

文章编号:1005-3832(2026)02-0044-09

# 生物絮团养殖模式下池塘微孔增氧对底泥的修复作用

张洪<sup>1,2</sup>, 杜飞<sup>1</sup>, 王佳豪<sup>1</sup>, 赵志刚<sup>1</sup>, 徐奇友<sup>3</sup>, 刘红柏<sup>1</sup>, 王常安<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江省水产动物病害与免疫重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150070;

2. 大连德泰海洋牧场有限公司, 辽宁 大连 116300;

3. 湖州师范学院生命科学学院, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 本试验探讨了微孔曝气在生物絮团养殖池塘中对底质和水质恢复的作用, 并比较了微孔曝气与叶轮曝气的增氧效果。结果表明: 与叶轮曝气相比, 底部微孔曝气显著降低了池塘底泥的总氮和亚硝酸态氮含量( $P < 0.05$ ), 且其上覆水的亚硝酸盐和氨氮含量在8月初呈显著性下降( $P < 0.05$ ); 2种增氧方式对底泥有机质、总磷及上覆水总磷等指标均无显著性影响( $P > 0.05$ ), 但微孔曝气在养殖初期表现出更高的磷素浓度和更活跃的波动特征。此外, 微孔曝气促进了鲤、鳊和草鱼的生长, 特定生长率分别提高5.24%、5.68%和11.16%, 体质量增长率分别提高9.62%、13.50%和14.77%, 而鲢的生长在2组间无显著性差异( $P > 0.05$ )。因此, 相较于传统叶轮曝气, 微孔曝气可更有效地优化氮磷的利用效率, 促进鱼类生长, 并显著增加底质中总氮的释放水平。

**关键词:** 微孔增氧; 底泥; 氮磷; 修复作用

中图分类号: S963

文献标识码: A

## The Restoration Effect of Microporous Aeration on Substrate Under the Biofloc Aquaculture Model in Ponds

ZHANG Hong<sup>1,2</sup>, DU Fei<sup>1</sup>, WANG Jiahao<sup>1</sup>, ZHAO Zhigang<sup>1</sup>, XU Qiyu<sup>3</sup>, LIU Hongbai<sup>1</sup>, WANG Chang'an<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Aquatic Animal Diseases and Immunity of Heilongjiang Province, Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China;

2. Dalian Deta Marine Pasture Co. Ltd., Dalian 116300, China;

3. College of Life Sciences, Huzhou Normal University, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** This study investigates the efficacy of microporous aeration in restoring substrate and water quality within biofloc-based pond polyculture systems, through a comparative analysis with traditional impeller aeration. Results demonstrated that bottom microporous aeration significantly reduced sediment total nitrogen (TN) and nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) concentrations compared to paddle-wheel systems by trial termination ( $P < 0.05$ ), while also achieving notable reductions in overlying water  $\text{NO}_2\text{-N}$  and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) levels during early August ( $P < 0.05$ ). Although both aeration methods showed comparable effects on sediment organic matter, total phosphorus (TP), and overlying water TP ( $P > 0.05$ ), microporous-aerated ponds exhibited elevated initial phosphorus concentrations and enhanced nutrient flux dynamics during early cultivation. Notably, treatment groups displayed superior growth performance in *Cyprinus carpio* (specific growth rate +5.24%, weight gain +9.62%), *Aristichthys nobilis* (+5.68%, +13.50%), and *Ctenopharyngodon idella* (+11.16%, +14.77%), while the growth of *Hypophthalmichthys molitrix* showed no significant difference between the two groups. Therefore, compared to traditional impeller aeration, microporous aeration is more effective in optimizing nitrogen and phosphorus utilization, enhancing fish growth, and effectively increasing the release of total nitrogen from the substrate.

**Key words:** microporous oxygenation; substrate; nitrogen and phosphorus; remediation

近些年来,我国的水产养殖业已经进入上升和发展阶段,尤其是沿海地区的水产养殖规模和集约化水平在快速扩大和提高。目前,集约化水产养殖

仍是我国淡水渔业的主要养殖方式。然而相较于其他养殖方式,传统集约化养殖的鱼类饲料吸收利用率偏低<sup>[1,2]</sup>。研究表明<sup>[3-6]</sup>,鱼类对饲料养分的吸收率

收稿日期:2025-07-01

基金项目:现代农业产业技术体系(特色淡水鱼)(CARS-46);黑龙江省重点研发计划(2024ZX10B06);中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2023TD60、2023TD96);黑龙江省特色水产动物种质资源鉴定评价及良种创制。

作者简介:张洪(1979-),男,硕士,工程师,研究方向为水产养殖.E-mail: zh826049@163.com

通信作者:王常安(1981-),男,博士,研究员,从事水产动物营养与饲料科学研究.E-mail: gordoncase@126.com;

刘红柏(1970-),女,博士,研究员,从事鱼类营养与免疫学研究.E-mail: liuhongbai@sina.com

有限,大约 55%~80%的饲料氮和 40%~60%的饲料磷没有被鱼体同化而残留在养殖系统中。这些沉积于底泥的废弃物被进一步分解,会释放有毒产物并恶化水质。

生物絮团技术(biofloc technology, BFT)是一种通过调控水体中的微生物群落来净化水质的高效方法,尤其在水产养殖中应用广泛<sup>[7]</sup>。生物絮团技术核心机理是通过科学添加外源碳源或氮源来精确调节水体中的碳氮比(C/N 比),当系统维持在最佳 C/N 比时,能够显著促进异养细菌的快速生长与繁殖,这些微生物不仅能够直接同化水中的氨氮和亚硝酸盐,将其转化为菌体蛋白,减少有毒物质的积累,还能通过分泌胞外聚合物(EPS)形成生物絮团,吸附并降解水体中的有机颗粒物和悬浮物,从而有效改善水质<sup>[8,9]</sup>。近年来,研究人员尝试将生物膜与生物絮凝工艺结合应用于污水处理领域,以提高污染物去除效率,其中生物絮团技术的关键在于微生物群落的定向调控。因此,当前相关研究主要集中在微生物组结构解析及其功能机制探索上<sup>[10]</sup>。

微孔曝气增氧技术是一种专门用于提高水体溶解氧含量的方法。该技术通过在水体中布置微孔曝气装置,利用其微小孔径向水中注入空气或氧气,形成大量细小气泡。这些气泡在上升过程中与水体充分接触,促使气体高效溶解于水中,最终提高水体的溶解氧浓度<sup>[11,12]</sup>。微孔曝气增氧技术通过改善底泥氧化还原环境、加速有机污染物降解、抑制内源污染释放和促进生态协同修复,有效降低底泥中的还原性物质、促进有机物分解、减少磷和氮的释放,并优化底栖生物结构和植物根系环境,从而实现了对底泥的综合修复<sup>[13,14]</sup>。

目前,已有研究多集中于微孔增氧对水质或鱼类生长的单一影响等方面,缺乏对多种混养池塘中微孔曝气增氧技术综合效应的系统性研究。在混养池塘中,不同种类的鱼类和水生生物对氧气的需求和反应存在差异,微孔曝气增氧不仅需要满足鱼类的生长需求,还需兼顾底泥修复、水质净化以及生态系统平衡。本研究以松浦镜鲤(*Cyprinus carpio*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)四元混养构建养殖模型,以不同增氧方式为基础,通过向池塘中添加碳源探究池塘底泥内源性营养盐的释放和水质的调节情况,阐述其对养殖鱼类生长影响和

水体底泥的修复作用,为进一步优化生物絮团养殖生产过程中微孔曝气增氧对池塘底泥修复的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 池塘鱼种放养

本试验在中国水产科学研究院黑龙江水产研究所呼兰综合试验站进行,试验池塘面积约 700 m<sup>2</sup>、平均水深 1.5 m,池塘中设置叶轮式增氧机和直径为 1 m 的微孔增氧盘,并沉于距池底 20~30 cm 的位置固定,微孔增氧管通过 PVC 管道与池塘岸边 5.5 kW 的罗茨鼓风机相连,连续 24 h 充气。试验用松浦镜鲤、鲢、鳙、草鱼均来自中国水产科学研究院黑龙江水产研究所。池塘中鲤、草鱼的初始平均体质量约为 22 g,鲢和鳙的初始平均体质量约为 19 g,放养密度为 1 400 尾/池;养殖密度均按照鲤:鲢:鳙:草鱼=6:2:2:1 比例混合养殖<sup>[15]</sup>。

### 1.2 试验设计

本研究设置 2 种不同的养殖模式进行对比:对照组采用传统叶轮式增氧机,而处理组则应用微孔曝气增氧技术。采用玉米淀粉作为有机碳源添加至处理组和对照组池塘。采用以下公式向池塘中添加有机碳源:

$$CH=20 \times H \times S \times C_{NH_3-N} / \Delta C。$$

其中,CH 为添加的碳源量(g);H 为养殖池塘水体深度(m);S 为养殖池塘水体面积(m<sup>2</sup>);C<sub>NH<sub>3</sub>-N</sub> 为养殖池塘水体的实测氨氮含量(mg/L);ΔC 为养殖水体所用碳水化合物(玉米淀粉)的含碳百分比<sup>[16]</sup>。本试验所用玉米淀粉碳源的含碳量约为 40%(质量百分比)<sup>[16]</sup>。

试验采用完全随机设计,将 6 口条件相同的池塘随机分为处理组(微孔曝气增氧)和对照组(叶轮增氧),每组各 3 口池塘。每天 08:00~09:00 和 15:00~16:00 各投喂 1 次饲料。饲料日投喂量按鱼体总重量的 2%~5% 确定,依据季节(水温)、水质(水色)、天气状况以及鱼类摄食情况等实际情况动态调整。投喂使用正大牌鲤配合饲料[饲料粗蛋白(30.75 ± 0.77)%、粗脂肪(7.12 ± 0.35)%、灰分(9.21 ± 0.62)%,以干物质计]。试验于 5—9 月进行,共持续 122 d。养殖期间仅补充因蒸发、渗漏及采样所致的失水量,全程不换水且未使用渔用药物。试验开始前,分别采集各池塘表层底泥样品并测定初

始理化指标。平均初始底泥总氮含量约为 1.5 g/kg (干重), 总磷约为 0.7 g/kg, 有机质含量分数约为 5%。

### 1.3 样品的采集与制备

池塘底泥淤积厚度约 20 cm。采用内径 10 cm 的有机玻璃采样柱垂直采集包含上覆水和柱状底泥的样品。用虹吸法小心移除柱内上覆水, 然后自下而上顶出底泥柱, 并按采样管刻度切取上层 10 cm 的泥样。泥样经自然阴干后平铺于硬纸板上, 用玻璃棒轻轻碾碎分散, 人工挑除杂质后采用四分法缩减样品量。将所得底泥样品研磨, 使颗粒全部通过 100 目筛, 充分混匀后分装备用, 作为各项指标的分析样本。同时, 从新鲜底泥样品中通过离心 (4 000 r/min, 15 min) 提取底泥间隙水, 滤取上清液备用用于后续理化指标分析。采样频率为每 14 d 1 次 (5 月 21 日—9 月 19 日), 采样时间选在晴天的上午 09:00 进行。该采样频率在保证捕捉水质变化趋势的同时, 尽量减少了频繁取样对池塘环境的扰动。

### 1.4 试验指标测定

上覆水和间隙水样品中的溶解氧 (DO)、总氮氮 (TAN)、氨氮 (NH<sub>3</sub>-N) 和亚硝酸态氮 (NO<sub>2</sub>-N) 采用美国 YSI 公司的便携式水质分析仪在现场即时测定 (每天 09:30—10:00)。底泥中上述氮素指标的测定需先提取底泥间隙水: 取适量新鲜底泥样品, 加入 2 mol/L KCl 溶液 (固液比 1:5), 振荡提取 1 h 后过滤, 所得滤液用同一台 YSI 分析仪测定 TAN、NH<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>2</sub>-N 浓度。总磷 (TP)、有效磷 (AP) 和铵

态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 按照国家标准的水质分析方法进行测定<sup>[17,18]</sup>; 水样经过硫酸钾氧化消解后, 采用钼酸铵分光光度法测定总磷; 底泥样品的有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 提取并经钼蓝比色法测定; 铵态氮采用纳氏试剂比色法测定。上覆水、间隙水和底泥样品的总有机质含量用总有机碳分析仪测定, 检测方法为高温催化燃烧—非分散红外检测法, 并以总有机碳含量表示有机质水平。

鱼体特定生长率 (SGR)、增重率 (WGR) 和成活率 (SR) 按以下公式计算:

$$\text{SGR}(\%/d) = 100(\ln W_2 - \ln W_1)/t;$$

$$\text{WGR}(\%/d) = 100(W_2 - W_1)/t;$$

$$\text{SR} = 100 \times N_t/N_i.$$

式中,  $W_2$  和  $W_1$  分别为鱼体终末体质量和初始体质量;  $t$  为养殖周期;  $N_i$  为初始鱼尾数;  $N_t$  为终末鱼尾数。

### 1.5 数据统计分析

数据通过 SPSS25.0 软件进行方差齐性检验和独立样本  $T$  检验,  $P < 0.05$  为显著性差异, 实验数据以“均值 ± 标准误”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 鱼体生长性能

生长性能对比如表 1 所示。处理组松浦镜鲤、鳊、草鱼的增重率均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ), 其增重率分别提高 9.62%、13.50% 和 14.77%。特定生长率分别比对照组高 5.24%、5.68% 和 11.16%, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。处理组鳊的增重率和特定生长

表 1 不同组别生长性能对比

Tab. 1 Comparison of growth performance among different groups

组别 groups	鱼种 species	性状 traits		
		SGR/(%/d)	WGR/%	SR/%
对照组 control group	松浦镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	4.39 ± 0.23	577.62 ± 12.86*	100.00
	鳊 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	3.43 ± 0.16	368.22 ± 33.47	99.33
	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	4.93 ± 0.07	559.40 ± 28.81*	99.50
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	4.66 ± 0.22	771.04 ± 58.52*	100.00
处理组 treatment group	松浦镜鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	4.62 ± 0.16	633.23 ± 20.37*	98.82
	鳊 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	3.42 ± 0.21	366.21 ± 17.72	100.00
	鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	5.21 ± 0.06	634.94 ± 52.52*	100.00
	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	5.18 ± 0.18	884.89 ± 27.10*	100.00

注: 数值用平均值 ± 标准误表示, \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Notes: Values are expressed as mean ± standard error (SE), with \* indicating a significant difference ( $P < 0.05$ ).

率略低于对照组,差异不显著( $P>0.05$ )。

## 2.2 池塘底泥理化指标的比较

底泥中的有机质含量没有显著性差异( $P>0.05$ )。在养殖初期,处理组的有机质浓度相对较高。然而,到了6月下旬的取样阶段,处理组与对照组的有机质浓度已无显著性差异( $P>0.05$ )。随后,有机质浓度的变化存在上升—略微下降—再上升的3个阶段,并在9月份达到了整个试验周期的峰值(图1)。

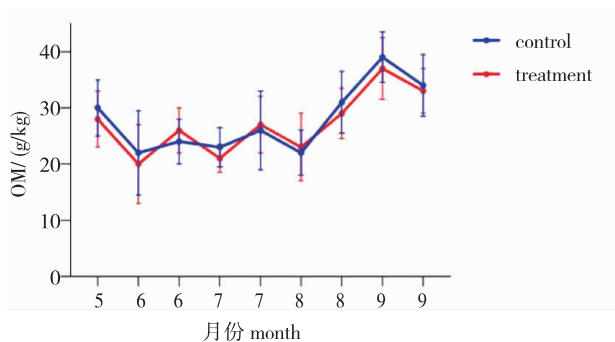


图1 池塘底泥有机质随养殖时间的变化

Fig. 1 Variation of organic matter in pond substrate

底泥中总磷和有效磷含量均无明显差别( $P>0.05$ ), 处理组在养殖初期5—7月总磷和有效磷的浓度处于一个较高的水平,而后逐渐下降,总体略低于对照组。随后总磷和有效磷的浓度具体变化表

现为上升—略有下降2个阶段(图2)。

底泥中处理组总氮含量处于一个较低的水平,但与对照组差异不显著( $P>0.05$ )。底泥总氮的含量处于先降低后升高的趋势。底泥亚硝酸态氮的变化趋势与总氮的变化趋势基本一致,处理组略低于对照组,至试验结束时,处理组底泥亚硝酸态氮含量显著低于对照组( $P<0.05$ )。处理组底泥中铵态氮含量低于对照组,变化趋势一致,均呈先升高后降低的趋势,其中7月处理组显著低于对照组( $P<0.05$ ,图3)。

## 2.3 池塘上覆水理化指标的比较

2种养殖方式条件下,上覆水总有机碳含量处理组均略低于对照组,但差异不显著( $P>0.05$ ,图4)。

对照组上覆水中总氮含量处于一个较低的水平,与处理组差异不显著( $P>0.05$ )。上覆水亚硝酸态氮的变化趋势与总氮的变化趋势基本一致,8月上旬处理组显著低于对照组( $P<0.05$ )。上覆水氨氮含量变化趋势一致,8月上旬处理组也显著低于对照组( $P<0.05$ ,图5)。

不同养殖模式下,各组上覆水的总磷与磷酸盐含量均无显著性差异( $P>0.05$ )。试验初期,处理组水体总磷及磷酸盐含量相对较高,随时间推移呈递减趋势,至试验后期与对照组测定值趋于一致(图6)。

8月上旬高温阶段,处理组DO显著高于对照组( $P<0.05$ ),其余时段组间差异不显著( $P>0.05$ )。同

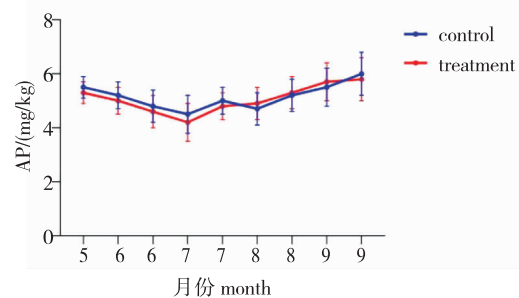
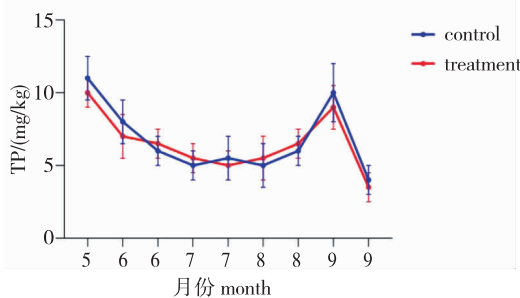


图2 池塘底泥中总磷和有效磷随养殖时间的变化

Fig. 2 Variations of total phosphorus and available phosphorus in pond substrate

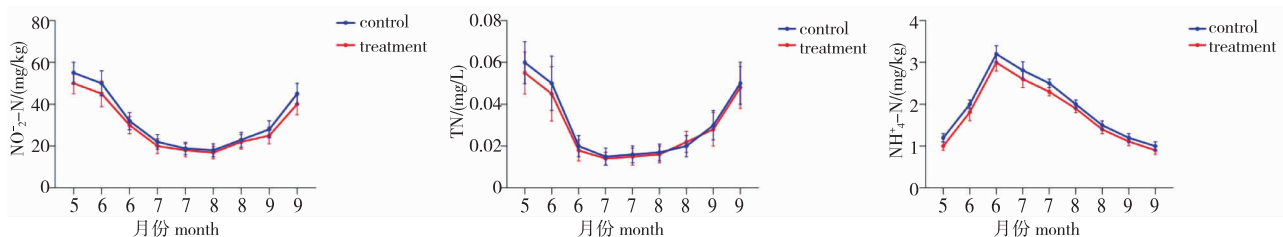


图3 池塘底泥中亚硝酸氮、总氮和铵态氮随养殖时间的变化

Fig. 3 Variations of nitrite nitrogen, total nitrogen, and ammonium nitrogen in pond substrate

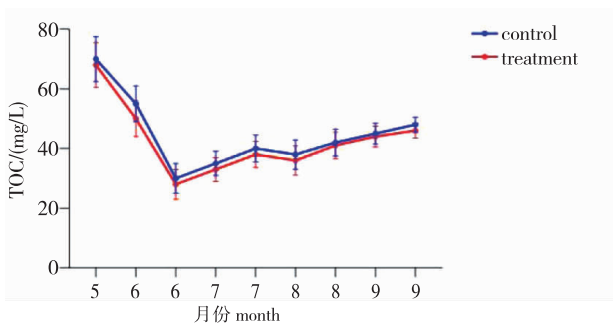


图 4 上覆水总有机碳随养殖时间的变化

Fig. 4 Variation of total organic carbon in overlying water

时,处理组 DO 日变幅较小且低于对照组,微孔曝气提高了上覆水溶氧的时空均匀性并抬升了清晨低

谷值(图 7)。

### 2.4 池塘间隙水理化指标的比较

2 种养殖条件下,总有机碳含量没有显著性差异( $P>0.05$ ),但处理组略低于对照组(图 8)。

不同养殖模式中,处理组间隙水总氮含量与对照组相比无显著性差异。氨氮浓度变化规律与总氮相似,对照组数值略高但差异不显著( $P>0.05$ )。养殖初期,处理组间隙水中亚硝酸氮含量显著低于对照组( $P<0.05$ ,图 9)。

2 种养殖方式条件下,间隙水总磷和磷酸盐含量差异不显著( $P>0.05$ )。养殖过程中总磷和磷酸盐的浓度具体变化可分为下降-平缓 2 个阶段(图 10)。

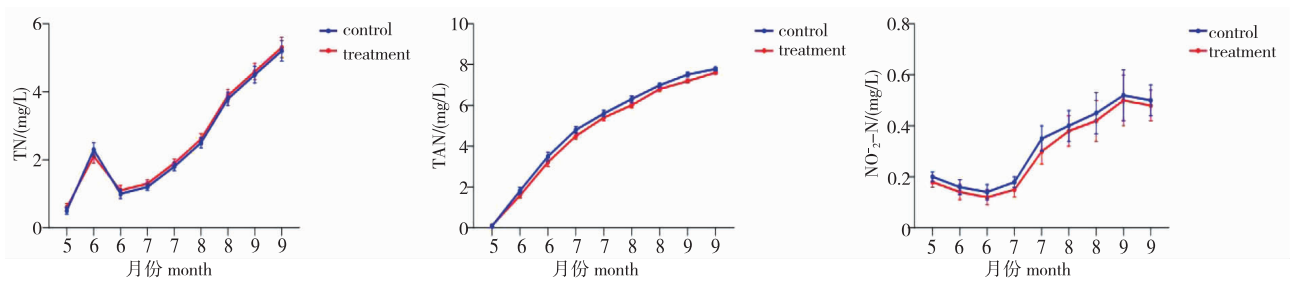


图 5 上覆水总氮、氨氮和亚硝酸态氮随养殖时间的变化

Fig. 5 Variations of total nitrogen, ammonia nitrogen, and nitrite nitrogen in overlying water

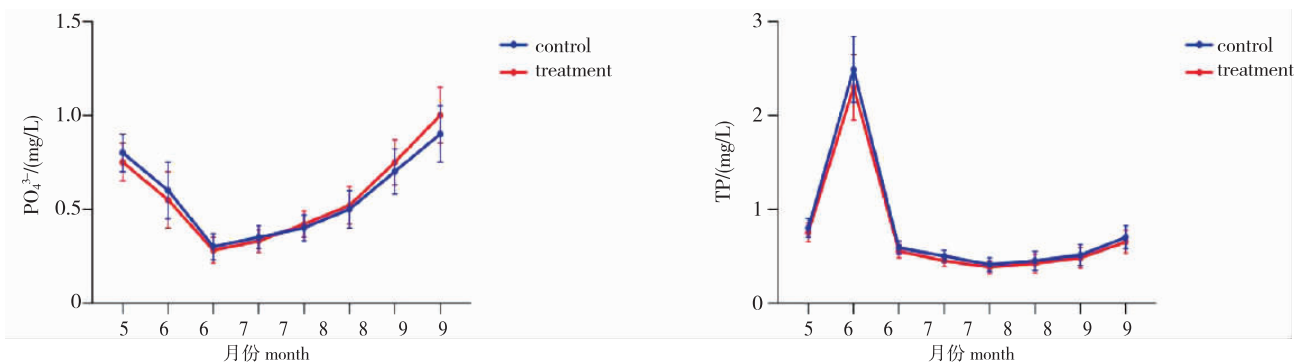


图 6 上覆水磷酸盐和总磷随养殖时间的变化

Fig. 6 Variations of phosphate and total phosphorus in overlying water

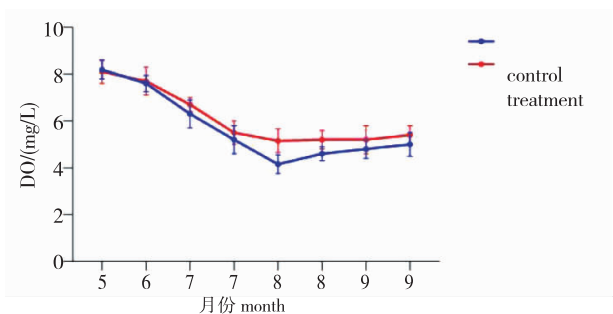


图 7 上覆水溶解氧随养殖时间的变化

Fig. 7 Variation of dissolved oxygen in overlying water

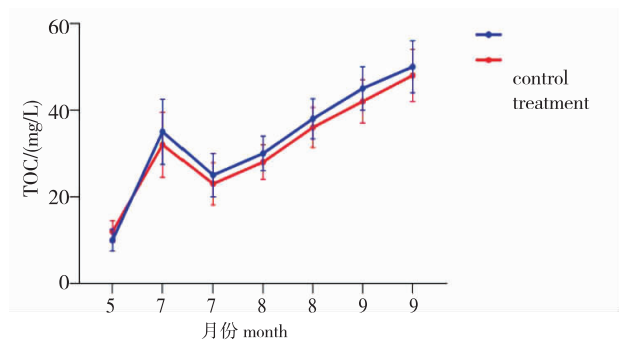


图 8 间隙水总有机碳随养殖时间的变化

Fig. 8 Variation of total organic carbon in interstitial water

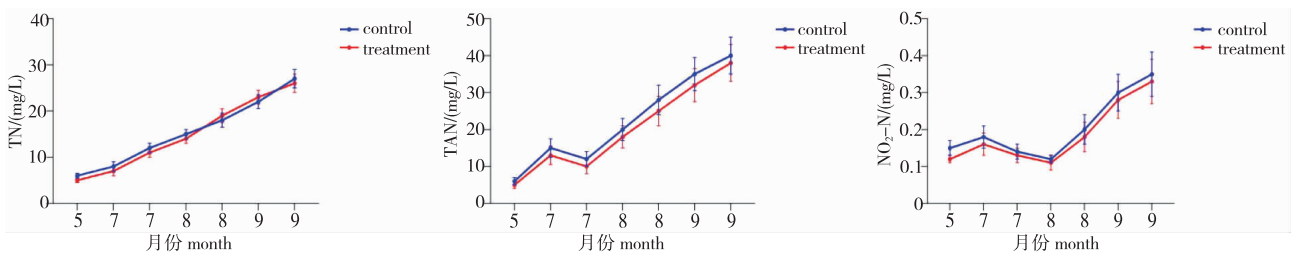


图9 间隙水总氮、氨氮和亚硝酸盐随养殖时间的变化

Fig. 9 Variations of total nitrogen, ammonia nitrogen, and nitrite nitrogen in interstitial water

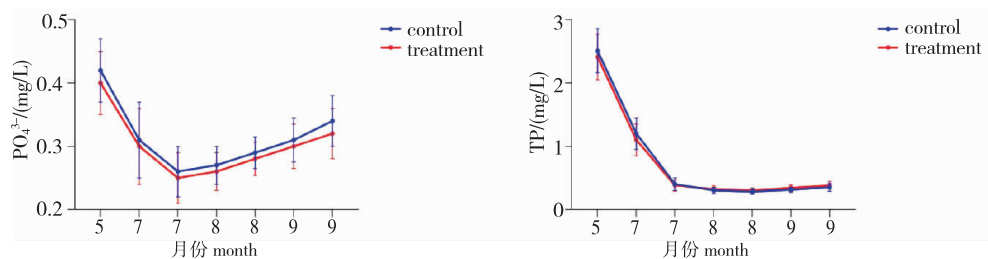


图10 间隙水磷酸盐和总磷随养殖时间的变化

Fig. 10 Variations of phosphate and total phosphorus in interstitial water

### 3 讨论

#### 3.1 上覆水、间隙水和底泥中有机质的变化分析

本试验中,不同的增氧方式对生物絮团养殖模式下池塘的底泥、上覆水和间隙水有机质含量无显著性差异( $P>0.05$ )。这是由于处理组在前期受光照、增氧浓度和残饵的影响使得有机质富集并出现最大值,在增强光照强度后,水底曝气增氧使得池塘底生物吸收底泥中有机质的养分并供能,底泥有机质利用率较高,使得有机质含量下降,并且水体温度升高也会增强微生物的活动和增加藻类的生产能耗<sup>[19]</sup>。因此,采用微孔增氧方式可以释放底泥中有机质含量,加速提高上覆水的有机质含量。好氧微生物可以分解池塘底泥中的有机质,随着底泥底部氧气浓度的增加,增强好氧微生物活性使得有机质分解效率提高<sup>[20]</sup>。池塘修复技术可以通过控制改变水体溶氧量,使得水体中腐殖质与微生物发生不同的作用,从而达到快速修复分解的作用<sup>[21]</sup>。微孔曝气技术通过显著提升池塘中下层水体的溶解氧水平,有效加速底泥中有机质的矿化分解过程,抑制硫化氢等有害气体的生成,最终改善整体养殖水环境质量。在微孔曝气提供的高氧条件下,底泥有机质主要经由好氧途径分解,产生 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等末端产物,避免了厌氧分解时产生硫化氢、氨气等恶臭

有害中间产物<sup>[22]</sup>。有研究利用底泥直接曝气形成氧化层,发现底泥表层的好氧分解作用显著增强,底泥中有机质和有机氮含量明显降低<sup>[23]</sup>。因此,微孔曝气增氧能有效促进底泥有机污染物的矿化,减少有机质在底泥中的积累。而在多品种混养系统中上覆水-间隙水-底泥三相界面的碳元素含量之间存在密切关系<sup>[24]</sup>。其中,上覆水中的有机质和无机碳含量表现出一定的同源性,并且两者之间存在相互促进的关系。表层间隙水持续积累有机质,并将其逐渐释放到上覆水中。尽管表层沉积物的有机质分解速率低于沉积速率,但它依然对上覆水中有机质含量的增加起到一定的促进作用。

本研究未对微生物群落进行测序分析,但微孔增氧结合外加碳源可能对养殖水体和底泥的微生物群落组成产生影响。高溶氧环境有利于好氧硝化细菌的繁殖,而外源碳源的加入则刺激异养细菌大量增殖,2类微生物可能在本试验条件下形成一定的此消彼长关系。微孔曝气池塘底泥中异养细菌数量在夏季显著低于未增氧的自然池塘<sup>[25]</sup>,表明溶氧充足会影响异养微生物的丰度和组成。氧气供应充足显著提升了硝化菌的活性,使氨氮更快地被氧化为硝酸盐,减少水体中氨氮的积累<sup>[26]</sup>。这与本试验中在8月上旬观察到处理组上覆水氨氮和亚硝氮浓度显著下降的结果是一致的。有报道指出微孔曝

气池塘中真菌相对细菌的比例长期高于传统增氧池塘<sup>[25]</sup>。这种微生物群落结构的变化可能影响有机质分解和养分循环过程,其生态意义需借助高通量分子生物学手段做进一步研究验证。

### 3.2 上覆水、间隙水和底泥中氮循环的变化分析

溶解氧是鱼类生命活动的必需物质,其浓度不仅反映水质好坏,还受多种非生物和生物因素影响;低氧会阻碍鱼类生长、降低繁殖能力和抗病性,影响行为和代谢,损害免疫系统,而高氧则可能引起浮力问题和生理紊乱<sup>[27]</sup>。在本研究中,2组池塘随着季节温度的变化水中的溶解氧呈现先降低后升高的现象,且在8月上旬高温阶段,处理组DO显著高于对照组。相较于叶轮式增氧机,微孔增氧技术通过促进池塘各层水体交融,打破溶解氧“跃温层”,减小水层差异,迅速提升底部溶解氧,从而全面提高池塘溶解氧水平,为水生生物提供均匀充足的氧气,优化养殖环境<sup>[28]</sup>。采用微孔增氧技术的处理组底泥总氮含量与对照组相比差异不显著( $P>0.05$ )。处理组沉积物中铵态氮浓度显著低于对照组( $P<0.05$ ),表明在本试验条件下,底泥中氮的矿化-释放过程更为活跃;通过微孔增氧并配合外加碳源,底泥中氮素释放速率加快。在有氧条件下,硝化细菌将氨氮先转化为亚硝酸盐,再进一步氧化为硝酸盐。微孔曝气增氧为水体和底泥提供了充足氧气,创造了利于硝化细菌生存的条件。尽管微孔曝气主要提升水中氧气含量,但在底泥内部或生物膜内部等耗氧较快的微环境中,仍可能形成缺氧微区;反硝化细菌可在此利用硝酸盐为电子受体,将其还原为氮气释放到大气,完成脱氮过程,从而减少氮在水体中的积累,降低水体富营养化风险<sup>[29]</sup>。整个试验期间,处理组上覆水和间隙水中的总氮浓度均略低于对照组。本研究中,5—8月上旬,池塘水温由约15℃上升至约28℃,9月中旬降至约18℃。温度较低时(如春季早期),微生物硝化作用受到抑制,沉积物氮以氨氮形态释放为主;而温度升高会显著促进硝化作用,导致上覆水和间隙水中的氨氮不断转化为硝态氮,使上覆水氨氮浓度持续下降<sup>[27]</sup>。一般而言,硝化作用在25~30℃时效率最高<sup>[27]</sup>。因此,在7—8月较高水温结合微孔曝气提供的充足氧气条件下,处理组池塘水体的氨氮去除速率明显加快,8月上旬检测到处理组上覆水氨氮和亚硝态氮浓度大幅低于对照组;进入9月后水温降低,微

生物活性减弱,氮素转化速率放缓,2组水体中氨氮浓度的差异趋于缩小。试验期间,2组水体的溶解氧和pH均保持在适宜范围(未出现极端波动),为上述硝化-反硝化过程的顺利进行提供了保障。底部扰动处理显著提高了沉积物溶解氧浓度及氧化还原电位,这种氧化环境的改善不仅加速了有机质的好氧降解过程,同时显著促进了沉积物-水界面的氮素迁移释放<sup>[30]</sup>。水体氨氮的转化过程主要涉及3个相互作用的生物化学途径:(1)浮游植物光合作用同化吸收;(2)化能自养硝化菌群的氧化作用;(3)异养微生物的生物合成作用。在实际水体环境中,这3种转化机制往往协同作用,其中硝化作用的终产物硝态氮在高溶解氧条件下表现出良好的稳定性<sup>[31]</sup>。

### 3.3 上覆水、间隙水和底泥中磷及磷酸盐的变化分析

与对照组相比,处理组底泥总磷和有效磷含量略有升高,但差异不显著( $P>0.05$ )。9月中旬后,2组底泥中总磷含量出现明显下降趋势,这是由于进入9月后水温降低以及藻类生长受到影响,抑制了生物絮团的形成,使底泥中磷含量的降低速率加快。整个养殖周期内,处理组与对照组间隙水总磷和磷酸盐浓度均无显著性差异( $P>0.05$ ),可能是由于间隙水中的磷含量较低,生物作用不明显导致的磷酸盐的生成量也相对较低。试验初期,处理组上覆水总磷浓度高于对照组,可能是微孔曝气产生大量微气泡对底泥造成较强扰动,并提供了更均匀的高氧环境,导致初始阶段底泥中的磷被重新悬浮释放到上覆水中,上覆水总磷浓度升高<sup>[32]</sup>;相较之下,叶轮增氧对底泥的扰动较小,在局部形成的高氧区域对底泥磷释放的影响也相对较弱。到7月下旬后呈现相反趋势:处理组上覆水总磷水平持续低于对照组并趋于稳定,而处理组上覆水磷酸盐浓度高于对照组且呈上升趋势。这可能是由于较高的初始磷浓度促进了水体藻类和浮游植物的繁茂生长,结合微孔曝气增氧提高了对磷的利用率,更有效地控制了底泥中总磷的释放并推动上覆水磷酸盐的生成<sup>[33]</sup>。2组间隙水中磷含量无显著性差异,可能由于底泥内源磷释放主要以颗粒态磷形式发生,部分颗粒磷滞留于底泥间隙中,使可溶性磷通过孔隙向上覆水迁移,导致上覆水磷浓度升高<sup>[34]</sup>。微藻通过其“泵吸效应”从底泥中吸收磷养分,这一过程不仅促进了上覆水体中溶解态磷的形态转化,同时显著降低了

间隙水中的磷含量<sup>[35]</sup>,这在一定程度上阐明了本研究观测到的磷含量下降现象的部分机理。因此,水流的扰动和增氧等方式可以直接促进沉积物中磷的释放,并通过促进有机物的释放间接导致了内部磷的释放<sup>[30]</sup>。

### 3.4 结论

本研究以松浦镜鲤、鲢、鳙和草鱼四元混养构建养殖模型为基础,从水质指标和鱼体生长等方面比较了 2 种不同增氧方式对池塘底泥内源性营养盐的释放情况及水质的修复效果。结果表明:(1)微孔曝气增氧技术可提升混养鱼类的生长性能,处理组鱼体的特定生长率和增重率均明显高于对照组;(2)2 种增氧方式均促进了底泥中营养盐(如氮)的释放,其中微孔曝气增氧可降低底泥和间隙水在养殖初期的总氮累积,同时有效调控底泥有机质的积累;(3)在添加相同碳源条件下,微孔曝气增氧并未显著增强池塘底泥磷的释放,处理组底泥总磷浓度与对照组大致相当且维持在较低水平,对养殖水体环境质量的改善具有一定积极作用。下一步应探索微孔曝气增氧技术在不同混养模式下的长期效应,结合生态修复需求,深入分析其对底泥营养盐动态变化和水质改善的具体机制,以期为池塘养殖管理和生态修复提供依据。

### 参考文献

- [1] 刘佩,孙炜琳.我国水产养殖业的发展现状·存在问题及对策[J].安徽农业科学,2013,41(30):11981-11984.
- [2] 曾洋泱,匡迎春,沈岳,等.水产养殖水质监控技术研究现状及发展趋势[J].渔业现代化,2013,40(1):40-44.
- [3] BARBOSA D P A, KOSTEN S, MUNIZ C C, et al. From feed to fish—nutrients' fate in aquaculture systems [J]. Applied Sciences, 2024, 14(14): 6056-6071.
- [4] 刘华丽,曹秀云,宋春雷,等.水产养殖池塘沉积物有机质富集的环境效应与修复策略[J].水生态学杂志,2011,32(6):130-134.
- [5] 罗松松,卓泽晟,胡淞凯,等.水产养殖尾水处理技术研究进展[J].渔业研究,2025,47(3):378-394.
- [6] 吴俊男.投喂策略对稻鱼共作系统气态氮排放和饲料氮利用的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [7] 赵相烁,刘超,徐爱玲,等.生物絮团技术强化及联用方法研究进展[J].渔业现代化,2025,52(1):14-24.
- [8] CRAB R, DEFOIRD T, BOSSIER P, et al. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges[J]. Aquaculture, 2012, 356: 351-356.
- [9] AHMAD I, RANI B M A, VEMA K A, et al. Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition [J]. Aquaculture International, 2017, 25(3): 1215-1226.
- [10] AVNIMELECH Y. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds [J]. Aquaculture, 2007, 264(1): 140-147.
- [11] 张世羊,李谷,陶玲,等.不同增氧方式对精养池塘溶氧的影响[J].农业工程学报,2013,29(17):169-175.
- [12] 管崇武,单建军,宋红桥,等.管道式微孔增氧装置的增氧性能研究[J].渔业现代化,2023,50(2):25-31.
- [13] 欧阳敏,徐节华,花麒,等.微孔增氧与叶轮增氧机在池塘中增氧效果的比较研究[J].江西水产科技,2017(4):14-16.
- [14] 张美彦,杨星,关梅,等.微孔增氧对养殖池塘水质及溶氧的影响[J].贵州农业科学,2017,45(12):101-103.
- [15] ZHAO Z G, XU Q Y, LUO L, et al. Effect of bio-floc on water quality and the production performance of bottom and filter feeder carp fed with different protein levels in a pond polyculture system [J]. Aquaculture, 2021, 531: 735906.
- [16] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46: S33-50.
- [17] GB/T 11893-1989 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [18] DZ/T 0064.57-2021 地下水水质分析方法第 57 部分:氨氮的测定纳氏试剂分光光度法[S].北京:地质出版社,2021.
- [19] THOMPSON F L, ABREU P C, WASIELESKY W. Importance of biofilm for water quality and nourishment in intensive shrimp culture [J]. Aquaculture, 2002, 203(3): 263-278.
- [20] JIANG X L, BOYD C E. Relationship between organic carbon concentration and potential pond bottom soil respiration [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(2): 147-151.
- [21] 林建伟,朱志良,赵建夫.曝气复氧对富营养化水体底泥氮磷释放的影响[J].生态环境,2005,14(6):812-815.
- [22] HU W T, LI Y R. Progress in research on the effect of aeration technology on urban black and odorous water body [J]. Water Pollution and Treatment, 2018, 6(4): 165-173.
- [23] 张雪,姜翠玲,朱立琴,等.大型表面流人工湿地长期运行下底泥污染特性及氧化层甄别[J].湖泊科学,

- 2019, 31(3): 677–688.
- [24] 熊莹槐, 王芳, 陈燕, 等. 草鱼不同混养模式的上覆水、间隙水及沉积物中各形态碳的分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(3): 22–30.
- [25] 王文琳, 杨耿介, 李乐洲, 等. 3 种水质调控方式对参池底泥异养菌和弧菌数量的比较[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(4): 961–971.
- [26] WU Y H, WEI W, LUO T, et al. Distribution of nitrification and its regulating factors in coastal bays with distinct trophic gradients [J]. *Water (Switzerland)*, 2025, 17 (6): 900–916.
- [27] 胡芥心. 不同溶解氧水平对草鱼肌肉品质及 MRFs 家族表达水平的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [28] 黄平, 李有根, 高小平, 等. 微孔增氧与叶轮式增氧在草鱼池塘养殖中应用比较[J]. 江西水产科技, 2022(2): 33–34, 37.
- [29] 李鹏洋. 水榕 – 硝化细菌 – 斑马鱼系统对水体氮素转化的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [30] WANG Y K, JI Z H, LI X Q, et al. Comprehensive analysis of the migration and transformation of nutrients between sediment and overlying water in complex habitat systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158433.
- [31] 罗国芝, 吴慧芳, 谭洪新. 自养硝化过程去除循环水养殖系统水体中氨氮的研究进展[J]. 淡水渔业, 2019, 49(2): 78–83.
- [32] ZHAO Y F, ZHANG W, ZHANG W H. Phosphorus transport process and driving mechanism in the sediment of farm ponds in small watersheds of Three Gorges Reservoir area [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 169: 112787.
- [33] ZHANG K, YU D G, LI Z F, et al. Influence of eco-substrate addition on organic carbon, nitrogen and phosphorus budgets of intensive aquaculture ponds of the Pearl River, China [J]. *Aquaculture*, 2020, 520: 734868.
- [34] 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 等. 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2848–2855.
- [35] 陈业. 微生物治理技术在河道底泥污染物治理中的应用研究[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(4): 49–53, 65.

(上接第 6 页)

- [22] 雷衍之, 董双林, 沈成钢. 碳酸盐碱度对鱼类毒性作用的研究[J]. 水产学报, 1985, 9(2): 171–183.
- [23] 周伟江, 常玉梅, 梁利群, 等. 氯化钠盐度和碳酸氢钠碱度对达里湖鲫毒性影响的初步研究[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(4): 340–346.
- [24] 周玉洁. 盐碱胁迫对中国对虾生长、繁殖及免疫功能的影响[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
- [25] 徐杰, 王杰, 刘娜, 等. 白斑狗鱼仔鱼对盐度和碱度的耐受性研究[J]. 黑龙江水产, 2025, 44(3): 260–264.
- [26] 江德泓, 陈思宇, 徐佳慧, 等. 淇河鲫幼鱼对碳酸盐碱度的耐受性研究[J]. 河南水产, 2024(4): 23–26.
- [27] 武鹏飞, 耿龙武, 姜海峰, 等. 三种鳊科鱼对 NaCl 盐度和 NaHCO<sub>3</sub> 碱度的耐受能力[J]. 中国水产科学, 2017, 24(2): 248–257.
- [28] 李罗佳. 碳酸盐碱对大鳞副泥鳅氨氮排泄的影响及其机制初步研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2024.
- [29] 章临江. 敲降 Aqp1 对盐碱胁迫下大鳞副泥鳅渗透调节和抗氧化能力的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024.
- [30] 周伟江, 梁利群, 常玉梅, 等. 达里湖鲫对盐度和碱度突变和渐变的耐受性[J]. 淡水渔业, 2013, 43(5): 14–20.
- [31] 刘济源, 么宗利, 来琦芳, 等. 盐碱胁迫对青海湖裸鲤耗氧率、血浆渗透浓度和离子浓度的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 664–669.
- [32] 周文宗, 宋祥甫, 陈桂发. 黄鳍对盐碱耐受性的研究[J]. 淡水渔业, 2014, 44(3): 95–99.
- [33] 张晓莹, 来琦芳, 么宗利. 盐度和碱度对梭鲈急性毒性实验[C]//2015 年中国水产学会学术年会论文摘要集. 武汉: 2015 年中国水产学会, 2015: 89.
- [34] 刘东伟, 孟祥亚, 李斌顺. 盐碱地池塘锦鲤健康养殖技术[J]. 河南水产, 2023(5): 8–10, 19.
- [35] 王萍, 刘济源, 么宗利, 等. 水生动物盐碱适应生理学研究进展[J]. 长江大学学报, 2015, 12(15): 44–47.