

# 人工湿地-生态浮床复合系统对鱼塘养殖废水的净化效果及生态修复机制

蔡名旋

中山市环境保护科学研究院有限公司 广东中山 528463

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16082

**[摘要]** 针对鱼塘养殖废水中氮磷含量高、有机物浓度大、生态环境受损等问题,本文构建了人工湿地-生态浮床复合系统,系统通过“基质-植物-微生物”多介质协同作用,实现污染物的多路径去除。研究在不同运行条件下对 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD 等指标进行动态监测,并结合微生物群落结构与功能基因分析,探讨复合系统的净化效率与作用机,以期对养殖废水治理和渔业可持续发展提供技术参考。

**[关键词]** 人工湿地; 生态浮床; 养殖废水; 净化效果; 生态修复

## 1 引言

近年来集约化鱼塘养殖排出大量的废水,水体中的氮、磷及有机物浓度较高,直接排放会造成水体的富营养化及生态恶化,影响养殖业的可持续发展。然而,养殖废水中氮、磷及有机物的含量高,采用人工湿地、生态浮床等单一技术手段,可在一定程度上进行污染的削减,但是单一技术污染负荷去除率低、系统稳定性能差、不能有效地开展生态修复过程。因此,复合人工湿地和生态浮床系统应运而生,通过基质的吸附、植物的吸收和微生物的降解作用对污染物进行高效同步治理、鱼塘的生态功能修复等。为此,本文构建该复合系统,系统评估其净化性能及生态修复机制,以期对养殖废水治理提供实践参考。

## 2 复合系统的构建与工艺设计

### 2.1 系统整体结构

人工湿地-生态浮床复合系统采用“预处理单元-人工湿地单元-生态浮床单元”串联式三级结构,适配鱼塘尾水的梯度净化需求。预处理单元由格栅与斜管沉淀池构成,格栅孔径设为 8mm 以拦截残饵、鱼体粪便等大颗粒悬浮物,沉淀池有效水深 1.8m,表面负荷控制在  $1.2\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,通过絮凝剂投加装置强化悬浮颗粒物沉降。人工湿地单元选用水平潜流构型,床体尺寸为长 15m×宽 4m×深 1.2m,基质采用“砾石-沸石-活性炭”分层填充,粒径自上而下依次为 20-30mm、5-10mm、1-3mm,填充高度分别为 40cm、50cm、20cm,床体内部种植芦苇、香蒲等水生植物,种植密度为 9 株/ $\text{m}^2$ 。生态

浮床单元布设于湿地出水端的缓冲塘,浮床框架采用高密度聚乙烯材质,单块尺寸为 2m×1m,布设覆盖率为 30%,浮床内部搭载美人蕉、水葫芦等挺水与浮水植物,根系悬挂深度控制在 0.6-0.8m,根系区域填充聚氨酯海绵作为微生物载体<sup>[1]</sup>。

### 2.2 复合耦合运行模式与水力学特征

在复合系统“连续进水-梯度净化-循环回流”的耦合运行形式下,鱼塘尾水经过前处理后经由布水管网多点均匀流入人工湿地,再经过湿地基质吸附和植物-微生物的作用后,水体自流进入生态浮床单元,浮床单元出水一部分自流入回水池,经回流后重新回到鱼塘,达到循环再利用的目的,设定回流量为 60%;另一部分达标水直接外排,作为尾水末端接纳水体。系统水力参数通过水力停留时间(HRT)与水力负荷(HLR)综合进行控制,其中人工湿地单元的 HRT 在 48h,HLR 为  $0.3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,浮床单元的 HRT 在 24h,HLR 为  $0.5\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。数值模拟以及现场监测结果表明,湿地内部为推流式流态,湿地基质孔隙率为 45%~50%,流速分布较为均匀,无短流和死区出现<sup>[2]</sup>;浮床单元由于植物根系的存在形成局部紊流,雷诺数为 800~1200,紊动扩散系数约为非植物区的 3 倍,提高了污染物与植物、微生物的有效接触能力,为多级净化的实现提供水力支持。

## 3 净化效果评价与监测方法

### 3.1 取样与监测指标

采用“梯度布点+定时取样”方案,在预处理单元进水口、

湿地进水口、湿地出水口、浮床出水口及鱼塘对照点设置5个监测断面,每个断面设3个平行取样点。取样频率为每7天1次,连续监测12个月,同步记录水温、pH值、溶解氧等现场参数。实验室监测指标涵盖氮素(总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮)、磷素(总磷、可溶性磷酸盐)、有机物(COD、BOD<sub>5</sub>)及悬浮物(SS),其中氮磷指标采用连续流动分析仪测定,有机物指标通过重铬酸钾氧化法与稀释接种法检测<sup>[3]</sup>。

### 3.2 水质净化效率计算方法

水质净化效率采用去除率与负荷去除量双指标评价。去除率 $\eta$ 计算公式为

$$\eta = (C_1 - C_2) / C_1 \times 100\%$$

其中,  $C_1$  为进水浓度,  $C_2$  为出水浓度。负荷去除量  $q$  计算为

$$q = Q \times (C_1 - C_2) / A$$

式中,  $Q$  为处理水量,  $A$  为系统有效面积, 用于表征单位面积净化能力。对氮磷形态转化效率, 采用形态占比变化率分析, 评估不同单元对污染物形态转化的贡献。

### 3.3 微生物群落多样性与功能基因分析方法

在湿地基质层与浮床根系载体处采集微生物样品, 采用高通量测序技术分析群落结构, 测序区域为16SrRNA基因V3-V4区, 通过OTU聚类计算Shannon-Wiener多样性指数与Simpson优势度指数。功能基因采用实时荧光定量PCR检测, 靶向硝化功能基因、反硝化功能基因及聚磷菌功能基因, 通过标准曲线定量基因拷贝数, 揭示功能微生物的丰度与净化活性关联<sup>[4]</sup>。

## 4 净化效果分析

### 4.1 氮素去除效果与转化途径

复合系统对氮素的总去除率达78.2%, 呈现“湿地主导、浮床强化”的梯度净化特征。人工湿地单元贡献62%的总氮去除量, 其中氨氮去除率59.3%, 硝态氮去除率71.5%, 主要依赖基质吸附与微生物转化: 沸石基质对氨氮的吸附容量达18.6mg/g, 床体内部amoA基因拷贝数为 $1.2 \times 10^8$ copies/g, 硝化菌主导氨氮氧化为硝态氮; nirS、nirK基因丰度达 $8.9 \times 10^7$ copies/g, 反硝化菌在厌氧微环境中完成硝态氮还原。生态浮床单元通过植物吸收与根系反硝化补充去除, 美人蕉对氮的生物富集系数达12.8, 水葫芦根系区域反硝化速率较湿地基质提升40%, 实现氮素从水体向植物与气态的迁移转化。

### 4.2 磷素去除效果与作用机制

人工湿地总磷的去除率达82.5%, 可溶性磷的去除率达到89.1%, 主要是由基质和植物的吸附和吸收完成。人工湿地基质层能够贡献占总磷去除的75%, 其中活性炭对可溶性磷的最大吸附容量9.2mg/g; 铁铝结合态磷含量占基质总磷的42%, 提示吸附和化学沉淀共同作用的效果明显; 生态浮床植物对磷的富集量是2.3g/m<sup>2</sup>, 水葫芦根系是地下部分磷含量是地上部分的1.8倍, 根部的载体聚氨酯海绵表面聚磷菌ppk基因拷贝数达 $5.6 \times 10^7$ copies/g, 富集菌过量吸磷作用加强磷的去除; 沉积物中钙结合态磷所占比例高达38%, 提示磷通过基质固定作用实现长期存储, 避免二次释放的风险。

### 4.3 有机物降解效果与微生物作用分析

有机物降解主要依赖微生物异养代谢, 具体降解效果如表1所示。

表1 有机物降解效果

监测指标	预处理出水浓度 (mg/L)	湿地出水浓度 (mg/L)	浮床出水浓度 (mg/L)	总去除率 (%)	湿地单元贡献率 (%)	浮床单元贡献率 (%)
COD	186	72	35	81.2	61.3	38.7
BOD <sub>5</sub>	89	28	12	86.5	68.5	31.5

复合系统对COD、BOD<sub>5</sub>总去除率分别达81.2%、86.5%, 且湿地单元贡献率更高, 分别为61.3%、68.5%。有机物降解核心依赖微生物异养代谢, 湿地基质层Shannon指数达3.8, 变形菌门与拟杆菌门占比超60%, 为优势降解菌群。浮床根系因素流强化传质, 微生物活性较湿地提升55%, BOD<sub>5</sub>/COD比值从0.48降至0.34, 难降解有机物被高效分解, 群落随

浓度降低向寡营养型演替。

### 4.4 综合水质改善与对比分析

复合系统对各水质指标改善效果显著, 总氮、总磷、COD较进水改善率分别达78.2%、82.5%、81.2%, 悬浮物降低77.9%, 溶解氧提升85.7%, 出水COD达地表水III类标准。对比单一技术, 其总氮、总磷去除率较单一湿地高25.6%、

18.7%，较单一浮床高46.8%、54.9%。悬浮物去除主要依赖湿地，溶解氧提升则浮床贡献更大，印证系统“梯度净化、功能互补”的技术优势。

## 5 生态修复机制探讨

### 5.1 水生植物在系统中的作用

水生植物通过“吸收-拦截-释氧-供载体”四维作用驱动生态修复。营养吸收层面，芦苇、香蒲对氮的积累量达 $3.2\text{g}/\text{m}^2$ ，美人蕉对磷的富集系数达8.6，直接降低水体氮磷浓度；物理拦截方面，植物茎叶形成密集阻隔层，使悬浮物沉降速率提升60%，湿地单元悬浮物去除率达77.9%。植物根系通过光合作用释氧，在基质中形成“好氧-缺氧-厌氧”微环境梯度，溶解氧含量从根系表面的 $7.2\text{mg}/\text{L}$ 降至基质深层的 $0.8\text{mg}/\text{L}$ ，为硝化-反硝化菌提供适宜生境。

### 5.2 微生物群落结构演替及其净化贡献

微生物群落随净化过程呈现“功能特化-丰度提升-结构稳定”的演替规律，构成污染物降解的核心动力。湿地进水端以异养菌为主，变形菌门占比达45%，主要降解高浓度有机物；中段硝化菌（*amoA* 基因拷贝数 $1.2\times 10^8\text{copies}/\text{g}$ ）与反硝化菌（*nirS/K* 基因 $8.9\times 10^7\text{copies}/\text{g}$ ）丰度显著提升，驱动氮素转化；出水端寡营养菌占比升至30%，群落 Shannon 指数从2.9增至3.8，稳定性增强。浮床根系区域因传质效率高，微生物活性较湿地提升55%，聚磷菌（*ppk* 基因 $5.6\times 10^7\text{copies}/\text{g}$ ）过量吸磷贡献25%的总磷去除量，功能微生物的协同作用使系统净化效能较无菌对照组提升70%<sup>[5]</sup>。

### 5.3 基质与浮床材料对污染物迁移转化的影响

基质和浮床介质的“吸附-沉淀-缓释-传质”实现污染物定向转化和封存。湿地基质的沸石的最高吸附氨氮容量为 $18.6\text{mg}/\text{g}$ ，使吸附氨氮封闭在孔隙中；活性炭的吸附最大值可达 $9.2\text{mg}/\text{g}$ 的可溶性磷酸盐，铁铝氧化物与磷的共沉淀使形成的铁铝结合态磷占基质中总的磷达42%。聚氨酯海绵浮床的孔隙度高达90%，为微生物提供了附着场所（生物量达 $12.5\text{g}/\text{m}^2$ ），通过缓释碳源实现了反硝化，浮床单元反硝化速率较不添加碳源组高40%。沉积物中的钙结合态磷的比例上升达38%，证明了磷经基质固定封存，减小了磷的二次释放，实现了污染物去向为基质固定吸附-转化-封存。

### 5.4 系统对鱼塘生态环境改善的协同效应

复合系统通过复合系统的“水质净化-生境构建-生态调

节”整合修复鱼塘生态系统。“水质净化”，出水COD符合地表水Ⅲ类，溶解氧含量提高85.7%，透明度从0.4m提高到1.2m，为水生生物营造良好的生存环境。“生境构建”，浮床植物为鱼类提供栖息、产卵的场所，植物覆盖30%水域的鱼类种群数量比对照组增加52%；优化微生物群落，提高水体的酶活性，脲酶、磷酸酶活性分别增加了1.8倍和2.3倍，加快物质循环速率。“生态调节”，系统回流比为60%，实现水资源循环利用，降低养殖业用水量；氮磷回收，植物生物量年总产量达到 $0.8\text{kg}/\text{m}^2$ ，可以用来作绿肥，资源化利用，构建“养殖-净化-资源利用”的生态闭环，实现鱼塘生态系统的稳定性、均衡状态。

## 6 结语

本文重点以人工湿地-生态浮床复合系统对鱼塘养殖废水中氮、磷、有机质的去除效率、微生物组成、植物吸收和基质的耦合去除作用作为研究对象，搭建复合系统模型，并寻找合适的运行模式，实现复合系统的污染协同去除与生态恢复。本研究系统揭示复合系统对鱼类养殖废水进行生态修复的生态学意义，尝试找出一个能够同时起到水质净化与环境生态恢复的生态学效率，并实现效率的同时提升，为复合系统在水域面积更大的水产养殖体内或外的大规模应用提供参考。未来，随着材料改进与智能监测技术的应用，该系统有望在更大规模养殖水体中实现高效、可持续推广。

## [参考文献]

- [1] 伍建业, 吴永贵, 兰美燕, 等. 复合人工湿地对陆基水产养殖废水中氮磷的净化及其微生物群落特征[J]. 环境工程学报, 2023, 17(02): 517-531.
- [2] 陈军亮, 许凤玲, 陈家颖, 等. 向日葵复合垂直流人工湿地脱氮除磷效果分析[J]. 环境生态学, 2022, 4(06): 63-68.
- [3] 李奎. 稻蟹共作-池塘养殖复合生态系统营养循环及生态评价研究[D]. 上海海洋大学, 2022.
- [4] 余俊霞, 陈双荣, 刘凌言, 等. 复合人工湿地系统对低污染水总氮的净化效果及其微生物群落结构特征[J]. 环境工程, 2022, 40(01): 13-20.
- [5] 董怡华, 张盛宇, 陈峰, 等. 植物塘-人工湿地复合系统基质与植物筛选及农田退水处理研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(02): 771-779.