

文章编号: 1674-7054(2018)03-0287-08

潮汐式水流方式对循环水养殖系统氮磷的净化

陆伟强, 顾志峰

(海南大学 海洋学院/南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口, 570228)

摘要: 为探究潮汐式水流方式在循环水养殖系统对水质净化的效果, 采用水质国标检测方法对比分析了潮汐式与溢流式循环水养殖系统生物过滤模式对水体中氮磷元素的净化效果。结果表明: 潮汐组氨氮浓度从 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下只需 12 d, 溢流组需要 15 d; 潮汐组与溢流组对磷酸态磷处理速度相差不大; 潮汐组实验过程中亚硝酸盐氮最高浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溢流组最高浓度为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此, 潮汐式循环水养殖系统对氨氮、亚硝酸盐氮处理效果比溢流式更优。

关键词: 潮汐式; 循环水养殖系统; 氨氮; 磷酸态磷; 亚硝酸盐氮

中图分类号: X 703

文献标志码: A

DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2018.03.004

随着高密度、高投饵率及高换水率水产养殖方式的广泛应用, 大量饵料和粪便等物质积累, 使得大量氮(氨氮 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、亚硝酸盐氮 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 和磷(磷酸态磷 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 等元素随着养殖废水排放到自然水域中, 对环境造成了严重的污染^[1-4]。循环水养殖系统被认为是解决这一问题的有效方法。循环水养殖系统(Recirculating Aquaculture Systems, 简称 RAS) 在中国沿海各个养殖地区受到广泛的关注和应用^[5]。与传统养殖相比, 循环水养殖具环境污染小、养殖物种生长快速、养殖密度大以及人为管理方便等优点^[6], 其可通过沉淀、过滤、生物净化、增氧、杀菌消毒等一系列物理、化学和生物手段, 高效处理并去除养殖水体中的饵料残渣及代谢产物, 使得水体可以循环使用。其中, 生物净化常用的方法是生物膜法, 即使硝化菌群附着在一定载体上, 形成生物膜, 再对水体进行处理。李秋芬等^[7]和罗国芝等^[8]提出在整个循环水处理系统中, 生物过滤起着核心作用, 其中, 自养硝化细菌是主要硝化微生物。但迄今为止, 很多循环水养殖系统均是过滤介质浸泡在水中进行处理的, 使用潮汐方式的研究较少^[9-12]。溢流式是指水位达到最高后, 水体从溢流口漫出过滤箱回到鱼池, 过滤载体浸泡在水中进行过滤。潮汐式水流方式是指水位高度达到最高后, 水位会自动下降, 降到最低后, 水位又会自动上升, 使得水位持续性上下波动。潮汐式的特性使得过滤介质不是一直浸泡水中, 可以增加硝化微生物接触空气的时间, 增加硝化作用。笔者通过建立实验室规模的潮汐式循环水养殖系统, 比较研究潮汐式与溢流式系统生物过滤环节对水体中氮磷元素的处理效果, 旨在探究潮汐式循环水养殖系统在水质处理方面的优越性。

1 材料与方法

1.1 实验地点及时间 本实验在海南省万宁市乌场村万宁市和乐蟹保育中心基地实验室进行, 实验时间为 2017-04-01—2017-04-21, 共 21 d。

1.2 实验装置 实验装置采用挂膜成熟的循环水养殖系统, 即系统经历 30 d 的挂膜生长, 达到生物膜成熟^[13]。鱼池置于地面上, 过滤箱位于鱼池上方, 置于距地面 1.5 m 的钢架上。

水体从鱼池经水泵抽取至上层过滤箱, 再以不同水流方式(潮汐式和溢流式)经过过滤箱, 最后回到鱼

收稿日期: 2017-12-09

修回日期: 2018-04-30

基金项目: 国际科技合作专项(2012DFG32200, 2013DFA31780); 国家自然科学基金项目(41366003)

作者简介: 陆伟强(1992-), 男, 海南大学海洋学院 2015 级硕士研究生. E-mail: 597897713@qq.com

通信作者: 顾志峰(1975-), 男, 教授. 研究方向: 贝类养殖和生态养殖. E-mail: hnugu@163.com

池,形成循环。鱼池内水体有效体积为 635 L,过滤箱内珊瑚石每块大小不超过 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$,占据过滤箱体积约为 0.154 m^3 ,过滤箱进水流速为 $450\text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.3 实验处理 实验设空白对照组 CK、潮汐组和溢流组(图 1),每个实验组设 3 个平行。空白对照组(图 1-A)过滤箱中不填入珊瑚石,鱼池水被水泵抽入过滤箱后,水流以溢流方式直接漫出溢流管回到鱼池,形成循环;潮汐组(图 1-B)过滤箱中填入 0.154 m^3 珊瑚石,鱼池水被水泵抽入过滤箱后,水流以潮汐方式经过珊瑚石,从潮汐管(在溢流管外面再套 1 个上端封口的大口径 PVC 管,形成虹吸)虹吸回到鱼池,形成循环;溢流组(图 1-C)过滤箱中填入 0.154 m^3 珊瑚石,鱼池水被水泵抽入过滤箱后,水流以溢流方式经过珊瑚石,漫出溢流管回到鱼池,形成循环。每个装置运行过程中,通过气泵气石为鱼池水体提供充足氧气。

实验开始阶段,循环关闭,每个实验组鱼池中加入 635 L 淡水,再加入 3 g 氯化铵和 3 g 磷酸二氢钾,系统运行 1 h 充分混匀后,每个试验池取水样 300 mL 进行检测,记为初始值,并打开循环水泵开始循环实验。每 12 h 取 1 次样进行检测,检测内容包括 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$,即水体取样时间为每天的 9:00 和 21:00,同时测量水体温度、pH、溶解氧。

1.4 水质检测方法 使用 pH 计(上海雷磁 PHS-3C 型)测量 pH,使用多参数水质监测仪(YSI 6600V2 型)测量温度和溶解氧,氨氮(次溴酸钠氧化法)、亚硝酸盐氮(萘乙二胺分光光度法)以及磷酸态磷(磷钼蓝分光光度法)均参照 GB17378.4-2007 海洋监测规范第 4 部分海水分析进行检测。

1.5 数据处理 测量数据使用 DPS16.05 高级版软件进行数据分析,进行多元线性逐步回归分析。实验分析 3 个实验组[对照组 CK(A1)、潮汐组(A2)、溢流组(A3)]中 4 个测量指标[天数(x_1)、温度 T (x_2)、pH(x_3)、溶氧 DO (x_4)]对 3 个指标[氨氮(y_1)、磷酸态磷(y_2)、亚硝酸盐氮(y_3)]浓度的影响,同时作通径分析。

2 结果与分析

2.1 温度、酸碱度以及溶解氧浓度的变化 从图 2 可知,实验过程中水体温度在 $26 \sim 28\text{ }^\circ\text{C}$,少数几天温度低于 $26\text{ }^\circ\text{C}$;pH 初始值均为 7.4,实验期间对照组稳定在 $7.5 \sim 7.7$,潮汐组和溢流组 $7.8 \sim 8.0$ (珊瑚石呈碱性);溶解氧浓度为 $7.0 \sim 7.8\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

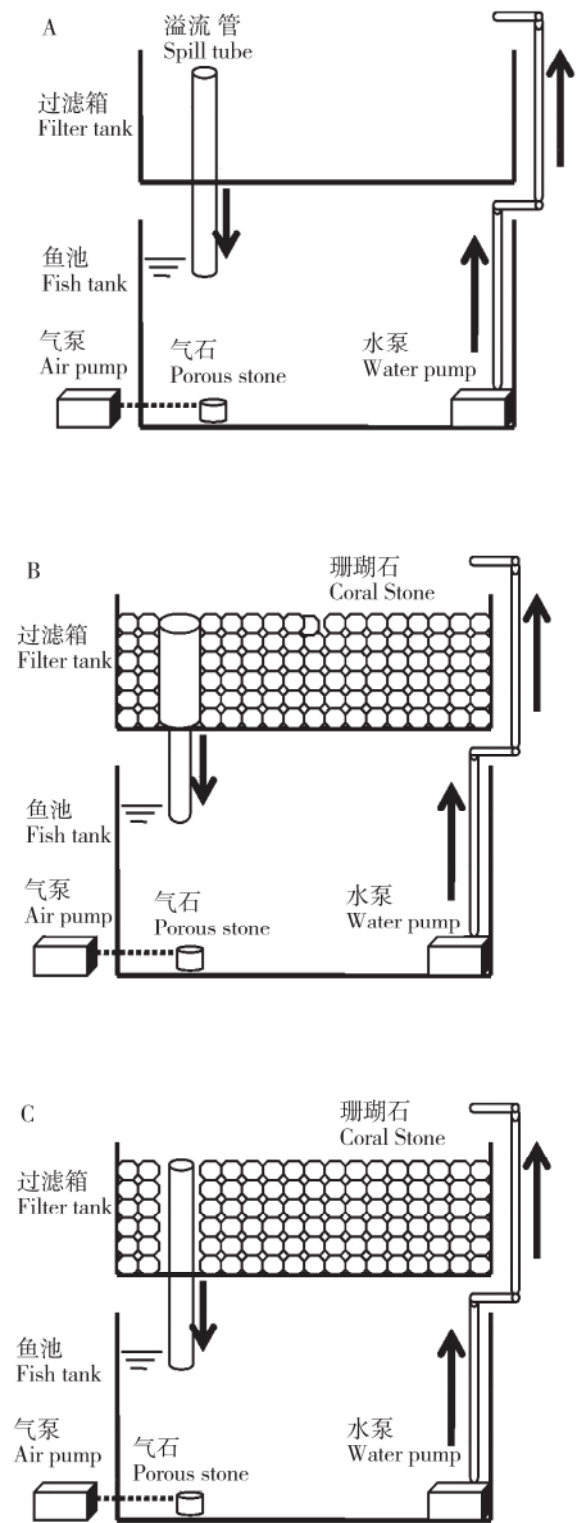


图 1 鱼菜共生系统装置

A. 无珊瑚石溢流式装置; B. 潮汐式装置; C. 溢流式装置

Fig. 1 Aquaponics integrating fish and vegetables

A. Experimental setup without coral stone; B. Tide

experimental setup; C. Spill experimental setup

2.2 氨氮处理效果多元回归分析

2.2.1 天数、温度、pH 和 DO 对对照组氨氮的多元回归分析

对照组(A_1)中天数(x_1)、 $T(x_2)$ 、 $pH(x_3)$ 、 $DO(x_4)$ 与氨氮(y_1)的分析结果显示(表1):天数与氨氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.9020 $P<0.01$)、 T 与氨氮为极显著的正相关(相关系数为 0.5476 $P<0.01$)、 pH 和 DO 与氨氮相关性不显著;天数与对照组氨氮的相关系数最大,即天数对对照组氨氮含量的影响最明显,为负相关,直接系数为 -1.1447 。多元回归方程为 $A_1Y_1 = -379.0161 - 50.2259x_1 + 58.6480x_2$,决定系数 $R^2 = 0.8528$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,对照组的剩余途径系数为 0.3836 。

2.2.2 天数、温度、pH 和 DO 对潮汐组氨氮的多元回归分析

潮汐组(A_2)中天数(x_1)、 $T(x_2)$ 、 $pH(x_3)$ 、 $DO(x_4)$ 与氨氮(y_1)的分析结果表明: T 与氨氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.7842 $P<0.01$)、 pH 与氨氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.5536 $P<0.01$)、天数和 DO 与氨氮相关性不显著; T 与潮汐组氨氮的相关系数最大,即 T 对潮汐组氨氮含量的影响最为明显,且是负相关,直接系数为 -0.6552 。多元回归方程为 $A_2Y_1 = 1.0560.0879 - 149.0897x_2 - 835.3395x_3$,决定系数 $R^2 = 0.8563$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,潮汐组的剩余途径系数为 0.3791 。

2.2.3 天数、温度、pH 和 DO 对溢流组氨氮的多元回归分析

溢流组(A_3)中天数(x_1)、 $T(x_2)$ 、 $pH(x_3)$ 、 $DO(x_4)$ 与氨氮(y_1)的分析结果显示:天数与氨氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.7660 $P<0.01$)、 T 与氨氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.6381 $P<0.01$)、 pH 和 DO 与氨氮相关性不显著;天数与溢流组氨氮的相关系数最大,即天数对溢流组氨氮含量的影响最明显,且是负相关,直接系数为 -0.5941 。多元回归方程为 $A_3Y_1 = 3.267.8933 - 36.3310x_1 - 102.1543x_2$,决定系数 $R^2 = 0.8889$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,溢流组的剩余途径系数为 0.3334 。

2.3 亚硝酸盐氮处理效果多元回归分析

2.3.1 天数、温度、pH 和 DO 对对照组亚硝酸盐氮的多元回归分析 从表2可知:天数与亚硝酸盐氮为极显著的正相关(相关系数为 0.7477 $P<0.01$)、 T 与亚硝酸盐氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.5024 $P<0.01$)、 pH 和 DO 与亚硝酸盐氮相关性不显著;天数与对照组亚硝酸盐氮的相关系数最大,即天数对对照组亚硝酸盐氮含量的影响最明显,且是正相关,直接系数为 1.0449 ,多元回归方程为 $A_1Y_3 = 1.457.1975 + 33.4901x_1 - 64.4100x_2$,决定系数 $R^2 = 0.5780$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,对照组的剩余途径系数为 0.6496 。

2.3.2 天数、 T 、 pH 和 DO 对潮汐组亚硝酸盐氮的多元回归分析 从表2可知:天数与亚硝酸盐氮为显著的负相关(相关系数为 -0.3118 $P<0.05$)、 T 与亚硝酸盐氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.4202 $P<0.01$)、 pH 与亚硝酸盐氮为极显著的正相关(相关系数为 0.4509 $P<0.01$)、 DO 与亚硝酸盐氮相关性不显著; T 与潮汐组亚硝酸盐氮的相关系数最大,即 T 对潮汐组亚硝酸盐氮含量的影响最明显,且是负相

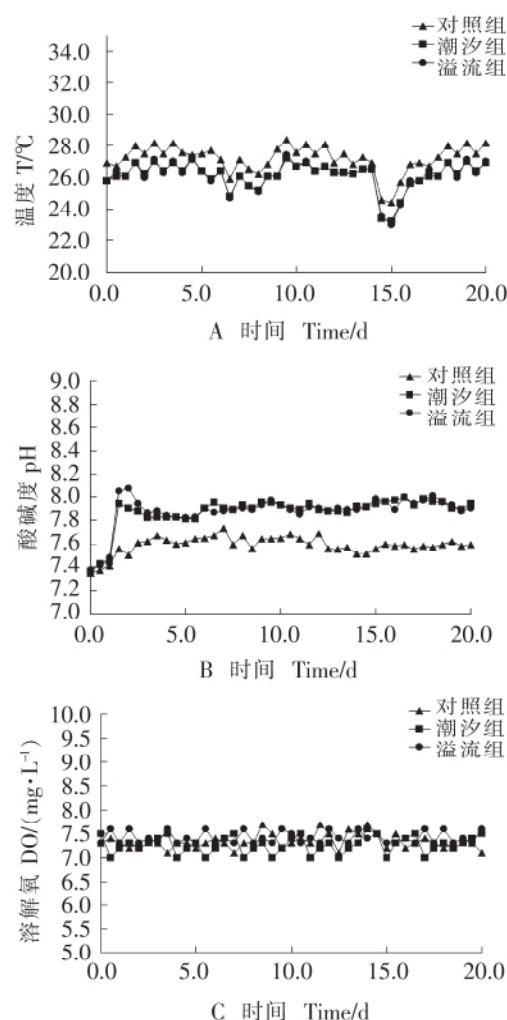


图2 各个实验组温度 T 、 pH 、 DO 随时间的变化
A 各个实验组温度 T 随时间的变化; B 各个实验组酸碱度 pH 随时间的变化; C 各个实验组溶解氧 DO 随时间的变化

Fig. 2 The change of T , pH , DO of each experiment over the time

A. The change of T in each experiment over the time;
B. The change of pH in each experiment over the time;
C. The change of DO in each experiment over the time

关,直接系数为 -0.5878 。多元回归方程为 $A_2Y_3 = -243.9536 - 0.8423x_1 - 5.2882x_2 + 50.0287x_3$,决定系数 $R^2 = 0.4440$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,潮汐组的剩余途径系数为 0.7457 。

2.3.3 天数、温度、pH 和 DO 对溢流组亚硝酸盐氮的多元回归分析 从表 2 可知:天数与亚硝酸盐氮为极显著的负相关(相关系数为 -0.7763 , $P < 0.01$)、T 与亚硝酸盐氮为极显著的正相关(相关系数为 0.7851 , $P < 0.01$)、pH 和 DO 与亚硝酸盐氮相关性不显著;T 与溢流组亚硝酸盐氮的相关系数最大,即 T 对溢流组亚硝酸盐氮含量的影响最明显,且是正相关,直接系数为 1.1344 。多元回归方程为 $A_3Y_3 = 1123.0537 - 12.1612x_1 + 50.6108x_2$,决定系数 $R^2 = 0.6420$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,溢流组的剩余途径系数为 0.5983 。

2.4 磷酸态磷处理效果多元回归分析

2.4.1 天数、温度、pH 和 DO 对对照组磷酸态磷的多元回归分析 从表 3 可知:天数与磷酸态磷为极显著的负相关(相关系数为 -0.9487 , $P < 0.01$)、T、pH 和 DO 与磷酸态磷相关性不显著。多元回归方程为 $A_1Y_2 = 1232.1953 - 13.8125x_1$,决定系数 $R^2 = 0.9001$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,对照组的剩余途径系数为 0.3162 。

2.4.2 天数、T、pH 和 DO 对潮汐组磷酸态磷的多元回归分析 从表 3 可知:天数与磷酸态磷为极显著的负相关(相关系数为 -0.6540 , $P < 0.01$)、T 与磷酸态磷为极显著的负相关(相关系数为 -0.6367 , $P < 0.01$)、pH 与磷酸态磷为极显著的负相关(相关系数为 -0.4582 , $P < 0.01$)、DO 与磷酸态磷相关性不显著;T 与潮汐组磷酸态磷的相关系数最大,即 T 对潮汐组磷酸态磷含量的影响最为明显,且是负相关,直接系数为 -0.4315 。多元回归方程为 $A_2Y_2 = 3689.0504 - 8.9954x_1 - 38.2315x_2 - 206.9789x_3$,决定系数 $R^2 = 0.9058$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,潮汐组的剩余途径系数为 0.3070 。

2.4.3 天数、温度、pH 和 DO 对溢流组磷酸态磷的多元回归分析 溢流组(A_3)中天数(x_1)、T(x_2)、pH(x_3)、DO(x_4)与磷酸态磷(y_2)的分析结果显示(表 3):天数与磷酸态磷为极显著的负相关(相关系数为 -0.7356 , $P < 0.01$)、T 与磷酸态磷为极显著的负相关(相关系数为 -0.7018 , $P < 0.01$)、pH 与磷酸态磷为显著的负相关(相关系数为 -0.3622 , $P < 0.05$)、DO 与磷酸态磷相关性不显著;天数与溢流组磷酸态磷的相关系数最大,即天数对溢流组磷酸态磷含量的影响最为明显,且是负相关,直接系数为 -0.4887 。多元回归方程为 $A_3Y_2 = 3304.6368 - 12.4052x_1 - 46.2733x_2 - 144.9403x_3$,决定系数 $R^2 = 0.9123$ 。途径系数反映自变量对因变量的直接影响,溢流组的剩余途径系数为 0.2961 。

表 1 天数、温度、pH 和 DO 对各组氨氮的逐步回归分析
Tab.1 Stepwise regression analysis of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by days, T, pH and DO

	变量 Variable	系数 Coefficient	回归系数 Regression coefficient	标准回归系数 Standard regression coefficient	偏相关 Partial correlation	t 值	P 值
对照组 CK	常数 Constant	a0	-379.016 1				
	天数(x_1) Days	a1	-50.225 9	-1.144 7	-0.902 0	12.879 3	0
	温度(x_2) T	a2	58.648 0	0.358 6	0.547 6	4.034 2	0
潮汐组 Tide experiment group	常数 Constant	b0	10560.087 9				
	温度(x_2) T	b1	-149.089 7	-0.655 2	-0.784 2	7.789 4	0
	酸碱度(x_3) pH	b2	-835.339 5	-0.344 7	-0.553 6	4.098 3	0.000 2
潮汐组 Spill experiment group	常数 Constant	c0	3267.893 3				
	天数(x_1) Days	c1	-36.331 0	-0.594 1	-0.766 0	7.345 0	0
	温度(x_2) T	c2	-102.154 3	-0.413 2	-0.638 1	5.108 5	0

表 2 天数、温度、pH 和 DO 对各组亚硝酸盐氮的逐步回归分析
Tab. 2 Stepwise regression analysis of NO₂-N by days, T, pH and DO

	变量 Variable	系数 Coefficient	回归系数 Regression coefficient	标准回归系数 Standard regression coefficient	偏相关 Partial correlation	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
对照组 CK	常数 Constant	e0	1 457.197 5				
	天数(<i>x</i> ₁) Days	e1	33.490 1	1.044 9	0.747 7	6.942 0	0
	温度(<i>x</i> ₂) T	e2	-64.410 0	-0.539 1	-0.502 4	3.581 4	0.001 0
潮汐组 Tide experiment group	常数 Constant	f0	-243.953 6				
	天数(<i>x</i> ₁) Days	f1	-0.842 3	-0.378 3	-0.311 8	1.996 2	0.053 3
	温度(<i>x</i> ₂) T	f2	-5.288 2	-0.587 8	-0.420 2	2.816 7	0.007 7
	酸碱度(<i>x</i> ₃) pH	f3	50.028 7	0.522 2	0.450 9	3.072 5	0.004 0
潮汐组 Spill experiment group	常数 Constant	g0	-1 123.053 7				
	天数(<i>x</i> ₁) Days	g1	-12.161 2	-1.102 0	-0.776 3	7.590 8	0
	温度(<i>x</i> ₂) T	g2	50.610 8	1.134 4	0.785 1	7.814 0	0

表 3 天数、温度、pH 和 DO 对各组磷酸态磷的逐步回归分析
Tab. 3 Stepwise regression analysis of PO₄³⁻-P by days, T, pH and DO

	变量 Variable	系数 Coefficient	回归系数 Regression coefficient	标准回归系数 Standard regression coefficient	偏相关 Partial correlation	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
对照组 CK	常数 Constant	h0	1 232.195 3				
	天数(<i>x</i> ₁) Days	h1	-13.812 5	-0.948 7	-0.948 7	18.739 8	0
潮汐组 Tide experiment group	常数 Constant	i0	3 689.050 4				
	天数(<i>x</i> ₁) Days	i1	-8.995 4	-0.410 2	-0.654 0	5.258 1	0
	温度(<i>x</i> ₂) T	i2	-38.231 5	-0.431 5	-0.636 7	5.022 7	0
	酸碱度(<i>x</i> ₃) pH	i3	-206.978 9	-0.219 3	-0.458 2	3.135 3	0.003 4
潮汐组 Spill experiment group	常数 Constant	j0	3 301.636 8				
	天数(<i>x</i> ₁) Days	j1	-12.405 2	-0.488 7	-0.735 6	6.604 3	0
	温度(<i>x</i> ₂) T	j2	-46.273 3	-0.450 9	-0.701 8	5.992 5	0
	酸碱度(<i>x</i> ₃) pH	j3	-144.940 3	-0.135 2	-0.362 2	2.363 5	0.023 5

2.5 氨氮、磷酸态磷、亚硝酸盐氮浓度变化分析

2.5.1 氨氮浓度变化 对照组、潮汐组、溢流组的氨氮浓度均呈下降趋势(图 3)。对照组 NH₄⁺-N 浓度下降速度最慢,初始值为 1.11 mg·L⁻¹,10 d 后浓度降低到 0.94 mg·L⁻¹,20 d 后浓度降低到 0.19 mg·L⁻¹;

潮汐组 NH_4^+-N 浓度下降速度最快, 初始值为 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2 d 后下降速度开始加快, 5 d 后下降速度开始降低, 且浓度低于 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 12 d 后浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 溢流组 NH_4^+-N 浓度下降速度次之, 初始值为 $1.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2 d 后下降速度开始加快, 10 d 后下降速度开始降低, 且在 9 d 后浓度低于 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 15 d 后浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.5.2 亚硝酸盐氮浓度变化 对照组呈上升趋势, 潮汐组、溢流组的亚硝酸盐氮浓度均呈向上升后下降趋势(图4)。初始 NO_2^--N 浓度均为 0。对照组 NO_2^--N 浓度 0~16 d 上升较慢, 16 d 时上升到 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 16~20 d 上升较快, 20 d 时上升到 $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 潮汐组 NO_2^--N 浓度 0~4 d 呈上升趋势, 4 d 达到峰值 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 4~20 d 呈下降趋势, 6 d 后浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 溢流组 NO_2^--N 浓度 0~9 d 呈上升趋势, 9 d 达到峰值 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 9~20 d 呈下降趋势, 12 d 后浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.5.3 磷酸态磷浓度变化 对照组、潮汐组、溢流组的磷酸态磷均呈下降趋势(图5)。对照组 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度下降速度最慢, 初始值为 $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 10 d 后浓度为 $1.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 20 d 后浓度为 $1.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 潮汐组 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度下降速度较快, 初始值为 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 10 d 后浓度为 $0.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 20 d 后浓度为 $0.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 溢流组 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度下降速度最快, 初始值为 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 10 d 后浓度为 $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 20 d 后浓度为 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

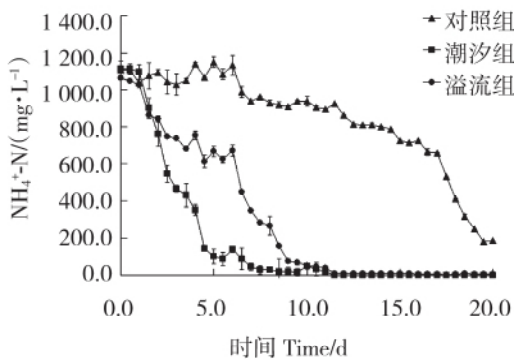


图3 各个实验组氨氮浓度随时间的变化
Fig. 3 The change of concentration of NH_4^+-N in each experiment over the time

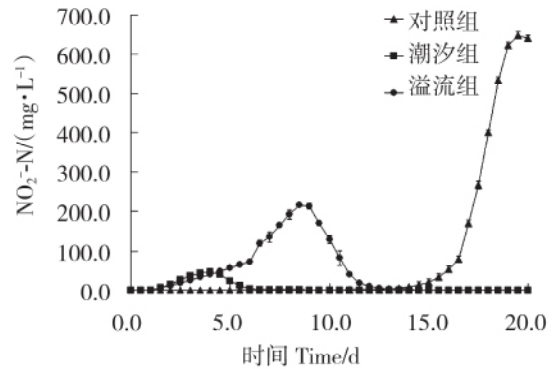


图4 各个实验组亚硝酸盐氮浓度随时间的变化
Fig. 4 The change of concentration of NO_2^--N in each experiment over the time

3 讨论

通径分析可用于分析多个自变量与变量之间的线性关系, 是回归分析的拓展, 不仅可以处理较复杂的变量关系, 而且能把实验参数间相关性分成直接影响和间接影响^[14-17]。鄢朝等^[18]应用通径分析方法研究华贵栉孔扇贝数量性状; 王爱民等^[19]对马氏珠母贝不同地理种群内自繁和种群间杂交子一代形态性状参数进行了相关分析。本实验结果表明, 天数和温度对对照组、潮汐组、溢流组的 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 NO_2^--N 均有极显著的影响, 建立回归方程时, 保留相关系数影响显著的, 剔除不显著的, 以建立理想的回归方程。 NH_4^+-N 浓度均处于下降趋势, 相比较对照组和溢流组, 潮汐组降低速度最快。12 d 潮汐组 NH_4^+-N 浓度降低到 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而溢流组需要 15 d。郑兴等^[13]研究表明, 潮汐式自动循环养殖系统保证了水体溶氧量, 满足硝化细菌对溶氧的需求, 更有利于硝化反应。这个结论与本实验结果一致, 可见潮汐式更有利于 NH_4^+-N 的降解。

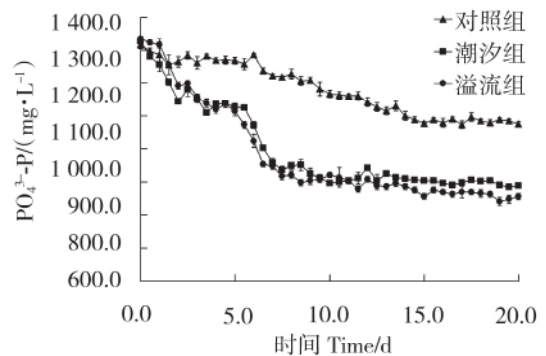


图5 各个实验组磷酸态磷浓度随时间的变化
Fig. 5 The change of concentration of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ in each experiment over the time

$\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度处于先上升后下降趋势,与山形阳一报道相一致^[20]。潮汐组 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度 4 d 达到最高 ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 6 d 浓度又降低到 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相比较对照组和溢流组,潮汐组的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 最高浓度最低, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 对养殖物种危害性较大,因此,浓度越低越好。可知潮汐式更有利于 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 降解,使 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 处于较低的浓度。对照组 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度上升,表明没有过滤介质的流动水体有利于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降解为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,但不利于 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 降解,会导致 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累。 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度均处于下降趋势,比较对照组和溢流组,溢流组降低速度最快,潮汐组次之,对照组最慢。20 d 溢流组 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度从 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,潮汐组从 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到 $0.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。潮汐组与溢流组 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度降低速度相差不大,但两者降低速度都不快。 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度降低速度与温度、pH、DO 以及盐度均有关^[21],实验温度在 $26 \sim 28 \text{ }^\circ\text{C}$, pH 在 $7.5 \sim 8.0$, DO 在 $7.0 \sim 7.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可能使 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 降低速度受到限制,降低速度较慢。

对比对照组和溢流组对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 以及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 的处理效果,虽然溢流组对 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 处理效果较好,但潮汐组与溢流组相差不大,所以潮汐组对水体处理效果比对照组和溢流组更优。氨氮、亚硝酸盐氮和磷酸盐对水产养殖物种的毒性较大,因此,将氨氮、亚硝酸盐氮和磷酸盐处理转化为硝酸盐氮以及磷酸根离子,更有利于水质的净化。综上所述,潮汐式水流方式有利于水体中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 以及 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 转化为硝酸盐氮以及磷酸根离子,有利于水质的净化^[1],因此,更适用于循环水养殖系统。

参考文献:

- [1] 邹艺娜,胡振,张建,等. 鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化[J]. 环境工程学报,2015,9(9): 4211–4216.
- [2] 刘道玉,范立民,王琼,等. 脱氮副球菌的好氧反硝化特性及对养殖水体中氮素的控制[J]. 农业环境科学学报,2012,31(11): 2249–2255.
- [3] Mook W T, Chakrabarti M H, Aroua M K, et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review[J]. Desalination, 2012, 285(3): 1–13.
- [4] Zhang Q Z, Achal V, Xu Y T, et al. Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsskal) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district[J]. Aquacultural Engineering, 2014, 60: 48–55.
- [5] 王威,曲克明,朱建新,等. 3种滤料生物滤器的挂膜与黑鲷幼鱼循环水养殖效果[J]. 中国水产科学,2012,19(5): 833–840.
- [6] 曲克明,杜守恩. 海水工厂化高效养殖体系构建工程技术[M]. 北京:海洋出版社,2010: 11–25.
- [7] 李秋芬,傅雪军,张艳,等. 循环水养殖系统生物滤池细菌群落的 PCR-DGGE 分析[J]. 水产学报,2011,35(4): 579–586.
- [8] 罗国芝,陈家捷,于文杰,等. 一株新型异养硝化细菌处理养殖水的效果[J]. 环境工程学报,2016,10(8): 4206–4212.
- [9] Rakocy J E, Masser M P, Losordo T M, et al. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture[M]. Washington: SRAC Publication, 2006.
- [10] Watten B J, Busch R L. Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system[J]. Aquaculture, 1984, 41(3): 271–283.
- [11] Liang J Y, Chien Y H. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 85(10): 693–700.
- [12] Roosta H R. Effects of foliar spray of K on mint, radish, parsley and coriander plants in aquaponic system[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(14): 2236–2254.
- [13] 郑兴,崔云亮,姚瑶,等. 5种生物滤料挂膜期间氨氮去除效果的比较[J]. 琼州学院学报,2015,2(22): 80–84.
- [14] 何洁,刘长发,张红霞,等. 3种载体上生物膜的硝化性能[J]. 中国水产科学,2003,10(1): 65–68.
- [15] 李朝霞,王春德. 海湾扇贝自交与杂交子代的生长比较和通径分析[J]. 中国农学通报,2009,25(8): 282–285.
- [16] 郑怀平,孙泽伟,张涛,等. 华贵栉孔扇贝1龄贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 中国农学通报,2009,25(20): 322–326.
- [17] 王庆恒,邓岳文,杜晓东,等. 翡翠贻贝形态性状对软体部质量的影响[J]. 广东海洋大学学报,2009,29(4): 1–4.

- [18] 鄢朝, 顾志峰, 章华忠, 等. 华贵栉孔扇贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 南方水产科学, 2012, 8(3): 34–38.
- [19] 王爱民, 石耀华, 周志刚. 马氏珠母贝不同地理种群内自繁和种群间杂交子一代形态性状参数及相关性分析[J]. 海洋水产研究, 2004, 27(3): 39–45.
- [20] 山形阳一. 循环过滤装置的维护和管理[J]. 梅志平译. 水产科技情报, 1991, 18(2): 58–60.
- [21] 杨志强. 环境因子对循环水养殖系统中生物膜净化效率的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

Removal of Nitrogen and Phosphate through Tidal Water Flow in Recirculating Aquaculture Systems

LU Weiqiang, GU Zhifeng

(College of Ocean Science, Hainan University / State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in the South China Sea, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: In order to explore the effect of tidal water flow on water purification in recirculating aquaculture systems, biofilters in recirculating aquaculture systems with tidal water flow and spill water flow setups were compared and analyzed by using the National Standard for Determination of Water Quality to observe their effect on removal of nitrogen and phosphorus in the water of the fish tank. The experimental results of ammonia nitrogen load showed that the concentration of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in the water was reduced from $1.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to below $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in 12 d in the tidal aquaponics, and in 15 d in the spill aquaponics. There was no much difference in removal speed of $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ between the tidal and the spill aquaponics, and the highest concentration of $\text{NO}_2^- \text{-N}$ was $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the tidal aquaponics, and $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the spill aquaponics during the experiment. It is hence concluded that the tidal recirculating aquaculture system is better than the spill one in the removal of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_2^- \text{-N}$.

Keywords: Tidal type; recirculating aquaculture system; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$; $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$; $\text{NO}_2^- \text{-N}$

(责任编辑: 潘学锋)