

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.06.024

城市雨洪管理与系统应对研究进展

李静思¹, 周伟¹, 王添²

(1. 陕西省水利水电勘察设计研究院, 陕西 西安 710005;

2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对气候变化与城市化的快速发展改变了城市降水径流空间分布格局,增加了城市内涝灾害风险,以及目前机理研究深度与应用研究广度存在的问题,从雨洪形成过程系统剖析城市地表、管网产汇流机制与内涝成因,总结城市雨洪管理的工程措施与非工程措施,讨论城市洪涝预报、预警、预演、预案的发展与应用现状。分析结果表明,未来应更深入研究城市产汇流机理及其响应机制,开展考虑城市立体空间的水动力模拟研究,开发更为精细化的内涝模拟模型,发展工程措施与非工程措施相结合的防涝技术,集成预报预警调度为一体的城市雨洪管理智慧化平台,保障城市的水安全。可为深化城市雨洪形成机理的科学认识及采取有效管理手段提供参考。

关键词: 产汇流;内涝;雨洪管理;四预体系

中图分类号: TV11; TU992.03

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)06—0166—06

Research Progress on Urban Storm Flood Management and System Response

LI Jingsi¹, ZHOU Wei¹, WANG Tian²

(1. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710005, China;

2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Climate change and rapid urbanization has intensified the frequency of extreme rainstorm events, changed the spatial distribution pattern of urban precipitation and runoff, and increased the risk of urban inundation disasters. This work systematically analyzes the relationship between the runoff generation and concentration process of urban surface and pipe network and waterlogging from the of rain and flood formation process. The engineering and non-engineering measures are summarized during urban rain and flood management processes. The simulation algorithms are concluded for rain and flood processes. And then, the current development and application status of urban flood forecasting are discussed. The results could provide scientific understanding of urban rain and flood formation mechanism and valuable suggestions for effective management measures. Priorities for future research are proposed as well as weak links existing in the current research which are as follows. Firstly, we should analyze the generation and concentration mechanism of urban surface and pipe network. More refined urban rainwater and flood management model system should be further develop considering urban three-dimensional space. The waterlogging prevention technology also need to research combining engineering and non-engineering measures. Finally, the intelligent urban rainwater and flood management platform should be built integrating forecasting, early warning and dispatching, so as to ensure the water safety of the city.

Keywords: runoff generation and concentration; waterlogging; rain and flood management; forecast along with early warning and rehearsal plan

收稿日期:2023-08-16

修稿日期:2023-09-21

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2022JQ-509)

作者简介:李静思(1990—),女,博士,工程师,主要从事海绵城市及水循环等方面的工作。E-mail:jingsili1990@outlook.com

通讯作者:王添(1989—),男,博士,讲师,主要从事城市水文水动力模拟等方面的工作。E-mail:t.wang@xaut.edu.cn

在全球气候变暖和人类活动的双重影响下水循环产生了复杂变化,增加了极端水文事件发生的概率。IPCC 第六次评估报告指出气候变化正在加剧水循环,带来更多的降雨和洪水^[1]。另一方面,城市不透水面积的增加与建筑格局的分布,改变了天然地表蓄滞条件,增加了降雨产汇流流量与速度,然而城市雨水管网的建设又未跟上城市发展的步伐,使得城市暴雨洪涝问题日益增多,暴雨洪水冲刷使得地表累积的大量污染物汇入城市管网与河流,对城市水环境造成严重威胁。当前城市面临严重的洪涝灾害、水资源短缺、水环境污染和水生态退化等问题,这在一定程度上影响了国家的中长期发展战略。因此,了解城市地表产汇流过程、分析城市洪涝灾害内因与影响、管理城市雨洪是城市水文学的研究重点^[2-4]。

目前,对于城市内涝的防治主要有工程措施和非工程措施。工程措施主要包括源头减排工程、过程控制工程和末端排放工程。非工程措施主要包括四预体系建设、排水系统设计、应急处置和防灾宣传等。工程措施与非工程措施的联合应用是雨洪管理的最优策略,其规划和设计均需要水文水力要素的指导。然而,城市受人类影响较大,水文过程较为复杂,全面监测城市水文过程,需要大量的人力、物力和财力^[5-7]。城市雨洪模型是城市内涝研究的重要手段,是城市防洪减灾的关键技术之一。基于水文与水动力的城市雨洪管理模型为科学指导海绵城市的建设与管理提供了基础。同时,随着计算机技术与算法的不断发展,GPU 并行加速与深度学习算法等提高了模型模拟精度与预测的能力。当前的雨洪管理模型对城市立交桥、下穿隧道等立体空间并未考虑,不能模拟其洪水演进过程;同时,城市雨洪模型只能在历史气象数据的基础上,对未来城市内涝进行模拟预测,不能实时、动态的进行预警预报,不利于城市雨洪管理和灾害处理。因此,研究突发性极端暴雨洪水形成机理,以城市产汇流模型为基础、以精细化场景为依托、以信息化技术为手段构建雨洪预警预报系统是亟待解决的关键技术问题。

在查阅国内外相关文献的基础上,系统分析当前变化环境下城市内涝问题的发展趋势,总结城市雨洪管理的工程措施与非工程措施,阐述当前城市洪涝四预体系的构建与应用情况,并将讨论现有文献存在的问题和未来城市雨洪管理的研究方向,以期相关部门应对城市洪涝灾害提供科学支撑,从而实现城市水安全、水生态、水环境和水资源的健康

可持续发展。

1 城市雨洪形成过程与内涝成因研究进展

城镇化的快速发展,导致城市下垫面剧烈变化,直接影响地表产汇流规律和对径流的调节作用。由于地表径流受多种因素的共同影响,产汇流机理仍不清晰。

从地表产流机制来讲,城市地表由于覆盖大量的建筑和不透水路,具有超渗产流的特征。随着大量的公园绿地、透水铺装、植草沟、人工湿地等的建设,使得城市产流同时具有超渗产流和蓄满产流的特征。关彦斌^[8]通过采用理论计算与试验分析对透水沥青路面产流机制进行了研究,结果表明整个降雨过程的产流模式受降雨强度、透水路饱和和水力传导度和瞬时水力传导度的影响表现不同;下垫面条件的改变对产流量也具有较大影响,Anni 等^[9]采用 MIKE URBAN 模拟了阿拉巴马校园下垫面有/无绿色集水设施两种情况,结果发现在相同降水条件下,有绿色集水设施的地表产流量明显小于无绿色设施的地表;Olivera 等^[10]研究发现,城市化是 White Oak Bayou 流域径流增加的主要原因。由于城市下垫面空间布局的差异性,确定城市地区不同产流模式的空间分布和其主导类型存在很大困难。

城市雨水汇流包括地表和地下管网汇流,与天然汇流过程相比,城市不透水建筑与空间分布格局,导致城市汇流路径复杂,汇流速度较快。因此,对于新建城市或场地开发,考虑汇流路径对径流的削减效果是当下研究的热点。黄涛等^[11]采用 SWMM 模型模拟了考虑汇流路径和不考虑汇流路径两种条件下场地的径流量,结果发现考虑汇流路径的场地设计可以有效削减径流;部分学者^[12-13]研究分析了雨水断接对径流控制的效果,雨水断接也是通过改变汇流路径的方式达到削减径流的目的。

暴雨是城市内涝发生的驱动要素,而下垫面土地利用与空间格局变化及城市排水管网排水能力不足是导致城市内涝的直接原因。全球气候变暖及不确定性变化,增加了极端暴雨事件发生的频次和强度;排水设施能力不足、管道淤积、雨污合流等问题,造成在极端暴雨和短时强降水条件下,无法满足排涝需求,造成管网出现大量的溢流点^[14-15]。土地利用方面,城市住宅、商业、交通等不透水表面,减少了雨水入渗,降低了城区蓄水能力,导致城市水循环过

程加快,水循环各要素比例失调;城市土地利用空间分布格局对城市内涝的产生也具有重要影响,吴健生等^[16]研究表明城市建设用地斑块的聚集度、优势度越高,区域的内涝程度越高。同时,城市下穿隧道、下凹式立交等低洼区域,降水可在短时间内形成积涝,又由于抽排泵站排水能力不足,造成严重内涝灾害。因此,明确城市内涝具体产生原因,有针对性地完善城市基础设施建设是降低城市内涝风险的主要途径。

2 城市雨洪管理发展现状

2.1 城市雨洪管理尺度研究

雨水的开放性与流动性使城市洪涝灾害的产生具有多尺度特征^[17],相应的城市雨洪管理也存在着不同空间尺度的控制措施。小尺度上通过分散式的海绵体措施即可调控汇水单元的径流和出流量;中尺度通过灰绿措施结合、管网渠系进行源头减排和过程控制,进而实现洪峰洪量的调节;大尺度则需要联合调蓄设施等控制性骨干工程,以及利用城市河湖水系的连通性进行流域尺度上的防洪排涝^[3]。

随着城市雨洪管理研究的深入,以流域为整体,系统化实施雨洪综合调蓄的管理措施明显优于现阶段各子流域分散管理的方式。王虹等^[18]的研究表明以流域为整体进行雨洪调蓄较之于子流域分散蓄滞方式可减少 24.7% 的滞蓄容积。然而,流域尺度的城市雨洪管理理念在我国尚处于起步阶段,雨洪管理仍然集中在行政片区。因此,对城市雨洪的管理应从分散式的部分城区管理模式过渡到整个流域和区域的尺度上,系统梳理自然与人工水系脉络,推进流域尺度上的综合管理方略,才能尽可能避免城市内涝现象的发生^[19-20]。

城市空间布局对城市雨洪管理也具有重要影响,城市下垫面不透水面积比例与分布差异性较大。有研究表明径流系数与不透水率呈显著的正相关关系^[21];近年来不透水面的空间分布对地表产汇流的影响逐渐引起人们的关注,李强等^[22]研究了点群式与行列式两种城市空间布局,发现点群式布局下垫面不透水面面积率高于行列式;而不透水面之间的空间组合关系以及与排水设施的连接关系直接影响了不透水面的有效性进而对产汇流产生较大影响^[23]。此外,城市微地形变化改变了城市水文的连续性,改变了地表汇流路径。梅超等^[21]系统总结了城市微地形对地表产汇流的影响,但是其影响机理尚不明确。然而,城市地表具有立体性、多样性、破

碎性、异质性及延展性等复杂特点,对地表产汇流的影响机理尚未完全明晰,目前仅限于物理实验和数值模拟研究。但城市横向与纵向的空间布局对地表产汇流具有较大影响这一结论得到普遍证实。因此,通过优化城市空间布局可以有效调控雨洪径流。

2.2 城市雨洪管理措施研究

为解决城市内涝和城市水环境恶化问题,20 世纪 70 年代初,美国提出了雨水场地蓄滞理念^[24]。经过一段时间的运行,雨水场地蓄滞措施并未起到预期效果。20 世纪 90 年代开始,部分国家开始进一步探索雨洪管理措施的理论 and 实践,其中 LID 是研究和应用最为广泛的城市雨洪管理措施之一,能够从源头控制径流产生,使径流总量和径流过程尽可能恢复到城市开发前的条件。LID 设施对径流总量、径流洪峰及污染物累积冲刷的影响和控制效果已有大量较为成熟的研究成果^[25-29]。

我国城市雨洪管理通过建设海绵城市来实现控制径流总量和径流污染的目的。海绵城市是基于低影响开发理念建设,并遵循“源头控制、过程调节、末端排放”的总体思路^[30],通过建设排水管网、透水铺装、雨水花园、下沉式绿地、城市内湖等灰绿蓝工程设施调节城市雨洪。目前我国已试点建设了一批海绵城市并对部分老城区进行了改造。Yang 等^[31]模拟了西咸新区海绵体建设前后径流过程的变化,结果表明径流总量、洪峰流量及径流系数均显著减小。吴连丰^[32]通过监测分析了深圳马銮湾试点区海绵城市建设效果,发现径流总量控制率高于规划目标,径流水质有所好转。然而,海绵城市的建设对中小降雨所产生的径流具有较好的调节作用,但对于短时强降水和暴雨的调控效果还需进一步验证。目前,在我国海绵城市试点的 30 个城市中,已有 19 个城市发生了不同程度的内涝。因此,加强和完善城市应对洪涝的能力需要因地制宜形成“源头减排、管网排放、蓄排并举,超标应急”的城市排水防涝工程体系。

城市雨洪管理除了通过建设灰绿蓝设施和改造排水管网的工程措施外,还可以运用多目标优化与联合调度、径流转移与径流分担等非工程措施^[33-34]。Eckart 等^[35]将 SWMM 模型与多目标优化算法耦合,以最小洪峰流量为目标,模拟了安大略省温莎市的地下管网在 3 场暴雨事件中的径流过程,发现径流峰值和总径流量分别减少了 13% 和 29%;李静思等^[36]从径流分担的角度提出了利用相邻汇水单元间的协同作用,减小区域径流总量。因此,城

市雨洪管理应依据产汇流机制,综合考虑工程措施和非工程措施的联合应用。

近年来,雨洪韧性城市理念逐渐引入到城市的防洪建设中^[37]。2020年国家“十四五规划”中强调提升城市防洪排涝能力,建设海绵城市、韧性城市。2021年《关于推动城乡建设绿色发展的意见》提出“实施海绵城市建设,完善城市防洪排涝体系,提高城市防灾减灾能力,增强城市韧性”。雨洪韧性城市强调了城市在灾时、灾中和灾后能够保持、恢复和调整自身内部结构,使其能够快速恢复和适应,并从多个维度综合应对雨洪灾害风险^[38]。因此,建设雨洪韧性城市是未来城市建设发展的指导方向。

3 城市洪涝预报-预警-预演-预案(FWPP)系统研究

城市洪涝防御与治理除了通过工程与非工程措施外,系统的响应尤为重要。城市洪涝预报(Forecast)、预警(early-warning)、预演(Preview)、预案(Plan)关键技术在于暴雨预测、水文监测、径流模拟、系统响应、预演预练。高精度的降雨监测预报是城市内涝预报预警的基础;完备的气象、水文、地表和地下监测网络系统是对城市降雨、排水、洪涝过程全方位监测的必要手段;构建雨洪实时预报模型是实现洪涝预警的基本途径;落地的预演预练是制定科学完备预案的有力支撑;精细化的应急预案是降低洪涝灾害损失、保障人民生命财产安全的关键。

目前降雨观测与预报的手段主要采用地面站点、气象雷达和微波遥感。然而由于城市下垫面空间分布格局差异较大,进而引发城市热岛效应、雨岛效应,造成降雨过程具有较大的时空变异性。同时,受雨量站点不足与分布不均,降雨观测范围局限,地面站点降水数据尚不能满足城市洪水预报的资料需求。随着天气雷达系统的研发与建设,新的测雨技术得到了应用^[39-40]。雷达测雨可对中小尺度的雷暴天气系统进行监测,并可以预测未来短期的降雨量^[41]。我国2000年开始投入到天气雷达网的研究,2012年自主研发的雷达测雨系统(PRS-11)在云南大理进行了测试,结果表明,其具有稳定性好、精度高和获取数据量大等优点^[42]。微波测雨是通过雨滴对微波信号产生的散射和吸收等衰减效应间接计算出降雨强度。通过依托通信基站资源,搭建降雨监测网络,采用交叉组网方式形成区块化网格,具有高时空分辨率的典型特征。目前微波测雨技术在江阴市水旱灾害防御中提供了精细化的降雨数据

支持^[43]。城市洪涝预报目前主要通过降水预测、下垫面条件解析、易涝点监测等作为输入和验证条件,采用水文水动力模型如,SWMM、MIKE URBAN、InfoWorks等模拟城市地表、地下和管网的产汇流过程。目前已有较多较为成熟的城市洪涝模拟模型,各模型偏重点不同、应用条件差异,因此需要结合具体问题具体选择。但现有模型并未考虑城市立体空间的雨洪过程模拟,仍需要进一步研究。

城市洪涝预警系统通过对降雨径流预报结合信息化平台来实现城市内涝的实时预警。在之前的研究中,可以发现基于水文、水动力学的精细化洪涝模型能够对城市水循环全过程模拟,进而获得地表内涝积水过程、范围、水深等信息。随着计算机、软件及通讯系统的快速发展,使得城市水管理逐渐智能化,对雨洪实时预报预警提供了技术支撑^[44-47]。当前应用较多的洪涝预警方式是通过建立暴雨-内涝情景库,利用情景匹配模式针对预报降雨发布城市内涝预警等级^[48]。随着物联网、大数据在城市雨洪预警中的应用,为预报提供了更加可靠、稳定的技术手段。Zeng等^[49]设计开发了基于Web技术的城市雨洪支持决策系统WEB-SWMM,并应用于我国某个城市,测试结果表明,WEB-SWMM能够稳定、快速、准确地为城市雨水实时管理提供计算服务。刘雄^[50]基于大数据技术设计了城市洪涝预警平台,并在平台内集成了物联网应用平台用于内涝点实时监测与预报预警。城市洪涝预警系统虽然在部分城市有所应用,但应用效果并不理想,依旧无法摆脱城市内涝的现状。一方面是由于降水的突发性造成预报的前置时间不足,无法第一时间采取行动;另一方面是模型计算的准确度并不稳定,仍需进一步提高。

洪涝灾害预防与逃生演练通过不同情景、突发事件,切实体会风险形势,并从中发现问题,进而构建全过程多情景模拟仿真的水利预演体系,为预案的制定提供支撑。预案是应急管理的基础,是降低城市洪涝灾害损失的关键。目前我国超过95%的城市已编制完成城市防洪应急预案,但从整体来看,存在着应急体系不完善且操作性不强等问题^[51]。从2012年北京“7.21”特大暴雨^[52]、2014年广州“5.22”特大暴雨^[53]、2016年武汉“7.6”大暴雨^[54]、2016年西安小寨“7.24”大暴雨^[55]以及2021年郑州“7.20”特大暴雨^[56]等由于暴雨和短时强降水引发的严重洪涝灾害中可以看出城市洪涝应急预案在面对暴雨和特大暴雨时暴露出来的不足,其几乎丧失了所有的操作性。这一方面是由于各地市对特大

洪涝灾害的处治经验认识不足、防范组织不力。但归根结底是预案机制体制不完善,应急预案没有可操作性和可行性,应急预案的编制没有针对具体城市提出具体策略,不具有实际指导意义。同时,对编制的应急预案,并未进行预演预练和不断修改完善更新,这也是目前我国绝大多数城市应急管理存在的共同问题。随着互联网和信息技术的不断发展,将 VR 技术引入到城市洪涝应急管理系统,是实现预演预练的有效措施之一。

4 结论与展望

城市内涝灾害给城市水安全、水生态、水环境和水资源健康发展带来危害,给市政管理部门带来困难,给人民生命财产安全带来威胁。城市雨洪形成原因、雨洪管理措施和雨洪应对系统研究对城市防灾减灾方面有重要意义,是实现城市可持续发展和水安全保障的前提。本文系统总结了城市雨洪研究的相关成果、存在问题,探讨了未来城市雨洪的研究方向,结论如下:

(1) 城市雨洪受极端降水事件和下垫面布局的影响,产汇流机理不清,未来应针对具体问题,采用物模试验和典型区监测分析城市产汇流内在机理。

(2) 城市雨洪量大、集中,通过建设 LID、大型深邃排蓄系统等工程措施与径流分担、优化城市空间布局等非工程措施相结合是管理与调蓄雨洪资源、实现雨洪资源化利用的有效手段,同时加强雨洪韧性城市建设是提高城市洪涝灾害处理能力的发展方向。

(3) 城市雨洪计算方法与模拟模型众多,进一步开发具有城市立体空间雨洪过程模块的模拟模型,并充分利用物联网、大数据等现代技术手段,结合信息化平台,实现雨洪预测、预报、预警、预案的精细化、自动化、可视化和智慧化。

参考文献:

- [1] Pörtner H O, Roberts D C, Tignor M, et al. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2022.
- [2] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605.
- [3] 张建云,王银堂,胡庆芳. 海绵城市建设有关问题讨论[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 793-799.
- [4] 严登华,王浩,张建云,等. 生态海绵智慧流域建设——从状态改变到能力提升[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 303-310.
- [5] 李静思,李山,李智录,等. 基于协同改造理念的城市雨洪削减效果模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 80-89.
- [6] 任南琪,张建云,王秀衡. 全域推进海绵城市建设,消除城市内涝,打造宜居环境[J]. 环境科学学报, 2020, 40(10): 3481-3483.
- [7] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 53-61.
- [8] 关彦斌. 大孔隙沥青路面的透水机理及结构设计研究[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
- [9] Afrin Hossain Anni, Sagy Cohen, Sarah Praskievicz S. Sensitivity of urban flood simulations to stormwater infrastructure and soil infiltration [J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: 125028.
- [10] Olivera F, Defee B B. Urbanization and its effect on runoff in the Whiteoak Bayou watershed, Texas [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 170-182.
- [11] 黄涛,王健龙,史德雯,等. 汇流路径对 SWMM 模型水量模拟结果的影响[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 170-175.
- [12] 宫永伟,宋瑞宁,戚海军,等. 雨水断接对城市雨洪控制的效果研究[J]. 给水排水, 2014, 40(1): 135-138.
- [13] 郭瀛莉,张守红,陈明秀,等. 北京西山砂壤土绿地雨水断接径流调控效应试验研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 111-119.
- [14] 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.
- [15] 郑宇,程香菊,王兆礼,等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 78-85.
- [16] 吴健生,张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究——以深圳市为例[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 444-456.
- [17] Daniell K A, Barreteau O. Water governance across competing scales: Coupling land and water management [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2367-2380.
- [18] 王虹,李昌志,程晓陶. 流域城市化进程中雨洪综合管理量化关系分析[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 271-279.
- [19] 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.
- [20] 危昱萍. “城市看海”频现海绵城市规划应回归问题导向[N]. 21世纪经济报道, 2016-08-19.
- [21] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市下垫面空间特征对地表产汇流过程的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 791-800.
- [22] 李强, 黄浩, 张鲸. 控制性详细规划约束下的城市不透水面研究: 以北京典型街区为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26(7): 1-6.
- [23] Hamilton B, Coops N C, Lokman K. Time series monitoring of impervious surfaces and runoff impacts in Metro Vancouver [J]. Science of the Total Environment, 2021, 760: 143873.
- [24] Tredway J C, Havlick D G. Assessing the potential of low-impact development techniques on runoff and streamflow in the Templeton Gap Watershed, Colorado [J]. Professional Geographer, 2017, 69(3): 372-382.
- [25] Sa'd Shannak. Assessment of low-impact development for managing aquatic ecosystem[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108235.
- [26] Maria Fernanda N'obrega dos Santos, Ademir Paceli Barbassa, Anaí Floriano Vasconcelos, et al. Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: Lifecycle assessment of low impact development practices[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126409.
- [27] Jiang Chunbo, Li Jiake, Lia Huaian, et al. Low-impact development facilities for stormwater runoff treatment: Field monitoring and assessment in Xi'an area, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124803.
- [28] Baeka Sang-Soo, Ligaraya Mayzonee, Pyoa Jongcheol, et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds [J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124886.
- [29] Song Jing, Yang Rui, Chang Zheng, et al. Adaptation as an indicator of measuring low-impact-development effectiveness in urban flooding risk mitigation[J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 133764.
- [30] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1009-1022.
- [31] Yang Yuanyuan, Li Jing, Huang Qiang, et al. Performance assessment of sponge city infrastructure on stormwater outflows using isochrone and SWMM models[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126151.
- [32] 吴连丰. 基于监测分析的海绵城市建设效果评价[J]. 给水排水, 2019, 45(12): 65-69.
- [33] 代普达. 当前海绵城市理论在实践中的互适性及操作性辨析[C]//规划60年: 成就与挑战—2016中国城市规划年会论文集(02 城市工程规划). 2016.
- [34] 代普达. 基于海绵城市建设的雨水排水许可制度及径流转移交易机制研究[C]//2017 城市发展与规划论文集, 2017.
- [35] Eckart Kyle, McPhee Zach, Bolisetti Tirupati. Multiobjective optimization of low impact development stormwater controls[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 564-576.
- [36] 李静思, 李山, 李智录, 等. 基于协同改造理念的都市雨洪削减效果模拟研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(4): 80-89.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Bernae A, Krajewski W F. Rainfall for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 357-366.
- [40] Krajewski W F, Smith J A. Radar hydrology: Rainfall estimation[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25: 1387-1394.
- [41] 糜佳伟, 田济扬, 薛海, 等. 雷达测雨及临近预报在中小流域水文视角下的应用评估[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10247-10254.
- [42] 杨春华, 冯联葵, 陶汝颂, 等. 雷达降雨观测精度分析与应用研究[J]. 人民长江, 2014, 45(11): 36-39.
- [43] 邹明忠, 陈转兰, 陈健, 等. 测雨技术创新及应用[J]. 中国水利, 2020(20): 81-83.
- [44] Nguyen K A, Stewart R A, Zhang H, et al. Re-engineering traditional urban water management practices with smart metering and informatics[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 101: 256-267.
- [45] Sharvelle S, Dozier A, Arabi M, et al. A geospatially-enabled web tool for urban water demand forecasting and assessment of alternative urban water management strategies[J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 97: 213-228.
- [46] Wu D, Wang H, Seidu R. Smart data driven quality prediction for urban water source management[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 107: 418-432.
- [47] Yuan Z G, Olsson G, Cardell-Oliver R, et al. Sweating the assets - the role of instrumentation, control and automation in urban water systems [J]. Water Research, 2019, 155: 381-402.
- [48] 徐美. 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.

(下转第189页)

- 110-115.
- [10] 白凤朋,杨中华,向爱农,等. 浅水数学模型在植被影响河道水流运动中的应用[J]. 水电能源科学,2019,37(5):53-56.
- [11] 槐文信,杨水草,杨中华,等. 基于水深平均模型的植被水流数值模拟[J]. 深圳大学学报(理工版),2012,29(1):56-60.
- [12] Liu X, Liu H, Liu Y. Theory and application of Lattice Boltzmann method [C]//International Conference on Chemical, Mechanical and Materials Engineering (CMME 2011), 2011:270-275.
- [13] Benzi R, Succi S, Vergassola M. The lattice boltzmann-equation theory and applications [J]. Physics Reports Review Section of Physics Letters, 1992, 222 (3): 145-197.
- [14] 彭碧涛. 对流扩散方程的格子 Boltzmann 方法研究[D]. 长沙:中南大学,2014:40-46.
- [15] 杜海川. 基于离散 Boltzmann 方法的复杂曲线边界污染物运输模型研究[D]. 成都:四川大学,2022:41-62.
- [16] Peng Yong, Du Haichuan, Wang Bo. A curved boundary treatment for discrete Boltzmann model of shallow water flows based on a partially saturated method[J]. Journal of Hydraulic Research, 2023, 61(3): 346-355.
- [17] 欧阳竞一. 植被分布对河道流场及污染物运输影响的数值模拟研究[D]. 成都:四川大学,2023:55-102.
- [18] Meng J, Gu X J, Emerson D R, et al. Discrete Boltzmann model of shallow water equations with polynomial equilibria[J]. International Journal of Modern Physics C, 2018, 29(9): 1850080.
- [19] 费云龙. 离散 Boltzmann 浅水模型的开发与验证[D]. 成都:四川大学,2020:9-17.
- [20] Zhou Jianguo. A lattice Boltzmann method for solute transport[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, 61(8): 848-863.
- [21] Wang H D, Cater J, Liu H F, et al. A lattice Boltzmann model for solute transport in open channel flow [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 419-426.
- [22] Peng Y, Zhou J G, Burrows R. Modelling solute transport in shallow water with the lattice Boltzmann method [J]. Computers & Fluids, 2011, 50(1): 181-188.
- [23] Bulat M, Biron P M, Lacey J R W, et al. A three-dimensional numerical model investigation of the impact of submerged macrophytes on flow dynamics in a large fluvial lake [J]. Freshwater Biology, 2019, 64 (9): 1627-1642.
- [24] Guan M, Liang Q. A two-dimensional hydro-morphological model for river hydraulics and morphology with vegetation [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 88: 10-21.

(上接第 171 页)

- [49] Zeng Z, Yuan X, Liang J, et al. Designing and implementing an SWMM-based web service framework to provide decision support for real-time urban stormwater management [J]. Environmental Modelling and Software, 2021, 135: 104887.
- [50] 刘雄. 大数据技术在城市洪涝灾害分析预警中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
- [51] 黄春豹. 论我国城市洪涝灾害应急管理——以广州市为例[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [52] 宋晓猛,张建云,贺瑞敏,等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展,2019,30(2):153-165.
- [53] 靳奎峰,巢惟志,陈虹杏,等. 双偏振天气雷达在灾害性降水估测中的应用——以广州“5.22”特大暴雨灾害为例[J]. 灾害学,2021,36(3):140-146.
- [54] 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.
- [55] 张雅斌,罗慧,赵荣,等. 西安致灾短时暴雨中尺度与动力指数特征[J]. 热带气象学报,2019,35(5):614-628.
- [56] 任宏昌,张恒德. 郑州 720 特大致洪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.