

# 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展

徐宗学, 卢兴超, 施奇妙

(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)

**摘要:** 围绕城市洪涝灾害形成过程的多样性、复杂性、连锁性特点, 分析了城市洪涝灾害的构成和形成机制, 总结了城市暴雨洪涝灾害风险的不确定性、不稳定性、非单一性特征, 解析了城市洪涝致灾过程中承灾体的暴露性、脆弱性、易损性特点, 比较了城市洪涝灾害风险评估中 H-V、H-E-V 和 H-E-V-R 三种框架的适用性, 提出了城市洪涝灾害风险评估流程, 辨析了城市洪涝灾害风险评估中历史灾情评估法、指标体系评估法、GIS 和 RS 耦合法、情景模拟评估法以及多智能体模型评估法的适用条件和优缺点。指出未来城市洪涝灾害风险评估手段将从定性分析向定量评估转变, 评估对象将从洪涝灾害本身向承灾体转变。

**关键词:** 城市洪涝灾害; 风险特征; 承灾体特征; 风险评估

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)01-0001-09

**Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment//XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao** (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Focusing on the characteristics of diversity, complexity, and linkage in the formation process of urban flooding disasters, the composition and formation mechanism of urban flooding disasters was analyzed, the uncertainty, instability, and non-uniformity characteristics of the urban flooding disaster risk were summarized, and the exposure, vulnerability, and fragility of the disaster-bearing bodies in the disaster-causing urban flooding were investigated. The applicability of H-V, H-E-V, and H-E-V-R frameworks in urban flooding disaster risk assessment was compared, the process of urban flooding disaster risk assessment was proposed, and the applicable conditions, advantages and disadvantages of historical disaster assessment method, index system assessment method, GIS and RS coupling method, scenario simulation assessment method, and multi-agent model evaluation method were investigated. It is pointed out that future risk assessment methods for urban flood disasters will evolve from qualitative analysis to quantitative evaluation, and the focus of assessment will shift from the flood disasters themselves to the disaster-bearing bodies.

**Key words:** urban flooding disaster; risk characteristics; characteristics of disaster-bearing body; risk assessment

城市暴雨洪涝灾害具有自然和社会双重属性<sup>[1-2]</sup>。研究显示,近一个世纪以来全球地表平均气温上升了 1.1℃<sup>[3]</sup>,全球气温每上升 1℃,空气中水汽含量就会增加 7%<sup>[4]</sup>,当地面露点温度达到 26℃ 时,可降水量一般在 60 mm 以上<sup>[5]</sup>。中国气象局发布的《中国气候变化蓝皮书(2023)》指出,中国极端高温事件频发趋强,极端强降水事件增多,气候风险指数呈上升趋势。国家统计局发布的《国民经济和社会发展统计公报》显示,到 2023 年底全国城镇化率达到 66.16%,与改革开放前城镇化率不到 20% 相比,年均增幅接近 1%<sup>[6]</sup>。在城镇化和气候变化的共同作用下,城市洪涝灾害发生的可能性和

不确定性在增加。

极端暴雨洪涝灾害具有累计雨量大、致灾损失高、影响范围广的特征<sup>[7]</sup>,这对灾害风险评估手段提出了更高的要求。城市洪涝灾害风险由传统的定性评估向半定量或定量评估方向发展。随着人工智能技术的发展,机器学习、深度学习等技术提高了城市洪涝模型的计算效率<sup>[8]</sup>,并在数字孪生流域、洪涝预报系统、智慧水利系统得到了广泛应用,使洪涝灾害风险评估更加具有高效性、实时性、精准性<sup>[9-10]</sup>。在城市洪涝灾害推演过程中,通过模拟承灾体面临的灾害风险损失,采取主动避险、救援方式<sup>[11-12]</sup>,将承灾体受灾风险降到最低,也可为政府

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239003)

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

部门制定保险补偿措施提供建议<sup>[13]</sup>。致灾因子的危险性、承灾体的易损性共同决定着城市洪涝灾害的致灾等级,多智能体模型的引入也让城市洪涝灾害损失评估从洪涝灾害本身向承灾体转变,对进一步精准化评估承灾体受灾损失具有重要意义。

本文系统分析了城市洪涝灾害的构成及其风险特征,辨析了承灾体暴露性、脆弱性、易损性等属性特征之间的差异性,从定性分析到定量评估角度,比较了常见的5种城市洪涝灾害风险评估方法和3种风险评估框架,并基于城市洪涝灾害中承灾体动态风险评估需求,分析了多智能体模型评估法的特点和适用性,以期为承灾体受灾风险量化评估提供选择。

## 1 城市洪涝灾害及其风险

### 1.1 城市洪涝灾害

城市洪涝灾害系统是城市孕灾环境、致灾因子、承灾体在特定范围内相互作用、相互影响、相互反馈,形成的具有复杂功能的体系<sup>[14]</sup>,如图1所示。该系统既是自然变化造成的,也是人类活动参与形成的。随着化石能源的使用、城镇化建设的推进,气候环境发生了显著变化,自然水循环系统被打破,“自然-社会”二元水循环模式形成<sup>[15]</sup>,导致城市化水文效应产生,易引发城市洪涝灾害<sup>[16]</sup>。

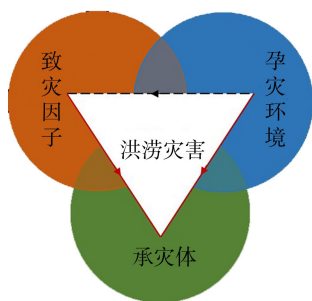


图1 城市洪涝灾害系统

#### 1.1.1 致灾因子

全球气候变化和城市化建设是极端暴雨形成的驱动要素。我国南北气候差异性和地形独特性决定了暴雨形成机制也有所不同<sup>[17]</sup>:华北地区受喇叭口地形、迎风坡地形和中、低纬度天气系统的影响;华南地区位于副热带高压的西北缘,水汽输送受辐射、地形、温差等多因素的影响;东北地区受冷涡空气对暴雨区稳定性的影响;西南地区受西南低涡的影响。暴雨引发城市洪涝,洪涝致灾程度受洪涝范围、深度、时间、流速等参数决定。台风暴雨是引发城市洪涝灾害的重要因素之一,如受台风“杜苏芮”影响,北京“23·7”暴雨事件造成山洪与内涝叠加形成洪涝灾害事件;受台风“海葵”、弱冷空气和季风三者叠加影响,深圳“9·7”特大暴雨事件造成城区淹没

面积占比达到19%,平均淹没时间超过12h。

#### 1.1.2 孕灾环境

孕灾环境是城市暴雨洪涝灾害的必要条件。从先天性条件来说,一个区域的孕灾环境决定了该区域自然灾害的类型和可能达到的量级。城市有滨海型、平原型、山丘型、河谷型,孕灾环境决定了滨海型城市有洪、涝、潮叠加的可能性,平原型城市有洪涝交加、因洪致涝、因涝成洪的可能性,山丘型城市则可能面临高流速山洪并伴随滑坡、泥石流的危害,而河谷型城市可能面临外洪内涝叠加的风险。从后天性改变来说,在城市化进程中社会环境改变了孕灾条件。城镇化造成城市透水面积减少、河湖调蓄空间降低、城市生态排水系统破坏、径流排放路径改变,从而导致雨水渗透能力下降、蓄滞能力减弱、汇流时间缩短,为洪涝产生创造了条件<sup>[18]</sup>。与此同时,城市人口聚集、建筑物密度增大、地下空间开发强度高、社会财富集中,为增大城市洪涝致灾损失提供了有利条件<sup>[19]</sup>。

#### 1.1.3 承灾体

承灾体是致灾因子的作用对象,分为人、财产、社会基建、自然资源<sup>[20]</sup>。不同承灾体应对洪涝灾害的属性特征不同,如成年男性、成年女性、老年人、儿童、残疾人,因身高、体重、年龄、身体素质的差异,其抗风险能力差距较大。下巴桥区、低洼路段、下穿隧道、地下空间等承灾体受灾后易造成次生灾害,包括人员伤亡、车辆受淹、财产受损、城市服务设施中断。供电站、自来水厂、车站、通信基站等城市基础设施受洪涝侵袭后造成城市运行保障中断,容易衍生新的灾害。脆弱性是承灾体自身固有的属性,不同灾区承灾体的脆弱性不同,而同一灾区不同承灾体表现的差异性也较大<sup>[21]</sup>。

### 1.2 城市洪涝灾害风险

风险为一个事件后果与其发生可能性的组合<sup>[22]</sup>。城市洪涝灾害风险由致灾因子危险性、承灾体暴露性和脆弱性组成。随着全球变暖加剧、海平面不断上升,流域洪水外排受阻,在外洪内涝叠加效应下城市洪涝灾害风险增大。与此同时,在城镇化不断推进背景下,城市温室效应、凝结核效应、微地形障碍效应等显著增强,造成城市局部地区极端降雨概率增大,致灾因子危险性增强,而当城市人口聚集、基建服务设施增多、社会财富体量增大,但城市应对灾害的防御能力无法同步跟上时,易导致承灾体暴露性、脆弱性出现倍数增长,造成城市洪涝灾害风险增大,因此,城市洪涝灾害风险等级与致灾因子危险性、承灾体暴露性和脆弱性呈正相关关系。未来随着极端气候演变、城镇化面积增大、城市社会财

富增多,城市洪涝灾害风险变大,如图2所示,城市洪涝灾害防治工作面临着诸多的挑战与不确定性。

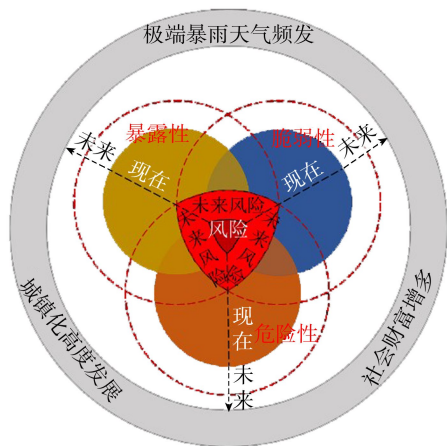


图2 城市洪涝灾害风险

### 1.2.1 不确定性

城市洪涝灾害风险受到多方面的影响:①灾害发生过程中多种环境要素相互作用、相互影响,且随着时间变化,环境要素对承灾体而言既有不利因素也有有利因素,导致孕灾环境呈现复杂性<sup>[23]</sup>;②致灾因子在形成、传递、衍生的过程中时刻变化,对承灾体的影响也具有时空差异性;③承灾体随着环境的变化也会产生动态响应,如洪涝灾害发生在下班高峰期与午间休息期、白天与夜晚等不同场景下,承灾体响应状态、所处位置、应对措施均具有明显差异,导致洪涝灾害损失不同。

### 1.2.2 不稳定性

我国南北城市气候差异较大、地形特征不同,洪涝灾害致灾机理也各不相同<sup>[17]</sup>。沿海城市受台风影响,大量水汽输送至陆地产生强降雨,城市排水能力、防涝能力和防洪能力红线屡次被突破,在洪、涝、潮共同加持下形成严重洪涝灾害事件<sup>[24]</sup>,如深圳“9·7”特大暴雨事件。内陆城市主要受地形和纬度的影响,但在台风和大气压差作用下大量水汽不断进入内陆城市,产生极端强降雨事件,如郑州“7·20”暴雨事件。随着气候变化加剧、城市化建设推进,极端降雨事件成为近几年的常态,不断突破城市洪涝灾害防御底线,给城市洪涝灾害设防标准带来了新的挑战。

### 1.2.3 非单一性

城市洪涝同源具有叠加效应。强降雨事件除了形成暴雨洪涝灾害外,易造成山体滑坡、泥石流、溃坝等灾害,多种自然灾害交织在一起,导致灾害具有复杂性。城市供水系统、供暖系统、电力系统、关键生命线等受洪水冲击时易受到破坏,产生由洪涝灾害引发的灾害链<sup>[25]</sup>,如“洪涝入侵地下空间—二次

供水泵房淹没—建筑供水系统瘫痪—居民用水短缺”“道路洪灾—车辆受淹受困—交通堵塞—救援无法及时赶到—乘客死亡”,这些由原生灾害引发的连锁反应<sup>[26]</sup>,将多种灾害叠加在一起形成复合型灾害,导致灾害损失以数倍形式增加。

## 2 城市洪涝灾害承灾体响应特征

### 2.1 暴露性

暴露性通常指受洪涝灾害危险性影响的承灾体类型、时空分布和价值。暴露性是承灾体在致灾因子作用下内外特性的综合表现,反映了承灾体受灾害影响或胁迫的程度,也是联系致灾因子危险性和承灾体脆弱性的纽带。承灾体暴露性容易受土地利用类型、人类活动、资产密度、环境等因素影响,承灾体的暴露性越高,越容易被致灾因子破坏,自我恢复能力越低,潜在脆弱性就越高<sup>[27]</sup>。暴露性研究在城市洪涝灾害风险评估中是基础研究,在脆弱性及风险研究中占据重要地位。承灾体暴露性研究常用的方法有地理信息系统(geographic information system, GIS)、空间分析方法、GIS和遥感(remote sensing, RS)耦合法、实地调查法等。暴露性分析中需要确定承灾体的分布特点、数量、物理形状、最小分析单元等要素,确定风险区,评价暴露要素,有利于后续进行洪涝风险和损失评估<sup>[28]</sup>。宋英华等<sup>[29]</sup>构建了武汉市MIKE 21水动力学模型,运用GIS空间分析技术,从积水深度和降雨时间等维度分析道路、建筑物等承灾体的暴露性。孙忠等<sup>[30]</sup>构建了孕灾环境脆弱性、承灾体暴露性及致灾因子危险性等多维空间耦合模型,提出结合加权综合评价法的灾害风险测算新方法,发现了承灾体暴露性较高的区域特点。

### 2.2 脆弱性

联合国国际减灾战略(UN/ISDR)认为承灾体脆弱性是区域容易受破坏或损伤的程度,并受社会、经济、物理和环境等要素影响<sup>[31]</sup>。Gallopín<sup>[32]</sup>认为脆弱性包含敏感性和响应能力,是系统与外界干扰之间联系的一种特征。结合现有学者们对脆弱性的定义和解释<sup>[33]</sup>,脆弱性可理解为承灾体的结构和功能中固有特征及属性受外动力冲击下引发灾害的期望损失程度,即对社会、经济、环境等各方面的暴露性、敏感性与适应能力的综合响应。在城市化建设中河湖天然通道被管网系统代替,城市基础设施高度集中,地下空间全面开发,城市正常运转过于依赖重要生命线工程和信息技术,这些事实加大了城市承灾体脆弱性<sup>[34]</sup>。承灾体脆弱性评估方法分为定性评估、半定量评估和定量评估。一般定性评估或半定量评估为基于指标体系法的专家打分法和统计



分析,定量评估为统计拟合、机器学习、模型模拟等方法。季孔阳等<sup>[35]</sup>利用 MIKE 模型定量分析了脆弱性综合评价指标值,计算城市洪涝灾害的脆弱性指数。徐宗学等<sup>[36]</sup>关注精细化经济指标空间分布并融合多源数据,构建了城市承灾体脆弱性评估指标体系,区分了流域脆弱性等级。当受到多种自然灾害侵害时,评估方法可选择指数法、矩阵法和曲线法。

### 2.3 易损性

易损性是承灾体在孕灾环境中受到一定外动力冲击下可能发生的灾害损失容易程度或情况。Zhang<sup>[37]</sup>认为易损性不依赖于危险事件,其产生与改变受到系统组织、社会和经济因素的影响。金菊良等<sup>[38]</sup>认为承灾体的易损性是承灾体承受灾害的能力。黄国如等<sup>[39-40]</sup>研究表明承灾体易损性是系统遭受洪涝灾害时潜在的可能损失程度。承灾体易损性易受人口、社会、文化、政治、环境和经济等要素的影响,具有时空异质性,能为区域土地利用、城市灾害风险评估等提供重要依据。易损性主要关注灾害破坏的概率和程度。目前大部分的承灾体易损性评估都是进行静态定性的描述,但只有进行动态全面的评价,将定量与定性相结合,才能更好地掌握城市易损性变化,了解城市洪涝灾害承灾体响应机制,丰富洪涝灾害风险评估体系。王绍玉等<sup>[41]</sup>基于 Kullback-Leibler (KL) 距离建立了 KL-TOPSIS 模型,动态评估了哈尔滨市洪水灾害易损性,并与其他城市进行了横向比较,验证了该评估方法的科学性。黄国如等<sup>[42]</sup>构建了一、二维城市洪涝耦合模型,根据洪涝灾害危险性和社会经济易损性选择指标,结合层次分析法进行了洪涝灾害风险评估。

## 3 城市洪涝灾害风险评估

### 3.1 风险评估框架

城市洪涝灾害风险评估框架分为:危险性(H)-易损性(V)、危险性(H)-暴露性(E)-脆弱性(V)、危险性(H)-暴露性(E)-脆弱性(V)-防灾减灾能力(R)<sup>[39,43-44]</sup>,如图3所示。危险性指标通常包含净雨量、降雨持续时间、最大降雨强度、下垫面地形和高程。暴露性指标包含承灾体在环境中的暴露时间、承灾体密度、经济指标。承灾体越聚集、暴露时间越长,承灾体暴露在洪涝灾害中的危险性越高,则暴露性越大。脆弱性指标包括承灾体结构、组成、用途、环境适应性等,决定着承灾体本身抵抗洪涝灾害的能力。承灾体应对能力与其脆弱性负相关,即应对能力越强,脆弱性越小<sup>[45]</sup>。易损性通常与承灾体本身的脆弱性和暴露性有关,包含承灾体结构不足、功能缺陷、密度大小、抗击能力。承灾体易损性越

强,受灾风险越高。防灾减灾能力指标包含监测预警系统、防灾减灾措施、防汛抗险设施、救援抢险措施等方面的软件和硬件措施,同时也包含承灾体自身的避险能力。

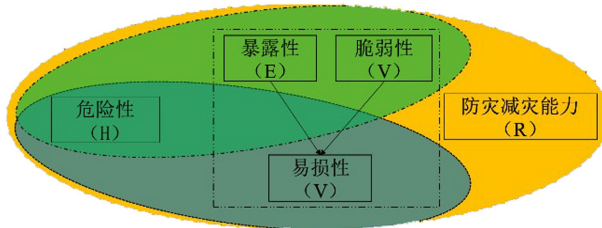


图3 城市洪涝灾害风险评估框架

虽然当前学术界对洪涝灾害风险框架构成要素尚未达成共识,但每种框架都有其适用性,关键在于如何科学合理利用。H-V 框架直接将城市洪涝灾害的致灾因子危险性与承灾体的易损性相结合,划分洪涝灾害的风险等级。例如:周成虎等<sup>[46]</sup>利用该框架对辽河流域洪灾风险进行了区划;张倩玉等<sup>[47]</sup>基于该框架,采用层次分析法和因子叠加法评估了东南沿海地区水库下游的洪涝风险性。H-E-V 框架将承灾体的暴露性、脆弱性与致灾因子的危险性统筹考虑。例如:尹占娥等<sup>[48]</sup>采用情景模拟方法对上海静安区某典型区域的洪涝灾害进行了评估,利用该框架进行灾害风险评价;殷杰等<sup>[49]</sup>采用该框架构建内涝灾害风险评估模型对上海川沙镇临园社区的内涝风险进行了评估。H-E-V-R 框架将城市的自我防御能力考虑进去,可更加真实地反映该框架的合理性。例如:杜康宁等<sup>[50]</sup>基于该框架利用层次分析法对景德镇洪涝灾害风险进行了区划;李远平等<sup>[51]</sup>基于该框架构建了六安市暴雨洪涝灾害风险评估指标体系。

### 3.2 风险评估流程

城市洪涝灾害风险评估以“评估指标与方法→资料收集与集成→数据提取与处理→风险评估与区划”为路线,如图4所示,具体流程如下:

- a. 评估指标与方法。①确定城市洪涝灾害风险指标,包括孕灾环境敏感性指标、致灾因子危险性指标、承灾体易损性指标;②优选适宜的城市洪涝灾害风险评估法,为资料收集提供明确方向。
- b. 资料收集与集成。开展研究区的气象水文监测、城市下垫面和基础设施、社会经济文化、地下排水系统、历史灾情情况、水利构筑物设施等资料的收集与调研工作,按照资料类型分类,形成资料集成库。
- c. 数据提取与处理。按照城市洪涝灾害风险组成三要素,从资料集成库中筛选出孕灾环境敏感性、致灾因子危险性、承灾体易损性等参数,给出各



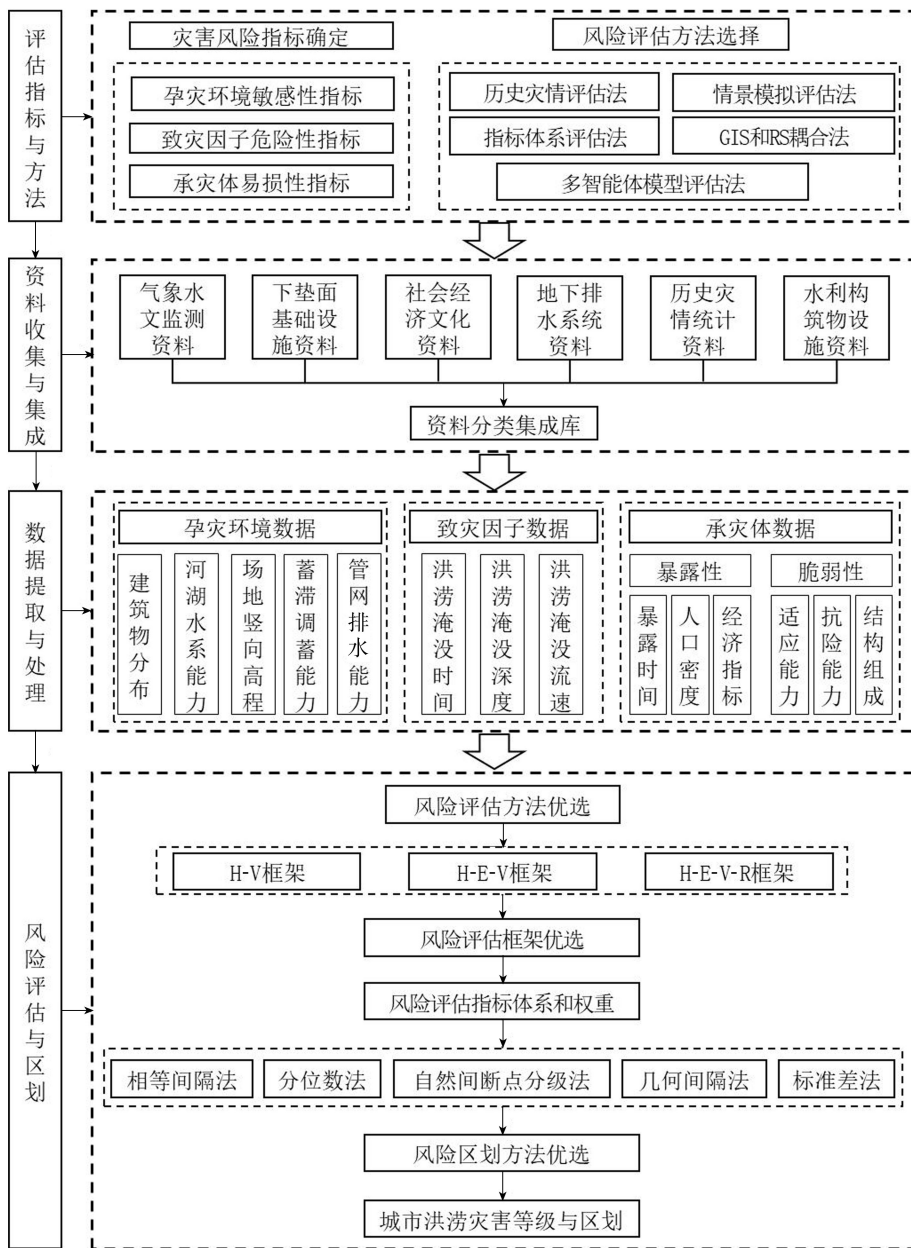


图4 城市洪涝灾害风险评估流程

指标的定性分析与定量评估。

**d. 风险评估与区划。** 优选合适的风险评估方法、风险评估框架、风险区划方法, 评估城市洪涝灾害风险, 给出灾害风险等级和区划范围。

### 3.3 风险评估方法

城市洪涝灾害风险评估方法分为定性分析、半定量分析、定量分析, 其中定性分析或半定量分析通常基于指标体系评估法, 定量分析包括历史灾情评估法、GIS和RS耦合法、情景模拟评估法、多智能体模型评估法。

#### 3.3.1 历史灾情评估法

该方法结合历史洪涝灾害事件中降雨数据和承灾体损失数据, 采用数理统计方式对城市洪涝灾害风险进行评估分析, 估算承灾体的损失大小。例如:

王静静等<sup>[52]</sup>通过统计1951—2000年的暴雨洪涝资料, 计算了受灾频次指标, 对东南沿海进行了洪涝灾害风险评价; 杨佩国等<sup>[53]</sup>基于历史暴雨洪涝灾情数据构建脆弱性曲线, 定量研究了北京市在不同降水量下的宏观脆弱性, 为北京市洪涝灾害风险管理提供了参考依据。历史灾情评估法的优点是不需要精细化的地理数据、计算方便快捷, 缺点是无法精准反映空间差异性, 更不能反映变化环境下洪涝灾害的新特征, 因此难以直接用于未来的风险评估。

#### 3.3.2 指标体系评估法

该方法从致灾因子危险性、承灾体脆弱性和暴露性出发, 采用数学方法处理指标划分权重, 对城市洪涝灾害过程中的承灾体风险进行评估。一般分为专家打分法、熵权法、层次分析法、主成分分析法、多

准则分析法、随机森林法等。例如:成蕾等<sup>[54]</sup>基于单灾种和多灾种 2 个维度,全面梳理了几种典型单灾种物理脆弱性指标体系和评估模型的构建情况;黄晶等<sup>[55]</sup>采用层次分析法与基于指标相关性的权重确定方式的组合赋权法,对深圳市福田区 4 个典型社区洪涝灾害发生时人群的受灾动态风险进行评估,给出了风险动态变化特征。指标体系评估法的优点是建模与计算简便,缺点是指标代表性易出现不足,指标权重选取过程主观性强,无法覆盖洪涝风险受灾特征。

### 3.3.3 GIS 和 RS 耦合法

该方法利用卫星遥感技术获取研究区内洪涝淹没范围、淹没时间及受灾情况,并利用 GIS 软件强大的空间数据管理和处理功能,将淹没数据进行解译和分析,绘制洪涝灾害分布图,评估洪涝灾害风险情况。例如:郑伟等<sup>[56]</sup>利用风云三号(FY-3)卫星数据对洪涝灾害最大淹没面积和时间信息进行提取,实现对洪涝灾害的监测;王泽雨等<sup>[57]</sup>基于 RS 和 GIS 技术对江西省洪涝灾害风险进行区划,并指出洪涝灾害风险较高的主要集中区域。GIS 和 RS 耦合法的优点是能够快速真实地反映受灾情况,具有时效性和精准性,缺点是对遥感影像的分辨率和解译准确率要求高,无法对洪涝过程详细信息如流速、水深等进行识别。

### 3.3.4 情景模拟评估法

该方法基于城市洪涝模型软件,对城市气象、水文、下垫面、地下管网等数据进行处理、演算、模拟,动态反映城市洪涝灾害过程,评估洪涝灾害风险。常用的国外洪涝模型包含 InfoWorks ICM、MIKE、PCSWMM、FLOW-3D 等商业软件,以及完全开源软件 SWMM 模型、半开源软件 LISFLOOD-FP 模型等;国内自主洪涝模型有 HydroMPM2D、GAST、HydroInfo、IFMS/Urban 等模型<sup>[58-60]</sup>。随着人工智能技术的发展,机器学习、深度学习进一步提高了城市洪涝模型的精准度和可靠度<sup>[61]</sup>,并被深入应用于数字孪生流域、联排联调系统、在线实时预报模拟以及城市智慧排水等方面<sup>[62]</sup>,使情景模拟评估法成为当前城市洪涝灾害风险评估与管理的主要手段之一。情景模拟评估法的优点是能够直观形象地反映洪涝灾害过程,获取各个阶段灾害风险数据,缺点是数据要求精度高,一般难以收集全面,数据处理工作量大。

### 3.3.5 多智能体模型评估法

该方法在情景模拟基础上引入系统理论模型,将孕灾环境智能体、致灾因子智能体、承灾体智能体,经通信机制和运行规则进行关联,构建多智能体模型。其中孕灾环境智能体涵盖下垫面高程、建筑

物、水系、道路分布等;致灾因子智能体通常为城市洪涝模型模拟得到的淹没范围、水深、时间等因子;承灾体智能体包括人、建筑物、车辆等受灾对象。通过将多智能体模型和城市洪涝模型进行耦合,构建城市洪涝灾害风险动态评估模型,能够实现对承灾体本身受灾情况进行量化评估<sup>[63]</sup>。朱净萱等<sup>[64]</sup>以浙江省丽水市莲都区北城作为研究区域,基于多智能体模型构建城市洪涝灾害动态脆弱性计算模型框架,定量评估研究区承灾体的脆弱性。卢兴超等<sup>[65]</sup>以北京市清河流域某典型排水分区为例,耦合城市洪涝灾害模拟结果,构建基于多智能体的城市洪涝灾害风险评估模型,并量化计算行人的受灾风险。多智能体模型评估法的优点是针对性强、能直观反映承灾体受灾变化特征,缺点是数据要求量大且精度高。

## 4 结 语

城市洪涝灾害一直是防灾减灾的热点问题,本文围绕城市洪涝致灾过程的多样性、复杂性、连锁性特点,提出了城市洪涝灾害风险的不确定性、不稳定性、非单一性特征,比较了城市洪涝致灾过程中承灾体的暴露性、脆弱性、易损性之间的差异,以及风险评估框架中 H-V、H-E-V、H-E-V-R 框架的适用性,提出了以“评估指标与方法→资料收集与集成→数据提取与处理→风险评估与区划”为路线的城市洪涝灾害风险评估流程,辨析了历史灾情评估法、指标体系评估法、GIS 和 RS 耦合法、情景模拟评估法、多智能体模型评估法等 5 种风险评估方法的优缺点。随着学科交叉深入和人工智能发展,城市洪涝灾害风险评估手段从定性分析向定量评估转变,灾害评估对象从洪涝灾害本身向承灾体转变,对受灾对象的灾害损失评价更加精准可靠,可为城市管理部门开展防灾减灾工作提供技术支撑。

## 参考文献:

- [1] SHUSTER W D, PAPPAS E, ZHANG Y. Laboratory-scale simulation of runoff response from pervious-impervious systems[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(9): 886-893.
- [2] 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))
- [3] IPCC. AR6 synthesis report: climate change 2023 [R]. Geneva: IPCC, 2023.
- [4] 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))
- [5] 郑永光,陶祖钰,俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象,2017,43(6):641-652. (ZHENG Yongguang, TAO Zuyu, YU Xiaoding. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteorological Monthly,2017,43(6):641-652. (in Chinese))
- [6] 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[2015]of State Council[J]. Water & Wastewater Engineering,2021,57(10):1-8. (in Chinese))
- [7] 黄晶,吴星妍,李梦晗. 不同主体视角下极端暴雨灾害事件网络舆情演化研究[J]. 水利经济,2023,41(4):94-106. (HUANG Jing, WU Xingyan, LI Menghan. Research on the evolution of network public opinion of extreme rainstorm disaster events from the perspective of different subjects[J]. Journal of Economics of Water Resources,2023,41(4):94-106. (in Chinese))
- [8] LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, et al. Fast simulation and prediction of urban pluvial floods using a deep convolutional neural network model[J]. Journal of Hydrology,2023,624:129945.
- [9] ZABIHI O, SIAMAKI M, GHEIBI M, et al. A smart sustainable system for flood damage management with the application of artificial intelligence and multi-criteria decision-making computations[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2023,84:103470.
- [10] 高成,余亮亮,顾春旭,等. 城市内涝预警预报系统研发及应用[J]. 中国水利,2024(3):34-38. (GAO Cheng, SHE Liangliang, GU Chunxu, et al. Development and application of urban waterlogging warning and forecasting system[J]. China Water Resources,2024(3):34-38. (in Chinese))
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报,2021,52(1):3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(1):3-11. (in Chinese))
- [15] 徐宗学,李鹏. 城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护,2022,38(1):7-17. (XU Zongxue, LI Peng. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):7-17. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 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. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):6-15. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 唐任伍. 我国城镇化进程的演进轨迹与民生改善[J]. 改革,2013(6):27-33. (TANG Renwu. Trajectory of the urbanization process and improvement of people's livelihood in China[J]. Reform,2013(6):27-33. (in Chinese))
- [20] 吴吉东,张化,许映军,等. 承灾体调查总体情况介绍[J]. 城市与减灾,2021(2):20-23. (WU Jidong, ZHANG Hua, XU Yingjun, et al. Introduction to overall survey situation of disaster-bearing body[J]. City and Disaster Reduction,2021(2):20-23. (in Chinese))
- [21] 周月华,彭涛,史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(5):494-501. (ZHOU Yuehua, PENG Tao, SHI Ruiqin. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood disasters in China[J]. Torrential Rain and Disasters,2019,38(5):494-501. (in Chinese))
- [22] 周妹天,翟国方,施益军,等. 城市自然灾害风险评估研究综述[J]. 灾害学,2020,35(4):180-186. (ZHOU Shutian, ZHAI Guofang, SHI Yijun, et al. A literature review of urban natural disaster risk assessment[J]. Journal of Catastrophology,2020,35(4):180-186. (in Chinese))



- [23] 宋晓猛,徐楠涛,张建业,等. 中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J]. 水科学进展,2024,35(3):357-373. (SONG Xiaomeng, XU Nantao, ZHANG Jianyun, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science,2024,35(3):357-373. (in Chinese))
- [24] 徐宗学,陈浩,黄亦轩,等. 我国沿海地区城市洪(潮)涝成因及应对策略:以深圳市为例[J]. 中国防汛抗旱,2024,34(1):14-18. (XU Zongxue, CHEN Hao, HUANG Yixuan, et al. Mechanism and strategies for urban flooding/tide waterlogging in coastal areas of China: a case study of Shenzhen City [J]. China Flood & Drought Management,2024,34(1):14-18. (in Chinese))
- [25] 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]. Advances in Water Science,2024,35(2):185-196. (in Chinese))
- [26] 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))
- [27] 叶燕妮. 基于土地利用的承灾体脆弱性与灾变风险研究:以广西北部湾经济区为例[D]. 南宁:南宁师范大学,2023.
- [28] 李伟峰,陈求稳,毛劲乔. 北京奥运村洪水淹没风险模型研究[J]. 科学通报,2009,54(3):321-328. (LI Weifeng, CHEN Qiuwen, MAO Jingqiao. Development of 1D and 2D coupled model to simulate urban inundation: an application to Beijing Olympic Village [J]. Chinese Science Bulletin,2009,54(3):321-328. (in Chinese))
- [29] 宋英华,张哲,方丹辉. 城市洪涝下承灾体暴露性及行人失稳风险分析[J]. 中国安全科学学报,2020,30(10):105-111. (SONG Yinghua, ZHANG Zhe, FANG Danhui. Analysis on exposure of disaster-bearing bodies and pedestrians' instability risk under urban waterlogging [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10):105-111. (in Chinese))
- [30] 孙忠,庞磊,卢扬扬. 基于多维空间耦合模型的综合灾害风险评价:以南阳市中心城区为例[J]. 灾害学,2024,39(1):89-95. (SUN Zhong, PANG Lei, LU Yangyang. Research on the comprehensive disaster risk assessment based on multidimensional spatial coupling model: take Nanyang's downtown area as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1):89-95. (in Chinese))
- [31] International Strategy for Disaster Reduction. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives [R]. New York: United Nations, 2004.
- [32] GALLOPÍN G C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3):293-303.
- [33] 李超超,程晓陶,王艳艳,等. 洪涝灾害三参数损失函数的构建 II:实例研究[J]. 水利学报,2020,51(5):519-526. (LI Chaochao, CHENG Xiaotao, WANG Yanyan, et al. A three-parameter flood damage function, part II: case study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5):519-526. (in Chinese))
- [34] 程晓陶. 城市型水灾害及其综合治水方略[J]. 灾害学,2010,25(增刊1):10-15. (CHENG Xiaotao. Urban water disasters and strategy of comprehensive control of water disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(Sup1):10-15. (in Chinese))
- [35] 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))
- [36] 徐宗学,唐清竹,陈浩,等. 基于精细化空间格局的城市承灾体脆弱性评估[J]. 水科学进展,2024,35(1):38-47. (XU Zongxue, TANG Qingzhu, CHEN Hao, et al. Assessment on the vulnerability of urban hazard bearing body based on refined spatial patterns [J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1):38-47. (in Chinese))
- [37] ZHANG Hongliang. A redefinition of the project risk process: using vulnerability to open up the event-consequence link [J]. International Journal of Project Management, 2007, 25(7):694-701.
- [38] 金菊良,王银堂,魏一鸣,等. 洪水灾害风险管理广义熵智能分析的理论框架[J]. 水科学进展,2009,20(6):894-900. (JIN Juliang, WANG Yintang, WEI Yiming, et al. Theoretical analysis frame based on general entropy and intelligence integration methodology for flood disaster risk management [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6):894-900. (in Chinese))
- [39] 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))
- [40] 毛德华,何梓霖,贺新光,等. 洪灾风险分析的国内外研究现状与展望(I):洪水为害风险分析研究现状[J]. 自然灾害学报,2009,18(1):139-149. (MAO Dehua, HE Zilin, HE Xinguang, et al. Review and prospect of research on flood risk analysis at home and abroad (I): status quo of research on risk analysis of flood hazard [J]. Journal of

- Natural Disasters,2009,18(1):139-149. (in Chinese))
- [41] 王绍玉,刘佳.城市洪水灾害易损性多属性动态评价[J].水科学进展,2012,23(3):334-340. (WANG Shaoyu, LIU Jia. Multi-attribute dynamic evaluation of urban flood disaster vulnerability[J]. Advances in Water Science,2012,23(3):334-340. (in Chinese))
- [42] 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))
- [43] 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. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability [J]. Progress in Geography,2019,38(2):175-190. (in Chinese))
- [44] 黄亦轩,徐宗学,陈浩,等.深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J].水资源保护,2023,39(1):101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):101-108. (in Chinese))
- [45] 曹建廷,黄火键,徐震,等.贵州省洪涝灾害演变规律及致灾机理研究[J].人民长江,2023,54(5):61-66. (CAO Jianting, HUANG Huojian, XU Zhen, et al. Study on evolution and related driving mechanism of flood disasters in Guizhou Province[J]. Yangtze River,2023,54(5):61-66. (in Chinese))
- [46] 周成虎,万庆,黄诗峰,等.基于GIS的洪水灾害风险区划研究[J].地理学报,2000,55(1):15-24. (ZHOU Chenghu, WAN Qing, HUANG Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation [J]. Acta Geographica Sinica,2000,55(1):15-24. (in Chinese))
- [47] 张倩玉,许有鹏,雷超桂,等.东南沿海水库下游地区基于动态模拟的洪涝风险评估[J].湖泊科学,2016,28(4):868-874. (ZHANG Qianyu, XU Youpeng, LEI Chaogui, et al. Risk assessment of flood based on dynamic simulation in downstream of reservoirs in coastal area of southeast China [J]. Journal of Lake Sciences,2016,28(4):868-874. (in Chinese))
- [48] 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 Zhan'e, 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))
- [49] 殷杰,尹占娥,王军,等.基于GIS的城市社区暴雨内涝灾害风险评估[J].地理与地理信息科学,2009,25(6):92-95. (YIN Jie, YIN Zhan'e, WANG Jun, et al. GIS-based disaster risk assessment of the urban community rainstorm waterlogging [J]. Geography and Geo-Information Science,2009,25(6):92-95. (in Chinese))
- [50] 杜康宁,梁忠民,王军,等.城市洪涝灾害风险区划研究[J].水电能源科学,2018,36(1):61-64. (DU Kangning, LIANG Zhongmin, WANG Jun, et al. Study on risk zoning of urban flood disaster [J]. Water Resources and Power,2018,36(1):61-64. (in Chinese))
- [51] 李远平,杨太保,包训成.大别山北坡典型区域暴雨洪涝风险评价研究:以安徽省六安市为例[J].长江流域资源与环境,2014,23(4):582-587. (LI Yuanping, YANG Taibao, BAO Xuncheng. Assessment of rainstorm flood risk in Lu'an City on the north slope of Dabie Mountain [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(4):582-587. (in Chinese))
- [52] 王静静,刘敏,权瑞松,等.中国东南沿海地区暴雨洪涝风险分区及评价[J].华北水利水电学院学报,2010,31(1):14-16. (WANG Jingjing, LIU Min, QUAN Ruisong, et al. Zoning and assessment of storm flood disaster risk for southeast coastal area of China [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2010,31(1):14-16. (in Chinese))
- [53] 杨佩国,靳京,赵东升,等.基于历史暴雨洪涝灾情数据的城市脆弱性定量研究:以北京市为例[J].地理科学,2016,36(5):733-741. (YANG Peiguo, JIN Jing, ZHAO Dongsheng, et al. An urban vulnerability study based on historical flood data: a case study of Beijing [J]. Scientia Geographica Sinica,2016,36(5):733-741. (in Chinese))
- [54] 成蕾,李碧雄.基于指标法的建筑物理脆弱性评估研究进展[J].震灾防御技术,2020,15(2):260-273. (CHENG Lei, LI Bixiong. Review of physical vulnerability assessment of building based on indicator method [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention,2020,15(2):260-273. (in Chinese))
- [55] 黄晶,王子勍,戴强,等.考虑人群活动的城市场所洪涝灾害风险动态评估:以深圳市为例[J].地理科学,2024,44(4):711-720. (HUANG Jing, WANG Ziqing, DAI Qiang, et al. Dynamic assessment of flood disaster risk in urban places considering crowd activities: a case study in Shenzhen, China [J]. Scientia Geographica Sinica,2024,44(4):711-720. (in Chinese))
- [56] 郑伟,刘诚. FY-3 卫星洪涝灾害监测应用[J].上海航天,2017,34(4):73-78. (ZHENG Wei, LIU Cheng. Application of flood disaster monitoring based on FY-3 satellite data [J]. Aerospace Shanghai,2017,34(4):73-78. (in Chinese))

(下转第 46 页)

- Dynamic characteristics of bubbles near damaged boundary based on CEL method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(1):99-106. (in Chinese))
- [21] 张钰鹏,徐倩倩,余志伟,等.垂直凹壁面对称位置的空泡动力学模拟研究[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(8):61-68. (ZHANG Yupeng, XU Qianqian, YU Zhiwei, et al. Numerical study on dynamic behaviors of cavitation bubbles in symmetrical position near right-angled concave walls[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(8):61-68. (in Chinese))
- [22] TRUMMLER T, BRYNGELSON S H, SCHMIDMAYER K, et al. Near-surface dynamics of a gas bubble collapsing above a crevice [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 899:A16.
- [23] ANDREWS E D, RIVAS D F, PETERS I R. Cavity collapse near slot geometries [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 901:A29.
- [24] 曾卿丰. 近凹陷空化泡动力学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [25] SUPPONEN O, OBRESCHKOW D, FARHAT M. Rebounds of deformed cavitation bubbles [J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3(10):103604.
- [26] KOCH M, LECHNER C, REUTER F, et al. Numerical modeling of laser generated cavitation bubbles with the finite volume and volume of fluid method, using OpenFOAM [J]. *Computers & Fluids*, 2016, 126:71-90.
- [27] ZHU Jiakai, CHEN Yao, ZHAO Dongfang, et al. Extension of the Schnerr-Sauer model for cryogenic cavitation [J]. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 2015, 52: 1-10.
- [28] RAYLEIGH L O M F R S. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [J]. *Philosophical Magazine*, 1917, 34(200):94-98.
- [29] 尹建勇. 水力空化泡动力学模型及数值求解 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021. (收稿日期: 2023-12-08 编辑: 俞云利)
- 
- (上接第 9 页)
- [57] 王泽雨, 李建章. 基于遥感与 GIS 的江西省洪涝灾害评估研究 [J]. *时空信息学报*, 2023, 30(4): 595-604. (WANG Zeyu, LI Jianzhang. Flood disaster assessment in Jiangxi Province based on remote sensing and GIS [J]. *Journal of Spatio-Temporal Information*, 2023, 30(4): 595-604. (in Chinese))
- [58] 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))
- [59] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望 [J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [60] 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))
- [61] DARKWAH G K, KALYANAPU A, OWUSU C. Machine learning-based flood forecasting system for Window Cliffs State Natural Area, Tennessee [J]. *GeoHazards*, 2024, 5(1): 64-90.
- [62] COELHO G D A, FERREIRA C M, KINTER J L. Multiscale and multi event evaluation of short-range real-time flood forecasting in large metropolitan areas [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612:128212.
- [63] 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, MIAO 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))
- [64] 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))
- [65] 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)) (收稿日期: 2024-06-13 编辑: 俞云利)