

文章编号: 0559-9350(2026)04-0483-16

城市暴雨洪涝灾害动力学机制及其防控关键技术

徐宗学^{1, 2}, 卢兴超^{1, 2}

(1. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要: 气候变化引发极端降雨增多与城市化水文效应叠加, 加剧城市洪涝灾害向趋多、趋强、趋广方向发展。为了解析自然-社会-工程耦合背景下城市洪涝灾害防控面临的技术需求, 本文系统梳理了当前城市洪涝灾害防控面临的主要挑战, 揭示了城市洪涝灾害动力学机制, 提出了灾害防控关键技术。结果表明, 城市洪涝风险不确定性增加、城市洪涝风险管控中自然与社会耦合机制认识不足、承灾体受灾防控标准不明以及灾害链精准防控技术欠缺, 是当前洪涝灾害防控所面临的主要挑战; 城市洪涝灾害动力学机制是城市洪涝水动力、承灾体失稳破坏、社会系统响应、灾害链级联传递等之间相互作用与映射的结果。从工程技术和政策管理角度, 提出涵盖暴雨预警与洪涝模拟、承灾体失稳智能判别、灾害链智能阻断、防灾韧性提升等灾害防控关键技术, 给出了适宜的策略、途径和措施。本文厘清了城市洪涝灾害系统中“自然-社会-工程”多系统耦合的协同机制, 研究结果可为城市洪涝灾害防控提供理论和技术支撑。

关键词: 城市洪涝灾害; 动力学机制; 洪涝水动力; 承灾体; 系统动力学; 灾害链

中图分类号: TV124

文献标识码: A

doi: 10.3724/j.slxb.20250622

1 研究背景

城市暴雨洪涝灾害已成为全球多个国家所面临的通病问题, 随着城市化规模性扩张建设, 其面临洪水的风险也不断提高^[1]。根据EM-DAT记录全球洪涝灾害数据集(1900—2020年), 沿海地区、大江大河中下游地区、以及建筑密集且排水设施薄弱地区的城市容易发生洪涝灾害, 如中国东南沿海、东南亚沿海国家、美国东部近海岸、印度恒河流域、亚马逊河流域、欧洲部分老城等都是洪涝灾害易发地区。2000—2020年间洪灾影响在东亚地区最为严重、非洲地区增幅最快, 未来在高风险发展环境下洪涝暴露度也将持续加剧^[2]。据《2024年全球自然灾害评估报告》指出, 与近30年(1994—2023年)均值相比, 2024年全球自然灾害直接经济损失偏多49%, 其中洪水灾害最为频繁, 发生128次, 受灾人口达4884.24万人^[3]。国家防灾减灾救灾委员会办公室发布的“2025年全国自然灾害情况”显示, 2025年呈现北方主汛期汛情灾情严重、西南地区地质灾害损失较重的特点, 因洪涝和地质灾害造成的死亡失踪人数为568人、直接经济损失达到1665.76亿元。

城市暴雨洪涝灾害已呈现趋强、趋多、趋广的发展态势。据统计, 2023年全国城市洪涝灾害105次, 主要分布在长江、太湖、珠江流域, 特别是两广、中部、华北平原等地区较为频繁。2025年进入梅雨季节后, 洪涝问题严峻, 如湖北武汉“5·22”、广东怀集“6·18”、贵州榕江“6·24”^[4]、北京“25·7”等暴雨灾害事件, 将城市安全再次带入到人们讨论的“热点”中。虽然我国自2012年北京“7·21”暴雨灾害后, 从中央到地方大力加快出台排水防涝规划、海绵城市建设、防洪排涝规划、韧性城市建设等政策, 但面对暴雨的不确定性、灾害的复杂性、灾损的严重性, 还是难以做到全面精准

收稿日期: 2025-10-07; 网络首发日期: 2026-04-23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20260423.1405.002>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介: 徐宗学(1962—), 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

防控^[5]。城市极端暴雨会引发河道溃堤、地下空间进水、道路积水成涝、排水管道溢流，而山地型城市还会产生山洪、滑坡、泥石流等复杂灾害，在外洪和内涝耦合作用下车辆和行人被淹，基础服务设施受到破坏，造成严重的人员伤亡和经济财产损失。

一直以来面对城市洪涝灾害日趋严重问题，国内外学者从全球气候变化、城市水循环、洪涝致灾机理、洪涝过程模拟、洪涝预警预报、防洪工程布设、紧急避险救援等^[6-7]角度开展深入研究，取得丰硕的成果，指导着城市洪涝灾害防治工作的开展。但在城市洪涝灾害动力学机制研究方面，侧重于自然机理分析、忽视与社会系统的耦合；在灾害防控技术方面，侧重于单一环节防控、缺乏全链条系统化协同防治。面对新的全球变化形势，在新科技推动及新型城镇化发展需求背景下，从系统化角度解析城市洪涝致灾机理，揭示洪涝灾害动力学机制，厘清洪涝灾害的驱动要素、水动力过程、系统动力学机理及灾害链传递机制之间的逻辑关系，提出灾害防控的关键技术，可为城市洪涝灾害防控提供理论和技术支撑。

2 城市洪涝灾害防控面临的挑战

2.1 未来变化环境下洪涝风险不确定性增加 气候变化影响着全球和区域降水的总量和分布格局。从20世纪开始，全球陆面降雨增加了2%^[8]，在9个降雨分区中有4个区域的降水量呈现增加趋势^[9]。气候变化主要源于全球温室气体的增加，相较于过去，近一个世纪以来全球地表平均温度上升1.1℃，而全球温度每升高1℃，大气可容纳的水汽量会增加约7%^[10]。地表温度升高加剧大气垂直对流运动，积累更多不稳定能量，触发短时强降雨。当地面露点温度达到26℃时，大气可降水量一般在60mm以上，海表温度升高促使海洋型台风生成频次增多并携带大量水汽，易引发沿海城市特大暴雨^[11]。与此同时，温度升高改变大气环流系统，如副热带高压北移且西伸，推动夏季风携带的暖湿气流向北输送，形成气候“南水北移”的现象。城市化率是衡量城市化发展水平的重要指标，截至2025年末中国人口城镇化率达到67.89%，相对于2024年末的67.00%^[12]，增长了0.89%，但与2021年之前平均增长率1.00%相比增速有所放缓，城市发展由“增量扩张”向“存量提质”转变。欧洲和美洲的发达国家城市化率超过70%，预计2050年全球城市化人口将超过66亿，平均城市化率为68%^[13]。城市化建设不仅改变了城市下垫面原本的快渗、缓排的水文特性，而且破坏了传统生态排水方式，阻断了自然汇流路径，易形成“断头流”，加之城乡温差大，易形成热岛效应，在城市地形阻障和空气中颗粒物凝结核多的作用下，进而形成雨岛效应，最终在强降雨条件下形成“产流多、汇流快、调蓄难、排水弱”的格局^[14]。因此，气候变化引发的降雨异常与城市化水文效应协同作用，最终形成“降雨总量增多—历时延长—强度增强—汇流加速”的链式反应，加剧城市洪涝灾害频发态势。

2.2 自然灾害与社会防控系统耦合机制认识不足 城市洪涝灾害是自然-社会二元水循环作用的结果。在应对极端降雨时，现有的灾害防控面临着自然水文过程与社会响应系统之间工程性脱节问题，主要体现在三个方面：（1）工程设施参数设计与社会动态需求之间存在显著错位。随着城市人口密度增大、道路交通量增多，城市降雨径流峰值和总量增多，传统排水管网1—3年一遇设计标准已无法与实际社会发展相匹配，致使高不透水排放区与低蓄排能力形成尖锐矛盾^[15]。（2）多种工程设施系统之间缺乏协同机制。极端降雨情况下外洪和内涝叠加已成为城市暴雨复合型灾害，而河湖防洪治涝与管网排水防涝分属不同管理部门，缺乏以流域-城市为整体的耦合设计和统一标准规范^[16]。（3）工程运维阶段的社会参与和责任机制严重缺失。工程防灾调控调度策略未融入公众疏散时间窗口和社会应急参数，导致水文调控与社会行动之间的时序不同步。在应对系统性洪涝风险时，暴露出系统监测能力与社会响应效能之间的非工程性耦合缺陷。首先，存在明显的部门数据壁垒，气象、水文与应急管理等领域独立运行，数据共享率低。其次，数值模拟过程中社会系统参数整合不足，未纳入公众疏散行为模式、应急资源分布等社会变量，模拟结果与实际灾情影响之间存在显著偏差^[17]。第三，预警-响应机制存在“技术—执行”断层，气象预警未能有效转化为社区层级的行动指南，导致公众响应频繁延

迟。因此,在自然灾害中需要厘清工程防御系统与社会复杂系统耦合机制关系,才能统筹二者之间的平衡。

2.3 承灾体失稳阈值与科学防控标准有待确定 承灾体失稳阈值是科学判断洪涝灾害危险程度和评价灾害损失的重要依据。当前研究城市洪涝条件下承灾体失稳阈值与失稳标准主要采用物理实验、理论分析、数值模拟等三种方法^[18-19],但每种方法均有局限性且互补性不足。物理实验层面,场景还原度与变量覆盖不足,主要表现在现有研究多采用缩尺模型或受到实验室环境限制,未充分模拟真实下垫面的坡度、流态及杂物干扰,难以复现真实洪水的紊动特性与场地环境,且测试对象特征差异较大,导致数据离散,同时缺乏对承灾体的质量和位置调整的耦合研究,使实验阈值难以外推至实际场景。理论分析层面,简化假设与参数率定缺陷显著,主要表现在现有公式多将承灾体简化为规则长方体或者复合圆柱体,忽略承灾体形态对流态的影响,且关键参数多依赖经验取值,如行人未充分整合紊动强度、群体信息交流等因素,车辆的摩擦系数、阻力系数等依赖经验,部分理论模型未纳入流态转换的非线性效应,导致公式普适性不足。数值模拟层面,建模简化与验证不足,主要表现在CFD模拟中网格划分、湍流模型选择存在主观性^[20-21],且多未开展参数敏感性分析,同时模拟结果多依赖承灾体模型数据验证,缺乏真实洪涝场景校准,且与足尺试验数据的耦合度低,难以支撑阈值标准的普适性。因此,三者共同导致失稳阈值存在显著离散性,无法形成统一科学防控标准。

2.4 灾害链精准断链和基础设施级联效应阻断技术亟待突破 极端降雨条件下洪涝灾害链的形成具有复杂多变和累积放大特征,城市基础设施受灾产生级联效应,形成高度依赖关系,这给灾害传递路径预测、演变规律解析以及精准防控措施制定带来严峻挑战^[22]。当前城市洪涝灾害链与基础设施级联效应的研究需要从两个方面亟待突破:(1)灾害传递路径难以精确阻断。短时雨、移动雨成为城市洪涝灾害的新型雨型,具有显著的时空异质性和不确定性,这给暴雨预测带来了严峻的挑战^[23]。灾害链形成过程和基础设施级联效应中灾害节点和连接边相互耦合,呈现“多点触发、跨域传导”特征。当前单一系统的局部防控难以切断灾害系统整体形成路径,且系统各部分脆弱性阈值存在差异,难以通过统一标准实现全链条阻断。与此同时,城市洪涝监测体系存在“碎片化、多源异构”问题,多部门监测数据未能实施互通,难以实现对灾害链和基础设施级联效应的全节点的实时追踪,无法做到关键节点识别和精确阻断。(2)防灾措施难以精准布控到灾害链和基础设施级联效应上。虽然基于机理的物理模型和基于数据驱动的数学模型能够推演洪涝灾害过程,但是模型参数精准度不高、演算尺度不够精细以及基础设施级联效应的传递关系不明,难以精准刻画灾害发生过程。现有城市洪涝灾害主流防控技术多针对灾害系统单一环节设计,难以匹配“多环节、跨系统”的灾害链。对于一些实时防控措施需要及时响应,但现有协同机制存在“数据壁垒、决策不同步”问题,导致防控技术难以形成精准合力,造成防控措施的时空滞后性。因此,现有城市洪涝灾害链防控措施和基础设施级联效应阻断措施既面临技术上的局限性,也存在机制上的制约性。

3 城市洪涝灾害动力学机制辨析

面对当前城市洪涝灾害防控面临的主要挑战,需要从城市洪涝灾害系统的动力学机制出发,解析洪涝灾害自然作用机制、承灾体失稳破坏机理、社会系统响应机制、灾害链传递破坏机制,为研究城市洪涝灾害防控关键技术提供理论支撑。

3.1 城市洪涝灾害系统动力学机制 城市暴雨洪涝灾害的形成是致灾因子危险性、孕灾环境敏感性与承灾体脆弱性共同作用的结果,该过程体现自然、社会与工程系统的耦合效应^[24]。解析城市洪涝灾害动力学机制需从四方面逐一辨析:暴雨洪涝水动力学机制、承灾体失稳破坏机理、承灾系统动态响应机制及洪涝灾害链传递机制。其中,暴雨洪涝水动力过程为承灾体失稳破坏提供作用力,承灾体失稳破坏是对暴雨洪涝致灾效应的响应,二者共同驱动承灾系统动态风险响应过程;而承灾系统内各承灾体之间的相互作用形成基础设施之间的级联效应,不同灾害事件之间构建成的洪涝灾害链,见图1。

通过承灾体失稳破坏机理的研究为洪涝水动力风险区划提供阈值参数，也为洪涝灾害链动力学机制解析提供承灾体失稳破坏规律和特征；通过洪涝水动力学机制的研究为多智能系统下承灾体动态风险评估提供致灾因子群体；通过承灾系统响应机制研究为基础设施级联效应评估提供理论依据，也为不同灾害事件之间形成灾害链的韧性评估提供鲁棒性评价依据。

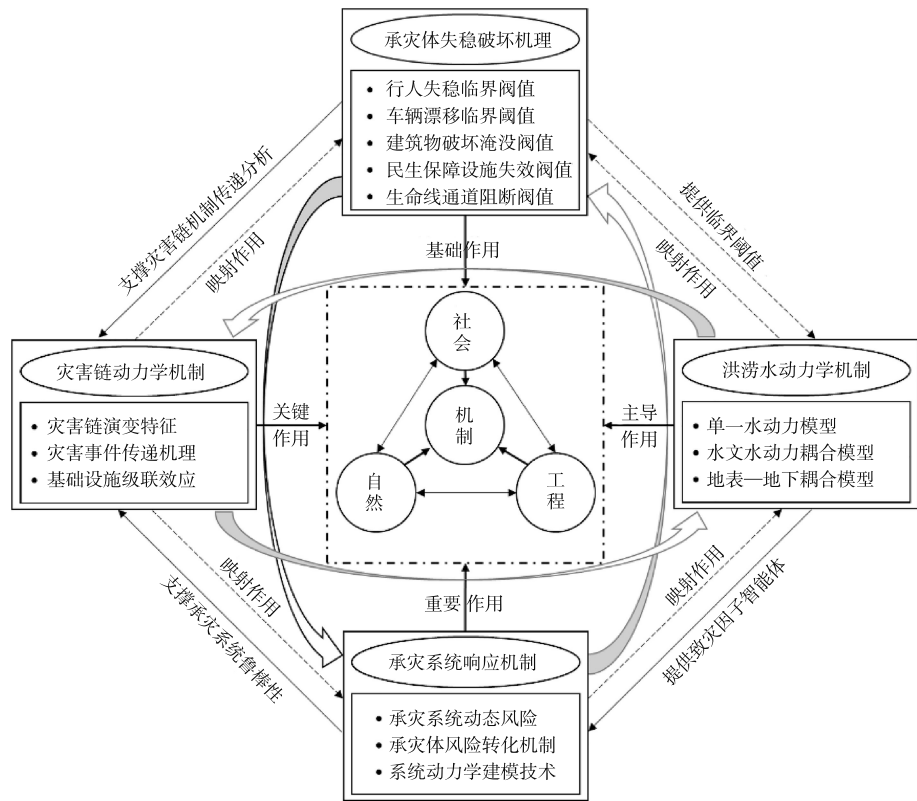


图1 城市洪涝灾害系统动力学机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system dynamics mechanism of urban flood disasters

暴雨洪涝水动力学聚焦于由暴雨引发的洪涝过程，核心是研究地表产流、管网汇流及地表漫流的水流运动规律，进而揭示洪水在不同时空尺度下的流速、水深及影响范围^[25-26]。在不同下垫面类型与地形坡度条件下，承灾体遭遇洪水冲击或涝水淹没时易发生倾倒或破坏。通常采用物理实验和数学模型方法，推演承灾体在水流浮力与推力作用下的失稳或破坏过程，以此揭示承灾体失稳破坏机理，进而划定暴雨洪涝水动力作用的临界阈值^[27]，为洪涝灾害风险区划定提供技术支撑。

承灾系统遭受洪水冲击后，依托自身鲁棒性开展抵御响应，并随城市洪涝灾害风险变化进行动态调整^[28]。通过将社会系统中承灾体概化为智能主体，耦合致灾因子和孕灾环境，构建城市洪涝灾害多智能体系统，实现智能互联，量化承灾体受灾风险；同时借助系统动力学建模技术，揭示承灾系统内不同风险等级承灾体间的转化机制^[29]。城市洪涝灾害系统内各承灾体随时空演变发生物质与能量传递，进而形成灾害链。通过构建复杂网络理论，评估灾害传递过程中承灾体之间的影响概率与不确定性，揭示灾害链传递机制并量化暴雨洪涝灾害链的风险^[30]。

3.2 城市暴雨洪涝条件下承灾体受灾破坏机理 承灾体的失稳与破坏既受其自身内在脆弱性的制约，也受外部环境危险性的影响。城市洪涝的危险性与场地洪水流态形式、坡度与下垫面粗糙度、设施与障碍物分布等因素有关^[31]，这些因素直接决定着洪水的推力、浮托力以及承灾体的抗滑力，见图2所示。当地形坡度大、地表粗糙度低、障碍物少时，场地形成洪水的机械能大、破坏力强，产生的危险性高，同样作用力小、破坏力弱的洪水，不会造成严重损失。承灾体面对洪水时易出现失稳、漂浮和破坏，如行人遇水时会失稳、滑倒和溺水^[32]，车辆遇水时会漂浮、侧倾及失控，建筑物遭洪水侵袭时

会渗漏、淹没甚至垮塌，城市民生保障设施和生命线通道，遭遇洪涝冲击时会出现功能失效、通道阻断的风险，这些都是承灾体自身抵抗能力小于洪水攻击力的结果。洪水造成承灾体失稳主要通过流速和水深关键参数来实现，小水深大流速条件下的水流推力大于承灾体接触有效摩擦力、大水深小流速条件下承灾体受到的漂浮和失稳力矩大于抵抗力矩，因此水深大或流速高行人会漂浮失稳或推拉倾倒，车辆会动力失效或侧向滑移^[18,33]。洪水造成建筑物破坏主要是洪水的动能、势能与建筑结构的抗压性能、抗渗性能相互作用结果，当水深形成的水压、流速产生的动能冲击超出建筑墙体的承载能力时引发墙体垮塌，当积水渗透力突破地基防渗阈值时造成地基渗漏，同时积水侵入建筑内部形成室内进水^[34-35]。洪涝深度造成城市基础设施被淹没、流速造成关键设施被冲毁，均会造成民用保障设施失能失效，城市道路和运输铁路因涝阻断、因毁阻隔，均会造成生命线通道停运失效。

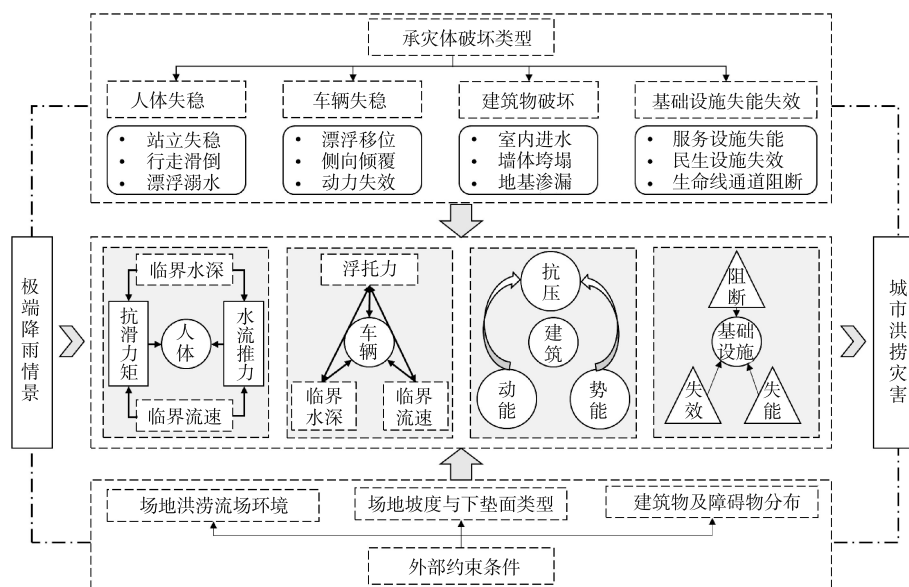


图2 承灾体受灾破坏机理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the damage mechanism of hazard-affected bodies

临界阈值是判断洪涝致灾的重要标准，早在五十年前国外学者就采用水槽试验模拟室内外洪水冲击行人过程，利用特技演员、成年男女以及适龄儿童进行实验，从身高、体重和行姿判断失稳的临界水深和流速^[36-37]。该方法得到人体主要有失稳和滑移两种模式，并利用大量实验数据推理力学平衡关系，形成以水深和流速、单宽流量、水流要素和人体特征相结合的失稳判别公式^[38-40]，这为以行人作为判定标准的城市洪涝灾害风险划分提供依据。城市洪涝条件下车辆失稳分为漂浮、滑动和倾倒，早期研究也采用水槽试验法揭示失稳机理^[41]，部分学者采用水动力平衡理论分析法^[42]，随着计算机技术的发展，引入数学工具如CFD、Flow-3D、FVM、SPH模型，模拟洪水流态过程并与试验数据进行比对分析^[43]，在失稳判断标准识别方面与行人采用相似的方式。城市洪涝条件下建筑物的倒塌破坏和基础设施失能失效的研究方法主要包括缩尺或足尺模型试验、数值模拟及理论建模^[44]，依据水动力参数中流速、水深，与结构力学性能中抗压强度、抗倾覆力矩的耦合关系，当水流推力矩超过结构抗滑或抗倾覆力矩、洪涝水压突破墙体承载阈值时判定为倒塌^[45-46]；当水深超过基础设施的防淹阈值、能量超过防御阈值，则认为民用服务设施会出现失能失效，城市生命线通道受到阻断。

3.3 城市暴雨洪涝灾害水动力学机制 暴雨引发的水流运动是“产流—汇流—漫流”过程与多空间交互耦合的动态过程。地表产流阶段分为两部分，一部分降雨通过土壤孔隙下渗形成地下径流，另一部分降雨满足植被截留与洼地填注后，在超渗或蓄满条件下形成地表径流。进入管网汇流阶段，地表径

流通过雨水口、检查井汇入管网，形成“地表—管网”交互，管网末端则通过排水口将径流排入河湖，完成“管网—河湖”交互^[47]。地表漫流阶段，管网中回溢至地表的径流与未汇入管网的径流，沿地形坡度形成地表漫流，过程中受建筑物、道路阻隔发生分流，部分水流直接汇入河湖，形成“地表—河湖”交互，另外一部分则在低洼位置形成内涝积水^[48]。气候变化与城市化显著重塑降雨“产—汇—漫”与多空间的交互特征^[49-50]，一方面，城市化缩减雨水的地表下渗量，加快地表汇流，导致管网汇流峰值提前、流量骤增，“管网—河道”排水压力陡升，使得“管网—地表”溢流频次增加，雨水溢流量加剧；另一方面，城市地表排水通道受到破坏，地形阻碍效应突出，雨水径流向低洼路段、下凹桥区、人工地下空间等汇集加重城市内涝积水，加之外洪入城，易形成洪涝连片效应。

城市化水文效应的多空间交互本质是“自然—社会”二元水循环系统耦合作用的体现^[51]。自然水循环维度，“地表—地下”通过下渗与补给实现水分交换，“地表—河道”依托径流排放通道与河道水位调节形成动态平衡，体现水分在自然介质中的迁移规律；社会水循环维度，人工管网强制改变“地表—河道”自然汇流路径，地下工程干预“地表—地下”交互，泵站、调蓄池调控“管网—河道”排水节奏，人类活动与自然过程的交互决定洪水空间分布特征^[52]。城市暴雨径流多空间交互模拟采用水文模型、水动力模型、水文水动力耦合模型^[7,53]，其中水文模型是通过简化水流运动的物理过程，利用下渗公式计算“地表—地下”下渗量，推算汇水区出口流量。水动力模型基于流体力学浅水方程，考虑水流的动量守恒与质量守恒，通过数值离散模拟“地表—河道”漫流与河道水位的耦合变化，模拟地表漫流的流速分布、水深变化、淹没范围及水流与障碍物的相互作用。水文水动力耦合模型则整合两类模型的优势，能准确反映水流在不同介质中的运动规律，为复杂城市洪涝过程模拟提供科学支撑。通过收集气象降雨、水文地质、地表类型、数字高程、排水管网等基础数据，构建城市地理信息系统数据库，建立水文模型、水动力模型，通过单项或双向方式进行耦合，演算城市洪涝水流运动过程，揭示洪涝灾害水动力学机制，见图3所示。

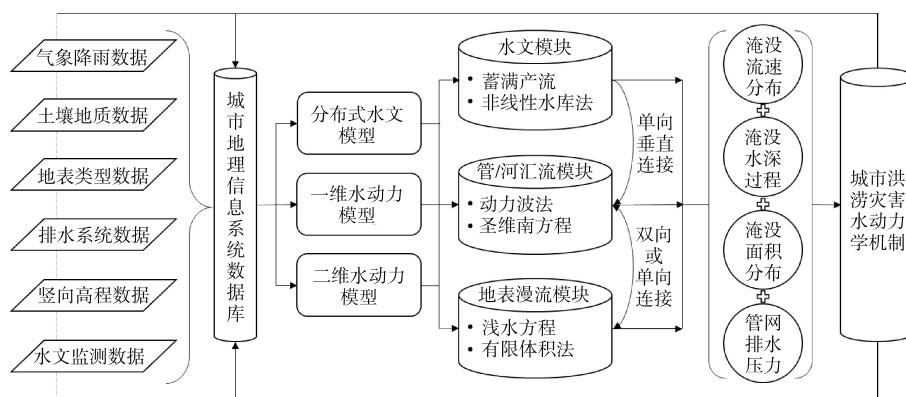


图3 城市暴雨洪涝灾害水动力学机制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the hydrodynamic mechanism of urban flood disasters

3.4 城市洪涝灾害承灾系统响应动力学机制 城市洪涝灾害驱动自然系统与社会系统的耦合，将洪涝灾害视为驱动因子、社会系统受灾对象视为承灾体、自然环境为约束条件，构建涵盖孕灾、致灾、承灾三者协同共建的多智能体系统，各部分呈现“空间约束—动力输入—行为响应”的层级耦合关系^[54]。孕灾环境包含研究边界、竖向高程、建筑物分布、道路走向及水系分布，为系统提供空间维度的约束条件，明确承灾体与致灾因子的交互场景；承灾体分为具有主观能动性的居民、车辆两类主体和具有客观响应性的建筑物、基础服务设施等主体，其中主观能动型承灾体通过提前预判、主动避险策略定义其避灾行为，客观响应型承灾体通过监测、感知、被动防护方式定义其响应行为；致灾因子以水深和时间风险图、流速和水深风险图、受力机制风险图为核心，量化洪涝致灾的水动力条件，为承灾体的风险响应提供动力输入^[55]。三者通过多智能体系统形成联动，依托智能体通信机制与运行规

则，实现不同承灾体间的信息与行为交互：孕灾环境的空间特征与致灾因子的水动力风险共同作用于承灾体，触发其风险响应行为，进而驱动承灾体动态风险变化趋势、不同风险等级承灾体间相互转化，以及洪涝灾害避险前后承灾体风险大小的动态演变，完整呈现承灾系统从风险触发到响应演化的动力学过程^[56]，见图4所示。

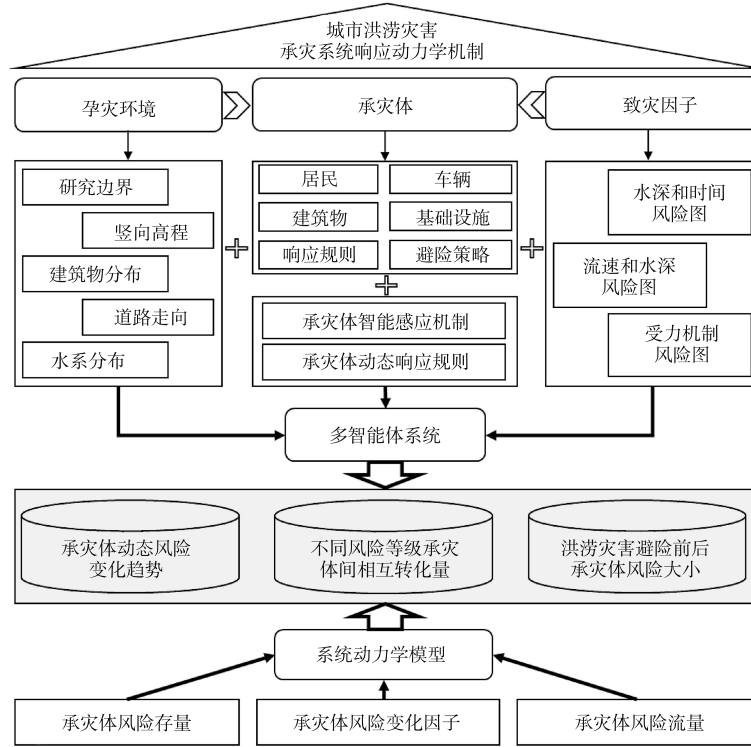


图4 城市洪涝灾害承灾系统响应动力学机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the response dynamics mechanism of urban flood disaster-bearing systems

系统动力学模型通过整合存量、变量因子与流量，实现对承灾体风险变化进行验证。模型以承灾体风险存量刻画承灾体的初始风险状态，以承灾体风险变化因子反映风险等级转化的驱动因素，以承灾体风险流量模拟风险在不同承灾体间的传递过程，最终输出承灾体动态风险变化趋势、不同风险等级承灾体间的相互转化量及洪涝灾害避险前后的承灾体风险大小。通过将系统动力学模型与多智能体系统进行相互验证，一方面，通过量化居民、车辆在灾害中的风险演化过程，验证多智能体系统对承灾体行为模拟的准确性；另一方面，通过调整承灾体的避险策略(如优化居民疏散路径、调整车辆避险规则)，对比不同场景下的风险变化结果，为城市洪涝灾害的避险策略优化、应急资源配置提供科学依据^[57]。在典型城市洪涝灾害的案例研究中，该模型推演了暴雨灾害下人口受灾的动态风险及演变趋势^[58-59]，为当地防洪排涝工程设计与应急管理方案制定提供了量化支撑，显著提升了承灾系统响应机制研究的实践价值。

(1)系统动力学建模原理公式：

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + dx \\ y_t = y_{t-1} + dy \\ z_t = z_{t-1} + dz \\ w_t = w_{t-1} + dw \end{cases} \quad (1)$$

式中： x_t 、 y_t 、 z_t 分别为 t 时刻安全承灾体、较安全承灾体、以及危险承灾体的存量值； x_{t-1} 、 y_{t-1} 、 z_{t-1} 分别为 $t-1$ 时刻安全承灾体、较安全承灾体、以及危险承灾体的存量值； dx 、 dy 、 dz 分别为单位时间下安全承灾体、较安全承灾体以及危险承灾体的变化量值； w_t 、 w_{t-1} 、 dw 分别为 t 时刻救援承灾体的存量值、 $t-1$ 时刻救援承灾体的存量值、单位时间下救援承灾体的变化量值。

(2)城市洪涝灾害中承灾体遇险响应系统动力学方程：

$$\begin{cases} dx = -ax - bx + qy \\ dy = ax - cy - qy \\ dz = bx + cy \end{cases} \quad (2)$$

式中： x 、 y 、 z 分别为安全承灾体数、较安全承灾体数以及危险承灾体数； a 为安全向较安全承灾体的转变因子； b 为安全向危险承灾体的转变因子； c 为较安全向危险承灾体的转变因子； q 为较安全向安全承灾体的转变因子。

3.5 城市暴雨洪涝灾害链动力学演变机制 城市暴雨洪涝灾害链以极端暴雨为触发源，呈现“原生一次生一衍生”的层级链式结构，各灾害事件通过洪水水流、动能等物质与能量载体实现跨灾种动态传递^[22]。原生灾害事件由暴雨直接驱动形成，次生灾害事件由原生灾害触发，衍生灾害事件由次生灾害进一步衍生，三者呈“触发—放大—蔓延”的递进关联，共同构成具有时间先后与影响叠加特征的灾害事件集^[60]。灾害链的传递机制依赖灾害事件之间的逐级传递作用：灾害事件Ⅰ因暴雨产流、地表漫流引发承灾体的功能失效与破坏，通过水流的空间迁移与能量传递触发灾害事件Ⅱ生效，进而波及灾害事件Ⅳ发生，形成“灾害Ⅰ级→灾害Ⅱ级→…→灾害Ⅳ级”的致灾体链式响应。城市洪涝灾害系统驱动过程由三大核心要素耦合推动：一是极端暴雨的能量输入，以降雨强度、历时为关键指标，决定灾害初始触发强度与范围；二是孕灾环境的脆弱性，涵盖场地地势坡度、下垫面类型分布、地下排水管网及构筑物等，直接影响灾害的传递效率与空间分布；三是承灾体的抗灾能力，包括建筑结构强度、基础设施抗灾能力、人员避险意识、应急管理执行能力等，显著影响灾害系统的最终破坏程度与演化路径。暴雨引发的原生灾害，在新的孕灾环境中转变为致灾因子，驱动次生灾害的形成，接着继续受环境要素的影响作用于承灾体，引发衍生灾害的产生，从原生灾害到次生灾害再到衍生灾害，推动灾害链从暴雨触发阶段向多灾种逐级连锁动态演进^[61]。

(1)城市暴雨洪涝灾害链可表示由多个相互关联的灾害链要素所组成的系统^[22]

$$S(n) = \{S_f(n), R, E\} \quad (3)$$

式中： $S(n)$ 为暴雨洪涝灾害链系统，由 n 个相互关联的灾害要素组成， $n \geq 2$ ； $S_f(n)$ 为灾害链要素，指灾害链中各类灾害事件，即为事件本体； R 为各灾害事件之间的关联关系，如致灾损失度或风险度； E 为灾害链所处的环境，即孕灾环境的敏感性。

(2)城市暴雨洪涝灾害链系统的内部状态(S_{in})表示为式(4)，外部表现为(H_z)见式(5)。

$$S_{in} = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_n\}, S_i \in A_i = \{A_1^i, A_2^i, \dots, A_i^i\} \quad (4)$$

$$H_z = F_h(R, S_{in}) \quad (5)$$

式中： S_i 、 A_i 分别为灾害链 $S(n)$ 中灾害要素的状态和状态空间； H_z 是 S_{in} 和 R 的函数。

城市暴雨洪涝灾害链可概化为以“灾害事件+致灾体”为节点、以节点间的作用关系为边构建的复杂网络系统^[62]。灾害链系统的重要程度和脆弱程度受节点重要度和边脆弱性决定^[63]，见图5所示，其中节点重要度通过度中心性、接近中心性、介数中心性三维指标综合评估：度中心性体现其在网络中的局部影响力，接近中心性表征其全局可达性，介数中心性凸显其对网络信息流的控制能力。节点重要度越高，越是灾害链网络的关键“桥梁”，属于灾害链的“咽喉”部位。边脆弱性通过边介数、连通度、平均路径长度量化衡量：边介数反映边作为灾害传递中介的次数，连通度表征边对网络连通性的贡献度，平均路径长度则体现边失效后网络路径的变化程度。边脆弱性越显著，其失效引发的灾害链分支扩张效应越强。评估灾害链风险时需整合节点风险与边风险，通过耦合两者的风险贡献度可计算系统综合风险^[64]。承灾系统与灾害链鲁棒性呈显著负相关，通过强化关键节点和高脆弱边的防护措施，可有效降低灾害链的级联失效概率，进而提升承灾系统对洪涝灾害链的抵御能力与灾后恢复效能^[65]，为城市洪涝减灾的靶向性决策提供理论支撑。

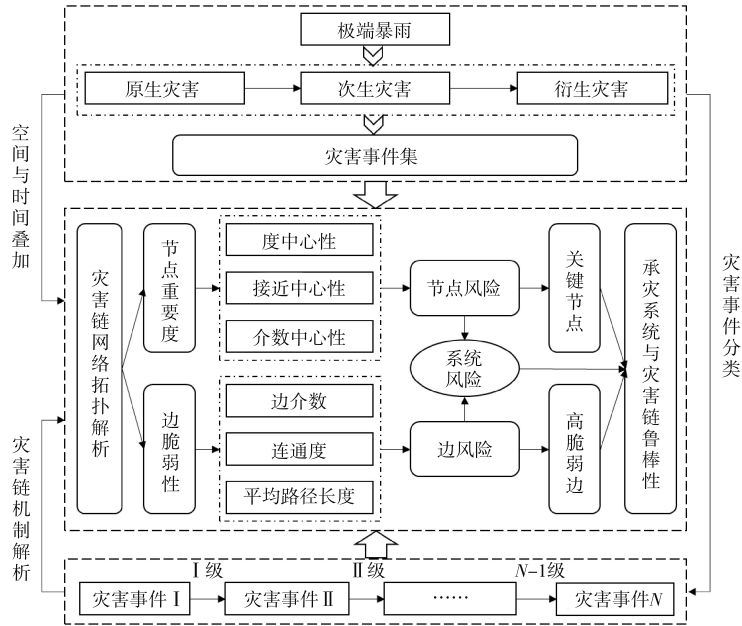


图5 城市洪涝灾害链动力学机制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the dynamic mechanism of urban flood disaster chains

4 城市洪涝灾害防控关键技术

4.1 极端降雨监测与洪涝模型高精度耦合模拟技术 降雨监测是暴雨灾害预警预报的重要基础，而洪涝过程模拟是推演洪涝变化过程的重要手段，将二者进行高精度耦合可实现“实时降雨监测—数据融合—灾害模拟”的全过程洪涝灾害评估。提高降雨监测与洪涝模拟高精度耦合需要从三个方面实现相关技术的提升：(1)降雨精细化监测技术。利用高精度监测技术工具，如卫星遥感^[66]、双偏振雷达^[67]、物联网地面密集站网及北斗信号^[68]，将降雨监测网格精确至最小，实时采集雨量、雨滴动能，精准捕捉短时强降雨时空突变。(2)洪涝精准化模拟技术。常用模拟手段有基于流域产汇流机理的水文模型、基于流体力学方程的水动力模型，以及基于数据驱动的机器学习模型三大类^[69]，其中水文模型场景模拟单一且精度低、水动力模型费时计算效率低。通过GPU加速的非结构网格水动力模型、多物理场耦合模型、以及人工智能增强深度学习模型，实现模拟效率的提升和预测误差的降低。(3)数据高精度耦合技术。依托四维变分同化、集合卡尔曼滤波等技术，将实时降雨监测数据分钟级输入洪涝模型中，结合数字孪生和人工智能技术，构建“监测—模拟—反馈”闭环，实现洪水淹没深度预测误差15%以下^[70]，有效支撑精细化推演。

4.2 承灾体失稳智能判别与动态风险评估技术 城市暴雨洪涝条件下承灾体失稳与破坏标准是承灾体受灾风险的评估依据。通过城市洪涝灾害的水流形态和水力参数进行智能感知、视觉学习及自适应判断，并与承灾体的失稳阈值进行比较，判断承灾体风险状态，为有效采取针对洪涝区预警、封锁及应急救援提供技术支撑^[71]。结合城市道路监测系统，一般采用以下三种技术：(1)摄像视觉积水识别技术^[72]。依托道路交通摄像头，基于深度学习实时分析道路路面反光纹理、车辆涉水姿态及行人步态异常，结合阴影检测与水体光谱特征，识别洪涝水深，联动交通信号系统设置预警响应时间。(2)多源数据传感融合技术。在城市低洼路段安装液位计和超声波流速仪，与路口摄像头联动，通过边缘计算实时生成积水热力图，当水深或流速临界阈值时，自动触发电子屏警示并推送至应急管理平台。(3)AI驱动的自适应判别模型。基于城市洪涝历史数据库训练长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)与卷积神经网络(Graph Convolutional Networks, GCN)相结合的深度学习模型^[73]，实时融合气象降雨数据、管网流量数据及摄像头识别数据，动态更新道路积水风险等级，比较并判断承灾

体失稳风险。城市洪涝灾害中承灾体动态风险是基于承灾体失稳标准、洪涝灾害风险等级、承灾体自我避险常识等综合模拟评估。承灾体动态风险评估可采用两种技术：(1)基于多智能体系统的风险评估方法^[54]。以微观行为驱动城市洪涝承灾体动态风险评估，通过划分孕灾环境、致灾因子、承灾体三类智能体，嵌入人口迁移、车辆避险等行为规则，引入“救援策略”动态调整承灾体受灾风险。(2)基于系统动力学模型的风险评估方法。构建“降雨—产流—管网—承灾体”因果回路，借微分方程和动态权重法量化风险累积，耦合“集总冲击参数”区分人车路水力响应差异。

4.3 城市洪涝灾害链动力学建模与智能阻断技术 城市洪涝灾害链系统是以外洪内涝与社会承灾体耦合作用机制为核心，覆盖流域外洪演进、城市内涝蔓延至承灾体响应的全链条过程。灾害链动力学模型构建过程综合考虑自然与社会之间的耦合关系，通过整合多源数据同化、多尺度洪涝建模、复杂网络分析及系统动力学等技术，实现宏观流域水文过程、中观城市洪涝蔓延以及微观应急响应。利用数值模拟方法构建“流域—城市”洪涝流场与承灾体作用的水动力学过程；以复杂网络理论为基础，构建灾害链网络模型，识别构建“降雨—洪涝—设施失效—社会响应”因果灾害链，量化节点脆弱性与边关联强度，计算灾害链风险度；借助系统动力学建模技术，动态模拟灾害链各环节的时序演化关系；利用贝叶斯概率方法修正各节点灾害损失等级的联合概率分布，提升灾害损失量化的准确性。灾害链的智能断链技术按照降雨发生时间分为灾前监测预警技术、灾中动态推演技术、灾停快速恢复技术，其中雨前监测预警技术利用降雨预测+模型评估技术^[74]，推演“极端降雨—洪涝分布一致灾点位”触发点，通过社交媒体进行预警预告。雨中动态推演技术利用水文监测设备、知识图谱推演及动态贝叶斯网络预测技术^[75]，实时感知城市洪涝的水流严重区域，绘制洪涝推演路径，标定典型灾害链“扩散点”，动态更新灾害链传递概率，及时切断关键节点。雨停快速恢复技术利用无人机热红外遥感快速评估受损节点，区块链同步更新修复进度，保障“供电恢复—通信重启—交通疏导”的时序协同。

4.4 城市洪涝防治韧性提升与自适应性优化技术 在水利高质量发展转型背景下，城市应对洪涝灾害的韧性提升技术需构建多源感知、精准模拟、工程—生态协同干预的一体化体系^[76-77]。构建空天地协同感知网络，布设高密度监测节点实时捕捉极端降雨、潮位等致灾因子动态。运用二维水动力模型与GIS栅格计算技术，融合土地覆盖糙率，精准反演淹没范围与水深分布，通过空间网络分析识别路网脆弱节点。针对不同地域特征实施差异化干预，沿海地区构建红树林湿地防波堤与智能闸门混合防御体系抵御风暴潮，平原地区合理加固加高河道堤坝、布局分布式雨水调蓄系统，按照资源优化配置合理和投资效益最大化的原则，建设分级响应、平急两用、多联互动的基础设施，强化设施的承灾韧性，降低链式传播风险。城市应对洪涝灾害需要建立自适应策略，立足于动态风险管控与多尺度协同中，以流域、城市、社区、建筑多级统筹为基础，结合危险性—暴露度—脆弱性适应能力评估框架制定方案。流域层面统筹防洪工程调度，优化蓄滞洪区规划避免上游强排导致下游风险转移；城市层面加强城市整体蓄排能力建设，针对沿海高风险区实施竖向设计与路网加密，针对平原城市推行低影响开发控制不透水率；社区层面优化应急避难布局，提升步行可达避难场所密度，合理规划社区地块与市政道路的竖向高差，防“客水”倒排进入社区；建筑层面加固建筑基底防冲击能力，合理提高建筑首层距地标高，提升地下空间入口挡水防淹能力。建立多部门数据互通的协同机制，动态更新防控预案^[78]，通过公众防灾教育与洪涝保险风险分担制度，构建社会适应机制，实现对气候变化与城市化带来的风险不确定性的动态适配，避免单一静态规划的局限性，切实提升城市在洪涝灾害冲击下的吸收响应与恢复能力。

5 结论

通过本文的研究工作，可以得到以下几点结论：

(1)从城市洪涝灾害风险挑战来看，当前城市洪涝灾害防控面临着洪涝风险不确定性增加、城市洪涝风险管控中自然与社会系统耦合机制认识不足、承灾体受灾防控标准不明、灾害链精准防控技术

欠缺等挑战, 这些挑战共同制约着现有灾害防控体系的实施效能, 凸显出深入解析灾害动力学机制与研发灾害防控技术的迫切性。(2)从城市洪涝灾害动力学机制来看, 城市洪涝灾害是“自然-工程-社会”多元系统耦合驱动的复杂过程, 其动力学过程涵盖暴雨洪涝水动力学、承灾体失稳破坏、承灾系统响应及灾害链传递等四大关键机制。(3)从城市洪涝灾害防控策略来看, 围绕城市洪涝灾害动力学机制特征, 提出基于“监测预警—精准模拟—智能判别—动态评估—断链阻断—韧性提升”的城市洪涝灾害防控技术体系, 该体系有利于显著提升城市洪涝灾害应对韧性与精准防控能力, 为工程实践提供技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] RENTSCHLER J, AVNER P, MARCONCINI M, et al. Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985[J]. *Nature*, 2022, 622(7981): 87-92.
- [2] ZHANG Q, LI C, WEN D, et al. Global South shows higher urban flood exposures than the Global North under current and future scenarios[J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 594.
- [3] 应急管理部-教育部 减灾与应急管理研究院, 北京师范大学 国家安全与应急管理学院, 应急管理部-国家减灾中心, 等. 2024年全球自然灾害评估报告[R/OL]. 2025. <https://www.preventionweb.net/publication/documents-and-publications/2024-global-natural-disaster-assessment-report>. (Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management-Ministry of Education, School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, National Disaster Reduction Center of China, Ministry of Emergency Management, et al. 2024 Global natural disaster assessment report[R/OL]. 2025. (in Chinese))
- [4] 袁泽, 周秋文, 杨航, 等. 贵州榕江县“2025·6”暴雨洪水特征分析[J]. *人民珠江*, 2026, 47(1): 73-82. (YUAN Z, ZHOU Q W, YANG H, et al. Analysis of characteristics of heavy rain and flood in Rongjiang County, Guizhou Province in June 2025[J]. *Pearl River*, 2026, 47(1): 73-82. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] THAKUR D, MOHANTY M. A synergistic approach towards understanding flood risks over coastal multi-hazard environments: Appraisal of bivariate flood risk mapping through flood hazard, and socio-economic-cum-physical vulnerability dimensions[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 901: 166423.
- [7] 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 Z X, YE C L. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: Principle, models and prospects[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [8] TRENBERTH K. Changes in precipitation with climate change[J]. *Climate Research*, 2011, 47(1): 123-138.
- [9] SCHUSTER Z, POTTER K, LIEBL D. Assessing the effects of climate change on precipitation and flood damage in Wisconsin[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(8): 888-894.
- [10] SWAIN D, PREIN A, ABATZOGLOU J, et al. Hydroclimate volatility on a warming earth[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2025, 6: 35-50.
- [11] 崔梦雪, 向纯怡, 张晗昀, 等. 台风“杜苏芮”(2305)引发福建极端强降水的特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(4): 11-20. (CUI M X, XIANG C Y, ZHANG H Y, et al. Characteristics of extreme precipitation in Fujian induced by Typhoon Doksuri(2305)[J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2023, 43(4): 11-20. (in Chinese))
- [12] 唐亚林. 中国城镇化发展规律与中国特色城市化新路子[J]. *政治学研究*, 2025(6): 46-52, 213-214. (TANG Y L. The laws of urbanization development in China and the new path of urbanization with Chinese characteristics[J]. *CASS Journal of Political Science*, 2025(6): 46-52, 213-214. (in Chinese))
- [13] MA D, YAN Y, XIAO Y, et al. Research on the spatiotemporal evolution and influencing factors of urbanization and carbon emission efficiency coupling coordination: From the perspective of global countries[J]. *Journal of Envi-*

ronmental Management, 2024, 360: 121153.

- [14] 宋晓猛, 徐楠涛, 张建云, 等. 中国城市洪涝问题: 现状、成因与挑战[J]. 水科学进展, 2024, 35(3): 357–373. (SONG X M, XU N T, ZHANG J Y, et al. Urban flooding in China: current status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357–373. (in Chinese))
- [15] 徐宗学, 陈浩, 任梅芳. 变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 33–40, 51. (XU Z X, CHEN H, REN M F. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 33–40, 51. (in Chinese))
- [16] 刘曾美, 熊恩敏, 雷勇, 等. 城镇内涝防治中市政排水与水利排涝的标准衔接研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 125–132. (LIU Z M, XIONG S M, LEI Y, et al. Study on design standard matching between municipal drainage and water conservancy drainage in urban local flood control[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 125–132. (in Chinese))
- [17] CHEN P, ZHANG J Q, SUN Y Y, et al. Wargame mapping and implementation for emergency evacuation of residents in urban waterlogging disaster[J]. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2018, 8(1): 43–51.
- [18] 李俊奇, 汪辉, 李小静, 等. 城市洪涝条件下车辆失稳风险阈值及判别标准研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(3): 30–45. (LI J Q, WANG H, LI X J, et al. Research progress on vehicle instability risk threshold and discriminant criteria under urban flooding condition[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(3): 30–45. (in Chinese))
- [19] 夏军强, 董柏良, 周美蓉, 等. 城市洪涝中人体失稳机理与判别标准研究进展[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 153–163. (XIA J Q, DONG B L, ZHOU M R, et al. Review on instability mechanisms and criteria of human body in floodwaters[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 153–163. (in Chinese))
- [20] ZHU Z F, GUO L F, LIU S Y, et al. Effect of urban neighbourhood layout on the flood intrusion rate of residential buildings and associated risk for pedestrians[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 92: 104485.
- [21] LIU S Y, ZHU Z F, WU W Q, et al. Effects of building configuration and upstream buildings on pedestrian risk around ideal buildings in a floodwater – wind joint environment[J]. Journal of Hydrology, 2024, 642: 131865.
- [22] 刘文方, 肖盛燮, 隋严春, 等. 自然灾害链及其断链减灾模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2675–2681. (LIU W F, XIAO S X, SUI Y C, et al. Analysis of natural disaster chain and chain-cutting disaster mitigation mode[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2675–2681. (in Chinese))
- [23] MENG D S, LIAO Y X, DENG Z F, et al. Spatially moving non-uniform rainstorms may exacerbate urban flooding disasters[J]. Journal of Hydrology, 2025, 660: 133374.
- [24] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1–9, 46. (XU Z X, LU X C, SHI Q M. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1–9, 46. (in Chinese))
- [25] 黄国如, 陈文杰, 喻海军. 城市洪涝水文水力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 334–344. (HUANG G R, CHEN W J, YU H J. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334–344. (in Chinese))
- [26] HE J, ZHANG L M, XIAO T, et al. Deep learning enables super-resolution hydrodynamic flooding process modeling under spatiotemporally varying rainstorms[J]. Water Research, 2023, 239: 120057.
- [27] 李国一, 刘家宏, 邵薇薇. 洪涝灾害风险评估与分区研究进展[J]. 水文, 2023, 43(4): 15–20. (LI G Y, LIU J H, SHAO W W. Research progress in flood disaster risk assessment and zoning[J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(4): 15–20. (in Chinese))
- [28] 王凯丰, 力刚, 张诚, 等. 城市洪涝韧性的研究热点及趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(4): 66–71. (WANG K F, LI G, ZHANG C, et al. Research hotspots and trend analysis of urban flood resilience[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(4): 66–71. (in Chinese))
- [29] 李雯, 姜仁贵, 解建仓, 等. 基于系统动力学的城市内涝灾害应急管理模型[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 51–57. (LI W, JIANG R G, JIE J C, et al. Emergency management model of urban waterlogging disaster based on system dynamics[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 51–57. (in Chinese))

- [30] 高玉琴, 徐诺, 汪键, 等. 基于复杂网络的洪涝灾害链风险评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 115–122. (GAO Y Q, XU N, WANG J, et al. Risk assessment of flood disaster chain based on complex network[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 115–122. (in Chinese))
- [31] 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))
- [32] ZHU Z F, ZHANG Y P, GOU L P, et al. On the physical vulnerability of pedestrians in urban flooding: Experimental study of the hydrodynamic instability of a human body model in floodwater[J]. Urban Climate, 2023, 48: 101420.
- [33] 夏军强, 陈倩, 李娜, 等. 现有洪水中人体失稳标准的评价及改进[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2): 262–268. (XIA J Q, CHEN Q, LI N, et al. Evaluation and further improvement of existing criteria for human stability in Floodwaters[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44(2): 262–268. (in Chinese))
- [34] QIN X L, WANG S F, MENG M, et al. Enhancing urban resilience through machine learning-supported flood risk assessment: integrating flood susceptibility with building function vulnerability[J]. Npj Urban Sustainability, 2025, 5(19): 1–19.
- [35] XING Z Y, YANG S, ZAN X L, et al. Flood vulnerability assessment of urban buildings based on integrating high-resolution remote sensing and street view images[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 92: 104467.
- [36] JONKMAN S N, PENNING-ROWSELL E. Human instability in flood Flows[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(5): 1208–1218.
- [37] FOSTER D N, COX R J. Stability of children on roads used as floodways[R]. Sydney: The University of New South Wales–water Research Laboratory, 1973.
- [38] ABT S R, WITTIER R J, TAYLOR A, et al. Human stability in a high flood hazard zone[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1989, 25(4): 881–890.
- [39] CHANSON H, BROWN R. Stability of individuals during urban inundations: What should we learn from field observations?[J]. Geosciences, 2018, 8: 341.
- [40] MARTINEZ-GÓMARIZ E, GOMEZ. M, RUSSO B. Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding[J]. Natural Hazards, 2016, 82(2): 1259–1278.
- [41] BONHAM A J, HATTERSLEY R T. Low level causeways[R]. Sydney: The University of New South Wales–Water Research Laboratory, 1967.
- [42] MILANESIL, PILOTTI M. A conceptual model of vehicles stability in flood flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2020, 58(4): 701–708.
- [43] AMICARELLI A, ALBANO R, MIRAUDA D, et al. A Smoothed Particle Hydrodynamics model for 3D solid body transport in free surface flows[J]. Computers & fluids, 2015, 116: 205–228.
- [44] MOHAMMAD A, JULIAN T, TATHEER Z, et al. Out of-plane failure analysis of masonry walls subjected to hydrostatic and hydrodynamic loads induced by flash floods[J]. Engineering Structures, 2024, 298: 117041.
- [45] NADIR M, CHUFRAN A P, HOSSEIN H, et al. Enhancing flood resilience: Comparative analysis of single and hybrid defense systems for vulnerable buildings[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 116, 105078.
- [46] 肖诗云, 程若桐. 波流耦合荷载作用下村镇建筑破坏机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 1–8, 54. (XIAO S Y, CHEN R T. Failure mechanism of rural buildings due to wave and current coupled loading of flood[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(2): 1–8, 54. (in Chinese))
- [47] 李小宁, 郑世威, 胡庆芳, 等. 基于城市排水过程的内涝高效模拟方法[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2024, 60(4): 509–518. (LI X N, ZHENG S W, HU Q F, et al. Simulation of high efficiency urban flood inundation in the drainage process[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2024, 60(4): 509–518. (in Chinese))
- [48] 李绍铭, 金辉, 李鹏, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市暴雨洪涝模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(5): 1143–1152. (LI S M, JIN H, LI P, et al. Urban rainstorm inundation simulation based on

- MIKE FLOOD coupling model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(5): 1143-1152. (in Chinese))
- [49] 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——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG J Y, SONG X M, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [50] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764. (SONG X M, ZHANG J Y, WANG G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II: Urban stormwater modeling and management[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 752-764. (in Chinese))
- [51] 徐宗学, 李鹏. 城市化水文效应研究进展: 机理、方法与应对措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17. (XU Z X, LI P. Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 7-17. (in Chinese))
- [52] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG H, WANG J, LIU J H, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [53] 王浩正, 冯宇, 孙文超, 等. 城市排水系统模型综述[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 1-10. (WANG H Z, FENG Y, SUN W C, et al. Review of urban drainage system models[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 1-10. (in Chinese))
- [54] LU X C, XU Z X, LI Y K, et al. A micro-macro approach to assess urban road traffic flood risk at the city scale [J]. Journal of Hydrology, 2026, 664: 134435.
- [55] 朱净莹, 戴强, 蔡俊逸, 等. 基于多智能体的城市洪涝灾害动态脆弱性计算模型构建[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1787-1797. (ZHU J X, DAI Q, CAI J Y, et al. An agent-based computing model of urban vulnerability to flood hazard[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(10): 1787-1797. (in Chinese))
- [56] 高玉琴, 王辰, 谢梦瑶, 等. 洪涝灾害人口生命损失风险动态评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 79-88. (GAO Y Q, WANG C, XIE M Y, et al. Dynamic assessment of population life loss risk due to flood disasters[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 79-88. (in Chinese))
- [57] YE C L, LIAO W H, XU Z X, et al. An innovative framework to assess the human-water relationship in complex pluvial flooding system at urban meso-scales[J]. Journal of Hydrology, 2025, 655: 132876.
- [58] LV W, DENG F. W, WANG J H, et al. Large-scale real-time evacuation modeling during urban floods: A coupled agent-based multi-model framework[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2025, 140: 103075.
- [59] 李文波, 郭啸天, 毛雪岷, 等. 基于多智能体的暴雨洪涝人口风险动态评估[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 80-87. (LI W B, GUO X T, MAO X M. The dynamic population risk assessment model for rainstorm-flood utilization multi-agent[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 80-87. (in Chinese))
- [60] WANG W, SONG Y, HUANG L, et al. Vulnerability assessment of disaster chains: A case study of rainstorm - landslide disaster chains in the Greater Bay Area[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 119(3), 105272.
- [61] 张子超, 郝蔚琳, 张伊凡. 一种复杂网络中节点安全重要性排序的度量方法[J]. 信息安全学报, 2019, 4(1): 79-88. (ZHANG Z C, HAO W L, ZHANG Y F. A measure approach for ranking the security importance of node security importance in complex network[J]. Journal of Cyber Security, 2019, 4(1): 79-88. (in Chinese))
- [62] ZHENG L, YAN D Y, JIANG H J, et al. Cascading failures in urban infrastructure systems: A comprehensive review of disaster chain mechanisms[J]. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, 2025, 4(3): 100157.
- [63] JIAO L D, LUO Q D, LU H, et al. Research on the urban rail transit disaster chain: Critical nodes, edge vulnerability and breaking strategy[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 102: 104258.
- [64] 刘爱华, 吴超. 基于复杂网络的灾害链风险评估方法的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(2): 466-472. (LIU A H, WU C. Research on risk assessment method of disaster chain based on complex network[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(2): 466-472. (in Chinese))
- [65] 卢兴超, 徐宗学, 陈浩, 等. 基于复杂网络的山地型区域洪涝灾害链风险评估——以北京市门头沟区为例

- [J]. 水科学进展, 2026, 37(1): 94–106. (LU X C, XU Z X, CHEN H, et al. Risk assessment of flooding disaster chains in mountainous area based on complex network: Take Mentougou District, Beijing as an example [J]. Advances in Water Science, 2026, 37(1): 94–106. (in Chinese))
- [66] 毛颖, 潘卫华, 李丽纯, 等. SMOTE-PCA-RF模型: FY-3D卫星微波湿度计亮温降雨反演方法[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(7): 1656–1670. (MAO Y, PAN W H, LI L C, et al. SMOTE-PCA-RF model: A rainfall estimation method for the brightness temperature data from the FY-3D satellite microwave humidity sounder [J]. Journal of Geo-information Science, 2025, 27(7): 1656–1670. (in Chinese))
- [67] ZHAO K, HUANG H, WANG M J, et al. Recent progress in dual-polarization radar research and applications in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(6): 961–974.
- [68] 邓南山, 刘洋, 李小伟, 等. 基于北斗/GNSS PWV数据构建的短临强降雨模型及其应用[J]. 测绘通报, 2024(9): 96–100. (DENG N S, LIU Y, LI X W, et al. Constructing a short term heavy rainfall model based on BeiDou/GNSS PWV data and its application[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(9): 96–100. (in Chinese))
- [69] 刘荣华, 王雪梅, 刘晓婉, 等. 暴雨山洪模拟与预警模型研究进展与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2025, 35(6): 1–10. (LIU R H, WANG X M, LIU X W, et al. Research progress and prospects of flash flood simulation and warning models[J]. China Flood & Drought Management, 2025, 35(6): 1–10. (in Chinese))
- [70] 侯精明, 马利平, 杨永平, 等. 人工智能技术在洪涝灾害防御领域的应用研究[J]. 人民长江, 2025, 56(10): 236–245. (HOU J M, MA L P, YANG Y P, et al. Research on application of artificial intelligence technology in flood disaster prevention[J]. Yangtze River, 2025, 56(10): 236–245. (in Chinese))
- [71] 刘明潇, 朱勇杰, 胡昊, 等. 城市新区极端雨洪汇流淹没特性与致灾机理调查研究——以郑州“7.20”特大暴雨(郑东新区)为例[J]. 水利学报, 2024, 55(3): 288–300. (Survey research on characteristics of extreme rainstorm flood and disaster-causing mechanism in urban new district: Taking Zhengdong New District in Zhengzhou's “7.20” heavy rainstorm as an example[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3): 288–300. (in Chinese))
- [72] SONG S Q, ZHANG C X, ZHANG P, et al. Urban waterlogging detection: A challenging benchmark and large-small model co-adaptor [C]//European Conference on Computer Vision, Milan, Italy: 2024. doi: 10.1038/s43247-025-02585-7.
- [73] TANG J Q, WANG J, LI J Y, et al. Predicting human mobility flows in response to extreme urban floods: A hybrid deep learning model considering spatial heterogeneity [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2024, 113: 102160.
- [74] 张建云, 金君良, 朱榴骏, 等. 变化环境下洪水预报面临的挑战与应对[J]. 中国科学基金, 2025, 39(6): 975–985. (ZHANG J Y, JIN J L, ZHU L J, et al. Challenges and strategies for flood forecasting in a changing environment[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6): 975–985. (in Chinese))
- [75] 任捷, 王子航, 王书玥, 等. 基于动态贝叶斯网络的黄河流域城市洪涝风险评估与时空分布研究[J]. 地域研究与开发, 2025, 44(5): 62–72. (REN J, WANG Z H, WANG S Y, et al. Urban flood risk assessment and spatial-temporal distribution in the Yellow River Basin based on dynamic Bayesian network[J]. Areal Research and Development, 2025, 44(5): 62–72. (in Chinese))
- [76] 程晓陶, 俞茜. 水利高质量发展转型中城市洪涝防治与韧性提升的探讨[J]. 水利发展研究, 2025, 25(11): 1–11. (CHEN X T, YU Q. Discussion on urban flood prevention and resilience enhancement in the transformation of high-quality water conservancy development[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(11): 1–11. (in Chinese))
- [77] 苑希民, 兰卓青, 王丽娜, 等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1298–1308. (YUAN X M, LAN Z Q, WANG L N, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1298–1308. (in Chinese))
- [78] 胡庆芳, 张建云, 金君良. 城镇化水平衡效应与城市水安全韧性提升研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 131–139. (HU Q F, ZHANG J Y, JIN J L. Water balance effect of urbanization and countermeasures for enhancing urban water security resilience[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 131–139. (in Chinese))

(下转第 509 页)