

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.013

城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述

姚蕊^{1,2,3}, 杨群涛^{1,2}, 张书亮^{1,2}

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏南京 210023; 3. 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241002)

摘要:针对传统脆弱性研究存在的概念和研究框架缺乏共识、空间尺度精细化不足以及耦合自然-社会经济要素的动态模拟薄弱等局限性,梳理了城市暴雨内涝灾害脆弱性认知、测度方法、时空模拟 3 个维度的研究现状和发展趋势。未来要不断完善城市暴雨内涝脆弱性的理论体系,加强大数据驱动下的内涝脆弱性定量测度方法和人类行为对脆弱性的适应性调控研究,实现城市暴雨内涝灾害脆弱性的多尺度、精细化动态模拟,满足城市防灾减灾和可持续发展建设的需求。

关键词:城市暴雨;内涝灾害;脆弱性;测度方法;时空模拟;防灾减灾

中图分类号:TV123;X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0093-08

Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster // YAO Rui^{1,2,3}, YANG Quntao^{1,2}, ZHANG Shuliang^{1,2} (1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment for the Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

Abstract: Aiming at the limitations of traditional vulnerability research, such as lack of consensus on concept and research framework, insufficient refinement of spatial scale, and weak dynamic simulation of coupling natural social and economic factors, this paper combs the research status and development trend of urban rainstorm waterlogging disaster vulnerability in three dimensions: cognition, measurement methods, and spatio-temporal simulation. In the future, it is necessary to continuously improve the theoretical system of urban rainstorm waterlogging disaster vulnerability, strengthen the research on quantitative measurement method of waterlogging vulnerability driven by big data and adaptive regulation of human behavior on vulnerability. Realize multi-scale and refined dynamic simulation of urban rainstorm waterlogging disaster vulnerability to meet the needs of urban disaster prevention and mitigation and sustainable development.

Key words: urban rainstorm; waterlogging disaster; vulnerability; measure method; spatio-temporal dynamic simulation; disaster prevention and mitigation

城市暴雨内涝灾害是指由于城市排水能力低于强降雨及连续性降雨余量,积水不能及时排除而造成严重损失的城市灾害,具有雨强大、历时短、灾害点空间散布、损失的连锁性和突变性特征^[1-3]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告表明,世界人口密集的主要城市内涝灾害频率和强度将会显著增加^[4],在全球气候变化和城市化的双重影响下,城市暴雨内涝灾害会导致严重的经济损失和社会问题,甚至威胁到人们的生命和健康^[5-6]。“逢暴雨必涝”已经成为中国许多城市

的真实写照,近些年,北京、广州、南京、郑州等大中城市相继发生暴雨内涝灾害事件,给城市的可持续发展带来严峻考验。城市暴雨内涝灾害是致灾因子危险性和承灾体脆弱性综合作用的结果,但一般难以通过改变致灾因子危险性(灾害强度及其发生的概率等)来降低灾害风险,而减小脆弱性是降低灾害风险、提高抗灾能力的有效手段,当前已成为城市发展和水灾害研究等领域重点关注的问题之一,被广泛应用于洪涝灾情评估、洪涝预警、强化公众的洪涝风险意识等方面^[7-8]。

基金项目:国家自然科学基金(42271483,42071364,41771424);江苏省研究生培养创新工程研究生科研与实践创新计划(KYCX21_1343)

作者简介:姚蕊(1986—),女,博士研究生,主要从事遥感和GIS应用研究。E-mail:yaorui1226@163.com

通信作者:张书亮(1974—),男,教授,博士,主要从事遥感和GIS应用研究。E-mail:zhangshuliang@njnu.edu.cn

脆弱性一词来源于拉丁文“vulnerare”,是“可能受伤”之意^[9],早期多用于自然灾害领域,并逐渐扩展至气候变化、生态环境、社会经济、可持续发展等领域^[10]。脆弱性研究在诠释“人-地”复杂系统作用机制、探索人类活动的生态与环境效应中发挥着显著作用。近年来,学者们开展了多方面、多层次的相关研究,在脆弱性概念内涵、评估框架、计算方法等方面取得了丰硕的成果^[10-12]。基于不同的驱动机制形成了一系列研究框架,如风险-灾害模型(risk-hazard, RH)^[13]、地方灾害模型(hazards of place, HOP)^[14]、人类-环境耦合系统分析模型(coupled human-environment system)^[11]、基于暴露-敏感-适应的脆弱性评价模型(vulnerability scoping diagram, VSD)^[15]等。目前学者们对脆弱性的系统性和复杂性达成了共识,无论是承灾个体、群体、系统或区域,脆弱性的影响因素都应多方位、多领域、多角度考虑,将各学科信息和概念集合才能解决脆弱性的复杂性。但由于研究视角和关注问题不同,学者们对脆弱性概念认知仍存在较大差别^[9]。

城市暴雨内涝灾害脆弱性(以下简称“内涝脆弱性”)是传统脆弱性概念在城市灾害研究领域的延伸和拓展,其注重灾害对城市生态环境、社会经济等多方面的影响,强调了人在灾害过程中的影响与作用,可度量城市在暴雨内涝灾害驱动下可能造成的损失程度,是连接城市暴雨内涝模拟为主的自然灾害过程模型和以灾害风险评估为代表的风险决策模型的重要桥梁^[16-17]。纵观内涝脆弱性的研究,涉及城市、区域、流域、社区、建筑物等多个空间尺度,研究尺度由中宏观向微观聚焦^[18]。GIS、RS及大数据技术的快速发展为内涝脆弱性的研究带来了新机遇^[2,19],随着内涝影响范围内建筑物、道路、人口分布等数据精度的提高,脆弱性分析呈现精细化和动态化的发展趋势。作为城市防灾减灾和灾害风险管理中的一种全新的研究工具和研究视角,学者们对内涝脆弱性概念内涵、尺度和计算单元界定、定量测度方法、时空模拟等方面仍存在诸多的争议和分歧,尚未形成统一的研究范式。基于此,本文对内涝脆弱性研究进行系统总结和梳理,围绕“认知-测度-模拟”的主线进行述评,揭示当前研究存在的问题与不足,加深对内涝脆弱性的理解,以期完善内涝脆弱性的研究内容和实践应用体系。

1 内涝脆弱性认知

1.1 内涝脆弱性概念

早期内涝脆弱性研究关注的热点是自然脆弱性,取决于灾害事件发生的可能性及影响范围,强调

在特定灾害强度下房屋、关键基础设施等建筑物的物理损毁或损失率大小^[20]。但脆弱性并不孤立于城市系统而存在,与城市的社会、经济、环境等方面的资源和管理息息相关。暴雨内涝的时空变化及影响区域、承灾体的时空分布都与脆弱性动态演变密切相关,因此内涝脆弱性的理解需要从3个方面把握:①承灾体,即遭受暴雨内涝灾害损害的对象;②致灾因子,即引起伤害和损失的原因,暴雨内涝作为致灾因子,其暴雨内涝强度、历时与影响范围等直接影响灾害的严重程度;③承灾体和致灾因子两者之间的关系,致灾因子作用的对象是承灾体,两者之间的相互作用使脆弱性增加或者减小,是改变脆弱性的驱动因素,最终通过承灾体面对灾害的敏感性以及应对能力表现出来^[9]。因此,结合相关学者对脆弱性的定义,本文认为内涝脆弱性是城市复合系统及内部承灾体暴露于暴雨内涝灾害区域而遭受的不利影响程度,是自然要素和社会、经济等人文要素驱动下的暴露度、敏感性和适应能力的综合表征。

虽然当前对内涝脆弱性组成要素的表述存在争议,但是研究者普遍认为内涝脆弱性是由暴露度、敏感性和适应能力三要素构成的^[9,15](图1)。内涝的影响范围和特点、暴露于淹没范围的承灾体及空间位置等是影响暴露度的重要因素,承灾体暴露度越高,其所受到灾害影响的损害程度越大。敏感性是由承灾体自身性质决定的,表征承灾体抵御致灾因子的能力,强调承灾体由于内部属性的差异而易遭受内涝灾害的影响,即对于同等程度的暴雨内涝灾害,淹没范围内敏感性高的承灾体遭受的损害更大^[21],例如老人、儿童、残疾人等弱势群体的敏感性要大于其他人群。暴露度和敏感性共同决定内涝灾害的损失和潜在影响,是脆弱性的被动(消极)部分,即脆弱性随着二者的增加而增加。适应能力则是承灾体为降低脆弱性、增强对内涝威胁的响应能力而进行的调整^[22]。内涝灾害发生过程中,适应能力重点强调承灾体对灾害风险的认知、调整和风险的管理,是减轻受灾害影响的能力和从灾害中恢复的能力,而如何识别适应能力及社会、经济、文化、政治等因素对其的影响是最受争议的问题。同时,社会和环境驱动力互馈作用决定了敏感性和暴露度的程度,不同的政治文化水平和社会经济条件直接影响着暴露单元的适应能力^[23]。适应能力是脆弱性的主动(积极)部分,脆弱性随着适应能力的增加而减小。随着对脆弱性研究的深入,由重视物理脆弱性逐渐发展到以人为中心,注重人在脆弱性形成及减小脆弱性中的作用,把人的主动适应性作为脆弱性模拟计算的核心问题^[18]。

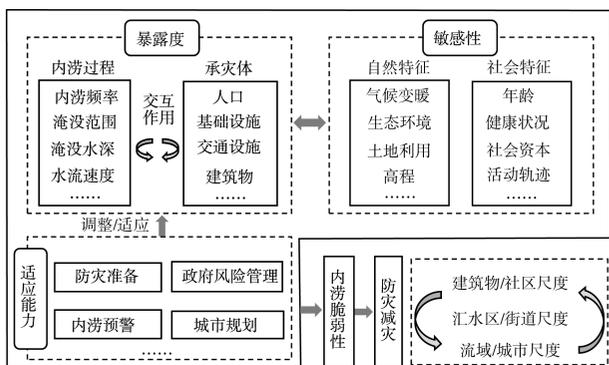


图1 内涝脆弱性模拟框架

Fig.1 Simulation framework of urban rainstorm waterlogging disaster vulnerability

1.2 内涝脆弱性尺度与计算单元

脆弱性尺度研究一般包括时间尺度和空间尺度。内涝脆弱性具有明显的空间尺度依赖性,不同空间尺度上具有不同的表现形式和特征。内涝脆弱性研究包括建筑物、社区、街道、城市、区域等不同层级的空间尺度,目前较多的城市灾害脆弱性研究是基于城市尺度或区域层面开展的,重在强调城市或区域的整体社会发展水平^[18,24-25],有利于宏观上测度城市和区域的整体脆弱性变化,为宏观战略规划提供理论依据。然而宏观的内涝脆弱性研究忽略了城市内部脆弱性差异,难以满足城市精准防灾减灾的需求,未来亟须开展街道、社区、建筑物精细化尺度的脆弱性研究,从而为城市可持续发展提供有力支撑。因此,在进行内涝脆弱性研究时需明确决定脆弱性模拟计算精度的最小空间单位,即脆弱性单元^[7,26-27]。而当前较多的城市灾害脆弱性研究主要以规则格网或行政边界为脆弱性单元进行空间分割,前者没有充分考虑城市复杂的下垫面条件,而后者不能反映脆弱性单元内部承灾体的空间分布差异,造成城市内部的某些高脆弱区被忽略。由于现有研究较少结合暴雨内涝过程,导致自然要素需要向人文要素的空间认知妥协,没有构建一个综合的精细化研究单元,以至于模拟结果仅仅适用于宏观的规划与决策。

在内涝脆弱性模拟过程中,时间尺度形成了不同的脆弱性窗口,通过连续观测的空间对比,揭示时空变化下的内涝脆弱性增加或减小趋势。时间尺度决定着暴雨内涝灾害对一个城市造成的损害和影响程度,在不同时间尺度上,影响内涝脆弱性变化的主要因素通常也是不同的。对于一次暴雨内涝灾害事件的短时间尺度来说,内涝脆弱性往往是由内涝的淹没特征与承灾体特点决定的。随着内涝灾害的不断演变,以人口为代表的承灾体根据已有的灾害风险意识,进行实时灾害信息传递、减灾政策引导等不

同程度的避灾行动,使得内涝脆弱性也随之动态演变。短时间尺度内涝脆弱性主要关注的是财产损失和人员伤亡风险^[16],而长时间尺度内涝脆弱性则与气候变化和城市发展等人类活动有关,更多地关注地域综合体可持续发展问题,强调承灾体对城市生态环境的变化、社会经济长期发展的动态响应^[28]。当前的内涝脆弱性研究大多关注某一空间尺度的静态脆弱性,内涝脆弱性时空变化及其驱动因素的耦合机制研究还比较薄弱。

诸多学者对内涝脆弱性的多尺度特征达成了共识,Turner等^[11]提出的SUST脆弱性分析框架强调了外界扰动的多尺度特性,揭示了脆弱性多尺度间的转换过程和产生根源的地方特性,对探讨暴雨内涝灾害脆弱性的动态特征和多尺度耦合作用具有重要的借鉴意义。刘耀龙^[29]开展“温州市-平阳县-水头镇”三级行政区划尺度灾害风险评价研究,并构建多尺度自然灾害风险表达范式和方法体系,把政府、企业、社区以及个人有机地整合在一起,共同协调应对灾害风险。当前内涝脆弱性研究包含行政单元^[29]、土地利用单元^[30]、汇水单元^[31]等尺度层级,在发生内涝灾害时,由于支撑数据、综合调控手段、救灾对象和区域等差异性,城市各管理和灾害调控部门会在不同尺度层级上进行决策与救灾应急。Kienberger等^[27]提出了“三维脆弱性”评估框架,揭示脆弱性在不同尺度层次上的复杂、动态过程,明确在什么地方(where)、什么是脆弱的(what)以及脆弱到什么程度(how),为决策者制定合理的减灾策略提供依据。然而不同尺度脆弱性表征存在明显的差异性,尺度之间脆弱性影响因素相互联系与反馈,明晰脆弱性的尺度效应,不同尺度之间建立尺度关联也是当前研究的难点^[32]。

2 内涝脆弱性测度方法

内涝脆弱性的概念内涵和组成要素、尺度和脆弱性单元构成了内涝脆弱性研究体系的基础理论认知部分,如何定量测度内涝脆弱性是研究体系的技术方法部分。内涝脆弱性具有时空动态差异性,其定量测度是十分复杂且具有挑战性的工作,受到诸多因素的影响,目前主要的测度方法有指标体系法和脆弱性曲线法。

2.1 指标体系法

指标体系法是根据研究区域和内涝灾害的特征选取恰当的指标构建指标体系,然后利用一定的数理分析方法得到表征脆弱性大小的脆弱性指数,步骤一般分为构建指标体系、标准化、加权和聚合4部分。该方法适用范围较广,从大尺度的国际计划到

小尺度社区脆弱性研究均适用。合理的指标体系是准确测度脆弱性的基础,指标的选择可以通过归纳或演绎的方法获得。目前学者们通过构建指标体系开展了暴雨内涝灾害的物理、社会、经济、基础设施、制度、风险感知等维度的单方面或综合脆弱性测度^[33-36],根据研究维度的不同,提出了很多脆弱性指数,主要是通过加减法及乘法2种方式构建,其中乘法相对于加减法更能有效地反映指标之间的协同作用关系^[37]。基于加减法的内涝脆弱性指数^[24-25,36,38]计算公式为

$$F = I_1 + I_2 - I_3 \quad (1)$$

其中 $I_i = \sum_{j=1}^n w_j P_j$ ($i = 1, 2, 3$)

式中: F 为内涝脆弱性指数; I_1 为暴露度; I_2 为敏感性; I_3 为适应能力或恢复力; w_j 为因子 j 的权重; P_j 为因子 j 的得分。

基于微观的家庭尺度的内涝脆弱性评估方法^[35]为

$$F = I_4 + I_5 + I_6 \quad (2)$$

式中: I_4 为财产损失指数; I_5 为身心伤害敏感性指数; I_6 为洪水恢复力指数。

也有学者针对人口和经济等承灾体的内涝脆弱性^[39]提出计算公式:

$$F_H \frac{y}{x_{pop}} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n + a_0 \quad (3)$$

$$F_M \frac{z}{x_{pro}} = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n + b_0 \quad (4)$$

式中: F_H 、 F_M 分别为人口脆弱性和经济脆弱性; y 为伤亡人数; x_{pop} 为淹没区人口; z 为损失价值; x_{pro} 淹没区财产; x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_n 为选取的因子值; a_i 、 b_i 均为线性回归系数。

基于乘除法的脆弱性指数^[33,40]计算公式为

$$F = \frac{I_1^{\beta_1} I_2^{\beta_2}}{I_3^{\beta_3}} \quad (5)$$

$$F = I_1^{\beta_1} I_2^{\beta_2} I_7^{\beta_3} \quad (6)$$

式中: I_7 为缺乏应对能力; β_1 、 β_2 、 β_3 为脆弱性组成部分的权重。

指标体系法操作简单,其中最关键的是各指标权重的确定,当前常用的赋权方法包括专家打分法、熵权法、层次分析法、主成分分析法、多准则分析方法、随机森林等。指标体系法最大的问题是规范化,虽然已有研究分别基于宏观和微观不同角度开展,但由于部分指标数据的可获取性差,在实际应用中难以操作;指标的聚合从简单的求和到复杂的统计方法,再到多准则分析方法发展。脆弱性结果受到指标因子的选取、分类、权重、阈值的设置和聚类方

法、空间尺度等的影响,指标与内涝脆弱性之间复杂的非线性关系给计算精度带来了重大挑战。现有研究成果中,通常采用指标敏感性分析来评估脆弱性指数的稳健性,缺乏对所选取指标因子的合理性和必要性的解释,存在目标定位不明确、针对性不强、指标权重受人为因素影响等问题,是当前内涝脆弱性研究实践应用中的瓶颈。

2.2 内涝脆弱性曲线

脆弱性曲线又称灾损(率)曲线(函数),用来衡量不同灾种的灾变强度与承灾体相应损失(率)之间的关系,该方法数据采集规范客观,结果的精度和可信度高,比较典型的应用是美国联邦应急管理署开发的HAZUS-MH软件,构建了多灾种的承灾体脆弱性曲线^[41-43]。国内的内涝脆弱性曲线研究起步较晚,目前没有建立普适的灾损数据库,用于曲线拟合的数据有历史灾害数据库、实地调研、保险数据等。根据数据的来源,内涝脆弱性曲线的构建方法主要有基于灾情数据、已有脆弱性曲线的修正重构、系统调查、模型模拟等。城市暴雨内涝灾害与积水空间分布、水深变化及积水持续时长等都密切相关,其中水深-灾损(率)曲线应用最为广泛^[43]。近年来,部分学者针对土地利用类型、房屋建筑和内部财产等承灾体内涝脆弱性曲线进行了探讨,为后来科研工作者提供了宝贵的经验和基础,如董姝娜等^[44]利用3S技术提取洪水淹没范围,实地调查获取水深和损失率数据,采用回归分析构建内涝脆弱性曲线。由实地调查的暴雨内涝灾损数据拟合得到的内涝脆弱性曲线,评估结果的精度和可信度高,但是此方式适用范围较小,对于大范围灾害事件灾损调查,仍存在工作强度和难度较大的局限。通过修正现有脆弱性曲线的方法,可以大大减少独立构建脆弱性曲线的工作量,也便于同类脆弱性曲线之间的比较,但这种方法会增加评估结果的不确定性^[43,45]。已有部分学者尝试通过引入随机事件模拟方法来量化不确定性,减少不确定性对脆弱性测度结果的影响^[46]。与指标法的脆弱性测度相比,内涝脆弱性曲线法只反映洪水深度与灾害损失之间的关系,更偏向承灾体暴露于自然灾害的损失程度,结果也更为精确,但对历史灾情数据依赖性较高。

3 内涝脆弱性时空模拟

当前基于定量测度的内涝脆弱性研究大多是在某一时间截面上的不同区域横向比较,内涝脆弱性的时空动态模拟研究仍比较薄弱。内涝灾害的演进过程、承灾体的地理位置及空间关系以及两者之间的相互反馈是内涝脆弱性模拟的关键因子,以下从

耦合内涝淹没过程的情景模拟、多尺度动态模拟以及适应性调控 3 个方面来阐述内涝脆弱性的时空模拟发展及存在的问题。

3.1 耦合内涝淹没模型的内涝脆弱性多情景模拟

城市暴雨内涝淹没范围、淹没深度等致灾因子特征是影响承灾体受灾程度的重要指标,也是影响内涝脆弱性动态模拟的关键因子。已有部分学者开展内涝脆弱性研究时,设定灾害初始条件,模拟推演灾害的发展过程,并将承灾体图层叠置于灾害情景中,直观、精确地反映了承灾体的受灾范围、个数等受灾情况及空间分布特征。尹占娥等^[47]基于 GIS 编制了不同重现期情景的淹没深度图,实地调查了研究区暴雨内涝灾害的灾损率数据,确定研究区的内涝脆弱性等级划分,并编制了基于不同重现期情景的上海浦东脆弱性图。石勇^[48]针对不同收入水平的居民住宅,用合成法构造城市水灾中内部财产的脆弱性曲线,并以上海市龙华镇为例,基于 DEM、遥感图像及模拟的水灾情景,得到龙华镇 3 种潮水水位时居民住宅内部财产的脆弱性分布图。当前研究可以动态地反映暴雨内涝灾害变化,特别是针对极端灾害事件情景下,可以预测建筑物受灾、家庭财产和经济损失等情况。长期以来,在城市内涝模拟研究中形成了诸多的内涝模型,根据计算方法不同,主要分为水文模型、水动力学模型和简化模型 3 种类型^[49]。随着高分遥感、互联网大数据等新技术的快速发展,为暴雨内涝研究精细化建模和验证提供了海量实时准确的数据基础。但现有内涝脆弱性研究大多是基于简化城市内涝模型,内涝模拟的精度决定了淹没范围内的承灾体信息及整个内涝脆弱性模拟结果的可靠性,耦合考虑建筑物、城市微地形等精细化内涝过程模拟的内涝脆弱性研究还比较薄弱。

3.2 内涝脆弱性多尺度动态模拟

内涝脆弱性在宏观时间尺度下的动态演变,即研究城市不同发展时期的脆弱性分布与变化^[50-51],难以深入探究城市暴雨内涝过程和承灾体的响应机制。随着当前城市精准防灾减灾的需要,灾害脆弱性研究从宏观战略层面的区域整体评估向空间异质化、精细化趋势发展^[18],部分学者尝试开展了社区、建筑物、家庭等城市精细化尺度的脆弱性研究。Yang 等^[52]耦合城市内涝模型与脆弱性计算模型,分析了不同灾害情景下的社区脆弱性。权瑞松^[45]开展了建筑物尺度的暴雨内涝脆弱性分析,得到不同灾害情景下的建筑结构灾损率与室内财产灾损率。Solín 等^[35]以家庭为调查对象,根据面对内涝灾害家庭的暴露程度、财产损失、灾害对家庭成员的

身心影响及家庭受灾恢复能力等方面调查数据分析减小脆弱性的可能性。内涝脆弱性的动态特征不仅取决于内涝演进过程,还受人类社会经济活动对内涝过程响应的动态响应的影响。因此,在暴雨内涝灾害过程中,考虑了以人口、交通为代表的承灾体动态变化是实现脆弱性动态模拟的关键,对减少经济损失和人员伤亡有重要作用,可为精准防灾减灾提供有效信息^[53]。Dawson 等^[54]耦合智能体模型与水动力模型,模拟不同风暴潮条件、防御情景、洪水预警时间和疏散策略下的人口脆弱性。Terti 等^[16]基于耦合灾害时空模型与人类行为提出了一个面向突发性洪水灾害的动态社会脆弱性概念模型。根据年龄、性别、就业状况、受教育程度等特征建立不同类型的智能体,基于日常情景与灾害情景下的活动模式,顾及居民出行、交通的城市内涝灾害承灾体的暴露度、脆弱性时空动态模拟是当前研究的热点问题^[17,55-56]。

3.3 顾及适应性调控的内涝脆弱性研究

承灾体的适应能力受诸多因素的影响,如个人通过各个决策过程来影响洪水风险预测等。利益相关者的风险认知(如以前的洪水经历)和采取的预防洪水风险措施很大程度上影响了适应能力,对于减轻内涝灾害影响至关重要。人类是最敏感、最脆弱的承灾体,而人的行为和风险感知难以量化,在传统的脆弱性研究时往往被忽略,如何量化人的风险认知对降低风险的影响是定量风险评估的挑战之一^[57]。城市暴雨内涝灾害时空演变与承灾体的动态响应共同决定着脆弱性的动态特征,风险感知是人类动态响应的重要决定因素之一。脆弱性动态模拟不仅需要考虑到灾害与承灾体的动态变化,同时还要兼顾两者的互馈作用^[16]。政府的预警、紧急疏散撤离及减灾措施等组织行为,以及人们根据灾害风险认知推迟行程或取消出行计划等都会影响人口的动态分布,因此亟须加强研究人的灾害风险认知增强社会和人群的恢复力和适应能力,从而降低内涝脆弱性。智能体模型在模拟人口位置的基础上,可以模拟人口与致灾因子、孕灾环境之间的相互作用,凭借其独特的优势,其将成为内涝脆弱性中人类的风险感知以及适应性调控研究的有效手段^[17,54]。未来可以尝试利用智能体模型实时模拟面对洪水灾害威胁时,探索个人、家庭、社区、政府等的响应行为对脆弱性的互馈关系,以便制定更有效的防灾减灾策略。

4 研究展望

内涝脆弱性是涉及多科学的综合现象,研究内

容逐渐由单一化、简单化向多元化、复杂化的趋势发展,由静态的、单向的转向动态的、相互反馈的脆弱性研究。在城市精准防灾减灾的现实需求下,内涝脆弱性研究的发展趋势包括:

a. 夯实内涝脆弱性研究的理论基础。城市暴雨内涝灾害是自然水循环和人类社会耦合的复杂系统,内涝脆弱性分析重在强调承灾体如何调整 and 应对灾害的动态过程,尽管许多学者强调了加强脆弱性的动态变化研究,但影响内涝脆弱性时空变化的因素众多,各个组成部分的时空变化过程、尺度效应及内涝脆弱性的驱动机制研究仍较薄弱。顾及承灾体交通出行、社会经济、风险感知、应急疏散等行为,深入挖掘内涝与承灾体之间的空间特征关联模式,才能动态揭示城市面对暴雨内涝灾害的脆弱程度。未来研究要从城市复杂系统视角挖掘脆弱性形成机理和演化规律,夯实内涝脆弱性研究的理论基础,拓展内涝脆弱性的研究思路和方法。

b. 优化大数据驱动下的内涝脆弱性定量测度方法。随着大数据和人工智能技术的迅猛发展,为城市暴雨内涝灾害风险管理提供了新的研究思路和技术支撑。当前海量、多维的灾害大数据日益涌现,内涝脆弱性研究也从以社会经济统计数据为主逐步转变为以多源数据为中心的方式。数据时空尺度互不相融,格式标准互不统一,实现多源异构数据的融合也是未来内涝脆弱性及风险管理的重要研究内容。当前的内涝脆弱性模拟较少顾及承灾体的灾害响应行为,在大数据背景下,利用人工智能技术,通过深入刻画承灾体对灾害的适应性调控决策优化脆弱性定量测度也是亟须加强研究的方向。

c. 提高内涝脆弱性动态模拟精度。内涝脆弱性模拟一直是城市灾害风险管理研究的热点和难点问题,其中获得高精度的致灾因子演变特征是内涝脆弱性动态模拟的第一步,其模拟精度直接关系到淹没范围内的承灾体位置及数量,影响整个综合脆弱性模拟的可靠性,发展适应于内涝脆弱性的高精度内涝模型,是未来发展的重要方向。另外,数据的时空分辨率也一直是制约内涝脆弱性模拟精度和时效性的关键,特别是人口、交通轨迹等数据。传统基于行政单元的统计数据难以满足实时动态的脆弱性分析,人口热力图、包含人的风险意识及公众情绪的互联网等动态大数据弥补了传统静态数据的不足。未来基于高精度内涝模型及动态大数据提高内涝脆弱性的模拟精度,将真正为城市防灾减灾及发展规划提供有效的政策依据。

参考文献:

[1] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主

要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(5):1-9. (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] 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))

[4] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2021.

[5] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护,2021,37(5):131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5):131-139. (in Chinese))

[6] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2):10-14. (in Chinese))

[7] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于GIS的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))

[8] YIN J, YE M, YIN Z, et al. A review of advances in urban flood risk analysis over China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(3):1063-1070.

[9] 李莉,王晓婷,王辉. 脆弱性内涵、评价与研究趋势综述[J]. 中国渔业经济,2010,28(3):161-169. (LI Li, WANG Xiaoting, WANG Hui. Review of content, evaluation and research trends of vulnerability [J]. Chinese Fisheries Economics, 2010, 28(3):161-169. (in Chinese))

[10] 黄晓军,黄馨,崔彩兰,等. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法[J]. 地理科学进展,2014,33(11):1512-1525. (HUANG Xiaojun, HUANG Xin, CUI Cailan, et al.

- The concept, analytical framework and assessment method of social vulnerability[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(11):1512-1525. (in Chinese)
- [11] TURNER B L, KASPERSON R E, MATSON P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability science [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(14):8074-8079.
- [12] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 洪水灾害脆弱性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(1):41-46. (SHI Yong, XU Shiyuan, SHI Chun, et al. A review on development of vulnerability assessment of floods [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(1):41-46. (in Chinese))
- [13] BURTONI. *The environment as hazard*[M]. New York: Guilford Press, 1993.
- [14] CUTTER S L. Vulnerability to environmental hazards[J]. *Progress in Human Geography*, 1996, 20(4):529-39.
- [15] POLSKY C, NEFF R, YARNAL B. Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram[J]. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4):472-485.
- [16] TERTI G, RUIN I, ANQUETINS, et al. Dynamic vulnerability factors for impact-based flash flood prediction [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(3):1481-1497.
- [17] 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 Geoinformation Science*, 2021, 23(10):1787-1797. (in Chinese))
- [18] 黄建毅, 苏飞. 城市灾害社会脆弱性研究热点问题评述与展望[J]. *地理科学*, 2017, 37(8):1211-1217. (HUANG Jianyi, SU Fei. The review and prospect on the hot issues of urban social vulnerability to disasters [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(8):1211-1217. (in Chinese))
- [19] TAUBENBÖCK H, WURM M, NETZBAND M, et al. Flood risks in urbanized areas-multi-sensoral approaches using remotely sensed data for risk assessment [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11(2):431-444.
- [20] DELEÓN V, CARLOS J. Vulnerability: a conceptual and methodological review[M]. Tokyo: UNU-EHS, 2006.
- [21] 刘洁. 城市洪水灾害易损性的量化模型及动态演化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [22] WILBY R L, KEENAN R. Adapting to flood risk under climate change[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, 36(3):348-378.
- [23] SMIT B, WANDEL J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability[J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3):282-292.
- [24] AROCA E, BODOQUE J M, GARCÍA J A, et al. A quantitative methodology for the assessment of the regional economic vulnerability to flash floods [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 565:386-399.
- [25] AROCA E, BODOQUE J M, GARCÍA J A, et al. Construction of an integrated social vulnerability index in urban areas prone to flash flooding [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2017, 17:1541-1557.
- [26] FEKETE A, DAMM M, BIRKMANN J. Scales as a challenge for vulnerability assessment [J]. *Natural Hazards*, 2010, 55(3):729-747.
- [27] KIENBERGER S, BLASCHKE T, ZAIDI R Z. A framework for spatio-temporal scales and concepts from different disciplines: the vulnerability cube [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68(3):1343-1369.
- [28] 苏桂武, 高庆华. 自然灾害风险的行为主体特性与时间尺度问题[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(1):9-16. (SU Guiwu, GAO Qinghua. Behavior subject-oriented qualities and timescale issues of natural disaster risk [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1):9-16. (in Chinese))
- [29] 刘耀龙. 多尺度自然灾害情景风险评估与区划[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [30] 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. 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))
- [31] BALICA S, WRIGHT N G. Reducing the complexity of the flood vulnerability index [J]. *Environmental Hazards*, 2010, 9(4):321-339.
- [32] 李鹤, 张平宇, 程叶青. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(2):18-25. (LI He, ZHANG Pingyu, CHENG Yeqing. Concepts and assessment methods of vulnerability [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(2):18-25. (in Chinese))
- [33] BALICA S, WRIGHT N. A network of knowledge on applying an indicator-based methodology for minimizing flood vulnerability [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(20):2983-2986.
- [34] ZACHOS L G, SWANN C T, ALTINAKAR M S, et al. Flood vulnerability indices and emergency management planning in the Yazoo Basin, Mississippi [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 18:89-99.
- [35] SOLÍN L, MADAJOVÁ S M, MICHALEJE L. Vulnerability assessment of households and its possible reflection in flood risk management: the case of the upper Myjava Basin, Slovakia [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 28:640-652.
- [36] GODFREY A, CIUREAN R L, VAN WESTEN C J, et al. Assessing vulnerability of buildings to hydro-

- meteorological hazards using an expert based approach; an application in Nehoiu Valley, Romania [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 13: 229-241.
- [37] 谢盼,王仰麟,彭建,等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价: 研究进展与框架 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34 (2): 165-174. (XIE Pan, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Health related urban heat wave vulnerability assessment; research progress and framework [J]. *Progress in Geography*, 2015, 34 (2): 165-174. (in Chinese))
- [38] FRAZIER T G, THOMPSON C M, DEZZANI R J. A framework for the development of the SERVmodel: a spatially explicit resilience-vulnerability model [J]. *Applied Geography*, 2014, 51: 158-172.
- [39] CONNOR R, HIROKI K. Development of a method for assessing flood vulnerability [J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2005, 51: 61-67.
- [40] IL CHOI H. Assessment of aggregation frameworks for composite indicators in measuring flood vulnerability to climate change [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 19371.
- [41] ROMALI N S, SULAIMAN M, KHUSHREN S A, et al. Flood damage assessment; a review of flood stage-damage function curve [C]//ISFRAM2014. São Paulo: ISFRAM, 2015: 147-159.
- [42] REMO J W F, PINTER N, MAHGOUB M. Assessing Illinois's flood vulnerability using Hazus-MH [J]. *Natural Hazards*, 2015, 81 (1): 1-23.
- [43] 周瑶,王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27 (4): 435-442. (ZHOU Yao, WANG Jing'ai. A review on development of vulnerability curve of natural disaster [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27 (4): 435-442. (in Chinese))
- [44] 董姝娜,姜鏊鹏,张继权,等. 基于“3S”技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究 [J]. *灾害学*, 2012, 27 (2): 34-38. (DONG Shuna, JIANG Liupeng, ZHANG Jiquan, et al. Research on flood vulnerability curves of rural dwellings based on “3S” technology [J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27 (2): 34-38. (in Chinese))
- [45] 权瑞松. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝脆弱性分析 [J]. *地理科学*, 2014, 34 (11): 1399-1403. (QUAN Ruisong. Vulnerability analysis of rainstorm waterlogging on buildings in central urban area of Shanghai based on scenario simulation [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34 (11): 1399-1403. (in Chinese))
- [46] CHEN W L, WANG X L, DENG S H, et al. Integrated urban flood vulnerability assessment using local spatial dependence-based probabilistic approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 454-469.
- [47] 尹占娥, 暴丽杰, 殷杰. 基于 GIS 的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性研究 [J]. *自然灾害学报*, 2011, 20 (2): 29-35. (YIN Zhan'e, BAO Lijie, YIN Jie. GIS-base study on vulnerability to rainstorm inundation in Pudong of Shanghai [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20 (2): 29-35. (in Chinese))
- [48] 石勇. 基于情景模拟的居民住宅内部财产的水灾脆弱性评价 [J]. *水电能源科学*, 2014, 32 (8): 134-137. (SHI Yong. Vulnerability assessment of property in residences in waterlogging disaster based on scenario simulation [J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32 (8): 134-137. (in Chinese))
- [49] 刘勇, 张韶月, 柳林, 等. 智慧城市视角下城市洪涝模拟研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34 (4): 494-504. (LIU Yong, ZHANG Shaoyue, LIU Lin, et al. Research on urban flood simulation: a review from the smart city perspective [J]. *Progress in Geography*, 2015, 34 (4): 494-504. (in Chinese))
- [50] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105 (7): 2301-2306.
- [51] LIU J, SHI Z, WANG D. Measuring and mapping the flood vulnerability based on land-use patterns: a case study of Beijing, China [J]. *Natural Hazards*. 2016, 83 (3): 1-21.
- [52] YANG Q T, ZHANG S L, DAI Q, et al. Assessment of community vulnerability to different types of urban floods: a case for Lishui City, China [J]. *Sustainability*, 2020, 12 (19): 7865.
- [53] 李梦雅. 暴雨内涝情景下城市通勤出行的暴露度与交通特征研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [54] 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.
- [55] ZHU X H, DAI Q, HAN D W, et al. Modeling the high-resolution dynamic exposure to flooding in a city region [J]. *Hydrology Earth System Science*, 2019, 23 (8): 3353-3372.
- [56] ZHU J X, DAI Q, DENG Y H, et al. Indirect damage of urban flooding: investigation of flood-induced traffic congestion using dynamic modeling [J]. *Water*, 2018, 10 (5): 622.
- [57] AERTS J C J H, BOTZEN W J, CLARKE K C, et al. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8 (3): 193-199.

(收稿日期: 2021-12-06 编辑: 王芳)