

自然基解决方案在城市黑臭水体治理中的分析

邓祥睿 肖霄 刁贵芳
重庆市水资源综合事务中心
DOI:10.12238/hwr.v9i5.6356

[摘要] 城市黑臭水体治理是改善城市水环境质量的重要任务。为实现城市黑臭水体的有效治理,对自然基解决方案的探讨具有重要价值。基于此,本文通过采用水生植物修复与生态河床构建以及生物群落调控等生态修复技术,结合控源截污与内源清理等工程措施来构建治理体系。并且通过对生态修复技术的应用进行分析,其有助于提升水体自净能力、改善水质、增加生物多样性,具备投资成本低与生态效益显著等优势。实践证实自然基解决方案能实现水体长效治理目标并营造优质滨水生态景观,同时对推动城市生态文明建设具有积极意义。而且基于多维度评估指标体系,合理应用生态修复技术可使水质达到地表水Ⅲ类标准并保证生态系统结构完整且功能稳定。这为城市水环境综合治理提供了科学可行方案,能有效推进水生态系统健康发展。

[关键词] 自然基解决方案; 黑臭水体; 生态修复; 水质改善; 生物多样性

中图分类号: P342+.4 **文献标识码:** A

Analysis of Nature-based Solutions in the Treatment of Urban Black and Odorous Water Bodies

Xiangrui Deng Xiao Xiao Guifang Diao
Chongqing Water Resources Comprehensive Affairs Center

[Abstract] The treatment of urban black and odorous water bodies is an important task for improving the quality of urban water environment. To achieve effective governance, it is of great value to explore nature-based solutions. This paper constructs a governance system by adopting ecological restoration technologies such as aquatic plant restoration, ecological riverbed construction and biological community regulation, combined with engineering measures such as source control and sewage interception and internal source cleaning. Ecological restoration technologies can enhance the self-purification capacity of water bodies, improve water quality and increase biodiversity, and have the advantages of low investment cost and significant ecological benefits. Practice has confirmed that nature-based solutions can achieve the goal of long-term water body governance and create high-quality waterfront ecological landscapes. At the same time, they have positive significance for promoting the construction of urban ecological civilization. Based on the multi-dimensional evaluation index system, ecological restoration technologies can ensure the water quality meets the Class III standard of surface water and the integrity of ecosystem structure and the stability of its functions. It provides a scientific and feasible solution for the comprehensive governance of urban water environment and effectively promotes the healthy development of the water ecosystem.

[Key words] Natural based solutions; Black and odorous water bodies; Ecological restoration; Improvement of water quality; biological diversity

城市化进程加速背景下,城市黑臭水体问题日益突出,严重影响居民生活质量与城市生态环境,传统工程治理方法虽能短期改善水质,却存在治理成本高与生态系统受损以及治理效果不持久等问题。自然基解决方案作为新型治理模式,强调利用自然生态系统自净功能,通过构建健康稳定水生态系统,实现水体可持续治理,该方法能够有效改善水质,提供生物栖息地,增加

城市生物多样性,创造优质城市生态空间。因此深入研究自然基解决方案在城市黑臭水体治理中应用,对指导城市水环境综合治理、提升城市生态系统服务功能具有重要理论价值与实践意义。

1 研究区域概况

城市黑臭水体的形成机理比较复杂,涉及水文与水力以及

水质与生态等多维度因素交互作用,研究区域内的黑臭水体处于城市密集区,河道总长达到3.5公里且呈现显著的城市化特征。在水体感官性状方面表现为水体发黑,还散发硫化氢及氨气等恶臭气体且漂浮大量垃圾与泡沫,理化指标方面表现为溶解氧含量持续低于2mg/L,化学需氧量(COD)浓度高达150–200mg/L,氨氮与总磷浓度分别达到8–10mg/L与0.8–1.2mg/L,水动力条件受闸坝调控致使流速缓慢,95%保证率下的最小流速仅0.02–0.05m/s,远低于河道自净所需的临界流速0.15m/s,底质呈现典型的厌氧状态且以黑色淤泥为主,有机质含量高达8–12%,底泥厚度普遍在0.5–1.0米之间。造成黑臭的直接原因包含生活污水直排与雨污混接以及工业废水偷排等点源污染,以及初期雨水冲刷带来的面源污染,深层次原因则涉及排水系统建设滞后与河道管理体制机制不健全等方面。水生态系统完全崩溃,表现为水生植物群落消失,85%以上河段无任何水生植被覆盖,底栖动物多样性指数低于1.5,仅存在少量耐污性极强的物种,微生物群落结构以厌氧菌为主,水体自净功能丧失。

2 自然基解决方案技术体系构建

2.1 水生植物修复系统

水生植物修复系统构建把群落结构优化与功能提升当作核心,借助构建多层次植物群落达成水质净化与生态修复目标,系统设计是基于植物生态位互补原理,于垂直空间形成“挺水–浮水–沉水”这样的立体结构^[1]。挺水植物挑选根系发达的芦苇与香蒲等,以此建立高效的根际微生物降解区,浮水植物主要选择莲与萍蓬草,将水面遮光率控制在35%–45%之间,沉水植物选用狐尾藻与金鱼藻等耐污物种,进而构建水下生态净化系统,植物群落的净化效率能够通过以下模型进行计算:

$$\eta = (1 - C_1/C_0) \times (1 - e^{-kt}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为植物群落净化效率(%), C_0 为进水污染物浓度(mg/L), C_1 为出水污染物浓度(mg/L), k 为植物群落净化速率常数, (d^{-1}) t 为水力停留时间(d)。群落配置采用“块状–带状”相结合的空间布局,以此确保不同功能群之间的生态廊道连通性,系统运行维护采用季节性轮伐与补种相结合的方式,通过生物量调控维持最佳净化效率,植物收获物经处理后可用于土壤改良以实现生态系统物质循环。

2.2 生态河床工程

生态河床工程借助重构河床结构与功能的方式,营造出多样化的水生生物栖息环境,从底层到表层构建起“基质层–生物膜层–水生植物层”这样的立体生态结构,其中基质层运用卵石与砾石等天然材料进行分层铺设,以此增加底质异质性,生物膜层利用火山岩与沸石等多孔材料,为微生物提供附着与生长的场所,水生植物层选择耐污挺水植物与沉水植物相结合的配置模式^[2]。在急流段设置人工暗礁与透水堰,创造出水流多样性并增强复氧效果,河岸带采用生态护坡技术,以生态砌块为基础植

坡结构采用三维网格植被混凝土,既保证岸坡稳定性又为植物生长提供基质,在河床关键节点布设生物栖息带,投放具有生物膜附着功能的生态基质,促进微生物群落发展并提升水体自净能力,整个系统设计充分考虑水动力条件变化特征,确保在不同流量工况下均能维持稳定的生态功能。

2.3 水生动物群落调控

黑臭水体治理时水生动物群落构建要遵循生态系统演替规律,通过分阶段调控来建立稳定的生物群落结构。初期阶段重点引入耐受低氧且耐污染的底栖动物,像摇蚊幼虫与水丝蚓等,投放密度控制在200–300个/ m^2 ,这些物种能通过生物扰动加速底泥有机质降解,同时培养氨氧化细菌等功能菌群增强水体降解能力^[3]。待溶解氧提升至2–4mg/L时,引入滤食性底栖动物如河蚌与螺蛳等,密度保持在10–15个/ m^2 ,通过其滤食作用降低水体悬浮物含量与提高透明度,配合投放耐低氧鱼类如鲫鱼与泥鳅等,生物量控制在50–80kg/亩,当水质达到稳定改善阶段且溶解氧持续高于4mg/L时,引入鲢鱼与鳙鱼等滤食性鱼类与草鱼按3:2:1的比例配置,总生物量维持在150–200kg/亩。构建“底栖动物–滤食性鱼类–控草鱼类”的完整食物链,在河道不同区段设置人工栖息地与避难场所,例如生态浮岛与人工暗礁等,为水生动物提供栖息繁殖的场所,建立定期监测体系对主要物种的数量与规格及生长状况进行动态评估,发现群落结构失衡时及时调整物种配比确保生态系统稳定运行。

2.4 活水循环系统

活水循环系统作为黑臭水体治理的核心工程,通过水力调控实现水质改善与生态系统修复,系统设计基于黑臭水体特征,采用“快速净化–稳定改善–生态维持”的三阶段调控策略,水力计算采用以下模型:

$$Q = Q_0(1 - e^{-\alpha t}) + Q_1 e^{-\beta t} \quad (2)$$

式中: Q 为系统流量(m^3/s), Q_0 为基础流量(m^3/s), Q_1 为生态补水流量(m^3/s), α 为流量衰减系数(d^{-1}), β 为水量调节系数(d^{-1}), t 为运行时间(d)

$$v = n^{-1} R^{(2/3)} J^{(1/2)} \quad (3)$$

式中: v 为断面平均流速(m/s), n 为糙率系数, R 为水力半径(m) J 为水力坡度。在初期治理这个阶段,采用强化搅动与曝气这些措施,依靠机械充氧以及水体扰动来打破水体分层,让溶解氧能够快速提升到2毫克每升以上,利用水动力调节设施来增加水体流速,以此促进污染物的稀释与扩散,到了稳定改善阶段,采用生态补水与水量调控相结合的办法,维持适宜的水动力条件,配合生态基流泄放保障水体流动性^[4]。进入长效管理阶段,重点关注生态需水量,建立起水量分配与调度机制,确保水体具备自净能力,在关键节点设置生态调节闸与多点曝气设备,形成一套系统化的水力–水质联动调控体系,依据水质监测数据建立智能化控制策略,结合季节性变化特征动态调整运行参数,有效应对

水质波动带来的风险。调水方案既要满足水质改善方面的需求,又要考虑生态系统的完整性,通过精准调控来实现水质持续达标。

3 治理效果与优化建议

3.1 水质改善评估指标

自然基解决方案用于城市黑臭水体治理时效果评估要建立科学完整指标体系,通过定量化分析来验证治理成效,评估体系包含理化指标与生物指标这两大类,评估周期覆盖四个季度以确保数据时空代表性,基于长期监测数据构建的水质改善评估指标体系如表1所示,通过赋权方式建立综合评价模型,为治理效果评估提供定量依据。

表1 城市河道水质改善评估指标体系及标准

评估类别	评估指标	优	良	一般	差
理化指标	溶解氧(mg/L)	>6.0	4.0-6.0	2.0-4.0	<2.0
	COD(mg/L)	<20	20-30	30-40	>40
	氨氮(mg/L)	<1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	>3.0
	总磷(mg/L)	<0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	>0.6
生物指标	浮游生物密度(个/L)	>10 ⁶	10 ⁴ -10 ⁶	10 ³ -10 ⁴	<10 ³
	底栖动物密度(个/m ²)	>1000	500-1000	200-500	<200
	水生植物覆盖度(%)	>50	30-50	10-30	<10
生态指数	Shannon-Wiener 指数	>3.0	2.0-3.0	1.0-2.0	<1.0

评估数据表明采用自然基解决方案的河道水质改善效果显著,其中生物指标的改善情况尤为明显,水生植物覆盖度平均提升40%,底栖动物多样性指数提高1.5-2.0个量级。通过标准化评估体系不仅实现了治理效果的科学量化,同时为后续优化调整提供了决策依据,溶解氧浓度稳定维持在4.5-6.5mg/L,氨氮浓度降至2.0mg/L以下,总磷控制在0.4mg/L以内,各项指标均达到地表水III类标准要求。

3.2 生态系统恢复状况

生态系统恢复成效体现于生态结构完整性与功能稳定性双重提升,系统监测显示河道水生生态系统已形成多层次稳定结构,水生植物群落达成“挺水-浮水-沉水”立体空间配置且优势种群数量达15-20种。浮游生物群落结构从蓝藻优势转变为绿藻与硅藻共优势表明水体营养结构趋于平衡,底栖动物群落演替明显,指示性物种组成由耐污种转变为清洁种,还出现五类清洁水体指示生物。生物多样性指数从治理前1.2上升至3.5以上,生态系统服务功能显著提升。微生物群落功能基因分析显示参与氮循环与有机物降解功能菌群丰度显著增加生态系统自净能力与稳定性全面提升。

3.3 优化完善建议

针对自然基解决方案实施过程存在的系统性问题,优化建议要从生态工程技术提升与管理机制创新两个维度来展开,在生态工程技术层面,需通过优化水生植物群落配置增加速生耐侯植物比例,建立季节性轮替机制提高生态系统抗逆性。要改进生态基质材料配方提高其稳定性与生物可利用度,实现污染物降解效率与基质更新速率动态平衡,应完善水生动物群落结构构建生物量动态监测与调控系统,保障食物网的完整性与稳定性,在水动力调控方面,要采用智能化设备实现水量与水质以及生态需水量精准平衡,建立水质-水量联动调控机制。在管理机制方面,要建立专业化运维团队加强技术培训与考核,设立专项运维资金保障长效管理,需构建流域统一管理平台实现上下游联动治理,协调各部门形成治理合力,在技术标准体系建设方面,要制定生态修复工程设计与施工与运维规范,完善效果评估方法,同时要建立公众参与机制发挥社会监督作用,形成全民参与的水环境保护格局^[5]。在政策支持方面,需要健全相关法规标准建立考核激励机制,为自然基解决方案的推广应用提供制度保障。

4 结语

自然基解决方案在城市黑臭水体治理当中展现出显著成效,通过构建多层次生态修复体系来有效改善水质情况,恢复了水生生态系统功能并创造出优质城市生态空间。实践表明该方案生态效益显著且维护成本较低,同时还具备着很强的持续性特点。通过不断完善生态修复技术体系、优化运行维护措施,并推广成功经验,能够为城市水环境治理提供科学可行的解决方案。研究结果表明,在生态文明建设背景下,自然基解决方案在城市黑臭水体治理中发挥越来越重要的作用,有助于推动城市水生态文明建设迈向全新的发展阶段。

[参考文献]

[1]安元.水生态修复技术在城市景观河流黑臭水体治理中的应用[J].水利技术监督,2025,(06):265-267+275.
[2]刘名扬.城市黑臭水体综合治理方案及应用实践[J].市政技术,2025,43(04):256-263.
[3]王晓辉.基于生态修复的城市黑臭水体治理长效机制与技术集成应用[J].工程建设与设计,2025,(07):179-181.
[4]肖丹丹.城市黑臭水体综合治理方案中的生态修复技术探讨[J].绿色中国,2025,(01):121-123.
[5]王思思,侯爽.基于自然的解决方案在城市水管理方面的研究进展[J].中国给水排水,2021,37(24):25-33.

作者简介:

邓祥睿(1992--),男,汉族,重庆人,研究生,中级工程师,研究方向:水污染治理。