

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20170624001

http://www.yykxjz.cn/

陆伟强, 高桦楠, 刘春胜, 王爱民, 顾志峰, 林国尧. 不同氨氮和溶解氧条件下循环海水养殖系统生物滤池对氨氮、化学耗氧量及颗粒悬浮物的处理效果. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 89-95

Lu WQ, Gao HN, Liu CS, Wang AM, Gu ZF, Lin GY. Treatment effect of ammonia nitrogen, COD and SS by a coral stone biological filter in the recirculating aquaculture systems under different concentrations of ammonia nitrogen and dissolved oxygen. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(3): 89-95

# 不同氨氮和溶解氧条件下循环海水养殖系统生物滤池对氨氮、化学耗氧量及颗粒悬浮物的处理效果\*

陆伟强<sup>1</sup> 高桦楠<sup>1</sup> 刘春胜<sup>1</sup> 王爱民<sup>1</sup> 顾志峰<sup>1①</sup> 林国尧<sup>2①</sup>

(1. 南海海洋资源利用国家重点实验室 海南大学海洋学院 海口 570228;

2. 海南省海洋与渔业科学院 海口 570206)

**摘要** 为了建立优化的循环海水养殖系统,采用水质国标检测方法分析了珊瑚石生物滤池在不同氨氮和溶解氧(DO)负荷实验条件下对养殖废水中氨氮、化学耗氧量(COD)及颗粒悬浮物(SS)的处理效果。结果显示,进水氨氮浓度对出水氨氮(正相关)、COD(正相关)均有极显著的影响( $P<0.01$ ),对SS处理效果影响不显著。当进水氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L 时,滤池对水体处理效果最优(氨氮平均清除率为 82.1%±3.3%; COD 平均清除率为 7.1%±1.5%; SS 平均清除率为 5.8%±1.6%)。DO 浓度对水体氨氮(负相关)和 COD(负相关)处理效果的影响显著( $P<0.05$ ),对 SS 处理效果影响不显著。DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时,水体处理效果最优(氨氮平均清除率为 78.7%±3.5%; COD 平均清除率为 23.0%±5.3%; SS 平均清除率为 7.1%±2.0%)。因此,本实验环境下的循环海水养殖系统珊瑚石生物滤池在氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L, DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时,对水体中的氨氮、COD、SS 的综合处理效果最优。

**关键词** 循环水养殖系统; 氨氮; 溶解氧; 负荷实验; 珊瑚石

**中图分类号** S969 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)03-0089-07

循环水养殖系统(Recirculating aquaculture systems, RAS)在中国沿海各个养殖地区受到广泛的关注和应用(王威等, 2012)。与传统养殖相比,循环水养殖具有环境污染小、养殖生物生长快速、养殖密度大以及管理方便等优点(曲克明等, 2010)。李秋芬等(2011)和罗国芝等(2016)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。目前,培养海水生物膜常用的菌种多为活

性污泥或者驯化的淡水硝化菌群(张俊新等, 2008)。载体的材质、结构和比表面积等对生物膜的水体处理效果有显著的影响(Bower *et al*, 1982; Lekang *et al*, 2000; Hirai *et al*, 2001; 王晋等, 2001; 何洁等, 2003; 郑兴等, 2015),而评价载体的指标主要包括表面生物膜形成时间以及水体的净化效果(Wang, 2011)。

养殖过程中水体积累的氨氮、化学耗氧量(Chemical oxygen demand, COD)和颗粒悬浮物(Suspended solids,

\* 国际科技合作专项(2012DFG32200; 2013DFA31780)和国家自然科学基金(41366003)共同资助[This work was supported by the International S&T Cooperation Program of China (2012DFG32200; 2013DFA31780), and the National Natural Science Foundation of China (41366003)]. 陆伟强, E-mail: 597897713@qq.com

① 通讯作者: 顾志峰, 教授, E-mail: hnugu@163.com; 林国尧, 副研究员, E-mail: 526720633@qq.com

收稿日期: 2017-06-24, 收修改稿日期: 2017-07-19

SS)等对养殖生物具有毒害作用,因此,生物膜对此类物质的处理效果尤为关键(杨志强等, 2015; 黄滨等, 2016)。而进水中的氨氮浓度以及生物滤池中的溶解氧(Dissolved oxygen, DO)浓度会影响生物膜对此类物质的处理。氨氮浓度过低时,硝化细菌受底物抑制,氨氮浓度太高对硝化细菌有毒害作用以致硝化不完全(王春英, 2009); 异养细菌与硝化细菌存在生长竞争关系,异养细菌有利于 COD 去除,而硝化细菌有利于氨氮去除,氨氮浓度高时,异养细菌处于竞争劣势,导致 COD 清除率降低(朱建新等, 2014); DO 浓度过低,不利于硝化作用,DO 浓度过高也会抑制硝化作用(李晓莉等, 2009)。

本研究采用水质检测方法,研究不同氨氮和 DO 负荷情况下,多孔珊瑚石作为生物膜载体的生物滤池对氨氮、COD、SS 的综合处理效果。以确定本实验生物滤池净化水体的最适 DO 浓度,以及其净化效果最明显的氨氮浓度范围。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

珊瑚石大小不超过 5 cm×5 cm×5 cm; 海水取自海南海口周边; 养殖废水为海南大学海洋学院贝类实验室的马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)养殖废水。

### 1.2 水质检测方法

pH 采用 pH 计(上海雷磁 PHS-3C 型)测定; 温度、盐度、DO 采用多参数水质监测仪(YSI 6600V2 型)测定; 氨氮(次溴酸钠氧化法)、亚硝酸盐(萘乙二胺分光光度法)、化学需氧量 COD、颗粒悬浮物 SS 测定均参照 GB17378.4-2007 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析方法进行(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2008)。

### 1.3 循环水系统

养殖池布置: 采用长宽高为 1.6 m×1 m×1 m 的

水泥池进行实验,每 3 个为 1 组,分别为进水池、出水池和珊瑚滤池,设置 3 个重复(图 1)。为方便检测进水、出水水样,3 个水池不循环,而是进水池底部由潜水泵 A 泵水至珊瑚滤池底部,珊瑚滤池的水通过溢流管进入出水池。当进水池中的水被泵完时,停止泵 A(氨氮、DO 负荷实验期间进水池水体 1600 L,抽干时间约为 16 h,15 h 时停止水泵 A),此时,在进水池、溢流口各取水样 200 ml。之后,打开水泵 B(3000 L/h)将出水池水体泵回进水池,再在进水池调节所需的氨氮浓度,混匀 30 min 后再关闭水泵 B,打开水泵 A,调节水泵 A,使水体流速为 100 L/h。

珊瑚滤池底部设置纳米管曝氧装置,铺设进水管,珊瑚滤池与出水池之间用溢流管(110 mm PVC 水管)连接,溢流口距池顶 10 cm。在珊瑚滤池填入珊瑚石至距池底 0.8 m 高,珊瑚滤池的出水溢流口设置于距离上表层珊瑚石 10 cm 处。珊瑚石加空隙体积为 1.28 m<sup>3</sup>。

生物膜培养: 根据朱建新等(2014)和傅雪军等(2010)的挂膜时间和温度,设计本实验的挂膜时间为 30 d,水温为 25℃~28℃,盐度为 31~33。关闭水泵 A 和 B,堵住溢流管口(用 110 mm PVC 水管堵头封闭),在珊瑚滤池中加满用氯片消毒 24 h 的养殖海水(24 h 后用硫代硫酸钠除余氯),此时,珊瑚石和水总体积为 1.6 m<sup>3</sup>,加水量约为 0.9 m<sup>3</sup>,珊瑚石体积约为 0.7 m<sup>3</sup>。充气保持水体 DO 为 6.5 mg/L,进行生物膜培养 30 d。待生物膜成熟后,进行后续实验。

氨氮、DO 负荷实验开始前,关闭水泵 A,进水池充满海水 1600 L,出水池充满海水 1600 L,进水池和出水池海水通过水泵 B 充分混匀,调节所需氨氮浓度(进水池、出水池底部之间有连通水管,实验时关闭,此时打开),珊瑚滤池排空。混匀后,打开水泵 A (3000 L/h),将进水池水体抽入珊瑚滤池至溢流口处,关闭水泵 A; 关闭进水池和出水池之间连通的水管,再通过水泵 B 将出水池水体抽入进水池,至进水池水满,关闭水泵 B,再打开水泵 A 调节水流速度为 100 L/h,开始实验。

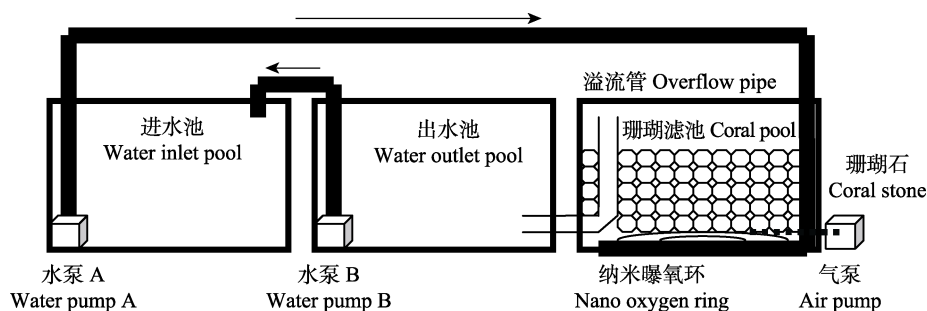


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental equipment

**1.3.1 氨氮负荷** 通过添加 NH<sub>4</sub>Cl 调节进水池水体氨氮浓度, 设置 4 组氨氮浓度水平, 分别为 0.05~0.25 mg/L、0.25~0.45 mg/L、0.45~0.65 mg/L 和 0.65~0.85 mg/L。每个氨氮浓度水平分别测试 6 次, 每 12 h 取 1 次样, 历时 12 d。DO 为 6.5~7.5 mg/L, 水温为 25℃~28℃, 盐度为 31~33。分别测量进水池和溢流口的氨氮、COD、SS 指标。

**1.3.2 DO 负荷** 通过调节气泵通气量大小调节珊瑚滤池中 DO 浓度, 设置 4 个 DO 负荷水平, 分别为 1~3 mg/L、3~5 mg/L、5~7 mg/L 和 7 mg/L 以上。每个水平测试 6 次, 每 12 h 取 1 次样, 历时 12 d。进水氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L, 水温为 25℃~28℃, 盐度为 31~33。测量珊瑚滤池 DO、进水池和溢流口的氨氮、COD、SS 指标。

**1.4 数据分析方法**

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。负荷实验阶段, 氨氮负荷实验分析 3 个测量指标[进水氨氮(x<sub>1</sub>)、进水 COD(x<sub>2</sub>)、进水 SS(x<sub>3</sub>)]对珊瑚滤池 3 个指标[出水氨氮(y<sub>1</sub>)、出水 COD(y<sub>2</sub>)、出水 SS(y<sub>3</sub>)]的影响, 同时作通径分析。DO 负荷阶段分析 3 个测量指标[DO(x<sub>1</sub>)、进水氨氮(x<sub>2</sub>)、进水 COD(x<sub>3</sub>)]对珊瑚滤池 3 个指标[出水氨氮(y<sub>1</sub>)、出水 COD(y<sub>2</sub>)、出水 SS(y<sub>3</sub>)]的影响, 同时作通径分析。

**2 结果**

**2.1 氨氮负荷实验**

**2.1.1 氨氮、COD 和 SS 的清除率** 如图 2 所示, 氨氮负荷实验数据显示, 关于氨氮清除率, 进水池氨氮浓度为 0.05~0.25 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 54.2%±9.1%; 进水池氨氮浓度为 0.25~0.45 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 72.7%±2.6%; 进水池氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 82.1%±3.3%; 进水池氨氮浓度为 0.65~0.85 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 78.4%±1.6%, 呈先增后减的趋势。

关于 COD 清除率, 进水池氨氮浓度为 0.05~

0.25 mg/L 时, COD 平均清除率为 21.9%±3.3%; 进水池氨氮浓度为 0.25~0.45 mg/L 时, COD 平均清除率为 13.1%±1.6%; 进水池氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L 时, COD 平均清除率为 7.1%±1.5%; 进水池氨氮浓度为 0.65~0.85 mg/L 时, COD 平均清除率为 2.7%±2.0%, 呈下降趋势。

关于 SS 清除率, 进水池氨氮浓度为 0.05~0.25 mg/L 时, COD 平均清除率为 45.9%±3.5%; 进水池氨氮浓度为 0.25~0.45 mg/L 时, COD 平均清除率为 14.3%±12.7%; 进水池氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L 时, COD 平均清除率为 5.8%±1.6%; 进水池氨氮浓度为 0.65~0.85 mg/L 时, COD 平均清除率为 5.3%±2.4%, 呈下降趋势。

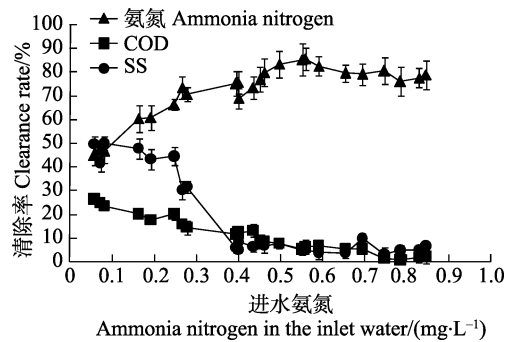


图 2 进水池氨氮浓度对珊瑚滤池氨氮、COD 和 SS 清除率的影响

Fig.2 Effect of the concentration of ammonia nitrogen in inlet water on clearance rate of ammonia nitrogen, COD and SS of the coral pool

**2.1.2 进水池氨氮对出水氨氮、COD、SS 的多元回归分析** 首先, 分析 3 个测量指标[进水池氨氮(x<sub>1</sub>)、COD(x<sub>2</sub>)、进水 SS(x<sub>3</sub>)]对珊瑚滤池出水氨氮(y<sub>1</sub>)的影响(表 1)。进水池氨氮与出水氨氮为极显著的正相关(相关系数为 0.8314, P<0.01), 进水 COD、SS 对出水氨氮影响不显著。y<sub>1</sub> = -0.0318 + 0.4013x<sub>1</sub>, 决定系数 R<sup>2</sup>=0.6913, 剩余标准差 SSE=0.0724, 剩余通径系数=0.5556。

再分析 3 个测量指标[进水池氨氮(x<sub>1</sub>)、COD(x<sub>2</sub>)、SS(x<sub>3</sub>)]对珊瑚滤池出水 COD(y<sub>2</sub>)的影响(表 2)。进水池氨氮与出水 COD 为极显著的正相关(相关系数为 0.9756,

表 1 进水池氨氮、COD 对出水氨氮的逐步回归分析

Tab.1 Stepwise regression analysis of ammonia nitrogen in the outlet water and the ammonia nitrogen and COD of the inlet water

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	P
常数 Constant	a0	-0.0318				
进水池氨氮(x <sub>1</sub> ) Ammonia nitrogen of the inlet water	a1	0.4013	0.8314	0.8314	7.0189	0.0000

$P < 0.01$ ); 进水 COD 与出水 COD 为极显著的正相关(相关系数为 0.9890,  $P < 0.01$ ); 进水 SS 与出水 COD 相关性不显著。通径系数反映自变量对因变量的直接影响。进水 COD 与出水 COD 的相关系数最大, 即进水 COD 对出水 COD 的影响最为明显, 且是正相关, 直接系数为 0.8509。  $y_2 = -0.2114 + 0.6569x_1 + 0.8500x_2$ , 决定系数  $R^2 = 0.9839$ , 剩余标准差  $SSE = 0.0061$ , 剩余

通径系数为 0.1269。

最后, 分析 3 个测量指标[进水池氨氮( $x_1$ )、COD( $x_2$ )、SS( $x_3$ )]对珊瑚滤池出水 SS( $y_3$ )的影响(表 3)。进水池 SS 与出水 SS 为极显著的正相关(相关系数为 0.7317,  $P < 0.01$ ); 进水氨氮与出水 COD 相关不显著。  $y_3 = -0.0064 + 0.8224x_3$ , 决定系数  $R^2 = 0.6324$ , 剩余标准差  $SSE = 0.0043$ , 剩余通径系数为 0.6063。

表 2 进水氨氮、COD、SS 对出水 COD 的逐步回归分析

Tab.2 Stepwise regression analysis of COD in the outlet water and the ammonia nitrogen, COD and SS in the inlet water

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	P
常数 Constant	b0	-0.2114				
进水氨氮( $x_1$ ) Ammonia nitrogen of the inlet water	b1	0.6569	0.5648	0.9756	20.3541	0.0000
进水 COD( $x_2$ ) COD of the inlet water	b2	0.8500	0.8509	0.9890	30.6621	0.0000

表 3 进水氨氮、COD、SS 对出水 SS 的逐步回归分析

Tab.3 Stepwise regression analysis of SS in the outlet water and the ammonia nitrogen, COD and SS in the inlet water

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	P
常数 Constant	c0	-0.0064				
进水 SS( $x_3$ ) SS of the inlet water	c1	0.8224	0.7733	0.7317	4.9197	0.0001

2.2 DO 负荷试验

2.2.1 氨氮、COD、SS 清除率 如图 3 所示, DO 负荷实验数据显示, 关于氨氮清除率, DO 浓度为 1.0~3.0 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 54.6%±2.6%; DO 浓度为 3.0~5.0 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 66.3%±5.4%; DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 78.7%±3.5%; DO 浓度大于 7.0 mg/L 时, 氨氮平均清除率为 75.0%±2.3%, 呈先增后减的趋势。

关于 COD 清除率, DO 浓度为 1.0~3.0 mg/L 时, COD 平均清除率为 1.6%±0.9%; DO 浓度为 3.0~5.0 mg/L 时, COD 平均清除率为 7.8%±2.3%; DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时, COD 平均清除率为 23.0%±5.3%; DO 浓度大于 7.0 mg/L 时, COD 平均清除率为 26.5%±2.7%, 呈上升的趋势。

关于 SS 清除率, DO 浓度为 1.0~3.0 mg/L 时, SS 平均清除率为 8.0%±2.5%; DO 浓度为 3.0~5.0 mg/L 时, SS 平均清除率为 21.8%±3.3%; DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时, SS 平均清除率为 7.1%±2.0%; DO 浓度大于 7.0 mg/L 时, SS 平均清除率为 2.8%±1.0%, 呈先增后减的趋势。

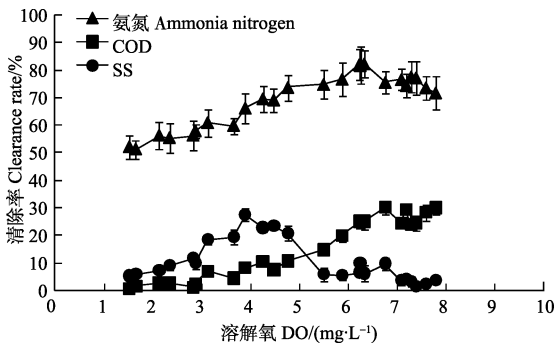


图 3 DO 浓度对珊瑚滤池氨氮、COD 和 SS 清除率的影响  
Fig.3 Effect of dissolved oxygen concentration on the clearance rate of ammonia nitrogen, COD and SS in the coral pool

2.2.2 DO 对出水氨氮、COD、SS 的多元回归分析

首先, 分析 4 个测量指标[DO( $x_1$ )、进水池氨氮( $x_2$ )、COD( $x_3$ )、SS( $x_4$ )]对珊瑚滤池出水 SS( $y_3$ )的影响(表 4)。DO 与出水氨氮为不显著的负相关(相关系数为 -0.2641,  $P = 0.2124$ )。  $y_1 = 0.1951 - 0.0061x_1$ , 决定系数  $R^2 = 0.0698$ , 剩余标准差  $SSE = 0.0878$ , 剩余通径系数 = 0.9645。

再分析 4 个测量指标[DO( $x_1$ )、进水池氨氮( $x_2$ )、COD( $x_3$ )、SS( $x_4$ )]对珊瑚滤池出水 COD( $y_2$ )的影响(表

5)。DO 与出水 COD 为极显著的负相关(相关系数为 -0.9340,  $P < 0.01$ ); 进水 COD 与出水 COD 为极显著的正相关(相关系数为 0.9715,  $P < 0.01$ ); 进水 SS 与出水 COD 为显著的负相关(相关系数为 -0.4497,  $P < 0.05$ )。通径系数反映自变量对因变量的直接影响。进水池 COD 与出水 COD 的相关系数最大, 即进水 COD 对出水 COD 的影响最为明显, 且是正相关, 直接系数为 0.8171。  $y_2 = 0.7860 - 0.0979x_1 + 0.8389x_3 -$

$11.6454x_4$ , 决定系数  $R^2=0.9621$ , 剩余标准差  $SSE=0.0110$ , 剩余通径系数为 0.1948。

最后, 分析 4 个测量指标[DO( $x_1$ )、进水池氨氮( $x_2$ )、COD( $x_3$ )、SS( $x_4$ )]对珊瑚滤池出水 SS( $y_3$ )的影响(表 6)。进水 SS 与出水 SS 为极显著的正相关(相关系数为 0.9178,  $P < 0.01$ )。  $y_3 = -0.0048 + 1.1081x_1$ , 决定系数  $R^2=0.84231$ , 剩余标准差  $SSE=0.0578$ , 剩余通径系数为 0.3971。

表 4 DO、进水氨氮、COD、SS 对出水氨氮的逐步回归分析  
Tab.4 Stepwise regression analysis of ammonia nitrogen in the outlet water of the DO, ammonia nitrogen, COD and SS in the inlet water

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>	<i>P</i>
常数 Constant	d0	0.1951				
溶解氧( $x_1$ ) DO	d1	-0.0061	-0.2641	-0.2641	1.2844	0.2124

表 5 DO、进水氨氮、COD、SS 对出水 COD 的逐步回归分析  
Tab.5 Stepwise regression analysis of the COD in the outlet water and the DO, ammonia nitrogen, COD and SS of the inlet water

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>	<i>P</i>
常数 Constant	e0	0.7860				
溶解氧( $x_1$ ) DO	e1	-0.0979	-0.6318	-0.9340	11.6902	0.0000
进水 COD( $x_3$ ) COD of the inlet water	e2	0.8389	0.8171	0.9715	18.3233	0.0000
进水 SS( $x_4$ ) SS of the inlet water	e3	-11.6454	-0.1195	-0.4497	2.2519	0.0357

表 6 DO、进水池氨氮、COD、SS 对出水 SS 的逐步回归分析  
Tab.6 Stepwise regression analysis of SS in the outlet water and the DO, ammonia nitrogen, COD and SS of the inlet water

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>	<i>P</i>
常数 Constant	f0	-0.0048				
进水 SS( $x_4$ ) SS of the inlet water	f1	1.1081	0.9178	0.9178	10.8406	0.0000

### 3 讨论

多元回归分析结果显示, 进水池氨氮浓度和 DO 浓度对出水氨氮、出水 COD 均有极显著的影响, 二者对 SS 影响不显著。多元回归分析不仅可以处理较为复杂的变量关系, 而且能区分实验参数间相关性是否为直接影响和间接影响(何洁等, 2003; 李朝霞等, 2009; 郑怀平等, 2009; 王庆恒等, 2009)。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。鄢朝等(2012)以此方法研究华贵栉孔扇贝(*Mimachlamys nobilis*)数量性状; 王爱民等(2004)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。

氨氮负荷实验结果显示, 进水氨氮浓度为 0.45~

0.65 mg/L 时, 珊瑚石生物滤池对水体中氨氮、COD、SS 的综合处理效果最优(氨氮平均清除率为  $82.1\% \pm 3.3\%$ ; COD 平均清除率为  $7.1\% \pm 1.5\%$ ; SS 平均清除率为  $5.8\% \pm 1.6\%$ )。氨氮负荷影响硝化速率, 氨氮浓度过低时硝化菌硝化速率不高, 氨氮浓度太高对硝化菌有抑制效应。COD 和 SS 的清除率整体较低, 所以偏重考虑氨氮清除率的情况, 来判断水体处理效果的优劣。因此, 综合考虑, 进水氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L 时, 系统对水体处理效果最优。

DO 负荷实验数据显示, DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时, 珊瑚石生物滤池对水体中氨氮、COD、SS 的综合处理效果最优[氨氮平均清除率为  $78.7\% \pm 3.5\%$ ; COD 平均清除率为  $23.0\% \pm 5.3\%$ ; SS 平均清除率为  $7.1\% \pm 2.0\%$ ]。李晓莉等(2009)在封闭式循环水养殖系统实验

中也得出,曝气生物滤池在 DO 值为 7.0 mg/L 时,滤池有最大的氨氮去除率。DO 浓度低,不利于硝化作用,DO 浓度过高也会抑制硝化作用。当 DO 浓度超过 7.0 mg/L, COD 清除率升高不明显。综合考虑,以珊瑚石为载体的生物处理系统的最优 DO 浓度范围为 5.0~7.0 mg/L。

综上所述,本研究环境下的循环海水养殖系统珊瑚石生物滤池在氨氮浓度为 0.45~0.65 mg/L、DO 浓度为 5.0~7.0 mg/L 时,对水体中的氨氮、COD、SS 的综合处理效果最优。本研究尚存在不足,不同水流速度、不同温度、不同盐度等情况下,系统对水体的处理效果还有待进一步实验。

### 参 考 文 献

- Bower CE, Turner DT. Effects of seven chemotherapeutic agents on nitrification in closed seawater culture systems. *Aquaculture*, 1982, 29(3-4): 331-345
- Fu XJ, Ma SS, Qu KM, *et al.* Ammonia removal by bio-film and its impact factors in recirculation aquaculture systems. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(1): 95-99 [傅雪军, 马绍赛, 曲克明, 等. 循环水养殖系统生物挂膜的消氨效果及影响因素分析. *渔业科学进展*, 2010, 31(1): 95-99]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The specification of marine monitoring—Part 4: Seawater analysis (GB17378.4-2007), 2008 [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析 (GB17378.4-2007), 2008]
- He J, Liu CF, Zhang HX, *et al.* Nitrification performances of bio-film on three types of filter media. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(1): 65-68 [何洁, 刘长发, 张红霞, 等. 3 种载体上生物膜的硝化性能. *中国水产科学*, 2003, 10(1): 65-68]
- Hirai M, Kamamoto M, Yani M, *et al.* Comparison of the biological NH<sub>3</sub> removal characteristics among four inorganic packing materials. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2001, 91(4): 428-430
- Huang B, Ma T, Liu BL, *et al.* Effects of ozone concentration on the activity of biofilm and its effectiveness of purification in recirculating aquaculture systems. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(3): 143-147 [黄滨, 马腾, 刘宝良, 等. 不同浓度臭氧对循环水养殖系统生物膜活性及其净化效能的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(3): 143-147]
- Lekang OI, Kleppe H. Efficiency of nitrification in trickling filters using different filter media. *Aquacultural Engineering*, 2000, 21(3): 181-199
- Li QF, Fu XJ, Zhang Y, *et al.* PCR-DGGE analysis of bacterial communities in bio-filters of re-circulating mariculture system. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(4): 579-586 [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. *水产学报*, 2011, 35(4): 579-586]
- Li XL, Liufu YZ, Shi TH. Study on biological aerated filter in closed recirculating mariculture system. *Environmental Science and Technology*, 2009, 22(2): 9-12 [李晓莉, 刘付永忠, 石太宏. 曝气生物滤池应用于封闭循环海水养殖系统的试验研究. *环境科技*, 2009, 22(2): 9-12]
- Li ZX, Wang CD. Comparison of growth and path analyses of inbred and cross-bred populations in the bay scallop *Argopecten irradians irradians*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(8): 282-285 [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. *中国农学通报*, 2009, 25(8): 282-285]
- Luo GZ, Chen JJ, Yu WJ, *et al.* A new heterotrophic nitrifying bacteria effect of aquaculture water treatment. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(8): 4206-4212 [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. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4206-4212]
- Qu KM, Du SE. The technology of construction of high efficient mariculture system. Beijing: Ocean Press, 2010: 11-25 [曲克明, 杜守恩. 海水工厂化高效养殖体系构建工程技术. 北京: 海洋出版社, 2010, 11-25]
- Wang AM, Shi YH, Zhou ZG. Morphological trait parameters and their correlations of the first generation form matings and crosses of geographical populations of *Pinctada martensii* (Dunker). *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(3): 39-45 [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. *海洋水产研究*, 2004, 25(3): 39-45]
- Wang CY. Effect of basicity, ammonia-N and COD on independent nitrification. *Sichuan Environment*, 2009, 28(4): 16-19 [王春英. 碱度、氨氮负荷和 COD 对独立硝化的影响. *四川环境*, 2009, 28(4): 16-19]
- Wang J, Ma WL, Qi R, *et al.* Nitrification capability of a fixed bio-membrane reactor. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2001, 2(1): 90-92, 83 [王晋, 马文林, 齐嵘, 等. 新型固定床生物膜反应器硝化性能的研究. *环境污染治理技术与设备*, 2001, 2(1): 90-92, 83]
- Wang QH, Deng YW, Du XD, *et al.* Effect of morphometric traits on edible part weight of *Perna viridis*. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2009, 29(4): 1-4 [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. *广东海洋大学学报*, 2009, 29(4): 1-4]
- Wang W, Qu KM, Zhu JX, *et al.* Biofilm cultivation with three stuffings and their effect on the growth of young black sea bream, *Sparus macrocephalus*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(5): 833-840 [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. *中国水产科学*, 2012, 19(5): 833-840]
- Wang W. Engineering test of biological aerated filter to treat wastewater. In: Zhu M. (eds) *Information and Management Engineering. Communications in Computer and Information*

- Science, 2011, vol 236. Springer, Berlin, Heidelberg
- Yan Z, Gu ZF, Zhang HZ, *et al.* Correlation and path analysis of major quantitative traits of *Chlamys nobilis* in Sanya. South China Fisheries Science, 2012, 8(3): 34–38 [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. 南方水产科学, 2012, 8(3): 34–38]
- Yang ZQ, Zhu JX, Liu H, *et al.* The influence of environmental factors on biofilter efficiency in a recirculating aquaculture system. Fishery Modernization, 2015, 42(3): 17–22 [杨志强, 朱建新, 刘慧, 等. 几种环境因子对循环水养殖系统中生物膜净化效率的研究. 渔业现代化, 2015, 42(3): 17–22]
- Zhang JX, Wei HF, He J, *et al.* Biofilm formation kinetics in mariculture waste water treated by cinder and zeolite media. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 23(3): 205–209 [张俊新, 魏海峰, 何洁, 等. 用煤渣和沸石处理海水养殖废水的挂膜动力学研究. 大连水产学院学报, 2008, 23(3): 205–209]
- Zheng HP, Sun ZW, Zhang T, *et al.* Correlation and path analysis to quantitative traits of noble scallop *Chlamys nobilis* reeve at one-year old. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(20): 322–326 [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. 中国农学通报, 2009, 25(20): 322–326]
- Zheng X, Cui YL, Yao Y, *et al.* Comparison of the ammonia-removing efficiency of five biofilters in recirculating aquaculture system during biofilm cultivation. Journal of Qiongzhou University, 2015, 2(22): 80–84 [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. 琼州学院学报, 2015, 2(22): 80–84]
- Zhu JX, Liu H, Xu Y, *et al.* Dual-culture techniques for the rapid start-up of recirculating aquaculture system. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(4): 118–124 [朱建新, 刘慧, 徐勇, 等. 循环水养殖系统生物滤器负荷挂膜技术. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 118–124]

(编辑 马璀璨)

## Treatment Effect of Ammonia Nitrogen, COD and SS by a Coral Stone Biological Filter in the Recirculating Aquaculture Systems Under Different Concentrations of Ammonia Nitrogen and Dissolved Oxygen

LU Weiqiang<sup>1</sup>, GAO Huanan<sup>1</sup>, LIU Chunsheng<sup>1</sup>, WANG Aimin<sup>1</sup>, GU Zhifeng<sup>1①</sup>, LIN Guoyao<sup>2①</sup>

(1. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Ocean College, Hainan University, Haikou 570228; 2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 570206)

**Abstract** To optimize recirculating aquaculture systems (RAS), we performed a water-quality detection experiment to study the effect of clearance rates of ammonia nitrogen, chemical oxygen demand (COD) and suspended solids (SS) by a biological filter in RAS under conditions of ammonia nitrogen and dissolved oxygen load. The experimental results for ammonia nitrogen load showed that the ammonia nitrogen concentration of the inlet water had a significant effect on the ammonia nitrogen (positive correlation) and COD (positive correlation) of the outlet water ( $P < 0.01$ ), and did not have a significant effect on SS. The optimal treatment effect of the water was observed when the ammonia nitrogen concentration of the inlet water was 0.45–0.65 mg/L (average clearance rates of ammonia nitrogen, COD, and SS were 82.1%±3.3%, 7.1%±1.5%, and 5.8%±1.6%). Experimental data for the dissolved oxygen load showed that dissolved oxygen concentration had a significant effect on ammonia nitrogen (negative correlation) and COD (negative correlation) treatment ( $P < 0.05$ ), and did not have a significant effect on SS. The optimal treatment effect of the water was observed when the dissolved oxygen concentration was 5.0–7.0 mg/L, (average clearance rate of ammonia nitrogen, COD, and SS were 78.7%±3.5%, 23.0%±5.3%, and 7.1%±2.0%). Therefore, when the concentration of ammonia nitrogen is 0.45–0.65 mg/L, the concentration of dissolved oxygen is 5.0–7.0 mg/L. The treatment effect of ammonia nitrogen, COD, and SS is optimized by the coral biofilter of RAS in this experimental environment.

**Key words** Recirculating aquaculture system; Ammonia nitrogen; DO; Load test; Coral stone

① Corresponding author: GU Zhifeng, E-mail: hnugu@163.com; LIN Guoyao, E-mail: 526720633@qq.com