

城市水系统综合治理关键技术及其在长江经济带的示范应用

夏军¹, 张世彦², 张永勇², 余敦先¹, 杨军³, 吴胜军⁴

- (1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
3. 中国科学院城市环境研究所 福建省流域生态重点实验室, 厦门 361021;
4. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘要: 内涝、水污染与水体黑臭、河湖生态系统退化是城市面临的主要水问题, 已成为限制长江经济带绿色发展的关键瓶颈问题之一。深入认识城市发展过程中水系统的演变规律以及各要素之间的相互影响, 阐明城市水问题的形成机制, 构建城市水系统综合治理技术体系, 是解决城市复杂水问题的根本途径。本文针对上述水问题, 从水循环系统多过程耦合的角度出发, 总结了城市水系统的概念和特征, 提出了城市水问题系统治理关键技术体系, 并以2016—2022年长江经济带城市(群)治理案例为例开展应用。研究表明: 泵站抽排和海绵措施可有效减少武汉市发生极端降水时的严重内涝面积和消除成渝城市群内涝点; 微生物—植物—水动力—一体化协同调控组合工艺可以显著强化武汉市典型黑臭水体的氮磷去除效果; 源头控制—路径耗散—末端治理的城市河湖生态综合修复体系使重庆市两河流域水体富营养化水平明显下降; 实施上述治理技术体系后, 长江中游城市群绿色发展指数平均提升4.8%。本文可为长江经济带绿色发展重大战略提供城市水系统理论和技术支持。

关键词: 城市水系统; 水环境; 绿色发展; 内涝; 城市群; 长江经济带

DOI: 10.11821/dlxb202409001

1 引言

内涝、水污染和河湖生态系统退化是雨量充沛的长江经济带城市群面临的主要水问题。2011—2018年中国每年平均有154座城市遭遇城市内涝灾害, 年均直接经济损失达1500亿元; 尤其是位于长江中游的武汉市, 2015—2019年均发生了严重的内涝^[1]。长江经济带城市群水污染问题突出, 众多河流湖泊都已遭受不同程度的污染, 部分河流湖泊富营养化日趋严重, 水环境质量有进一步恶化的趋势。截至2016年, 长江经济带城市黑臭水体认定总数为911个, 约占中国城市黑臭水体总数的49%, 初期雨水的源污染是水体黑臭的重要原因^[2]。如何应对城市发展带来的水问题已成为城市可持续发展面临的重大挑战。

收稿日期: 2023-11-03; 修订日期: 2024-07-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23040301); 国家自然科学基金项目(42071041) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23040301; National Natural Science Foundation of China, No.42071041]

作者简介: 夏军(1954-), 男, 湖北广水人, 教授, 中国科学院院士, 中国地理学会会员(S110001624H), 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: xiaj@igsrr.ac.cn

通讯作者: 张永勇(1981-), 男, 湖北京山人, 研究员, 主要从事环境水文过程与人工扰动机制研究。
E-mail: zhangyy003@igsrr.ac.cn

目前城市水问题的成因机制和解决对策方面已开展了大量的研究。在城市水循环及人水关系等方面,如城市降雨产流产污、内涝、水资源与水环境承载力等方面进展突出^[3-4]。然而传统的城市水治理研究对水循环各环节之间的耦合机理认识不足,大多侧重于单一方面或单一过程^[5-6],未能全面考虑城市水循环各个过程之间的相互联系而导致综合治理缺乏。近年来,城市水问题解决越来越多地从水循环系统多过程的角度出发,研究水文、生态环境以及社会经济之间的联系,得出综合性的解决方案^[7-8]。由此,迫切需要从传统单一过程的研究逐步转向涵盖不同下垫面的产汇流和产污过程、海绵措施调蓄、排水管网传输、污水处理设施以及水环境治理与水生态修复等多个过程的综合研究。此外,现有的城市水环境治理大多关注污水处理厂改造扩容、合流制管网改造、截污减排等工程技术方面,而水系统综合治理技术应用研究仍比较缺乏。2014年中国正式提出了海绵城市理念和城市水环境管理模式,推动了城市水系统的理论发展;目前相关研究仍以海绵城市水循环调控与管理为主^[9],而较少对多尺度水环境过程统一调控技术开展研究,对于城市水问题的解决难以取得显著且持久的成效。

因此,深入认识城市发展过程中水系统的演变规律以及各要素之间的相互影响,阐明城市水问题的形成机制,构建城市水系统综合治理技术体系,是解决城市复杂水问题的根本途径。本文从水循环多过程相互耦合的城市水系统角度出发,详细阐述了城市内涝、水污染与水体黑臭、河湖生态退化等水问题系统治理关键技术及其在长江经济带城市(群)的应用,研究结果可以为长江经济带城市群的绿色发展提供水系统综合治理对策与建议。

2 城市水系统综合治理技术体系

2.1 城市水系统的概念与特征

城市水系统是以城市水循环为纽带,耦合与水相关的物理、生物地球化学、生态和人文等过程,从而形成的相互作用的综合系统^[10]。国际上已有许多学者提出将城市水系统视为一个包括自然水循环、社会经济水循环、生物地球化学过程和水生态过程的复杂关联系统,并衍生出社会水文学、社会生态水文学等交叉学科概念^[11-13]。海绵城市建设实施使人们逐渐认识到基于系统性视角去研究海绵城市背景下水循环过程的重要性^[14]。城市水系统理论由早期仅关注绿色基础设施自净过程和自然供排水过程的城市水循环系统1.0版,发展到以由自来水厂到污水处理厂的“供—用—耗—排”系统为核心的城市水循环系统2.0版,再到以“自来水厂—污水处理厂—城市水体与湿地”为核心,融合“绿色+灰色”海绵城市理念的城市水循环系统3.0版,和以“自来水厂—污水处理厂—排水管网—城市水体与湿地”为核心,加入地球化学物质循环和水质过程、污水末端治理和回用过程的城市水循环系统4.0版,促进了城市水系统理论的完善和应用发展^[15]。然而,城市水循环、水环境、水生态过程以及人文过程之间的关联目前仍未系统性地梳理。夏军等^[7]针对国家重大需求和国际学科前沿问题,采用系统治理与城市绿色发展相结合,在原有基础上进一步完善发展,提出了城市水系统5.0理论,该理论认为城市水循环应包括以“降雨—蒸散发—调蓄—径流”为核心的自然水循环和以“供—用—耗—排”为核心的人工侧支水循环,将传统的小海绵、城市管网给排水的中海绵和城市江河湖库的大海绵功能相结合,形成相互联系的海绵城市水系统,实现城市水系统模拟与海绵城市水系统理论与技术的集成研究。城市水系统5.0的主要特征包括:

(1) 多过程性。城市水系统包括降雨、蒸散发、下渗、径流等自然水循环过程和取水、用水、耗水、排水等人工水循环过程, 是一个复杂的多过程耦合系统; 因此, 城市水系统需要从系统视角来考虑具有自然和人工双重属性的水循环多过程之间的耦合互馈机制。

(2) 多尺度性。城市水系统及其驱动要素在时空上具有多重尺度, 既包含排水分区产汇流计算、河湖水动力计算, 城市(群)社会经济水循环和绿色发展计算与评估等不同空间尺度过程, 也包含自然降雨—径流、城市内涝、河湖水动力过程、水循环季节性变化和年际波动、水体黑臭与富营养化治理、城市社会经济发展等不同时间尺度事件; 因此, 城市水系统需要采用合适的尺度转换技术以完成模块间的数据传递与交换。

(3) 整体性。城市水系统包括地表径流、地下水、给排水系统、城市河湖、调蓄净化设施等多个系统单元, 各单元之间具有自然的关联耦合互馈机制; 因此, 城市水系统需要充分考虑各系统单元之间的联动性, 克服不同单元间的尺度差异, 以适应城市水系统管理的整体性要求。

2.2 城市水系统治理关键技术

2.2.1 技术框架 城市水系统5.0耦合城市观测与机理挖掘、水系统耦合模拟与调控、综合治理等技术, 通过采用现场观测分析与模型模拟结果相互验证, 揭示城市水环境演变机理与驱动因素, 同时针对性研发城市内涝调控、黑臭水体治理、河湖生态修复等技术, 结合城市水系统模型开展城市水系统模拟与调控, 最终形成城市水系统综合治理技术体系(图1)。

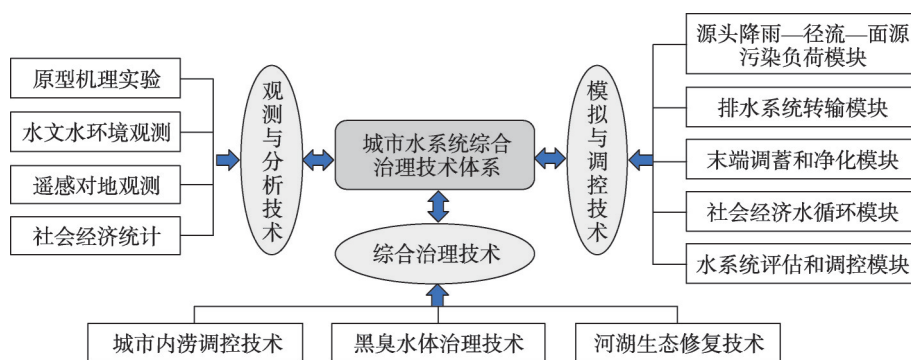


图1 城市水系统综合治理技术体系框架

Fig. 1 Framework of the comprehensive treatment technology system of the urban water system

2.2.2 关键技术

(1) 观测与分析技术。依托遥感对地观测、无人机航拍、视频监控和站点长期观测等开展城市下垫面、水文气象、水环境和水生态观测和机理实验; 并通过历史观测资料 and 统计年鉴等收集整理, 构建城市不同发展阶段高精度下垫面、水文气象、水资源、水环境、水生态和社会经济等序列; 采用对比分析、趋势分析和归因分析等手段, 分析城市经济社会发展面临的水环境水生态问题及主要驱动因素, 揭示城市水循环与水环境的相互作用机理, 从而为长江经济带城市群综合治理技术体系的形成提供理论依据。

(2) 城市内涝调控技术。基于地理信息数据、水文气象观测数据和社会经济统计数据, 揭示城市下垫面格局演变对产汇流的影响, 识别关键影响区域; 提出海绵措施基质和植物优化配置技术, 研发新型海绵城市设施及其优化组合; 构建考虑不同海绵措施调

控特征和多途径汇流方式的城市雨洪模拟技术,模拟城市化进程下不同尺度的产汇流过程,形成城市水文效应和内涝风险评价技术;耦合海绵措施优化、排水管网转输、河湖调蓄与泵站抽排调控模块,构建城市内涝综合调控技术。

(3) 黑臭水体治理技术。开发致黑致臭物质识别与风险评估技术、基于微型生物群落的黑臭成因与演变诊断技术和城市典型黑臭水体综合治理技术。利用DNA高通量测序技术、荧光定量PCR技术等对微生物群落和功能菌进行分析,研究黑臭水体形成条件及其与微生物群落的相互作用关系及强度;开发具有高效脱氮除磷、有机物降解等功能的微生物固定化技术、低成本填料吸附的磷去除技术、新型河道增氧及其组合技术,形成黑臭水体治理技术。

(4) 河湖生态修复技术。研发源头控制—路径耗散—末端治理的多级控制城市河湖生态综合修复技术体系,具体包括不同土地覆被的营养物质排放控制技术,岸带微界面自然生境再造技术、拟自然人工促进生态系统构建技术、植物—生态基—微生物立体浮岛构建技术、富营养化水体移动式水质净化技术、污染负荷削减新型生物强化技术、脱氮菌靶向激活的生物促生技术等。

(5) 城市水系统综合调控技术。基于城市水系统理论,分析城市水环境、水生态问题成因及主要驱动因素,综合考虑城市水文过程、城市管网给排水系统、河湖水环境水生态过程和社会经济发展过程等多个过程,构建城市水循环水环境模拟与调控平台,实现城市多要素、多过程和多尺度的水系统耦合模型与系统平台;以城市水系统模型为基础,集成城市内涝调控技术、黑臭水体治理技术、河湖生态修复技术等关键技术,形成城市水系统综合调控技术。

2.2.3 城市水系统5.0模型 城市水系统5.0模型是城市水系统研究的核心成果,也是城市水系统综合治理的核心工具。以城市水系统5.0理论为基础,城市时变增益降雨—径流模型(Urban Time Variant Gain Model, TVGM_Urban)为核心,研制城市水系统5.0模型^[10]。该模型已在长江经济带城市群(如成渝、中游城市群)、城市(如武汉、九江和重庆)和排水分区(如武汉市青山区和鹦鹉洲小区、重庆市悦来新城片区)开展应用验证^[10, 16-17]。模型的5大功能模块包括:

(1) 源头降雨—径流—面源污染负荷模块。主要模拟城市多种用地类型和海绵措施调控下非线性产流、面源污染物累积—冲刷输出和地表汇流等过程。

(2) 排水系统转输模块。城市排水管网系统分为雨污合流制和分流制两大类,排水系统转输模块主要模拟水量水质在合流制和分流制管网系统的迁移、不同排水措施(如节流孔、溢流堰和排水泵站)下出流过程等。

(3) 末端调蓄和净化模块。主要模拟通过管道系统转输和地表漫流的径流和污染物在污水处理设施(如污水处理厂、人工湿地)的净化过程、城区水体(如河流、湖泊)的迁移和降解过程等。

(4) 社会经济水循环模块。主要模拟城市社会经济(人口和GDP)、基础设施建设(建设投资、排水管网系统长度、绿地、道路和建设用地面积)、社会经济取用水和排污(供水量、用水定额、排水量、排污量和污水处理率)等社会经济发展及其水循环指标的年际变化。

(5) 水系统评估和调控模块。主要模拟评估内涝、黑臭、生态退化和绿色发展等级及其时空分布规律;辨识关键水问题,并优选治理工艺和成本等,为城市水问题治理与绿色发展提供决策依据,是城市水系统5.0模型的出口。

3 城市水系统综合治理技术示范应用

3.1 城市内涝调控示范应用

3.1.1 城市尺度 武汉市地处江汉平原, 地势平坦, 城区内涝风险较高。由于雨季与长江干流汛期重合, 外江水位较高, 泵站抽排是武汉市城区排涝的主要手段。武汉市城区2016年泵站总抽排能力达到 $980 \text{ m}^3/\text{s}$, 至2020年增至约 $1960 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[18]。本文以2016年7月6日降水事件1(24 h降雨量为 203.8 mm)和2020年7月6日降水事件2(24 h降雨量为 134.9 mm)为例, 基于调研得到的2016年和2020年武汉市城区泵站分布情况, 研究泵站抽排方案对城区内涝调控的作用, 为武汉市开展基于泵站抽排的内涝调控提供依据。

在选定的两场典型降水事件下, 设置武汉市城区泵站分别按照2016年和2020年的设计抽排能力(2016年 $980 \text{ m}^3/\text{s}$, 2020年 $1960 \text{ m}^3/\text{s}$)运行, 模拟泵站抽排情况下武汉市区的内涝分布情况, 并通过与泵站不运行的城市内涝分布情况进行比较以分析泵站抽排方案对建成区内涝过程的影响(图2)。模拟结果表明在降水事件1中, 若按照2016年泵站抽排能力进行抽排, 相较于无泵站的情况可削减28%的内涝面积、46%的严重内涝面积; 若按照2020年的抽排能力进行计算, 相较于无泵站的情况可削减38%的内涝面积、62%的严重内涝面积; 在降水事件2中, 若按照2016年泵站抽排能力进行抽排, 相较于无泵站的情况可削减47%的内涝面积、66%的严重内涝面积; 而若按照2020年的抽排能力进行计算, 相较于无泵站的情况可削减65%的内涝面积、80%的严重内涝面积。由此可见, ① 泵站抽排在两次降雨事件中对内涝面积占比具有明显的削减作用, 且在严重内涝区域其削减效果更为明显, 说明采用泵站抽排是缓解武汉市建成区内涝灾害的有效手段; ② 按照2020年设计抽排能力进行抽排可消除武汉市建成区大部分内涝区域, 说明武汉市现状泵站建设能力已满足大部分城区的排涝要求, 仅在东湖、南湖、汤逊湖、后官湖周边及长江干流两侧的局部低洼地区仍需加强排涝设施建设。

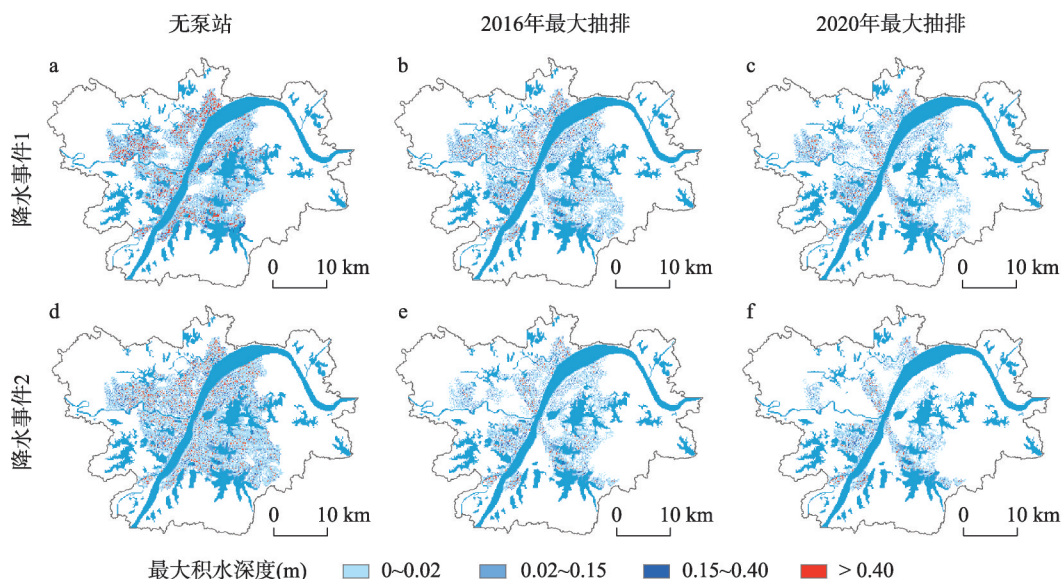


图2 典型降雨在不同泵站抽排条件下最大积水深度的空间分布模拟结果

Fig. 2 Simulation results of the spatial distribution of the maximum water accumulation depth of typical rainfall under different pumping conditions

3.1.2 城市群尺度 成渝城市群以重庆、成都为中心,范围包括四川省的15个城市和重庆市的27个区(县)以及开州、云阳的部分地区,是长江经济带的重要组成部分。以《住房和城乡建设部关于全国城市排水防涝安全及重要易涝点整治责任人名单的通告》(建城函[2018]40号、[2019]37号、[2020]38号、[2021]25号)为依据统计各城市主要易涝点,在2017—2020年期间成渝城市群各城市平均有33个易涝点,表明内涝灾害已成为城市的主要自然灾害。

通过实施海绵措施调控增加地块对雨水的渗、滞、蓄、用和排等调控能力,提高城市整体年径流总量控制率,在一定程度上可减轻城市的内涝灾害。本文利用高精度DEM和土地利用类型数据构建各城市的水系统模型,实现对城市群内涝点空间分布的模拟。对比2017—2020年的城市内涝点统计数据发现,成渝城市群60%的城市易涝点数量模拟偏差在 $\pm 20\%$ 之间,20%的城市偏差在 $\pm 20\% \sim 40\%$ 之间,表明模型具有良好的模拟精度。通过比较各城市年径流总量控制措施实施前后的内涝点空间分布模拟结果发现(图3),当城市群年径流总量控制率为70%时,除成都、雅安外,其他城市内涝点均已消除。上述结果表明,城市年径流总量控制率偏低是城市内涝灾害发生的重要原因,其根源是城市下垫面和基础设施雨水调蓄能力不足,内涝防治体系不完善^[19]。全面落实海绵城市建设理念和标准,优化蓄排设施体系布局,将传统的源头设施小海绵、城市管网给排水的中海绵和城市江河湖库的大海绵功能相结合,形成相互联系的海绵城市水系统,是有效减缓城市群内涝灾害的必要手段。

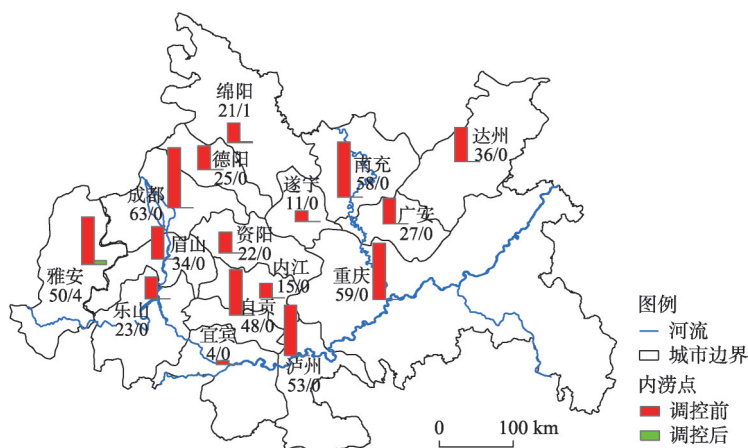


图3 海绵措施调控前后内涝点空间分布模拟结果比较

Fig. 3 Comparison of simulation results of the spatial distribution of waterlogging points before and after the regulation of sponge measures

3.2 城市黑臭水体治理示范应用

城市化发展对武汉市水环境造成了巨大的压力。截至2018年底,武汉市有65处水体被纳入住建部黑臭水体整治名录,黑臭水体总面积占全市水域面积的0.2%。经过持续整治,列入黑臭水体整治名录的水体已基本消除黑臭,但巡司河、机场河和黄孝河等部分河流污染形势依然严峻,治理工作不可忽视。城市河道的黑臭水体治理需要根据实地调查和研究结果,因地制宜地设计生态综合修复技术方案(图4)。

3.2.1 致黑致臭物质识别与风险评估技术 通过现场监测、分光光度化学分析、色谱—质谱联用技术等手段,对黑臭水体的时空分布规律开展研究。在武汉市内19个不同水体进行21个断面现场采样,包括6条浅水河流、11条明渠、1个湖泊水库和1条支流组成;其中

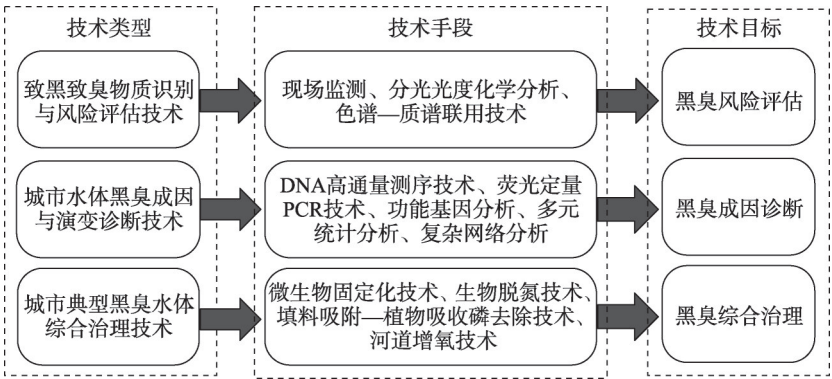


图4 城市黑臭水体治理技术框架

Fig. 4 Technical framework of urban black and odorous water body treatment

包括饮用水水源地水库木兰湖作为参考地点，通过测定致黑物质（总铁、总锰）、致臭物质（二甲基硫醚、二甲基二硫醚、二甲基三硫醚、2-甲基异茨醇等）、溶解性有机质、水化学、稳定同位素特征等指标，研究致黑致臭物质的时空分布规律和水污染成因。监测结果表明^[20]，在武汉市21个采样断面中，2019年无黑臭水体的断面比例为66.7%，水体轻度黑臭的断面比例为23.8%，水体重度黑臭的断面比例为9.5%（图5）；2022年无黑臭水体的断面比例为90.5%，水体轻度黑臭的断面比例为9.5%，水体重度黑臭的断面已完全消除。2022年与2019年相比，武汉市的水体黑臭情况呈现明显改善趋势。溶解性有机质（DOM）荧光组分分析结果表明，不同水体中的DOM来源存在较大差异。外江河道

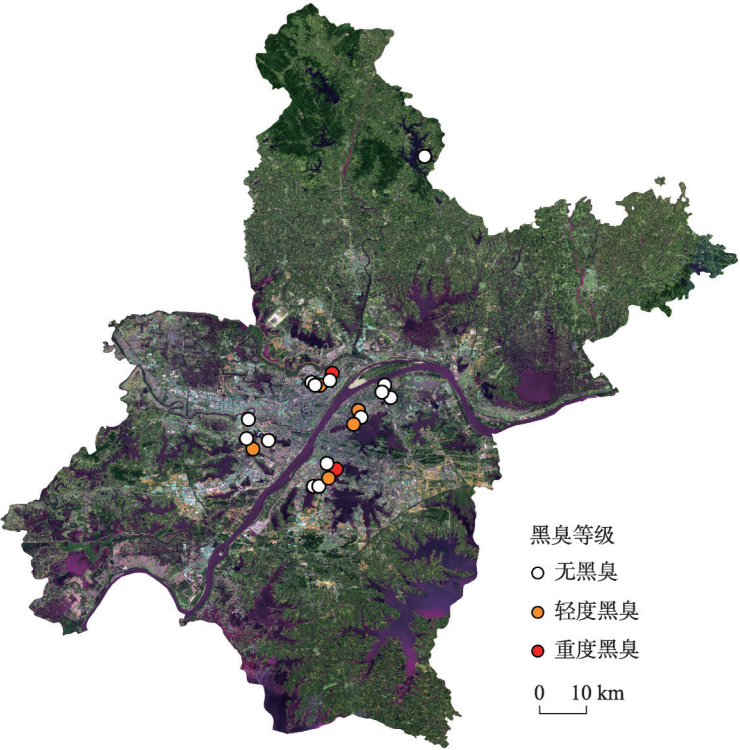


图5 2019年武汉市建成区主要黑臭水体位点与黑臭等级情况

Fig. 5 Main black and odorous water sites and black odor grade in Wuhan city built-up area in 2019

的DOM主要受到人类活动排放的外源DOM影响,湖泊水体的DOM则以自生的内源输入为主,城市河道的DOM则同时受到外源和内源输入的影响。

3.2.2 水体黑臭成因与演变诊断技术 根据水体的类型特征,研究城市水体黑臭问题生态成因与变化趋势,结果表明武汉市水体可以分为无污染、轻度污染、中度污染和重度污染4类水体。各类水体环境因子与细菌、微型真核群落组成之间存在显著相关性,具有预测黑臭发生的潜力。此外,针对城市化水平对浮游植物群落结构(生物量、群落组成和多样性)和功能(资源利用效率)的影响进行研究,结果表明城市建成区面积百分比、水体流速、浊度、总氮、氨氮、总磷、磷酸盐等环境因子与浮游植物生物量、多样性和资源利用效率显著相关,其中资源利用效率对环境因子的响应更强;说明城市化通过改变土地利用和水体物理化学条件,直接或间接地影响浮游植物群落结构和功能^[21]。

3.2.3 城市典型黑臭水体综合治理成套技术 在水体黑臭诊断基础上,针对不同受污染类型水体,通过选用微生物固定化技术、生物脱氮技术、填料吸附—植物吸收磷去除技术、河道增氧技术及其组合工艺,开展城市黑臭水体的综合治理。首先从武汉市黑臭水体样品及周边环境样品中筛选出具有脱氮、除磷、有机物降解功能的单菌与混菌;其次在优化了黑臭水体生态修复复合功能填料的同时,充分利用流化床体积增加微生物附着面积并精准调节流化床膨胀系数,实现复合功能填料构型优化;另外还研发了半沉嵌入式微纳米曝气装置,在改善示范区水动力条件的同时,又避免了底部曝气易导致底泥上翻的问题;最后通过将上述工艺与箱式生物接触氧化工艺、多功能生态浮岛工艺及其组合技术相结合,形成微生物—植物—水动力一体化协同调控技术,并在武汉巡司河和纸坊港两个示范点开展了技术应用。巡司河下游武泰闸断面水质监测结果表明,与常规曝气治理工艺相比,黑臭水体综合治理成套技术显著强化了氮磷去除效果,提升了水体水质,并有效改善了底泥厌氧环境。

3.3 城市河湖生态综合修复示范应用

基于重庆市河湖生态问题及成因,通过集成城市湖库生态修复技术和城市河岸带生态修复技术等关键技术,形成了典型山地城市源头控制—路径耗散—末端治理的城市河湖生态综合修复体系。该修复体系已在两河流域湖库和江北嘴河岸带示范应用。

3.3.1 重庆市两河流域湖库生态修复示范点 两河流域包括跳墩河流域和肖家河流域,总面积35.8 km²,流域内部分区域雨污混流严重,水体输入性污染较大,导致水环境持续恶化,且存在不同程度的富营养化现象。针对两河流域水质恶化、自净能力差的现状,重点面向湖库等核心区域,基于水体不同污染来源与特征,集成人工湿地、沟渠、生态塘、沟凼塘、立体浮岛、微生物在线强化装置、植被群落配置等多种生态修复工程措施,结合生物、物理和化学方法,形成了源头减排—物理修复—生态修复多级控制的城市湖库生态修复体系(图6)。在生态综合修复实施前后分别对示范区水质开展了连续监测。监测结果表明,跳墩河流域水质由V类、劣V类为主提升至以IV类为主,氨氮由治理前的2.3 mg/L降低到治理后的1.4 mg/L,总磷由治理前0.150 mg/L减少到治理后的0.085 mg/L,富营养化水平明显下降。

3.3.2 江北嘴河岸带生态修复示范点 江北嘴是重庆市“两江四岸”治理提升工程的重要组成部分。由于受到三峡水库周期性淹没的影响,“两江四岸”消落带地区出现岸带裸露和景观异质性差、陆域生态系统与水域生态系统割裂、滨水区生态功能和生物多样性退化等问题,导致植被对岸边污染物的拦截和过滤功能基本丧失。项目团队对长江干流重庆段河岸带不同高程采集的土壤样本开展理化性质和DNA测序分析,发现了淹没组和恢复组之间的土壤理化性质和微生物丰度存在显著差异,提出水位波动是造成河岸带生物

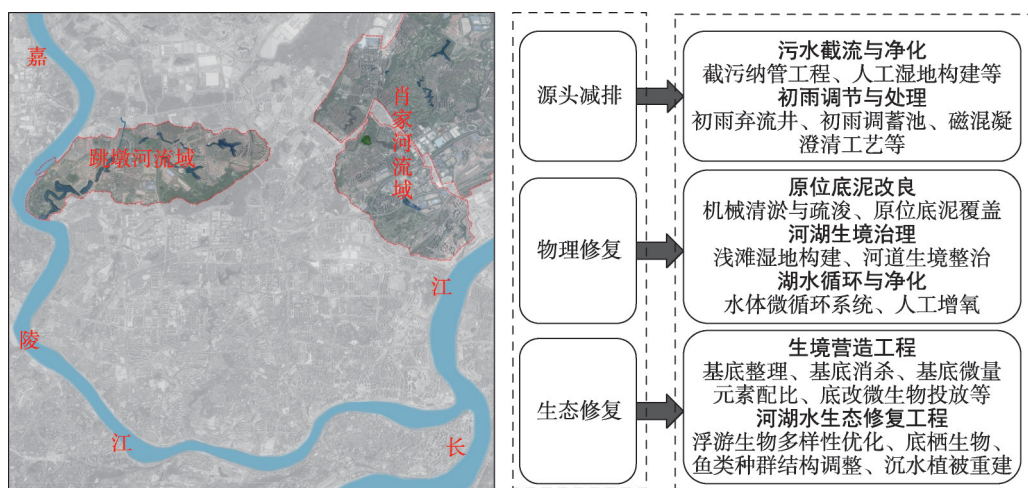


图6 重庆市两河流域河湖生态综合修复技术示范

Fig. 6 Demonstration of comprehensive ecological restoration technology of rivers and lakes in Chongqing municipality

多样性和土壤结构特性变化的主要驱动因子, 并确定以165 m作为微生物抗性韧性转换和土壤性质分异的分割线高程^[22], 为河岸带分层生态修复设计提供了依据。在考虑消落带群落景观异质性的基础上, 采用河岸带中下部自然恢复, 中上部适当人为干预的思路, 提出了以消落带高程分层群落构建技术和生态驳岸治理技术为主体的城市河岸带生态修复技术(图7), 分圈层开展多重水位变化下的韧性植物筛选, 针对消落带165 m枯水位线以上江岸开展治理。截至2022年11月, 一期与二期江北嘴岸带修复工程已经完成。2023年6月嘉陵江洪峰江北嘴示范区的观测表明, 短期淹水对生态修复工程植物正常生长影响不大, 初步证明了江北嘴岸带修复工程中采用的植被生态修复措施能够抵御消落带短期淹水的影响。

3.4 城市水系统综合调控示范应用

在城市水系统5.0模型的基础上, 通过集成城市内涝调控、黑臭水体治理和河湖生态修复等关键技术, 以提高城市绿色发展评估值为目标, 形成城市水系统综合调控技术,

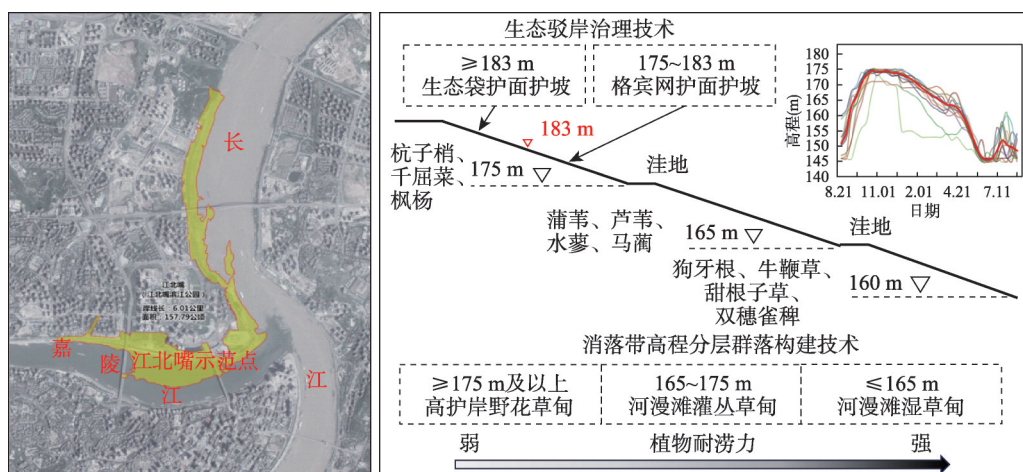


图7 重庆市江北嘴河岸带生态修复技术示范

Fig. 7 Jiangbeizui riverbank belt ecological restoration technology demonstration in Chongqing municipality

并以长江中游城市群为对象开展示范应用。城市水系统模型绿色发展评估模块选取资源利用、环境质量、生态保护、经济增长、绿色生活5个维度18个具体指标,构建绿色发展评估指标体系,并采用多种评估方法结果的中位数作为最终绿色发展评估结果(图8)^[23]。长江中游城市群各个城市现状条件下绿色发展指数在0.40~0.57之间,平均值为0.49;其中吉安(0.57)、萍乡(0.56)和抚州市(0.55)绿色发展指数较高。通过实施内涝调控、黑臭水体治理和湖库生态修复等水问题综合治理,各个城市绿色发展指数明显提升,数值在0.43~0.60之间,平均值为0.51,平均提升幅度为4.8%;荆州(15.7%)、湘潭(13.9%)和仙桃市(10.9%)绿色发展指数提升幅度最明显。

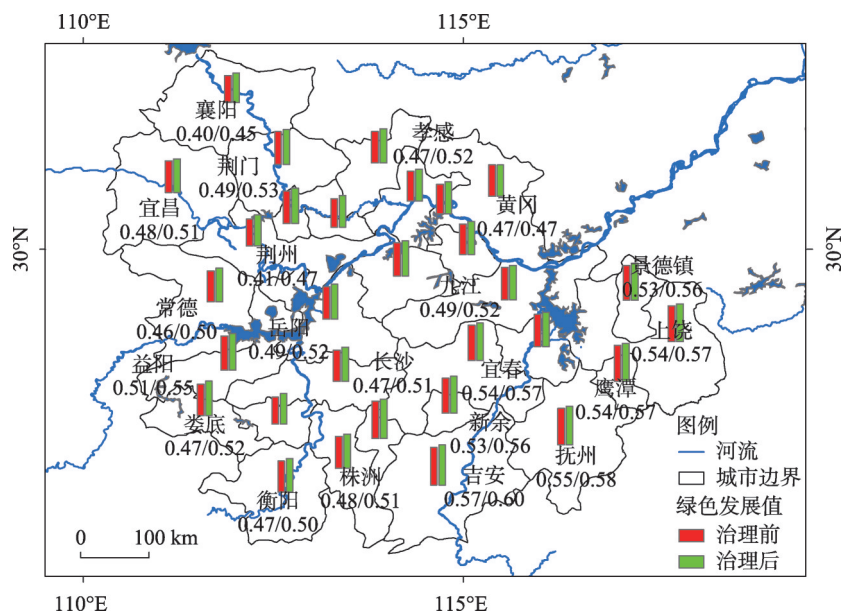


图8 2020年长江中游城市群水环境综合治理前后绿色发展评估比较

Fig. 8 Comparison of green development assessment before and after comprehensive water environment treatment in the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2020

4 结论与展望

推动长江经济带绿色发展是关系国家发展全局的重大战略。城市群是长江经济带的核心,是带动全国经济快速增长的增长极。城市群发展带来的内涝、水污染和水生态退化等问题,已成为限制长江经济带城市群绿色发展的关键瓶颈问题。针对长江经济带城市群面临的主要水环境生态问题,综合利用地球科学水系统理论的前沿技术与方法,研发城市水系统综合治理技术体系,是保障长江经济带高质量发展和城市水安全的重大战略问题。

从理论上开展城市水系统综合治理技术研究,需要从整体上构建城市水系统再认识与改进的5.0版本理论框架,将“降雨—蒸散发—调蓄—径流”为核心的自然水循环和以“供—用—耗—排”为核心的人工侧支水循环相互联系,深入理解城市水文过程、城市管网给排水过程、河湖水环境生态过程和社会经济发展过程的耦合机理,形成传统LID小海绵、城市给排水管网中海绵和城市江河湖库大海绵相互联结的多尺度海绵城市水系统,揭示城市化过程中水循环及其伴随的生态和环境过程演变与机理,解析城市暴雨过程与

面源污染形成机制、城市水体致黑致臭物质与黑臭成因、水体污染物对城市河流生态系统的影响等关键机制,并将单个城市建设纳入长江经济带城市群可持续发展的自然科学与社会科学的综合集成研究。

从方法上开展城市水系统综合治理技术研究,需要在城市水系统5.0理论的基础上,构建城市水环境模拟与调控平台,实现城市多要素、多过程和多尺度的水环境耦合模拟,分析城市水环境生态问题成因及主要驱动因素,进而提出城市水质—水量—水生态的多目标综合调控机制,并基于“源头治理—过程管控—末端调蓄”的系统治理模式,集成城市源头综合调控技术、城市黑臭水体治理技术、城市河湖生态综合修复技术、城市水循环系统调控与评估技术等治理技术,形成长江经济带城市群水环境综合治理技术体系。

由于城市水问题的复杂性,城市水系统综合治理研究仍需进一步完善,主要包括如下方面:

(1) 进一步完善城市水系统基础理论,加强城市内涝和面源污染形成、海绵措施的调控机制研究。目前中国城市化水文效应的机理研究以径流过程为主,对水文过程其他要素和过程的分析仍显不足,城市面源污染形成机制及其在水环境中的迁移转化过程仍未清楚;对城市黑臭水体成因认识尚不清晰,导致现有评价方法大多集中于化学指标的评价,忽视了微生物机制在水体黑臭过程中发挥的驱动作用和指示作用。此外,典型源头海绵措施如雨水花园、绿色屋顶以及生物滞留带等水文水质观测数据不足,导致海绵措施对水文和水质过程调控机制仍有待进一步加强。

(2) 城市水环境综合模拟与调控技术需进一步完善。已有成果大多集中在污水处理厂改造扩容、合流制管网改造、截污等工程体系方面,而水环境综合调控研究仍比较缺乏,对于城市水循环过程中多过程之间的耦合机制研究相对薄弱。此外,由于目前海绵城市管理实践尚缺少在城市水系统尺度上开展的水系统多过程统一调控研究,目前应用于城市水系统调控的模拟与调控模型工具在机理和功能上仍需完善。

(3) 推进城市源头综合调控和江河湖库联合调度技术研发,构建完整的城市内涝防治体系。需要基于城市水系统视角,加强源头调控体系、蓄滞体系和排水体系的综合调控,形成源头低影响开发措施、排水管网系统、城市江河湖库等小中大尺度海绵措施相互联系的城市水系统,为城市内涝防治体系的构建提供理论依据和技术支持。

参考文献(References)

- [1] Xiao S, Zou L, Xia J, et al. Assessment of the urban waterlogging resilience and identification of its driving factors: A case study of Wuhan city, China. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161321. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161321.
- [2] Cao X, Sun Q, Zhao D H, et al. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121511. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121511.
- [3] Xia Jun, Zhang Yongyong, Wang Zhonggen, et al. Water carrying capacity of urbanized area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006(12): 1482-1488. [夏军, 张永勇, 王中根, 等. 城市化地区水资源承载力研究. *水利学报*, 2006(12): 1482-1488.]
- [4] Xu Zongxue, Ye Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: Principle, models and prospects. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392. [徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望. *水利学报*, 2021, 52(4): 381-392.]
- [5] Kirker A N, Toran L. When impervious cover doesn't predict urban runoff: lessons from distributed overland flow modeling. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129539. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129539.
- [6] Mignot E, Dewals B. Hydraulic modelling of inland urban flooding: Recent advances. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: 127763. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127763.
- [7] Xia J, Zhang Y Y, Xiong L H, et al. Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water

- issues in China. *Science China: Earth Sciences*, 2017, 60: 652-658.
- [8] Xia J. Toward water systems science and technology, in the section of the frontiers of water and sanitation, *Nature Water*, 2023, 1: 10-18.
- [9] Jiang Y, Zevenbergen C, Ma Y C. Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environmental Science & Policy*, 2018, 80: 132-143.
- [10] Xia J, Zhang Y Y, She D X, et al. Urban water system theory and its model development and application. *Science China: Earth Sciences*, 2024, 67(3): 704-724.
- [11] Wagener T, Sivapalan M, Troch P A, et al. The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 2010, 46(5): 301. DOI:10.1029/2009WR008906.
- [12] Sivapalan M. Perspectives on socio-hydrology: Changing water systems and the "tyranny of small problems". *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4795-4805.
- [13] Vogel R M, Lall U, Cai X M, et al. Hydrology: The interdisciplinary science of water. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4409-4430.
- [14] Yang Moyuan, Liu Changming, Pan Xingyao, et al. Analysis of sponge city system and research points from the perspective of urban water cycle. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1831-1844. [杨默远, 刘昌明, 潘兴瑶, 等. 基于水循环视角的海绵城市系统及研究要点解析. *地理学报*, 2020, 75(9): 1831-1844.]
- [15] Ren Nanqi, Feng Yujie, Chen Zhonglin, et al. Transformation Rules of Pollutants in Urban Water Systems and Resource Utilization Theory and Technology. Beijing: Science Press, 2012. [任南琪, 冯玉杰, 陈忠林, 等. 城市水系统污染物转化规律及资源化理论与技术. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [16] Hu C, Xia J, She D, et al. A new urban hydrological model considering various land covers for flood simulation. *Journal of Hydrology*, 2021, 603A: 126833. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126833.
- [17] Zhang Y Y, Hou J J, Xia J, et al. Regulation characteristics of underlying surface on runoff regime metrics and their spatial differences in typical urban communities across China. *Science China: Earth Sciences*, 2022, 65(8): 1415-1430.
- [18] Xia Jun, Chen Jin. A new era of flood control strategies from the perspective of managing the 2020 Yangtze River flood. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2021, 51(1): 27-34. [夏军, 陈进. 从防御2020年长江洪水看新时代防洪战略. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(1): 27-34.]
- [19] 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. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 1-5, 15. [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. *水资源保护*, 2024, 40(1): 1-5, 15.]
- [20] Luo Anqi, Chen Huihuang, Zhang Yongyong, et al. Identification of black and odorous water and evaluation of treatment effect in Wuhan city. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(8): 1006-1012. [罗安琪, 陈辉煌, 张永勇, 等. 武汉市黑臭水体辨识及其治理效果评价. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(8): 1006-1012.]
- [21] Yang Y G, Chen H H, Abdullah A M, et al. Urbanization reduces resource use efficiency of phytoplankton community by altering the environment and decreasing biodiversity. *Journal of Environmental Sciences*, 112: 140-151.
- [22] Ye F, Ma M H, Op den Camp H J M, et al. Different recovery processes of soil ammonia oxidizers from flooding disturbance. *Microbial Ecology*, 2018, 76(4): 1041-1052.
- [23] Zhang Yongyong, Hou Jinjin, Zhu Jingmin, et al. Evaluation and regulation of green development based on urban water system simulation. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2023, 56(8): 952-960. [张永勇, 侯进进, 朱静敏, 等. 基于城市水系统模拟的绿色发展评估与调控. *武汉大学学报(工学版)*, 2023, 56(8): 952-960.]

Key technologies of integrated urban water system management and their applications in the Yangtze River Economic Belt

XIA Jun¹, ZHANG Shiyan², ZHANG Yongyong²,

SHE Dunxian¹, YANG Jun³, WU Shengjun⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Fujian Key Laboratory of Watershed Ecology, Institute of Urban Environment, CAS, Xiamen 361021, Fujian, China; 4. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, CAS, Chongqing 400714, China)

Abstract: Waterlogging, water pollution, black and odorous water, and riverine and lacustrine ecological degradation are the main water problems faced by China's cities, which have become one of the key obstacles to the green development of the Yangtze River Economic Belt. In-depth understanding of the evolution of the water system in the process of urban development and the mutual influences between the elements, clarifying the formation mechanism of the urban water problems, and constructing an integrated treatment technology system of the urban water system are the fundamental ways to solve the complex urban water problems. Aiming at the abovementioned urban water problems, this paper summarizes the concepts and characteristics of the urban water system from a systematic perspective of the multiple processes coupled with each other in the water cycle and proposes a key technology system for a systematic solution to the urban water problems, which are demonstrated with the treatment examples of the urban agglomeration in the Yangtze River Economic Belt in 2016-2022. The demonstrative applications show that the pumping stations and sponge measures can effectively reduce the severely inundated area of Wuhan city in extreme rainfall events and eliminate the waterlogging points in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration; the proposed microbial-botanical-hydrodynamic integrated synergistic regulation and control technology can significantly enhance the removal efficiency of the nitrogen and phosphorus level in typical black and odorous water bodies of Wuhan city; the proposed source control-path dissipation-terminal regulation comprehensive ecological treatment system for urban rivers and lakes decreased the water eutrophication level significantly in the Lianghe River basin of Chongqing city; with the implementation of the abovementioned treatment technology system, the green development index of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River increased by an average of 4.8%. This study provides theoretical and technical support of urban water system for the major strategies of the green development of the Yangtze River Economic Belt.

Keywords: urban water system; water environment; green development; waterlogging; urban agglomeration; Yangtze River Economic Belt