

述评与讨论

城市河湖水体综合整治与品质提升技术研究及示范应用

郑兴灿¹, 何强², 陈一², 张秀华¹, 周健², 尚巍¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 城市河湖水体水质的下降、水体景观与生态功能的缺失,对城市水体生态功能和人居环境品质的提升造成了严重影响。在全面推进生态文明建设和美丽中国实现的新时代背景下,如何构建适合于我国城市河湖水体综合整治和功能品质提升的系统性解决方案迫在眉睫。随着国家水体污染控制与治理科技重大专项的实施,经过一系列城市河湖水体监测、评估、治理与修复技术的研发与示范应用,总结凝练出“城市水体监测评估—污染负荷控制—水体水质提升—生态功能恢复”的全链条技术体系,有效解决了我国城市河湖水环境监测评价、水污染控制、水环境整治、水生态恢复的技术问题。在天津、重庆、安徽等重点流域、区域的示范应用验证了水专项技术成果的系统性和实用性,促进了城市河湖水体整治技术的发展与规模化应用,为我国城市水环境工程相关科研、设计、建设、运维和监管人员提供了可参考借鉴的技术方案和工程经验。

关键词: 城市河湖; 综合整治; 生态环境; 技术体系; 人居环境

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)10-0001-09

Technical Research and Demonstration on Comprehensive Rehabilitation and Performance Improvement of Urban River and Lake Waters

ZHENG Xing-can¹, HE Qiang², CHEN Yi², ZHANG Xiu-hua¹, ZHOU Jian², SHANG Wei¹

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The decline of water quality and the lack of landscape and ecological functions of urban rivers and lakes have seriously affected the ecological functions of urban water bodies and the improvement of the quality of human living environment. In the new era of comprehensively promoting the construction of ecological civilization and a beautiful China, it is urgent to build a systematic solution, which is suitable for the comprehensive improvement on the quality and function of urban rivers and lakes in China. A series of research, development and demonstration application of urban river and lake water body including monitoring, assessment, management, and restoration technologies were performed. With the implementation of the National Science and Technology Major Project for Water Pollution Control and Management, the whole technical chain of “urban water body monitoring and assessment – pollution load control – water quality improvement – ecological function restoration” has been summarized. It has effectively solved the technical problems such as water environment monitoring and evaluation, water

pollution control, water environment remediation and water ecology restoration in urban rivers and lakes in China. The demonstration and application in key watershed areas such as Tianjin, Chongqing and Anhui have verified the systemic and practical advantages from the outcomes of the water special projects. These outcomes promoted the technical development and large-scale application in urban river and lake water. The technical research and practical application provided technical solutions and engineering experience to researchers, designers, constructors, operators, and supervisors who work for urban water environment projects in China.

Key words: urban rivers and lakes; comprehensive rehabilitation; ecological environment; technical system; human habitation environment

1 研究背景

随着我国生态文明建设、美丽中国建设、《水污染防治行动计划》等重大战略部署的提出与全面推行,对城乡人居环境质量提升,尤其是消除建设和发展过程给自然环境带来的不利影响方面,提出了越来越高的能力与品质要求。在城镇化发展进程中,首先要做到合理规划、科学实施、绿色低碳,同时兼顾自然水生态环境健康和满足城市功能需求;其次,要对点源、面源、内源等各种污染源施行全过程、全时空、系统性的动态科学管控,对受污染和功能受损的水体进行综合整治、生境修复与生态恢复。

“十一五”期间,通过国家水体污染控制与治理科技重大专项相关项目的实施,在城市水污染控制、水体治理和水生态环境修复等方面突破了一系列关键技术并进行了示范验证^[1]。“十二五”“十三五”期间,重点攻克了针对城市水污染、城市黑臭水体、富营养化湖库的综合治理技术,经过关键技术落地示范,筛选出切实有效的技术方法并进行集成示范,结合区域水环境及城市化效应、自然水循环与社会循环良性耦合、水污染控制与景观生态构建等方面研究,凝练总结出城市河湖水环境系统性治理的集成技术体系、成套技术方法和核心装备产品,为我国城市河湖全面治理提供了切实可行的系列解决方案。

2 城市河湖水环境问题分析

城市河湖水体是流域水系的重要组成部分,是水污染控制的关键节点和景观生态修复恢复的难点所在^[2]。由于较粗放快速城镇化发展,城市河湖受到的人为扰动和污染物影响更为强烈,更具时空动态不确定性,其自然景观与水生态系统遭到的

破坏更为严重,缺水、水质污染和富营养化问题普遍存在。从构成要素上,城市河湖水环境主要涉及城市自然生物赖以生存的水体环境、抵御洪涝灾害的韧性能力、水源的供给与来源、水体动态水质水量、涉水工程及附属设施、水陆整体人文景观、与周围环境和谐程度等诸多方面。

2.1 城市河湖水环境质量状况

图1为2006年以来我国城市水体的国控断面水质演变情况。

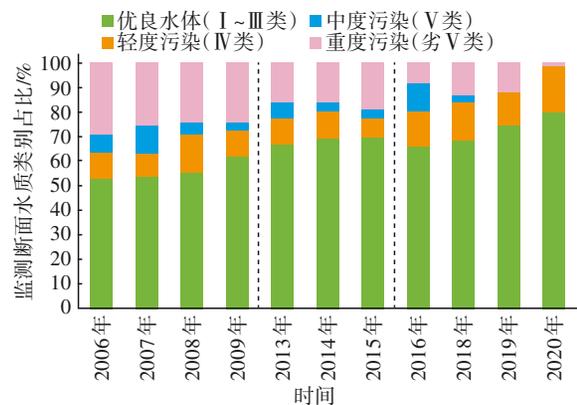


图1 2006年—2020年我国城市水环境(国控断面)水质演变
Fig.1 Evolution of water quality in China's urban water environment (state-controlled section) from 2006 to 2020

由图1可知,2006年—2008年地表水IV~劣V类水的占比偏大,主要污染指标为COD、氨氮、总氮和总磷。2008年之后,国家水体污染控制与治理科技重大专项开始实施,与此同时,各地落地建设了一大批水污染治理和水环境整治工程项目。可以看出,城市水体国控断面的I~III类水占比逐年增加,由“十一五”初期的53%提升至“十三五”末期的80%,断面IV类水占比由9%提升至18%,V类、劣V类水占比大幅度降低到2%。表明我国城市水环境

质量已呈现总体向好的趋势,城市水生态系统也开始得到改善。但需要特别提及的是,我国城市水体非国控断面的水环境质量远低于国控断面,城市建成区水生态环境质量明显低于流域水系的干流及主要支流。

2.2 主要问题分析

造成我国城市水环境问题的成因无疑是非常复杂的,但最主要的原因是城市面积和居住人口的快速膨胀,加上忽视城市水环境容量的有限性和生态承载的脆弱性,引发城市水污染负荷的严重超载、水生态环境的严重透支。归纳起来,构成我国城市河湖水体问题的关键原因主要包括以下几个方面:

① 城市污染负荷远超水环境承载力

我国城市建成区规模快速扩展,城市人口密度大,大量生活污水、工业废水、地表径流没有得到充分的污染物削减,不仅造成城市水体严重水环境问题,也对流域水环境构成威胁^[3]。其一,生活污水量逐年增加,排水设施建设老旧,混错接和不配套现象普遍存在,污水直排问题仍然不同程度存在;管网破损致使外水入流入渗,处理设施进水流量增加、污染物浓度偏低;部分设施运行维护不到位;部分处理出水难以满足水体补水水质要求,影响城市河湖水体水质,甚至导致城市水体黑臭。其二,城市快速扩张导致洪涝频发和汛期流量及峰值增高,带来明显的面源污染和洪涝灾害;污水管网和处理厂的能力有限,降雨期存在污水漫溢现象;近年极端气候带来叠加效应,雨季污染加重、洪涝加剧。其三,我国城市工业发展迅速,同时排放出大量工业废水,是城市水环境的主要污染源之一,高度工业化的城市区域,污染负荷超过生活源。

② 城市水生态环境系统损伤严重

近20多年来,城市建设规模的快速扩张,还带来一定程度的土地不合理开发利用,城市水系统被人为破坏和不合理改变,河湖水域岸线、生态缓冲带、水源涵养区、自然保护区等经常被侵占,围垦湖泊、填湖造地、河湖湿地退化萎缩等问题突出,森林、草原和湿地等自然生态用地面积不断减少,生态空间受到挤占,部分河道被水库、涵闸、泵站、漫水坝占据,水生态流量保障不足。加上水资源过度开发,大量工业废水及生活污水排放,导致城市水生态系统遭到不同程度的破坏,有的城市水生态系

统甚至难以恢复。

③ 城市水质型和资源型缺水突出

我国绝大部分城市存在水质型缺水或资源型缺水问题,其中,点源和面源污染物排放量大大超出城市水环境容量。由于普遍缺乏优质的补水水源,城市水源受到不同程度的污染,这是导致城市水质型缺水的主要原因。对水资源不合理的开发利用,再加上城市本身水资源的匮乏,是城市资源型缺水的重要原因。

④ 城市存在多种类型的水安全隐患

一方面,部分城市的饮用水安全存在隐患,饮用水水源布局 and 结构存在重大风险。城市取水口和企业排污口在空间布局上交叉分布,部分饮用水源地保护区范围及保护区周围临近区域存在工业企业及排污口。城市水源结构存在风险,缺少备用水源,城市饮用水源地水质风险较高。另一方面,由于城市密集的工业生产活动和较高的人口密度,大量新污染物在城市水体中被检出,构成潜在的生态安全与健康风险。

⑤ 全面治理亟需法规与标准引领

城市污染源排查和解析不够全面,污染源控制与水质响应机理不够清晰,技术选择的连续性和持续性及适配度不够。城市河湖水体水质与功能的评价标准不健全,功能定位和水质水量要求不够准确,难以客观体现城市河湖水体的特征和目标要求,阻碍合理技术的选择与实施。城市河湖水体生态修复技术仍存在水质改善效果不佳、监管体系不完善、系统性不够强等问题,无法对城市水体修复提供科学、精准、系统的政策引领和技术指导,在技术方案制定、工程实施和运维管控过程中存在较多的认识误区与不正确行为。

3 城市河湖水体综合整治技术体系构建

城市河湖水体的污染控制与生态修复和恢复,需要基于控源为本、调配优先、多元为辅、景观共建的基本原则,在系统性研判水体类型、功能定位、污染成因、生态容量的基础上,着重突破城市河湖水体污染解析与溯源识别、监测评估、营养盐脱除、非常规水源补水、水动力调控与生态改善等关键技术^[4]。

在国家水体污染控制与治理科技重大专项实施过程中,针对我国城市河湖水环境治理的重大需求,重点突破了以下几方面:①基于城市河湖水体

尺度的污染成因识别与源解析,科学识别污染形成机理与演变特征,为水体功能科学定位、水体修复技术路线选择和技术方案编制提供支撑;②基于城市河湖水体功能定位的评价指标研究,提出适宜性的评价基准,明确城市河湖水体治理目标;③瞄准营养盐脱除及非传统水源补水等技术瓶颈,针对规划设计、建设实施及运维监管全链条开展系统性研

究和工程示范,形成技术和管理体系。

城市河湖水体综合整治与品质提升技术体系框架结构如图 2 所示。构建的技术体系着重强调从“水体监测评估—污染负荷控制—水体水质提升—生态功能恢复”的全链条过程,为我国城市河湖水体的综合整治和品质提升提供较系统的完整的技术解决方案。

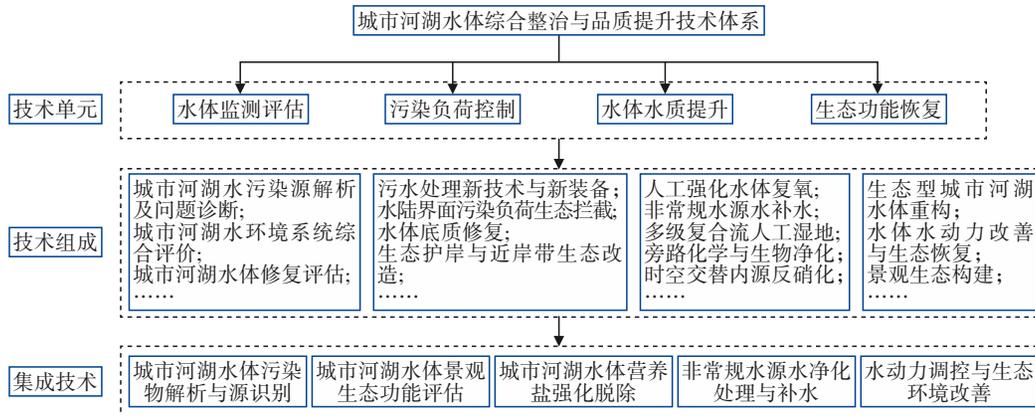


图 2 城市河湖水体综合整治与品质提升技术体系框架

Fig.2 Framework of technical system for comprehensive rehabilitation and performance improvement of urban river and lake waters

① 城市水体监测评估

对于水体监测,先前主要基于传统水质监测方法进行水质分析。随着信息技术的发展,遥感和无线传感器技术已应用于城市水体监测,能够快速获得河流、湖泊等水体的宏观水文水质数据。我国针对城市水体监测需求研发了污染溯源预警仪、特征污染物监测仪等设备,提升了国产溯源预警设备的精度、准确度及市场占有率。对于城市水体评估,先前主要沿用基于大尺度水环境的水质单因子评价法和综合污染指数法,随着水质评价模型的发展,水质模型逐渐应用于不同城市水体的评估。其中,基于城市内湖景观功能综合评价的指标体系(WQI)^[5],以及基于吸收光谱扫描(SPI)与水体表观质量指数(SQI)^[6]的河道水质感观质量评价体系等,弥补了以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)进行城市水体质量评价所存在的不足。

② 城市污染负荷控制

对于水污染负荷控制,原先主要通过截污方式对入河入湖污染物进行控制,随着排水管网的逐步完善,生活点源污染逐步得到控制,从而更加注重面源污染削减和内源污染治理。随着水污染负荷

控制技术的发展,水专项开发了“水生+湿生”植物稳定群落构建及优化配置、河湖底质生物活性多层覆盖等外源阻断与内源治理关键技术、生态护岸和近岸带改造等 10 余项技术^[7-8]。技术成果的工程实施有效消除了内源污染,推动由工程清淤为主到生态阻断为先的技术升级。采用生态类技术控制水体污染负荷,并开发了无污染的新型环保材料,环境性能提高,但由于底泥疏浚等设备能耗仍然较高,成套技术研究和总体经济性能还有待提升。

③ 城市水体水质提升

针对城市水体黑臭和富营养化的治理技术包括生态浮床、曝气复氧、人工湿地、生物接触氧化和混凝沉淀等。早期以生态浮床和曝气复氧为主,传统生态浮床主要采用有浮力的竹质、木质或塑料材料搭建,并通过较易控制的水面浮叶植物来实现对水下藻类的间接控制。目前已经开始智能生态浮床等相关技术的研发,并开发了复合型生态浮岛^[9]。曝气复氧由传统机械曝气转变为多种曝气技术联合,同时与土木工程结合进行曝气复氧。人工湿地、生物接触氧化等技术已经常用于水体整治工程,目前已经出现了多级复合型人工湿地、高负荷

人工湿地等类型,基质填料也相继采用矿石、生物炭和复合轻质填料等新材料^[10],植物配置变得更加多元化,水力条件多流态,处理功能复合化。生物接触氧化工艺改进较多,如分段进水、间歇曝气等。水专项产出的多项水体水质提升技术,大部分为集成技术,具有显著的水体水质改善效果。

④ 城市水体生态功能恢复

针对城市水体普遍滞流缓流、景观缺失、生态功能不足的问题,主要采用水力调控和水生态恢复技术。水力调控技术主要通过增强水体流动性,增加溶解氧含量来保持水质,早期主要通过机械复氧,现在通常采用(太阳能)喷泉复氧、多级溢流坝复氧,提升水体流速的同时协同景观功能。水生态恢复技术以前主要为生物控制方法,利用浮游植物与大型植物的竞争态势来改变水体生态状况^[11],还有制备环境友好型光敏材料投加到水体中抑制藻类。目前开始采用生物操纵技术,包括非经典和经典生物操纵,以及与其他技术组合,例如水生植物-非经典生物操纵和微生物-水生植物强化等技术,有效恢复水体生态与景观功能。

4 工程示范应用案例总结

针对不同地域特征及类型的城市水体问题,采取因地制宜的水污染控制、水体水质改善和生态功能提升技术^[12]。由于面临的不是单一的问题,而是多种因素的综合叠加影响,因此,结合水专项示范工程及推广应用中具有代表性的集成技术成果,选择山地城市河湖水环境治理实践、缺水城市新型水环境系统构建、水乡城镇水体治理与景观提升、北方沿海地域大型景观湿地公园治理等方面的案例,进行总结分析。

4.1 重庆园博园龙景湖水水质保障技术综合示范

重庆园博园龙景湖水水质保障技术综合示范工程(见图3、4),主要针对山地湖泊换水周期长、流速缓慢、湖湾易发富营养化等问题,从水质监测、污染源控制、水质提升及生态功能恢复四个方面实施治理工程,在一定程度上控制了污染源流入,强化了水体的自净能力,有力保证了园博园龙景湖水体的水质,工程完成后龙景湖主要水质指标达到地表Ⅳ类水体水质要求^[13]。

综合示范应用工程研究突破了大坡度径流污染物控制、微型水景滞存净化、溢流雨污水坑塘-湿

地梯级净化等污染物输入控制关键技术,在园博园龙景湖整体示范应用中解决了山地径流水力负荷大、污染负荷削减难的问题。构建了旋转式纳水-复氧-净化系统,在强化水体循环的基础上实现原位水质提升,突破了湖库水体低能耗循环及净化技术,节省能耗15%~25%;通过回水区人工强化复氧技术示范工程,库湾的溶解氧浓度平均提高44.8%,有效降低了水体COD和氨氮浓度,提升了水域自净能力,显著抑制了该区域藻类聚生长。通过湖库健康水生态系统构建技术示范工程,秋亭桥湖湾水体中氨氮和TP浓度明显下降,藻类聚生长显著减少。水体由原来的中度富营养状态转为轻度富营养状态,水环境质量显著改善,节省了水污染控制或引清水补水的费用,还带动了地方产业和经济发展。

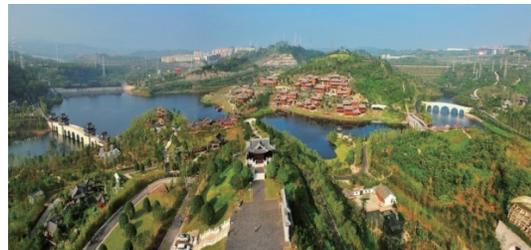


图3 重庆园博园龙景湖水系鸟瞰图

Fig.3 Aerial view of the water system of Longjing Lake in Chongqing Garden Expo Park



图4 重庆园博园龙景湖水系景观生态品质提升实景

Fig.4 Landscaping and ecological improvement in Longjing Lake water system of Chongqing Garden Expo Park

4.2 中新天津生态城新型水系统构建与实施示范

中新天津生态城水系统建设与水专项实施相伴相随,从2008年新型水系统规划到当前全域推广,从最初8 km²起步区水环境建设到目前120 km²地域集成应用,涵盖了规划设计、建设实施、设施融合、运维提升、智慧管控的各个阶段,从污水再生处

理高效利用、雨水资源梯级利用、水体治污溯源、湿地水面保持、水体环境品质提升到水系统联动防涝,通过顶层规划设计,构建了系统性技术解决方案,结合工程难点开展研发与集成应用,为生态城水环境建设和运维提供了全过程的技术支撑^[14]。

通过构建中新天津生态城新型水环境系统,突破传统模式,统筹所有涉水设施,融入非常规水多源协同利用^[15]和海绵城市建设措施^[16-17],系统解决了水资源匮乏、环境本底差、建设标准高叠加影响下的规划建设复杂难题。实现常规与非常规水资源高效利用,满足多维时空水质水量动态均衡要求^[18],创立涉水设施全覆盖、运行状态全监控、监测预警应急联动的水质水量时空保障和效能评估智能化管控方案与平台,形成新型水环境系统规划建设及运行管理模式,建立水量可调、水质可控、参数可视、信息化管理的新型水环境系统,建设了系列示范应用工程(见图5、6),水体环境质量提前达到设定的高标准目标要求。



图5 中新天津生态城非常规水多源多功能净化处理工程
Fig.5 Multifunctional purification system of unconventional water sources in Sino-Singapore Tianjin Eco-city



图6 中新天津生态城水环境综合治理与景观生态品质提升工程

Fig.6 Water environment, landscaping and ecological quality improvement in Sino-Singapore Tianjin Eco-city

首创了所有涉水设施统筹、非常规水多源多等级净化利用、水质水量保障及动态联动联控的生态城市新型水系统构建与实施保障成套技术,在天津生态城整体示范应用中,雨水资源利用量达到 $569 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,中低品质再生水生产能力(处理二级出水和过境水)为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,高品质再生水(脱盐水)

能力为 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,满足景观水体的多等级生态补水需求,实现雨水全利用、非常规水利用率超50%;清静湖及蓟运河故道等总水面面积 3.57 km^2 ,采用多源协同补水(雨水、再生水、过境水净化水、脱盐水)、水力循环、旁路透析、生态功能恢复等技术,水体水质达到地表水IV类标准,昔日盐碱荒滩成为繁荣宜居的绿色生态新城(见图7)。



图7 中新天津生态城——繁荣宜居的绿色生态新城
Fig.7 Sino-Singapore Tianjin Eco-city—prosperous and livable green ecological new city

4.3 安徽枞阳县城区水环境综合治理工程

枞阳县城区水环境综合治理项目工程范围(见图8)为中心城区连城湖、羹脍赛湖、望龙湖、月儿湖、莲花湖及小桥圩、连羹河等片区,治理面积总计 20 km^2 。



图8 枞阳县城区水环境综合治理项目实施范围
Fig.8 Implementation scope of Zongyang urban water environment comprehensive improvement project

以控源截污和内源治理为基础,生态修复为保障,通过全食物链生态系统构建、水动力循环、控藻等工程技术应用,削减外源、内源污染。实施复合型生态护岸、旁路湿地、库湾生态湿地、生态驳岸、海绵梯田、谷坊塘坝等工程建设。以水系连通工程为框架,增加连通设施,景观生态协同、提升整体水环境容量,解决连城湖、羹脍赛湖、望龙湖、月儿湖的换水周期长、水质保持困难、生态廊道不完整等问题,提升了水体自净能力,丰富了生物多样性,增强了水生态结构稳定性。形成了以望龙北路、连羹河、羹脍路为骨架串联连城湖、羹脍赛湖的北部水

体生态廊道,实现“城水相依·共境以融”的治理目标。

项目实施完工后,各湖泊主要指标COD、NH₃-N由地表水Ⅳ类提升至Ⅲ类,TP指标由地表水劣Ⅴ类提升至Ⅲ类(湖库),湖泊水体透明度>1.5 m,岸边区域清澈见底,基本实现“有鱼有草,水清岸绿”的目标(见图9)。



图9 枞阳县城区主要湖泊水体治理效果实景

Fig.9 Realistic views of Zongyang urban water environment after comprehensive improvement

4.4 西咸新区沣西新城新渭沙生态湿地公园

该项目位于沣西新城新河、渭河、沙河三河交汇处(见图10),以新河入渭河口的综合治理为工程核心建设内容,湿地公园面积110 hm²,由新河、沙河、中心湖岛、人工湿地、观鸟区、防洪堤等组成。针对渭河雨水倒灌、沙河干涸、新河传输水质差、全年水资源不均衡、景观可利用空间有限等问题,以多专业协同综合水生态环境治理为核心,海绵城市建设为目标,营造地域特色湿地景观风貌为手法,在有限场地空间内,提出生态景观协同、控源截污和内源治理为主,因地制宜、生态修复优先的创新集成技术方案,建设集防洪排涝、净化水质、涵养水源、恢复生境、景观友好于一体的新型韧性空间,带动周边发展和价值提升。

通过增加水净化处理空间、防洪和休闲娱乐等多重功能,优化土地利用,增加人与自然互动,将新河防洪功能自然化,保证湿地公园行洪安全,最大程度地发挥湿地景观价值。通过再生水、雨水和低污染水协同净化,充分利用外源补水、雨水、渭河污水处理厂再生水等多种非常规水源进行水体补水。结合系统改造、拦污截污和人工湿地,应用多源协同补水、水力循环、旁路透析、生态功能恢复等水质保持技术,将水质由劣Ⅴ类提升至Ⅳ类,促进防洪

体系完善、滨水空间优美、全民参与的水友好之城建设(见图11)。



图10 沣西新城新渭沙生态湿地公园项目范围

Fig.10 Project scope of New Weisha Wetland Park in Fengxi New City



图11 沣西新城新渭沙生态湿地公园建设实景(局部)

Fig.11 Realistic view (partial) of New Weisha Wetland Park in Fengxi New City

4.5 北戴河森林湿地水系综合治理工程

该项目包括生态观光休闲区、森林氧吧和湿地鸟类保护区,占地465 hm²。治理之前,湿地公园内水体黑臭、富营养化严重。通过污染源调查与检测、底泥泥质特征及释放潜力分析、化学强化处理耦合生态修复净化效果研究,制定了涵盖外源污染处理、底泥清淤、水系连通、原位生态修复、生态补水等于一体的系统性污染治理和水质维持技术方案。确定“控制外源、清除内源、改善补水、强化连通、增强自净”的工程方案,通过公园周边污染源系统识别,确定外源和内源污染权重及治理策略;建设两座集中式污水再生处理站,有效控制外源,出水作为公园水系补水;结合底泥检测和释放试验结果,明确不同区位的清淤深度和淤泥处理方法;通过增设闸门、管道、提升泵站等设施,实现20多个水塘连通与循环;选择具有水质改善和景观提升功能的沉水植物,对多个水塘原位修复;强化水系景观设计,形成亲水宜人的自然生态景观。工程实施

前、后局部景观效果见图12。



a. 治理前

b. 治理后

图12 北戴河森林湿地水系治理前、后景观对比(局部)

Fig.12 Comparison of water body landscape (partial) before and after improvement in Beidaihe Forest Wetland

5 结语

通过水专项相关项目(课题)的实施,构建了以城市水体监测评估、水污染负荷控制、水体水质提升、生态功能恢复为核心的城市河湖水体综合整治与品质提升的技术体系。在重点流域、区域开展了规模化、规范化的综合示范与推广应用,完善了治理技术及管理技术体系,将理论研究、技术开发有效融入工程建设实施全过程,切实提升了城市河湖水环境治理的总体成效,培养了大批具有工程经验的专业人才。

当前,我国已进入补齐生态环境短板、实现水环境质量总体改善的攻坚期,还需要针对不同类型城市河湖水体,进一步开展城市水环境改善与生态环境修复技术的研究与集成应用,着重研究开发排水防涝与景观生态融合的城市水系重构、溢流污染控制、再生水河湖补水、底泥生态清淤、水生态重构及生物多样性恢复等方面的成套技术和装备,推动城市河湖整治与品质提升的规范化、智能化、低碳化绿色高质量发展。

参考文献:

- [1] 郑兴灿. 海河流域典型城市水环境整治的关键技术集成与示范应用[J]. 给水排水, 2013, 39(4): 17-22.
ZHENG Xingcan. Integration and demonstration of key technology for water environmental improvement of typical city in Haihe River basin [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(4): 17-22 (in Chinese).
- [2] 孙永利,郑兴灿. 科学推进城市黑臭水体整治工作的几点建议[J]. 给水排水, 2020,46(1): 1-3,56.
SUN Yongli, ZHENG Xingcan. Suggestions on restoration of black and odor urban water body [J].

Water & Wastewater Engineering, 2020,46(1): 1-3,56 (in Chinese).

- [3] 曹甜甜,朱洪涛,王振北,等. 我国西南地区城市水环境综合整治对策与路线图[J]. 环境工程技术学报, 2022,12(2):500-512.
CAO Tiantian, ZHU Hongtao, WANG Zhenbei, et al. Study on the comprehensive improvement countermeasures and roadmap of water ecological environment in urban area of Southwest China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2):500-512 (in Chinese).
- [4] 严以新,阮晓红,何成达,等. 城市轻度污染景观河湖多元生态水质改善与功能提升关键技术与工程示范[J]. 给水排水, 2013, 39(11):11-15.
YAN Yixin, RUAN Xiaohong, HE Chengda, et al. Study and engineering demonstration of the key technologies for the improvement of the water quality and function of multi-factor ecology of the micro-polluted landscape rivers in city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(11): 11-15 (in Chinese).
- [5] KRISHAN G, SINGH S. Water quality assessment in terms of water quality index (WQI) using GIS in Ballia District, Uttar Pradesh, India [J]. Journal of Environmental & Analytical Toxicology, 2016, 6(3): 1000366.
- [6] 李奂,黄勇,李学艳,等. 城市景观水体表观质量评价方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(15): 95-98.
LI Huan, HUANG Yong, LI Xueyan, et al. Study on evaluation method of sensory quality of urban landscape water body [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(15):95-98(in Chinese).
- [7] 陆大玮,孟红雁,梁兴印,等. 水体内源污染原位生物修复技术探讨[J]. 中国给水排水, 2021,37(16): 35-40.
LU Dawei, MENG Hongyan, LIANG Xingyin, et al. Study on *in-situ* bioremediation technology for endogenous pollution in water [J]. China Water & Wastewater, 2021,37(16):35-40(in Chinese).
- [8] 李凯,程金花,祁生林. 永定河流域(北京段)不同生态护岸形式坡面侵蚀及面源污染特征[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(1): 74-83.
LI Kai, CHENG Jinhua, QI Shenglin. Characteristics of slope erosion and non-point source pollution in different ecological revetment in Yongding River basin (Beijing

- section) [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(1):74-83 (in Chinese).
- [9] 董怡华,张新月,陈峰,等.生态浮岛的构建及其修复校园富营养化人工湖水试验[J].*环境工程*,2021,39(3):90-96.
- DONG Yihua, ZHANG Xinyue, CHEN Feng, *et al.* Construction of ecological floating island and restoration of campus artificial lake eutrophication [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(3):90-96 (in Chinese).
- [10] YAN J, HU X B, HE Q, *et al.* Simultaneous enhancement of treatment performance and energy recovery using pyrite as anodic filling material in constructed wetland coupled with microbial fuel cells [J]. *Water Research*, 2021, 201:117333.
- [11] 李鹤男,孙永利,黄鹏,等.苦草改善城市水体及底泥氧化还原特征的研究[J].*中国给水排水*,2021,37(23):28-33.
- LI Henan, SUN Yongli, HUANG Peng, *et al.* Redox characteristics of urban water body and sediment improved by *Vallisneria natans* [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(23):28-33 (in Chinese).
- [12] 刘翔,李森,周方,等.城市水环境综合整治工程原理与系统方法[J].*环境工程*,2019,37(10):1-5,15.
- LIU Xiang, LI Miao, ZHOU Fang, *et al.* Principles and systematic methods of urban water environment comprehensive treatment projects [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10):1-5,15 (in Chinese).
- [13] 李家杰,李宏,毛羽丰,等.基于流域尺度的山地城市湖泊综合治理及效果评价[J].*给水排水*,2016,42(5):9-12.
- LI Jiajie, LI Hong, MAO Yufeng, *et al.* Integrated control of mountainous lake in watershed scale: the effects and evaluation [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(5):9-12(in Chinese).
- [14] 周国华,葛铜岗,尚巍,等.中新天津生态城甘露溪公园海绵建设与运行总结[J].*中国给水排水*,2020,36(24):134-139.
- ZHOU Guohua, GE Tonggang, SHANG Wei, *et al.* Construction and operation of Ganluxi sponge park in Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(24):134-139 (in Chinese).
- [15] 刘振江,尚巍,赵益华,等.营城污水处理厂工艺提升及再生水工艺研究及工程设计[J].*建设科技*,2015(20):84-86.
- LIU Zhenjiang, SHANG Wei, ZHAO Yihua, *et al.* Process upgrading and reclaimed water process research and engineering design for Yingcheng wastewater treatment plant [J]. *Construction Science and Technology*, 2015(20):84-86(in Chinese).
- [16] 葛铜岗,黄鹏,尚巍,等.人工湿地在天津生态城水系构建中的应用建议研究[J].*环境科学与管理*,2016,41(12):141-143.
- GE Tonggang, HUANG Peng, SHANG Wei, *et al.* Application of constructed wetlands in landscape water system construction in Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, 41(12):141-143(in Chinese).
- [17] 孙晓峰,叶青,宋昆,等.基于实际问题的海绵城市建设与管理实践:以中新天津生态城为例[J].*给水排水*,2019,45(4):67-71.
- SUN Xiaofeng, YE Qing, SONG Kun, *et al.* Practice of sponge city construction and management based on practical problems: a case study of Sino-Singapore Tianjin Eco-city [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(4):67-71(in Chinese).
- [18] 孙晓峰,王金丽,黄鹏,等.天津生态城三区合一水资源平衡与高效利用模式[J].*中国给水排水*,2020,36(2):26-33.
- SUN Xiaofeng, WANG Jinli, HUANG Peng, *et al.* Balanced and efficient utilization model of water resources in the three districts of Tianjin Eco-city [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(2):26-33 (in Chinese).

作者简介:郑兴灿(1963-),男,福建寿宁人,工学博士,教授级高级工程师,主要从事城市污水处理与资源化利用、城市水环境治理与海绵城市建设、绿色市政基础设施设计研究。

E-mail:tjzxc@139.com

收稿日期:2022-04-12

修回日期:2022-04-14

(编辑:丁彩娟)