

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.002

# 特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题

刘家宏<sup>1,2</sup>, 梅超<sup>1,2</sup>, 刘宏伟<sup>3</sup>, 房小怡<sup>4</sup>, 倪广恒<sup>5</sup>, 靳文波<sup>6</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038; 3. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 中国气象科学研究院气象影响与风险研究中心, 北京 100081; 5. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 6. 应急管理部大数据中心, 北京 100013)

**摘要:**近年来,特大城市极端暴雨内涝和流域洪水叠加导致的洪涝灾害风险呈增加趋势,造成了重大人员伤亡和财产损失,亟待开展流域洪水和城市内涝灾害链联防联控研究。融合气象科学、水文科学、信息科学、防灾减灾科学等多学科理论与方法,重点解决城市外洪内涝组合致灾机理与灾害链风险传递规律关键科学问题;突破流域-城市一体化协同监测与早期风险感知技术、城市外洪内涝链生灾害智能预警与定向发布技术、跨尺度洪涝耦合模拟与联防联控场景推演技术、城市洪涝联防联控应急预案编制与智能化决策技术等4项关键技术。构建以空天地气象水文协同观测、社会经济多源信息汇聚分析、灾害动力模型推演为基础的联防联控应急指挥决策业务系统,突出实时性、动态化、精准性和智能化,支撑特大城市外洪内涝全过程预报、预警、预演、预案“四预”业务实践。

**关键词:**流域洪水;城市内涝;灾害链;联防联控;“四预”措施

**中图分类号:** TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)02-0172-10

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告指出,21世纪全球许多地区的强降水和洪水将加剧且更加频繁<sup>[1-4]</sup>,这一趋势在高度城镇化的区域更为明显<sup>[5-6]</sup>。近年来,快速城镇化改变了城市区域的水循环过程<sup>[7-8]</sup>,特大城市“外洪-内涝”灾害在世界多地出现,造成重大人员伤亡和财产损失,如中国郑州(2021年7月20日)、德国哈根(2021年7月15日)、美国纽约(2021年9月1日)、澳大利亚昆士兰(2022年2月27日)及韩国首尔(2022年8月8日)等<sup>[9-14]</sup>。特大城市的洪涝承载体从传统平面静态对象发展为地表/地下三维动态对象,线性成灾过程发展为互馈、次生的网状灾害链,加之外洪-内涝的叠加放大效应,极大地增加了城市洪涝应对的复杂性和难度。国内外学者从工程防御、风险管理、应急能力及韧性提升等多角度<sup>[15-18]</sup>提出了城市特大洪涝应对的策略,促进了防洪减灾领域的技术进步。

面向特大暴雨灾害暴露出的特大城市灾害链机制不明、监测预警失灵、联防联控脱节、缺乏重大外洪内涝链生灾害耦合推演技术和动态风险评估技术等问题,亟待提升灾害天气预报的能力<sup>[19]</sup>,揭示“外洪-内涝”链生灾害的形成与演化规律,识别城市三维承载体的洪涝特性及灾害链阻断机制;基于业务化应用需求<sup>[20]</sup>,亟需研发流域-城市耦合系统外洪内涝一体化协同监测与早期风险感知技术、城市外洪内涝链生灾害风险智能预警与定向发布技术,研制流域洪水与城市内涝联防联控场景三维推演与趋势预测平台,构建城市外洪内涝灾害链风险规避与联防联控应急指挥决策智能化系统。

## 1 关键科学问题

特大城市外洪内涝灾害链联防联控的关键科学问题是城市外洪内涝组合致灾机理与灾害链风险传递规

收稿日期: 2022-12-31; 网络出版日期: 2023-03-01

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//32.1309.P.20230301.1001.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3090600); 国家自然科学基金资助项目(52192671)

作者简介: 刘家宏(1977—),男,湖北钟祥人,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。

E-mail: liujh@iwhr.com

通信作者: 梅超, E-mail: meichao@iwhr.com

律。在全球变暖、海平面上升和快速城市化等复杂背景下,极端暴雨(雨)、流域洪水(洪)、城市内涝(涝)和海洋高潮位(潮)遭遇事件频发,复合洪涝事件极易导致灾害伴生现象和灾害链叠加“放大效应”。城市“外洪-内涝”灾害链的形成涉及雨、洪、涝、潮等多源致灾因子与人、车、建筑等多类承灾体在相关孕灾环境下的相互关联作用,呈现出承灾体复杂、时空尺度多样等特点。中国北方特大城市的地下空间开发强度较高,河湖水系被侵占现象比较普遍,在超标准暴雨洪涝情景下,容易诱发地下空间淹涝-地下室配电设施进水短路-大范围停电停水等系列灾害链;中国南方内陆特大城市多数依傍大江大河发展,城市排水防涝基础设施与江河连通,容易遭受外洪内涝的双重威胁,形成外江洪水顶托—内河水位高涨—排水管网水力坡降变缓甚至出现逆坡—排水能力衰减甚至倒灌等连锁反应,从而引发洪涝灾害链;滨海型特大城市,受海洋季风影响,“台风-暴雨”频繁发生,城市暴雨内涝叠加“风暴潮增水”,如果再遇上“天文大潮”,极易诱发特大洪涝灾害链。例如,1970年11月13日,孟加拉湾的台风“博拉”导致强烈的“风暴潮”,叠加“天文大潮”增水超过6 m,造成恒河三角洲一带约30万人遇难,溺死牲畜50多万头,约100万人流离失所,震惊世界<sup>[21]</sup>。从承灾对象来看,新型城市洪涝承灾体包括地下空间、地表洼地、地上构筑物、蓄水体等,洪涝蓄泄及连通响应特性相比传统洪涝承灾对象而言,已经发生了显著的变化。城市洪涝三维承灾对象的水文响应和多重灾害相互诱发,使得洪涝灾害应对过程中存在链生灾害发展难预判、防御瓶颈难诊断、应对时机难把握等实际问题。例如,2021年郑州“7·20”特大暴雨期间,京广路隧道的灾难事件:城市下穿隧道等复杂三维地形遭遇特大暴雨,相继出现隧道出口内涝断路拥堵、隧道出入口淹水倒灌、排水泵站及配电设备进水停机,加之隧道管理单位和有关部门封闭隧道疏导交通不及时等多重因素叠加放大,造成“城市洪涝灾害链”。为此,需重点关注多重灾害相互诱发作用下洪涝灾害链形成机理这一关键科学问题,构建城市“外洪-内涝”灾害链知识图谱,识别洪涝灾害链形成的主要驱动要素、传递机制与关键时空节点,研发城市三维空间承灾体洪涝容深特性识别方法,为灾害链的精准阻断提供科学参考。进而,基于多重灾害相互诱发作用下“外洪-内涝”灾害链形成机理以及洪涝承灾体风险规避技术,揭示组合致灾条件下城市“外洪-内涝”联防联控应急预案的时空响应特征,从而推动城市洪涝联防联控应急预案编制技术发展,提升应对洪涝灾害的技术水平。

针对上述关键科学问题,需重点开展城市“外洪-内涝”灾害耦合机理、三维承灾对象洪涝灾害特性、洪涝灾害链形成与阻断机理、洪涝防控的时间与空间特性等4个方面的理论和方法研究(图1)。

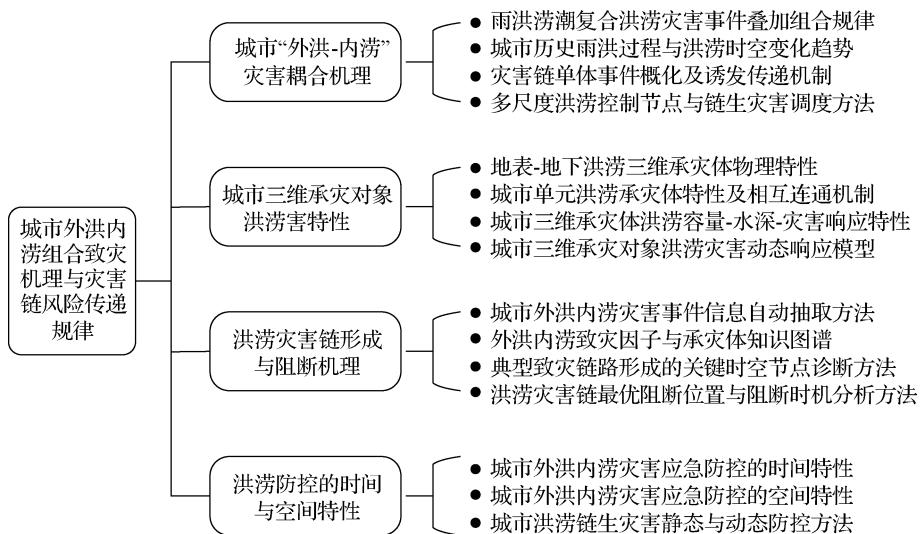


图1 城市洪涝灾害链联防联控关键科学问题及相关研究内容

Fig.1 Key scientific issues and research contents of the joint prevention and control of urban flood disasters

## 2 关键技术需求

面向特大城市“外洪-内涝”监测预警、模拟推演和智能决策方面的主要问题，当前在城市外洪内涝灾害链联防联控方面的关键技术需求如图2所示。

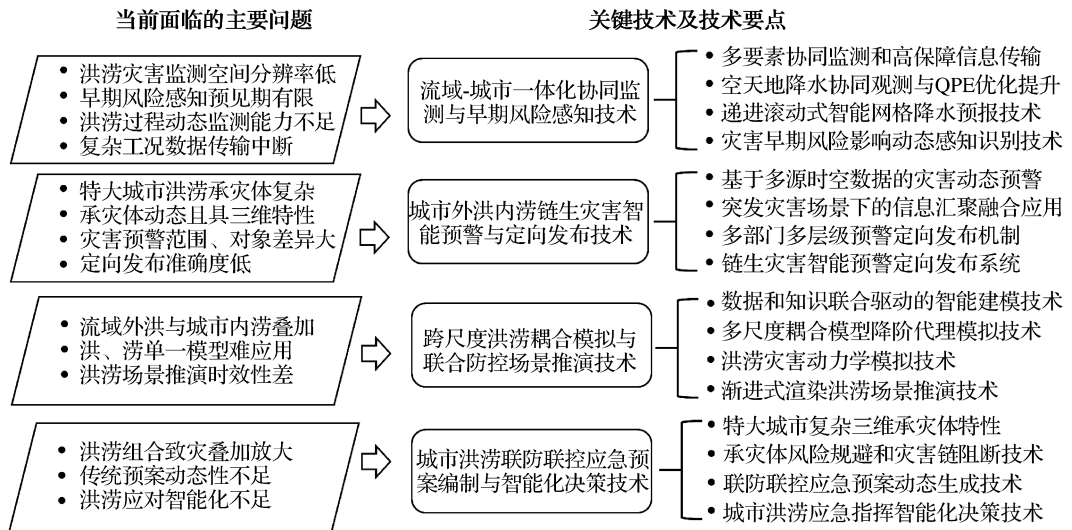


图2 城市洪涝联防联控面临的主要问题与关键技术需求

Fig. 2 Principal problems and technological issues of the joint prevention and control of urban flood

### 2.1 流域-城市一体化协同监测与早期风险感知技术

目前美国国家航空航天局(NASA)和日本航空勘探局(JAXA)等机构已发起并建立了全球降水观测(Global Precipitation Measurement, GPM)计划<sup>[22-23]</sup>, 可提供全球12 km分辨率网格、3 h降水预报产品, 当前各国正在发展基于观测和数值模式的降水订正技术, 该领域中国整体处在“并跑”阶段, 在高分辨率临近降水预报领域正寻求“领跑”突破。现有的城市洪涝灾害监测系统的空间分辨偏低、早期风险感知预见期有限、洪涝过程动态监测能力不足, 难以满足城市外洪内涝联防联控的业务需求; 此外, 城市特大洪涝灾害发生时极有可能产生断电、断网等不利情景。因此, 需要研发城市洪涝灾害多要素协同监测和高保障信息传输技术, 该技术拟基于嵌入式计算机、窄带物联、卫星通讯的智能多信道数据传输保障方法, 实现市电中断、无线互联网中断等恶劣工况下关键信息传输不中断, 保障城市地区洪涝水文多要素协同监测和数据传输。同时, 基于中国气象雷达观测系统和地面雨量站构建流域-城市-街区多尺度降水动态监测体系, 研发空天地降水协同观测与定量降水预估(Quantitative Precipitation Estimation, QPE)时空分辨率优化提升技术, 通过空天地暴雨目标观测物综合校验, 提升天气雷达QPE时空分辨率, 建立时空分辨率为100 m和10 min的QPE产品, 提高强暴雨外推预警水平, 提升特大城市降水预报的精细化水平及强降水预见期。研发特大城市高时空分辨率中期-短期-短临递进滚动式智能网格降水预报技术, 通过对高时空分辨率观测资料的滚动融合及预报算法的改进, 提高计算效率, 将短临预报的强降水预见期延长至3 h、空间分辨率提升到500 m; 通过对不同预报时效产品的融合, 构建高时空分辨率中期-短期-短临递进滚动式智能网格降水预报技术体系; 研发外洪内涝灾害早期风险影响动态感知识别技术, 实现分类致洪面雨量的识别; 根据定量降水估计和中小流域面雨量预报, 应用决策树模型等分析特大城市及周边流域洪涝风险, 实现降水及其致灾天气系统在时间预见性上的无缝隙预报和早期风险感知。

## 2.2 城市外洪内涝链生灾害智能预警与定向发布技术

特大城市洪涝承灾体复杂、动态,且具有地表、地下空间等三维特性,在不同的城市运行状态、不同的内涝风险阈值下,受灾范围、承灾对象差异巨大,这对灾害预警与定向发布提出了严峻挑战。国外在洪涝风险管理方面具有领先优势<sup>[24-25]</sup>,美国、法国和日本等相继建立了国家洪水预报系统,但主要关注流域层面的洪水过程,尚未建立与城市内涝耦合预报、联合推演的业务化运行系统。中国分2期建设了国家防汛抗旱指挥系统,已经在中央、流域和省级部署,开展了业务化运行,在实践应用上处于“领跑”位置。未来需剖析城市人口、车流、三维复杂承灾体等动、静要素组合场景下外洪内涝链生灾害的时空演进机理,提出直链式、循环式、发散式等不同类型链生灾害风险研判与态势预测方法;智能汇聚分析城市洪涝灾害动态多源信息,构建城市多尺度、跨部门的灾害联防联控响应体系和分布式监测-预警体系;面向街区、部门研发多层次、多目标预警信息精准发布技术,提升洪涝场景下城市联防联控响应、智能预警与定向发布能力。具体的分项技术要点包括基于多源时空关联数据的城市外洪内涝链生灾害动态预警技术、特大城市突发灾害场景下的信息汇聚融合应用技术、城市外洪内涝场景下多部门和多层次预警定向发布机制,以及特大城市外洪内涝场景下链生灾害智能预警定向发布系统等。

## 2.3 跨尺度洪涝耦合模拟与联防联控场景推演技术

流域洪水与城市内涝的遭遇叠加涉及跨尺度洪涝过程的耦合模拟,单一的流域洪水模型和城市内涝模型在处理此类问题时都有局限性。本领域国外研发了SWMM、MIKE、InfoWorks等系列软件产品<sup>[26-27]</sup>,面对特大城市、复杂下垫面等大规模模拟问题时,其计算速度瓶颈尚未突破。流域-城市跨尺度耦合模拟刚刚起步,中国属于“并跑”向“领跑”过渡阶段。流域-城市跨尺度洪涝耦合模拟涉及实体多元、链接部位繁杂等问题,需研发基于多源数据和领域知识联合驱动的智能建模技术,实现跨尺度单元级联拓扑自动推断和关键区域自适应加密。针对因跨尺度洪涝演进快慢过程交织、大小要素共存而产生的耦合计算性能瓶颈,需研发基于动态模态分解与深度时序网络的多尺度耦合模型降阶代理模拟技术,并利用采样仿真与数据同化算法,提升跨尺度耦合模拟的效率与精度。针对洪涝致灾链路及联防联控体系的级联复杂性,可采用知识图谱技术快速构建统一存储、有序管理的城市特大洪涝联防联控场景知识库,利用耦合灾害动力学模拟的强化学习算法,智能推荐联防联控预案,并利用考虑单元级联与过程耦合关系的通用化场景描述技术,以及兼顾推演精度需求与数据时空变化特性的渐进式渲染技术等,实现联防联控推演场景的高效响应和实时仿真。

## 2.4 城市洪涝联防联控应急预案编制与智能化决策技术

城市“外洪-内涝”组合致灾情景下,洪涝的致灾机理和区域水文过程可能出现“叠加放大效应”等一系列重大变化,传统以城市区域为重点的防洪排涝预案将难以满足需求。国外在洪涝应对方面侧重于风险管控,城市建筑物和重要基础设施的规划建设避让洪水高风险区,对中低风险区内的财产实施洪水保险等非工程措施加以保全<sup>[28-29]</sup>。中国由于人口密集,避让难度大,且许多老城区在新的水文情势下,已经暴露于洪水风险中<sup>[30]</sup>,在未来城市更新过程完成前,难以规避风险。因此,中国采取了防洪排涝工程措施与洪涝应急管理非工程措施相结合的方式管控风险,制定了较为完善的流域及城市防汛应急预案,在本领域处于“领跑”位置。未来需基于灾害链形成与传播机理,研究组合致灾情景下洪涝灾害演变过程与预案编制的内在联系,解析特大城市复杂三维承灾体特性,研发承灾体风险规避和灾害链阻断技术,提出不同尺度下联防联控应急预案协调机制。同时,研究组合致灾情景下城市“外洪-内涝”联防联控应急预案的时空特征,从城市洪涝灾害时空特性出发,量化分析组合致灾情景下城市防洪排涝的物资和救援需求,构建组合致灾情景下面向防洪排涝需求的资源优化配置模型,智能优化配置/调度防洪排涝资源及相关应急设施。进一步地,融合城市实时洪涝监测感知、洪涝灾害推演、风险评估预警等工具与信息,创建组合致灾情景下城市“灾前预警-灾中应对-灾后处置”联防联控应急预案动态生成技术,弥补传统预案在动态组合致灾情景下资源实时配置能力不足等问题,支撑城市洪涝应急指挥智能化决策,最大程度地降低洪涝灾害损失。

### 3 联防联控系统

城市洪涝灾害联防联控技术研发属于“面向国家重大需求”的科技创新工作，着力解决特大城市的“发展与安全”重大问题，需重点破解四大难题：外洪内涝一体化精准协同监测难题、早期风险感知预见期和精度同步提升难题、面向人/车动态对象的预警信息定向发布难题、洪涝联防联控场景快速推演与智能决策难题，构建联防联控系统(图3)，实现动态化评估、精准化预警、智能化决策，支撑流域洪水和城市内涝联防联控应急管理业务应用。

#### 3.1 动态化评估

传统城市洪涝风险评估主要面向城市区域的平面静态对象，包括地表受淹的建筑物等固定资产。城市外洪内涝复合灾害具有突发性强、蔓延迅速、承灾体复杂多变、位置不固定等特征，洪涝承灾体也从平面静态对象转变为三维动态对象，静态评估方法难以适应新的灾害特征。亟需研究解析城市人口、车流、三维复杂承灾体等时空演进规律，提出不同类型链生灾害风险研判与态势预测方法，融合城市多源异构数据资源，形成城市洪涝链生灾害动态风险评估网络，实现灾害风险的动态评估与预测。

#### 3.2 精准化预警

特大洪涝灾害应急管理实践中，往往面临应急物资和救援力量不足等困难，精准预警、提前响应、主动有序避险十分重要。灾害事故的精准预警与定向发布，难点主要包括灾害承灾体及应急响应队伍的精准识别、差异化定制预警信息的准确投送。可通过叠加实时交通大数据、人口分布热力图、洪涝致灾因子空间分布图，采用人/车轨迹同时空分析，精准识别灾害风险区的人/车对象及相应的救援力量，利用手机信号基站定向耦联方式，实现洪涝预警信息及救援指令的精准化定向发布。

#### 3.3 智能化决策

城市洪涝联防联控应急指挥决策变量众多、场景复杂，且灾害形势瞬息万变，时效性要求极高，单纯依靠专家会商决策，难以做到全局最优，且时效性难以保证，因此，需要引入人工智能及机器学习算法进行辅助决策。智能化决策技术主要体现在数据获取的智能化、洪涝过程模拟的智能化、应对方案优选的智能化、防控形势研判的智能化等方面。在灾情、灾害、救援进展及物资储运等信息的获取方面采用智能化的数据分析与知识挖掘等信息获取技术；在洪涝过程模拟时采用机理模型与智能模型双驱动、自学习模式迭代更新，提升模拟精度和运行效率；在应对方案生成和优选时通过历史方案库的匹配和智能组合评估，快速获得优选方案集；在方案执行过程中，基于实时动态监测数据，采用大数据融合智能技术进行防控形势的科学研判，及时反馈方案调整建议等。

#### 3.4 系统预期成效

基于特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术成果构建的软硬件系统，预期可全面增强监测、预报及推演能力，支撑早期预警和预案推演，为应急指挥决策和现场救援赢得宝贵的时间，有效提升洪涝应急管理水平和灾害救援效率。如图4所示，从灾害天气背景场形成开始，通过流域-城市一体化协同监测系统的气象雷达装置，可获取新一代S波段和局地X波段天气雷达数据；考虑原始数据接收时间延时和数据处理时间，约26 min后可得到高精度、高时空分辨率的0~3 h的临近外推降水预报产品(考虑到距雷达观测时间已经过去了约26 min，实际获得的降水预见期约为2.5 h)；将降水预报产品输入跨尺度洪涝耦合模型，进行模拟推演约30 min，可提前2 h获取灾害预警信息；通过智能预警与定向发布系统、联防联控应急预案编制与智能化决策模块等，启动应急响应和决策指挥，及时阻断灾害链，主动进行应急避险，在灾害发生时最大限度保障人员和财产安全。

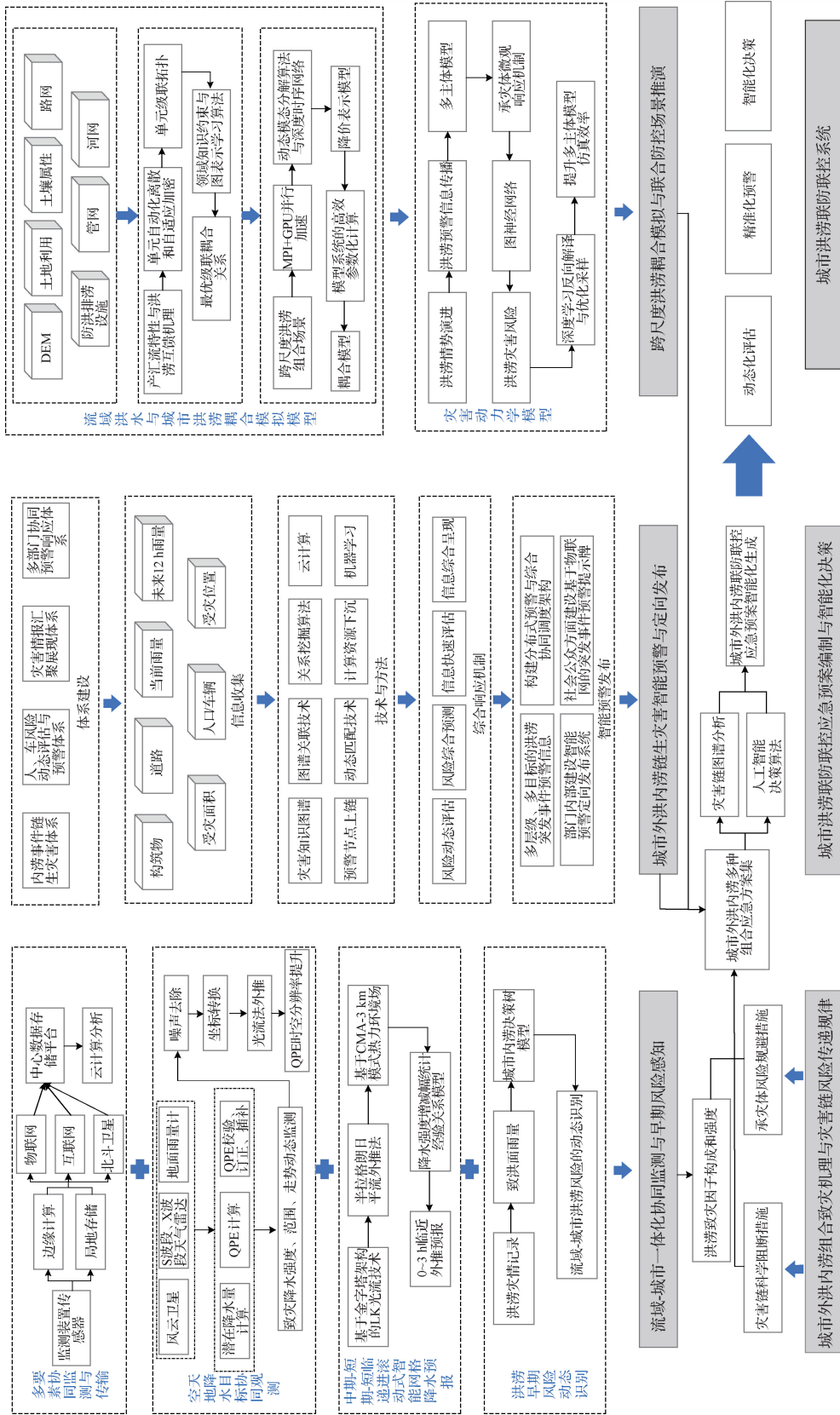


图3 城市洪涝联防联控系统的构成组件及功能

Fig. 3 Composition components and functions of joint prevention and control system for urban flood

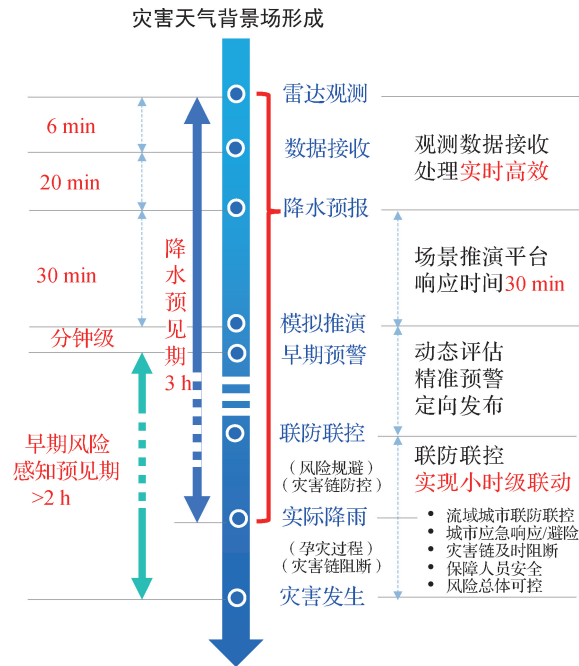


图4 城市洪涝联防联控系统执行流程及预期成效示意

Fig. 4 Implementation process and expected results of joint prevention and control system for urban flood

## 4 结论与展望

全球气候变化与快速城镇化背景下，流域洪水与城市内涝叠加风险明显增加，本文梳理了特大城市外洪内涝灾害链联防联控关键科学技术问题，解析了城市洪涝联防联控系统的技术要点，展望了相关技术研发和系统构建的预期成效。未来可能的创新点和突破方向概括如下：

(1) 强化城市外洪内涝灾害链形成与演化机制研究，系统揭示雨-洪-涝-潮相互作用机理、城市“外洪内涝”遭遇规律和承灾体响应特征，识别洪涝灾害链形成演化机制及叠加放大效应，提出灾害链阻断理论与方法；

(2) 发展城市外洪内涝链生灾害耦合推演技术，构建跨尺度外洪内涝链生灾害动力学模型，支撑流域-城市水文水动力过程的耦合模拟和洪涝联防联控组合场景推演，解决流域-城市耦合系统在特大洪涝场景下的复杂链生灾害过程推演难题；

(3) 创新街区尺度洪涝风险动态评估与预警技术，融合人口/车流等动态信息和早期风险感知技术，考虑洪涝灾害链风险传递规律和城市复杂三维承灾体特性，精准定位洪涝灾害风险区，识别涉险人/车对象，实现街区尺度的预警信息定向精准发布；

(4) 研发流域-城市一体化协同监测技术与装备，实现城市区域高空间分辨率洪涝要素动态监测，研制多信道智能切换数据传输装置，保障特大洪涝时断电、断网等恶劣工况下洪涝关键要素的监测传输不中断。

中国幅员辽阔，南方、北方、滨海等不同区域特大城市具有不同的特点，洪涝形成机理与灾害链传递特征也不尽相同，本文所提出的关键科学技术问题主要侧重共性问题，存在一定的偏颇和不足，未来尚需结合城市具体实际进行进一步的深化研究。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] KREIBICH H, van LOON A F, SCHRÖTER K, et al. The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management[J]. *Nature*, 2022, 608(7921): 80-86.
- [3] 王蕾, 张百超, 石英, 等. IPCC 第六次评估报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(4): 389-394. (WANG L, ZHANG B C, SHI Y, et al. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 18(4): 389-394. (in Chinese))
- [4] 马占云, 任佳雪, 陈海涛, 等. IPCC 第一工作组评估报告分析及建议[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(11): 2550-2558. (MA Z Y, REN J X, CHEN H T, et al. Analysis and recommendations of the assessment report of IPCC working group I [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(11): 2550-2558. (in Chinese))
- [5] 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 J Y, WANG Y T, HE R M, 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))
- [6] SANDERS B F, SCHUBERT J E, KAHL D T, et al. Large and inequitable flood risks in Los Angeles, California[J]. *Nature Sustainability*, 2023, 6(1): 47-57.
- [7] 王强, 许有鹏, 于志慧, 等. 快速城市化地区多尺度水文观测试验与暴雨洪水响应机理分析[J]. *水科学进展*, 2022, 33(5): 743-753. (WANG Q, XU Y P, YU Z H, et al. Multi-scale hydrological observation experiment and analysis of rainstorm and flood response mechanism in rapidly urbanized areas[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 743-753. (in Chinese))
- [8] 吴雷, 许有鹏, 王强, 等. 长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性[J]. *水科学进展*, 2022, 33(5): 730-742. (WU L, XU Y P, WANG Q, et al. Evolution and non-stationary characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 730-742. (in Chinese))
- [9] 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/OL]. (2022-01-21)[2022-09-06]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404728138059088150>. (The State Council Disaster Investigation Team. The investigation report of “July 20” heavy rain disaster in Zhengzhou, Henan Province[R]. (2022-01-21)[2022-09-06]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404728138059088150>. (in Chinese))
- [10] 胡庆芳, 张野, 李伶杰, 等. GPM 近实时反演数据对河南省 2021 年“7·20”极端暴雨的比较分析[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 567-580. (HU Q F, ZHANG Y, LI L J, et al. Comparative evaluation of GPM near-real-time precipitation products during the 20 July 2021 extreme rainfall event in Henan Province[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 567-580. (in Chinese))
- [11] CORNWALL W. Europe’s deadly floods leave scientists stunned[J]. *Science*, 2021, 373(6553): 372-373.
- [12] HEMMATI M, KORNUBER K, KRUCZKIEWICZ A. Enhanced urban adaptation efforts needed to counter rising extreme rainfall risks[J]. *Npj Urban Sustainability*, 2022, 2: 16.
- [13] 蓝琳琳, 游志斌. 2022 年 2—3 月澳大利亚重大洪灾过程应对工作分析与评价[J]. *中国减灾*, 2022(15): 34-37. (LAN L L, YOU Z B. Analysis and evaluation of the response to the severe flood in Australia from February to March 2022[J]. *Disaster Reduction in China*, 2022(15): 34-37. (in Chinese))
- [14] 缪国瑾. 韩国首尔遭遇 80 年来最大降雨[J]. *水利水电快报*, 2022, 43(9): 3. (MIAO G J. South Korea’s Seoul has been hit by the heaviest rainfall in 80 years[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2022, 43(9): 3. (in Chinese))
- [15] 王艳艳, 王静, 胡昌伟, 等. 太湖流域应对特大洪水防洪工程效益模拟[J]. *水科学进展*, 2020, 31(6): 885-896. (WANG Y Y, WANG J, HU C W, et al. Benefit simulation of flood control project in Taihu Lake basin under extreme floods [J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(6): 885-896. (in Chinese))
- [16] de RUIG L T, HAER T, de MOEL H, et al. How the USA can benefit from risk-based premiums combined with flood protection



- [J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(11): 995-998.
- [17] 刘家宏, 梅超, 邵薇薇, 等. 城市排水防涝基础设施应对能力的三个阈值[J]. *水利学报*, 2022, 53(7): 789-797. (LIU J H, MEI C, SHAO W W, et al. Three thresholds for the bearing capacity of urban drainage and flood control infrastructures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 789-797. (in Chinese))
- [18] 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, 778. (CHENG X T, LIU C J, LI C Z, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(7): 757-768, 778. (in Chinese))
- [19] GOLDING B. Towards the “Perfect” weather warning: bridging disciplinary gaps through partnership and communication[M]. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [20] 张红萍, 李敏, 贺瑞敏, 等. 城市洪涝模拟应用场景及相应技术策略[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 452-461. (ZHANG H P, LI M, HE R M, et al. Application scenarios and corresponding technical strategies of urban flood modeling[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 452-461. (in Chinese))
- [21] JON WHITE. All about history: natural disasters[M]. London: Future Publishing Ltd, 2018.
- [22] TAPIADOR F J, TURK F J, PETERSEN W, et al. Global precipitation measurement: methods, datasets and applications[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 104/105: 70-97.
- [23] LI R Z, QI D, ZHANG Y, et al. A new pixel-to-object method for evaluating the capability of the GPM IMERG product to quantify precipitation systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128476.
- [24] MARCHI L, BORGA M, PRECISO E, et al. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(1/2): 118-133.
- [25] SCHANZE J, ZEMAN E, MARSALEK J. Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006.
- [26] PIADDEH F, BEHZADIAN K, ALANI A M. A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127476.
- [27] SIDEK L M, JAAFAR A S, MAJID W H A W A, et al. High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using InfoWorks ICM[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10259.
- [28] LIN L, TANG C Q, LIANG Q H, et al. Rapid urban flood risk mapping for data-scarce environments using social sensing and region-stable deep neural network[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128758.
- [29] SIEGEL D I, ALVAREZ-COHEN L, BOUWER E J, et al. Levees and the national flood insurance program: improving policies and practices[EB/OL]. Washington, D C: The National Academies Press, 2013. [https://legacy-assets.eenews.net/open\\_files/assets/2013/03/20/document\\_pm\\_05.pdf](https://legacy-assets.eenews.net/open_files/assets/2013/03/20/document_pm_05.pdf).
- [30] 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. (SONG X M, ZHANG J Y, HE R M, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese))

## Key scientific and technological issues of joint prevention and control of river flood and urban waterlogging disaster chain in megacities \*

LIU Jiahong<sup>1,2</sup>, MEI Chao<sup>1,2</sup>, LIU Hongwei<sup>3</sup>, FANG Xiaoyi<sup>4</sup>, NI Guangheng<sup>5</sup>, JIN Wenbo<sup>6</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China*; 3. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 4. *Meteorological Impact and Risk Research Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*; 5. *State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*;  
6. *Big Data Center, Ministry of Emergency Management, Beijing 100013, China*)

**Abstract:** In recent years, the risk of extreme super rainstorm in megacities coupled with big flood in rivers has been increasing, which caused heavy casualties and property losses. It is necessary to carry out joint prevention and control measurements to cope with river flood and urban waterlogging disaster chains. At present, it is an urgent need to integrate multidisciplinary theories and methods of meteorological science, hydrological science, information technology, disaster prevention and mitigation technology, to solve the key scientific and technological issues. The key scientific issue is the combination mechanism of river-urban flood and the risk transmission rule of disaster chain. Besides, there are four key technological issues: ① To integrate the river and urban meteorological-hydrological observation facilities into a collaborative one to monitor and forecast the flood risk. ② Intelligent early warning and directional message broadcasting technology for river flood and urban waterlogging disaster chain. ③ Coupled simulation of river-urban flood and demonstration of joint prevention and control scenarios. ④ Intelligent decision-making technology for river-urban joint flood control and emergency plan preparation. Based on the collaborative observation of meteorology and hydrology, social and economic multi-source information convergence analysis, and disaster deduction model, an emergency command and decision support system could be built for joint prevention and control of river-urban flood. The system highlights real-time, dynamic assessment, precision and intelligence to support the whole-process river-urban flood regulation. It could provide technical support for flood forecasting, early warning, scenario-demonstration and emergency plan preparation in megacities.

**Key words:** river flood; urban waterlogging; disaster chain; joint prevention and control; four pre-handle measures

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3090600) and the National Natural Science Foundation of China (No. 52192671).