

王化齐, 张戈, 李林, 等. 城市内涝风险识别、预警与韧性评估研究进展[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 136–140. [WANG Huaqi, ZHANG Ge, LI Lin, et al. Risk Identification, Alarming, and Resilience Assessment of the Urban Waterlogging[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 136–140. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.021.]

城市内涝风险识别、预警与韧性评估研究进展*

王化齐^{1,2}, 张戈^{1,2}, 李林^{1,2}, 董英^{1,2}, 王涛^{1,2}, 刘文辉^{1,2}, 张新社^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质调查科技创新中心), 陕西 西安 710119;
2. 陕西省水资源与环境工程技术研究中心, 陕西 西安 710119)

摘要:城市内涝风险识别、预警及韧性评估是补齐城市安全风险短板的关键。在简单回顾国内外研究进展的基础上, 对其研究思路和技术方法进行了概况性评述和深入分析, 发现由暴雨预报转向风险预警的研究程度还需要深入, 韧性评估技术没有一个科学的衡量标准, 仍存在争议, 难以精准服务城市内涝防御和城市安全应急管理。在未来发展趋势上, 要进一步加强基于暴雨-内涝-灾损过程的风险感知、“数据+模型”双驱动下的城市内涝风险预警、考虑内涝灾害保险的韧性评估等技术攻关, 为城市安全、城市韧性建设提供科学理论和实用技术的有力支撑。

关键词:城市内涝; 风险; 韧性; 城市安全

中图分类号: X915.5; X43; TV213; TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0136-05
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.021

随着全球气候变化加剧, 导致了水文情势的剧烈变化, 水文系统的不确定性增加^[1], 极端天气出现的频率和强度骤增。城市化改变了地形、地貌、地质条件, 引起了水文过程改变, 表现为滞留能力下降、洪水到达时间提前、洪水波形尖锐、洪水流量增加^[2], 这些都增大了城市暴雨洪涝风险^[3]。城市人口和财富又相对集中, 在同样强度下, 损失明显高于非城市地区^[4]。另外, 城市内涝灾害呈现链发状态, 在一定程度上有放大效应。同时, 城市是“自然、经济和社会复合的人工系统”, 一旦灾害发生, 就会有“牵一发而动全身”的效应, 给人民群众生命财产和社会经济发展构成巨大威胁。根据2011—2018年中国水旱灾害公报数据, 我国每年平均进水受淹或发生严重内涝的城市数量为154个, 因洪涝直接经济损失约占当年GDP的0.35%。2012年“7·21”北京、2021年“7·20”郑州等极端雨洪灾害事件造成了巨大生命和财产损失, 为城市应急管理带来惨痛教训。2021年4月, 国务院办公厅关于加强城市内涝治理的实施意见中强调, 治理城市内涝事关人民群众生命财产安全, 既是重大民生工程, 又是重大发展工程。

城市内涝灾害的风险感知、预警及韧性评估技术, 如内涝成灾机理基础、风险分析与风险管

理、灾害损失评估技术、韧性评估等, 可以从以下几个方面支撑城市绿色高质量发展: ①可直接支撑服务城市防涝和应急管理, 减少财产损失, 确保人民安全, 其防灾减灾效益突出^[5]; ②可直接服务三线划定、城市蓝绿线划定、国土空间规划、管网规划、地下空间管理等^[6]; ③支撑服务城市规划建设及安全运营全过程, 促进韧性城市建设, 服务城市绿色高质量发展。综上, 城市内涝风险识别、预警及韧性评估研究成果将对城市安全、自然灾害防治极其重要, 是补齐城市安全风险短板的关键, 支撑服务城市绿色高质量发展, 市场需求巨大。

本文在简单回顾城市内涝风险的国内外研究进展的基础上, 对其研究思路和技术方法进行概况评述和深入分析, 发现研究中存在的问题和难点, 并对城市内涝风险及韧性研究进行了展望, 为城市安全、城市韧性建设提供科学理论和实用技术的有力支撑。

1 城市内涝风险与韧性

城市内涝是由于短历时强降雨或者连续型降雨超出城市排水能力, 导致城市内产生积水灾害

* 收稿日期: 2022-07-13 修回日期: 2022-11-22

基金项目: 中国地质调查局“西安城市地质安全调查评价与风险管理示范”(DD20189220); 陕西省创新能力支撑计划项目(2019TD-040); 中国地质调查局项目(DD20221731)。

第一作者简介: 王化齐(1980-), 女, 汉族, 陕西郿邑区人, 教授级高级工程师, 主要从事地质安全风险评价、国土空间规划等领域研究。E-mail: whqi321@163.com

的现象^[7]。在自然灾害系统理论中,致灾因子、孕灾环境和承灾体是构成灾害系统的三大要素。在城市内涝灾害形成过程中,其致灾因子是强降水或者连续性降水;孕灾环境主要是城市的地表环境;承灾体是具有暴露性和脆弱性的城区基础设施和民众生命、财产等。从城市内涝灾害的发生机理来看,灾害初期,人类活动对孕灾环境造成了一些影响,会增加灾害发生的可能性;在灾害的发生阶段,其致灾因子极端降雨天气频发可能会引发内涝灾害;在灾害的发展阶段,承灾体对灾害的应对能力较弱也会导致灾害继续发展;内涝灾害阶段主要是致灾因子和孕灾环境相互作用,各种风险叠加,给承灾体带来了消极的影响过程。城市内涝风险是致灾因子、承灾体暴露性和脆弱性相结合下的可能损失,其大小取决于致灾因子发生的强度和概率、承灾体暴露分布以及承灾体的脆弱程度。国内常用的内涝风险等级是基于积水深度和积水时间划分的,每个等级对应了不同的积水深度和积水时间,同时也代表了受影响的严重程度,主要应用于城市交通、基础设施等预警。

韧性是一个系统、社区或者社会暴露于危险中时能够通过及时有效的方式抵抗、吸收、适应并从中影响中恢复的能力。城市防涝韧性是在当城市受到雨洪灾害的威胁时,在不受外界帮助的情况下,保持城市自身正常运转的基本结构不被破坏、基本结构遭受破坏后能及时恢复城市正常秩序、不断学习调整内部结构以期下一次更好应对雨洪灾害的能力。目前来说,说经历了3个阶段,分别是防洪排涝建设阶段、海绵城市生态发展阶段和工程生态综合发展阶段,逐渐规避了传统的“政府主导”和“排涝工程主导”的灾害防治体制的弊端,发挥了综合的社会生态效益,提升抗涝韧性建设的程度。

2 城市内涝风险的国内外研究进展

2.1 城市内涝精细化模拟技术

城市内涝精细化模拟技术是内涝风险识别、预警和韧性评估的关键。与自然流域相比,城市流域空间异质性大、人类活动干预显著,呈现出复杂独特的产汇流特征,传统的水文学理论难以给出合理的分析和解释^[8]。城市内涝精细化模拟模型的构建在模拟过程中显得非常重要。从发展历程上看,内涝模拟模型主要包括水文模型、水动力模型,水文水动力模型^[9-10]三大类^[11],按照维度分,包括一维模型、二维模型和一维二维耦合模型。目前,国内外常用的模型有SWMM^[12-13]、MIKE系列^[11,14-16]、EFDC、FVCOM、SWAT、BASINS、HEC-HMS、HEC-RAS、PostGis、QGIS、Delft3D和一些自主研发的分布式水文模型^[17]、水动力学模型等,取得了一些研究成果。另外,还有用SCAM-HPA方法^[18]、最大信息熵和土地利用耦合模型^[19]、神经网络

络^[20]、机器学习算法^[21]等来模拟分析城市内涝变化及其驱动因素。

城市化改变了传统的暴雨径流运动方式,径流通道变成了道路、排水管网、渠道等,以往的水文模型进行模拟运算存在一定的局限性,难以达到令人满意的效果;而水动力学模型解决了水文学模型无法提供的各种水力特征的体现,但水动力学模型的计算相对复杂,而且对研究区域基础数据的要求较高,在数据收集上有很大难度。传统一维模型通常假设雨水先全部进入管网,且将检查井或虚拟通道作为管网与地表水量的交换通道,无法反映实际的雨水汇流路径;而一维、二维耦合模型计算复杂且对数据要求很高。精细化城市洪涝模拟需要与之适配的地表地形和地下管网信息,而当前我国仍处于快速城市化阶段,地下空间设施、雨洪调控设施等关键环节的简化处理,无法全面反映城市水循环系统,有效满足模型更新迭代需求。

总的来看,目前城市内涝模拟的研究方法模型很多,也取得了丰富的成果,为后续的研究提供了良好的基础。在以后的研究中,应该更多的发挥大数据、智能化技术、地理信息化技术的作用,以高精度地形和基础设施资料为支撑,重视下垫面的空间变异性,发展多过程耦合的精细化智能模拟技术,将是未来城市暴雨洪水模拟与感知面临的重要任务。

2.2 城市内涝风险评估和预警

在城市内涝的风险评估和预警方面,目前较为普遍的是基于历史灾情或指标体系技术方法。基于灾情的方法计算简单,空间精度难以反映风险的空间差异性,不适合开展小尺度区域的风险评估。基于指标体系的评估方法难以实现动态评估。例如,综合暴雨灾害潜在危险性、暴雨灾害状态、暴雨灾害的变迁、区域社会经济发展水平、区域抗灾能力等5个方面的因素建立了暴雨洪涝灾害风险评价指标体系,但都无法实现动态评估。

另外,众多学者也对因涝致灾造成的生命、财产影响与损失方面比较关注。美国、日本基于基础地理信息资料、社会经济专题资料和各行业的损失率资料等来评估城市内涝灾害损失^[22]。美国环保署依托ArcGIS平台开发暴雨雨水管理模型(EAP-SWMM)的预处理及后处理软件环境,辅助开展损失评估^[23]。JONKMAN等人^[24]使用水动力学模型SOBEK并根据灾害损失曲线,对荷兰南部洪水灾害损失进行了评估,过程中不仅估算了直接经济损失,还尝试考虑了间接经济损失和人员伤亡。江净超等人基于GIS等技术,在空间和时间上对流域进行水文单元的划分与模拟,便于灾害损失评估^[25]。一些学者通过内涝模拟,进行城市内涝灾害的气象预警^[26],采用数值气象预报模式与水文模型相耦合的形式,并取得了广泛的应用^[27]。另外,还有一些学者对城市内涝脆弱度进行评价^[22]。还有基于高精度DEM数据,考虑各水利要素的相互作用,借助数值气象预报模型与水动力学模型耦合的高效

高分辨率城市洪涝预报技术。

城市内涝风险预警是防涝减灾的关键。值得注意的是,目前,对城市内涝的风险预警,基本上还处于暴雨预报预警阶段,对于内涝风险最多的是关注灾损研究,对于风险的识别、预警还没有达到一定的精度和针对性。因此,在城市内涝风险预警方面,从风险理论出发,实现将水量-流量过程转换成淹没-破坏风险信息,从过去基于阈值预警,向针对风险信息的响应预警转变,建立完善基于灾害风险发生过程的精细化网格化预报预警技术。

2.3 城市内涝韧性评估

在面对内涝灾害时,城市不仅需要单纯地防灾,还应该具备适应内涝和快速恢复的能力。因此,城市韧性越来越受到国内外学者的关注。目前,已有众多的国内外学者探索应对城市内涝灾害的韧性评估理论技术方法。在韧性评估方法上,基本上都是通过构建指标体系、选取相应的数学方法、建立运算模型来达到量化的目的。

在城市内涝韧性指标的构建方面,基本上从以下四个角度:从社会、经济、制度和物理等层面确定韧性指标^[28-29];从城市内涝的抵抗力、恢复力和适应力三大属性出发建立韧性评估模型^[30];从城市内涝的致灾、抗灾和承灾三个方面去构建韧性指标体系^[31];从韧性社区与海绵社区的角度去建立韧性指标体系^[32]。在城市内涝韧性评价方法和模型方面,国内外应用最广泛的就是层次分析法、专家打分、模糊分析、熵权法、逼近理想解排序法(KL-TOPSIS)。在城市内涝的韧性提升策略方面,目前多采用绿化屋顶^[33]、基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)^[34]、灰绿蓝相结合的内涝蓄排体系等。

随着城市发展,城市水灾害的损失越来越大,如何科学识别、评估、控制和防范特大灾害风险,减少灾害事故隐患和损失,分散转移特大灾害风险,是一个值得研究的科学问题。保险是日常避险的重要市场化工具,那么它在自然灾害发生时能否发挥同样的作用^[11]?美国大约有50%的受灾损失可以从保险中获得部分补偿,德国、奥地利等国也大约有10%~20%的受灾损失已投保^[35]。目前,在国内地质灾害保险也逐渐作为地质灾害风险管理的重要手段,在三峡库区地质灾害防治^[36]、一些灾害应对过程中都引入了保险理念^[37]。韧性的概念涵盖了三个要素,一是具备减轻灾害或突发事件影响的能力;二是对灾害或突发事件的适应能力;三是从灾害或突发事件中高效恢复的能力。应该说,保险业在这三个方面都可以发挥重要且不可替代的作用。

值得注意的是,现有的内涝灾害相关的韧性评估体系大多为灾损评估,重视基础设施的抵御能力和气象、地形等客观因子,却忽视政府和市民的防控意识、应急处理和灾后恢复主观因子。城市内涝问题是一个复杂大系统,已有的内涝灾害韧性评估研究虽然考虑了工程、非工程相结合,

但是仍然局限于顶层政策层面,从社会、经济以及其他领域进行研究稍显薄弱。

3 存在问题

尽管国内外围绕城市内涝风险识别、预警及韧性评估开展了大量的研究性工作,也取得了一些有借鉴意义的成果,具有重要的指导作用,但从已有的研究进展来看,在技术层面上仍存在值得深入研究的方面。

对城市内涝过程模拟研究较多,取得了一些成果,但没有从统计学、数据同化与挖掘的角度,精细刻画内涝发生-危险性-灾损-风险的定量关系,有针对性地提出内涝防治的对策建议。

在城市内涝预报预警方面,基本上还是参照的是暴雨预警,从暴雨-内涝-灾变过程-防涝建议的逻辑思路研究的不深,针对性不强。这就迫切地需要从内涝发生灾变风险过程和机理来深入研究,分析其灾变的原因,有针对性的进行内涝防治及应急管理。

目前,学术界在基于内涝风险的韧性评估方面取得了一些探索性成果,但也存在一些薄弱环节,韧性指标体系和评价标准不统一,灾害保险制度未纳入韧性评估体系,且静态化评估较多,缺乏动态过程模拟和情景预测,评估成果难以有针对性地支撑防涝应急管理。因此,迫切需要深化内涝风险的韧性评估的技术方法体系研究,提升支撑服务城市安全的程度。

4 未来研究趋势

现阶段,对由暴雨预报转向风险预警研究程度还需要深入,韧性评估技术还存在争议,没有一个科学的衡量标准,难以精准服务内涝预警和防涝应急管理。精细化城市洪涝模拟是城市雨洪灾害应急管理的基础,内涝风险及韧性研究是城市雨洪灾害应急管理的发展方向与必然要求。未来相关领域应围绕以上问题,深入推进研究工作,为城市安全、城市韧性建设提供科学理论和实用技术的有力支撑,切实推动城市内涝问题的解决。

4.1 基于暴雨-内涝-灾损过程的城市内涝风险感知技术

在高精度DEM、遥感影像图、水系统以及排水基础设施资料基础上,从地质地貌、城市空间布局、汇水、排水等因素出发,完成城市内涝易发性评价和区划;在管-路-渠-河交互多层次汇流格局下,基于Copula方法确定暴雨频率,筛选出典型暴雨事件,运用现代化的暴雨洪涝仿真技术,识别出水深、流急的高风险点;构建暴雨重现期、频率与因涝潜在经济损失频率之间的定量函数关系;在对城市内涝致灾因子、孕灾环境、承灾体进行易发性、危险性评估的基础上,进行

不同暴雨重现期的内涝灾害风险综合研判,进行城市内涝风险区划,明确城市的高风险点,摸清内涝灾害隐患的底数。技术攻关的关键点主要包括:①基于地形特征的城市内涝灾害的易发性评价及区划;②超标暴雨工况下城市内涝致灾过程的精细化模拟;③城市内涝灾害的受损过程的危险性定量评估;④城市内涝灾害风险感知与识别。

4.2 基于“数据+模型”双驱动的城市内涝风险预警

将城市内涝灾害“量变-质变-灾变”的风险演变过程纳入灾害预警过程,在“数据+模型”双驱动下,建立暴雨-地形-下垫面-排水-积水-灾损的多维数据集,通过限定的最小支持和最小置信度来寻找数据之间的强关联规则,建立暴雨重现期、频率与灾损的频率函数关系,确定不同的承灾体受到内涝威胁的风险临界值;构建以灾变风险全过程感知的精细化预警,提升基于风险感知的预警精度,实现灾害过程感知的多维预警。技术攻关的关键点主要包括:①厘定内涝风险过程多维数据的强关联规则分析;②确定不同承灾体受到内涝威胁的风险临界值;③基于内涝灾变过程的空间动态网络风险预警。

4.3 考虑内涝灾害保险的城市内涝韧性评估

兼顾发展与安全的双重目标,将韧性理念、自组织和自适应能力融入内涝安全系统,充分借鉴国内外的经验案例,考虑城市内涝保险,从自然生态、空间格局、经济、社会以及基础设施等方面建立抵抗、吸收、适应灾害扰动,并恢复至运行的各个阶段的内涝韧性评价指标体系,提出基于风险评估和概率设置“优先级”的内涝灾害韧性评估的技术方法体系,并对韧性及其障碍度进行评估,通过可视化方法,展示各指标在适应性、应对性和恢复性上的性能,以提高其应对灾害风险的不同阶段的韧性缓冲能力;通过绿、蓝、灰等城市空间布局优化、用地功能置换、开发强度控制等措施,有效分配国土空间资源以应对灾害风险的发生,分析其危险性以及发生的风险概率,调控灾害发生过程,降低超常规灾害的损失,提升城市内涝灾害防治水平和城市韧性程度。技术攻关的关键点主要包括:①考虑城市内涝灾害保险的韧性多维临界指标体系构建;②厘定基于风险过程评估和灾变发生概率的韧性标准;③提出与内涝灾害风险共存的国土空间资源优化策略。

5 结语

城市防涝是补齐城市安全风险短板的关键。目前学术界在基于内涝风险识别和韧性评估方面取得了一些探索性成果,但也存在一些薄弱环节,对由暴雨预报转向风险预警研究程度还需要深入,韧性评估技术还存在争议,没有一个科学的衡量标准,难以精准服务内涝预警和防涝应急管理。

在下一步的研究中,在基于城市内涝致灾过

程的风险感知、预警以及韧性评估的技术方法体系方面,应优化改善现有的风险评估、预警及韧性评估技术。在城市内涝风险研判技术方面,将城市内涝灾害风险过程的多维大数据协同分析,深度融合“数据+模型”驱动的技术手段,实现城市洪涝灾害风险预警,优化内涝灾害过程模拟与风险态势感知技术。在城市内涝韧性评估技术方面,提出了考虑内涝灾害保险的韧性评估指标体系,构建了基于风险过程评估和灾变发生概率的韧性标准,提出与内涝灾害风险共存的国土空间资源优化策略。率先构建基于城市内涝灾害过程的风险感知、预警和韧性评估技术,为保障城市安全,减少灾害损失,尤其是城市防涝和应急管理提供亟需的理论技术方法,防灾减灾效益显著,服务城市蓝绿线划定、国土空间规划、管网规划等,促进韧性城市建设,服务城市绿色高质量发展。

参考文献:

- [1] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead; whither water management? [J]. Science, 2008, 319(5863): 573-574.
- [2] 程晓陶,冯智瑶. 城市化与现代社会中的水害演变:从日本经历看今日深圳[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(2): 41-48.
- [3] HALLEGATTE S, GREEN C, NICHOLLS R J, et al. Future flood losses in major coastal cities[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(9): 802-806.
- [4] 彭珂珊. 中国城市化与地质灾害之分析[J]. 城市规划汇刊, 1998(2): 35-40, 65.
- [5] 魏炳乾,孙小军,石忠科. 西安市防洪工程体系现状及改善措施初探[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 136-141.
- [6] 洪明. 国土空间规划背景下浙江海绵城市规划新思路[J]. 浙江工业大学学报(社会科学版), 2020, 19(1): 61-66.
- [7] 贺山峰,王欣. 变化环境下城市内涝灾害风险管理:挑战与应对[J]. 河南理工大学学报(社会科学版), 2019, 20(3): 48-53.
- [8] 田富强,程涛,芦由,等. 社会水文学和城市水文学研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 46-56.
- [9] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 820-828.
- [10] 韩浩,侯精明,金钊. 新型流域雨洪过程模拟方法研究[J]. 西北水电, 2022(5): 41-46.
- [11] 邵军,司增焯. 自然灾害对经济影响的研究述评[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2009, 11(3): 61-67.
- [12] 杜颖恩,侯精明,马红丽,等. 基于SWMM的LID设施空间格局优化模拟研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(19): 120-125.
- [13] 丛翔宇,倪广恒,惠士博,等. 城市立交桥暴雨积水数值模拟[J]. 城市道桥与防洪, 2006(2): 52-55, 152.
- [14] 王丹. 基于MIKE模型的西安市曲江新区城市内涝模拟研究[D]. 西安:西安理工大学, 2017.
- [15] 王英. 基于MIKE FLOOD的城区雨洪模拟与内涝风险评估[D]. 邯郸:河北工程大学, 2018.
- [16] 汤钟,张亮,俞露,等. 韧性城市理念下的区域雨洪控制系统构建探索及实践[J]. 净水技术, 2020, 39(1): 136-143.
- [17] 潘安君,侯爱中,田富强,等. 基于分布式洪水模型的北京城区道路积水数值模拟:以万泉河桥为例[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 19-22.
- [18] ZHANG Q F, et al. Explicit the urban waterlogging spatial variation and its driving factors: the stepwise cluster analysis model and hierarchical partitioning analysis approach[J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 143041.
- [19] LIN J Y, et al. Predicting future urban waterlogging-prone areas

- by coupling the maximum entropy and FLUS model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103812.
- [20] SHU Y Q, ZHENG G B, YAN X W. Application of Multiple Geographical Units Convolutional Neural Network based on neighborhood effects in urban waterlogging risk assessment in the city of Guangzhou, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2022, 126: 103054.
- [21] GUO Y C, QUAN L H, SONG LL, et al. Construction of rapid early warning and comprehensive analysis models for urban waterlogging based on AutoML and comparison of the other three machine learning algorithms [J], *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127367.
- [22] 黄曦涛. 城市内涝脆弱度评价与灾害影响模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [23] 彭定志. 基于 RS 和 GIS 的水文模型以及洪灾监测评估系统的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 1-120.
- [24] JONKMAN SN, BOCKARJOVA M, KOK M, et al. Integrated-hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands[J]. *Ecological Economics*, 2008, 66(1): 77-90.
- [25] 江净超, 朱阿兴, 秦承志, 等. 分布式水文模型软件系统研究综述[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(8): 1090-1100.
- [26] 王建鹏, 薛春芳, 薛荣, 等. 西安城市暴雨内涝灾害气象预警系统研究[J]. *灾害学*, 2008, 23(S1): 45-49.
- [27] 陈光照. 城市内涝过程高效高分辨率模拟预报方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [28] QASIM S, SHRESTHA R P, et al. community resilience to flood hazards in Khyber Pukhtunkhwa Province of Pakistan[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 18: 100-106.
- [29] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. *国际城市规划*, 2017, 32(5): 15-25.
- [30] 陈长坤, 陈以琴, 施波, 等. 雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J]. *中国安全科学学报*, 2018, 28(4): 1-6.
- [31] 李正兆, 傅大放, 王君娴, 等. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(2): 266-276.
- [32] 姜宇道. 雨洪防涝视角下韧性社区评价体系及优化策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [33] 孙挺, 倪广恒, 唐莉华, 等. 绿化屋顶雨水滞蓄能力试验研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(3): 44-48.
- [34] 周伟奇, 朱家菡. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5137-5151.
- [35] KEEN M, FREEMAN P K, MANI M, et al. Dealing with increased risk of natural disasters: challenges and options[J]. *IMF Working Papers*, 2003, 3(197): 1.
- [36] 冯春涛, 余振国. 三峡库区地质灾害防治保险制度研究[J]. *中国国土资源经济*, 2006, 19(10): 24-26, 47.
- [37] 谷玉, 李应求, 欧阳迪飞, 等. 基于动态财务分析的地质灾害保险定价[J]. *经济数学*, 2016, 33(2): 93-97.

Risk Identification, Alarming, and Resilience Assessment of the Urban Waterlogging

WANG Huaqi^{1,2}, ZHANG Ge^{1,2}, LI Lin^{1,2}, DONG Ying^{1,2}, WANG Tao^{1,2},
LIU Wenhui^{1,2}, ZHANG Xinshe^{1,2}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey(Northwestern Innovation center on Geosciences), Xi'an 710119, China;
2. Shaanxi Province Engineering Research Centre of Water Resources and Environment, Xi'an 710119, China)

Abstract: Urban waterlogging risk identification, early alarming and resilience assessment technology is the key to complement the short board of urban safety risks. On the basis of a brief review of the research progress of urban waterlogging risk at home and abroad, the research ideas and technical methods are reviewed and analyzed deeply. It is found that the degree of research from rainstorm forecast to risk early warning needs to be further studied, and there is no scientific standard for resilience measurement technology, which is still controversial and difficult to accurately serve urban waterlogging prevention and urban safety emergency management. The next step of the urban waterlogging should strengthen the risk perception technology based on rainstorm - waterlogging - disaster process, the urban waterlogging risk early alarming based on "data + model" dual driving forces, and the resilience assessment considering waterlogging disaster insurance, so as to provide strong support for urban safety and resilience urban construction.

Keywords: urban water logging; risk; resilience; urban safety