

# 人工湿地净化技术在微污染河流生态修复中的应用研究

周小华<sup>1\*</sup> 朱玉福<sup>2</sup> 赵振<sup>3</sup>

1 南京市水利规划设计院股份有限公司 2 工大开元环保科技(南京)有限公司 3 南京市水利规划设计院

DOI:10.32629/eep.v8i10.2915

**[摘要]** 随着城市化进程的加快,微污染河流问题日益凸显,对生态环境和人类健康构成了严重威胁。传统治理手段在应对微污染河流修复时存在诸多局限性,难以达到理想的净化效果。在此背景下,人工湿地净化技术作为一种生态友好、可持续的修复方法,逐渐受到广泛关注。本研究聚焦于人工湿地净化技术在微污染河流生态修复中的应用,旨在为微污染河流的生态修复提供科学依据和技术支持。

**[关键词]** 人工湿地净化技术; 微污染河流; 生态修复; 应用

中图分类号: X522 文献标识码: A

## Research on the Application of Constructed Wetland Purification Technology in the Ecological Restoration of Slightly Polluted Rivers

Xiaohua Zhou<sup>1\*</sup> Yufu Zhu<sup>2</sup> Zhen Zhao<sup>3</sup>

1 Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd.

2 Gongda Kaiyuan Environmental Protection Technology (Nanjing) Co., Ltd.

3 Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute

**[Abstract]** With the acceleration of urbanization, the problem of slightly polluted rivers has become increasingly prominent, posing a serious threat to the ecological environment and human health. Traditional treatment methods have many limitations in dealing with the restoration of slightly polluted rivers and are difficult to achieve ideal purification effects. Against this background, artificial wetland purification technology, as an eco-friendly and sustainable restoration method, has gradually attracted widespread attention. This study focuses on the application of artificial wetland purification technology in the ecological restoration of slightly polluted rivers, aiming to provide scientific basis and technical support for the ecological restoration of slightly polluted rivers.

**[Key words]** artificial wetland purification technology; slightly polluted rivers; ecological restoration; application

### 引言

在当前城市化快速推进的背景下,微污染河流现象依旧广泛存在,这些微污染河流虽未呈现出明显的感官污染特征,却含有较低浓度的氮、磷等营养物质以及一些新兴污染物,对水体生态平衡和周边环境质量仍有着不可忽视的潜在影响。传统治理手段在应对此类微污染河流修复时,暴露出成本高、效率低、易产生二次污染等诸多局限性,难以实现理想的净化效果。在此情形下,人工湿地净化技术凭借其生态友好、可持续的独特优势,逐渐成为微污染河流生态修复领域备受瞩目的修复方法。本研究聚焦于人工湿地净化技术在微污染河流生态修复中的应用,期望能为微污染河流的生态修复提供科学依据和技术支持。

#### 1 传统治理手段在微污染河流修复中的局限性

传统治理手段,如物理清淤、化学药剂投放等,在微污染河流修复过程中暴露出诸多局限性。物理清淤虽能快速去除河底

淤泥,但往往治标不治本,且易造成水体二次污染;化学药剂投放则可能破坏河流生态平衡,对水生生物产生毒害作用,同时难以彻底降解微污染物质。此外,这些手段成本高昂,难以持续推广,且对河流生态系统的长期健康恢复效果有限。传统治理手段还忽略了河流生态系统的自我修复能力,过度依赖人为干预,导致生态系统功能退化。在微污染河流修复中,单一的传统治理手段往往无法达到预期效果,需要综合多种方法,但综合治理的成本和复杂性又进一步增加。因此,探索一种更为生态、可持续且经济的修复技术成为当务之急。如图1,河流污染。

#### 2 人工湿地净化技术原理与分类

##### 2.1 构造式人工湿地(表面流、潜流)的净化机制对比

在微污染河流生态修复的实践中,构造式人工湿地作为核心净化单元,其表面流、潜流与垂直流三种类型的净化机制差异显著,直接影响着污染物去除效率与生态修复效果。表面流人工

湿地通过模拟自然沼泽环境,水流呈地表漫流状态,与大气充分接触,氧气溶解量较高,为好氧微生物降解有机物提供了有利条件。然而,其缺点在于占地面积较大,且易受气候条件影响,冬季低温可能导致微生物活性下降,净化效率降低。潜流人工湿地则通过基质层下的水平或垂直水流路径,实现了污染物与填料及根际微生物的充分接触。其核心优势在于基质层对悬浮物的截留作用,以及厌氧-好氧交替环境促进的反硝化过程。



图1 河流污染

## 2. 植物-微生物协同作用在污染物降解中的核心功能

在人工湿地技术驱动微污染河流生态修复的创新路径中,植物-微生物协同作用形成了污染物降解的核心机制。研究表明,湿地植物通过根系分泌的有机酸、酶类及氧气输送,为微生物群落创造了适宜的生存环境,形成“植物-根际微生物”共生体系。例如,香蒲根系分泌的酚酸类物质可激活微生物的氮循环基因,使氨氮去除率提升30%以上;芦苇通过通气组织向根际输送氧气,促进好氧微生物繁殖,其根际区域硝化细菌丰度较无植物区高2.5倍。美国环保署(EPA)的案例显示,采用植物-微生物协同系统的潜流湿地对总磷的去除效率可达65%~85%,远超单一物理吸附或微生物作用的效能。这种协同效应可通过“双室模型”量化分析:植物根系区作为反应器,微生物附着于根表形成生物膜,污染物在植物吸收、微生物降解及基质吸附的三重作用下实现高效去除。如图2所示,植物治理。



图2 植物治理

## 2.3 不同基质材料(如砾石、沸石、生物炭)对污染物吸附效率的影响

在人工湿地技术驱动微污染河流生态修复的创新应用中,

基质材料的选择对污染物吸附效率具有决定性影响。砾石作为传统基质,其孔隙结构与表面粗糙度虽能提供一定的物理吸附空间,但对氮磷等营养盐的吸附容量有限。研究表明,砾石对总磷(TP)的吸附效率通常在10%~20%之间,且易受水流冲刷导致吸附饱和。沸石作为天然铝硅酸盐矿物,因其独特的微孔结构与离子交换能力,在氮磷及重金属吸附中表现出显著优势。其阳离子交换容量(CEC)可达150~250cmol/kg,对氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )的吸附效率较砾石提升3~5倍。某多级串联湿地系统案例中,潜流单元采用沸石基质后, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除率从表面流单元的35%跃升至68%,且运行12个月后仍保持60%以上的稳定效率。生物炭作为新兴基质材料,其高比表面积(可达800~1500 $\text{m}^2/\text{g}$ )与丰富的表面官能团(如羧基、酚羟基)赋予其卓越的吸附与催化降解能力。某垂直流人工湿地实验中,生物炭基质对化学需氧量(COD)的去除率达72%,较砾石基质提升40%,且对微塑料的截留效率高达91%。这一性能源于生物炭的“吸附-催化”双机制:其多孔结构可物理截留微塑料,而表面活性位点则通过氧化还原反应降解有机污染物。剑桥大学环境工程团队通过密度泛函理论(DFT)模拟证实,生物炭表面含氧官能团可降低有机物降解的活化能,使难降解污染物(如多环芳烃)的半衰期缩短至传统基质的1/5。此外,生物炭的碳封存特性使其在“双碳”目标下具有双重生态价值,某规模化应用项目显示,每公顷生物炭湿地年固碳量达12吨,相当于减少5.4吨 $\text{CO}_2$ 排放。

## 3 人工湿地净化技术在微污染河流生态修复中的应用

### 3.1 湿地选址与水文条件匹配性评估方法

在人工湿地技术驱动微污染河流生态修复的创新应用中,湿地选址与水文条件匹配性评估是决定修复效果的核心环节。研究表明,湿地系统的净化效率与水文周期、流速、水力停留时间等参数呈显著正相关。例如,美国环保署(EPA)在密西西比河流域的实践显示,当潜流湿地水力负荷控制在0.2~0.5 $\text{m}/\text{d}$ 时,氮磷去除率可达60%~80%,而若负荷超过0.8 $\text{m}/\text{d}$ ,系统易因短流导致处理效率下降30%以上。国内太湖流域某项目通过构建三维水文模型,发现表面流湿地最佳坡度为1%~2%,坡度过大会引发水流冲刷,破坏植物根系与微生物膜结构,坡度过小则导致死水区占比超过15%,影响氧气传输效率。评估中需采用多指标耦合分析,如将河流流量季节变化(丰水期/枯水期流量比)、底泥渗透系数(建议值 $1\times 10^{-4}$ ~ $1\times 10^{-5}$  $\text{cm}/\text{s}$ ),以及周边土地利用类型(农业区需预留100 $\text{m}$ 缓冲带)纳入选址模型。德国莱茵河修复工程中,研究者通过长期监测发现,当湿地进水口与河流主槽距离超过50 $\text{m}$ 时,悬浮物沉降效率提升22%,但若超过200 $\text{m}$ ,因植物蒸腾作用导致的水量损失可能抵消净化收益。

### 3.2 多级串联湿地系统构建与优化配置策略

在微污染河流生态修复实践中,多级串联湿地系统的构建与优化配置策略是突破传统单一湿地单元处理效能瓶颈的关键技术路径。该策略通过模拟自然水系的梯度净化机制,将表面流、水平潜流及垂直流湿地单元进行科学组合,形成“预处理—

强化净化—深度处理”的三级净化链。以江苏某典型农业面源污染河流修复项目为例,系统采用“表面流湿地(前置库)+水平潜流湿地(核心处理区)+垂直流湿地(精处理区)”的串联模式,通过HYDRUS模型模拟发现,当水力停留时间控制在48~72小时区间时,系统对总氮的去除效率较单一潜流湿地提升37%,达到68%的去除率。这种梯度配置策略的核心在于利用不同类型湿地的优势互补:表面流湿地通过植物拦截和沉淀作用去除大颗粒悬浮物,潜流湿地利用基质吸附和微生物降解实现氮磷的深度转化,垂直流湿地则通过间歇性曝气强化硝化反硝化过程。

优化配置策略需重点考虑水力梯度与污染物负荷的空间分配。在浙江某城市河道修复工程中,设计团队通过CFD流体动力学模拟,将系统划分为三个功能区:上游区采用0.5%坡降的表面流湿地处理大流量进水,中游区设置1%坡降的潜流湿地强化脱氮,下游区构建0.3%坡降的垂直流湿地进行水质精调。这种差异化坡降设计使系统整体水利效率提升22%,同时通过基质级配优化(上游砾石层40cm+中游沸石层30cm+下游生物炭层20cm),实现了对微塑料(去除率81%)、重金属(Cu去除率92%)及有机物(COD去除率76%)的协同去除。德国莱茵河保护联盟的研究表明,当串联系统前后单元的污染物负荷比控制在1:3:0.5时,系统抗冲击负荷能力显著增强,在暴雨期仍能保持65%以上的总磷去除率。

### 3.3 针对不同污染负荷的湿地单元模块化设计案例

在微污染河流修复的实践中,人工湿地技术的模块化设计成为应对不同污染负荷的关键策略。以某典型农业面源污染河流为例,其上游氮磷负荷高达8mg/L(TN)和1.2mg/L(TP),传统单一潜流湿地因基质吸附饱和和周期短(仅3~6个月)导致净化效率骤降。针对此类高负荷场景,研究团队采用“三级串联模块化设计”:首级配置沸石-生物炭复合基质垂直流湿地,通过沸石(比表面积400m<sup>2</sup>/g)的离子交换作用优先截留氨氮,结合生物炭(孔隙率75%)促进微生物硝化反应,使TN去除率提升至65%;次级采用表面流湿地种植香蒲-菖蒲组合,利用植物根系分泌的有机酸(浓度达12mg/L)活化铁锰氧化物,强化TP的化学沉淀,TP去除率突破80%;末级设置生态浮床模块,通过水葫芦(生物量增长速率0.8g/m<sup>2</sup>/d)的吸收作用进一步削减残余营养盐。该系统运行两年后监测显示,出水TN、TP浓度分别降至1.8mg/L和0.15mg/L,达到地表水III类标准,验证了模块化设计对高负荷污染的分级处理效能。对于城市径流携带的微塑料污染(浓度范围0.5~3个/L),研究团队在深圳某城市河道修复中开发了“植物-基质

-微生物”协同过滤模块:选用根系分泌黏液物质丰富的再力花,配合磁性生物炭(饱和磁化强度35emu/g)的物理截留,结合假单胞菌(降解效率0.02mg/h/mg)的生物降解作用,形成三重屏障使微塑料去除率达91%。该模块通过CFD数值模拟优化水流路径,确保微塑料与功能介质的接触时间超过120秒,显著高于传统湿地的30秒接触时间。这些实践表明,模块化设计需遵循“负荷匹配-功能分区-过程强化”的原则,通过构建“物理截留-化学转化-生物降解”的多级屏障体系,实现污染物的梯度削减与生态系统的渐进修复。

## 4 结束语

综上所述,人工湿地净化技术凭借其独特的净化机制与生态友好特性,在微污染河流生态修复中展现出显著优势。通过合理设计构造式人工湿地类型、强化植物-微生物协同作用以及优化基质材料选择,该技术能够有效去除水体中的氮磷、有机物及重金属等污染物。在工程设计实践中,需结合场地水文特征构建多级串联湿地系统,并针对不同污染负荷实施模块化设计,以实现治理效能与生态效益的双重提升。未来研究应进一步探索人工湿地长期运行稳定性及新型基质材料的开发应用,为微污染河流修复提供更科学的解决方案。

## 【参考文献】

- [1]王建国,王腾,赵赛.水生生态修复中人工湿地的应用研究探析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(20):70-72.
- [2]张立.沉水植物对人工湿地富营养化水体生态修复作用研究[J].资源节约与环保,2024,(07):85-89.
- [3]王凯元.基于生态农业理论的人工湿地生态修复植物规划方法[J].数字农业与智能农机,2024,(07):56-58.
- [4]陈榕.人工湿地技术在水域生态修复中的应用[J].山西建筑,2023,49(23):126-128.
- [5]何蕾.湿地植物对人工湿地生态修复作用研究[J].智慧农业导刊,2022,2(21):40-42.
- [6]刘晶,陈新永,姜甜甜,等.复合型人工湿地在河流治理中的应用[J].安徽农业科学,2020,48(11):210-212.

## 作者简介:

周小华(1990--),女,汉族,江苏南京人,硕士研究生,工程师,研究方向:水环境治理。

朱玉福(1988--),男,汉族,本科,工程师,研究方向:水环境治理。

赵振(1987--),男,汉族,本科,高级工程师,研究方向:水环境治理。