

对虾高位池循环水养殖系统对水质调控效果研究

李琦^{1,2,3}, 李纯厚^{1,2*}, 颀晓勇^{1,2}, 胡维安^{1,3}, 魏小岚^{1,4}

(1.中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州 510300; 2.农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广州 510300; 4.上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 3.大连海洋大学水产学院, 辽宁 大连 116036)

摘要:为了改善高位池对虾养殖水质,降低养殖环境污染,提高产品质量安全,对自主研发的高位池循环水养殖系统调控对虾养殖水质的效果进行研究,设计了3个不同循环量($20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, T1)、($40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, T2)、($60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, T3)水处理系统进行高位池试验。结果表明,不同处理量的循环水系统均能有效地降低水体中 NH_4^+ 和 NO_2^- , T1、T2、T3对 NH_4^+ 的相对消除率分别为46%、56%、57%;对 NO_2^- 的相对消除率分别为38%、34%、54%;各处理组对 NO_3^- 均没有明显的消除作用。T1、T2对 PO_4^{3-} 无消除效果, T3对 PO_4^{3-} 的相对消除率为36%。T1对COD无消除效果, T2、T3对COD的相对消除率为9%、15%。综合比较可知, $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 循环水处理系统对改善水质效果最好, $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 次之, $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 最差。

关键词:循环水系统;高位池;水质控制;对虾养殖

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)12-2579-07

Effects of a Water Recycling Treatment System on Water Quality Control in Upper Tidal Shrimp Ponds

LI Qi^{1,2,3}, LI Chun-hou^{1,2*}, XIE Xiao-yong^{1,2}, HU Wei-an^{1,3}, WEI Xiao-lan^{1,4}

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Utilization, Ministry of Agriculture, P.R.China, Guangzhou 510300; 3. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. College of Life Science and Technology, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: A water recycling treatment system composed with a protein skimmer and a biological filter was designed and used to treat the upper tidal shrimp pond water during culture process. The effects of recycling water treatment system on nitrogen and phosphorus removal was investigated in the present experiment. Three flow rate treatments were set: $20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (T1), $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (T2) and $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (T3). The results showed that the concentration of total ammonia nitrogen (NH_4^+) and nitrite nitrogen (NO_2^-) were significantly decreased in all the treatments. The total ammonia nitrogen (NH_4^+) removal rates in T1, T2 and T3 were 46%, 56% and 57%, respectively. The nitrite nitrogen (NO_2^-) removal rates in T1, T2 and T3 were 38%, 34%, 54%, respectively. However, the nitrate (NO_3^-) removal in all treatment was not significant. Treatment T3 reduce the phosphorus (PO_4^{3-}) concentration by 36%, but treatments T1 and T3 showed no significant effects. The reduction efficiency of chemical oxygen demand (COD) in treatments T2 and T3 was 9% and 15%, respectively. Whereas the pond water COD was not significantly affected by treatment T1. In general, the above results suggested that the water quality of upper tidal shrimp ponds could be improved by the water recycling treatment system, and the effect could be increased by increasing the recycling water flow rates.

Keywords: water recycling treatment system; upper tidal pond; water quality control; shrimp culture

对虾是我国南方地区重要的优势水产养殖品种之一,养殖模式多样,其中高位池养虾模式,因其高产

出、高效益、高回报,成为近年来沿海地区最重要的养殖模式之一^[1-2]。但近年来由于环境污染加重,水资源紧张,导致养殖水域环境恶化^[3],尤其是养殖过程中残饵粪便成为对虾养殖过程中重要内源污染^[4]。与此同时,环境污染导致病害大规模暴发,严重影响对虾养殖产业的发展^[5-6]。归纳起来,高位池养殖生产存在的主要问题包括:(1)设施化程度低,养殖户大多采用简易设施,缺乏技术储备与技术改造;(2)资源利用率

收稿日期:2011-05-03

基金项目:广东省海洋渔业科技推广专项项目(A200901G04);广东省科技计划项目(2011B031200001);农业部2011年农业生态环境保护财政项目

作者简介:李琦(1984—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,主要从事水生生物学的研究。E-mail:liqi8406@163.com

* 通讯作者:李纯厚 E-mail:scslch@vip.163.com

低,无序、无度、无偿地开发和利用水资源,无法可持续发展;(3)养殖水域环境恶化,富营养化程度加剧,养殖二次污染严重,反过来严重影响对虾养殖业;(4)养殖技术研发滞后,技术更新速度缓慢,多年依靠传统养殖方式生产,药物残留严重影响产品品质。因此,如何减少高位池养殖对水资源的需求,减少养殖过程中与外界水体交换,降低感染虾病风险,并减少内源污染,控制水质,维持良好养殖环境,成为高位池对虾养殖发展所面临的焦点问题。

为了探讨解决高位池养殖生产存在的上述问题,从 2008 年开始,中国水产科学研究院南海水产研究所开始尝试高位池循环水养殖装备及养殖技术与示范应用;2009 年在汕尾、惠东等地开展了高位池循环水处理装备生产应用验证与优化,并取得了显著成效。

本实验在高位池对虾养殖中使用不同处理量的循环水系统,就其对养殖水质的调控效果进行研究,为循环水处理系统在高位池对虾养殖中的推广运用提供科学数据和应用指导,为建立循环水养殖模式,提高对虾高位池设施化养殖水平,实现集约、高效、清洁生产提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

高位池循环水处理系统是由蛋白质分离器与生物过滤器等组成,由中国水产科学研究院南海水产研究所与广州创领水产科技有限公司联合研发的专利产品^[7-8]。系统运行时,从池底中央集污口将养殖污水泵入水处理系统,经过蛋白质分离、生物过滤器等处理后的水再进入养殖池循环使用。

养殖凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)放苗苗种平均体长(0.6±0.1)cm,由深圳环球虾苗场提供进口一代苗;饲料为恒兴凡纳滨对虾配合饲料;养殖环境辅助产品,包括光合细菌、芽孢杆菌等由中国水产科学研究院南海水产研究所健康养殖中心提供。

1.2 实验方法

1.2.1 养殖管理

实验于 2010 年 8—12 月在广东省深圳市南海水产研究所深圳试验基地进行。选取 4 口铺地膜水泥护坡高位池,每个池塘面积为 0.06 hm²,水深 1.8~2.2 m,并配备 1 台水车式增氧机,同时底部微孔曝气式管道增氧,增氧功率为 0.98 kW·hm⁻²(4 口池塘共用 1 台 3.7 kW 鼓风机)。根据实验设计安装循环水处理系

统,实验设计见表 1,高位池循环水系统处理流程见图 1。2010 年 8 月 25 日投放凡纳滨对虾虾苗,密度为 150 万尾·hm⁻²,2010 年 11 月 20 日收虾。

根据系统运行的时间将实验分为 4 个阶段,第一阶段(1~40 d),系统不运行;第二阶段(41~60 d),系统每天运行 8 h;第三阶段(61~70 d),系统每天运行 16 h;第四阶段(71~80 d),系统每天运行 24 h。养殖管理:放苗前进行晒池和消毒,养殖用水经沙滤并过滤后消毒,养殖过程中不排水、不换水,只补充蒸发水分以及系统运行损耗的水分以保持水位,养殖全程投喂配合饲料。

表 1 实验池塘安排

Table 1 Arrange of each higher-place ponds				
池塘	面积/hm ²	放苗量/万尾	放苗日期	系统处理量/m ³ ·h ⁻¹
对照池	0.06	10	2010-8-25	0
T1 池	0.06	10	2010-8-25	20
T2 池	0.06	10	2010-8-25	40
T3 池	0.06	10	2010-8-25	60

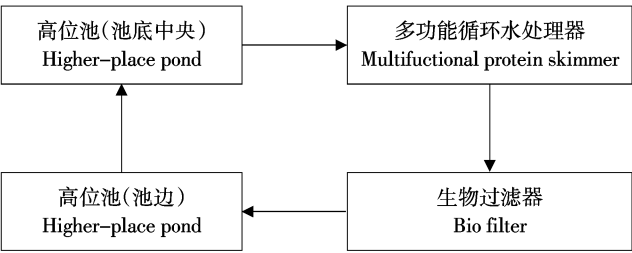


图 1 高位池循环水系统处理流程

Figure 1 The flow of higher-place pond recycling water treatment system

1.2.2 样品的采集和处理

实验第一阶段(1~40 d),每 4 d 采集 1 次水样;其余阶段,每天采集 1 次水样。上午 9:00 用柱状采水器在池塘四角及中央各定量采集水样 2 L,混合待用。取混合水样 1 L,用于检测相关水质指标。现场采用赛多利斯 PT-10 型 pH 计测定 pH 值,YSI550A 型便携式溶氧仪测定溶氧(DO)和水温,Jenco3000 型便携式盐度计测量盐度(S)。

1.2.3 水质指标的测定

检测指标:亚硝酸氮(NO₂⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸氮(NO₃⁻-N)、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)、化学耗氧量(COD)。

检测方法:NO₂⁻-N 采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定;NH₄⁺-N 采用次溴酸盐氧化法;NO₃⁻-N 采用铈还原法;PO₄³⁻-P 采用磷钼蓝分光光度法;COD 采用

碱式高锰酸钾法测定。测定方法参考 GB 17378.4—2007《海洋监测规范》^[9]。

1.2.4 数据分析

采用 SPSS17.0 软件对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA)。若有显著差异,再做 LSD 多重比较。 $P<0.05$ 表示有显著差异, $P<0.01$ 表示有极显著差异。

2 结果

2.1 池塘水体主要理化因子

养殖过程中池塘水体主要理化因子见表 2。对照池、T1 池、T2 池、T3 池养殖过程中平均 pH 值分别为 (7.90 ± 0.04) 、 (7.90 ± 0.09) 、 (8.08 ± 0.09) 、 (8.14 ± 0.16) ; 平均溶氧为 $(3.88\pm0.27)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(3.91\pm0.23)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(4.06\pm0.36)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(3.89\pm0.22)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 平均盐度为 $(1.12\pm0.098)\%$ 、 $(1.14\pm0.056)\%$ 、 $(1.16\pm0.064)\%$ 、 $(1.15\pm0.088)\%$; 平均温度为 $(26.7\pm2.95)^\circ\text{C}$ 、 $(26.5\pm2.85)^\circ\text{C}$ 、 $(26.4\pm2.77)^\circ\text{C}$ 、 $(26.6\pm2.68)^\circ\text{C}$ 。各项指标均处于对虾生长正常范围内。

表 2 池塘水体主要理化因子(Mean±SD)
Table 2 Physicochemical factors of higher-place ponds(Mean±SD)

理化因子	对照池	T1 池	T2 池	T3 池
pH	7.90±0.04	7.90±0.09	8.08±0.09	8.14±0.16
溶氧/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.88±0.27	3.91±0.23	4.06±0.36	3.89±0.22
盐度/%	1.12±0.098	1.14±0.056	1.16±0.064	1.15±0.088
水温/ $^\circ\text{C}$	26.7±2.95	26.5±2.85	26.4±2.77	26.6±2.68

2.2 养殖系统对水体中 NO_2^--N 含量的影响

如图 2 所示,不同处理量的循环水处理系统对

NO_2^--N 有消除效果,但不同处理组之间效果差异显著($P<0.05$)。系统运行的时间不同,其效果也不同。 $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的循环水系统在实验中始终可以很好地控制 NO_2^--N , NO_2^--N 含量维持在 $0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。第一阶段,投饵量少,粪便少,浮游植物生长旺盛, NO_2^--N 含量极低,含量基本持平;第二阶段中,T1 池 NO_2^--N 无明显消除效果,T2、T3 池 NO_2^--N 有显著消除效果,组间差异极显著($P<0.01$);第三阶段,3 套系统对 NO_2^--N 均有显著的消除效果,相对于对照组差异极显著($P<0.01$),T3 的效果优于 T1、T2,差异极显著($P<0.01$),T1、T2 组间无显著差异($P>0.05$);第四阶段,只有 T3 对 NO_2^--N 的消除效果显著($P<0.01$),T1、T2 的 NO_2^--N 含量虽然低于对照组,但差异不显著($P>0.05$)。

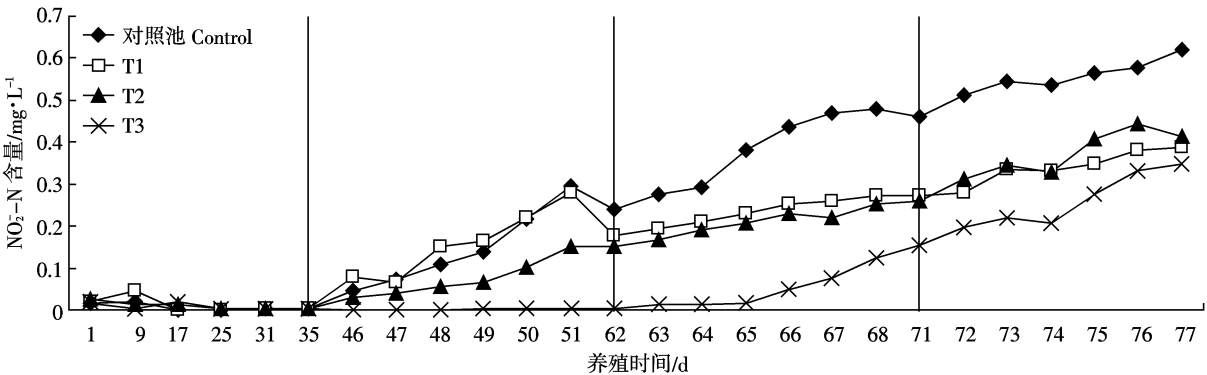
表 3 各阶段水体中亚硝酸氮平均含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Mean±SD)
Table 3 The NO_2^--N of each pond during different phases(Mean±SD)

池塘	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
对照池	0.008±0.00a	0.181±0.04a	0.368±0.10a	0.539±0.02a
T1 池	0.018±0.00a	0.177±0.05a	0.228±0.04c	0.334±0.02a
T2 池	0.014±0.00a	0.093±0.02c	0.203±0.01c	0.359±0.03a
T3 池	0.012±0.00a	0.003±0.00e	0.043±0.03e	0.248±0.03c

注:同列上标相同字母表示差异不显著($P>0.05$),相邻字母表示差异显著($P<0.05$),相间字母表示差异极显著($P<0.01$)。以下同。

2.3 养殖系统对水体中 NH_4^+-N 含量的影响

如图 3 所示,养殖初期 NH_4^+-N 含量较低,养殖后期随着投饵量增加, NH_4^+-N 含量逐渐升高,并维持在一个相对稳定水平,但处理组始终低于对照组。第一阶段,各组 NH_4^+-N 含量极低,维持在同一水平,组间



第一阶段 1~40 d;第二阶段 41~60 d;第三阶段 61~70 d;第四阶段 71 d 至收虾。以下同

图 2 养殖实验期间各池塘亚硝酸氮含量的变化

Figure 2 The changes of NO_2^--N in higher-place ponds during shrimp culture

无显著差异($P>0.05$);第二阶段,处理组 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量低于对照池,但无显著差异($P>0.05$);第三、四阶段,处理组 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量低于对照组,差异极显著($P<0.01$),T2、T3 池 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量低于 T1 池,与 T1 池差异极显著($P<0.01$),T2、T3 池之间无显著差异($P>0.05$)。在实验的第三、四阶段,循环水系统具有较好的消除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 效果,使其维持在一个合理的水平。说明 $40\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $60\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理系统在控制 $\text{NH}_4\text{-N}$ 方面均具有较好的效果。

表 4 各阶段水体中氨氮平均含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mean $\pm$ SD)

Table 4 The $\text{NH}_4\text{-N}$ of each pond during different phases($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mean $\pm$ SD)

池塘	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
对照池	0.049 $\pm$ 0.01a	0.526 $\pm$ 0.07a	1.341 $\pm$ 0.09a	1.282 $\pm$ 0.04a
T1 池	0.036 $\pm$ 0.01a	0.464 $\pm$ 0.08a	0.990 $\pm$ 0.11b	0.693 $\pm$ 0.02b
T2 池	0.058 $\pm$ 0.09a	0.346 $\pm$ 0.05a	0.597 $\pm$ 0.07d	0.558 $\pm$ 0.02c
T3 池	0.021 $\pm$ 0.02a	0.295 $\pm$ 0.06a	0.452 $\pm$ 0.04d	0.546 $\pm$ 0.06c

2.4 养殖系统对水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量的影响

除了第四阶段 T3 池 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量显著低于其余

池($P<0.05$)外,其余阶段处理组 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量与对照组无显著差异($P>0.05$)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量初期较低,随着养殖时间的推移逐渐升高,在第三阶段达到顶峰并维持在较高水平。实验结果表明,不同处理量的循环水系统对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 均无显著的消除效果。

表 5 各阶段水体中硝酸氮平均含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mean $\pm$ SD)

Table 5 The $\text{NO}_3\text{-N}$ of each pond during different phases($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Mean $\pm$ SD)

池塘	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
对照池	0.573 $\pm$ 0.02a	1.312 $\pm$ 0.03a	1.624 $\pm$ 0.01a	1.683 $\pm$ 0.02a
T1 池	0.540 $\pm$ 0.01a	1.342 $\pm$ 0.04a	1.557 $\pm$ 0.04a	1.654 $\pm$ 0.04a
T2 池	0.531 $\pm$ 0.01a	1.323 $\pm$ 0.04a	1.554 $\pm$ 0.03a	1.637 $\pm$ 0.04a
T3 池	0.573 $\pm$ 0.03a	1.292 $\pm$ 0.02a	1.572 $\pm$ 0.05a	1.548 $\pm$ 0.03b

2.5 养殖系统对水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量的影响

如图 4 所示, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的含量随着养殖时间的推移而升高,在养殖 40 d 左右时有个突然升高的过程,并一直维持在一个较高的水平。T1、T2 池与对照组含量无显著差异($P>0.05$),T3 池的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量低于其余

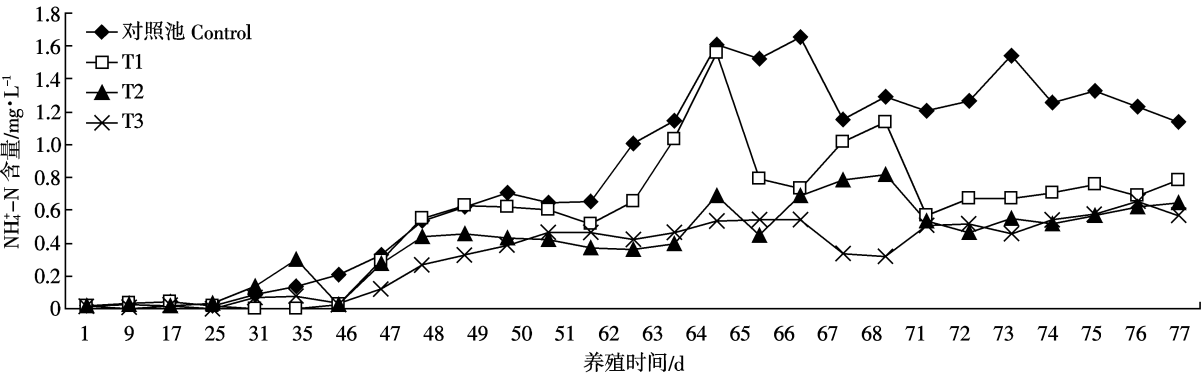


图 3 各池塘氨氮含量的变化

Figure 3 The change of $\text{NH}_4\text{-N}$ in higher-place ponds during shrimp culture

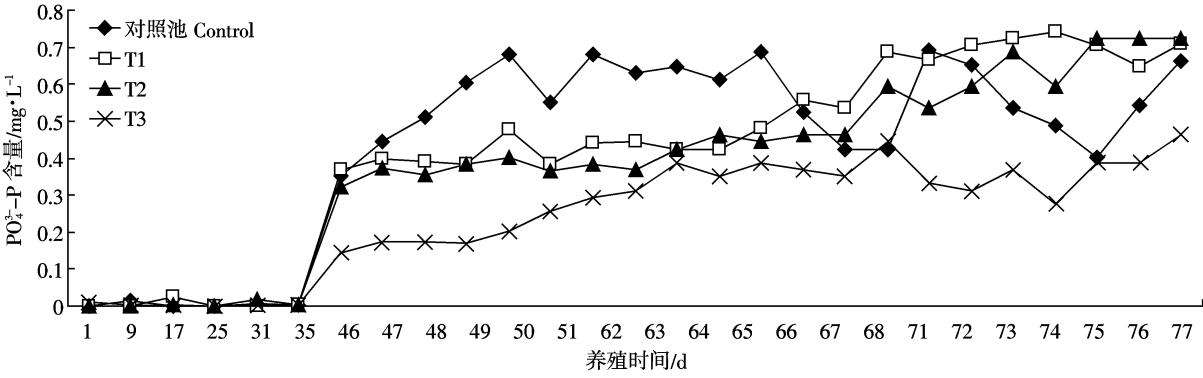


图 4 各池塘活性磷酸盐含量的变化

Figure 4 The change of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in higher-place ponds during shrimp culture

表 6 各阶段水体中活性磷酸盐含量(mg·L⁻¹ Mean±SD)
Table 6 The PO₄³⁻-P of each pond during different phases(mg·L⁻¹ Mean±SD)

池塘	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
对照池	0.006±0.00a	0.546±0.02a	0.565±0.04a	0.568±0.04a
T1 池	0.004±0.00a	0.406±0.02a	0.508±0.04a	0.700±0.01a
T2 池	0.006±0.00a	0.370±0.01a	0.460±0.03a	0.654±0.03a
T3 池	0.003±0.00a	0.202±0.02c	0.372±0.02c	0.361±0.03c

池,差异极显著($P<0.01$)。结果表明,60 m³·h⁻¹ 的循环水系统对水体中 PO₄³⁻-P 有较好的消除效果,20、40 m³·h⁻¹ 的循环水系统对 PO₄³⁻-P 没有消除效果。

2.6 养殖系统对水体中 COD 含量的影响

如图 5 所示,COD 随养殖时间的推移而呈上升趋势。COD 在 40 d 左右时上升至较高值,但从结果来看,处理组低于对照组,组间差异显著($P<0.05$)。实验第一阶段,各组 COD 含量无显著差异($P>0.05$);第二、三阶段,处理组 COD 含量显著低于对照组($P<0.05$),处理组组间无显著差异($P>0.05$);第四阶段,T1 组与对照组 COD 含量无显著差异($P>0.05$);T2、T3 组含量低于对照组,差异显著($P<0.05$),T2、T3 组间无显著差异($P>0.05$)。结果表明,各循环水处理系统对 COD 均有一定的消除效果,其中 60 m³·h⁻¹ 的处理系统效果最好。

表 7 各阶段水中 COD 含量(mg·L⁻¹ Mean±SD)
Table 7 The COD of each pond during different phases(mg·L⁻¹ Mean±SD)

池塘	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段
对照池	9.3±1.88a	24.8±0.53a	30.2±0.37a	32.5±0.41a
T1 池	9.5±1.75a	24.3±0.50a	22.9±0.55b	31.4±0.72a
T2 池	8.3±1.33a	21.1±0.50b	24.7±0.40b	29.5±0.48b
T3 池	8.2±1.22a	20.2±0.65b	23.1±0.55b	27.5±0.23b

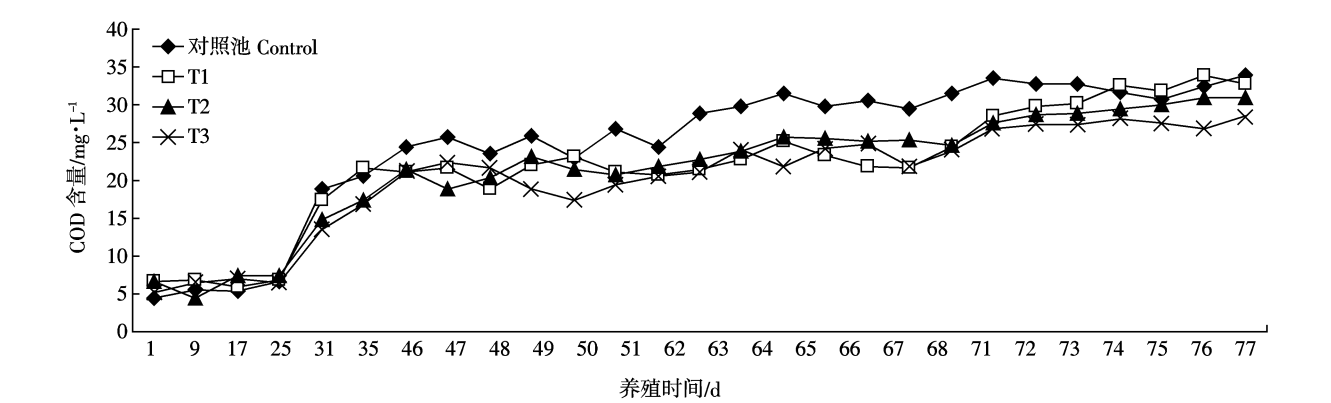


图 5 各池塘 COD 含量变化
Figure 5 The change of COD in higher-place ponds during shrimp culture

3 讨论
3.1 循环水养殖系统对养殖水体中氮化合物含量的影响

实验过程中 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 呈整体上升趋势。处理组的 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 含量低于对照池,且差异极显著($P<0.01$);处理组与对照组 NO₃⁻-N 含量无显著差异($P>0.05$)。说明循环水处理系统对 NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 有消除效果,而对 NO₃⁻-N 没有消除效果,这与孙国铭等^[10]和郑瑞东等^[11]的研究结论一致。高位池对虾养殖以人工投饵为主,养殖密度高、投饵量大,养殖过程中易积累大量的残饵、粪便以及生物残体等污物。这些污物长期处于水体底层,在厌氧的环境中分解产生氨氮、亚硝酸氮、硫化氢、有机酸等对养殖动物有毒的中间产物,成为养殖水体中污染物的重要内源^[12-13]。水车式增氧机运行产生的旋流作用,将残饵、粪便、生物残体等污染物集中在池底中央排污口处。池底集中的污水被抽入多功能循环水处理器,该处理器的集污锥结构,将残饵、粪便、生物残体等收集并通过排污阀排出。多功能处理器通过泡沫分离功能将可溶性有机物分离排出,减少其分解产生亚硝氮、氨氮,形成二次污染的机会^[14-15]。多功能水处理系统的 PDA 势能增氧功能,使水体进入生物过滤器时处于高溶氧状态,有利于细菌对氨氮的降解^[16]。生物过滤器可以将老化的藻类、一些浮游植物吸附并沉降到底部,并通过排污阀排出,以保证运行的顺畅。通过循环水系统的养殖水从含氧量低、水质较差的排污口进入氧含量高、水质好的表层水体。亚硝氮、氨氮在细菌的作用下转化为无毒的硝态氮或者直接被浮游植物吸收利用^[17]。循环水系统对高位池对虾养殖水体中的氨氮、亚硝氮有较好的消除作用,但其效果与系统处理能力有显著的正相关关系,处理量 60 m³·h⁻¹ 循环水

处理系统效果最佳。

3.2 循环水养殖系统对养殖水体中 COD 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量的影响

实验中 COD 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量较高,中后期呈现上升趋势。在高密度、高投饵的高位池对虾养殖水体中,作为主要营养元素的无机磷含量普遍较高,残饵、粪便以及在水中溶解的饲料分解所产生的磷超过浮游植物对磷元素的吸收。邱德全等^[18]研究表明,在高密度对虾养殖中活性磷含量都比较高,胡菊香等^[19]测定的养殖水中 COD 也较高。本实验中,20、40 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 循环水系统对磷的去除效果不佳,可能是因为处理量不够,60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的循环水系统有一定的去除磷的效果,相对去除率达到 36%。养殖中后期,水体中 COD 含量有一定程度的升高,但处理组 COD 比对照组低,显示对 COD 具有一定的消除效果。从结果来看,20 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理量对降低 COD 效果最差,40、60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理量对 COD 有一定的降解作用,在养殖末期对 COD 的相对消除率分别为 9%、15%。在长期不换水的情况下,水体中残饵、粪便随着养殖时间不断积累,在养殖中后期,COD、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 会有不同程度的升高。

3.3 循环水养殖系统处理量选择以及处理模式的系统优化

40 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 与 60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的循环水处理系统对亚硝氮、氨氮有较好的消除作用,60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的系统对 COD 与活性磷酸盐也有一定的消除作用,20 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的循环水处理系统对水质调控效果一般。但从对虾养殖的角度分析,养殖水体中需要维持一定有机物与营养盐的水平,以促进浮游植物的生长以及浮游动物的繁殖,为水体提供充足的溶氧以及为对虾提供基础饵料^[20]。实验中,T3 池的营养盐一直处于很低的水平,并且 60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 处理系统的系统耗电量高于 40 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 处理系统。因此,从高位池对虾养殖对水质的要求以及减少能耗来看,在 667 m^2 的高位池池塘中,循环水系统使用 40 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理量已经足够。

传统的高位池养殖模式在水质恶化的情况下,一般采取大换水的方式,会引起对虾的应激反应,非但不能调节水质,反而可能造成对虾的大规模死亡,而且含有大量残饵、粪便、动物残体的底层污水直接排入附近海域,也对环境造成严重污染。相对于传统养殖的大排大换来处理水质,循环水系统每天排除定量的污水,污水高度的浓缩,主要成分为残饵、粪便、富含可溶性有机物的胶状泡沫物质以及一定数量老化的藻类、动物残体,利于将循环水系统排出的废水进

行回收利用,比如藻类资源化利用或者将有机物制成复合肥料^[21-22]。

在生产运用中,考虑到经济效益,需要对系统的开启进行规划。养殖初期,对虾个体小、耗氧量低、投饵量少、残饵粪便少,水中的营养盐、有机物可以促进浮游植物的生长,起到“肥水”的作用,因此初期没有必要开启系统。养殖中后期,对虾个体大、耗氧量高、残饵、粪便多,池塘生态系统已无法自净,需要开启系统改善水质。系统开启的时间也需要根据养殖的具体情况安排。养殖过程中系统的开启时间不光需要参考对虾的生长状况、摄食状况、褪壳情况,也需要参考天气因素,如阴天、刮风、大雨等对养殖不利的天气因素。在对虾个体小时,系统少开或者不开,对虾个体长大时,视情况多开;晴天天气好时,系统少开或者不开,天气恶劣时,系统可以多开。至于系统开启时间的量化控制,还需进一步研究。

4 结论

循环水系统对对虾高位池水质具有较好的调控作用,实验过程中,20、40、60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理组均可以有效地调节水质。处理组对 NH_4^+ 的消除效果最佳,20、40、60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理组的消除率分别为 46%、56%、57%,对 NO_2^- 也有一定的处理效果,20、40、60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理组的消除率分别为 38%、34%、54%,40、60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理组对 COD 的相对消除率为 9%、15%,60 $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 的处理组对 PO_4^{3-} 的相对消除率为 36%,而 3 套循环水处理系统对 NO_3^- 无显著消除效果。结果表明,循环水处理系统对高位池对虾养殖水质有较好的处理效果,实验过程中各项水质指标均维持在安全浓度以内。

参考文献:

- [1] 符泽雄. 南美白对虾高密度高产养殖研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002:210-214.
FU Ze-xiong. Research on shrimp culture in high density and high yield [M]. Beijing: Ocean Press, 2002:210-214.
- [2] Paul M Sandifer, Stephen Hopkins J. Conceptual design of a sustainable pond-based shrimp culture system[J]. *Aquacultural Engineering*, 1996, 15:41-52.
- [3] 李纯厚, 黄洪辉, 林 钦, 等. 海水对虾池塘养殖污染物环境负荷量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3):545-550.
LI Chun-hou, HUANG Hong-hui, LIN Qin, et al. Environmental carrying capacity of the pollutants from the prawn seawater culture Ponds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3):545-550.
- [4] Martin M, Yves Veran. Shrimp rearing: Stocking density, growth, impact

- on sediment, waste output and their relationships studied through the nitrogen budget in rearing ponds[J]. *Aquaculture*, 1998, 164: 135-149.
- [5] James A Brock, Robert Bullis. Disease prevention and control for gametes and embryos of fish and marine shrimp[J]. *Aquaculture*, 2001, 197: 137-159.
- [6] 孙成波, 李 婷, 王 平, 等. 高位池养殖对虾携带白斑综合症病毒变化[J]. 海洋通报, 2009(8): 117-120.
SUN Cheng-bo, LI Ting, WANG Ping, et al. Study on the change of WSSV taken in Penaeid shrimp cultured in Ponds above Sea Level[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009(8): 117-120.
- [7] 李纯厚, 姜汉平, 颜晓勇. 一种多功能循环水处理设备, 200910192778. 6[P]. 2009. 9. 30.
LI Chun-hou, JIANG Han-ping, XIE Xiao-yong. A multipurpose circulating water treatment equipment, 200910192778. 6[P]. 2009. 9. 30.
- [8] 李纯厚, 姜汉平, 颜晓勇. 一种养殖水过滤方法及其装置, 200910042214. 4[P]. 2009. 8. 31.
LI Chun-hou, JIANG Han-ping, XIE Xiao-yong. A method and its devices of aquaculture water filtration. 200910042214. 4[P]. 2009. 8. 31.
- [9] 国家质量技术监督局. 海水分析//海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 142-143, 150-162.
State Bureau of Quality and Technology Supervision. Seawater analyses//The specification for marine monitoring[S]. Beijing: China Standard Press, 2007: 142-143, 150-162.
- [10] 孙国铭, 万夕和, 许 璞, 等. 海水循环式养殖系统 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 转化及其水质管理[J]. 水产养殖, 1999(4): 11-14.
SUN Guo-ming, WAN Xi-he, XU Pu, et al. On Transformation between $\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_2\text{-N}$ and water quality control in aquaculture system with circulating seawater[J]. *Journal of Aquaculture*, 1999(4): 11-14.
- [11] 郑瑞东, 刘 鹰. 泡沫分离法的研究进展[J]. 现代渔业信息, 2005(9): 3-6.
ZHENG Rui-dong, LIU Ying. Progress on research of foam fractionation[J]. *Modern Fisheries Information*, 2005(9): 3-6.
- [12] 沈南南, 李纯厚, 贾晓平, 等. 3 种微生物制剂调控工厂化对虾养殖水质的研究[J]. 南方水产, 2007, 3(3): 20-26.
SHEN Nan-nan, LI Chun-hou, JIA Xiao-ping, et al. Application of three microbiological preparations to control of water quality in industrialized shrimp culture[J]. *South China Fisheries Science*, 2007, 3(3): 20-26.
- [13] 臧维玲, 杨 明, 戴习林, 等. 凡纳滨对虾室内封闭式养殖水质变化与氮收支的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 1019-1024.
ZANG Wei-ling, YANG Ming, DAI Xi-lin, et al. Experimental research on change of water quality and nitrogen budgets for indoor closed culture ponds of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5): 1019-1024.
- [14] 宋德敬, 尚 静, 姜 辉, 等. 蛋白质分离器中的不同臭氧浓度对工厂化养殖净水效果的试验[J]. 水产学报, 2005, 29(5): 719-723.
SONG De-jing, SHANG Jing, JIANG Hui, et al. Experiment on water treatment of protein skimmer with different ozone concentrations in industrial fish farming system[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(5): 719-723.
- [15] 宋协法, 李 勋. 工业化鱼类养殖污水处理技术研究 [J]. 中国水产科学, 2001(11): 96-100.
SONG Xie-fa, Li xun. Technical study on industrialization of fish breeding[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2001(11): 96-100.
- [16] 张 锡, 吴 垠, 马妮娜, 等. 高溶氧对闭合养殖系统中生物滤器功能的影响[J]. 大连水产学院学报, 2008(4): 309-314.
ZHANG Xi, WU Yin, MA Ni-na, et al. The effect of hyperoxic condition on a biofilter in a closed recirculating aquaculture system[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008(4): 309-314.
- [17] 杨东方, 李 宏, 张越美, 等. 浅析浮游植物生长的营养盐限制及其判断方法[J]. 海洋科学, 2000, 24: 47-50.
YANG Dong-fang, LI Hong, ZHANG Yue-mei, et al. The factor and way of limiting nutrient for the growth of phytoplankton[J]. *Marine Sciences*, 2000, 24: 47-50.
- [18] 邱德全, 杨世平. 高密度对虾养殖中后期水质问题和调控[J]. 中国水产, 2004(5): 84-85.
QIU De-quan, YANG Shi-ping. Mid-late-quality problems and regulation in high density shrimp farming[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2004(5): 84-85.
- [19] 胡菊香, 吴生桂, 邹 清, 等. 生物水净化剂对养殖池塘水质调控作用探讨[J]. 水利渔业, 2003, 23(6): 40-41.
HU Ju-xiang, WU Sheng-gui, ZOU Qing, et al. Discussion on water clarifier for controlling water quality of aquaculture ponds[J]. *Reservoir Fisheries*, 2003, 23(6): 40-41.
- [20] 钱彩源, 吴贞荣, 陈太丰. 对虾池塘科学肥水四要素[J]. 科学养鱼, 2006(6): 89.
QIAN Cai-yuan, WU Zhen-rong, CHEN Tai-feng. Four elements of scientific fertilizer in shrimp ponds[J]. *Scientific Fish Farming*, 2006(6): 89.
- [21] 韩士群, 严少华, 范成新. 水产养殖废水循环利用及多余藻类生物量资源化[J]. 自然资源学报, 2008, 23(4): 560-567.
HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, FAN Cheng-xin. Recycling of aquaculture wastewater and reusing the resources of redundant algae biomass[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(4): 560-567.
- [22] 胡杏芳, 方琼楼, 余 婕, 等. 利用微生物絮凝剂处理养殖废水的方法所得的复合肥料[J]. 工业水处理, 2010(6): 83.
HU Xing-fang, FANG Qiong-lou, YU Jie, et al. A compound fertilizer getting from aquaculture wastewater which disposed with microbial flocculants[J]. *Industrial Water Treatment*, 2010(6): 83.