

高密度城市洪涝污防治研究进展与关键应对途径

陈文龙¹,赵铜铁钢²,李一平³,袁寄望¹,张 鹏^{1,4},吴辉明^{1,4},贾文豪¹

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院; 2. 中山大学水资源与环境研究中心; 3. 河海大学环境学院;
4. 广州珠科院工程勘察设计有限公司)

摘要: 在高密度城市暴雨洪涝和水污染灾害典型特征的基础上,剖析了当代城市洪涝与水污染治理困境,综述国内外城市洪涝与水污染治理理念和关键技术等方面的研究进展,并提出应对灾害的有效途径;面对城市洪涝应急响应窗口期短、用地空间紧张、水污染治理边际效应递减,以及效能提升困难等重要瓶颈,未来应构建城市洪涝污协同治理理念,重点研发城市洪涝快速预报与智慧调度技术,同时开展城市河流水生态系统修复和功能提升研究等。

关键词: 高密度城市;城市暴雨洪涝;城市水污染;洪涝污共治;水安全

Research progresses and key coping approaches on rain floods and water pollution in high-density cities//Chen Wenlong¹, Zhao Tongtiegang², Li Yiping³, Yuan Jiawang¹, Zhang Peng^{1,4}, Wu Huiming^{1,4}, Jia Wenhao¹ (1. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission; 2. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-Sen University; 3. College of Environment, Hohai University; 4. Guangzhou PRHRI Engineering Survey and Design Co., Ltd.)

Abstract: Firstly, based on analysis of the main characteristics of urban rain floods and water pollution in high-density cities. On this basis, the current practical difficulties faced by disaster management are deeply analyzed. Systematically reviewing and clarifying the current research status and shortcomings about the urban flooding and water pollution were reviewed and clarified systematically. Thus further proposing effective approaches to cope with disasters. The results show that to deal with the short emergency response window period and tight physical space for urban floods, and difficulty improving efficiency for water pollution, it is necessary to establish the concept of collaborative management for urban floods and water pollution, key research and development rapid forecasting and wise scheduling for urban floods, and simultaneously research the restoration and function enhancement for river ecosystem.

Key words: high-density city; urban rain flood; urban water pollution; rain floods and water pollution co-governance; water security

在全球气候变化加剧和城市化快速发展背景下,短历时强降雨事件增多增强^[1],暴雨径流过程与城市排水系统能力及结构性的矛盾持续放大,使城市水循环体系的调蓄功能与污染承载力呈下降趋势,进而引发多类水安全风险。其中,内涝和河流水体污染已成为我国高密度城市最突出、最严峻的水问题^[2-3]。近年来,极端暴雨事件频发,多地出现严重内涝,“城市看海”现象轮番上演。2020 年广州“5·22”特大暴雨、2021 年河南“7·20”特大暴雨以及 2023 年深圳“9·7”特大暴雨,让城市洪涝再度成为社会各界关注焦点。同时,高强度暴雨径流携带大量面源污染负荷快速入河,叠加底泥长期释放内源污染,导致受纳水体水质显著恶化,成为当前城

市水环境质量持续改善的瓶颈^[4]。目前,国内外学者从工程措施^[5-6]、非工程防御^[7-8]和韧性提升^[9-11]等方面开展了大量研究,促进了防灾减灾技术进步。然而,城市洪涝与水污染的根源性、深层次问题和卡脖子关键防治技术未被系统性、突破性认识,致使这两类灾害在城市可持续发展中仍处于高风险状态。

城市化发展阶段不同,所面临的治水问题、需求和困境也差异显著。高密度城市具有典型的“高人口密度、高建设强度、高经济密度与高系统关联度”等特征^[12-13],加剧了洪涝和水污染灾害的复杂性、不确定性及潜在损失。同时,高密度城市作为经济活动最活跃、人口最密集、生产力最发达、财富最集中的区域,对水安全保障、水环境质量和城市韧性的

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-2022064)
作者简介:陈文龙(1977—),男,正高级工程师,硕士,主要从事城市水治理研究。E-mail:longyancwl@163.com

要求远高于一般地区。提高防洪治涝标准、打造优良水环境是城市发展的必然诉求。然而,城市洪涝和水污染治理面临“用地、经济、景观”等多重约束,随着“人水城”之间的互动愈发紧密,“治水与发展”的不协调不断加剧。因此,治水理念和关键技术必须与城市的发展阶段、空间格局及水循环特征相适宜,才能兼顾防灾安全、生态保护和城市发展的多重目标。目前,在城市洪涝防治领域,灾害推演预报、风险评估、调度决策等应急管理非工程措施已是应对灾害的有效手段^[14],但支撑应急响应决策的关键技术及其难点亟待进一步剖析与深刻认知。在水污染防治领域,由于缺乏因地制宜的模式识别与对症下药的防治技术,治理的瓶颈往往难以攻克。此外,洪涝及暴雨冲击性污染问题也并非相互独立,而是受暴雨径流共同驱动的复合型灾害,具有显著的交织性和关联性。然而,受研究视角和管理体系不同,现有研究多聚焦于洪涝或水污染单一问题^[15-16],相关协同治理的系统性理论与方法较少。因此,深入理解洪涝与水污染之间内在互动关系,构建系统性研究思路,将有助于从根本上破解当前城市治水的困局。

鉴于此,本文在实地调研和典型案例解析的基础上,系统梳理高密度城市洪涝与水污染灾害的主要表现与演化特征,揭示当前防治工作面临的核心矛盾与现实困境,从治理理念与关键技术两个层面对现有研究进行系统回顾,提出适用于高密度城市特点的洪涝与水污染协同治理理念与关键技术,旨在为城市水安全保障和水环境品质提升提供参考。

1 高密度城市洪涝污特征与治理困境

为有效应对城市洪涝和水污染灾害,就必须先认清灾害所暴露出来的新特征,由表及里,深刻解析灾害治理面临的困境,从而为防灾减灾的精准施策提供方向。

1.1 城市洪涝特征及其治理困境

1.1.1 洪涝特征

a. 突发性强。极端暴雨形成过程相当复杂,一般由多种大尺度系统共同作用下叠加城市效应,显著增加局地降水的突发性,暴雨集中瞬时下落,导致洪涝快速发生。如深圳 2023 年“9·7”极端特大暴雨,气象部门于 2023 年 9 月 7 日 15 时解除预警,19 时突降暴雨,雨量打破 7 项历史极值;郑州 2021 年“7·20”特大暴雨,最大小时雨量 201.9 mm;广州 2017 年“5·7”特大暴雨,最大小时雨量 184.7 mm,短时降雨极强。

b. 致灾快。城市化发展剧烈改变下垫面条件

和城市排水模式,增大径流系数和汇流速度、削弱天然蓄滞能力、扰乱排水格局,进而加速洪涝形成。如郑州 2021 年“7·20”特大暴雨,中京广快速通道隧道由最大 1 h 降雨开始至完全淹没仅 1.5 h,广州 2020 年“5·22”特大暴雨,开源隧道从开始积水至完全淹没仅 0.5 h,城市区域洪涝成灾速度极快。

c. 频次高。城市局地极端暴雨频发和突发性给洪涝防御造成很大压力,加之下垫面孕灾环境的脆弱性,导致极端暴雨常常超过城市防洪排涝标准,增加了洪涝灾害事件发生的可能性。如武汉市、杭州市内涝屡屡发生^[17],且据深圳历年来影响较大的洪涝灾害场次资料记载,城市化稳定阶段(2010 年后)频繁遭遇特大暴雨事件,特别是 2020 年“5·22”、2023 年“9·7”、2025 年“7·8”和“8·5”特大暴雨连续刷新深圳降雨极值。

d. 损失大。根据《中国水旱灾害公报》,2020—2024 年全国范围内因洪涝灾害造成的直接经济损失高达 1 289 亿~2 598 亿元,占同期各年国内生产总值 0.11%~0.22%。其中城区因人口、经济、重要基础设施高度集中,洪涝灾害的破坏性更大、危害范围更广、灾后恢复重建代价更重,经济损失巨大,如郑州“7·20”特大暴雨,郑州市直接经济损失 406 亿元,占全省 34%。

1.1.2 治理困境

a. 防汛决策窗口期短,应急响应难。高密度城市灾害呈现出突发性强和致灾快的特征,导致防汛应急响应难。一方面,城市极端暴雨强突发性使其预见期很短,目前我国短时临近预报的强降水预见期低于 3 h;另一方面,落地雨致灾快,洪涝几乎瞬时产生。事实上,高密度建成区小流域从有效降雨预报到灾害形成往往不足 3 h,预留的应急窗口期极短。然而,应急抢险工作开展需要降雨预报观测数据接收、洪涝灾害推演、风险评估预警、决策制定等多个环节支撑,要求在短时间内高效、科学、有序完成,给防汛应急抢险工作带来严峻挑战。

b. 建设用地严重受限,工程治理难。高密度城市洪涝灾害呈现出损失大且频发的特征,意味着必须高标准设防,相应需要配套大规模治理工程。然而,高密度城市开发强度高、建设密度大,用地空间高度紧张,严重制约城市洪涝治理工程落地。同时,因早期规划缺乏前瞻性,未给后续城市内涝防治标准的提升预留足够空间。在此背景下,河道横向拓宽、管网升级改造等线性工程的提标建设与大型泵站、调蓄池等点状工程的新建布局,在城市建成区落地难度大。

1.2 城市水污染特征及其治理困境

1.2.1 水污染特征

a. 外源截污不完全现象长期存在。暴雨冲击性污染频发根源在于截污不完全现象长期存在。由于管网混错漏接等功能性问题难以彻底消除、结构缺陷的合流制管网难以快速推进改造,以及部分老城区及城中村截污管网覆盖先天盲区难以系统完善。管网问题改不动、改不快、改不全,导致截污不完全现象长期存在。在此背景下,暴雨期间分流制排水系统混接排放和合流制排水系统雨天溢流现象将会频繁发生,如珠三角城市群中广州、中山等城市部分河流水环境质量反复波动^[18]。

b. 内源污染治理投资大。底泥内源污染是引起水环境恶化的重要原因^[19]。目前我国普遍采用“疏浚-转运-拖水-填埋”异位处理工艺,该技术相对较为成熟,在苏州河、茅洲河、太湖等河湖的综合治理中都实施清淤疏浚工程^[20-21]。但底泥疏浚量大且处置成本高,处理费用一般在 10~6 000 元/t 不等^[21],成本成为限制底泥清淤疏浚工程并资源化利用的关键因素。

1.2.2 治理困境

水污染治理边际效应递减,效能提升难。高密度城市河流底泥内源治理投资巨大,优先采取外源截污来缓解底泥内源污染是根本之策,而外源截污又需投入高成本开展灰绿基础设施建设,以及污染溯源、问题管网诊断修复和结构缺陷管网升级改造等工作,其投资和运维成本高,而河流水质改善效果并不明显,呈典型的“投入大、产出少”边际递减效应,如深圳前海深隧系统为实现初期雨水削减率目标,总投资达 24 亿元,年运行费用亦高达数千万元,但河道水质直观改善效果却难以量化评估;芜湖市 2 000 km 市政管道检测花费 5 亿元,每千米长度成本高达 25 万元,由于城市污水收集率已处于较高水平(如广州污水规划 2025 年可达 85%),进一步提升污水收集增量的空间极为有限,致使工程带来的污水收集效率并不明显;污水处理厂出水标准由地表水Ⅳ提高至Ⅲ类,污水平均处理成本需增加 0.4~0.5 元/m³^[22]。治理成本投入与其产出的环境效益严重不匹配,治理面临艰巨挑战。

2 高密度城市洪涝污治理研究进展

为应对上述治理困境,国内外学者开展了大量研究并取得重要进展。基于现有研究成果,本文系统梳理当前主流的治水理念,以及在应急管理、非大型工程治理与水污染控制等方向上代表性的关键技术,并从适用性、有效性与局限性等维度对其成功经

验与不足之处进行分析。

2.1 治理理念

a. 城市洪涝共治理念。城市洪涝治理模式的发展本质上是治理理念从“碎片化治理”向“协同治理”的质变,历经传统的“灰色基础模式”、“灰、绿基础结合模式”、到“洪涝同源”理论突破,最终迈向“洪涝共治”实践。我国最早大规模开展的城市洪涝治理模式是以灰色基础设施为主的工程措施,核心聚焦于防洪安全,主要采取筑堤坝、河道整治、水库和蓄水池等措施。中华人民共和国成立 50 多年后,七大江河初步形成以水库、堤防、蓄滞洪区为主的防洪工程体系^[23]。同时,排水管网工程也在不断加快推进,逐渐建成高效排水的城市排水系统^[24]。然而,随着城市化进程加快,工程局限性日益凸显。首先,城市化进程加快导致自然生态空间(如绿地、湿地、河湖)被挤占、填埋或破坏,显著削弱城市自身的自然渗透与水体调蓄能力。其次,早期治理理念多着眼于短期的防洪排涝成效,对排水设施整体规划、水环境保护等问题未进行全面考虑,这不仅加剧城市洪涝程度,也提高城市水环境污染风险。借鉴欧美等发达国家城市雨水管理经验^[25-26],我国提出海绵城市建设理念,在传统灰色基础设施模式(快排措施)基础上,融入“源头减排”与“滞蓄措施”,形成“灰、绿基础结合模式”治理模式。其中,车伍等^[27]率先对海绵城市的基本概念与内涵、狭义与广义低影响开发系统与海绵城市的关系等基础问题进行阐述;王浩等^[28]从对城市水问题的基本判断与海绵城市建设存在的问题出发,宏观上综合提出海绵城市构建的系统模式,为海绵城市建设提供基础理论支撑。海绵城市建设已经从前期试点阶段推进到示范阶段,一直是现阶段我国城市洪涝防治领域研究的重点。然而,该治理并未真正改变“洪涝分治”的本质,未能深刻反映出市政排水与水利防洪的协同关系,常出现“因洪致涝”或“因涝致洪”现象。如何统筹“洪涝共治”成为亟待解决的问题。夏军^[29]认为城市洪涝防治应是多部门系统协作和多元主体综合管理;张建云等^[30]进一步明确指出城市排水、除涝和防洪三类防治标准等方面需要协调和衔接;后续,陈文龙等^[31-32]开展基于“洪涝同源”流域系统整体观的城市洪涝治理工程优化布局研究,深化完善洪涝共治治理理论体系,并以深圳市深圳河流域为例,对城市“洪涝共治”进行工程实践,成为“洪涝共治”理念从理论走向实践的关键一步。

b. 城市水污染治理理念。近 20 年来,得益于治理理念的演进与进步,我国城市水污染治理取得

显著成效。治理理念逐步由初期的重点源治理,转向暴雨冲击性污染控制,再到底泥内源污染治理,并进一步发展为水生态系统修复理念。我国城镇化进程加速,城市污水排放总量也逐渐增加。水污染治理的基础设施建设以末端控制为主,主要针对城市污水收集和处理系统而言,包括污水处理厂和污水管网规模建设两部分,如德国 Emscher 河流水污染治理工程中,新建 4 座污水处理厂、超过 400 km 污水管道等,解决污水直排问题^[33]。在政策效应和资本助力下,点源污染治理成效显著。而伴随我国快速城镇化带来的降雨径流污染和管网溢流污染等暴雨冲击性污染问题也日益突出,以飞来峡库区典型流域为例,SS、TP、TN 等各污染物的非点源污染贡献率均值均达到 80% 以上^[34];此外,暴雨径流期间管道内污染物瞬时释放量可达平常水平的 4 ~ 8 倍^[4]。在暴雨冲击性污染负荷下,导致原有污水收集和处理系统不能有效应对,城市水环境质量持续恶化。因此,促使重点源治理理念转向暴雨冲击性污染控制。与点源污染相比,暴雨冲击性污染形成与发展过程复杂、污染源分布范围广、污染物种类多样,治理难度极大。美国是开展这类污染研究最早的国家,率先提出低影响开发理念,在实践中取得良好效果。我国相关研究起步较晚,目前主要采取源头控制^[35]、过程控制^[36]、末端治理^[37]等策略,通过经验模型、国内外机理模型及改进方法等进行研究。总体来说,我国城市河流点源治理和暴雨冲击性污染治理已实现较为有效的外源截污,取得阶段性和局部性成效。然而,底泥内源污染问题依然严峻,制约整体水环境进一步改善,阶段性治理工作从减污向治泥理念展开。后续,在底泥污染治理实践中,又逐渐将水污染治理理念向水生态系统修复推进^[38-39]。

城市洪涝与水污染治理理念取得显著进展,但“洪涝污分治、割裂”的传统思维仍未改变。这种系统性和协同性缺失,导致洪、涝、污防治工程之间效能相互削弱、资源重复浪费,从而制约城市洪涝污治理成效的大幅提升。

2.2 关键技术

2.2.1 城市洪涝应急管理关键技术

a. 洪涝灾害风险预报技术。目前城市洪涝风险预报主要利用基于物理过程的机理模型对洪涝过程进行情景模拟和洪涝风险发展态势进行评估,大部分学者依据计算方法将城市洪涝模型划分为水文模型、水动力模型、水文水动力模型等,模型组成通常包括地表产汇流模型、一维河道/管网模型、二维地表淹没模型等。其中,一维河道/管网模型发展较

早,研究主要集中于物理公式修正、运行效率提升方面,但无法直接模拟水流在地表的演进过程。因此,学者们开始探索二维地表模型,大多研究致力于平衡模拟精度和模拟效率之间的矛盾。此后,一维模型和二维模型耦合的研究路径逐渐兴起,既包括河道/管道水流计算,也包括水流在地表流动情况。迄今仍有许多学者持续开展这方面的深入研究。城市洪涝数值模型模拟结果能够直观、精确地反映洪涝事件的影响范围和程度,一般适宜城市中、小尺度区域。随着计算机技术快速发展和城市产汇流理论日趋成熟,城市暴雨洪涝数值模拟方法、精度、计算效率和适用性等方面均得到长足发展。但面对高密度城市复杂下垫面和极端暴雨时,模型计算效率低下的问题日益突出。为提高模型计算速度,人们开始另辟蹊径,采取 CPU-GPU 异构并行计算模式对城市洪涝模型开展大量研究,主要针对城市地表二维模型, Lamb^[40-41] 均在一定程度上缩短模型运行时间。关于一维河道/管网模型的加速研究相对较少,宋利祥等^[42]运用 OpenMP 和 OpenACC 技术分别实现 CPU、GPU 并行计算,通过珠三角河网案例表明该模型具有良好的计算效率。尽管超级计算机等硬件条件的提升以及 GPU 并行计算等技术的引入,已大幅提高数值模拟计算效率,然而在有效降雨预报预见期极短的条件下,仍难以满足应急决策高时效性需求。近年来,在智慧城市与大数据时代背景下,数据驱动模型因分钟级预报效率等优势被引入城市内涝预报中,以神经网络、深度学习等典型代表模型得到广泛关注。但其缺乏物理机制支撑,极端条件下易出现奇异结果^[43],难以直接应用于应急决策。新近发展的机理-数据双驱动模型崭露头角^[14],其本质是利用物理模型生成补充训练数据作为数据模型输入,智能算法对混合模型进行优化和求解加速。该方法能够实现高时效性,但高度依赖精细化机理模型提供的高质量样本,而机理模型自身本底条件不清,产出精确数据本就是伪命题,质量上不能满足样本需求。需指出,这属于客观条件限制而非单纯技术短板。

b. 河网闸泵库群调度技术。流域闸泵库群防洪调度是典型的系统性决策问题,需统筹考虑水库自身安全、闸泵库群间的协同关系以及下游区域的防洪安全,涉及多目标、多约束条件,决策系统耦合复杂。目前,我国重点城市针对标准内降雨,能够进行有效科学调度和管理,而对于超标准暴雨事件,针对性、时效性和可操作性仍有待提高,尤其是闸泵库群调度。闸泵库群实时防洪调度决策制定包括以下几种方法:一是基于经验调度方法,通常管理者依据

雨水工情信息,凭借人工经验设置多种调度方案,通过水力模型预演,经过多轮迭代与权衡后选择最优调度策略。然而,面对梯级闸泵或水库群调度需求时,难以准确动态分析复杂的防洪风险及其在系统内的传递与转移。二是多目标优化调度技术,多目标调度优化求解主要有两类,最早是通过权重法和约束法将多目标问题转化为单目标问题间接求解优化模型,如杜守建等^[44]采用约束法将净效益、洪水量、发电量、供水保证率等多目标转化为单目标进行求解;随后多目标智能优化算法被提出和发展,并在水库群防洪优化调度上得到广泛应用,如贾本有等^[45]以水库群系统安全度最大、行蓄洪区系统损失最小为目标函数,建立了复杂防洪系统多目标递阶优化调度模型。在实际调度中,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,但模型易困于“维度灾难”,计算效率低,很难满足实时调度要求。近年来,数据驱动的闸泵库群调度技术为调度决策制定提供了新的思路 and 工具,能够快速生成调度方案,但其局限性与上述数据驱动的洪涝模拟预测一致,对历史未出现的稀遇性或突发性强的极端暴雨事件,难以生成可靠的调度决策。

c. 监测感知-灾害推演-调度决策一体化平台。融合城市洪涝水文监测感知技术、灾害模拟推演技术和调度决策智能生成技术于一体的软硬件系统是在水利部提出的“四预”体系架构中,是未来提升城市防洪排涝能力的关键。相较于英国、美国等发达国家,我国城市防洪排涝系统研发起步较晚。随着计算机、物联网、物理信息系统等技术迅速发展,国内城市防洪排涝应急管控平台建设方面已取得显著进展,一些适用于本土的洪涝管控平台也陆续搭建起来。如杨森等^[46]依托 Delft-FEWS 平台,在前期大量信息化建设的基础上,构建浦东新区洪涝预报预警系统,集成了实时降雨、潮位、水位监测以及降雨与潮位预报数据、河网水文水动力模型以及管网一二维耦合模型。近年来,由于人工智能等新一代信息技术的赋能,城市防洪排涝系统也有新突破。如史超等^[47]运用机器学习算法对洪涝快速预报,进一步构建城市洪涝预报决策系统,为交通出行和应急管理决策提供直观的可视化展示和数据支撑。然而,目前业界多停留在体系框架探讨和系统可视化展示层面^[48-49],具备实时可操作性的技术集成一体化应急智慧平台的研究尚显不足。由于该系统涉及专业模块多元、链接部位复杂、技术的点上突破较多,使得技术集成难度高,“监测感知—风险预报—调度决策”的链条未真正实现贯通融合,智慧化平台的整体优势还未充分发挥。因此,亟须构建城市

洪涝应急决策智能化平台,支撑城市水工程设施的科学调度,提升应急能力建设。

2.2.2 城市水污染治理关键技术

a. 厂网河一体化调度技术。厂网河一体化的城市水污染主要体现在合流制管网系统中。因我国污水处理系统设计标准偏低,多数污水处理厂不具备暴雨期间处理高负荷运行的能力。在这种情况下,当超过合流制管网排水系统能力,管道沉积物、混接污水及降雨径流污染等混合高浓度污水一部分通过排水口溢流至受纳水体,一部分通过雨水算子、检查井等溢流至道路,造成地表漫溢污染现象。要改善城市河流水环境,外源截流(减污)是治标之本。针对暴雨期间溢流污染,在高密度城市大规模治理工程难以落地,以及污水处理厂、排水管网等子系统标准相对独立,衔接程度不足,缺少系统统筹规划的现实约束条件下,厂网河一体化调度成为应对的可行技术。该技术通过阀门、泵站、闸门等调控工程对污水处理厂、排水管网和河道进行联合调度,以缓解因管网入流与污水处理厂处理能力不匹配导致的溢流污染问题。现有调度研究以提升河道水质为主,重点关注厂前溢流削减。厂网河系统模拟常用水质水动力模型,如国际上开发的 EFDC、MIKE 系列及 SWMM 等模型,均在世界范围内获得广泛应用与验证。其中,EFDC 常用于库、湖复杂水动力与污染物迁移转化模拟,SWMM 模型和 MIKE 系列多用于城市管网与河网水动力-水质耦合模拟。根据城市水动力水质耦合模型的组成,划分为水文模型、一维河道/管网水动力水质模型、二维地表水动力水质模型。水文模型通过径流系数法等水文学方法计算;一维河道/管网水动力模型通过求解圣维南方程对河道/管网水流的运动状态进行求解、一维河道/管网水质模型采用一维对流扩散方程求解;二维地表水动力模型主要通过求解浅水方程计算地表水流运动状态,二维地表水质模型采用二维对流扩散方程仿真污染物在水体中输移扩散及降解规律。耦合方程将水动力学模型的输出(如流速、流量)作为水质模型的输入,同时水质模型的输出(如污染物浓度)反馈到水动力学模型中。水动力学模型的流速和流量影响水质模型的物质传输速度和路径。反之,水质模型中污染物质浓度影响水动力学模型中水体流动特性。通过地表、管网、河道模型两两耦合,实现一维排水系统与二维地表之间水量与水质的交互作用。随着模型技术的发展,机理-数据双驱动的水质模型逐渐兴起,水质模型的计算效率得到极大提升。厂网河一体化调度本质上属于多目标优化问题,其策略制定方法包括经验法和智能优化

算法。工程实践方面,我国已开展多项探索。如北京排水集团早在 2010 年率先提出并初步形成较为完备的“厂网一体化”运营管理模式;深圳水务集团于 2018 年成立深圳河流域厂网河调度指挥中心,构建“厂网河一体化”全要素总图和统一调度平台。

b. 底泥内源污染治理技术。当前底泥污染的处理技术主要分为原位修复和异位处理。原位修复技术包括原位覆盖、人工曝气增氧、沉水植物修复、电动修复等方法。其中,原位覆盖可短期内有效控制污染释放,但覆盖层易受水流扰动而破坏;人工曝气增氧技术见效快、设备简单,但其维护成本高、耗能大、水体黑臭易复发问题;沉水植物修复技术兼具投资和运行成本低、改善生态景观等优点,但伴随着修复周期长、见效慢、效果容易受季节气候变化影响等缺点;电动修复技术是 20 世纪 90 年代初兴起的一项底泥修复技术,对高浓度污染物去除效率较高,具备成本低、操作灵活的特点,然而电极材料易腐蚀,目前该技术尚未有较为成熟的规模化应用。异位处理则以清淤为主,该技术起源于日本和欧美的水污染治理实践,国外应用已有 50 多年,我国应用已 20 多年,是最大的环保清淤疏浚国。清淤作为当前我国湖泊、水库及河道消除内源污染物的主要技术,在富营养化控制、黑臭治理中发挥积极作用。由于清淤范围和深度的确定方法尚不完善,易引发二次污染,破坏河道底质生态,清淤后水质改善效果不佳的问题是长期以来不断引发争议的主要焦点。近几年,传统清淤已发展到底泥洗脱原位置换新技术。该技术对改善泥水界面生境、促进沉水植物自然生长有显著作用。针对底泥洗脱后泥料理化性质不稳定的问题,罗欢^[50]进一步研发了以无机大颗粒泥沙为主的覆盖层技术,在稳定底泥结构的同时,实现洗脱底泥资源化利用。相继该研究团队创新性地提出“先泥后水”治理模式,通过应用自主研发的富集反硝化功能菌的生态环保型缓释功能材料,可有效同步消除底泥中硫化氢、有机物等耗氧物质^[38]。“底泥洗脱技术”和“底泥碳氮硫污染物同步去除技术”标志着底泥治理模式正向生态系统修复转变。

c. 低水位运行技术。传统观念普遍认为维持河道高水位有助于增加水环境容量。然而,在高水位运行条件下,底层水体流速仍较为滞缓,泥-水界面长期处于缺氧、厌氧状态,污染底泥不仅无法得到有效修复,且污染程度进一步加剧。城市河流低水位运行是广州市水务局与珠江水利科学研究院在总结过去十几年治水经验基础上,转变工程治理思维方式,率先提出的一种低碳、经济、可持续的水生态自我修复新模式^[51],是适用于高密度城市河流污染

标本兼治的治水理念,其具体内涵是微干预河道自然低水位运行,并控制河道最高水位不高于雨水口或者各类拍门(闸门)。避免大规模引水调水,利用污水处理厂布局优势,将污水处理厂尾水再生利用补给河道,增强水体流动,同时让大自然充分做功,实现底泥自然净化和修复,逐步构建完善的水生态系统。底泥治理和生态修复的原理是通过改善泥-水界面环境因子,高效驱动垂向好氧硝化-厌氧反硝化协同,促进底泥自然修复。从而推动底泥由污染“源”向“汇”的转变,显著提升城市河流和抗污韧性,确保在外源截污不完全长期存在的条件下,充分发挥底泥的自我净化功能,维持水质稳定^[52-53]。目前,该技术已在广州市 100 多条城市河流得到应用,短短几个月便呈现“飞鸟偏偏、清流涓涓、鱼翔浅底”的美丽景象,且大幅节约了治理成本,累计减少河道整治工程投资达 400 多亿元,年度运行经费约 12.9 亿元^[53],为高密度城市河流水污染治理和生态修复提供参考。

3 高密度城市洪涝污防治韧性提升可行途径

目前城市洪涝和水污染治理在理念和关键技术方面已取得显著进展,但高密度城市面临的防治困境,对现有治理理念与技术提出更高要求。面对城市洪涝与水污染协同治理理念系统性缺失、应急管理关键技术高时效性需求以及水污染治理成效有待提升等问题,亟须深入剖析各类灾害防治所暴露出的内在联系及特有难点,制定与高密度城市相适宜的韧性提升途径是当前减轻灾害风险的必然需求。

3.1 构建城市洪涝污协同治理理念

城市暴雨洪涝与暴雨冲击性水污染灾害密切相关,其共性主要体现在致灾同源、传输同径、治理同难等方面。城市暴雨径流既是洪涝系统的直接水源输入,又是污染物的关键水力驱动和迁移载体,是诱发两类灾害共同的“源”。两类灾害风险演进路径均依赖于同一套排水系统,即在地表、排水管网、河道内耦合演变,完成汇流过程的空间转移。治理工程均面临空间制约难题。排水管网与城市内河等线性工程,改扩建常与道路系统、地下管线等既有市政设施产生空间竞争。而排水泵站、雨(污)水调蓄池及污水处理厂等点状工程,则需占用大面积集中土地且对区位条件敏感,城市中心区选址通常陷入“无地可寻”被动局面。因此,需要构建协同治理理念。

上述城市洪涝和水污染存在的共性,为实施协同共治提供了理论依据和实践可能。如何实现洪涝与水污染系统防治,需建立“源头减排—过程管

控—末端自净”的工程体系。城市海绵设施,兼具径流和面源污染源头减排功能,但作用有限。针对高密度城市用地受限的客观条件,新城区及更新地块应重点研发“平急两用”建构筑物调蓄系统。老城区应聚焦小尺度局域积水单元或中尺度的城市汇水区,采取多元化、分散式策略,充分挖掘整合公园湖泊、下沉广场、地下调蓄池等城市空间的潜力,将传统的低影响开发模式向城市防洪控污体系转变。通过改变产流量、汇流速度和路径,实现水量和面源污染协同控制。排水管网过程水动力水质管控,着眼于排水设施的提质增效,动态干预高污染径流的传输过程,实现涝水和溢流污染的同步控制。末端河道需将其功能重新定位为兼顾行洪排涝和自净能力的复合廊道,进行生态化改造,缓解排涝泄洪压力、以及外源截污不完全和河道底泥内源污染的问题。目前已有协同共治模式的成功实践,例如广州市推行河道“低水位运行”,通过合理降低河道水位,既腾出更多调蓄空间,又显著提升底泥净化能力,同时利于管涵排水顺利下河。高密度城市暴雨洪涝污共治理念如图 1 所示。

3.2 研发城市洪涝快速预报与智慧调度技术

应对超出设防标准的极端暴雨事件,应急管理强韧性是建成“不怕淹”城市的核心策略。而城市洪涝风险预报和智能调度技术又是应急管理的两大核心手段。鉴于应急响应窗口期极短,支撑洪涝预报和调度的模型必须具备高时效性。

制约城市洪涝风险预报模型计算效率的关键因素在于过度追求模拟精细化。一方面复杂环境中精细化模型本身难以获得精准的模拟结果,另一方面城市洪涝应急决策更侧重于快速获取“大致正确”的预报结果,以支撑风险态势研判,而非追求厘米级

的数值精度。基于“精度适需、计算高效”的预报原则,概化的数学模型可通过结构降维、复杂求解方式简化等方法,在满足模拟精度实际需求的前提下,提高计算效率。因此,此类模型能够有效平衡计算效率和精度,有望为应急处置工作提供一种可行的技术手段,是兼具现实应用价值和学术研究的新途径。闸泵库群智慧调度决策技术在实践应用中面临系统结构复杂、模型求解难度高、计算量大等问题,计算效率瓶颈尚未突破。究其原因,现有模型普遍陷于“目标函数-约束条件”的刚性结构、智能算法寻优求解的模式。因此,亟须打破现有框架的束缚,发展一种全新的调度范式成为该领域的迫切需求。未来的研究趋势必然重构决策生成的整体架构,通过重点优化调度模型的顶层设计、核心求解技术以及系统结构的扩展能力(图 2),实现模型的结构简单、求解快速、通用性强,使其在保证决策科学性的同时,快速生成调度决策方案,且能够迅速响应不同流域背景或未来水利工程格局的演变。从而引领传统的闸泵库群防洪调度模型向快速智慧化调度模型演进。

3.3 开展城市河流水生态系统修复研究

目前城市水环境保护已历经外源污染控制、底泥内源治理阶段,水质总体得到明显改善。然而,我国高密度城市河流水生态系统普遍脆弱,鲜有水生态系统修复的成功实践。事实上,城市河流水生态系统完整性恢复是一项难度极大的系统性工程,面临的治理难点广泛存在:①底泥内源污染问题依然严峻,仍是局部区域水环境的主要污染源;②外源截污不完全长期存在,城市污水收集率通常仅约 80%,面源污染和溢流污染等暴雨冲击性负荷将会持续入河;③暴雨期间洪水脉冲式剧烈扰动,对水生生物造成毁灭性破坏;④外来生物入侵对本土生态系统威

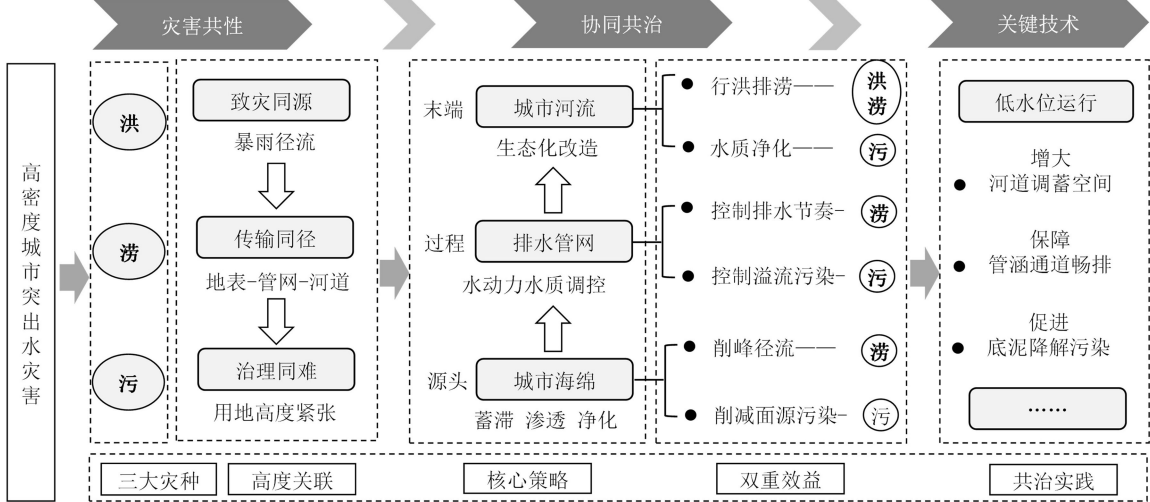


图 1 高密度城市暴雨洪涝污协同共治理念

Fig. 1 Concept of collaborative governance for rain floods and water pollution in high-density cities

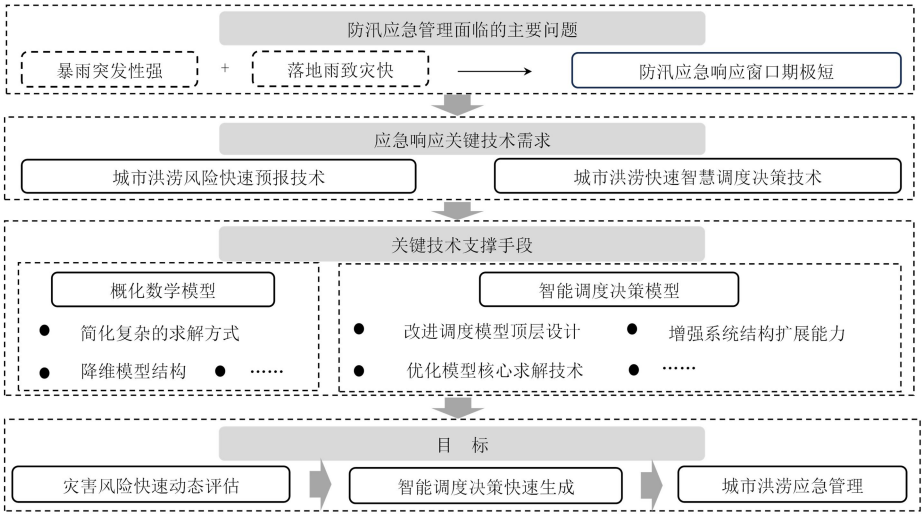


图 2 高密度城市洪涝应急响应的关键技术需求

Fig. 2 Key technology for emergency response to rain floods in high-density cities

胁显著,如广州城区大部分内河罗非鱼泛滥,已对其他水生生物过程产生严重干扰,形成单优势种群。此外,河道渠硬化工程等对水生态系统的影响也不容忽视。因此,在多重制约难点尚未得到根本解决的现实情况下,如何有效构建与修复城市河流水生态系统是一项重大挑战。

城市河流水生态系统恢复是新时代水利建设和开发的科学决策,也是后续发展的必然趋势,更是建成“不易污”韧性城市的重要途径。因此,亟须开展水生态系统修复科学研究。为此,需要抓准当前主要问题,从水文过程变异、生境过程退化和生物过程变化等方面,揭示水生态系统退化机制,并围绕底泥内源污染治理、水文情势改善、河流地貌景观修复、生物群落多样性再造的生态系统等具体建设内容,研究制定解决复杂问题的措施与关键创新技术,逐步实现生态完整性与可持续性的阶段性目标(图 3)。同时,城市河流生态系统构建与修复具有

动态演进特征,其不确定性也要求修复措施和关键技术不断反馈调整,持续提升适应性。总体而言,实现全面城市水生态系统构建任重而道远。

4 结 语

a. 城市洪涝灾害暴露出突发性强、致灾快、频次高和损失大等特征,洪涝灾害防治面临应急响应窗口期极短和用地高度紧张的困境;水污染灾害则表现出外源截污不完全长期存在和底泥内源污染治理投资大的特征,陷入治理边际效应递减,效能提升难的困境。城市洪涝应急管理和水生态恢复是破解现代化高密度城市洪涝和水污染治理困境的两条主线。

b. 未来开展城市洪涝和水污染灾害减灾工作中,在治理理念层面,深刻认识洪涝和水污染灾害同源、传输同径、治理同难的共性特点,构建城市洪涝污协同治理理念;在洪涝应急管理层面,重点研发城市洪涝快速预报与智慧调度技术,以满足防汛应急

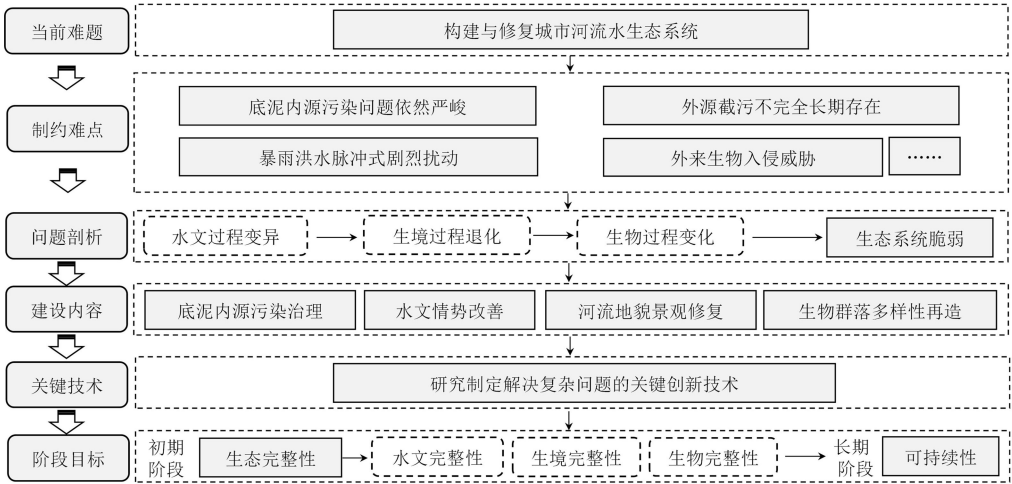


图 3 高密度城市河流生态系统构建框架

Fig. 3 Framework for constructing ecosystem of urban rivers in high-density cities

响应的现实需求;在水环境建设层面,着力开展城市河流水生生态系统修复研究,促使河流自我净化。通过治理理念协同、技术研发与创新等途径,推动城市洪涝污应对向韧性方向发展。

参考文献:

[1] 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. (Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang. Analysis on causes of flooding/waterlogging disasters in typical megacities of China under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (5): 33-40. (in Chinese))

[2] 夏军,贾海峰,张翔,等. 长江中下游城市内涝与雨季污染协同治理对策[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 1-5. (Xia Jun, Jia Haifeng, Zhang Xiang, et al. Coordination strategies for urban waterlogging and rainy season pollution control in middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 1-5. (in Chinese))

[3] 徐祖信,张辰,李怀正. 我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]. 给水排水, 2018, 54(10): 1-5. (Xu Zuxin, Zhang Chen, Li Huaizheng, et al. Classification and systematic treatment of black order problem in urban rivers in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(10): 1-5. (in Chinese))

[4] 叶程,杨文源,董天一,等. 城市水环境雨天冲击污染中新污染物水质风险与控制策略[J]. 给水排水, 2025, 61(8): 42-51. (Ye Cheng, Yang Wenyuan, Dong Tianyi, et al. The water quality risk and control method of emerging contaminants in storm-induced pollution of urban water environment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 61(8): 42-51. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 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 ' anshan city [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 348-355. (in Chinese))

[7] 姚思敏. 城市暴雨灾害风险评估研究[D]. 北京:清华大学, 2016.

[8] 陈甜甜,沈铤桑,杨泓哲,等. 城市径流污染风险评估与分区分管研究:以杭州为例[J]. 长江流域资源与环境,

2024, 33(8): 1741-1752. (Chen Tiantian, Shen Rusang, Yang Hongzhe, et al. Risk assessment and zoning control of urban runoff pollution: taking Hangzhou City as an example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(8): 1741-1752. (in Chinese))

[9] 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))

[10] 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]. Water Resources in China, 2022(5): 39-42. (in Chinese))

[11] 胡春宏,张双虎. 长江经济带水安全保障与水生态修复策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 166-175. (Hu Chunhong, Zhang Shuanghu. Strategies for water security and aquatic ecosystem restoration in the Yangtze River Economic Belt [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24 (1): 166-175. (in Chinese))

[12] 吴夏安,徐磊青. 城市高密度背景下的感知密度:内涵、价值与重要研究问题[J]. 国际城市规划, 2024, 39(6): 62-70. (Wu Xiaan, Xu Leiqing. Perceived density in urban high-density: concept, value and important research issues [J]. Urban Planning International, 2024, 39 (6): 62-70. (in Chinese))

[13] 杨婕. 高密度城市极端天气事件的韧性治理优化路径研究[D]. 长春:吉林大学, 2024.

[14] 侯精明,王添,李东来,等. 超大特大城市极端暴雨致涝过程高效模拟预测方法研究[J]. 中国水利, 2025(18): 19-28. (Hou Jingming, Wang Tian, Li Donglai, et al. Efficient simulation and prediction method for extreme rainfall-induced flooding processes in ultra-large cities [J]. China Water Resources, 2025 (18): 19-28. (in Chinese))

[15] 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. (Cheng Xiaotao, Liu Changjun, Li Changzhi, 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. (in Chinese))

[16] 王晨杨,贾启萌,贾海峰,等. 流域水环境调控措施协同减污降碳成本效益评估[J]. 环境科学, 2026: 1-15. (Wang Chenyang, Jia Qimeng, Jia Haifeng, et al. Cost-benefit analysis of synergistic pollutant and carbon reduction through watershed interventions [J]. Environmental Science, 2026: 1-15. (in Chinese))

[17] 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 Ximin, Lan Zhuoqing, Wang Lina, 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))
- [18] 广东省生态环境厅. 水环境[EB/OL]. (2025-07-03). https://gdee.gd.gov.cn/jhszl/content/post_4738737.html.
- [19] 高扬, 杨栋, 倪守高, 等. 疏浚泥浆在线脱水的工艺设计及试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (3): 77-82. (Gao Yang, Yang Dong, Ni Shougao, et al. Technological design and test of online dewatering process for dredged mud[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (3): 77-82. (in Chinese))
- [20] 宁梓洁, 王鑫. 黑臭水体治理技术研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36 (8): 26-29. (Ning Zijie, Wang Xin. Overview of the black-odorous waters treatment technologies[J]. Environmental Engineering, 2018, 36 (8): 26-29. (in Chinese))
- [21] 张茜, 张霖, 李姐, 等. 秦淮河治理修复情况浅析及相关建议[J]. 中国水运, 2010, 10 (18): 161-162. (Zhang Qian, Zhang Lin, Li Da, et al. Analysis of the restoration and related recommendations in the Qinhuai River[J]. China Water Transport, 2010, 10 (18): 161-162. (in Chinese))
- [22] 韩东刚. 天津市城市污水处理建设与运营管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [23] 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))
- [24] 刘诗雄. 泉州市城市内涝治理工程措施探讨[J]. 中国水利, 2012 (19): 48-49. (Liu Shixiong. Discussion on urban flood control measures in Quanzhou[J]. China Water Resources, 2012 (19): 48-49. (in Chinese))
- [25] Chan F, Griffiths J A, Higgitt D, et al. “Sponge City” in China: a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context[J]. Land Use Policy, 2018, 76: 772-778.
- [26] Yin Dingkun, Chen Ye, Jia Haifeng, et al. Sponge city practice in China: a review of construction, assessment, operational and maintenance[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124963.
- [27] 车伍, 赵杨, 李俊奇, 等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J]. 中国给水排水, 2015, 31 (8): 1-5. (Che Wu, Zhao Yang, Li Junqi, et al. Explanation of sponge city development technical guide: basic concepts and comprehensive goals[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (8): 1-5. (in Chinese))
- [28] 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): 1009-1014. (Wang Hao, Mei Chao, Liu Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (9): 1009-1014. (in Chinese))
- [29] 夏军. 我国城市洪涝防治的新理念[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29 (8): 2-3. (Xia Jun. New concept of urban flood prevention and control in China[J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29 (8): 2-3. (in Chinese))
- [30] 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.)
- [31] 陈文龙, 徐宗学, 宋利祥, 等. 基于流域系统整体观的城市洪涝治理研究[J]. 水利学报, 2021, 52 (6): 659-672. (Chen Wenlong, Xu Zongxue, Song Lixiang, et al. Research on the control measures of pluvial and fluvial urban floods based on holistic view of watershed system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (6): 659-672. (in Chinese))
- [32] 陈文龙, 徐宗学, 张印, 等. 高密度城市暴雨洪涝治理理论框架及其应用研究[J]. 水利学报, 2022, 53 (7): 769-778. (Chen Wenlong, Xu Zongxue, Zhang Yin, et al. Theoretical framework and application of urban rainstorm flood control in high-density cities[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (7): 769-778. (in Chinese))
- [33] Perini K, Sabbion P. Urban sustainability and river restoration: green and blue infrastructure[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- [34] 黄国如, 陈晓丽, 任秀文. 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 9-16. (Huang Guoru, Chen Xiaoli, Ren Xiuwen. Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (4): 9-16. (in Chinese))
- [35] 刘家宏, 王东, 李泽锦, 等. 厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征[J]. 水资源保护, 2019, 35 (6): 9-13. (Liu Jiahong, Wang Dong, Li Zejin, et al. Measurement and characteristic analysis of infiltration performance in Xiamen spongification reconstruction area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 9-13. (in Chinese))
- [36] 韩冠宇, 王殿常, 王浩正, 等. 源-网-厂-河排水系统多目标实时优化控制方法与实践[J]. 中国给水排水, 2023, 39 (24): 21-29. (Han Guanyu, Wang Dianchang, Wang Haozheng, et al. Method and practice of multiobjective and realtime optimal control in urban drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (24): 21-29. (in Chinese))

- [37] 李强坤,孙娟,胡亚伟,等. 青峡灌区农业非点源污染控制措施及其效果分析[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):141-144. (Li Qiangkun, Sun Juan, Hu Yawei, et al. Control measures of agricultural non-point source pollution in Qingtongxia irrigation district and effects analysis [J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(1):141-144. (in Chinese))
- [38] 陈文龙,罗欢,吴琼,等. 基于“先泥后水”模式的重污染河道底泥碳氮硫同步去除技术研究[J]. 水资源保护,2023,39(3):16-23. (Chen Wenlong, Luo Huan, Wu Qiong, et al. A synchronous removal technology of carbon, nitrogen and sulfur pollutants from sediment in heavily polluted rivers based on “treating sediment before water” model[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):16-23. (in Chinese))
- [39] 汤茵琪,任心欣,孔露霆,等. 城市河流系统治理策略在鹅颈水生态修复中的应用[J]. 水资源保护,2021,37(6):88-93. (Tang Yinqi, Ren Xinxin, Kong Luting, et al. Application of integrated urban river management strategy in Ejingshui River ecological restoration [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):88-93. (in Chinese))
- [40] Lamb R, Crossley A, Waller S. A fast 2D floodplain inundation model[J]. Water Management,2009,162(6):363-370.
- [41] Xia Xilin, Liang Qinhua, Ming Xiaodong. A full-scale fluvial flood forecasting based on a high-performance integrated hydrodynamic modelling system[J]. Advances in Water Resources,2019,132:103392.
- [42] 宋利祥,李清清,胡晓张,等. 基于有限体积法的河网水动力并行计算模型[J]. 长江科学院院报,2019,36(5):7-12. (Song Lixiang, Li Qingqing, Hu Xiaozhang, et al. A parallel finite-volume method for hydrodynamic modeling of river network[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2019, 36 (5): 7-12. (in Chinese))
- [43] 王浩. 以产学研深度融合推动水利智慧化升级[J]. 中国科技产业,2022(6):11-13. (Wang Hao. Promoting intelligent upgrading of water conservancy through deep integration of industry, academia and research[J]. Science & Technology Industry of China, 2022 (6): 11-13. (in Chinese))
- [44] 杜守建,李怀恩,白玉慧,等. 多目标调度模型在尼山水库的应用[J]. 水力发电学报,2006,25(2):69-73. (Du Shoujian, Li Huaien, Bai Yuhui, et al. Application of multi objective operation model to Nishan Reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25 (2): 69-73. (in Chinese))
- [45] 贾本有,钟平安,陈娟,等. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. 水科学进展,2015,26(4):560-571. (Jia Youben, Zhong Pingan, Chen Juan, et al. Coordinated optimal operation model of complex flood control system [J]. Advances in Water Science,2015,26(4):560-571. (in Chinese))
- [46] 杨森,周全,黄琳煜. 浦东新区洪涝预报预警系统构建与应用[J]. 中国给水排水,2024,40(1):131-136. (Yang Sen, Zhou Quan, Huang Linyu. Establishment and application of flood forecasting and early warning system in pudong new area [J]. China Water & Wastewater,2024,40(1):131-136. (in Chinese))
- [47] 史超,王兴桦,吴新垒,等. 基于机器学习快速预报模型的城市洪涝预报预警系统研究及应用[J]. 西北水电,2023(2):12-19. (Shi Chao, Wang Xinghua, Wu Xinlei. Study and application of urban flood forecasting and early warning system based on machine learning rapid forecasting model [J]. Northwest Hydropower, 2023 (2): 12-19. (in Chinese))
- [48] 封敏. 大数据驱动的流域洪涝灾害智能决策引擎关键技术研发[J]. 中国水利,2023(11):45-48. (Feng Min. Research and development of key technologies of intelligent decision-making engine for river basin flood disasters driven by big data [J]. China Water Resources, 2023(11):45-48. (in Chinese))
- [49] 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 Jingming, Ma Liping, Yang Yongping, et al. Research on application of artificial intelligence technology in flood disaster prevention [J]. Yangtze River, 2025,56(10):236-245. (in Chinese))
- [50] 罗欢. 一种菌藻共生种植基及其制备方法和应用:ZL, 202211354667.2. X[P]. 2023-07-28.
- [51] 李明,陈文龙,吴琼. 广州市城市河流低水位运行生态修复理念与实践[J]. 中国水利,2023(9):31-35. (Li Ming, Chen Wenlong, Wu Qiong. Ecological and practice of urban river low water level operation in Guangzhou City [J]. China Water Resources, 2023 (9): 31-35. (in Chinese))
- [52] 吴琼,陈文龙,陈军. 基于低水位运行的城市河流污染底泥中微生物群落特征及影响因素[J]. 水资源保护,2024,40(2):126-133. (Wu Qiong, Chen Wenlong, Chen Jun, et al. Characteristics and influencing factors of microbial communities in polluted sediment of urban rivers under low water level operation [J]. Water Resources Protection,2024,40(2):126-133. (in Chinese))
- [53] 陈文龙,吴琼,李一平. 城市河流低水位运行生态修复机制与实践效果[J]. 水资源保护,2024,40(2):16-22. (Chen Wenlong, Wu Qiong, Li Yiping. Ecological restoration mechanism and practical effects of low water level operation in urban rivers [J]. Water Resources Protection,2024,40(2):16-22. (in Chinese))

(收稿日期:2025-12-05 编辑:彭桃英)