

池塘陆基循环水养殖系统构建及其运行效果

胡晓娜, 朱永久, 吴兴兵, 李学梅, 王 龙, 张远松, 李晓莉*

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223)

摘要: 为探讨陆基循环水养殖系统与现有淡水池塘如何有机结合, 本研究将养殖池塘改造为“菌-藻-鱼-水生植物”联合的水处理区, 并与陆基养殖单元结合, 构建一套陆基循环水养殖系统, 并开展瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 养殖试验。试验过程中监测了各水处理单元水质理化指标及陆基养殖单元鱼类生长情况, 评估了养殖系统氮磷收支情况及养殖单元与水处理单元面积配比关系。结果表明: 经8周运行, 水处理单元对氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝酸盐 ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、总氮和总磷的总去除率分别为 75.69%、64.99%、29.1% 和 43.29%, 养殖尾水经水处理单元净化后能够满足《淡水池塘养殖水排放要求 (SC/T 9 101-2007)》。陆基养殖单元瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 的成活率为 97.5%, 单位产量为 6.38 kg/m³, 增重率平均为 71.57%, 特定生长率 ($R_{\text{SGR,m}}$) 平均为 0.96 %/d, 饵料系数平均为 1.48。氮磷收支结果表明, 饲料是系统氮、磷的主要来源, 分别占氮、磷总输入的 61.71%、61.85%。瓦氏黄颡鱼和综合积累 (包含底泥沉积、水体渗漏、吸附等) 分别是氮、磷输出的主要项目, 分别占氮、磷总输出的 50.26%、38.53%。瓦氏黄颡鱼对氮、磷的利用率分别为 29.12%、10.65%, 鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 和鳙 (*Aristichthys nobilis*) 对氮、磷的利用率分别为 0.06%、1.14% 和 0.02%、0.33%, 瓦氏黄颡鱼对氮、磷的利用率均显著高于鲢、鳙 ($P<0.05$)。养殖桶与水处理单元实际面积配比关系为 0.043:1, 尚有进一步优化空间。因此, 本研究表明基于养殖池塘改造的陆基循环水养殖系统在养殖尾水净化、氮磷利用等方面具有良好效果, 值得进一步优化和推广。

关键词: 池塘; 循环水养殖; 净化效果; 氮; 磷; 瓦氏黄颡鱼

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405212

中图分类号: S965.112

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0210-10

胡晓娜, 朱永久, 吴兴兵, 等. 池塘陆基循环水养殖系统构建及其运行效果[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 210-219. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405212 <http://www.tcsae.org>

HU Xiaona, ZHU Yongjiu, WU Xingbing, et al. Construction and operation effect of land-based recirculating aquaculture system based on pond[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 210-219. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405212 <http://www.tcsae.org>

0 引言

中国是水产养殖大国, 从 2008 年起水产养殖产量达到世界水产养殖产量的 60% 以上。池塘养殖是中国主要的养殖模式之一, 对中国水产养殖业的发展具有重大作用^[1]。水产养殖一方面为企业和渔民带来经济收入, 但同时高养殖密度、过度投饲与施肥等引发水环境恶化、病害频发, 严重影响养殖水产品的产量与质量。养殖尾水的大量排放更是加剧了农业面源污染, 造成周边水域富营养化, 阻碍了水产养殖业的绿色健康发展, 传统养殖方式转型和结构调整迫在眉睫^[2-3]。众多学者对池塘养殖模式升级做出积极探索, 出现了池塘原位修复 (如池塘循环水养殖模式)、异位修复模式, 此类模式

以养殖池塘为主体进行改造升级, 虽已取得良好效果, 但投入成本高、处理效果不稳定^[4]。陆基循环水养殖模式因其具有安装灵活、用水量少、占地面积小、养殖密度高、产出高、生产可控、收获方便等特点^[5-7], 被认定为 2021 年农业农村部重大引领性技术之一, 是未来水产养殖业发展的必然趋势^[8]。陆基循环水养殖模式的关键是尾水处理技术, 高效的尾水处理技术可为养殖系统提供水质良好的水源, 推动水产养殖业健康可持续发展^[9-10]; 同时实现水资源的重复利用, 减少环境污染。王相盼等^[11]构建了 1 套陆基圆桶循环水养殖系统, 该系统综合利用物理法 (沉降)、生物法 (水生植物、微生物) 处理养殖尾水, 净化后水质符合养殖要求, 养殖对象可达到预期规格和产量。刘梅等^[12]通过沉淀池、过滤坝、曝气池和生态池等综合利用物理、化学和生物净化法处理养殖尾水, 结果表明, 水质净化效果明显。菌藻共生技术利用细菌和藻类间的协同作用有效处理污水, 具有能耗低、净化能力强等优点, 逐渐得到研究人员的重视^[13]。但目前关于菌藻共生系统的研究大多停留在试验规模, 着眼于生产实际的养殖尾水处理研究鲜有报道。

本研究依据系统内多种组分之间相互协调和促进的原理, 将传统池塘改造为由菌-藻-鱼处理区—水生植物处理区—过滤坝组成的尾水处理单元, 并将其与陆基养

收稿日期: 2024-05-29 修订日期: 2024-08-03

基金项目: 国家重点研发计划长江禁渔后特色土著鱼类规模化繁育与绿色高效养殖项目 (2022YFD2400902); 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-46); 中国水产科学研究院基本科研业务费院级湖库增殖渔业创新团队项目 (2023TD61)

作者简介: 胡晓娜, 研究方向为池塘生态工程。

Email: huxn159753@163.com

*通信作者: 李晓莉, 副研究员, 研究方向为鱼类驯养繁殖与池塘养殖。

Email: lxli@yfi.ac.cn

殖单元相结合，构建一套陆基循环水养殖系统，开展了瓦氏黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 的养殖试验。对该系统养殖尾水净化能力进行研究，同时分析了该系统氮磷收支情况及养殖单元与水处理单元面积的配比关系，以期在传统养殖模式的转型和结构调整提供可借鉴的资料。

1 材料与方法

1.1 陆基循环水养殖系统构建

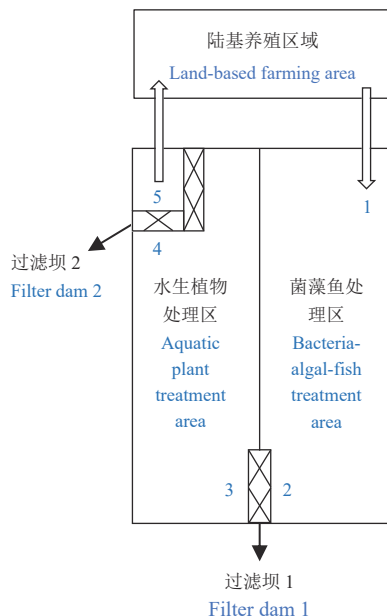
试验系统位于湖北省鄂州市中国水产科学研究院长江水产研究所梁子湖基地。依据养殖基地现有养殖池塘，构建陆基模块化养殖池-池塘相结合的陆基循环水养殖系统，占地约 760 m²，由陆基养殖单元和水处理单元组成。

1.1.1 陆基养殖单元

陆基养殖单元在原有池塘的池埂处建设完成，占地约 100 m²，包含水塔、9 个养殖桶（直径 2 m，高 1 m）、进排水设施、曝气设施、微滤机等。养殖桶进水量由水泵和进水阀门控制；曝气系统由功率为 1.5 kW 的罗茨鼓风机、进气管和纳米曝气盘组成；微滤机连接养殖桶总出水，采用 0.075 mm 孔径的不锈钢网，过滤流量为 30 T/h。

1.1.2 水处理单元

水处理单元布设在面积为 660 m² (33 m×20 m) 的池塘中，主要包含：进水口、菌-藻-鱼处理区（简称菌藻鱼区）、水生植物处理区（简称水生植物区）、过滤坝、取水口（见图 1）；其中，菌藻鱼区和水生植物区面积比为 1:1，由导流墙和过滤坝隔开。



1. 采样点 1，菌藻鱼区进水口；2. 采样点 2，菌藻鱼区出水口；3. 采样点 3，水生植物区进水口；4. 采样点 4，水生植物区出水口；5. 采样点 5，养殖系统进水口
1. Sampling point 1, Bacteria-algal-fish area intake; 2. Sampling point 2, Bacteria-algal-fish area outlet; 3. Sampling point 3, Aquatic plant area intake; 4. Sampling point 4, Aquatic plant area outlet; 5. Sampling point 5, Aquaculture system intake

图 1 陆基循环水养殖系统示意图

Fig.1 Diagram of land-based recirculating aquaculture system

1) 菌藻鱼区

菌藻鱼区面积为 330 m²，配养鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 100 尾，初始平均体质量 (5.32±0.34) g；配养鳙 (*Aristichthys nobilis*) 20 尾，平均初始体质量 (5.17±0.27) g。试验期间菌藻鱼区定期添加小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 和 EM 菌（每 7 天一次，每次采样后添加）。小球藻和 EM 菌均购自湖北丰田生物有限公司，小球藻按照每亩水面用量 5 L 全池泼洒。EM 菌原料组成为嗜酸乳杆菌、枯草芽孢杆菌、酿酒酵母、植物乳杆菌、粪肠球菌、放线菌、光合细菌、载体葡萄糖，其中嗜酸乳杆菌≥20×10⁷ cfu/g，酿酒酵母≥10×10⁶ cfu/g，枯草芽孢杆菌≥2×10⁶ cfu/g，每亩水面使用 EM 菌发酵菌液 1.5 kg。

2) 水生植物区

水生植物区面积为 330 m²，其中浮床总面积为 40 m²，由 5 个 4 m×2 m 的浮床 PVC 框架组成；浮床中种植凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*)。

3) 导流墙

导流墙由土工膜和过滤坝 1 组成。土工膜规格为 25 m×3 m，过滤坝规格为 5 m×0.6 m×2.5 m，材质为 10~20 mm 的火山石。火山石装在 70 cm×40 cm 的网袋中，网袋从池塘底部摞起与水面齐平 (2.5 m)，形成过滤坝。

4) 取水区

取水区面积为 9 m²，位于水生植物区一角，由过滤坝 2 围成，取水区放置水泵，用于养殖区进水。

1.2 试验鱼养殖管理

陆基养殖区养殖品种为瓦氏黄颡鱼，初始体长 (7.16±0.11) cm，平均体质量 (5.84±0.26) g，养殖密度为 673 尾/m³。养殖桶水深维持在 80 cm，水交换量为 1.2 m³/h（即养殖桶每 2 h 换水一次），水体溶解氧含量始终维持 7 mg/L 以上。选择常规池塘养殖瓦氏黄颡鱼作为对照塘，对照塘放养总量与陆基养殖区放养总量相同，养殖管理按照常规方式进行。

1.3 系统运行和管理

本系统于 2023 年 5 月建成，随后开展了水处理单元在系统启动运行阶段对池塘尾水处理效果的研究。本次试验时间为 2023 年 9 月~11 月，系统 24 h 不间断运行。养殖尾水首先经过微滤机进行过滤处理，以去除水体中的杂质；随后进入菌藻鱼区，依靠水体中微生物、浮游生物、鲢和鳙等综合去除水体中氨氮 (NH₄⁺-N)、亚硝酸盐 (NO₂⁻-N) 等营养物质；经过滤坝 1 过滤后，水体经水生植物区、过滤坝 2，汇聚于取水口，由水泵将水体抽进水塔，从而实现陆基养殖单元和水处理单元的水体循环流动。

试验期间，陆基养殖单元投喂人工配合饲料（粗蛋白≥40%、粗脂肪≥3%、粗纤维≤5%、粗灰分≤17%），每日早晚各投喂 1 次，日投喂量为鱼体质量的 1.5%~3%，具体视水温、试验鱼摄食情况进行调整^[14]，并做好统计工作，菌藻鱼区不投喂。

1.4 样品采集和分析方法

为探讨养殖尾水污染物沿水处理流程的变化，设置

5个采样点,分别为:菌藻鱼区进水口、菌藻鱼区出水口、水生植物区进水口、水生植物区出水口、陆基养殖区进水口。每周测定1次水处理单元水体理化指标,每次水样采集时间为8:00—10:00。水温(water temperature, WT)、溶氧(dissolved oxygen, DO)、pH使用哈希HQ40 d现场测定;采集水样经0.45 μm玻璃纤维膜抽滤后,用于NH₄⁺-N(水杨酸法)和NO₂⁻-N(重氮化法)的测定;TN、TP分别使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法测定。各水质指标的排放标准参考《淡水池塘养殖水排放要求(SC/T 9101-2007)》。试验鱼于放养时测定一次,系统运行期间试验鱼监测频率与水处理单元一致。

随机采集系统内全部品种鱼类样本,采用凯氏定氮法(GB/T 5009.5-2003)和分光光度法(GB/T 12393-1990)测定鱼肉的TN、TP含量。饲料中TN、TP含量测定方法同鱼体样品。由微滤机过滤出的固体废弃物的TN、TP含量分别使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(CJ/T 221-2005)、偏钼酸铵分光光度法(HJ 712-2014)测定。养殖期间记录补充的水量,并测定补充水的TN和TP含量;降雨未对水处理单元水位造成影响,因此忽略雨水中TN、TP的输入量。养殖期间补充水量约为99 m³。

1.5 计算方法

1.5.1 水处理单元净化效果

各水处理单元净化效果采用百分比去除率。计算公式为

$$\text{百分比去除率} = [(C_0 - C_t) / C_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中 C_0 表示各水处理单元进水污染物浓度, mg/L; C_t 表示各水处理单元出水污染物浓度, mg/L。

1.5.2 陆基养殖单元养殖效果

养殖效果评估采用成活率、增重率(weight gain rate, WGR)、特定生长率(specific growth rate, $R_{SGR,m}$)和饵料系数(feed coefficient, FCR)等指标。计算公式为

$$\text{成活率} = (S_t / S_0) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{增重率 WGR} = [(W_t - W_0) / W_0] \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{特定生长率 } R_{SGR,m} = [(\ln W_t - \ln W_0) / t] \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{饵料系数 FCR} = FI / (W_t - W_0) \quad (5)$$

式中 S_t 表示养殖 t 时间时成活的尾数, 尾; S_0 表示试验开始时放养尾数, 尾; W_t 表示养殖 t 时间时的体质量, g; W_0 表示放养时的体质量, g; FI 表示投入的饲料重量, g。

1.5.3 氮磷收支及利用率

氮、磷收支方程为

$$\begin{aligned} \text{氮输入(投喂饲料+放养鱼类+初始水体+补充水+} \\ \text{水生植物)} = \text{氮输出(收获鱼类+终末水层+固体废弃物+} \\ \text{水生植物+U)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{磷输入(投喂饲料+放养鱼类+初始水体+补充水+} \\ \text{水生植物)} = \text{磷输出(收获鱼类+终末水层+固体废弃物+} \\ \text{水生植物+U)} \end{aligned} \quad (7)$$

式中固体废弃物为微滤机过滤出的水体中的大颗粒悬浮物; U 为未测出的氮、磷, 包括底泥沉积、水体渗漏和吸附等。

$$\begin{aligned} \text{氮、磷利用率} = \text{养殖生物净产量的氮、磷含量} / \\ \text{(投喂饵料的氮、磷含量)} \times 100\% \end{aligned} \quad (8)$$

1.5.4 陆基养殖单元与水处理单元面积的配比关系

陆基养殖单元和水处理单元面积的关系, 根据如下公式进行计算:

1) 根据养殖桶与水处理单元水量交换的体积进行计算^[15]

$$S'_0 = H / (\Delta h \times \Delta n) \times S \quad (9)$$

式中 S'_0 为养殖单元面积, m²; H 为水处理单元的水深, m; Δh 为每次换水的深度, m; Δn 为换水陆基养殖桶水体占水处理单元的比例; S 为水处理单元的面积, m²。

2) 根据水处理单元设计要满足陆基养殖单元在若干养殖桶同时换水一定深度的情况下水体污染物净化达到《淡水池塘养殖水排放要求(SC/T 9101-2007)》的要求原则进行计算^[15]

$$S'_0 = (Q \times K \times \Delta d) / (\Delta v \times \Delta h \times \Delta n \times T) \times S \quad (10)$$

式中 Q 为水处理单元水生植物的覆盖率, %; K 为水生植物对污染物的吸收值, g/m³; Δd 为每次换水间隔的天数, d; Δv 为污染物去除浓度, mg/L。

3) 根据养殖鱼类的产排污系数计算^[15]

$$S'_0 = (666.7 \times T_0 \times H_0 \times Q \times K) / (M_0 \times K_0 \times \Delta h \times \Delta n \times T) \times S \quad (11)$$

式中 T_0 为鱼类的养殖周期, d; H_0 为养殖桶的水深, m; M_0 为养殖鱼类的产量, kg; K_0 为养殖鱼类的产排污系数, g/kg。

1.6 数据处理与分析

各试验指标均以“Mean±SE”(均值±标准误)形式表示, 使用Excel和SPSS 27对各指标的数据进行统计与分析, 并进行图表绘制。使用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和Duncan多重比较进行显著性分析, 显著水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 水处理单元主要水质参数变化

试验期间, 试验塘水体水温、溶解氧和pH值如表1所示。整体而言, 常规水体理化指标相对稳定, 溶解氧浓度大于7 mg/L, 可满足《渔业水质标准(GB 11607-1989)》。

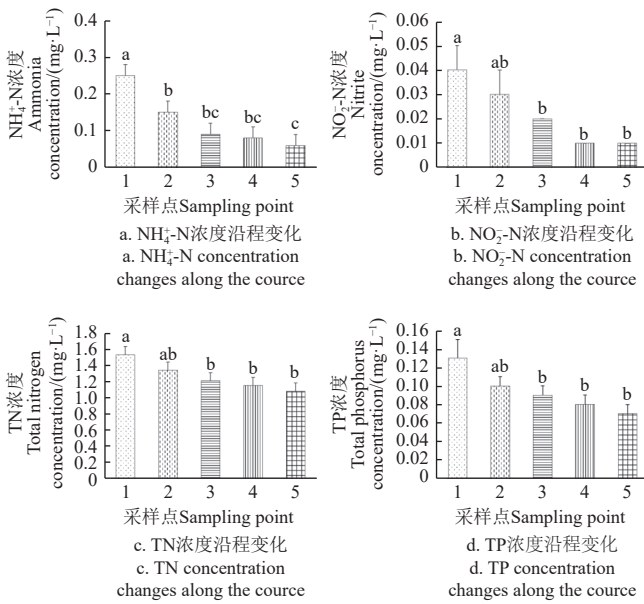
由图2可知, 试验塘养殖尾水中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN和TP等污染物浓度沿水流方向, 均呈现下降趋势。水处理单元出水NH₄⁺-N浓度为0.06 mg/L, NO₂⁻-N浓度

为 0.01 mg/L, TN 浓度为 1.08 mg/L, TP 浓度为 0.07 mg/L, 能够满足《淡水池塘养殖水排放要求 (SC/T 9101-2007)》。

表 1 水体常规理化指标变化

Table 1 Changes of conventional physical and chemical indexes of water bodies

采样点 Sampling point	水温 Water temperature /°C	溶氧 Dissolved oxygen/(mg·L ⁻¹)	pH 值 pH value
1	21.66±1.26	9.29±0.53	7.78±0.17
2	21.78±1.28	9.76±0.57	7.94±0.27
3	21.74±1.21	9.78±0.62	7.96±0.26
4	21.89±1.26	9.27±0.66	7.84±0.26
5	21.94±1.25	7.92±0.65	7.71±0.27



注：图中同一参数不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。
 Note: Different letters of the same parameter in the figure indicate significant difference at the level of 0.05.

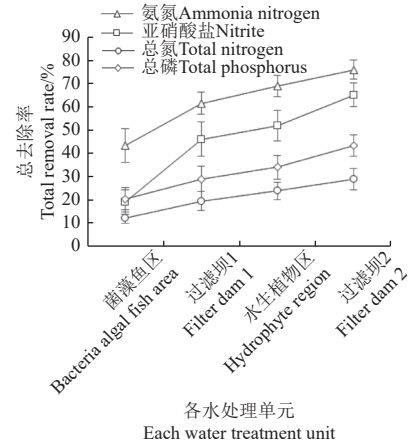
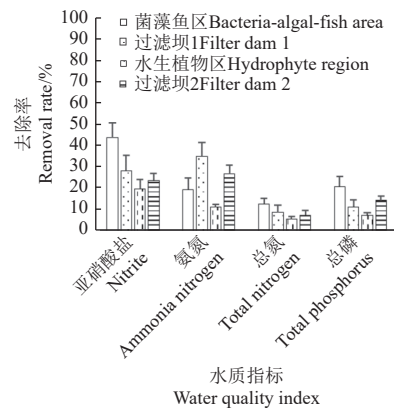
图 2 主要水质参数的沿程变化

Fig.2 Variations of main water quality parameters along the course

由图 3 可知, 水处理单元对 NH₄⁺-N 总去除率为 75.69%, 菌藻鱼区、过滤坝 1、水生植物区和过滤坝 2 对 NH₄⁺-N 去除的贡献率分别为 57.29%、23.75%、9.69% 和 9.28%; NO₂⁻-N 总去除率为 64.99%, 各沿程水处理单元贡献率分别为 29.51%、41.26%、9.13% 和 20.10%; TN 总去除率为 29.1%, 各沿程水处理单元贡献率分别为 42.84%、24.75%、14.67% 和 17.75%; TP 总去除率为 43.29%, 沿程各水处理单元贡献率分别为 47.60%、19.72%、11.36% 和 21.32%。由此可知, 菌藻鱼区和过滤坝 1 是水处理单元对 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP 等污染物去除的主要区域, 总贡献率均超过 50%, 其中菌藻鱼区的贡献率相对较高。

整体上, 各水处理单元对 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的去除效果较好 (图 4)。菌藻鱼区对 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP 的去除率分别为 43.36%、19.18%、12.46% 和 20.61%; 过滤坝 1 对 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP 的去除率分别为 27.95%、34.49%、8.35% 和 11.09%; 水生植

物区对 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP 的去除率分别为 19.53%、10.91%、5.26% 和 7.18%; 过滤坝 2 对 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP 的去除率分别为 23.31%、26.45%、7.04% 和 14.09%。该尾水处理系统对 TN 的去除效果整体较其他指标低; 水体经处理能够同时满足《渔业水质标准 (GB 11607-1989)》和《淡水池塘养殖水排放要求 (SC/T 9101-2007)》。

图 3 主要水质参数去除率的沿程变化
Fig.3 Change of removal rate of main water quality parameters along the course图 4 养殖尾水水质净化效果
Fig.4 Purification effect of aquaculture tail water

2.2 试验期间陆基养殖单元水质动态变化及特征

由图 5 可知, 试验塘 NH₄⁺-N 浓度变化范围为 0.13~0.55 mg/L, 平均值为 0.13 mg/L, 在试验开展第 1 周时出现一次峰值; 对照塘变化范围为 0.14~0.25 mg/L, 在试验开展第 2 周和第 4 周出现峰值, 对照塘 NH₄⁺-N 浓度从第 2 周开始, 均高于试验塘 (图 5a)。试验塘 NO₂⁻-N 浓度变化范围为 0.007~0.052 mg/L, 平均值为 0.020 mg/L, 在试验开展第 1 周时出现一次峰值; 对照塘变化范围为 0.023~0.047 mg/L, 平均值为 0.032 mg/L, 在试验开展第 6 周时出现峰值, 对照塘 NO₂⁻-N 浓度从第 3 周开始, 均高于试验塘 (图 5b)。试验塘和对照塘 TP 浓度变化趋势一致, 且对照塘明显高于试验塘 (图 5c)。

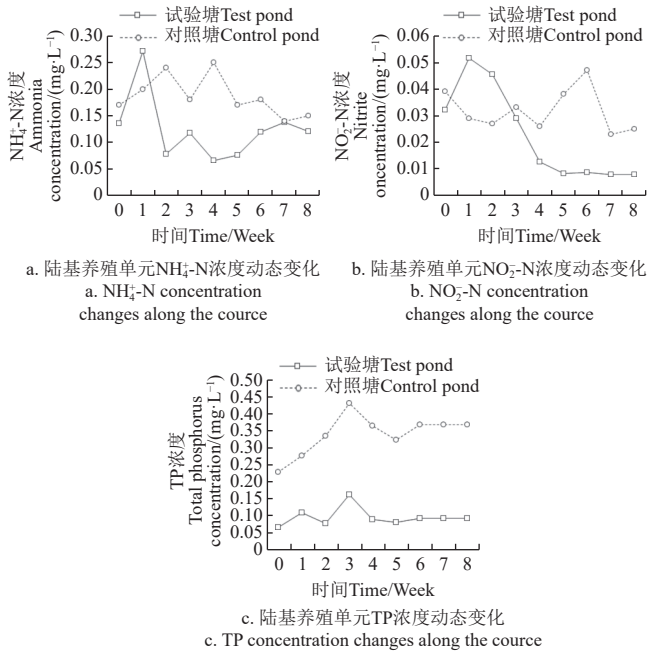


图5 陆基养殖单元水质参数动态变化

Fig.5 Dynamic change of water quality parameters in land-based aquaculture unit

2.3 陆基养殖单元养殖效果

由表2可知,瓦氏黄颡鱼于陆基养殖单元中经8周的人工养殖,其成活率为97.5%,单位产量为6.38 kg/m³,

增重率平均为71.57%,特定生长率平均为0.96%/d,饵料系数平均为1.48,因本研究中对照塘未干塘,采用文献中黄颡鱼养殖数据进行对比,养殖结果表明与池塘养殖相比,陆基循环水养殖提高了瓦氏黄颡鱼的成活率。

2.4 氮磷收支及利用

由表3可知,饲料是氮元素的主要输入来源,占系统氮元素输入量的61.71%,其次是瓦氏黄颡鱼,占系统氮元素输入量的32.29%。水葫芦、水层和补充水体中氮元素分别占氮元素输入总量的2.24%、3.43%和0.33%。饲料是磷元素的主要输入来源,占系统磷元素输入量的61.85%,其次是水葫芦,占系统磷元素输入量的22.95%。瓦氏黄颡鱼、水层和补充水磷元素分别占系统磷元素输入量的8.64%、6.00%和0.50%。

在系统氮磷的输出途径中,瓦氏黄颡鱼和综合项(包含底泥沉积、水体渗漏、吸附等)是氮元素输出的主要方式,分别占系统氮元素输出量的50.26%和41.12%。水葫芦和水层分别占系统氮元素输出量的3.19%和4.98%。鲢、鳙和微滤机固体废弃物对氮元素输出的贡献均不足1%。综合项和水葫芦是磷元素输出的主要方式,分别占系统磷元素输出量的38.53%、32.69%,其次是瓦氏黄颡鱼,占系统磷元素总输出量的15.23%。水层和微滤机固体废弃物的磷元素分别占系统磷元素输出量的8.77%、4.18%。净水鱼类鲢、鳙对磷元素输出的贡献均不足1%。

表2 陆基养殖单元鱼类收获情况

Table 2 Harvest information in land-based culture unit

养殖模式 Culture mode	种类 Species	初始平均 体质量 Initial mean body weight/g	终末平均 体质量 Terminal mean body weight/g	成活率 Survival rate/%	单位产量 Unit of production /(kg·m ⁻³)	增重率 Weight gain rate/%	特定生长率 Specific growth rate /(%·d ⁻¹)	饵料系数 Food coefficient	养殖周 期 Culture cycle/d	文献 Reference
陆基循环水养殖模式 Land based recirculating aquaculture model	瓦氏黄颡鱼	5.84±0.18	9.99±0.71	97.5	6.38	71.57±4.52	0.96±0.05	1.48±0.09	56	本研究
池塘循环水养殖模式 Pond recirculating aquaculture model	黄颡鱼	21.3±2.82	168.50±5.47	86.88		104.67±18.61	0.68±0.17		322	[16]
池塘养殖模式 Pond culture model	黄颡鱼	21.3±2.82	180.05±5.96	93.12		112.40±28.13	0.77±0.19		322	[16]

表3 养殖系统氮磷收支状况

Table 3 Nitrogen and phosphorus budget of aquaculture system

项目 Items	输入量 Input quantity				输出 Output quantity			
	氮 Nitrogen		磷 Phosphorus		氮 Nitrogen		磷 Phosphorus	
	质量 Quality/g	占比 Proportion/%	质量 Quality/g	占比 Proportion/%	质量 Quality/g	占比 Proportion/%	质量 Quality/g	占比 Proportion/%
饲料 Fodder	27 741.40	61.71	1 238.00	61.85	/	/	/	/
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	14 513.60	32.29	172.90	8.64	22 591.30	50.26	304.80	15.23
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	1.29	0.00	1.04	0.05	12.48	0.03	10.46	0.52
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	0.28	0.00	0.19	0.01	1.84	0.00	1.72	0.09
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	1 005.84	2.24	459.36	22.95	1 432.56	3.19	654.24	32.69
水层 Aquifer	1 540.44	3.43	120.12	6.00	2 237.40	4.98	175.56	8.77
补充水 Make-up water	148.10	0.33	10.00	0.50	/	/	/	/
固体废弃物 Solid waste	/	/	/	/	189.78	0.42	83.66	4.18
综合项 Composite term	/	/	/	/	18 485.60	41.12	771.18	38.53
总量 Total amount	44 950.95		2 001.61		/	/	/	/

养殖系统中鱼类对氮、磷的利用率见表4。养殖系统中,瓦氏黄颡鱼对氮磷利用率分别为(29.12±0.75)%、

(10.65±0.29)%。鲢、鳙对氮的利用率分别为(0.06±0.01)%、(0.02±0.00)%;对磷的利用率分别为(1.14±

0.17) %、(0.33±0.04) %。Duncan's 多重比较结果显示, 瓦氏黄颡鱼对氮、磷的利用率均显著高于鳙、鲢 ($P < 0.05$)。鳙和鲢之间的氮、磷利用率差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 4 养殖系统中鱼类的氮磷利用率

Table 4 Nitrogen and phosphorus utilization of fish in aquaculture system

物种 Species	氮利用率 Nitrogen utilization rate/%	磷利用率 Phosphorus utilization rate/%
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	29.12±0.75 ^a	10.65±0.29 ^a
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	0.06±0.01 ^b	1.14±0.17 ^b
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	0.02±0.00 ^b	0.33±0.04 ^c

注: 图中同一项目标有不同字母的数据表示相互差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Data marked with different letters for the same item in the figure indicate significant differences between them ($P < 0.05$).

2.5 陆基养殖单元与水处理单元面积的配比关系

根据式 (9), 若陆基养殖单元全部养殖桶换水一次, 则 $H=2.5$ m, $\Delta h=0.8$ m, $\Delta n=1$, 代入式 (9) 得: $S_0=3.125S$, 即养殖桶与水处理单元面积配比为 3.125:1。

根据式 (10), 水草的覆盖率 Q 为 12.12%; 仅考虑对 TN 的去除, 水生植物对污染物的吸收值 K 参考宋超等^[15] 的研究, $K=30$ g/m³; 2 h 所有养殖桶换水一次, 则 $\Delta d=0.083$ d; 水生植物的生长周期为 8 周, 则 $T=56$ d; 将 TN 从 1.50 mg/L 降到 0.5 mg/L, 则 $\Delta v=1$ mg/L; 每次换水 0.8 m, 即 $\Delta h=0.8$ m; 全部的养殖桶换水, 则 $\Delta n=1$ 。代入式 (10) 得: $S_0=0.0067S$, 即养殖桶与水处理单元面积配比为 0.0067:1。

根据式 (11), 鱼类养殖周期 T_0 为 56 d; 养殖池塘水深 H_0 为 0.8 m; 净水池塘水生植物覆盖率 Q 为 12.12%; 水生植物对污染物的吸收值 K 参考宋超等^[15] 的研究, $K=30$ g/m³; 666.7 m² 养殖鱼类的产量 M_0 为 1472.59 kg; 养殖鱼类的产排污系数 K_0 参考宋超等^[15] 的研究, $K_0=10$ g/kg; 每次换水的深度 Δh 为 0.8 m; 全部的养殖桶换水, 则 $\Delta n=1$; 水生植物的生长周期为 8 周, 则 $T=56$ d。代入式 (11) 得: $S_0=0.16S$, 即养殖桶与水处理单元面积配比为 0.16:1。

3 讨论

3.1 水处理单元对养殖尾水净化分析

池塘循环水养殖系统水处理单元通常采用水生植物、滤食性鱼类净化水质^[17-18]。本系统中, 除水生植物区净化养殖尾水外, 还添加菌藻鱼区, 通过“菌-藻-鱼”间的相互作用净化水质。水处理单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 和 TP 总去除率分别为 75.69%、64.99%、29.1% 和 43.29%, 其中菌藻鱼区的贡献率较水生植物区高, 表明“菌-藻-鱼”组合具有良好的净化能力。藻类光合作用产生氧气增加了水体中溶解氧浓度, 利于氨氧化、亚硝酸盐氧化和磷的积累; 进行光合作用所产生的有机物质和藻类死亡腐败产生的有机物质可被细菌利用。细菌代谢产物可被藻类利用, 如呼吸作用产生的 CO_2 可被藻类

利用, 合成有机物^[19-20]。研究表明, 低温环境通常影响植物生长和微生物繁殖^[21]。本研究中, 水处理单元对 TN 总去除率相对较低, 为 29.1%, 推测与试验过程中天气逐渐转凉、温度下降有关, 微生物繁殖受到影响, 导致脱氮效果较差。

水生植物可以通过自身的吸收 (富集和快速生长) 以及与微生物的协同作用有效净化水质^[22]。由于不同植物的生长能力、根系类型以及氮磷积累能力不同, 其对废水的净化能力也不同^[23-25]。漂浮植物具有发达的根系, 通过茎和根吸收营养物质, 繁殖迅速^[26-27], 其根系也为微生物提供有利的生存环境^[28]。LI 等^[29] 在夏季 (气温为 25~35 °C) 研究 8 种水生植物对高浓度磷溶液 (3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.5 mg/L) 的处理效果, 结果表明, 水生植物对水中磷的去除效率高达 95% 以上。然而本研究中, 水生植物区对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN 和 TP 去除效果均较低, 可能与水生植物区进水中污染物浓度较低有关。研究表明, 沉水植物 (轮叶黑藻 *Hydrilla verticillata*、苦草 *Vallisneria natans*、金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*、穗状狐尾藻 *Myriophyllum spicatum*、微齿眼子菜 *Potamogeton maackianus*) 腐败后可引起水体 TN、TP 浓度上升^[30]; 马来眼子菜 (*Potamogeton malaianu*) 生长过程中产生的腐败枝叶等物质增加了水体中 TP 浓度^[27]。试验过程中, 观察到凤眼莲部分茎叶衰败脱落。研究表明, 使用水生植物处理养殖废水时, 应综合考虑水质、气候等因素, 合理选择水生植物种类, 分类搭配, 以求提高水生植物污水处理能力; 并在水生植物枯萎阶段前, 应尽快打捞收割并上岸填埋处理, 避免植物残体腐败并释放污染物^[31]。综上所述, 水生植物区可通过合理选择水生植物种类、分类搭配措施增强其废水净化能力。

3.2 养殖效果

瓦氏黄颡鱼喜居池塘底部生活, 喜静水、缓流, 偏好黑暗环境或喜欢藏匿^[32-33], 养殖模式主要是淡水池塘养殖。高产量的池塘养殖模式存在养殖水体污染、水产品肉质品质差、易患病等问题, 不仅带来经济损失, 还导致环境恶化。因此寻找瓦氏黄颡鱼的生态健康养殖方式具有重要意义。黄颡鱼-水稻生态种养模式中, 水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与池塘养殖水体相比, 降低了 60%~80%^[34]。吕敏等^[35] 对稻田和池塘养殖的瓦氏黄颡鱼的生长性能进行了比较分析, 结果表明, 稻养模式能到改善水质, 提高天然生物饵料的含量, 提升瓦氏黄颡鱼的生长性能。刘梅等^[16] 研究了不同养殖模式下黄颡鱼的生长性能, 结果表明, 传统池塘养殖模式下黄颡鱼成活率为 93.12%, 增重率平均为 112.40%, 特定生长率平均为 0.77%/d, 而池塘循环水养殖模式下, 黄颡鱼经 322 天的养殖, 成活率为 86.88%, 增重率平均为 104.67%, 特定生长率平均为 0.68%/d。本研究中, 陆基循环水养殖模式下, 瓦氏黄颡鱼经 56 天的养殖, 成活率为 97.5%, 增重率平均为 71.57%, 特定生长率平均为 0.96%/d, 与刘梅等^[16] 的研究结果相比, 本养殖模式表现出较好的养殖效果, 推测与陆基循环水系统能够较好

的处理养殖尾水,改善水质有关。

3.3 养殖系统的氮磷利用效率

相关研究表明,不同养殖品种和养殖模式下,氮磷输入的来源比例会有所差异,在不施肥情况下,饲料通常是养殖池塘氮磷输入的主要方式^[2,36]。孙云飞等^[37]对草鱼与鲢、鲤不同混养模式的研究结果表明:不同养殖模式下,饲料输入氮磷含量占总输入的比例达到80%以上。张翔宇等^[38]对不同年龄红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)循环水养殖系统研究结果表明:饲料输入是系统氮磷元素输入的主要方式,占比达96%以上。本研究中,饲料是氮磷输入的主要来源,与前人研究结果一致。

在氮磷输出研究中,主要支出项目为底泥沉积、终末水层、收获生物^[2]。本研究结果显示,养殖鱼类(瓦氏黄颡鱼)和综合积累(包含底泥沉积、水体渗漏、吸附等)是本系统氮输出的主要项目,分别占氮总输出的50.26%、41.12%,水生植物和综合积累是磷输出的主要方式,分别占磷总输出的32.69%、38.53%。刘梅等^[39]对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)养殖池塘的研究结果表明,底泥沉积是养殖系统氮、磷输出的主要方式。孙云飞等^[37]对草鱼与鲢、鲤混养池塘的研究表明,养殖生物收获是氮元素输出的主要方式,底泥积累是磷元素输出的主要方式。表明养殖对象和养殖模式可能对氮元素的主要输出方式产生影响。本研究中,水层中氮积累量远远高于磷积累量,推测与氮、磷循环方式不同有关。研究表明,磷为沉积型循环,易固结在土壤等沉积物中^[40]。

饲料、养殖模式和养殖对象等因素通常会影响到养殖生物对氮、磷等营养元素的利用率^[41]。本研究中,瓦氏黄颡鱼的氮磷利用率分别为29.12%、10.65%,高于青鱼和鳙混养池塘的氮、磷利用率(分别为17.51%和9.78%)^[2],但低于鲤和草鱼混养池塘的氮磷利用率(分别为65.2%和16.6%)^[36],说明氮磷利用率受到养殖对象和养殖模式的影响。由于不同养殖品种对氮磷的需求和利用存在差异,本研究中,瓦氏黄颡鱼对氮磷的吸收利用率显著高于鲢、鳙,原因可能是瓦氏黄颡鱼放养量大,鲢、鳙作为净水鱼类,主要摄食残饵及浮游生物且其放养量小,因此鲢鳙氮磷利用率显著低于瓦氏黄颡鱼。

3.4 养殖单元面积与净化单元面积配比关系

设计池塘循环水养殖系统的核心问题是养殖单元与净化单元的面积配比关系,它涉及建设成本、运行效率以及最终的养殖收益。净化单元面积过小,净化能力有限,无法有效处理养殖尾水中的污染物;净化单元面积过大,则会缩减养殖面积,造成土地资源浪费^[42]。本研究根据换水体积、养殖单元排放的污染物浓度、养殖鱼类的产排污系数进行计算,得出养殖桶与水处理单元面积配比关系分别为3.125:1、0.0067:1、0.16:1。3种计算结果差异较大,推测与3种分析方法的分析角度不同、计算过程中部分数据(如水生植物对污染物的吸收值 K 、养殖鱼类的产排污系数 K_0)作为参考值未实际测定有关。本试验中养殖桶与水处理单元实际面积配比关系为0.043:1,介于0.0067:1与0.16:1之间,与3.125:1差别较大,且本试验中水处理单元净化效果显著,说明根据

换水体积计算所得的面积配比关系存在土地资源浪费现象,本试验系统更适合参考养殖单元排放的污染物浓度、养殖鱼类的产排污系数进行计算。净化池塘面积受净化能力、养殖负荷等多种因素的影响,净化能力越强,水力停留时间则越短,从而可降低净化池塘配比比例^[43]。植物与生物膜联合处理鲟鱼冷流水养殖尾水, TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均达到90%~100%^[44];小球藻(*Chlorella vulgaris*)和地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)对废水中TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为88.95%、80.28%和72.00%^[45]。与之相比,本研究中TN、TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的总去除率分别为29.1%、43.29%和75.69%,净化能力未达到理想状态,推测与植物、微生物、藻类未达到最佳净化能力有关^[19]。因此,本研究所采用的养殖桶面积和水处理单元面积配比尚有很大的提升空间。此外,本试验养殖系统尚未满负荷运转,所以养殖桶与水处理单元的面积配比关系需在提高水处理单元净化能力和养殖负荷的基础上,结合数学模型进一步研究。

4 结论

- 1) 本系统水处理单元对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、TN和TP等污染物的总去除率分别为75.69%、64.99%、29.1%和43.29%,养殖尾水经净化后能够满足《渔业水质标准(GB 11607-1989)》和《淡水池塘养殖水排放要求(SC/T 9101-2007)》。
- 2) 本系统陆基养殖单元瓦氏黄颡鱼经8周养殖,其成活率为97.5%,增重率为(71.57±4.52)%,饵料系数为1.48,养殖效果良好。
- 3) 本试验中养殖桶与水处理单元实际面积配比关系为0.043:1,养殖尾水净化效果显著,但未达到理想状态,且本试验中养殖单元未满负荷运转,养殖单元与净化单元的面积配比尚有很大的提升空间。

[参考文献]

- [1] 赵思琪, 赵三琴, 国振洪, 等. 池塘水产养殖精准投喂系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 27-34. ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, GUO Zhenqi, et al. Development of the precise feeding system for pond culture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(22): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘璐, 李学梅, 吴兴兵, 等. 青鱼-鳙生态混养池塘的氮磷收支研究[J]. 淡水渔业, 2021, 51(6): 63-69. LIU Lu, LI Xuemei, WU Xingbing, et al. Nitrogen and phosphorus budgets of *Mylopharyngodon piceus* and *Aristichthys nobilis* ecological polyculture pond[J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(6): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李林, 胡建勇, 李晓东, 等. 池塘内循环水系统养殖斑点叉尾鲴与传统养殖模式的比较试验[J]. 黑龙江水产, 2023, 42(6): 433-436. LI Lin, HU Jianyong, LI Xiaodong, et al. Comparison between in-pond recirculating water system for culture of *Ictalurus punctatus* and Comparative experiment of traditional culture mode[J]. Northern Chinese Fisheries, 2023, 42(6): 433-436. (in

- Chinese with English abstract)
- [4] 周东来, 邝哲师, 符兵, 等. 养殖池塘水体原位修复技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2024, 51(1): 85-96. ZHOU Donglai, KUANG Zheshi, FU Bing, et al. Progress on in-situ remediation technologies of aquaculture pond water[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2024, 51(1): 85-96. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨菁, 管崇武, 宋红桥, 等. 基于物质平衡的对虾高位池循环水养殖系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 217-222. YANG Jing, GUAN Chongwu, SONG Hongqiao, et al. Design and test of mass balance-based recirculating aquaculture system for higher place shrimp pond[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 217-222. (in Chinese with English abstract)
- [6] 徐琰斐, 单建军, 顾川川, 等. 菜-鱼复合设施种养系统构建与运行试验分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 150-156. XU Yanfei, SHAN Jianjun, GU Chuanchuan, et al. Constructing and operating synergy model of aquaponic system integrated with soil-based cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(2): 150-156. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙丽慧, 包成荣, 李倩, 等. 工厂化循环水养殖模式对大口黑鲈肌肉营养成分和挥发性风味物质的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(5): 3192-3208. SUN Lihui, BAO Chengrong, LI Qian, et al. Effects of industrialized circulating aquaculture mode on muscle nutritional components and volatile flavor compounds of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(5): 3192-3208. (in Chinese with English abstract)
- [8] 周寅鑫, 刘海波, 胡伟, 等. 鱼类趋流性在循环水养殖系统中的应用与展望[J/OL]. 水产科学: 1-15. [2024-07-08]. <https://doi.org/10.16378/j.cnki.1003-1111.23005>. ZHOU Yinxin, LIU Haibo, HU Wei, et al. A review: application and prospect of fish rheotaxis in a recirculating aquaculture system[J/OL]. Fisheries Science: 1-15. [2024-07-08]. <https://doi.org/10.16378/j.cnki.1003-1111.23005>. (in Chinese with English abstract)
- [9] 冯德军, 黄亨达, 张宇笈, 等. 养殖密度对圆形循环水养殖池自清洗能力的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 267-276. FENG Dejun, HUANG Hengda, ZHANG Yuji, et al. Effects of aquaculture density on self-cleaning ability of circular recirculating water aquaculture tank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(19): 267-276. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李华, 田道贺, 刘青松, 等. 间歇式双循环工厂化养殖系统构建及其养殖效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 299-305. LI Hua, TIAN Daohe, LIU Qingsong, et al. Construction and effect of sequencing batch double-cycle recirculating aquaculture system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 299-305. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王相盼, 黄金义, 李同庆, 等. 一种陆基圆桶循环水养殖系统的设计与实际应用[J]. 河北渔业, 2023(8): 3-6. WANG Xiangpan, HUANG Jinyi, LI Tongqing, et al. Design and practical application of a land-based barrel recirculating aquaculture system[J]. Hebei Fisheries, 2023(8): 3-6. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. “三池两坝”多级组合工艺对内陆池塘养殖尾水的处理[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(1): 97-106. LIU Mei, YUAN Julin, NI Meng, et al. Treatment of inland pond aquaculture tail water by multi-stage combined process of “three ponds and two dams” [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(1): 97-106. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐佳杰, 张妮, 谢周云, 等. 基于文献计量的菌藻共生技术研究现状及发展趋势[J]. 环境科学学报, 2023, 43(7): 401-412. XU Jiajie, ZHANG Ni, XIE Zhouyun, et al. Current status and future development of algal-bacterial symbiosis technology based on bibliometrics[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(7): 401-412. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴心怡, 徐一闯, 席峰, 等. 不同比例低品质红鱼粉饲料中添加酵母培养物对美洲鳗幼鱼生长及肠道健康的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(6): 1000-1010. WU Xinyi, XU Yichuang, XI Feng, et al. Yeast culture on the growth and intestinal health of juvenile american eel (*Anguilla Rostrata*) fed diets with varying proportions of low-quality brown fishmeal[J]. Acta Hydrobiologica Sinca, 2024, 48(6): 1000-1010. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋超, 裘丽萍, 瞿建宏, 等. 池塘循环水养殖模式下养殖面积与净化面积的配比关系研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(29): 147-151. SONG Chao, QIU Liping, QU Jianhong, et al. The relationship between the area of fish pond and purification pond in the model of the water circulation pond aquaculture system[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(29): 147-151. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘梅, 宓国强, 郭建林, 等. 池塘内循环流水养殖模式对黄颡鱼生长性能、形体指标、血清生化指标及肌肉营养成分的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(4): 1704-1717. LIU Mei, MI Guoqiang, GUO Jianlin, et al. Effects of internal-circulation pond aquaculture model on growth performance, morphological indices, serum biochemical indices and muscle nutritional components of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(4): 1704-1717. (in Chinese with English abstract)
- [17] MARTINS C I M, EDING E H, VERDEGEM M C J, et al. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability[J]. Aquacultural Engineering, 2010, 43(3): 83-93.
- [18] 彭刚, 刘伟杰, 童军, 等. 池塘循环水生态养殖效果分析[J]. 水产科学, 2010, 29(11): 643-647. PENG Gang, LIU Weijie, TONG Jun, et al. Ecological aquaculture analysis in a recirculating water pond[J]. Fisheries Science, 2010, 29(11): 643-647. (in Chinese with English abstract)
- [19] SUN X Y, LI X P, TANG S, et al. A review on algal-bacterial symbiosis system for aquaculture tail water treatment[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157620.
- [20] 金忠友, 陈志宏, 郑政, 等. 水环境菌藻共生相互作用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(6): 870-874,880.

- JIN Zhongyou, CHEN Zhihong, ZHENG Zheng, et al. Research progress of bacteria-algae symbiotic interaction in water environment[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(6): 870-874,880. (in Chinese with English abstract)
- [21] 丁怡, 唐海燕, 刘兴坡, 等. 不同类型人工湿地在污水脱氮中的研究进展[J]. *工业水处理*, 2019, 39(7): 1-3,9. DING Yi, TANG Haiyan, LIU Xingpo, et al. Research progress in different kinds of constructed wetlands for nitrogen removal from wastewater[J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(7): 1-3,9. (in Chinese with English abstract)
- [22] 崔键, 杜易, 丁程成, 等. 中国湖泊水体磷的赋存形态及污染治理措施进展[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(3): 621-633. CUI Jian, DU Yi, DING Chengcheng, et al. Phosphorus fraction and abatement of lakes in China: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(3): 621-633. (in Chinese with English abstract)
- [23] ZHU L, LI Z, KETOLA T. Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1460-1466.
- [24] SAMAL K, DASH R R, BHUNIA P. Treatment of wastewater by vermifiltration integrated with macrophyte filter: a review[J]. *Journal Of Environmental Chemical Engineering*, 2017, 5(3): 2274-2289.
- [25] DEANE D C, HARDING C, ALDRIDGE K T, et al. Predicted risks of groundwater decline in seasonal wetland plant communities depend on basin morphology[J]. *Wetlands Ecology And Management*, 2018, 26(3): 359-372.
- [26] SUDIARTO S I A, RENGAMAN A, CHOI H L. Floating aquatic plants for total nitrogen and phosphorus removal from treated swine wastewater and their biomass characteristics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 763-769.
- [27] XU J L, LIU J, HU J Q, et al. Nitrogen and phosphorus removal in simulated wastewater by two aquatic plants[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2021, 28(44): 63237-63249.
- [28] XING W, HAN Y, GUO Z, et al. Quantitative study on redistribution of nitrogen and phosphorus by wetland plants under different water quality conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114086.
- [29] LI J F, WANG Y H, CUI J W, et al. Removal effects of aquatic plants on high-concentration phosphorus in wastewater during summer[J]. *Journal of Environment Management*, 2022(324): 116434.
- [30] 金树权, 周金波, 包薇红, 等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 156-161. JIN Shuquan, ZHOU Jinbo, BAO Weihong, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes[J]. *Environmental science*, 2017, 38(1): 156-161. (in Chinese with English abstract)
- [31] 龚深, 巢传鑫, 邹冬生, 等. 人工湿地中植物对污染物去除机理研究进展[J]. *湿地科学*, 2023, 21(6): 927-935. GONG Shen, CHAO Chuanxin, ZOU Dongsheng, et al. Research progress on pollutant removal mechanism of plants in constructed wetland[J]. *Wetland Science*, 2023, 21(6): 927-935. (in Chinese with English abstract)
- [32] 白艳勤, 王雪, 刘德富, 等. 瓦氏黄颡鱼和鲢对光照强度和颜色的选择[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(2): 216-221. BAI Yanqin, WANG Xue, LIU Defu, et al. The preferable light intensity and color for darkbarbel catfish and silver carp[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(2): 216-221. (in Chinese with English abstract)
- [33] 路波, 石小涛, 刘德富, 等. 瓦氏黄颡鱼对黑白底质颜色偏好和藏匿行为研究[J]. *水生生态学杂志*, 2012, 33(5): 36-40. LU Bo, SHI Xiaotao, LIU Defu, et al. White and black substrate preference and hiding behavior of *Pelteobagrus vachelli*[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(5): 36-40. (in Chinese with English abstract)
- [34] VROMANT N, DUONG L T, OLLEVIER F. Effect of fish on the yield and yield components of rice in integrated concurrent rice-fish systems[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2002(138): 63-71.
- [35] 吕敏, 甘晖, 陈田聪, 等. 瓦氏黄颡鱼在稻田和池塘养殖中的生长性能和肌肉品质比较[J]. *水产学杂志*, 2022, 35(1): 75-81. LÜ Min, GAN Hui, CHEN Tiancong, et al. Comparison of growth performance and muscle quality of Yellow Catfish(*Pseudobagrus vachelli*)cultured in rice fields and ponds[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2022, 35(1): 75-81. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张家赫, 许世玲, 左妍, 等. 工程化循环水养殖池塘的氮磷收支研究[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(5): 734-743. ZHANG Jiahe, XU Shiling, ZUO Yan, et al. Nitrogen and phosphorus budget in engineered recirculating aquaculture pond[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(5): 734-743. (in Chinese with English abstract)
- [37] 孙云飞, 王芳, 刘峰, 等. 草鱼与鲢、鲤不同混养模式系统的氮磷收支[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(3): 450-459. SUN Yunfei, WANG Fang, LIU Feng, et al. Nitrogen and phosphorus budgets in grass carp, silver carp, and common carp culture systems[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(3): 450-459. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张翔宇, 宋协法, 于智海, 等. 不同生长阶段红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)循环水养殖系统的水质调控和氮磷收支研究[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(3): 856-865. ZHANG Xiangyu, SONG Xiefa, YU Zhihai, et al. Study on nitrogen/phosphorus budget and water quality control of recirculating aquaculture system of *Takifugu Rubripes* in different ages[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2023, 54(3): 856-865. (in Chinese with English abstract)
- [39] 刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. 大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)不同养殖模式氮磷收支及养殖效果研究[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(3): 718-728. LIU Mei, YUAN Julin, NI Meng, et al. A comparative study on nitrogen and phosphorus budget and aquaculture effect of *Micropterus Salmoides* in two modes[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2021, 52(3): 718-728. (in Chinese with English abstract)
- [40] 张玉平, 刘金金, 张芬. 上海地区池塘沉积物中氮、磷、有机碳及重金属风险评价[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(12): 1448-1463. ZHANG Yuping, LIU Jinjin, ZHANG Fen. Risk assessment of nitrogen, phosphorus, organic carbon, and heavy metals in Shanghai aquaculture ponds[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(12): 1448-1463. (in Chinese with English abstract)
- [41] 廖洪平, 张文琦, 邓泳妍, 等. 珍珠龙胆石斑鱼高位养殖池塘氮磷动态及收支的研究[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(1): 92-99. LIAO Hongping, ZHANG Wenqi, DENG Yongyan, et al.

- Dynamics and budgets of nitrogen and phosphorus in higher-plate ponds of gentian grouper[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2023, 42(1): 92-99. (in Chinese with English abstract)
- [42] 刘栋, 张成龙, 朱健. 池塘循环水养殖系统构建及其生态净化效果研究进展[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(17): 145-152. LIU Dong, ZHANG Chenglong, ZHU Jian. Construction and purification effect of pond recirculating aquaculture system: research progress[J]. *Chinses Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(17): 145-152. (in Chinese with English abstract)
- [43] 郭红喜, 柯彦若, 杨泽冰, 等. 基于氮平衡的陆基水产养殖系统关键参数设计[J]. *天津农业科学*, 2021, 27(11): 44-47, 52. GUO Hongxi, KE Yanruo, YANG Zebing, et al. Design of the key parameters for land-based aquaculture systems based on the nitrogen balance[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(11): 44-47, 52. (in Chinese with English abstract)
- [44] 李鹏举. 水培植物-微生物联合处理冷水鱼养殖尾水的效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. LI Pengju. The Effect of the Combination of Hydroponic Plants and Microorganisms in Cold Water Aquaculture Wastewater Treatment[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [45] JI X Y, JIANG M Q, Zhang J B, et al. The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 247: 44-50.

Construction and operation effect of land-based recirculating aquaculture system based on pond

HU Xiaona, ZHU Yongjiu, WU Xingbing, LI Xuemei, WANG Long, ZHANG Yuansong, LI Xiaoli*

(Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

Abstract: To explore how the land-based recirculating water aquaculture system can be organically integrated with existing freshwater ponds, this study carried out to transform the aquaculture ponds into a combined "bacteria-algae-fish-aquatic plants" water treatment area, which was combined with a land-based aquaculture unit to construct a land-based recirculating water aquaculture system for conducting experiments on the culture of *Pelteobagrus vachelli*. During the experiment, the physical and chemical indicators of water quality in each water treatment unit and the growth of fish in the land-based aquaculture unit were monitored, and the nitrogen and phosphorus balance in the aquaculture system as well as the relationship between the aquaculture unit and the water treatment unit area were evaluated. The results indicated that after 8 weeks of operation, the total removal rates of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrite ($\text{NO}_2^-\text{-N}$), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) by the water treatment units were 75.69%, 64.99%, 29.1% and 43.29%, respectively. Among them, the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, TN and TP were 43.36%, 19.18%, 12.46% and 20.61%, respectively, in the bacteria-algal-fish area, and the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, TN and TP in the aquatic plant area were 19.53%, 10.91%, 5.26% and 7.18%, respectively. The culture tail water was able to meet the "Requirement for Water Discharge from Freshwater Aquaculture Pond" (SC/T 9101-2007) after being purified by the water treatment unit. During the experimental period, the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of the test ponds ranged from 0.13 to 0.55 mg/L, with an average value of 0.13 mg/L, and the control ponds ranged from 0.14 to 0.25 mg/L. The $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of the control ponds was higher than that of the test ponds from the 2nd week onward ($P<0.05$). The $\text{NO}_2^-\text{-N}$ concentration of the test ponds ranged from 0.007 to 0.052 mg/L, with an average value of 0.020 mg/L, and the control ponds ranged from 0.023 to 0.047 mg/L, with an average value of 0.032 mg/L. The $\text{NO}_2^-\text{-N}$ concentrations in the control ponds were higher than those in the experimental ponds from the 3rd week onward ($P<0.05$). The trends of changes in the TP concentrations in the experimental ponds and control ponds were consistent, and the control ponds were significantly higher than the experimental ponds ($P<0.05$). The land-based culture unit of *Pelteobagrus vachelli* had a survival rate of 97.5%, a unit yield of 6.38 kg/m³, an average weight gain rate (WGR) was 71.57%, an average specific growth rate ($R_{\text{SGR,m}}$) of 0.96 %/d, and an average food coefficient (FCR) of 1.48. The results of the nitrogen and phosphorus income and expenditure showed that the feed was the main source of nitrogen and phosphorus in the system, accounting for 61.71% and 61.85% of the total nitrogen and phosphorus input, respectively. *Pelteobagrus vachelli* and integrated accumulation (including bottom sediment deposition, water leakage, adsorption, etc.) were the main items of N and P output, accounting for 50.26% and 38.53% of the total N and P output, respectively. The utilization rates of nitrogen and phosphorus were 29.12% and 10.65%, respectively, and the utilization rates of nitrogen and phosphorus were 0.06% and 1.14% for *Hypophthalmichthys molitrix* and 0.02% and 0.33% for *Aristichthys nobilis*, respectively. The results of multiple comparisons showed that the utilization of nitrogen and phosphorus of *Pelteobagrus vachelli* was significantly higher than that of *Hypophthalmichthys molitrix* and *Aristichthys nobilis* ($P<0.05$). Based on the calculation of the water exchange volume, the pollutant concentration discharged by the aquaculture tank, and the production and discharge coefficient of the aquaculture fish, it was determined that the proportion relationships between the aquaculture barrel and the water treatment unit were 3.125:1, 0.0067:1 and 0.16:1, respectively. However, the proportion relationship between the aquaculture tank and the actual area of the purification pond in this study was 0.043:1, and there was still potential for further optimization. Therefore, this study demonstrated that the land-based recirculating aquaculture system based on the modification of the aquaculture ponds has a good effect in the aspects of aquaculture tailwater purification and nitrogen and phosphorus utilization, which is worthy of further optimization and promotion.

Keywords: pond; recirculating aquaculture; purification effect; nitrogen; phosphorus; *pelteobagrus vachelli*