

# 城市黑臭水体治理与水生态修复协同技术研究

朱陈名

江苏南理环境科技有限公司

DOI:10.32629/eep.v8i9.2861

**[摘要]** 我国城镇化进程中,城市黑臭水体面临持续性污染与反复返黑返臭的挑战,对城市生态环境与居民生活品质构成显著制约。为达成“清水绿岸、鱼翔浅底”的生态目标,本研究基于系统工程理论,构建城市黑臭水体治理与水生态修复协同技术体系。从环境科学与生态工程视角解析可知,水体黑臭源于三大核心因素:外源污染高强度输入、沉积物内源污染物释放、水动力不足导致的污染物扩散受阻。据此梳理控源截污与生态修复的协同逻辑,提出“外源阻断-内源净化-生态重构”三级技术框架:外源阻断依托智能化排口净化装置与分布式截污管网实现源头管控,内源净化采用原位底泥清污技术消除释放隐患,生态重构通过沉水植物群落构建与微生物强化恢复自净能力。选取深圳石岩河与河北某黑臭水体治理工程为案例,经水质监测与生态指标分析证实,该体系在COD、氨氮削减及生物多样性恢复方面成效显著。构建水质改善度与生态完整性指数双重评价体系,实现治理效果量化评估。研究表明,协同技术体系可实现水质提升与生态稳定的统一,为黑臭水体“长制久清”提供技术方案与理论支撑。

**[关键词]** 黑臭水体; 生态修复; 协同技术; 底泥治理; 沉水植物

中图分类号: F062.2 文献标识码: A

## Research on Synergistic Technologies for Urban Black and Odorous Water Body Management and Water Ecological Restoration

Chenming Zhu

Jiangsu Nanli Environmental Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** During China's urbanisation process, urban black and odorous water bodies face persistent pollution and recurrent recurrence of black and foul conditions, significantly constraining urban ecological environments and residents' quality of life. To achieve the ecological vision of 'clear waters and green shores where fish glide through shallow depths,' this study employs systems engineering theory to establish a synergistic technical framework for the management of urban black and odorous water bodies and water ecological restoration. Analysis from environmental science and ecological engineering perspectives reveals three core factors underlying water blackening and odour: high-intensity external pollution inputs, release of internal pollutants from sediments, and impaired pollutant dispersion due to inadequate hydrodynamics. Accordingly, the synergistic logic between pollution source control and ecological restoration is outlined, proposing a three-tiered technical framework: 'External Source Interception – Internal Source Purification – Ecological Reconstruction'. External source interception relies on intelligent discharge purification devices and distributed intercepting pipe networks for source control; internal source purification employs in-situ sediment decontamination technology to eliminate release risks; ecological reconstruction enhances self-purification capacity through submerged plant community establishment and microbial reinforcement. Case studies of Shiyuan River in Shenzhen and a black-odorous water body remediation project in Hebei demonstrate, through water quality monitoring and ecological indicator analysis, the system's significant efficacy in reducing COD and ammonia nitrogen levels while restoring biodiversity. A dual evaluation framework combining water quality improvement metrics and ecological integrity indices enables quantitative assessment of remediation outcomes. Research demonstrates that this synergistic technology system achieves unified water quality enhancement and ecological stability, providing both technical solutions and theoretical underpinnings for the sustainable

long-term remediation of black and odorous water bodies.

[Key words] Black And Odorous Water Bodies; Ecological Restoration; Synergistic Technology; Sediment Remediation; Submerged Plants

## 1 引言

### 1.1 研究背景

我国城镇化率突破65%后,城市人口集聚与产业扩张带来的水环境压力持续增大,黑臭水体成为制约城市生态品质提升的突出问题。2015年国务院发布《水污染防治行动计划》(“水十条”),明确要求到2020年地级及以上城市建成区黑臭水体控制在10%以内,2030年城市建成区黑臭水体总体消除,将黑臭水体治理列为水环境改善的核心任务。生态环境部与住房和城乡建设部联合监测数据显示,截至2023年底,全国296个地级及以上城市累计排查出2914条黑臭水体,涉及流域面积超1.2万平方公里,其中重度黑臭水体占比38.7%。其成因呈现显著复合性特征:一是城市污水管网建设滞后于城镇化速度,部分老城区管网覆盖率不足70%,雨污分流改造完成率仅56%,导致雨季生活污水与初期雨水混合溢流,旱季工业废水通过隐蔽排污口非法排放,日均入河污染负荷超30万吨;二是城市河道长期接纳污染物,底泥中有机质含量普遍达5%~8%,部分河段重金属(如镉、铅)超标2~5倍,在厌氧环境下通过扩散、悬浮等方式持续释放,内源污染贡献率占总污染负荷的40%~60%;三是城市河道为满足防洪排涝需求,多采用混凝土硬化边坡、直线化裁弯取直等人工化改造措施,导致河道自然形态破坏,水动力系数降低30%~50%,污染物滞留时间延长至7~15天,难以通过自然扩散稀释改善水质。多重因素叠加使黑臭水体治理面临“治理-反弹-再治理”的循环困境,传统单一的工程技术(如单纯清淤、临时调水)已无法满足长期稳定达标需求,亟需构建“污染控制-生态修复-长效维持”一体化的协同解决方案<sup>[1]</sup>。

### 1.2 研究现状与不足

当前国内外黑臭水体治理技术可分为物理、化学、生物三大类,实际应用中以控源截污、清淤疏浚、生态调水、生物修复等工程措施为主。控源截污通过新建污水管网、改造雨污合流制管网等方式削减外源污染负荷,例如我国东部某省会城市通过建设120公里截污干管,使入河COD负荷削减52%;清淤疏浚则通过机械或水力方式清除表层污染底泥,降低内源释放风险,某工业园区河道经清淤后,底泥氨氮释放通量从8.6mg/(m<sup>2</sup>·d)降至2.1mg/(m<sup>2</sup>·d)。然而,这类技术普遍存在“重工程治理、轻生态修复”的结构性问题,仅关注污染物去除,忽视水体生态系统的重建与恢复。中科院合肥物质科学研究院环境工程研究所2022年开展的全国12个城市黑臭水体治理效果跟踪研究显示,仅实施底泥清淤而未配套生态修复措施的水体,半年内黑臭复发率达43.6%,1年内复发率升至61.2%,根本原因在于清淤后水体缺乏自净功能,无法应对后续的微量污染输入或环境扰动。

从研究层面看,现有成果多聚焦单项技术的优化升级,如新型絮凝剂研发、耐污植物品种筛选等,缺乏对“污染治理-生态

修复-长效维持”全链条协同机制的系统探讨。例如,部分研究优化了生物膜反应器的COD去除效率,但未考虑其与后续沉水植物种植的衔接条件;另有研究关注沉水植物的生长特性,却未结合前期底泥清淤的深度与范围制定适配方案。技术应用呈现碎片化特征,难以形成治理合力。此外,现有工程实践中,治理效果评价多以水质指标(如COD、氨氮)达标为核心,忽视生态指标(如生物多样性、群落结构)的监测与评估,导致部分水体虽短期水质达标,但生态系统脆弱,抗干扰能力薄弱。如南方某城市河道治理后,雨季暴雨导致管网溢流时,水体COD浓度在24小时内从35mg/L升至89mg/L,迅速返黑返臭,凸显生态系统缺失带来的风险。

### 1.3 研究目的与意义

本研究旨在揭示黑臭水体治理与生态修复的协同机理,整合环境工程、生态科学、信息技术等多学科手段,构建普适性协同技术体系。通过典型案例实证分析,量化评估技术组合效能,提供“精准治污-科学修复-长效管理”一体化方案。研究成果可推动治理从“工程达标”向“生态达标”转型,助力水环境质量根本性改善。同时契合国家“双碳”战略,通过生态修复提升水体碳汇能力,促进城镇生态系统低碳转型,兼具环境、社会与生态经济价值<sup>[2]</sup>。

## 2 城市黑臭水体形成机理与协同治理逻辑

### 2.1 黑臭水体核心成因

水体黑臭是外源与内源协同作用引发的生态退化过程。城市污水管网渗漏、初期雨水携带污染物及工业废水非法排放等外源污染,占总污染量的70%以上。这些污染物沉积于水底形成含腐殖质、氮磷的污染层,在高温或水动力扰动下,有机质厌氧分解产生硫化氢、氨等恶臭物质,同时释放氨磷加剧富营养化,形成“沉积-释放-黑臭”的恶性循环。加之城市水体普遍水动力不足、水流滞缓,既阻碍污染物扩散稀释,又抑制水生生物活性,破坏水体自净能力。

### 2.2 协同治理的技术逻辑

协同治理以“切断污染链-重构生态链-稳定系统链”为核心:首先通过控源截污阻断外源输入,为生态修复创造条件;其次实施内源净化,降低底泥负荷并改善微生物生境,减少二次污染;最终构建水生植物群落,建立自净系统实现水质长效稳定。这一过程形成“工程促生态,生态固成效”的正向反馈,既解决当前黑臭问题,又为水生态长期健康奠定基础。

## 3 黑臭水体治理与生态修复协同技术体系构建

### 3.1 外源污染阻断与水质快速改善技术

#### 3.1.1 排口精准净化技术

针对旱季污水冒溢与雨季面源污染问题,研发“截流-净化-调蓄”一体化系统:通过格栅拦截悬浮物降低处理负荷,利用生

物膜反应器依托微生物代谢去除COD与氨氮,配套雨水调蓄池储存初期雨水并后续处理,削减雨季污染峰值。实际应用中,该系统COD去除率超60%,悬浮物去除率超85%,水质改善效果显著<sup>[3]</sup>。

### 3.1.2 管网效能提升技术

构建管网效能评价体系,采用管道检测机器人、声呐探测等技术全面检测排水管网,修复渗漏与破损问题减少污水渗排。结合智慧水务平台实时监控流量、水位等参数,实现精准管理。以深圳石岩河流域为例,新建管网890公里、改造排污口850余个后,污水收集率从65%提升至98%,有效减少污水直排。

### 3.2 内源污染净化与生境改善技术

#### 3.2.1 底泥生态清污技术

采用“物理分选-原位覆盖”创新技术处理污染底泥:通过物理分选分离有机质与悬浮颗粒,将处理后的无机大颗粒覆盖于底泥表面形成屏障,阻断污染物释放。与传统清淤相比,工程量减少40%,且底泥氧化还原电位(ORP)提升150mV以上,改善氧化环境并抑制厌氧分解。

#### 3.2.2 水体活化技术

针对封闭水体流动性差、溶解氧不足问题,采用生态推流设备增强水体流动,曝气装置将溶解氧浓度提升至5mg/L以上,为好氧微生物提供生存条件。同时投放筛选的高效微生物菌剂,加速有机质分解降低污染物浓度,为水生植物定植创造条件。

#### 3.3 水生态系统重构与长效维持技术

##### 3.3.1 沉水植物核心修复技术

沉水植物通过根系分泌化感物质抑制藻类、叶片生物膜吸附污染物、根际微生物转化氮磷实现水质净化。实际应用中筛选苦草、黑藻等适应性强的物种,按“先锋定植-优势扩繁-群落稳定”序列种植,结合再生水补给调节生态环境,抑制黑臭复发。

##### 3.3.2 生态系统优化技术

构建“沉水植物-水生动-微生物”完整生态系统:投放螺类、鱼类控制藻类生长,培育土著微生物菌群增强降解能力。河北某项目应用该技术后,水体透明度从0.3米提升至1.2米,水质从劣V类改善至IV类,水生植物覆盖率超60%,生态功能显著恢复<sup>[4]</sup>。

## 4 协同技术工程应用案例分析

### 4.1 深圳石岩河流域协同治理案例

2017年石岩河被认定为重度黑臭水体,黑臭段长5.13千米,底泥有机质含量8.2%。采用协同方案:新建截污箱涵8711米阻断外源,处理底泥25811平方米降低内源负荷,种植沉水植物3.2万平方米重构生态。2017年底实现“不黑不臭”,2024年三季度达“长制久清”标准,同步建成11.48公里生态碧道,成为修复典范。

### 4.2 河北某城市河道修复案例

采用“排口净化-底泥分选-沉水植物修复”方案:排口设置净化装置控源,分选处理底泥减少释放,种植苦草构建生态系统。治理后COD、氨氮浓度分别下降72%、81%,底泥污染物释放通量降低90%,生态完整性指数提升0.6,实现水质与生态双重改善。

## 5 协同技术效能评价与长效管理

### 5.1 多维度评价指标体系

构建“治理效果-生态功能-管理效能”三级体系:治理效果含黑臭消除率、水质达标率等8项指标,直观反映成效;生态功能涵盖植物覆盖率、生物多样性指数等6项指标,评估系统恢复情况;管理效能包括管网完好率、监管响应速度等4项指标,衡量管理有效性,为方案筛选与评估提供标准<sup>[5]</sup>。

### 5.2 长效监管机制

搭建智能化监管平台,整合水质监测、管网运行等数据,实现“共享-预警-对策推送”闭环管理。建立“河湖长负责制+第三方评估”模式,由河湖长统筹协调,第三方定期生态诊断,结合监测数据优化技术方案,保障治理效果稳定。

## 6 结论与展望

### 6.1 研究结论

(1)需建立“外源阻断-内源净化-生态重构”协同框架,实现工程与生态修复的有效衔接;(2)排口净化、底泥清污与沉水植物修复协同应用,可使COD去除率超60%,生态完整性指数提升0.5以上;(3)“技术评价-智能监管-制度保障”体系是实现“长制久清”的关键支撑。

### 6.2 未来展望

后续将聚焦三方面研究:开发低能耗智能协同设备;构建适配不同气候区的技术应用模型;探索“治理-修复-碳汇”融合路径,为“双碳”目标达成提供助力。

## 参考文献

- [1]中国城镇供水排水协会.城市黑臭水体治理技术与政策研究[R].北京:中国城镇供水排水协会,2023.
- [2]冯慧云,余增亮.底泥生态清污技术在黑臭水体修复中的应用[J].环境工程学报,2023,17(7):1985-1993.
- [3]深圳市水务局.茅洲河流域(宝安片区)黑臭水体治理工程技术报告[R].深圳:深圳市水务局,2024.
- [4]住房和城乡建设部.城市黑臭水体整治工作指南[S].2015.
- [5]湖北经济学院湖北水事研究中心.60个常见环境保护领域名词解释[EB/OL],2025-04-08.

## 作者简介:

朱陈名(1992--),男,汉族,安徽滁州人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:水环境治理、水生态修复。