

城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展

张金良^{1,2}, 罗秋实^{1,2}, 王冰洁^{1,2}, 李荣容^{1,2}, 盖永岗^{1,2}, 陈翠霞^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要:从极端暴雨形成机制、城市洪涝致灾机理及风险评估、防灾减灾措施和应对极端暴雨的城市韧性4个方面对城市暴雨洪涝问题国内外研究进展进行了综述,指出研究中下垫面对强降水和产汇流过程的影响机制认识不清,以单灾种为研究对象的风险评估缺乏对各类灾害关系的厘定,应对极端暴雨的城市韧性研究多停留在理论探讨层面等问题,未来应重点研究城市极端暴雨预报预警能力提升技术、洪涝灾害形成及灾害链传导机制、洪涝灾害治理措施、可实施层面的城市韧性提升方法等。

关键词:极端暴雨;城市洪涝;致灾机理;防灾减灾

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)01-0006-10

Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters//ZHANG Jinliang^{1,2}, LUO Qiushi^{1,2}, WANG Bingjie^{1,2}, LI Rongrong^{1,2}, GE Yonggang^{1,2}, CHEN Cuixia^{1,2} (1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (under construction), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The research progresses of urban rainstorm-induced flooding in China and at abroad are reviewed from four aspects, including formation mechanism of extreme rainstorms, disaster-causing mechanism and risk assessment of urban flooding, disaster prevention and mitigation measures, and urban resilience in response to extreme rainstorms. Some problems existing in the present research are put forward, including the unawareness of the influence mechanism of underlying surface on heavy rainfall and runoff generation and confluence process, lacks of the definition of the relationship between various disasters in the risk assessment with single disasters as the research object, and the study of urban resilience in response to extreme rainstorms being mostly confined to the theoretical exploration. It is pointed out that research in the future should focus on improving the technology of urban extreme rainstorm forecasting and early warning, flood disaster formation and disaster chain transmission mechanism, flood disaster management countermeasures, and implementable urban resilience enhancement method.

Key words: extreme rainstorm; urban flooding; disaster-causing mechanism; disaster prevention and mitigation

受城市化进程加快及全球气候变化的影响,全球水循环过程极端气象事件总体呈现增多增强的趋势,由极端暴雨引起的城市洪涝问题日趋严重,多灾并发特征十分明显^[1-3];我国大部分地区受季风气候控制,降雨集中,加之改革开放后城市化的快速推进,导致暴雨洪涝灾害在各大城市频繁发生,且受灾城市数量、规模、经济损失程度和人员死伤等均呈显著上升的态势^[4-5]。据不完全统计,2000年以来,我国70%的城市发生过严重的洪涝灾害,33%的大城市发生过严重的洪涝灾害,例如,从2021年7月17日

开始持续近一周的河南特大暴雨过程,造成全省因灾死亡失踪398人,直接经济损失1200.6亿元^[6]。

随着发生频次和灾损程度的显著增加,城市洪涝灾害已成为制约我国经济社会发展的重要顽疾,也成为防灾减灾领域的研究热点。本文针对近年来突发、频发、多发的极端暴雨诱发的城市洪涝灾害问题,从极端暴雨形成机制、城市洪涝致灾机理及风险评估、防灾减灾措施和应对极端暴雨的城市韧性4个方面总结阐述国内外对城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策的研究现状,进一步提出研究展望,以期

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3080300);中国保护黄河基金项目(2021YF013)

作者简介:张金良(1963—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水利水电工程设计研究。E-mail:jlzhangyrec@126.com

通信作者:罗秋实(1980—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:18655093@qq.com

为极端暴雨洪涝灾害风险识别、城市韧性评估及综合防治提供参考。

1 研究综述

1.1 城市极端暴雨形成机制

1.1.1 暴雨形成的物理条件

暴雨形成的过程相当复杂,主要物理条件包括充足的水汽、强盛而持久的气流上升运动和不稳定的大气层结构^[7-11]。各种尺度的天气系统和下垫面特别是有利的地形组合可产生较大的暴雨,以中国为例,由于地域辽阔,不同区域常出现不同类型的暴雨,如江淮暴雨、华南前汛期暴雨、东北暴雨、西南暴雨、华北暴雨等。高守亭等^[9,12]回顾并总结了我国几个主要区域暴雨形成机理的研究进展,认为江淮暴雨的形成与对称不稳定、涡度场的变化及 β 中尺度对流线关系极大;华南地区位于副热带高压的西北缘,低空季风气流向北输送过程中,地形抬升、海陆差异及不均匀加热等多种因素造成中小尺度辐合、切变及对流系统活动频繁,形成华南前汛期暴雨天气^[13];东北暴雨的形成主要是由于东北冷涡背景下,干冷空气入侵促进了暴雨区内的不稳定,促使垂直运动发展^[9,14-16],此外,气旋和切变也可能引发东北地区暴雨;导致西南地区暴雨最重要的天气系统是西南低涡,西南低涡造成的暴雨强度、频数和范围仅次于台风,是我国位居第二的暴雨灾害系统^[17-20];对华北地区而言,因喇叭口地形、迎风坡地形强迫增强风速辐合^[21-25],强降水常出现在华北平原与四周山区的过渡地带^[26-27],同时,华北暴雨的重要特征之一是中、低纬度天气系统相互作用^[12,27-30]。

1.1.2 全球变暖对城市暴雨特性的影响

在全球变暖及城镇化进程加快的共同影响下,我国极端强降水事件整体增多增强。全球变暖一方面加快了水文循环过程,增加了海洋和陆地表面的蒸发,另一方面增强了大气持水能力。全球气温每上升1℃,大气中的水汽含量增加约7%,潮湿和温暖的大气不稳定性增强,使极端强降水发生的可能性增大^[1]。当地面露点温度达到26℃时,大气中可降水量在60mm以上将有利于极端短时强降水的出现^[31-32]。

1.1.3 城镇化对城市暴雨特性的影响

城镇化对城市暴雨特性的影响主要包括热岛效应、凝结核增强效应、微地形屏障效应3个方面。热岛效应指城市中心比郊区温度高的现象,温度升高促进极端降水,热岛效应的热扰动促进对流,进而形成和增强局地极端降水;凝结核增强效应指城市空

气中增加的污染物粒子提供了充足的水汽凝结核,增加了城区的降雨概率和强度;微地形屏障效应指暖湿空气在运动过程中,遇到高楼大厦群,有一定地形爬升作用,暖湿空气上升冷却,增加了降雨的可能性^[1,33]。

1.2 城市洪涝致灾机理及风险评估

城市洪涝致灾机理与灾害风险评估是统筹城市防洪与排涝,系统提升城市洪涝灾害应对能力的重要依据^[5]。决定城市暴雨洪涝灾害发生与否的关键是致灾因子危险性、孕灾环境稳定性和承灾体脆弱性^[34]。暴雨作为致灾因子,是导致城市洪涝灾害的直接原因,其强度和时空分布直接关系到城市洪涝灾害发生的概率、受灾程度及灾害分布^[35]。受城市化影响,洪涝灾害孕灾环境明显改变,大范围的基础设施建设导致市区不透水面积比例迅速提高,城市河道和低洼地被填平或被改造;城区雨水汇集速度加快,河道缩窄,行洪断面减小,城区蓄水能力严重降低,排水能力下降,进排速度不成比例加剧了城市洪涝的风险^[5,36]。承灾体作为致灾因子的作用对象,其脆弱性是指在一定社会政治、经济、文化背景下,区域容易受到伤害或损伤的程度大小。城市化发展改变了原始的河湖水系格局与水系连通功能,亦改变了地表水和地下水的转化路径,使众多天然水循环转变为人工水循环,且城市排水管网覆盖率、设施排涝能力偏低,这些因素都加剧了城市排水承灾体的脆弱性^[5,37];城市洪涝灾害一旦发生,暴露在洪水中的行人、道路、建筑物等承灾体极易受到威胁,造成人员伤亡、积水断路、停水停电及经济损失等^[38-39],甚至可能导致城市应急指挥系统和通讯、电力、医疗等基础保障系统等彻底瘫痪。

风险评估亦可称为风险区划,指通过比较风险分析结果与预先设定的风险准则或阈值,或通过比较各种风险的分析结果,确定风险等级,绘制出直观可靠的风险区划图。风险区划图可真实、客观地反映洪涝风险空间分布的特征和规律,是风险管理的基础,也是防灾减灾决策的技术支持^[40-41]。城市洪涝风险评估中的主要框架有危险性-暴露性-脆弱性(H-E-V)^[42]、危险性-暴露性-脆弱性-防灾减灾能力(H-E-V-R)、危险性-脆弱性(H-V)^[43]。评估的方法主要有4种:历史灾情评估法、遥感和GIS耦合法、指标体系评估法和情景模拟评估法^[2,5,41-42,44-45]。历史灾情评估法一般基于历史记载的暴雨洪涝灾害强度数据和损失数据,利用数理统计方法对城市受灾情况进行统计分析和评估。遥感和GIS耦合法指利用暴雨洪涝期间淹没范围、淹没历时、承灾体数量等遥感影像数据,耦合GIS强大的空间数据管理、空间

数据分析等功能,结合地面高程数据分析获取研究区域内的淹没水深等,评估洪涝灾害风险^[46]。指标体系评估法是从致灾因子、孕灾环境和承灾体等要素出发,识别影响因子,划分指标权重,对城市洪涝灾害进行风险评估。情景模拟评估法主要是指利用数值模型模拟多种涉及自然和社会变化情景下的洪涝过程,评估洪涝灾害风险,数值模型包括水动力学模型、水文水动力学模型等,该方法具有一定的物理机制,且能够直观、真实地根据计算出的水文水动力学要素划分风险范围,因此,情景模拟评估法是洪涝灾害风险研究方法的发展趋势^[5,41,47-49]。值得说明的是,基于动力学机制的洪涝模型一般计算量较大,难以满足实时预警要求,实际应用中除了利用 CPU 集群、GPU 并行等各种加速技术外,还需提前计算各种典型情景形成方案库,并根据降雨信息匹配相似的方案。表 1 总结了不同城市洪涝风险评估方法的优缺点及适用条件。

1.3 城市洪涝防灾减灾措施研究

城市洪涝防灾减灾需要将工程措施和非工程措施相结合^[50-51]。

a. 工程措施。目前,我国北京、昆明、济南等城市确定了“上蓄、中疏、下泄”的城市防洪排涝整体格局,包括大坝、水库、堤防、防洪墙、河道整治、疏浚、分洪道、蓄滞洪区、水土保持、雨洪就地消化等洪水调控措施和城市排水系统^[52],可实施闸、泵、堰、库等水利工程联合调度,最大程度缓解城区内涝问题。此外,通过加强排水管网建设,提升排涝能力,避免积水;通过增加城市广场和绿地占地面积,降低广场和绿地地势,有效减小排水管网的排水压力;通过修建地下蓄洪池和楼顶蓄水池,临时蓄滞部分降雨^[36]。

b. 非工程措施。城市洪涝防灾减灾非工程措施可归结为 6 类:洪泛区管理、洪水风险管理、洪水预报预警、防洪减灾政策与法规、防洪预案与抗洪抢

险、城市水文学基础研究^[53-54]。洪泛区管理主要通过严格限制洪泛区开发利用,实现洪泛区自然属性与社会属性和谐统一,减少城市洪涝损失;洪水风险管理最主要的实现手段是推行城市洪水保险制度和编制城市洪水风险图;洪水预报预警作为一种重要的非工程措施,主要通过预报做出实时有效的决策,制定防洪预案,当发生超标洪水时发布洪水警报;防洪减灾政策与法规是通过制定的一系列政策与法规,约束和制裁不利于防洪减灾的经济社会活动;防洪预案与抗洪抢险是为了确保城市河道行洪安全,防止洪水泛滥成灾、防洪工程体系遭到破坏采取的洪水应急措施^[54];城市水文学基础研究通过对城市化的水文过程及其伴生效应识别与描述和对城市水文过程机理解析与模拟计算^[55],为防洪规划、防洪预案的制订及抗洪抢险提供理论依据和资料支持。

1.4 应对极端暴雨洪涝灾害的城市韧性研究

1.4.1 城市韧性内涵

传统强调治理和抵御的防灾规划方法发挥了重要作用,但其主要关注灾害本身,忽略了灾害与城市之间的互动关系,相对被动且无法满足防灾减灾需求。人类不可能构建一个完全没有灾害的城市,让城市更具韧性是城市可持续发展、高质量发展的必然要求。当灾害发生的时候,韧性城市能保证其功能正常运转,拥有灾后迅速恢复原状的能力,并通过适应更好地应对未来的灾害风险^[56-59]。

1.4.2 城市韧性研究焦点

城市韧性研究的焦点是解决气候变化和自然灾害引起的扰动问题,而极端暴雨洪涝灾害是不确定性扰动的一种形式。目前,研究的主要内容是韧性理论、韧性评估、提升策略 3 个方面。城市韧性理论研究经历了从单一系统简单框架研究到多系统复杂框架研究的转变,韧性主体从生态系统、工程系统逐渐扩展,增加了社会、经济、政治、文化等内容。在城市韧性评估方面,目前主要集中于评价方法和评价

表 1 不同城市洪涝风险评估方法的优缺点及适用条件

Table 1 Advantages and disadvantages of different urban flood risk assessment methods and applicable conditions			
方法	优点	缺点	适用条件
历史灾情评估法	不需要精细的地理数据支撑,计算快捷	对历史洪涝灾情数据的完整性和准确性要求较高;不能体现城市洪涝风险的空间差异性;对历史灾害强度数据和历史灾害损失数据难以进行空间上的匹配	一般用于防灾减灾工程设计和灾后损失评价
遥感和 GIS 耦合法	在时效性和评估范围上具有很大优势	受制于遥感影像的分辨率和影像解译的准确率;不能反映淹没水深和地表流速等关键信息	城市及以上尺度
指标体系评估法	建模与计算简便、数据易于获取	指标的选取受限于数据的可取性;对指标数据精度的要求较高,易出现以点代面的现象;不适合在尺度较小区域开展;不能完全反映灾害风险的空间分布特征	城市及以上尺度
情景模拟评估法	能直观、精确地给出城市洪涝灾害风险的空间分布特征;可实现灾害风险的动态评估	对区域地理背景资料和排水系统资料要求较高;对构建区域水文水动力模型的精度有一定要求,工作量大	适宜中、小尺度灾害评估

指标体系研究两个方面。评价方法主要包括综合指数法、函数模型法、阈值法、社会网络模型法、遥感模型评价等方法,不同的方法在评估分析城市洪涝韧性时有利有弊,具体应用时应根据具体城市或评价目标选择适当的方法^[58]。在评价指标体系方面,国外很多研究机构都已建立了城市韧性评估指标体系^[60],国内学者也分别从不同角度构建了洪涝韧性评估指标体系,如赵庆风^[59]从社会、经济、基础设施以及环境4个方面构建了河南省城市内涝灾害韧性评估体系;张庆霞^[61]从城市社会承灾力、城市资源禀赋、城市资源配置的角度构建了洪涝社会韧性分层指标体系;刘常瑜等^[62]从压力、状态、响应3方面构建了洪涝灾害后恢复力评价指标体系。在城市韧性提升策略研究方面,国外相继发布了众多关于韧性提升的指南、宣言、行动框架,在一些遭受特定灾害的地区或沿海地区开展了实践,取得了良好的效果;国内一些学者从应对城市单一灾害的角度出发,提出了较为具体的空间形态韧性设计策略^[57,63]。

2 存在的问题与研究展望

近年来,虽然城市洪涝防灾减灾成为灾害防治的重点研究领域且取得了诸多进展,但仍存在一些问题,值得深入研究和探讨。

2.1 城市极端暴雨预报预警及洪涝灾害形成机制

2.1.1 极端暴雨形成机制及预报预警研究

目前,我国在暴雨机理研究和预报预警方面已经取得了长足进步,但仍面临一些挑战。气象部门发布的预报预警主要是大范围的定性预测,其误差和精细化不足的问题在一定程度上影响了灾害的预警效果,究其原因,主要是对极端暴雨中尺度系统的精细结构和发展机理认识不够,对观测资料的质量控制、多源资料综合应用、数值模式动力框架和物理过程描述存在不足^[9]。针对以上问题,要着力提升灾害性天气精密监测和灾害性天气短时临近精准预报能力,增强雷达、卫星等多元观测资料应用及人工智能、大数据等新技术应用能力,提升高分辨率数值模式对短时临近预报的支撑能力,规范气象灾害预警信号业务。此外,应加强基于观测的极端暴雨中尺度系统理论研究和模式动力框架、物理过程、模式系统的开发和改进,同时加强资料同化理论技术及人工智能技术在大气科学领域的应用等,以期在我国极端暴雨形成机制及预报预警能力提升技术研究方面取得更大进步。以河南省典型的山前平原为例,该地区受北西南太行山、伏牛山、桐柏山等三面山区地形影响,由东部或东南部形成的水汽遇山地爬升,极端暴雨洪涝灾害发生的频次高,形成机制复

杂,灾害影响大^[64-67],如1975年8月驻马店、2016年7月新乡发生极端暴雨,2021年7月郑州发生特大暴雨事件。针对出现的极端暴雨洪涝灾害,应综合气象、遥感等多源数据,强化对海洋水汽向内陆长距离输送机制、山前平原极端暴雨形成机制及可能暴雨情景的研究。

2.1.2 复杂构筑物影响下城区产汇流机制研究

城市下垫面条件复杂,地下空间、立交桥等复杂构筑物结构改变了天然水文循环过程,如降水、蒸发、下渗和坡面汇流等^[68],且密集的人类活动加剧了水文过程和水动力过程的复杂性和不确定性。原有的植被覆盖和土壤被硬化路面逐渐取代,削弱了地表截留、蒸散发和下渗能力,区域不透水面积增大,导致城市区域地表产流量的增加。与此同时,城市地表糙率变小,使得地表汇流速度加快,流量增加,形成径流峰值高、峰现时间提前的洪水过程线^[5]。目前,城市复杂构筑物影响下产汇流过程的研究尚不够深入,对洪涝致灾的水动力学机理的认识还不够深刻,需要进一步通过量化不透水面空间特征,解析其对产汇流多过程 and 不同环节的影响,揭示城市复杂下垫面对产汇流过程的影响机理^[69],以为城市洪涝灾害防治提供科学依据。

2.1.3 城市洪涝灾害链传导机制研究

防范暴雨洪涝灾害迫切需要实时动态的风险评估^[40],目前暴雨洪涝灾害风险识别与评估技术研究主要以单灾种为研究对象,通过叠加单灾种风险评估判定综合风险等级。考虑到暴雨往往诱发一系列原生-次生-衍生灾害,呈现显著的“链式效应”,由此造成的损失也越来越大,而基于单灾种的综合风险评估缺乏对各类灾害关系的厘定,其结果往往偏离实际^[70]。以灾害链为核心对城市极端暴雨灾害进行风险识别与评估,才能全面、系统地把握城市重大灾害风险点。为此,需要立足于暴雨洪涝灾害发生的灾前、灾中、灾后全过程,从致灾机理出发,研究洪涝灾害发生的过程以及过程间的联系。借助遥感、全球定位系统和地理信息系统,运用水文水动力学模型开展水文气象耦合的暴雨洪涝动态模拟,精细刻画洪涝灾害及污染物迁移等伴生过程,并进一步通过科学描述城市洪涝灾害链传导机制及其对经济社会的潜在影响,实现暴雨洪涝灾害风险的综合动态评估,为提升实时防灾减灾能力和保障经济社会的持续发展提供有力支撑^[40,71]。

2.2 应对城市极端暴雨的防灾减灾措施

工程措施方面,目前我国市政的排水、除涝、防洪标准普遍偏低,防洪工程体系不健全。应强化河湖水系的综合治理和连通,提升调蓄能力和抽排能

力,系统化推进海绵城市建设,挖掘公园湖泊、下沉广场等雨洪处理空间,着力构建“源头减排、管网排放、蓄排并举、超标应急”的城市防洪除涝工程体系^[72-73]。此外,当遭遇极端暴雨洪水时,以土石坝为主要挡水建筑物的工程极易发生漫顶溃决,对城市居民生命财产安全威胁极大,因此,应对城市上游水库、塘堰等进行防溃加固改造。2021年7月河南特大暴雨事件中,郑州市郭家嘴水库漫坝、坝体冲毁已敲响了警钟,应着力解决土石坝漫顶易溃问题,尽快消除“头顶库”的安全威胁。

非工程措施方面,在加大防洪工程和城市防涝设施建设以应对标准内降雨的同时,我国还需要重视防洪减灾机构设置和提升防洪应急管理能力,扎实做好预报、预警、预演、预案工作,科学、有序、有效应对极端暴雨洪涝灾害。具体主要体现在以下方面:①迫切需要建设完善的现代城市暴雨洪涝全过程、全要素监测网,加强实时雨水情监测和分析研判,提供多源数据同化融合的城市洪涝全过程预报与致灾风险预警^[66];②加大城市洪涝实时计算机软硬件投入,构建具有物理机制的城市洪涝精细化模拟模型,以实现对城市降雨产汇流全过程模拟,提高预报预警的能力和水平^[74-76];③有针对性地开展防洪排涝综合演练,细化抢险措施,完善城市洪涝应急疏散机制,提高抢险措施精准化、专业化水平;④积极开展洪水保险模式及理论研究,推行城市洪水保险制度,帮助受灾地区和群众度过灾期,恢复灾后生活和生产,提高抵抗洪水灾害的能力,减轻政府财政负担^[51];⑤模拟不同降雨条件下,特别是超标准大暴雨的城市洪涝风险,预测、评估城市承灾能力,制定、完善预警指标和防汛管理应急响应预案,提高防灾减灾多部门综合协调能力和市民的防灾避灾意识^[77]。

2.3 应对极端暴雨洪涝灾害的城市韧性提升

2.3.1 城市韧性提升策略

面对超标暴雨的挑战,提升城市自身抗风险的能力,实现在风险中的快速恢复是减轻洪涝灾害影响的关键。我国对城市韧性研究起步较晚,更多停留在理论探讨层面,对具体规划策略的实效性和可操作性研究相对较少,对可实施层面的韧性提升策略、工程韧性提升技术及装备的研发和示范应用方面的认识还有待提升。同时,亟须构建符合应对极端暴雨洪涝灾害的城市韧性评估方法,基于评测结果摸清洪涝灾害防控薄弱环节,为提升城市韧性提供技术指引及建议。具体地,应逐步建立统一公认的理论框架,推动多要素、多目标、多层次的系统评价研究,基于统一的理论框架及综合性、可操作性等原则,

逐步完善韧性评价体系;加强城市韧性影响机理研究,在城市韧性的动态模拟、决策预警方面实现新突破;注重城市韧性的变化趋势预测与情景分析,在实证性研究基础上继续探索城市韧性的应用模式^[58]。

2.3.2 重新审视城市基础设施防洪排涝安全设计标准

除按照国家标准进行城市规划,建设完善的防洪排涝体系外,应强化城市地铁、住宅小区、大型办公楼、地下车库等各类建筑物防洪安全设计,避免洪涝诱发触电等次生灾害;应从确保人民群众生命安全的角度重新审视城市建设标准,由相关管理部门开展洪涝风险安全评价,采取相应措施提高城市规划建设应对洪涝的韧性,做到以低成本的规划建设换取高成本的防洪效益。当前城市大量的配电设施包括强电和弱电均布置在地下空间,一旦遭遇超标准洪水,地下空间进水,城市通讯、交通、应急指挥系统等将中断,甚至导致整个城市瘫痪,因此,重大基础设施建设应坚持底线思维,改变传统相对安全的建设理念,确保能够有效抵御各种极端风险^[78-79]。此外,城市基础设施建设需统筹考虑排水、除涝和防洪三类不同的防治标准,处理好这三类标准在城市洪涝防治中的协调和衔接问题,同时需根据城市的规模、地形、地理位置、经济发展状况以及洪涝水特性甄别选择,以最大限度实现人水和谐。

3 结 语

本文回顾了近年来国内外在极端暴雨形成机制、洪涝致灾机理及风险评估、城市洪涝防灾减灾措施研究和城市应对极端暴雨韧性等方面的研究进展,并针对当前城市极端暴雨洪涝灾害成因及防洪减灾对策研究中的问题进行了展望。在城市极端暴雨形成方面,需要利用多源气象资料开展中尺度地形和城市下垫面对强降水影响机制的研究,加强灾害性暴雨的短时临近预报预警相关技术研究。在城市灾害链形成机理及风险评估方面,需要进一步揭示城市复杂下垫面条件下的产汇流规律以及城市洪涝致灾的水动力学机理,立足于暴雨洪涝灾害发生发展的全过程,以灾害链为核心实现对城市极端暴雨洪涝灾害风险的综合动态评估。在城市洪涝治理方面,工程措施与非工程措施并举,不仅需要重新审视相关建设规范,科学合理地完善城市防洪排涝和排水标准,开展城市上游土石坝防溃加固研究,着力消除城市“头顶库”的安全威胁,确保有效抵御各种极端风险,还要坚持预报、预警、预演、预案,做到科学、有序、有效应对。在应对洪涝灾害的城市韧性研究方面,亟须构建符合应对极端暴雨洪涝灾害的城

市韧性评估方法,基于评测结果摸清洪涝灾害防控薄弱环节,为提升城市韧性提供技术支撑。

参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[2] 姚思敏. 城市暴雨灾害风险评估研究:以京津冀地区为例[D]. 北京:清华大学,2016.

[3] 李超超,程晓陶,申若竹,等. 城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J]. 灾害学,2019,34(2):57-62. (LI Chaochao,CHENG Xiaotao,SHEN Ruozhu,et al. New characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization [J]. Journal of Catastrophology,2019,34(2):57-62. (in Chinese))

[4] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报,2017,36(1):1-6. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,LIU Cuishan,et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(1):1-6. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R]. 北京:中华人民共和国应急管理部,2022.

[7] 孙继松. 短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. 暴雨灾害,2017,36(6):498-506. (SUN Jisong. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. Torrential Rain and Disasters,2017,36(6):498-506. (in Chinese))

[8] 田付友,郑永光,张涛,等. 我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J]. 暴雨灾害,2017,36(6):518-526. (TIAN Fuyou,ZHENG Yongguang,ZHANG Tao,et al. Characteristics of environmental parameters for multi-intensity short-duration heavy rainfalls over East China [J]. Torrential Rain and Disasters,2017,36(6):518-526. (in Chinese))

[9] 高守亭,周玉淑,冉令坤. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学,2018,42(4):833-846. (GAO Shouting,ZHOU Yushu,RAN Lingkun. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of

Atmospheric Sciences, 2018, 42 (4): 833-846. (in Chinese))

[10] 张芳,张芳华,张恒德,等. 长江中下游一次暖区极端致洪暴雨特征及天气学成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):16-24. (ZHANG Fang,ZHANG Fanghua,ZHANG Hengde,et al. Characteristics and synoptic causes of the extreme warm-region flood-causing rainfall over the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):16-24. (in Chinese))

[11] 于超,贺靛,张恒德,等. 北京市2018年“7·16”极端暴雨特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(4):42-49. (YU Chao, HE Liang, ZHANG Hengde,et al. Analysis on characteristics and causes of the extreme rainstorm on 16 July 2018 in Beijing City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(4):42-49. (in Chinese))

[12] 罗亚丽,孙继松,李英,等. 中国暴雨的科学和预报:改革开放40年研究成果[J]. 气象学报,2020,78(3):419-450. (LUO Yali,SUN Jisong,LI Ying,et al. Science and prediction of heavy rainfall over China: research progress since the reform and opening-up of the People’s Republic of China [J]. Acta Meteorologica Sinica,2020,78(3):419-450. (in Chinese))

[13] 赵玉春,王叶红. 近30年华南前汛期暴雨研究概述[J]. 暴雨灾害,2009,28(3):193-202. (ZHAO Yuchun,WANG Yehong. A review of studies on torrential rain during pre-summer flood season in South China since the 1980’s [J]. Torrential Rain and Disasters,2009,28(3):193-202. (in Chinese))

[14] 王东海,钟水新,刘英,等. 东北暴雨的研究[J]. 地球科学进展,2007,22(6):549-560. (WANG Donghai,ZHONG Shuixin,LIU Ying,et al. Advances in the study of rainstorm in northeast China [J]. Advances in Earth Science,2007,22(6):549-560. (in Chinese))

[15] WANG Donghai, YANG Shuai. An atmospheric dry intrusion parameter and its application [J]. Journal of Meteorological Research,2010,24(4):492-500.

[16] 钟水新,王东海,张人禾,等. 一次东北冷涡降水过程的结构特征与影响因子分析[J]. 高原气象,2011,30(4):951-960. (ZHONG Shuixin,WANG Donghai,ZHANG Renhe,et al. Analyses on the structure characteristic and formation mechanism of the rainstorm related to a cold vortex system over Northeast China [J]. Plateau Meteorology, 2011, 30 (4): 951-960. (in Chinese))

[17] 叶笃正,高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京:科学出版社,1979.

[18] 罗四维. 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究[M]. 北京:气象出版社,1992.

[19] 何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象,2012,38(2):

- 155-163. (HE Guangbi. Review of the southwest vortex research[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38 (2) : 155-163. (in Chinese))
- [20] WANG Hui, LUO Yali, JOU B J D. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: observational analysis[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119 (23) : 13206-13232.
- [21] 谌芸, 孙军, 徐珺, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) : 观测分析及思考 [J]. 气象, 2012, 38 (10) : 1255-1266. (CHEN Yun, SUN Jun, XU Jun, et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing, part I: observation and thinking [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38 (10) : 1255-1266. (in Chinese))
- [22] 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (二) : 极端性降水成因初探及思考 [J]. 气象, 2012, 38 (10) : 1267-1277. (SUN Jun, CHEN Yun, YANG Shunan, et al. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing, part II: preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38 (10) : 1267-1277. (in Chinese))
- [23] 孙军, 张福青. 中国日极端降水和趋势 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47 (12) : 1469-1482. (SUN Jun, ZHANG Fuqing. Daily extreme precipitation and trends over China [J]. Science China Earth Sciences, 2017, 47 (12) : 1469-1482. (in Chinese))
- [24] 符娇兰, 马学款, 陈涛, 等. “ 16 · 7 ” 华北极端强降水特征及天气学成因分析 [J]. 气象, 2017, 43 (5) : 528-539. (FU Jiaolan, MA Xuekuan, CHEN Tao, et al. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43 (5) : 528-539. (in Chinese))
- [25] 栗晗, 王新敏, 张霞, 等. 河南 “ 7 · 19 ” 豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析 [J]. 气象, 2018, 44 (9) : 1136-1147. (LI Han, WANG Xinmin, ZHANG Xia, et al. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the north of Henan Province [J]. Meteorological Monthly, 2018, 44 (9) : 1136-1147. (in Chinese))
- [26] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究 [J]. 大气科学, 2005, 29 (3) : 445-452. (SUN Jisong. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29 (3) : 445-452. (in Chinese))
- [27] XIA Ruidi, ZHANG Dalin. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19-20 July 2016 along the Taihang Mountains in north China [J]. Monthly Weather Review, 2019, 147 (11) : 4199-4220.
- [28] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “ 9608 ” 号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究 [J]. 气象学报, 2006, 64 (1) : 57-71. (SUN Jianhua, QI Linlin, ZHAO Sixiong. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “ 9608 ” typhoon [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64 (1) : 57-71. (in Chinese))
- [29] 赵思雄, 傅慎明. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析 [J]. 大气科学, 2007, 31 (6) : 1059-1075. (ZHAO Sixiong, FU Shenming. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31 (6) : 1059-1075. (in Chinese))
- [30] 杨波, 孙继松, 毛旭, 等. 北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征 [J]. 气象学报, 2016, 74 (6) : 919-934. (YANG Bo, SUN Jisong, MAO Xu, et al. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74 (6) : 919-934. (in Chinese))
- [31] 陶祖钰, 范俊红, 李开元, 等. 谈谈气象要素 (压、温、湿、风) 的物理意义和预报应用价值 [J]. 气象科技进展, 2016, 6 (5) : 59-64. (TAO Zuyu, FAN Junhong, LI Kaiyuan, et al. The physical significance and forecasting application value of meteorological elements (pressure, temperature, humidity, wind) [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6 (5) : 59-64. (in Chinese))
- [32] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题 [J]. 气象, 2017, 43 (6) : 641-652. (ZHENG Yongguang, TAO Zuyu, YU Xiaoding. Some essential issues of severe convective weather forecasting [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43 (6) : 641-652. (in Chinese))
- [33] 罗鑫玥, 陈明星. 城镇化对气候变化影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2019, 34 (9) : 984-997. (LUO Xinyue, CHEN Mingxing. Research progress on the impact of urbanization on climate change [J]. Advances in Earth Science, 2019, 34 (9) : 984-997. (in Chinese))
- [34] 倪丽丽, 曾坚. 城市暴雨内涝成灾机理与城市环境致灾演变 [J]. 建筑与文化, 2015 (6) : 116-118. (NI Lili, ZENG Jian. The mechanism of urban rainstorm waterlogging disaster and the disaster-inducing evolution of urban environment [J]. Architecture & Culture, 2015 (6) : 116-118. (in Chinese))
- [35] 赖成光, 廖耀星, 王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (3) : 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios [J]. Water Resources

- Protection,2023,39(3):101-108. (in Chinese))
- [36] 刘建芬,王慧敏,张行南. 城市化背景下城区洪涝灾害频发的原因及对策[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2012,14(1):73-75. (LIU Jianfen, WANG Huimin, ZHANG Xingnan. Causes of flood-stricken urban areas in the context of urbanization and its countermeasures[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences),2012,14(1):73-75. (in Chinese))
- [37] 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))
- [38] 张书函,郑凡东,邸苏闯,等. 从郑州“2021.7.20”暴雨洪涝思考北京的城市内涝防治[J]. 中国防汛抗旱,2021,31(9):5-11. (ZHANG Shuhan, ZHENG Fandong, DI Suchuang, et al. Thoughts on urban waterlogging control in Beijing from the rainstorm and flood of “2021.7.20” in Zhengzhou[J]. China Flood & Drought Management,2021,31(9):5-11. (in Chinese))
- [39] 涂善波,郭士明,耿青松,等. 郑州市极端暴雨灾后交通工程隐患应急检测分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):9-16. (TU Shanbo, GUO Shiming, GENG Qingsong, et al. Emergency detection analysis of traffic projects' problems after the extreme rainstorm disaster in Zhengzhou City[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):9-16. (in Chinese))
- [40] 周月华,彭涛,史瑞琴. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(5):494-501. (ZHOU Yuehua, PENG Tao, SHI Ruiqin. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood disasters in China[J]. Torrential Rain and Disasters,2019,38(5):494-501. (in Chinese))
- [41] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))
- [42] 张会,李钺,程炯,等. 基于“H-E-V”框架的城市洪涝风险评估研究进展[J]. 地理科学进展,2019,38(2):175-190. (ZHANG Hui, LI Cheng, CHENG Jiong, et al. A review of urban flood risk assessment based on the framework of hazard-exposure-vulnerability[J]. Progress in Geography,2019,38(2):175-190. (in Chinese))
- [43] 黄亦轩,徐宗学,陈浩,等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):101-108. (in Chinese))
- [44] 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))
- [45] 温家洪,袁穗萍,李大力,等. 海平面上升及其风险管理[J]. 地球科学进展,2018,33(4):350-360. (WEN Jiahong, YUAN Suiping, LI Dali, et al. Sea level rise and its risk management[J]. Advances in Earth Science,2018,33(4):350-360. (in Chinese))
- [46] XU Zongxue, CHENG Tao, HONG Siyang, et al. Review on applications of remote sensing in urban flood modeling[J]. Chinese Science Bulletin,2018,63(21):2156-2166.
- [47] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展,2019,30(5):643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong Basin, Guangzhou[J]. Advances in Water Science,2019,30(5):643-652. (in Chinese))
- [48] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护,2023,39(2):87-94. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):87-94. (in Chinese))
- [49] 李国一,刘家宏. 基于 TELEMAC-2D 模型的深圳洪涝风险评估[J]. 水资源保护,2022,38(5):58-64. (LI Guoyi, LIU Jiahong. Flood risk assessment of Shenzhen City based on TELEMAC-2D model[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):58-64. (in Chinese))
- [50] 梁志勇,何晓燕,黄金池,等. 国外非工程防洪减灾战略研究(I):减灾措施[J]. 自然灾害学报,2002,11(1):52-56. (LIANG Zhiyong, HE Xiaoyan, HUANG Jinchu, et al. Studying on non-engineering flood control strategies abroad(I): disaster reduction measures[J]. Journal of Natural Disasters,2002,11(1):52-56. (in Chinese))
- [51] 李大鸣,陈海舟,范玉. 国内外防洪减灾发展与现状[J]. 中国农村水利水电,2005(9):33-37. (LI Daming, CHEN Haizhou, FAN Yu. Present situation and development of flood control and mitigation in China and abroad[J]. China Rural Water and Hydropower,2005(9):33-37. (in Chinese))
- [52] 向立云. 防洪减灾体系概要[J]. 中国防汛抗旱,2011,21(2):10-11. (XIANG Liyun. Outline of the flood control and disaster mitigation system[J]. China Flood & Drought Management,2011,21(2):10-11. (in Chinese))

- [53] 陈春浩. 深圳市洪涝灾害特性与防灾减灾对策研究[J]. 中国水利, 2003 (3): 39-41. (CHEN Chunhao. Feature of flood disasters in Shenzhen City & countermeasure study [J]. China Water Resources, 2003 (3): 39-41. (in Chinese))
- [54] 郑风华, 郑建华, 崔豪斌. 城市防洪非工程措施探讨[J]. 山东水利, 2005 (12): 25-26. (ZHENG Fenghua, ZHENG Jianhua, CUI Haobin. Discussion on non-engineering measures of urban flood control [J]. Shandong Water Resources, 2005 (12): 25-26. (in Chinese))
- [55] 刘家宏, 王浩, 高学睿, 等. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报, 2014, 59 (36): 3581-3590. (LIU Jiahong, WANG Hao, GAO Xuerui, et al. Review on urban hydrology [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (36): 3581-3590. (in Chinese))
- [56] 李亚, 翟国方, 顾福妹. 城市基础设施韧性的定量评估方法研究综述[J]. 城市发展研究, 2016, 23 (6): 113-122. (LI Ya, ZHAI Guofang, GU Fumei. Review on methods of quantification of urban infrastructure resilience [J]. Urban Development Studies, 2016, 23 (6): 113-122. (in Chinese))
- [57] 臧鑫宇, 王峤. 城市韧性的概念演进、研究内容与发展趋势[J]. 科技导报, 2019, 37 (22): 94-104. (ZANG Xinyu, WANG Qiao. The evolution of the urban resilience concept, and its research contents and development trend [J]. Science & Technology Review, 2019, 37 (22): 94-104. (in Chinese))
- [58] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39 (10): 1717-1731. (ZHAO Ruidong, FANG Chuanglin, LIU Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research [J]. Progress in Geography, 2020, 39 (10): 1717-1731. (in Chinese))
- [59] 赵庆风. 城市内涝灾害韧性评估及其提升策略研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
- [60] 张明顺, 李欢欢. 气候变化背景下城市韧性评估研究进展[J]. 生态经济, 2018, 34 (10): 154-161. (ZHANG Mingshun, LI Huanhuan. Review of urban resilience assessment in the context of climate change [J]. Ecological Economy, 2018, 34 (10): 154-161. (in Chinese))
- [61] 张庆霞. 城市洪涝灾害治理的社会韧性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [62] 刘常瑜, 尚书, 赵强, 等. 基于 GIS 和 TOPSIS-PSR 的湖南省洪涝灾害后恢复力评价[J]. 水电能源科学, 2018, 36 (1): 70-73. (LIU Changyu, SHANG Shu, ZHAO Qiang, et al. Flood resilience assessment in Hunan Province based on GIS and TOPSIS-PSR [J]. Water Resources and Power, 2018, 36 (1): 70-73. (in Chinese))
- [63] 郭祖源. 城市韧性综合评估及优化策略研究: 以长江中游城市群为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [64] 胡伟贤. 山前平原型城市雨洪模型构建及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [65] 常晓栋, 徐宗学, 赵刚, 等. 山前平原型城市雨洪模拟与应用: 以济南市为例[J]. 水力发电学报, 2018, 37 (5): 107-116. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulation of urban rainfall-runoff in piedmont cities: case study of Jinan city, China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37 (5): 107-116. (in Chinese))
- [66] 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))
- [67] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 (3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50 (3): 17-22. (in Chinese))
- [68] 陈佩琪, 王兆礼, 曾照洋, 等. 城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39 (9): 67-77. (CHEN Peiqi, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Assessing influence of future urbanization on hydrological process in typical river basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 (9): 67-77. (in Chinese))
- [69] 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. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Comprehensive review on the impact of spatial features of urban underlying surface on runoff processes [J]. Advances in Water Science, 2021, 32 (5): 791-800. (in Chinese))
- [70] 王思成. 风险治理导向下滨海城市综合防灾规划路径研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [71] 刘爱华. 城市灾害链动力学演变模型与灾害链风险评估方法的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [72] 叶陈雷, 徐宗学. 水工程调度与低影响开发协同作用下典型城市片区洪涝过程模拟: 以福州市为例[J]. 水利学报, 2022, 53 (7): 833-844. (YE Chenlei, XU Zongxue. Simulation of fluvial/pluvial flooding processes in a typical urban area considering role of low impact development (LID) measures and joint operation for hydraulic structures: case study in Fuzhou City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (7): 833-844. (in Chinese))
- [73] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 83-92. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Influences of sponge reconstruction of Jin'an River

drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1):83-92. (in Chinese))

[74] 徐宗学,叶陈雷.从“城市看海”到“城市看江”:极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):12-20. (XU Zongxue, YE Chenlei. From “looking at sea in city” to “looking at river in city”: simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (9): 12-20. (in Chinese))

[75] 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. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (4): 381-392. (in Chinese))

[76] 臧文斌,赵雪,李敏,等.城市洪涝模拟技术研究进展及发展趋势[J].中国防汛抗旱,2020,30(11):1-13. (ZANG Wenbin, ZHAO Xue, LI Min, et al. Research

progress and development trend of urban flood simulation technology [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30 (11): 1-13. (in Chinese))

[77] 刘媛媛,郑敬伟,刘洪伟,等.极端大暴雨对城市防洪的警示和思考[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):21-24. (LIU Yuanyuan, ZHENG Jingwei, LIU Hongwei, et al. Warning and thoughts of extreme rainstorm on urban flood prevention [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31 (9): 21-24. (in Chinese))

[78] 乔地.从人民群众生命安全角度重新审视城市建设标准[N].科技日报,2021-08-13(02).

[79] 付健,高小涛,乔明叶.极端天气灾害下城市防洪排涝整体解决方案探讨:以郑州市为例[J].中国水利,2022(5):39-42. (FU Jian, GAO Xiaotao, QIAO Mingye. Overall solution for urban flood control and drainage under extreme rainfall and flood: taking Zhengzhou as an example [J]. China Water Resources, 2022 (5): 39-42. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-21 编辑:施业)

(上接第5页)

[19] 肖黎明,张仙鹏.强可持续理念下绿色创新效率与生态福利绩效耦合协调的时空特征[J].自然资源学报,2019,34(2):312-324. (XIAO Liming, ZHANG Xianpeng. Spatio-temporal characteristics of coupling coordination between green innovation efficiency and ecological welfare performance under the concept of strong sustainability [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (2): 312-324. (in Chinese))

[20] RENTSCHLER J, SALHAB M, JAFINO B A. Flood exposure and poverty in 188 countries [J]. Nature Communications, 2022, 13: 3527.

[21] 徐祖信,张竞艺,徐晋,等.城市排水系统提质增效关键技术研究:以马鞍山市为例[J].环境工程技术学报,2022,12(2):348-355. (XU Zuxin, ZHANG Jingyi, XU Jin, et al. Study on key technologies for improving quality and efficiency of urban drainage system: a case of Ma'an Shan City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12 (2): 348-355. (in Chinese))

[22] 武春丽.中国跨入标准定额新时代[J].工程建设标准化,2014(2):16-18. (WU Chunli. China has entered a new era of standard quotas [J]. Standardization of Engineering Construction, 2014 (2): 16-18. (in Chinese)).

[23] 邱斌,朱洪涛,齐飞,等.长江流域典型城市水生态环境特征解析及综合整治对策[J].环境工程技术学报,2023,13(1):1-9. (QIU Bin, ZHU Hongtao, QI Fei, et al. Analysis of the characteristics of water eco-environment

and comprehensive countermeasure for typical cities in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13 (1): 1-9. (in Chinese))

[24] 王峥,曾令武,张妍妍,等.长江中下游城市水生态环境综合整治对策与路线图[J].环境工程,2023,41(3):1-11. (WANG Zheng, ZENG Lingwu, ZHANG Yanyan, et al. Solutions and roadmap for comprehensive remediation of water ecological environment in urban areas of the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (3): 1-11. (in Chinese))

(收稿日期:2023-12-20 编辑:王芳)

