

# 城市内涝风险模拟与预警研究进展及展望

初亚奇<sup>1</sup>,王曦<sup>2</sup>,曹晓妍<sup>2</sup>,石铁矛<sup>2,3</sup>

(1. 沈阳大学建筑工程学院,辽宁 沈阳 110044;2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168;  
3. 沈阳建筑大学空间规划与设计研究院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**城市内涝风险模拟与预警是指导城市减灾工作的重要依据。基于对国内外相关研究的梳理,发现在城市内涝风险模拟中技术模型需要从二维平面模型转换为三维空间模型,研究关注点需要从暴雨预报、灾损评估转化到内涝风险预警层面。在未来发展趋势中,要建立“多源数据-精准分析-动态预警”的研究体系,进一步针对研究区域的地域化特征,提取并叠加多种影响因子,融合城市地理、水文、气象、交通、规划等学科多源数据进行耦合分析,在多尺度系统中利用空间三维模型进行多情景内涝风险模拟,实现内涝风险动态预警,为韧性城市发展提供新思路。

**关键词:**城市内涝;风险模拟;预警技术;韧性城市

**中图分类号:**TU992 **文献标志码:**A

由于全球气候突变与城镇化持续扩张,城市自然水文循环被严重破坏,城市水生态系统的自我调节能力急剧降低<sup>[1]</sup>,极端降雨频次和强度剧增,导致城市蓄排能力短板突显,城市内涝灾害频发<sup>[2]</sup>。《中国水旱灾害公报》公布的2011—2018年中国每年平均受到严重内涝影响城市已达到154个,直接经济损失约为每年GDP总数的0.35%<sup>[3]</sup>。2012年“7.21”北京暴雨、2014年“9.1”重庆暴雨以及2021年“7.20”郑州暴雨灾害皆造成了严重人员伤亡和经济损失<sup>[4-6]</sup>。2021年4月,国务院办公厅发布的《关于加强城市内涝治理的实施意见》(国办发[2021]11号)中强调<sup>[7]</sup>: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。因此,由暴雨引发的城市内涝已然成为制约城市化发展的重要因素之一,对

城市内涝风险进行模拟与预警将成为指导城市减灾工作的重要依据。

城市内涝风险模拟与动态预警是通过计算机技术建立城市降雨-径流模拟模型,对即将发生的内涝灾害及潜在风险向政府与公众进行实时预报警示和提前预判,尽可能减轻对人民生命财产安全和社会经济的负面影响。侯天宇等<sup>[8]</sup>通过智能物联网技术实时获取天津市积水监测数据,基于机器、神经网络模型和城市内涝风险等级划分理论,研发了天津市积水监测预警系统;周晔等<sup>[9]</sup>基于预报降雨校正模块和水文水动力模型,构建了城市内涝模拟预报模型,并以陕西省西咸新区部分区域为研究对象,通过3场实测检验了暴雨模型的预报性能;曹雪健等<sup>[10]</sup>基于综合观测的城市内涝风险预警系统,以北京市清河流域为例,融合降雨观测技术,采用水

文模型模拟,为交通系统提供实时积水深度数据并预测其风险等级。综上可见,城市内涝风险模拟与预警研究对城市减灾工作具有极其重要的作用。研究通过梳理城市内涝风险的相关概念,对国内外内涝风险模拟与预警技术进行评述和分析,总结研究中存在的问题,同时展望城市内涝风险模拟与预警的发展方向,为构建韧性城市提供理论支撑。

## 一、城市内涝风险影响因素

城市内涝是由于短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的现象<sup>[11]</sup>。城市内涝灾害包含致灾因子、承灾体与孕灾环境,三者之间相互作用和相互影响形成的灾害体系如图1所示,其共同作用导致城市内涝灾害风险具有复杂化、动态化以及多维化等明显特征。

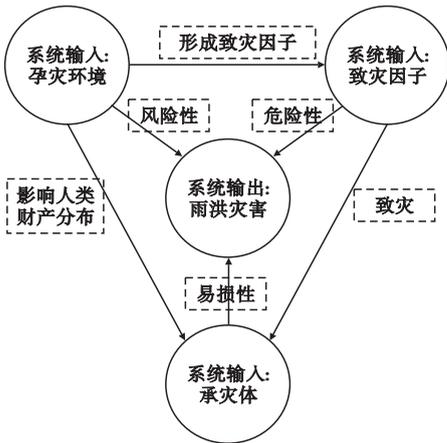


图1 内涝灾害系统及其要素结构

其中,致灾因子为引发灾害的主要因素,通常包括降雨强度、径流量和下渗率。①降雨强度在气象学角度通常是按照降水量12 h或24 h来划定并区分为小雨到特大暴雨共6个等级;②径流量是在指定时间段内的地表或地下河流水系某一断面的水体总量;③下渗率指单位面积下渗到土地中的水量。孕灾环境包括城市中的地形地貌、下垫面等一系列地表环境。承灾体通常指根据环境、用地等受损度确定洪涝灾害承受力。从城市内涝灾害产生机理角度出发,在灾害具有潜在风险阶段,快速城市化对孕灾环境造成了一定

的影响,一定程度地增加了内涝灾害的产生;在灾害产生阶段,致灾因子可能引发城市内涝;在灾害发展阶段,承灾体的较为脆弱导致灾害继续发展;内涝灾害是致灾因子和孕灾环境相互作用、风险叠加,并给承灾体带来消极影响的过程。中国内涝风险等级一般基于积水深度和积水时间进行划分<sup>[12]</sup>,每个等级对应不同的积水深度和时间,同时代表受灾害影响的程度,可用于道路交通、城市基础设施等预警。

## 二、国内外研究进展

### 1. 城市暴雨内涝风险模拟研究

城市内涝风险模拟是依据地理信息系统(Geologic Information System, GIS)对城市空间与水文过程进行分析模拟的技术方法<sup>[13]</sup>。目前,大量研究是基于GIS分析手段在研究区域进行空间数据提取、调整与收集等<sup>[14]</sup>,同时利用GIS系统数据与其他水文数字模型相结合,对不同降雨重现期的情景进行模拟,预测其不同情景的雨洪情况,再通过相关分析方法对区域风险进行评价与评判<sup>[15]</sup>,对城市内涝灾害防控有着积极作用。而相关的国内外研究主要集中于运用水文模型对城市降雨时空变化过程进行分析模拟,以求得其灾害风险变化状态<sup>[16-17]</sup>(见图2)。

城市水文模型正在向整体化、综合化、集成化发展,这一趋势将对数据的多元性、研究尺度的复杂性提供较强的技术支撑。目前常用的模型主要包括暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)、MIKE URBAN、Info-Works、MUSIC等<sup>[18-19]</sup>(见表1),其中,SWMM模型可结合GIS软件数据进行交互对接,多用于城市管网的水力学模拟<sup>[20]</sup>;MUSIC模型可基于DEM模型数据进行模拟,如施露等<sup>[21]</sup>采用MIKE FLOOD模型模拟了不同降雨条件下,传统开发模型和低影响开发模式下引发的降雨径流量的量化对比。梁志承等<sup>[22]</sup>提出了蚁群算法与SCS-CN水文模型耦合优化不透水面空间格局的方法,增加地面雨水入渗量,应用于景

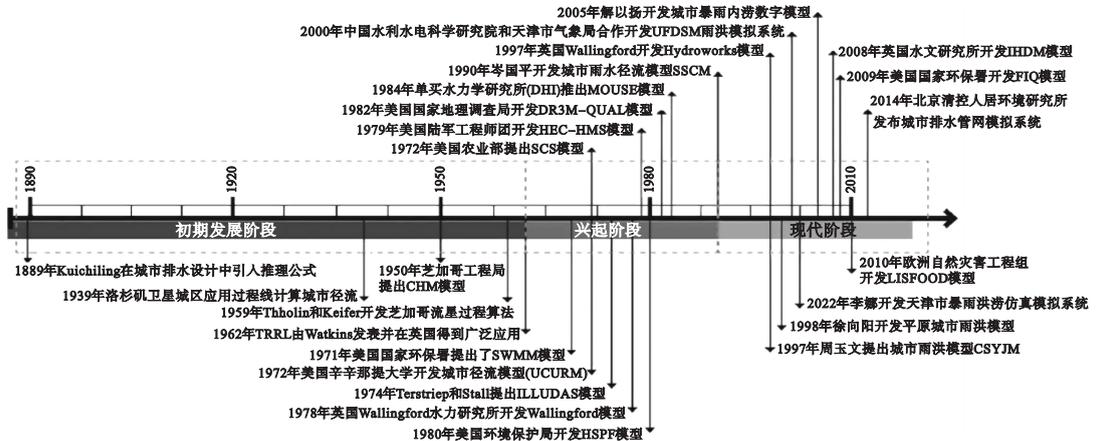


图2 水文水力学模型研究进展

表1 城市水文模型分类

开发时间	开发机构	名称	应用方向	优点和缺点
1971	美国国家环保署	SWMM	模拟城市降雨径流过程;动态降雨-径流水质水量预测和管理	应用最广泛的分布式水文模型,但地表汇流过程简略,无法描述具体的雨洪空间流动过程
1972	美国农业部水土保持局	SCS-CN	模拟流域水文过程中下垫面与降雨径流的关系	需求数据和内部模型结构简单,快速计算集水区径流,但需要根据不同地块进行参数校准
1976	荷兰 Delft 大学	Delft3D	降雨洪水、污染扩散过程模拟	较好适应曲面结构,操作便捷便于设计调试,稳定性高,但不适用于大尺度环境
1978	英国 Wallingford 水力学所	Info-Works	城市水文水力模拟等	有效模拟城市管道流及复杂的水文循环过程,但需要参数较多
1984	丹麦水力研究所	MOUSE	模拟城市径流、管道水流的 城市暴雨径流模型	可连续模拟暴雨事件,但更侧重于灰色基础设施
1994	美国农业部	SWAT	分布式流域水文模拟;非点源污染模拟等	分单元、分环节模拟,便于进行模型扩展,但更适用于水质污染分析
2000	中国水利水电科学研究院和天津市气象局	UFDSM	城市雨洪模拟	对中国雨洪条件适应性较强,但是应用检验相对少
2003	USEPA	SUSTAIN	城市暴雨处理及分析集成模型,针对低影响开发的水文、水力和水质评估	可评估 LID 和 BMP 设施下水量水质达标所需造价,对降雨过程模拟完整,但是不适用于城市大尺度
2006	DHI 公司	MIKE FLOOD	动态耦合的城市雨洪模型,地表水流域的三维模拟	可比较前后水文循环效果,但不适用于不规则边界地形

观格局指数对不透水面空间格局的分析,对不同重现期下 1 h 连续降雨事件进行模拟,对比景观格局优化前后的方案发现,优化后的方案在不同重现期下对径流系数均有一定程度的消减。目前,大量国外学者在研究从计算机领域引入大数据模型来处理复杂且海量的数据,探索运用大数据方法进行城市内涝模拟。Behzad 等<sup>[23]</sup>以墨尔本市东南地区作为研究区域,运用 MIKE FLOOD 模型进行内涝模拟,在高精度 DEM 数据基础之上对二维水动力进行了计算,准确、快速地模拟

该城市内涝过程。梅超等<sup>[24]</sup>将 SWMM 与地表淹没模块进行耦合,构建了研究区城市内涝淹没数值模型,模拟两种重现期情景下的内涝过程,对比不同重现期下高峰期与平峰期路网运行状态,发现两种重现期下高峰期道路平均通行速度比平峰期分别下降了 19.3% 和 37.4%。

根据对城市内涝风险模拟相关技术方法进行的梳理研究,可以看出研究正逐渐转向大数据综合分析空间信息、水文信息与环境信息,并将上述多源信息数据纳入城市空间

规划决策的技术过程。

## 2. 城市暴雨内涝风险预警研究

针对城市暴雨内涝风险预警的研究主要集中于减少因内涝造成的人员与财产损失、提升城市减灾能力等方面。美国国家环保署依托 GIS 平台开发了 SWMM 的预处理及后处理软件,辅助开展损失评估<sup>[25]</sup>。Jonkmans 等<sup>[26]</sup>使用水力模型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,不仅能估算直接经济损失,还可考量间接经济损失和人员伤亡;Bisht 等<sup>[27]</sup>通过综合环境脆弱性和应灾能力评估洪水风险,并利用空间显式贝叶斯网络模型对洪水风险进行了建模,该模型可用于评估和改进现有预警的效果;纪颖波等<sup>[28]</sup>以北京某大学为研究区域,构建了基于情境假设的城市暴雨灾害模拟模型,并通过引入径向基函数网络构建了警情分析模型,利用数理统计方法寻求致灾风险要素与警情指标之间的关系,从而建立了城市内涝风险预警指标体系,对提升城市内涝灾害应急减灾能力有一定的研究价值。

目前,国内外学者对城市内涝风险预警的研究基本是以暴雨预报的形式为主,关注点相对集中于内涝风险的灾损情况,对于城市内涝风险预警还没有达到一定的精准性与针对性。因此,在城市内涝风险预警方面,应从韧性城市理论角度出发,通过气象云图变化数据、交通车辆的扰动数据以及城市下垫面等多元数据进行耦合分析,对城市内涝风险区或风险点实行实时动态预警。

## 三、未来研究趋势展望

现阶段针对城市暴雨内涝风险的模拟研究虽然成果较多,但中国地域差异性较大,区域多元化特征明显,地域性内涝灾害影响因素研究仍显不足,没有充分结合不同地域的实际情况,存在基础数据缺失、测量数据误差、模拟软件精度不足以及计算误差等一系列问题,模拟过程中大多应用二维平面水文模型进行模拟。在未来研究中应运用三维空间水文分析模型,开发更为精准化的模型技术。

在城市暴雨内涝风险预警层面,现有研究主要集中于气象预报与灾损评估方面,多为单要素线性分析,具有一定的局限性,缺少多种要素影响下的城市内涝分析以及整体变化趋势分析。研究应从系统化、体系化角度切入,针对不同区域城市内涝灾害机理进行更为深入的研究,将气象数据、交通数据以及城市下垫面等多源数据与城市内涝紧密联系,利用多源数据进行定量分析,探寻多源数据耦合分析下的城市内涝风险规律,建立“实时监测、精准诊断、动态预警”技术路线,对韧性城市建设中将要或可能出现的内涝风险进行精准预判。

### 1. 基于城市空间三维模型的城市暴雨内涝风险模拟

基于城市遥感影像数据、气象数据、绿地系统、水系统、建筑物空间容量、道路系统以及排水基础设施等多源数据,将地质地貌、大气云图、城市空间格局、车辆扰动、汇水、排水等多种要素耦合叠加,对城市内涝风险区进行不同安全等级划分;在“区域流域-城市-城区”多尺度耦合体系中,利用 GIS 技术、遥感技术与水文模拟技术等多种技术,如结合 MIKE FLOOD、SWMM 等城市水文模型对不同重现期下的暴雨径流进行模拟,用于识别城市内涝风险区或内涝风险点;基于城市内涝多源数据融合,运用多种技术方法,提高数字模型的精确化程度,为城市内涝风险预警提供数据支撑。

### 2. 基于多源数据的城市内涝风险动态预警

在城市内涝风险预警方面,对城市内涝与多种影响因子之间的内在关联进行深入分析,并通过数字模型进行定量模拟,更为系统性地反映城市内涝的综合情况。除了提取一般影响因子以外,还需要进一步探寻城市内涝风险的特殊影响因子,主要包括:①通过气象云图变化数据预测城市空间降雨量,并利用专业仪器实时监测内涝点的水深与急流风险区;②通过交通系统中机动车辆行驶对道路积水的扰动,研究其扰动对降雨径流以及内涝加剧速率的影响;③通过地面建筑物的

空间容量与特征对雨水径流的影响,识别城市内涝风险区范围边界;④研究城市地表(绿地、透水土壤等)自然滞蓄能力对地表径流的减缓影响。通过将一般影响因子与特殊影响因子叠加综合,进行周期性变化分析,得到多情景模型推测结果。最终基于多源数据进行耦合系统分析与多情景模拟,运用城市地理、水文、气象、交通、规划等学科交叉的动态数据分析方法,精准识别城市内涝风险区,实现城市内涝风险实时动态预警。

#### 四、结 语

目前,针对城市暴雨内涝风险模拟与预警的研究已取得较多成果,但也存在一定的不足,从暴雨预报、灾损评估向内涝风险动态预警转变仍需要进行深入研究,对城市微气候变化对降雨量时空变化的影响、城市下垫面与内涝风险区的空间关系、机动车行驶过程对道路积水扰动后的径流变化等方面学术界尚无相关研究。在下一步研究中,将以“多源数据-精准分析-动态预警”为体系,针对研究区域的地域化特征,对城市内涝机理进行更为深入的分析,提取并叠加多种影响因子,基于地理、水文、气象、交通、规划等学科多源数据进行耦合分析,在多尺度系统中利用空间三维模型进行多情景模拟,实现城市内涝风险实时动态预警,最大程度提升城市的弹性空间,为韧性城市发展提供新思路。

#### 参考文献:

[1] 夏军,翟金良,占车生.我国水资源研究与发展的若干思考[J].地球科学进展,2011,26(9):905-915.

[2] 杨冬冬,曹磊,赵新,等.灰绿基础设施耦合的“海绵系统”示范基地构建:天津大学阅读体验舱景观规划设计[J].中国园林,2017,33(9):61-66.

[3] 孔锋.我国城市暴雨内涝灾害风险综合治理初探[J].中国减灾,2021(17):23-27.

[4] 张杰,史培军,杨静,等.北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响:以“7·21”暴雨为例[J].地理学报,2020,75(1):113-125.

[5] 李伟,高俊波,祁旭阳,等.基于耦合雨洪模型

的城市内涝数值模拟与风险分析[J].水利技术监督,2021(12):56-61.

[6] 陈文龙,杨芳,宋利祥,等.高密度城市暴雨洪涝防御对策:郑州“7·20”特大暴雨启示[J].中国水利,2021(15):18-20.

[7] 翟国方.韧性城市与雨洪韧性[J].西部人居环境学刊,2022,37(1):4.

[8] 侯天宇,梁好,霍凯,等.基于智能物联网技术的天津城市积水监测预警系统[J].气象研究与应用,2021,42(1):85-89.

[9] 周聂,侯精明,苏锋,等.基于陆气耦合的城市内涝高分辨率模拟预报方法[J].中国给水排水,2021,37(21):131-138.

[10] 曹雪健,戚友存,李梦迪,等.极端暴雨威胁下的城市内涝风险预警系统研究[J].大气科学,2022,46(4):953-964.

[11] 李瑶,胡潭高,潘骏,等.城市内涝灾害模拟与灾情风险评估研究进展[J].地理信息世界,2017,24(6):42-49.

[12] 邓金运,刘聪聪.不同土地利用类型下城市内涝风险及损失评估[J].安全与环境学报,2018,18(6):2293-2299.

[13] 林美霞.基于海绵城市建设的厦门城市暴雨内涝灾害风险研究[D].西安:西安科技大学,2017.

[14] 石铁矛,卜英杰,石羽.基于POI数据的沈阳城市生活服务设施空间格局研究[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2021,23(3):217-224.

[15] 汤鹏,王玮,张展,等.海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(1):15-20.

[16] 徐美,刘舒,孙杨,等.利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(8):1185-1194.

[17] ZHANG Q F, WU Z F, GUO G H, 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.

[18] LIN J Y, HE P, YANG L, et al. Predicting future urban waterlogging-prone areas by coupling the maximum entropy and FLUS model[J]. Sustainable cities and society, 2022, 80:103812.

- [19] CAMILLA T, NORAS, HARRI K, et al. Assessment of stormwater pollutant loads and source area contributions with storm water management model (SWMM) [J]. *Journal of environmental management*, 2019, 233: 719 – 727.
- [20] 王慧亮, 吴泽宁, 胡彩虹. 基于 GIS 与 SWMM 耦合的城市暴雨洪水淹没分析[J]. *人民黄河*, 2017, 39(8): 31 – 35.
- [21] 施露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(4): 350 – 357.
- [22] 梁志承, 赵耀龙, 付迎春. 耦合蚁群算法和 SCS-CN 水文模型的城市不透水面空间格局优化[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(10): 1315 – 1326.
- [23] BEHZAD J, PETERM B. Arapidurban flood inundation and damage assessment model [J]. *Journal of hydrology*, 2018, 564: 1085 – 1098.
- [24] 梅超, 陈宇枫, 刘家宏, 等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 31 – 38.
- [25] 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.
- [26] JONKMANS N, BOCKARJOVAM, KOK M, et al. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands [J]. *Ecological economics*, 2018, 66(1): 77 – 90.
- [27] BISHT D S, CHATTERJEE C, KALAKOTI S, et al. Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE urban: a case study [J]. *Natural hazards*, 2016, 84(2): 749 – 776.
- [28] 纪颖波, 钟炜, 姜腾腾, 等. 面向预案响应机制的城市内涝可控及推演机制研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(10): 8 – 11.

## Research Progress and Prospect of Urban Waterlogging Risk Simulation and Early Warning

CHU Yaqi<sup>1</sup>, WANG Xi<sup>2</sup>, CAO Xiaoyan<sup>2</sup>, SHI Tiemao<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. Institute of Spatial Planning and Design, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Urban waterlogging risk simulation and early warning is an important basis for guiding urban disaster reduction. Based on the review of relevant research at home and abroad, it is found that the technical model in urban waterlogging risk simulation needs to be transformed from two-dimensional plane model to three-dimensional space model, and the research focus needs to be transformed from rainstorm forecast and disaster loss assessment to waterlogging risk early warning. In the future development trend, it is necessary to establish a research system of “multi-source data-precision analysis-dynamic warning”. Further, according to the regional characteristics of the study area, various influencing factors are extracted and superimposed, and multi-source data of urban geography, hydrology, meteorology, transportation, planning and other disciplines are integrated for coupling analysis. In the multi-scale system, the spatial three-dimensional model is used to simulate the multi-scenario waterlogging risk, realize the dynamic early warning of waterlogging risk, and provide new ideas for the development of resilient cities.

**Key words:** urban waterlogging; risk simulation; early warning technology; resilient cities

(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)