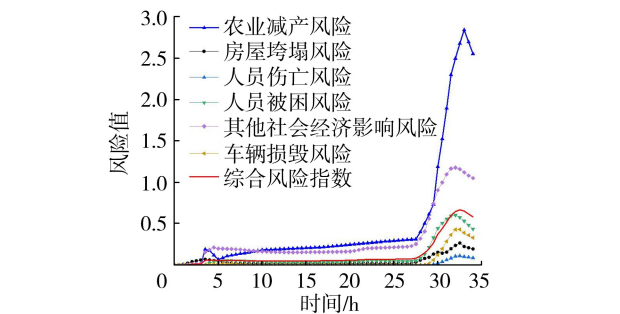


图 8 各类不利事件的风险动态
Fig. 8 Change of risk of adverse events

本文主要关注城市暴雨引发的洪涝所导致的各类不利事件风险,对暴雨引发的地质灾害未做考虑。但在实际的极端天气事件中,暴雨在引发城市洪涝的同时也可能引发泥石流、滑坡等地质灾害,使得城市暴雨灾害链更为复杂,后续研究将予以扩展。

4 结 语

本文在梳理城市暴雨洪涝的主要级联效应的基础上,提出了一种以城镇关键基础设施为暴雨洪涝级联灾害主要承灾体的城市洪涝灾害链风险评估方法。该方法利用基于机理模型模拟得到的洪涝演进信息,对系统动力学模型进行参数化,进而用于洪涝灾害链的风险评估。该方法能够揭示不同承灾体的级联灾害风险,可为城市暴雨洪涝灾害链的应对提供决策支撑。

以广州市南岗河流域 2020 年“5·22”特大暴雨事件为实例进行了灾害链风险评估,结果表明,水利设施、主要化工厂、医院及地下空间等承灾体遭遇的洪涝暴露度相对较高;而受淹的公路街道、农田、地下空间和桥隧等承灾体面临的危险性较高。在各类不利事件的风险中,农业减产风险和其他社会经济影响风险尤为突出,车辆损毁风险和人员被困风险处于中等水平,房屋坍塌风险和人员伤亡风险相对较低。城市洪涝综合风险对降水呈现出非线性响应关系。在极端暴雨条件下,随着降雨的发生,城市洪涝综合风险的增幅远高于承灾体暴露度的增幅,且综合风险指数的达峰时刻较承灾体总体暴露度的达峰时刻滞后约 2 h。

参考文献:

[1] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报,2024,55(11): 1298-1308. (YUAN Ximin, LAN Zhuoqing WANG Lina, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping counter measures [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(11):1298-1308. (in Chinese))

[2] 李曦亭,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2): 12-18. (LI Xiting,WANG Leizhi, SHANG Shouwei, et al. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin, sub-basin and urban [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):12-18. (in Chinese))

[3] ZUCCARO G, DE GREGORIO D, LEONE M F. Theoretical model for cascading effects analyses [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 30: 199-215.

[4] 朱伟,陈长坤,纪道溪,等. 我国北方城市暴雨灾害演化过程及风险分析[J]. 灾害学, 2011, 26 (3): 88-91. (ZHU Wei,CHEN Changkun,JI Daoxi,et al. Analysis on the risk and evolution process of rainstorm disaster in cities of north China[J], Journal of Catastrophology[J],

2011,26(3):88-91. (in Chinese))

[5] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (1): 1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (1):1-9. (in Chinese))

[6] 叶丽梅,周月华,周悦,等. 暴雨洪涝灾害链实例分析及断链减灾框架构建[J]. 灾害学,2018,33(1): 65-70. (YE Limei, ZHOU Yuehua, ZHOU Yue, et al. Instance analysis of rainstorm floods chain and chain-cutting disaster mitigation building [J]. Journal of Catastrophology,2018,33(1): 65-70. (in Chinese))

[7] BERARIU R, FIKAR C, GRONALT M, et al. Understanding the impact of cascade effects of natural disasters on disaster relief operations [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2015,12:350-356.

[8] SERRE D, HEINZLEF C. Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 30 (B), 235-243.

[9] 刘家宏,梅超,刘宏伟,等. 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题[J]. 水科学进展,2023,34(2): 172-181. (LIU Jiahong,MEI Chao,LIU Hongwei, et al. Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities[J]. Advance in Water Resources,2023,34(2): 172-181. (in Chinese))

[10] 靳文波,杨继星,刘韶菲,等. 特大城市暴雨灾害断链推演与应对方法研究[J]. 中国工程科学,2023,25(1): 20-29. (JIN Wenbo, Yang Jixing, LIU Shaofei, et al. Chain breaking simulation and countermeasures of rainstorm disasters in megacities[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(1): 20-29 (in Chinese))

[11] 王浩,杜伟,刘家宏,等. 基于知识图谱的城市洪涝灾害链推演及时空特性解析[J]. 水科学进展, 2024, 35 (2): 185-196. (WANG Hao, DU Wei, LIU Jiahong, et al. Derivation and transmission analysis of urban flood disaster chain based on knowledge graph[J]. Advance in Water Resources,2024,35(2): 185-196. (in Chinese))

[12] 卢兴超,徐宗学,施奇妙,等. 城市暴雨洪涝灾害链演变特征及减灾途径[J]. 水科学进展, 2025, 36 (1): 97-108. (LU Xingchao, XU Zongxue, SHI Qimiao, et al. Evolution characteristics of urban flood disasters chain and approaches for disaster mitigation[J]. Advances in Water Resources,2025,36(1):97-108. (in Chinese))

[13] 张会,李铖,程炯,等. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展,2019,38(2): 175-190. (ZHANG Hui,LI Cheng,CHENG Jiong,et al. 2019. A review of urban flood risk assessment based on the

- framework of hazard-exposure-vulnerability[J]. Progress in Geography,38(2): 175-190. (in Chinese))
- [14] 李孟泽,褚俊英,周祖昊,等. 基于多智能体系统的城市极端暴雨内涝风险动态评估[J]. 水资源保护, 2025,41(2): 95-105. (LI Mengze,CHU Junying,ZHOU Zuhao, et al. Dynamic assessment of urban extreme rainstorm waterlogging risk based on multi-agent system [J], Water Resources Protection, 2025, 41(2): 95-105. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] 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))
- [17] 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))
- [18] 李博文,张印,杨芳,等. 基于复杂网络模型的广州市增城区洪涝灾害风险评估[J]. 人民珠江,2023,44(10): 47-53. (LI Bowen,ZHANG Yin,YANG Fang, et al. Flood risk assessment for Zengcheng District of Guangzhou City based on complex network models[J]. Pearl River, 2023, 44(10): 47-53. (in Chinese))
- [19] CODETTA-RAITERI D, BOBBIO A, MONTANI S, et al. A dynamic Bayesian network based framework to evaluate cascading effects in a power grid [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(4): 683-697.
- [20] LI J, LIU G, WANG H. Capturing cascading effects under urban flooding: a new framework in the lens of heterogeneity [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130249.
- [21] 方志耕,杨保华,陆志鹏,等. 基于 Bayes 推理的灾害演化 GERT 网络模型研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(2): 102-107. (FANG Zhigeng, YANG Baohua, LU Zhipeng, et al. The GERT network model study of disaster evolution based on Bayes inference [J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(2): 102-107. (in Chinese))
- [22] RAHNAMAY-NAEINI M, HAYAT M M. Cascading failures in interdependent infrastructures: an interdependent Markov-Chain approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1997-2006.
- [23] CHEN Y, ZHANG J, ZHOU A, et al. Modeling and analysis of mining subsidence disaster chains based on stochastic Petri nets[J]. Natural Hazards, 2018, 92: 19-41.
- [24] YANG Z, DONG X B, GUO L. Scenario inference model of urban metro system cascading failure under extreme rainfall conditions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 229: 108888.
- [25] TANG P, ZHONG W, WEN J. Developing and understanding cascading effects scenario of typhoons in coastal mega-cities from system perspectives for disaster risk reduction: a case study of Shenzhen, China [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 92: 103691.
- [26] BERARIU R, FIKAR C, GRONALT M, et al. Understanding the impact of cascade effects of natural disasters on disaster relief operations [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2015, 12: 350-356.
- [27] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R/OL]. 北京: 中华人民共和国应急管理部, 2022[2022-01-21]. [2022-03-15]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/202201/P020220121639049697767.pdf>.
- [28] VERSINI P A, GAUME E, ANDRIEU H. Assessment of the susceptibility of roads to flooding based on geographical information-test in a flash flood prone area (the Gard region, France) [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2010, 10(4): 793-803.
- [29] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7. (SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 1-7. (in Chinese))
- [30] FORRESTER J W. Industrial Dynamics [M]. Cambridge: MIT Press, 1961.
- [31] YANG C C, YE H C. Application of system dynamics in environmental risk management of project management for external stakeholders [J]. Systemic Practice and Action Research, 2014, 27: 211-225.
- [32] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [33] 胡晓张,宋利祥. HydroMPM2D 水动力及其伴生过程耦合数学模型原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [34] 杨芳,胡豫英,宋利祥,等. 基于动态网格和局部时间步长技术的城市洪涝模型加速方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(12): 2132-2143. (YANG Fang, HU Yuying, SONG Lixiang, et al. Acceleration method of the urban flood model based on the dynamic grid system and local time step technology[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2024, 64(12): 2132-2143. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-29 编辑:雷燕)