

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.008

# 我国城市内涝风险图编制关键问题及研究展望

张伟<sup>1,2,3</sup>, 庄子孟<sup>1</sup>, 孙慧超<sup>1,2</sup>, 李俊奇<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京建筑大学北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044;

2. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044;

3. 北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

**摘要:**全面梳理了国内外内涝风险图发展历程,系统分析了我国城市内涝风险图的核心组成、编制思路,重点探讨了我国城市内涝风险图编制的若干关键问题和技术需求,并结合现阶段我国城市内涝治理工作要求,对城市内涝风险图研究和工程实践进行了展望。指出城市内涝风险评估应从致灾因子危险性、孕灾环境暴露性和承灾体脆弱性3方面进行,采用指标体系法和情景模拟法相结合的方法编制城市内涝风险图。城市内涝风险图应对综合风险和潜在损失等多种信息进行全面、精准的表达,其编制是一项极其复杂的系统工程。未来需重点关注不同于流域尺度的城市下垫面产汇流特征及内涝形成演进机制,从高质量基础数据、高效模型和标准规范等方面进一步研究。

**关键词:**城市内涝风险图;城市内涝治理;致灾因子危险性;孕灾环境暴露性;承灾体脆弱性

**中图分类号:**TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0058-11

**Key issues and study prospect of urban waterlogging risk map in China**//ZHANG Wei<sup>1,2,3</sup>, ZHUANG Zimeng<sup>1</sup>, SUN Huichao<sup>1,2</sup>, LI Junqi<sup>1,2,3</sup> (1. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This paper comprehensively combed the development process of urban waterlogging risk maps in various countries, systematically analyzed the core components and compilation ideas of the urban waterlogging risk map, and focused on exploring several key issues and technical requirements for the compilation of urban waterlogging risk maps in China. Combined with the current requirements of urban waterlogging control in China, the development of urban waterlogging risk map research and engineering practice was prospected. It was pointed out that the risk assessment of urban waterlogging should be carried out from three aspects including risk of disaster causing factors, exposure to breeding disaster environment, and vulnerability of disaster carriers, and a combination of scenario simulation method and indicator system method should be used. The urban waterlogging risk map should express the comprehensive and accurate information such as comprehensive risk and potential loss, and the compilation is an extremely complex system engineering. In the future, it is necessary to focus on the characteristics of urban underlying surface runoff and the evolution mechanism of waterlogging at different watershed scales, and further research should be conducted from high-quality basic data, efficient models, and standard specifications.

**Key words:** urban waterlogging risk map; urban waterlogging control; risk of disaster causing factors; exposure to breeding disaster environment; vulnerability of disaster carriers

城市快速发展改变了原有生态和水文本底特征,城市内涝灾害频发,严重威胁城市居民日常生活

和社会经济发展,气候变化背景下的极端暴雨加剧了这一影响<sup>[1]</sup>。为有效应对和从根本上缓解城市

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2022YFC3800500, 2021YFC3001400);北京市自然科学基金重点项目(8191001);泸州市海绵城市科研课题研究项目(N5105012022000106)

**作者简介:**张伟(1984—),男,副教授,博士,主要从事海绵城市与内涝治理研究。E-mail:zhangwei@bucea.edu.cn

内涝及其带来的不利影响,近年来我国先后出台了一系列重大举措,为城市内涝治理工作有效推进提供了重要支撑。2013年4月,国务院办公厅印发了《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》(国办发[2013]23号),明确要求各地区全面评估城市排水防涝能力和风险、编制完成城市排水防涝设施建设规划,提高城市防灾减灾能力和安全保障水平,加强城市排水防涝设施建设。其中,城市排水能力与内涝风险评估是城市排水防涝设施建设工作的核心内容,也是有效推进城市内涝治理的重要基础工作。国内外已开展了一些前期研究和探索,根据研究区域自然和排水系统特征、可用基础数据质量、风险评估精度要求等因素有效探索了多种评估方法<sup>[2]</sup>。解以扬等<sup>[3]</sup>采用数值模拟方法评估了研究区域暴雨内涝灾害风险,以积水深度作为风险等级划分指标,提出了内涝灾害风险三级划分方法。Kazmierczak等<sup>[4]</sup>基于人口脆弱性、内涝发生概率以及自然和建筑环境的物理特征间的空间关联性分析,采用包含26个主要指标的主成分分析法系统评估了英国大曼彻斯特市的内涝风险。Yin等<sup>[5]</sup>提出了基于情景模拟的小尺度城市暴雨内涝灾害风险评估的综合分析思路与方法。Abebe等<sup>[6]</sup>基于地理信息系统和贝叶斯网络的内涝脆弱性评估模型,量化了内涝风险评估的不确定性。Dong等<sup>[7]</sup>以郑州市内涝事件特征为基础,提出实际流速与人或车辆初始流速之比的危险程度指标,对内涝事件中人车风险评估提供了可能依据。

城市内涝风险科学全面评估结果的表达十分重要,直接决定内涝风险评估的价值和效益,有效支撑主管部门排水防涝规划制定、应急管理预案编制和应急响应决策。城市内涝风险图因其科学、直观、易读性强等特点,为内涝风险评估结果表达提供了可行途径。2015年7月,住房和城乡建设部、中国气象局联合印发《关于加强城市内涝信息共享和预警信息发布工作的通知》,其中要求应利用科学方法确定城市内涝灾害气象致灾阈值和内涝风险等级,联合制作精细化城市内涝风险区划图,这为我国开展城市内涝风险图的研究和实践工作提供了重要依据。2021年4月国务院办公厅印发的《关于加强城市内涝治理的实施意见》(国办发[2021]11号)给出了更为明确的要求,各地应编制内涝风险图,探索划定洪涝风险控制线和灾害风险区,优化城市布局、加强竖向管控,进一步凸显城市内涝风险图编制在城市内涝治理工作中的必要性和紧迫性。内涝风险图编制工作中,内涝致灾阈值和内涝风险等级的确定至关重要,也是绘制精细、准确城市内涝风险图的

决定性因素,围绕这一关键问题,国内外学者已开展了一些有益探索和实践。基于数学模型模拟分析结果绘制特定降雨条件下内涝淹没图,可直观展示特定降雨与内涝积水范围、深度、流速等特征参数的关系,但诸如人口密度、城市化率和经济水平等城市社会因素的影响无法直观展示<sup>[8]</sup>,而这些社会因素对内涝积水范围、淹没深度可能造成的灾害和损失风险至关重要。Martínez-Gomariz等<sup>[9]</sup>基于InfoWorks ICM构建的一维二维耦合模型对西班牙巴达洛纳市的内涝风险进行了评估,绘制特定设计降雨重现期条件下的行人和车辆等脆弱性分布图和内涝风险图,并评估极端降雨条件下积水风险和潜在损失增量。赵玉杰等<sup>[10]</sup>结合数学模型情景模拟和指标体系分析,量化多种重现期设计降雨条件下淹没水深、淹没历时等级分布,提出了涵盖致灾因子危险性、孕灾环境敏感性和承灾体脆弱性3个维度的城市内涝风险图绘制方法,对城市内涝风险图绘制进行了有益探索。但目前针对城市内涝风险图的研究和实践,在模型构建和模拟分析方法、致灾、孕灾和承灾三要素分析以及内涝风险综合评价指标和指标值确定等方面仍存在不同理解,城市内涝风险图绘制方法也尚无统一标准可供遵循,这必然会对城市内涝风险评估和治理工作的有效推进造成障碍。

尽管城市内涝评估和风险图绘制尚在探索研究阶段,但在流域层面洪水风险评价和洪水风险图编制方面已具备较为丰富的实践经验和研究基础<sup>[11]</sup>,可为城市内涝风险图研究和实践提供可行思路 and 有效借鉴。值得关注的是,由于流域洪水和城市内涝在时空特征与演进机制、下垫面条件与降雨时空特征、地上/地下多排水系统耦合关系等方面存在显著差异<sup>[12]</sup>,流域洪水风险图的编制经验并不能在城市内涝风险评估中直接“生搬硬套”,首先需明晰城市内涝积水成因和致灾机制,形成体现城市内涝积水实际特征的科学规范的城市内涝风险图编制方法和流程,方可城市内涝治理工作提供切实有效理论支撑。

鉴于目前我国城市内涝风险评估和内涝风险图研究和实践现状,结合目前我国在加强城市内涝治理工作中对内涝风险图编制的迫切需求,以及现阶段业内对内涝风险图编制方法和成果表达的不同理解等,本文对城市内涝风险图编制的若干关键问题进行细致梳理和解析,追溯城市内涝风险图的起源与发展,明晰城市内涝风险图的核心组成,提出符合我国城市内涝治理实际需求的城市内涝风险图编制思路,以期为我国城市内涝风险图编制和城市内涝治理工作提供参考。

## 1 国外洪水风险图编制概况

在许多欧美国家尽管也按照洪涝成因区分流域洪水(watershed flooding)和城市内涝洪积洪水(pluvial flooding)或地表径流洪水(surface water flood),但并不严格意义上区分洪水风险和城市内涝风险,通常认为城市内涝是城市洪水组成部分或一种具体形式,特指城市区域内由于强降雨导致超过城市排水系统能力的过量径流<sup>[13]</sup>。这些国家针对洪涝风险评估研究大多聚焦在河流洪水(fluvial flooding)和沿海洪水(coastal flooding),仅针对城市内涝研究相对较少<sup>[14]</sup>。鉴于这种城市区域内洪涝问题和衔接关系,国际上更多是针对广义洪水风险图开展研究,逐步形成并完善了洪水风险图技术方法体系。但值得注意的是,相对成熟的国外洪水风险图编制相关标准或技术文件中,重点针对城市内涝的技术要求和具体内容相对较少,也并未清晰地给出特指城市内涝风险评估的核心问题和关键步骤,进而导致在许多城市编制本地洪水风险图时,对城市内涝相关内容采用的技术指标和评估结果展示方法不一而同。当然,如果将城市内涝作为城市洪涝的一种具体形式,内涝风险图编制时也可参考洪水风险图编制思路和技术要求实施。

无论是内涝风险图还是洪水风险图,首先需要明确其编制的责任主体。以美国为例,洪水风险图由联邦应急管理署(Federal Emergency Management Agency, FEMA)制定具体内容和技术指标参数要求,并由FEMA通过网站等多种媒体渠道发布风险图及其他评估结果,州郡县等地方政府统一按照联邦政府的规范要求负责具体落实。日本由国土交通省负责编制流域尺度洪水风险图,但并没有类似FEMA的管理机构和实施模式,小于流域尺度的洪水风险图编制和发布实施多由地方政府部门负责<sup>[15]</sup>。英国情况与美国有类似之处,由英国环保署及地方洪水主管机构共同负责洪水风险图编制工作,且风险图发布渠道也更为丰富,除在互联网上共享和公开洪水风险图,也提供洪水风险图查询系统。有专门机构负责与管理更有利于洪水风险图编制工作的标准化和规范化实施与落实,风险评估成果等多渠道、多媒体发布也必然会为公众参与和受益提供良好的平台。

许多国家对洪涝风险的评估方法不同,所选评估指标及阈值划分标准也存在差异。美国洪水风险图编制通常采用水文学、水力学计算方法,水文学计算方法主要有累积频率曲线法、区域回归方程法、推理公式法和数学模型法<sup>[16]</sup>,对于复杂的城市下垫面

区域,水力学计算方法具有更高的空间分辨率和更好的模拟准确性<sup>[17]</sup>。FEMA用于一维恒定/非恒定流水力模拟的软件主要包括HEC-RAS、FEQ、SWMM、UNET、FLDWAV、MIKE 11等,用于二维恒定/非恒定流水力模拟的软件主要有Adaptive Hydraulics(4.2)、FESWMS 2DH(1.1)、MIKE Flood、HEC-RAS(5.0)、XPSWMM 2D、XPStorm 2D等<sup>[16]</sup>。此外,FEMA正在实施一种称为风险评级2.0(risk rating 2.0)的新评级方法,通过纳入更多的洪水风险变量来解决评级差异问题。日本的城市洪涝风险图以某场暴雨为设计情景,采用不同颜色表示4个积水深度等级(0.2~0.5、0.5~1.0、1.0~2.0、2.0~5.0 m),体现不同积水深度的空间分布,且标示避难转移相关信息<sup>[15]</sup>。美国、日本等国家对洪水风险多从流域尺度分析,并未明确要求对城市内涝进行专门风险图编制,但英国出于对城市内涝积水问题的重视,在流域洪水风险评估管控基础上,特别强调了城市内涝地表径流洪水地图(surface water flood map)编制的具体要求。在英国《洪水风险条例》中明确定义了地表径流洪水地图概念,《地方洪水主管机构内涝洪水风险图编制导则》中规定,英国内涝洪水灾害图应包含洪水的可能程度、洪水深度、流动方向和速度以及洪水发生的可能性,降雨标准采用30年一遇、100年一遇和1000年一遇,降雨历时按1 h、3 h和6 h,通过水文模型、数字地形模型(digital terrain model, DTM)和水力模型分析地表汇流、渗流和管网排水,精度要求也较高,采用2 m×2 m的网格尺寸,《什么是更新的内涝洪水地图》还给出了淹没范围、深度、流速及危险等级的划分标准。无论针对城市内涝风险图专门要求,还是作为流域尺度下洪水风险图的一部分,许多国家在城市区域洪、涝风险评估指标体系和具体指标值要求,可为我国城市内涝风险图编制提供有益的参考。

洪水风险图是风险评估的最终成果表现形式,但由于侧重点不同,最终表达形式也存在显著差异。美国实践中侧重风险评估结果与洪水保险挂钩,因此其洪水风险图重点体现洪水保险费率指向性,具体表达为洪水保险率地图(flood insurance rate map, FIRM),其中标识了100年一遇和500年一遇洪水可能淹没的区域和风险等级,并提供保险费率计算方法,可为国家洪水保险计划(national flood insurance program, NFIP)实施提供有力支撑<sup>[18-19]</sup>。日本洪水风险图则是以居民的转移避险为主要目标,除淹没范围、水深以及人口、房屋、财产损失评价结果等基本信息外,特别强调公众获取洪水信息渠道、公众避难场所、避难路径、避难空间分布信息和主

要管理机构紧急联系信息<sup>[20]</sup>。英国地表径流洪水地图(surface water flood mapping)实施中,具体分为洪水灾害地图(flood hazard maps)(主要显示洪水范围、深度和流速等洪水特征)和洪水风险地图(flood risk maps)(主要表达因洪致灾的不利影响)<sup>[21]</sup>。英国政府也专门发布《地方洪水主管机构内涝洪水风险图编制导则》,其中具体规定了地表径流洪水地图应至少包含的核心内容和具体指标要求。各国家在城市内涝风险图表达形式中的不同做法也可为我国城市内涝风险图的编制提供参考。

## 2 我国城市内涝风险图现状

尽管目前我国尚无城市内涝风险图的统一规范标准,但洪水风险图相关领域的研究和实践可提供一些借鉴意义。我国洪水风险图编制内容主要是从洪水危险性角度进行分析,利用数学模型模拟洪水特征和分析潜在风险,较少涉及孕灾环境暴露性和承灾体脆弱性等内容。在现行行业标准 SL 483—2017《洪水风险图编制导则》(以下简称《导则》)中,将洪水类型分为河道洪水(含溃坝洪水)、暴雨内涝和风暴潮,尽管城市内涝风险也纳入这一行标范畴,但《导则》的重点在于河道洪水,尚未对城市内涝风险分析的若干重要问题进行细致规定,并未全面界定城市内涝风险图编制显著区别于流域尺度河道洪水的独特之处,因此仅通过该《导则》无法给予城市内涝风险图编制切实和具体的指导。

现行国家标准 GB 50014—2021《室外排水设计标准》给出了城市内涝的明确定义,强降雨或连续性降雨超过城镇排水能力,导致城镇地面产生积水灾害的现象。从这一定义中可以清晰看出城市内涝风险和一般意义洪水风险的明显差异:①两者在尺度存在显著差异,相对较大尺度流域洪水风险,城市内涝更多聚焦于城市行政区划内,或重点在建成区范围;②两者在精度上存在显著不同,相对流域洪水风险分析中千米或百米级的地表特征精度,城市内涝风险分析中,因城市地表复杂的特征,多数情况需要米级甚至亚米级精度数据支撑;③现代城市不仅局限于地表土地开发建设,而是“地上+地下”空间开发建设同步推进,造就了城市内涝风险分析需要充分考虑城市地表径流行泄和地下空间复杂交互关系,诸如地铁口、地下室停车场入口等都是地上/地下空间径流交互的重要耦合点,从而相对于单一地表产流、漫流为主的流域洪水分析,城市内涝分析具有更高复杂性;④城市排水系统是一个多子系统耦合的复杂系统,源头减排、排水管渠、超标径流行泄系统间协同作用本已十分复杂,再叠加上河道湖泊

等受纳水体的顶托、半淹没等特殊情况下,必将进一步增加城市排水系统的复杂性和不确定性。

尽管内涝风险评估具有高度复杂性和不确定性,实现精准的风险评估必然面临更高挑战,但近年来我国城市内涝风险评估也探索了一些可行的方法,诸如历史灾情法、指标体系法和情景模拟法等<sup>[2]</sup>。历史灾情法通常对水文、历史实测基础数据要求较高,但城市内涝分析时可用实测数据储备相对有限<sup>[22]</sup>,限制了该方法在内涝风险分析中应用。指标体系法多是根据内涝灾害特点建立内涝风险评估指标体系,但表达内涝风险的指标值、权重等确定通常具有不同程度的主观性<sup>[2]</sup>;该方法通常从内涝致灾因子、孕灾环境和承灾体特征入手确定具体评价指标,在数据需求、评价全面性等方面具有一定优势<sup>[23]</sup>,但该方法多未考虑地表产汇流动态过程,以及城市排水管渠实际排水能力及与地表排水的交互作用,其结果表达上尽管实现了量化,但无法有效反映内涝风险的空间分布特征<sup>[2]</sup>。情景模拟法通常基于城市排水模型模拟,可较为真实地反映不同降雨情景下城市产汇流、排水管渠输送以及地表积水动态过程,可体现城市内涝灾害信息的空间分布特征<sup>[24]</sup>,较好弥补了指标体系法的先天缺陷。蔡甜等<sup>[25-26]</sup>通过两种方法有机结合,既较好实现内涝风险指标量化,也更为直观地表达了考虑多种自然因素和社会因素的内涝风险空间分布特征,为内涝风险准确识别和全面评估提供了可行途径。

我国城市内涝风险评估尚处于研究探索阶段,内涝风险图实践应用也尚属于起步阶段。2013年9月30日,湖北省人民政府发布了武汉市第一部城区内涝风险图,以直观的方式标识了武汉市城区主要风险点(线)及其风险等级。2022年7月7日,北京市水务局发布了首份城市积水内涝风险地图,以积水深度为内涝风险指标,给出了主城区历史积水内涝点分布、下凹式立交桥分布和积水内涝风险分布情况,在图示基础上,并附内涝点和风险点详细信息表,便于管理部门决策和公众了解。客观来说,目前部分城市发布了城市内涝风险图,确是在这一领域的重要突破和关键进展,但已发布城市内涝风险图多以积水深度单一指标表达内涝风险及程度,指标设置上还存在有待完善之处。此外,目前的内涝风险尚以表达内涝积水程度和风险的的空间分布为主,内涝风险图成果表达方式也尚待丰富。再有,目前内涝多从致灾因子程度入手,缺乏内涝危险性多尺度特点、城市承灾体多样性和承灾体脆弱性差异等因素的综合考量,并且未充分考虑城市防涝能力等因素。最后,我国目前开展内涝风险图编制并发布

的城市尚为少数,未来内涝风险评估和风险图编制还有大量工作亟须开展。在此背景下,充分基于现有研究和实践基础与经验积累,研究明确城市内涝风险图的核心组成,建立适用不同条件的内涝风险评估方法体系,进而规范我国城市内涝风险图编制工作,是有效推进我国城市内涝风险治理的必由之路。

### 3 我国城市内涝风险图核心组成

相较流域尺度洪涝问题,城市内涝因受更多因素影响,其成因具有更高复杂性和不确定性,因此城市内涝风险评估应关注的因素更多,其中气候变化背景下降雨条件多变性和城市化背景下下垫面条件的错综复杂是城市内涝形成的主要驱动因素<sup>[2]</sup>,也是城市内涝区别于流域洪水的重要原因之一。与城市内涝风险评估相关的概念有很多,如危险性、暴露性、脆弱性、恢复力、适应性等,不同领域的专家学者研究的侧重有所差异<sup>[2]</sup>。结合灾害风险系统理论定义,本文认为内涝灾害风险应是危险性、暴露性和脆弱性三者共同作用的结果,并重视人类社会经济自身的脆弱性在灾害形成中的作用,保证指标选取的全面性和科学性,尤其关注与流域洪水不同的城市尺度特有的承灾体脆弱性。①降雨是最重要的内涝致灾因子,其时空分布特征直接影响了内涝发生强度、位置和演进特征,气候变化背景下极端降雨出

现频次和强度增加更加剧了这一影响,降雨造成的积水范围、水深、历时等内涝灾害可量化特征可直观反映内涝本身危险程度。②暴露在致灾因子影响下的自然环境是内涝发生的间接影响因素,是体现内涝形成的孕灾环境<sup>[27]</sup>。在城市较小尺度范围,尤其是建成区范围,城市原有下垫面类型因城市建设发生显著改变,改变了区域原有自然排水、蓄水能力,已有研究表明土地利用类型变化是导致内涝风险和影响其程度的关键因素之一<sup>[28]</sup>。其中,对于地势起伏较大的山地城市和丘陵城市,高纵坡道路将成为雨水行泄的重要通道,而因地形起伏形成的低洼区则极有可能成为内涝积水重灾区。③与流域洪水不同,城市排水系统是内涝形成的决定性因素之一<sup>[29]</sup>,城市排水能力也是体现城市承灾体脆弱性的重要指标之一。城市管网系统、内涝防治系统设计标准与现实实际排水能力的差异,决定了城市排水系统对内涝形成和风险的实际控制程度。④承灾体对内涝承载能力体现为承灾体脆弱性,为明确内涝究竟造成怎样的后果和损失以及风险是否超出城市承受能力,承灾体脆弱性是必须考虑的关键问题<sup>[6]</sup>,也是为后续制定防灾减灾对策提供科学依据的前提。基于城市内涝形成、演进、致灾和风险等方面的实际特征,以及我国洪涝风险图研究和实践经验,并结合国内外内涝风险的研究成果,提出城市内涝风险图的核心组成如图1所示。

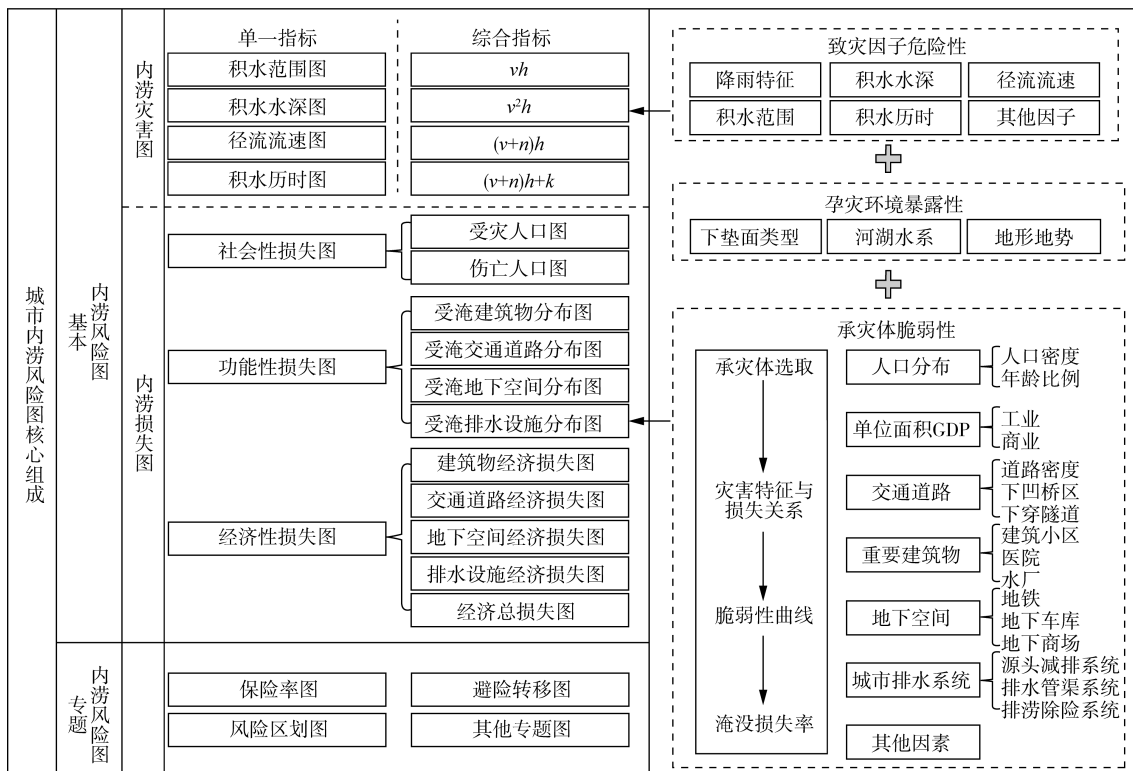


图1 城市内涝风险图的核心组成

Fig.1 Core composition of urban waterlogging risk map

基于3方面风险要素分析,可将城市内涝灾害特征以及内涝造成的损失绘制成图,形成清晰表达内涝风险程度的空间分布图,又可细分为内涝灾害图和内涝损失图。但是,仅有表达内涝风险程度的要素信息不够,还应根据应用场景和行业需求,绘制包含避险路线、避难场所、相关机构联络电话等信息的避险转移图,还包括可用于保险业计算保险费率的保险率图以及可用于城市规划管理的风险区划图等。这些特定行业应用的内涝风险图可作为专题内涝风险图。内涝风险图划分为基本内涝风险图和专题内涝风险图,既符合现行《导则》的要求,又与英国地表径流洪水地图分类方法等国际惯例保持一致,可有效避免内涵和理解上差异造成不必要的混乱。

致灾因子危险性和灾害指标选择是城市内涝风险图编制的核心问题之一。按照国内外洪涝风险分析经验,淹没范围、淹没水深、淹没历时和径流流速是最直观的洪涝风险典型危险性指标,现行《导则》中也将其作为洪水风险主要要素,还包含体现洪水特征的前锋到达时间等其他特征要素,但其并非城市内涝风险性主要要素。城市内涝风险图致灾因子危险性和灾害指标应至少包括积水范围、积水水深、径流流速和积水历时。此外,单一指标可在一定程度上反映内涝积水危害的某一特征,但仅用单一指标难以全面反映内涝灾害危险程度,包含多种指标的综合指标为解决这一问题提供了可能。美国FEMA采用洪水深度和洪水速度的综合作用表达洪水的严重程度,英国环保署和HR Wallingford公司也采用包含洪水淹没深度和流速的函数表达洪水灾害程度<sup>[30]</sup>。近年来,对于表达洪涝风险的综合性指标研究已经开展一些有益探索,利用流速 $v$ 和水深 $h$ ,设计了 $vh$ 、 $v^2h$ 、 $(v+n)h$ 等综合性指标,其中 $n$ 为附加系数,通常取值为0.5或1.5,也有研究在此基础上再叠加表达径流挟沙能力的泥沙因子 $k$ ,不同形式综合性指标适用性和表征危险程度准确性等有待深入研究。

从内涝风险评估角度,更关注人口、建筑物及基础设施等承灾体在内涝事件中可能遭受的损失情况。因此,对于城市内涝风险分析,更应重视城市的交通设施、医疗设施、生活设施等生命线系统遭受内涝可能造成的直接功能性损失和经济损失。结合城市内涝致灾特征,主要损失类型应至少包括社会性损失图、功能性损失图和经济性损失图。无论是哪种类型损失图,损失的科学准确量化是保证损失图准确性的关键。可通过表达致灾因子强度和承灾体脆弱性的定量关系的脆弱性曲线实现各种类型损失

量化评价<sup>[31]</sup>。脆弱性曲线研究通常选取淹没水深、淹没历时和径流流速等致灾因子指标<sup>[32]</sup>,目前在内涝风险评估也呈现出采用综合指标的趋势和显著倾向,这也与内涝灾害图中单一指标和综合指标选择具有一致性。

我国不同地区城市本底条件和气候条件差异显著,其内涝成因和风险具有显著不同的特征<sup>[12]</sup>,进一步增加了我国城市内涝风险图编制工作的复杂性。尽管GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》和SL 723—2016《治涝标准》对城市内涝的概念和定义给出明确规定,但我国城市内涝风险评估指标及内涝风险等级划分尚无统一规定,在城市内涝风险图编制工作中,各城市应以自然和社会等本底特征和当地城市排水系统问题为导向,合理确定适合当地条件的内涝风险评估指标,慎重选择承灾体脆弱性评估指标,增强当地城市内涝风险图编制的针对性、实用性和可操作性。

#### 4 我国城市内涝风险图编制思路

在明确城市内涝风险图核心组成的基础上,明晰和规范城市内涝风险图的编制思路是保证内涝风险图编制成果可靠性的重要环节。结合国内外经验,城市内涝风险图编制应采用指标体系法和情景模拟法相结合的方法,以实现城市内涝风险更为准确的全面评估。具体而言,应按照“资料收集与评估准备—模型构建与风险评估—体系构建与系统分析—成果表达与图纸绘制—应用途径与公开公布”的总体思路进行(图2)。

**a. 资料收集与评估准备。**城镇化发展不仅是地上的下垫面条件改变,通常是地上、地下同步快速推进,同时具有更多地上/地下空间的交互通道。立交桥、下凹桥区等交通枢纽和重要交通节点增加,地铁口、地下车库入口、过街隧道等地上/地下空间交互节点涌现,以及由于城市景观设计需要,城市各类微地形设计、复杂竖向条件也成为常态,再加上城市地下排水管网与地表径流汇流和行泄过程中的交互作用导致城市区域内地表径流和产汇流过程更为复杂,同时也对城市内涝风险评估模型所收集资料数据体量和质量提出了更高的要求。除此之外,城市降雨资料的收集也极大影响内涝风险评估的准确性,城市排水系统在汇水区域范围内(通常 $2\text{ km}^2$ )多采用点雨量,但忽略降雨的空间分布差异必然会对城市内涝风险评估结果造成影响,尤其是城市区域容易由于下垫面条件影响形成“雨岛效应”“局地微气候”,充分考虑降雨空间分布特征的降雨资料有助于更为精准的内涝风险识别。此外,对于特定条件



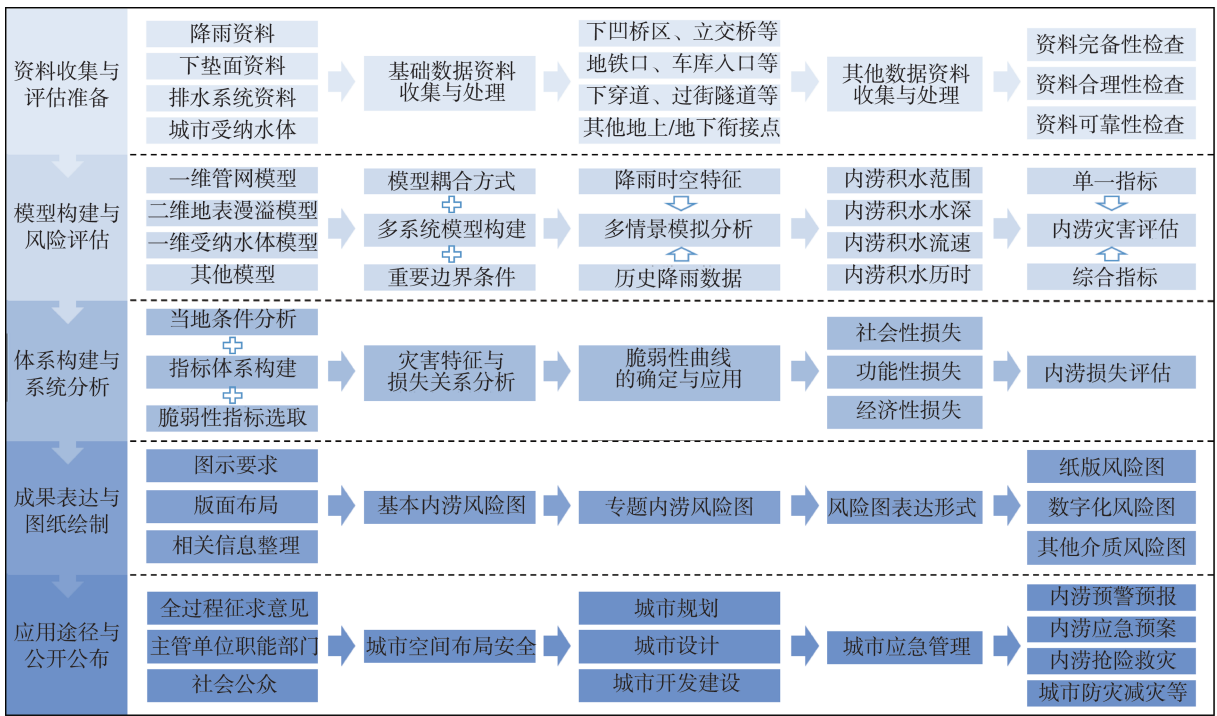


图 2 城市内涝风险图编制流程

Fig. 2 Process of urban waterlogging risk mapping

下的内涝分析,还需要 30 年或更长时间历史降雨数据的支撑,也增加了降雨资料收集的难度。为保证后期内涝损失的量化分析和评估,现在和历史社会经济资料也是城市内涝风险图编制的重要支撑材料。最后,资料的完备性和合理性检查是所有资料收集后的关键步骤,也是后续风险评估可靠性的重要保证。

**b. 模型构建与风险评估。**数学模型在城市排水系统设计中已成为普遍采用的重要工具<sup>[33]</sup>,GB 50014—2021《室外排水设计标准》对数学模型的应用进行了明确的规定,数学模型在城市内涝风险评估和风险图编制工作中也是贯穿全过程的重要支撑工具。在流域尺度洪水风险模拟分析中,通常只采用二维水动力学模型模拟地表洪水形成与演进过程,以及洪水淹没致灾特征<sup>[34]</sup>。但对于城市而言,由于城市源头减排、排水管渠和排涝除险系统同时存在,模型构建面临更高的要求。通过对包括城市排水管渠在内的排水系统进行合理概化,采用一维排水管网与二维地表漫溢耦合模型,特殊情况下再实现接纳水体一维模型耦合,科学合理确定各子模型的耦合方式和相关边界条件,可实现对城市内涝风险的准确识别和评估。目前业内已有模型软件可以部分或全部实现上述功能要求,但对于模型耦合方式和参数确定、具有空间分布的降雨数据输入、地上/地下交互和关键节点的概化方式等方面尚需深入研究。

**c. 指标体系构建与系统分析。**风险评估指标体系构建和系统分析可通过脆弱性曲线等方式将内涝危险性和可能造成的潜在损失建立联系。指标体系能够基于对当地自然地理条件和社会经济条件的分析,结合区域内承灾体脆弱性指标,实现对内涝造成潜在社会性、功能性和经济性损失风险的有效评估。指标体系构建的核心步骤是指标的选取和权重的确定。评估指标通常需要根据城市区域的本底特征进行选择,常用的权重赋值方法包括层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、主成分分析(principal component analysis, PCA)、熵权法(entropy weight method, EWM)等<sup>[35]</sup>。不同学者对指标的选择不同,评估结果也存在较大差异,指标赋权应选择较为客观的计算方法,减少主观影响。对于指标的等级划分,主要有阈值法、经验公式法和物理机制法等<sup>[2]</sup>,也可参考 GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》、GB 50014—2021《室外排水设计标准》以及其他相关研究确定<sup>[24]</sup>。

**d. 成果表达与图纸绘制。**城市内涝风险图应至少包括基本内涝风险图和专题内涝风险图,其中基本内涝风险图是一套直观反映内涝危险性和承灾体脆弱性的风险要素空间分布的图集,也是专题内涝风险图的基础。地理信息系统(geo-information system, GIS)可极大提高风险图绘制效率,丰富风险表达方式,可清晰、详尽地表达城市内涝风险信息。对于根据特殊应用需求和场景绘制专题内涝风险

图,应图示相关信息的空间分布情况,如避险转移图中应图示避难场所、避难路径、责任机构联络信息和避难注意事项等。城市内涝风险图的最终成果应包括纸质、数字化等多种介质形式,便于记录保存、开放共享和后续实际应用。

e. 应用途径与公开公布。城市内涝风险图编制的目的不是“束之高阁”,一定要实际应用,真正为社会生产生活服务。基本内涝风险图是城市规划、城市设计、城市开发建设的重要参考依据,是加强城市空间布局安全的重要支撑,更是城市内涝预警预报、防灾减灾、应急预案等应急管理工作向风险管理思路转变的重要指引和参考工具<sup>[36]</sup>。此外,城市内涝风险图应采用多种方式向公众及时公开公布,向主管和相关单位部门、社会公众征求宝贵意见和建议,更可为城市运行各部门以及社会公众提供积水内涝风险防御参考依据,辅助市民汛期安全出行,促进公众参与,共同有效推进城市内涝治理研究和实践工作。

## 5 我国城市内涝风险图编制需求与研究展望

### 5.1 高质量基础数据需求与数据共享途径缺乏

高质量基础数据是保证内涝风险图编制的重要基础,数据采集也是投入成本较高的环节<sup>[37]</sup>。城市内涝风险分析与评估需要真实、精准地反映城市下垫面条件的基础信息,这是城市地表径流产汇流和内涝形成演进分析的基石。城市下垫面的复杂结构、地上/地下空间交互关系多样性等特征,对获取数据的精度提出更高的要求。内涝致灾损失分析中的人口密度、GDP 分布、城市排水管网系统数据以及建筑物、道路、重要排水防涝设施数据等<sup>[38]</sup>,需要达到与下垫面和地形数据相匹配的精度。此外,对用于风险评估模型率定和验证的历史内涝事件数据,也需要与建模数据相适配。这些数据大多由不同部门掌握,限于部门管理权限和职责范围,目前尚缺乏数据共享途径和相关协调机制。而且,不同部门对数据资料保存形式、数据格式尚无统一标准,大量的时间和人员成本往往投入到这些重复性数据处理工作,造成不必要的浪费,也增加了风险分析的不确定性<sup>[39-40]</sup>。城市内涝风险分析工作普遍的困难是降雨数据的获取,尤其高精度长历时的降雨数据。因此,在积极探索数据共享途径和共享机制外,也应在已有数据共享平台中现有数据更新频次、数据共享类型、数据共享范围、共享数据精度等开展新的尝试,将对城市内涝风险分析和内涝风险图编制工作有效推进提供有力的支撑。

### 5.2 模型模拟准确性和模拟计算效率之间的矛盾

实现城市内涝精准模拟要求模型构建时充分考虑城市下垫面复杂性以及影响城市内涝形成和演进过程的多种关键因素<sup>[41-42]</sup>,但模型精细化和模型计算成本存在矛盾。目前,业界也对城市内涝模拟分析采用一维管网耦合二维地表漫溢的建模方式达成了基本共识,但对于城市下垫面和排水系统复杂性,甚至地表建筑物、构筑物等在二维地表漫溢模型中的不同概化处理方式,都会显著影响城市内涝风险模拟的计算效率,也增加模拟分析的不确定性<sup>[43-44]</sup>。目前,模拟时长对于特定假设降雨情景的内涝模拟分析的影响尚在可接受范围内,但基于短临降雨预报的动态内涝风险图将成为今后发展的趋势之一,较长的模拟计算时间必将成为限制其发展的关键因素。目前城市内涝模拟分析中遇到的问题和瓶颈已得到主管部门的重视和相关研究人员的普遍关注。据报道,在“十四五”重点研发计划多个专项中已设立若干内涝治理为主题的研究项目,从内涝风险模型研发、内涝致灾过程模拟、内涝快速预警和短临预报、模型耦合和概化方式等方面开展研究,相信目前已开展或即将开展的研究工作定会为今后解决上述技术瓶颈提供有效方法。

### 5.3 城市内涝风险评估指标确定与风险图编制工作标准化

在我国已经开展的部分城市内涝风险评估和风险图编制工作中,大多基于国内外研究并参考流域洪涝风险评估方法体系,从致灾因子危险性、孕灾环境暴露性和承灾体脆弱性等几个维度进行分析,在内涝风险评估指标选取和评估指标体系构建上存在一定差异。评价指标体系的差异一定程度上体现了各城市自身条件的不同,但评价指标体系建立和指标选取上存在一定主观性,一方面可能影响内涝评估结果,另一方面也对不同城市评估结果的横向比较造成了障碍。不同指标权重计算方法各有优缺点<sup>[35]</sup>,对于城市内涝风险评估,未来应充分考虑人为主观性和数据客观性的特点,改善单一赋权方法中由于主客观因素而导致的误差问题,提高评估可靠性。对于不同城市特征,内涝风险区划确定方法的选择也不同,未来需要进一步探究风险区划与指标体系的内在联系,更准确地表达城市内涝风险。更重要的是,目前我国城市内涝风险图编制尚无统一的规范要求。前述《导则》更偏向流域尺度的洪水分析,并未对城市内涝分析和风险图绘制的特殊性进行细致规定。据了解,目前结合系统化全域推进海绵城市示范城市建设,一些地方城市启动了内涝风险图编制规范性技术文件编制工作,相信



这将会是在内涝风险图编制工作规范化和标准化道路迈出的坚实一步。

#### 5.4 有效支撑应急管理并拓展公众参与途径

城市内涝风险图编制的初衷之一就是为城市应急管理工作提供可靠的决策工具。无论是反映内涝灾害危险程度的基本内涝风险图还是特定应用途径的专题内涝风险图,都可为城市内涝潜在风险预判、内涝应急管理预案制定、内涝救灾抢险应对等工作提供依据。城市内涝风险图另一个重要受众是城市居民,内涝风险图是公众获取内涝发生时应急避险、疏散通道信息的重要渠道,以便居民及时采取避险自救和紧急呼救,保障自身安全。2022年北京编制了城市积水内涝风险地图,并采用多种方式向公众发布,值得其他城市借鉴。城市内涝风险评估和内涝风险图的公众参与并非单向过程,而是一种全过程的互动。应从内涝风险图编制之初,通过公众参与最大程度获取公众所了解的评估区域历史内涝积水事件和影响等信息,并在内涝风险图编制过程中通过多种媒体及时更新阶段性评估结果,以公众征求意见形式获取公众对内涝风险程度评估结果的直观反馈,利于对内涝评估结果及时修正和校核。这种全过程的参与,有助于提高公众对内涝风险的了解和认识,提升公众防灾减灾意识,强化公众参与城市管理责任感,也更为有效保证内涝风险图编制的实用性。

## 6 结 语

本文梳理了国内外城市洪涝风险图研究和实践现状,提出了我国城市内涝风险图的核心组成、编制思路以及编制中的重要需求,并对未来研究和实践中重点着力方向进行了展望。城市内涝风险图是在充分了解国内外在洪-涝理解差异和城市内涝孕灾环境和复杂成因的基础上,经历史数据分析和模型模拟分析,叠加多维度数据集合,全面、精准表达由城市内涝导致的综合风险和潜在损失等多层级信息的一套地图工具集。城市内涝风险图编制,需紧紧抓住城市下垫面产汇流特征及内涝形成和演进规律,还需以高质量基础数据、高效模型模拟和规范化科学编制流程为支撑,必然是一项极具挑战的复杂系统工程。但毫无疑问,一套高精度、科学规范编制的城市内涝风险图,必将为城市内涝治理工作打下坚实的基础。

#### 参考文献:

[ 1 ] BERNDTSSON R, BECKER P, PERSSON A, et al. Drivers of changing urban flood risk: a framework for action [ J ].

Journal of Environmental Management, 2019, 240: 47-56.

- [ 2 ] 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 ) )
- [ 3 ] 解以扬, 韩素芹, 由立宏, 等. 天津市暴雨内涝灾害风险分析 [ J ]. 气象科学, 2004 ( 3 ): 342-349. ( XIE Yiyang, HAN Suqin, YOU Lihong, et al. Risk analysis of urban rainfall waterlogging in Tianjin City [ J ]. Scientia Meteorologica Sinica, 2004 ( 3 ): 342-349. ( in Chinese ) )
- [ 4 ] KAZMIERCZAK A, CAVAN G. Surface water flooding risk to urban communities: analysis of vulnerability, hazard and exposure [ J ]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103: 185-197.
- [ 5 ] YIN Zhan'e, YIN Jie, XU Shiyuan, et al. Community-based scenario modelling and disaster risk assessment of urban rainstorm waterlogging [ J ]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21 ( 2 ): 274-284.
- [ 6 ] ABEBE Y, KABIR G, TESFAMARIAM S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Beliefnetwork model [ J ]. Journal of Cleaner Production, 2017, 174: 1629-1641.
- [ 7 ] DONG Boliang, XIA Junqiang, LI Qijie, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: case study of the " 7. 20 " flood event in Zhengzhou, China [ J ]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 80: 103205.
- [ 8 ] GENG Yanfen, ZHENG Xin, WANG Zhili, et al. Flood risk assessment in Quzhou City ( China ) using a coupled hydrodynamic model and fuzzy comprehensive evaluation ( FCE ) [ J ]. Natural Hazards, 2020, 100: 133-149.
- [ 9 ] MARTÍNEZ-GOMARIZ E, LOCATELLI L, GUERRERO M, et al. Socio-economic potential impacts due to urban pluvial floods in Badalona ( Spain ) in a context of climate change [ J ]. Water, 2019, 11 ( 12 ): 2658.
- [ 10 ] 赵玉杰, 王昊, 刘子龙, 等. 基于组合赋权的多情景内涝灾害风险评估 [ J ]. 水利水电技术 ( 中英文 ), 2022, 53 ( 5 ): 1-12. ( ZHAO Yujie, WANG Hao, LIU Zilong, et al. Multi-scenario waterlogging disaster risk assessment based on combination weighting [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53 ( 5 ): 1-12. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] 李帅杰, 谢映霞, 程晓陶. 城市洪水风险图编制研究: 以福州为例 [ J ]. 灾害学, 2015, 30 ( 1 ): 108-114. ( LI Shuaijie, XIE Yingxia, CHENG Xiaotao. Study on drawing of flood risk maps for cities: a case study on Fuzhou [ J ]. Journal of Catastrophology, 2015, 30 ( 1 ): 108-114. ( in Chinese ) )

- [12] 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))
- [13] MILLER J D, HUTCHINS M. The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: a review of the evidence concerning the United Kingdom [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017,12:345-362.
- [14] TANAKA T, KIYOHARA K, TACHIKAWA Y. Comparison of fluvial and pluvial flood risk curves in urban cities derived from a large ensemble climate simulation dataset: a case study in Nagoya, Japan [J]. Journal of Hydrology,2020,584:124706.
- [15] 聂蕊. 城市空间对洪涝灾害的影响、风险评估及减灾应对策略:以日本东京为例[J]. 城市规划学刊,2012(6):79-85. (NIE Rui. A study on effects of urban space on flood mitigation:the case of Tokyo[J]. Urban Planning Forum,2012(6):79-85. (in Chinese))
- [16] 张尚义,阳妍,邵知宇,等. 美国洪水风险地图编制技术分析及对我国的启示[J]. 中国给水排水,2017,33(21):124-128. (ZHANG Shangyi, YANG Yan, SHAO Zhiyu, et al. Analysis and inspiration of American flood risk mapping technology[J]. China Water & Wastewater, 2017,33(21):124-128. (in Chinese))
- [17] SPEIGHT L, CRANSTON M, WHITE C, et al. Operational and emerging capabilities for surface water flood forecasting[J]. Wires Water,2021,8:e1517.
- [18] 李娜,向立云,程晓陶. 国外洪水风险图制作比较及对我国洪水风险图制作的建议[J]. 水利发展研究,2005(6):28-32. (LI Na, XIANG Liyun, CHENG Xiaotao. Comparison of foreign flood risk map production and suggestions for the production of flood risk map in China [J]. Water Resources Development Research,2005(6):28-32. (in Chinese))
- [19] 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))
- [20] 王义成. 日本综合防洪减灾对策及洪水风险图制作[J]. 中国水利,2005(17):32-35. (WANG Yicheng. Comprehensive flood control measures and flood hazard mapping in Japan [J]. China Water Resources, 2005(17):32-35. (in Chinese))
- [21] 张念强,黄海雷,徐美,等. 英国洪水风险图编制应用及对我国的借鉴[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(3):62-67. (ZHANG Nianqiang, HUANG Hailei, XU Mei, et al. The application of flood risk mapping in the United Kingdom and its reference to China [J]. China Flood & Drought Management,2018,28(3):62-67. (in Chinese))
- [22] 张冬冬,严登华,王义成,等. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J]. 灾害学,2014,29(1):144-149. (ZHANG Dongdong, YAN Denghua, WANG Yicheng, et al. Research progress on risk assessment and integrated strategies for urban pluvial flooding [J]. Journal of Catastrophology,2014,29(1):144-149. (in Chinese))
- [23] PENG Jiaqi, ZHANG Jianmin. Urban flooding risk assessment based on GIS-game theory combination weight: a case study of Zhengzhou City [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction,2022,77:103080.
- [24] 廖如婷,徐宗学,叶陈雷,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝过程模拟:以北京市大红门排水区为例[J]. 水资源保护,2023,39(3):109-117. (LIAO Ruting, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Simulation of urban waterlogging processes based on SWMM and InfoWorks ICM model: a case study of Dahongmen drainage area in Beijing City [J]. Water Resources Protection,2023,39(3):109-117. (in Chinese))
- [25] 蔡甜,王佳. 排水模型和 GIS 模糊综合评价在内涝风险评估中的应用[J]. 中国给水排水,2021,37(11):117-124. (CAI Tian, WANG Jia. Application of drainage model and GIS fuzzy comprehensive evaluation in waterlogging risk assessment [J]. China Water & Wastewater,2021,37(11):117-124. (in Chinese))
- [26] 于磊,黄瑞晶,李宝,等. 基于层次分析法的北京城市副中心内涝风险评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(1):62-69. (YU Lei, HUANG Ruijing, LI Bao, et al. Risk assessment of waterlogging in Beijing Municipal Administrative Center by hierarchical analysis [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2022,58(1):62-69. (in Chinese))
- [27] 王林森,熊小兰,柯庆,等. 基于 GIS 空间分析建模技术的内涝风险评估[J]. 中国给水排水,2017,33(3):115-118. (WANG Linsen, XIONG Xiaolan, KE Qing, et al. GIS-based spatial analysis modeling techniques for urban flooding risk assessment [J]. China Water & Wastewater, 2017,33(3):115-118. (in Chinese))
- [28] HUANG Qingyu, WANG Jun, LI Mengya, et al. Modeling the influence of urbanization on urban pluvial flooding: a scenario-based case study in Shanghai, China [J]. Natural Hazards,2017,87:1035-1055.
- [29] SÖRENSEN J, MOBINI S. Pluvial, urban flood mechanisms and characteristics: assessment based on insurance claims [J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 51-67.

- [30] 张大伟,程晓陶,权锦. 欧洲洪水风险图编制经验的启迪[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2014,12(3): 264-269. (ZHANG Dawei, CHENG Xiaotao, QUAN Jin. Enlightenment of flood risk mapping in Europe [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12 (3): 264-269. (in Chinese))
- [31] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护,2023,39(1):93-100. (YAO Rui, YANG Quntao, ZHANG Shuliang. Review on vulnerability of urban rainstorm waterlogging disaster[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 93-100. (in Chinese))
- [32] 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))
- [33] 吴海春,黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32(5):11-16. (WU Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 11-16. (in Chinese))
- [34] 张念强,马建明,陆吉康,等. 基于多类模型耦合的城市洪水风险分析技术研究[J]. 水利水电技术,2013,44(7):125-128. (ZHANG Nianqiang, MA Jianming, LU Jikang, et al. Multi-models coupling based study on urban flood risk analysis technology [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44 (7): 125-128. (in Chinese))
- [35] QI Man, HUANG Huabing, LIU Lin, et al. An integrated approach for urban pluvial flood risk assessment at catchment level[J]. Water, 2022, 14(13): 2000.
- [36] 赵响皓,邵锦焯. 基于洪涝风险图的海绵城市建设思路探索:以广州市海珠区为例[J]. 广东水利水电,2022(2):47-51. (ZHAO Yunhao, SHAO Jinchao. Exploration of sponge city construction based on flood risk map: take Haizhu District of Guangzhou City as an example [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2022 (2): 47-51. (in Chinese))
- [37] MEMBELE G M, NAIDU M, MUTANGA O. Examining flood vulnerability mapping approaches in developing countries; a scoping review [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 69: 102766.
- [38] NKEKI F N, BELLO E I, AGBAJE I G. Flood risk mapping and urban infrastructural susceptibility assessment using a GIS and analytic hierarchical raster fusion approach in the Ona River Basin, Nigeria [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 77: 103097.
- [39] 陈伟珂,刘国义. 城市内涝灾害防治困境的突破:基于数据治理模式的研究[J]. 灾害学,2021,36(1):42-47. (CHEN Weike, LIU Guoyi. Breakthrough in the prevention and control of urban waterlogging disasters: a study based on data governance model [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(1): 42-47. (in Chinese))
- [40] 芮孝芳. 数据密集范式与水文学的未来[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):1-7. (RUI Xiaofang. Hydrology future and data-intensive paradigm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (6): 1-7. (in Chinese))
- [41] 潘鑫鑫,侯精明,陈光照,等. 基于 K 近邻和水动力模型的城市内涝快速预报[J]. 水资源保护,2023,39(3):91-100. (PAN Xinxin, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Rapid prediction of urban inundation based on the K-nearest neighbor method and the hydrodynamic model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 91-100. (in Chinese))
- [42] 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))
- [43] 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))
- [44] TENG J, JAKEMAN A J, VAZE J, et al. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 90: 201-216.

(收稿日期:2023-02-12 编辑:王芳)

