

文章编号: 1674-5566(2018)06-0907-09

DOI:10.12024/jsou.20180302247

## 碳氮比对生物絮凝反应器处理水质效果的影响

陈伟<sup>1</sup>, 谭洪新<sup>1,2,3</sup>, 罗国芝<sup>1,2,3</sup>, 孙大川<sup>1,2,3</sup>, 刘文畅<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 水产科学国际级实验教学示范中心, 上海 201306)

**摘要:** 为探究不同 C/N 对以生物絮凝反应器为唯一水处理装置的循环水养殖系统的废水处理的影响, 以鳗鱼循环水养殖废水为研究对象, 分别设置不同 DOC/DIN 梯度 (Dissolved Organic Carbon, DOC; Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN, C/N: 0、5、10 和 15) 进行相关研究。实验结果表明: C/N = 0 时 (未添加碳源), 反应器没有脱氮除磷的效果,  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$  出现积累; 随着 C/N 的升高, 反应器脱氮除磷的效果也逐渐增加, C/N = 15 时去除效果显著高于其他处理组 ( $P < 0.05$ ), TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$  的去除率 (RR) 分别为 46.60%、43.49% 和 24.40%; 在整个实验过程中, 反应器的 SS、TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 在 C/N = 0 和 C/N = 5 的去除效果显著高于 C/N = 10 和 C/N = 15 的去除效果 ( $P < 0.05$ ), 并且随着 C/N 的升高而降低; 在 C/N 逐渐升高的条件下, 反应器的稳定性逐渐变差, 反应器最高可运行的 C/N 为 15; 在低 C/N (C/N = 0 和 5) 情况下, 反应器絮体体积指数 (SVI-30) 始终小于 150 mg/L, 未出现絮团膨胀, 系统稳定性良好; 当  $10 \leq C/N \leq 15$  时, 反应器呈现出絮团微膨胀, 反应器的稳定性变得较差, 但对反应器脱氮除磷效果没有影响。在 BFT (Biofloc Technology) 反应器中, 反应器的 ORP 值与反应器的 C/N 呈负相关关系, 可作为 BFT 反应器反硝化特征和优化的参数。综上可知, BFT 反应器在低 C/N 条件下对 SS、TAN、 $\text{NO}_2^-$ -N 具有良好的水处理效果, 在 C/N  $\geq 10$  情况下对 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{PO}_4^{3-}$  具有良好的水处理效果, 具有同步硝化反硝化 (Simultaneous Nitrification and Denitrification, SND) 和除磷的作用。研究结果可为其用作 RAS 核心水处理装置的进一步研究和应用提供参考。

**关键词:** 碳氮比; 水处理; 生物絮凝反应器; 循环水养殖系统; 水产养殖

**中图分类号:** S 912 **文献标志码:** A

2017 年, 我国水产品生产总量高达 6 901.25 万吨, 其中水产养殖产量 5 142.39 万 t, 占比高达 74.51%<sup>[1]</sup>。然而, 传统的换水养殖模式和工厂化高密度养殖模式不仅需要消耗大量的水资源, 而且产生了大量的有机物和有害物质, 严重加剧了水环境的恶化, 也影响了水产品的质量。因此, 发展高效益、可持续的现代化水产养殖模式是大势所趋, 当前国际上较为认可的生物絮团技术 (biofloc technology, BFT) 和循环水养殖模式被认为是解决可持续化健康养殖水质污染的有效途径。循环水养殖系统 (recirculating aquaculture system, RAS) 由于设备价格昂贵, 运行成本高, 日常管理难等短板制约了其在该行业的发展, 而以生物絮团技术为核心构建的 BFT 反应器如果用

作 RAS 唯一水处理核心单元, 因其具有同步去除 SS (Suspended Solids)、氮污染物, 节水和提高营养物质利用效率等潜在的优势, 将会进一步推进循环水养殖模式的发展<sup>[2]</sup>。

生物絮团技术主要是通过碳源的添加去调控微生物的生产, 从而达到去除氮污染物的目的。在这个过程中, 有机碳源作为微生物的能量来源, 使得其浓度对整个过程的影响显得尤其重要。卢炳国等<sup>[3]</sup>认为当 C/N  $\geq 15$  时, 形成的生物絮团可以有效的调节水质, 降低水体中的氨氮、亚硝酸盐氮水平; ASADUZZAMAN 等<sup>[4]</sup>分析了 C/N 和底物的添加对淡水虾塘的天然食物群落的影响, 结果表明 C/N 从 10 升到 20 时, 水中浮游植物、甲壳类动物和轮虫的生物量以及水体、

收稿日期: 2018-03-29 修回日期: 2018-05-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0701700)

作者简介: 陈伟 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为循环水养殖技术与工程。E-mail: 863634896@qq.com

通信作者: 谭洪新, E-mail: hxtan@shou.edu.cn

沉积物和固着物里的总异养生物 (total heterotrophic bacteria, THB) 的量得到了显著的提高。GOLDMAN 等<sup>[5]</sup>发现 C/N > 10 是对优化生物絮团生产和使氨再生最小化的最佳条件。生物絮凝反应器作为循环水养殖系统水处理装置,不同 C/N 对其水处理效果的影响,目前相关实际应用研究鲜有报道。

课题组利用循环水系统设计原理和生物絮凝技术设计了一种连续流式 BFT 反应器,并用作中试规模 RAS 的唯一水处理装置。同时对 BFT 反应器设置了 4 个 C/N 浓度比水平(0、5、10 和 15),每个水平试验周期为 9 天(由于试验是在系统生物絮体预培养完成的基础上进行的,BFT 系统稳定性良好,每个 C/N 水平的水质和处理效果稳定,所以每个 C/N 水平试验周期的设置对实验结果影响不大),研究了每个 C/N 比水平下的污水处理效果,为其在 RAS 的进一步研究和应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 水处理系统

生物絮凝反应器为聚乙烯材质,高 220 cm,内径 100 cm(图 1)。反应器中部设有一个宽 100 cm,高 205 cm 的中隔板,中隔板距反应器底部 15 cm,将反应器分为反应区和沉淀区两部分。在反应器底部沉淀区设置导泥板,导泥板与反应器底部呈 30°夹角。BFT 反应器进水口设在反应区高 200 cm 处,出水口设在沉淀区高 190 cm 处,反应器工作容积为 1.4 m<sup>3</sup>。BFT 反应器顶部,反应区和沉淀区各设有一个直径 45 cm 的半圆形检查口。反应区底部设有一个总长 250 cm 的纳米微孔曝气盘管,并设两台空气泵(总流量 10 L/min,138 W,型号 ACO-008,浙江森森有限公司)连接曝气,主要是为了进行搅拌和增氧。设有一个工作容积 12 L 的聚丙烯碳源桶和一个蠕动泵(型号 KCP3,卡默尔流体科技有限公司),调节流量 1 L/h,向反应区连续添加碳源。

RAS 养殖单元由上层养殖槽、中层养殖槽和下层缓冲池组成,通过 DN90 聚氯乙烯管道串联。上、中层养殖槽长 1 000 cm,宽 100 cm,高 45 cm。上、中层养殖槽每隔 100 cm 设有一个直径为 80 cm 的纳米曝气盘,总计 10 个纳米曝气盘,10 个曝气盘共同连接到 1 台电磁式空气泵。每层养

殖槽后设有一个长 50 cm,宽 100 cm,高 80 cm 的斜斗式集污槽。2 个集污槽设有独立的 PVC 排污管道(DN90)。下层缓冲池长 500 cm,宽 100 cm,高 45 cm,养殖槽和缓冲池设有聚乙烯盖保温。缓冲池出水口一端设有 1 台造流方向与缓冲池水流方向相反的造流泵(48W,型号 JVP-402A,浙江森森有限公司),防止固体颗粒物沉淀积累。

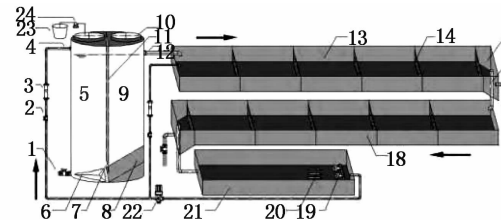


图 1 基于 BFT 反应器的循环水养殖系统  
Fig. 1 Recirculating aquaculture systems based on biofloc reactor

1. 排泥口; 2. 阀门; 3. 流量计; 4. 进水口; 5. 反应区; 6. 曝气盘; 7. 回泥口; 8. 导泥板; 9. 沉淀区; 10. 检查口; 11. 中隔板; 12. 出水口; 13. 上层养殖槽; 14. 钢丝隔网; 15. 集污槽; 16. 连通管道; 17. 排污管道; 18. 中层养殖槽; 19. 造流泵; 20. 恒温棒; 21. 下层缓冲池; 22. 循环泵; 23. 碳源桶; 24. 蠕动泵; 箭头方向为水流方向

1. Sludge outlet; 2. Valve; 3. Flowmeter; 4. Water inlet; 5. Reaction zone; 6. Aeration plate; 7. Sludge backing orifice; 8. Sludge guiding plate; 9. Settling zone; 10. Observation port; 11. Clapboard; 12. Water outlet; 13. Upper culture-zone; 14. Wire mesh; 15. Sump tank; 16. Connection pipeline; 17. Sewage pipeline; 18. Middle cultrue-zone; 19. Wave maker; 20. Heating rod; 21. Bottom buffer tank; 22. Circulating pump; 23. Carbon bucket; 24. Peristaltic pump; Arrow direction for water flow

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 养殖水体

2016 年 6 月 8 日至 2016 年 6 月 14 日,为了活化养殖水体和建立养殖污水,向养殖槽和缓冲池加除氯自来水至水深 23 cm 处,关闭 BFT 反应器进水支路,开启另一支路和循环泵,使养殖槽和缓冲池独立循环运行。

#### 1.2.2 生物絮体的预培养

2016 年 5 月 24 日至 2016 年 6 月 14 日为 BFT 反应器中生物絮体的预培养时期。向 BFT 反应器反应区每隔 5 天加入 1.0 kg 经自来水泡 12 小时后的膨化商品配合饲料(水分 ≤ 10%,粗蛋白 ≥ 30%,粗脂肪 ≥ 4%,粗灰分 ≤ 13%;漳州市日高特种饲料有限公司)。采用 LU 等<sup>[6]</sup>所述方法,24 h 连续曝气,每日加入一水葡萄糖,调节

溶解有机碳(dissolution organic carbon, DOC): TAN > 15,直至反应区形成具有较强絮凝沉降能力的生物絮体,此时反应区絮体特征为絮体体积指数(SVI-30) =  $10^5$  mg/L,混合液悬浮固体(mixed liquor suspended solid, MLSS) 1 150 mg/L,化学需氧量(chemical oxygen demand, COD) 320 mg/L。

### 1.2.3 养殖管理

2016年6月15日,分别向上层养殖槽移入花鳗鲡(*Anguilla marmorata*) 176尾,初始放养密度  $48 \text{ kg/m}^3$ ,规格( $626.5 \pm 120.4$ ) g;下层养殖槽移入156尾,初始放养密度  $48.2 \text{ kg/m}^3$ ,规格( $707.6 \pm 172.5$ ) g,上下层养殖槽鱼体总质量一致。上下层养殖槽每日各分2次投喂质量1.13 kg 鳗鱼配合饲料(水分 $\leq 10\%$ ,粗蛋白 $\geq 48\%$ ,粗脂肪 $\geq 4\%$ ,粗灰分 $\leq 17\%$ ;福建高农饲料有限公司),BFT反应器的饵料负荷为  $0.49 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。每2天打开集污槽阀门排污(50 L),并加水补充日常损耗的水量。

### 1.2.4 实验设计

实验时间为2016年6月16日(记为实验第1天)至2016年7月25日。打开BFT反应器进水阀门,调节相应流量至3 L/min,即反应器水力停留时间(Hydraulic Retention Time, HRT)为12 h,同时打开连接聚丙烯碳源桶和反应区的蠕动泵,调节相应流量至1 L/h。监测反应器进水总无机氮,即TAN、亚硝氮( $\text{NO}_2^-$ -N)和硝氮( $\text{NO}_3^-$ -N)之和,每日以一水葡萄糖(有机碳质量分数35.07%)作为碳源,每日2次,每次用12 L除氯自来水溶解后加入碳源桶,并通过蠕动泵向BFT反应器连续添加碳源。通过调节一水葡萄糖的添加量使反应器C/N依次为0(第1~9天)、5(第10~18天)、10(第19~27天)、15(第28~36天),每个C/N水平试验周期都为9天。试验期间以 $\text{NaHCO}_3$ 调控系统碱度。控制稳定期反应区絮体质量浓度MLSS为1 500~2 500 mg/L。具体调控方法为:当MLSS超过1 500 mg/L,从BFT反应器反应区泵出(型号HQB-4500,浙江森森)适量生物絮体浑浊液至聚丙烯桶(内径50 cm,高70 cm),静置1 h,取上清液泵回缓冲池,弃去沉淀后的生物絮体。

### 1.3 采样测定

每天8:00至9:00间取水样,每样设三个平

行,每2天监测1次。SS、总氮(TN)和COD(每3天监测1次)直接采样测定<sup>[7]</sup>。水样先进行离心(4 000 g, 8 min),经滤膜(0.45  $\mu\text{m}$ )过滤后测定TAN、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ <sup>[7]</sup>,同时部分水样测定DOC(型号Multi N/C 2100,德国耶拿分析仪器集团公司)。温度、溶解氧(DO)、氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)和pH直接使用Multi 3430多参数水质测量仪每天7:00采集现场测定(德国WTW公司)。MLSS、混合液中的挥发性炫富固体(mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS)和水样测试当天一起测定<sup>[7]</sup>,以英霍夫锥形管取1 000 mL反应区絮体浑浊液,静置沉淀30 min,测定絮体体积(FV-30),以FV-30与MLSS之比计算SVI-30。

### 1.4 数据分析与处理

用Origin 8和Adobe Illustrator CS4作图,数据采用SPSS 19.0软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),当差异显著时再使用Duncan法进行多重比较,以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 BFT反应器的稳定性

BFT反应器的稳定性和生物絮团的结构和沉降性能有关,主要表现为泥水分离是否明显,即反应器运行过程中沉淀区沉淀后的生物絮体与上清液之间有一个明显的泥水分离线,当泥水分离效果较好时,分离线位于反应器底部,反应器出水为上清液。如图2所示,当C/N = 0时,即不添加碳源,平均SVI-30 = 51 mg/L,此时分离线位于反应器底部;当C/N = 5时,平均SVI-30 = 132 mg/L,此时分离线位于反应器中部,上清液未出现浑浊;当C/N = 10时,平均SVI-30 = 273 mg/L,此时分离线位于离反应器出口60 cm处,上清液未出现浑浊;当C/N = 15时,平均SVI-30 = 458 mg/L,此时泥水分离线距离出水口水20 cm处,上清液出现轻微浑浊,部分结构松散的絮体雾状碎屑从沉淀区洗出回流到养殖区。实验末期,将反应器C/N升高到20的条件下运行,在此条件下运行第3天后,反应区泥水分离线距离出水口水平位置较近,成块的絮体从沉淀区洗出,致使反应器停止运行。结果表明,各组之间SVI-30差异显著( $P < 0.05$ )。随着C/N的升高,絮体SVI-30逐渐升高,表明絮体沉降性能减弱,

反应器的稳定性变差,BFT反应器可运行的C/N为15。

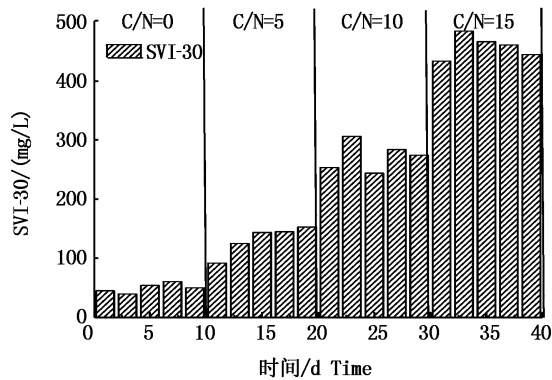


图2 C/N和SVI-30之间的关系

Fig. 2 The relationship between C/N and SVI-30

## 2.2 碳氮比对反应器氮污染物处理效果的影响

(1)图3a显示,添加碳源有助于反应器TN的去除,各处理组之间TN的去除率差异显著( $P < 0.05$ ),并随着C/N的升高,去除率也逐渐升高,C/N=15时的TN去除效果最佳,去除率为 $46.6\% \pm 4.2\%$ ,出水TN浓度最低,为 $(22.45 \pm 4.56)$  mg/L。(2)由图3b和c可以看出,在整个实验过程中,C/N=0和C/N=5时,两处理组间TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除率差异不显著( $P > 0.05$ ),随着C/N的增加,反应器TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除率呈缓慢上升趋势;当C/N=10和C/N=15时,两处理组间TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除率差异不显著( $P > 0.05$ ),但都显著低于C/N=0和C/N=5两处理组( $P < 0.05$ )。由此可知随着C/N的增加,TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除明显受到抑制,在C/N=15时去除率达到最低,去除率分别为 $61.4\% \pm 5.4\%$ , $49.9\% \pm 4.6\%$ 。(3)由图3d可知,各处理组之间 $\text{NO}_3^-$ -N的去除效果差异显著( $P < 0.05$ )。当C/N=0时,反应器出现了 $\text{NO}_3^-$ -N积累现象,对 $\text{NO}_3^-$ -N没有去除效果;当C/N=5时,对 $\text{NO}_3^-$ -N去除效果不明显,去除率仅为 $4.83\% \pm 1.45\%$ ;随着C/N的升高, $\text{NO}_3^-$ -N的去除率也逐渐增加,C/N=15时, $\text{NO}_3^-$ -N的去除效果最佳,去除率为 $43.49\% \pm 2.8\%$ 。

## 2.3 不同碳氮比对反应器除磷的影响

如图4(a)所示,绝大多数的时间点,反应器

出水 $\text{PO}_4^{3-}$ 的浓度是低于进水浓度的。不同C/N(0、5、10和15)处理组的 $\text{PO}_4^{3-}$ 平均去除率差异显著( $P < 0.05$ ),分别为 $-13.4\%$ 、 $5.8\%$ 、 $13.2\%$ 和 $24.4\%$ 。表明当C/N=0时, $\text{PO}_4^{3-}$ 出现积累现象,反应器对 $\text{PO}_4^{3-}$ 没有去除效果,随着碳氮比的升高,除磷效果也越显著,说明较高C/N有利于BFT反应器除磷。

## 2.4 不同碳氮比对反应器去除SS的影响

如图4(b)所示,各处理组间SS的去除率差异显著( $P < 0.05$ ),其中反应器C/N=0的SS出水浓度最低,去除率最高,C/N=15时去除率最差。反应器随着C/N(0、5、10和15)的升高,SS出水质量浓度分别为 $(13.23 \pm 6.58)$ 、 $(17.05 \pm 2.18)$ 、 $(66.37 \pm 5.28)$ 和 $(119.96 \pm 12.59)$  mg/L;去除率分别为 $83.08\% \pm 4.61\%$ 、 $74.17\% \pm 2.31\%$ 、 $51.16\% \pm 2.78\%$ 和 $29.34\% \pm 1.60\%$ ;实验表明,BFT反应器对SS都有一定的处理效果,在低C/N情况下SS处理效果显著高于高C/N。

## 2.5 不同碳氮比与反应器的ORP值和DO之间的关系

由图5可知,1)DO和ORP值呈正相关关系。各处理组之间DO和ORP值差异显著( $P < 0.05$ ),并随着C/N的升高,DO和ORP值越低,同时沉淀区的DO和ORP值显著低于反应区的DO和ORP值,最小值分别为 $-87$  mV、 $0.07$  mg/L。当C/N=0和5时,反应器的反应区和沉淀区ORP值和DO值处于一个较高的水平,反应器对TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 的去除效果不明显或出现积累现象;当C/N=10和15时,随着碳氮比的升高,反应器整体的DO的浓度和ORP值都下降,在C/N=15时达到最低,此时反应器的反应区的DO的浓度和ORP值最小值分别为 $1.17$  mg/L、 $77.1$  mV;沉淀区处于缺氧或厌氧状态,DO的浓度骤降到 $1.0$  mg/L以下,此时ORP值由正值骤降到负值,TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 的去除效果显著高于其他C/N水平( $P < 0.05$ ),平均去除率最高值分别为 $51.03\%$ 、 $46.30\%$ 和 $27.05\%$ ,反硝化越明显。综上可知,反应器的DO和ORP值呈正相关关系,反应器的TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 去除率和ORP值呈负相关关系,系统的ORP值可作为BFT反应器反硝化特征优化的参数。

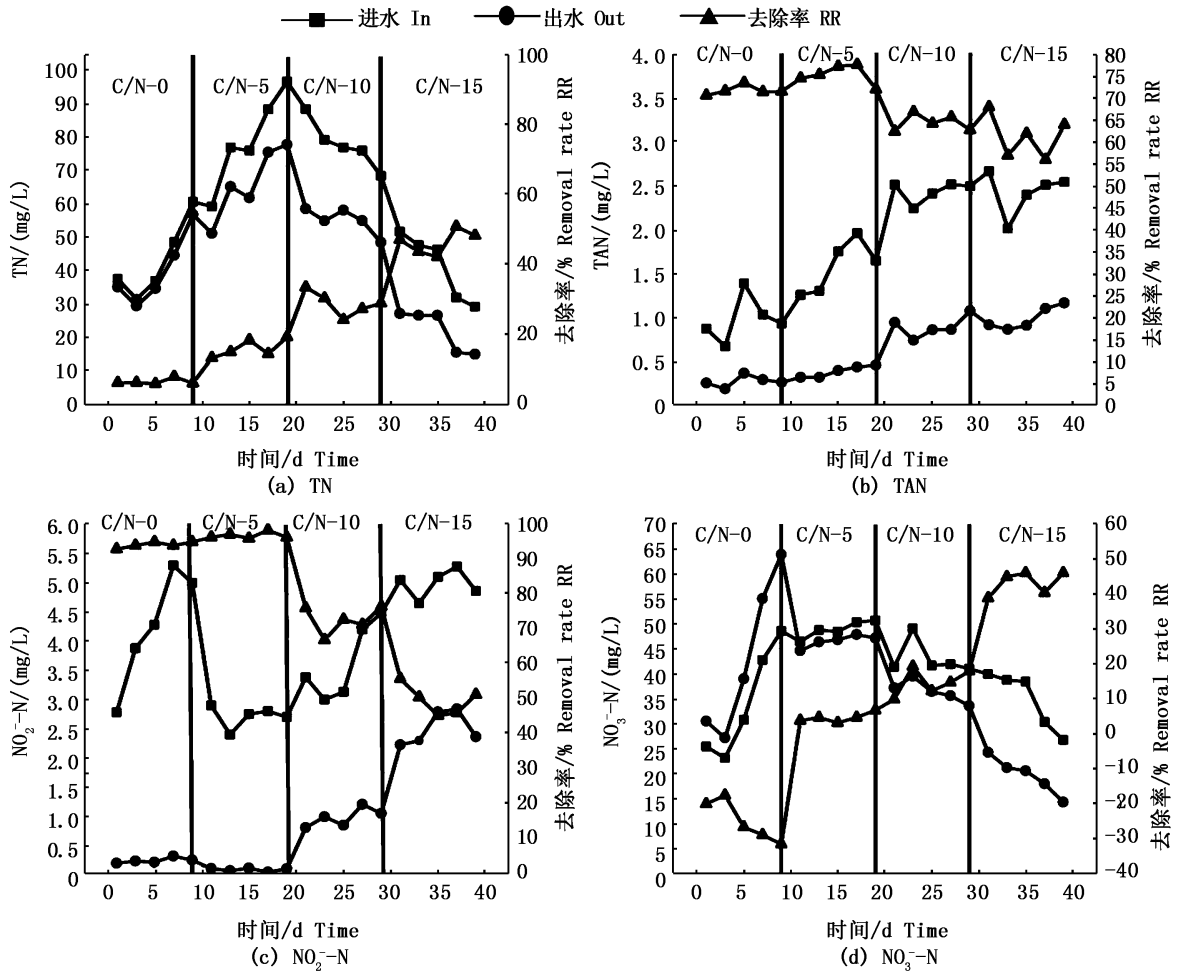


图3 碳氮比对 BFT 反应器氮污染物的处理效果

Fig.3 Effect of carbon nitrogen ratio on nitrogen pollutant in biofloc reactor

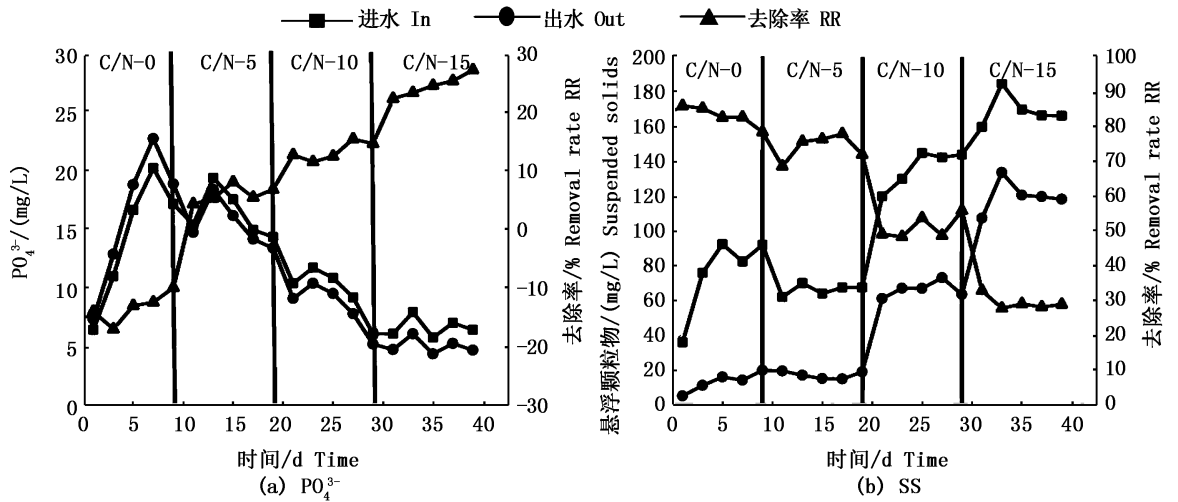


图4 碳氮比对 BFT 反应器  $PO_4^{3-}$  和 SS 的处理效果

Fig.4 Effect of carbon nitrogen ratio on  $PO_4^{3-}$  and SS pollutant in biofloc reactor

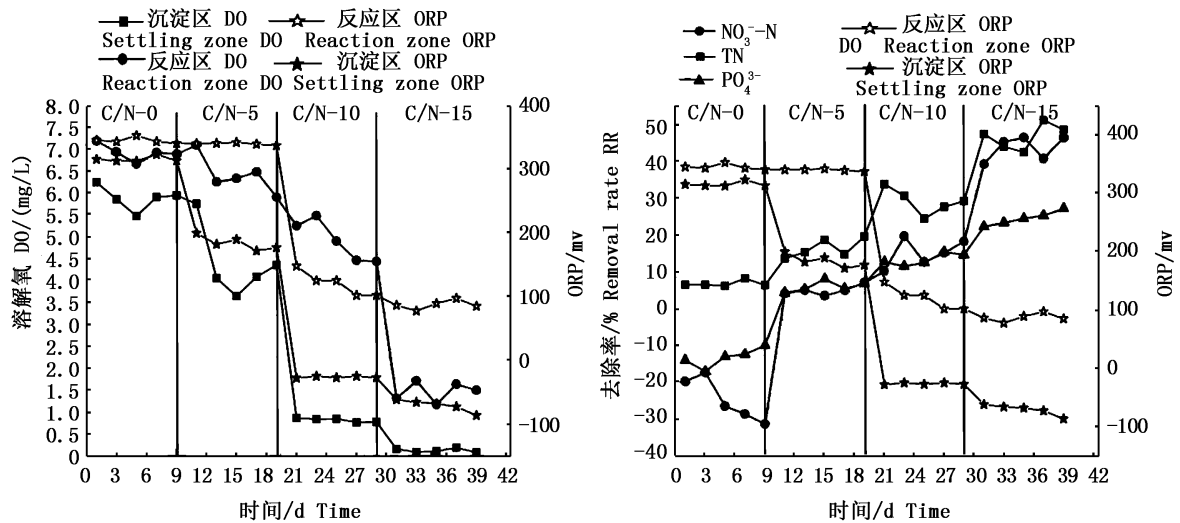


图5 ORP 值与 DO、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 去除率之间的关系

Fig.5 The relationship between the ORP value and the removal rate of DO, TN, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>

2.6 鳗鲡养殖结果

应用以 BFT 反应器为唯一水处理核心的循环水养殖系统进行了 40 天的鳗鲡养殖,整个养殖过程中,鳗鲡生长正常,并且获得了很高的存

活率,BFT 反应器可以维持系统各项水质指标稳定。最终养殖情况如表 1 所示,养殖系统初始放养密度为 48.1 kg/m<sup>3</sup>,终末均重为 819 g,存活率高达 99.7%,增重率为 22.8%,饵料系数为 1.76。

表 1 整个系统的最终鳗鲡养殖情况

Tab.1 The whole system final culture of eel

初始均质量/g Initial average weight	终末均质量/g Final average weight	初始密度/ (kg/m <sup>3</sup> ) Initial density	终末密度/ (kg/m <sup>3</sup> ) Final density	成活率/% Survival rate	增重率/% Increasing weight rate	饵料系数 Feed conversion rate
667.1 ± 152.4	819.1 ± 202.1	48.1	58.63	22.8	99.7	1.76

3 讨论

3.1 碳氮比与 BFT 反应器的稳定性

BFT 反应器的稳定性和生物絮团的结构和沉降性能有关。生物絮团中丝状细菌占一定的比例,形成了生物絮团的骨架,菌胶团细菌等微生物产生多聚糖附着在上面,形成具有网状结构的絮体,当丝状菌数量过高时,絮团的沉降性能变差,严重时将出现污泥膨胀现象<sup>[8-13]</sup>。而絮团的沉降性能主要通过絮体体积指数(SVI)来表示,当 SVI 高于 150 mg/L 时,通常就认为发生了污泥膨胀<sup>[14]</sup>,污泥膨胀一旦发生,治理和恢复都很困难<sup>[15]</sup>,污泥膨胀的类型一般分为丝状菌膨胀和非丝状菌膨胀<sup>[16]</sup>。本文通过调节反应器碳氮比分别为 0、5、10 和 15 来探索反应器的废水处理能

力,实验过程发现,随着 C/N 的升高,絮体 SVI-30 逐渐升高,系统的稳定性也变差,反应器在低碳氮比(C/N ≤ 5)条件下,平均 SVI-30 的值都是低于 150 mg/L 标准值,此时的泥水分离效果明显,沉淀区上清液清澈。当 C/N = 10、C/N = 15 时,平均 SVI-30 的值远远高于 150 mg/L 标准值,但在 C/N = 10 时,上清液未出现浑浊,说明此时反应器的稳定性较好,并未出现絮团膨胀,泥水并未出现流失,出现了污泥微膨胀状态<sup>[17]</sup>。当 C/N = 15 时,沉降性能最差,但此时反应器对 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的去除效果最佳,分析可知在 C/N = 15 时,反应器处于厌氧的环境下,充足的碳源补给更有利于系统的反硝化进行。BFT 反应器需从脱氮效果和沉降性能之间综合评价,去选择一个合适的碳氮比。

3.2 碳氮比对反应器的同步硝化反硝化的影响

研究表明,硝化和反硝化作用在有氧条件下

可以在一个反应容器内进行,这个过程通常被称为同步硝化反硝化(Simultaneous Nitrification and Denitrification,简称SND)<sup>[18]</sup>,因此,同步硝化反硝化(SND)是指在有氧条件下,在同一生物反应器内同时发生硝化和反硝化的过程,直接把硝化反应控制在 $\text{NO}_2^-$ -N阶段,阻止 $\text{NO}_2^-$ -N的进一步硝化,然后直接进行反硝化,将水体中的含氮化合物直接以氮氧化物或氮气的形式排出去<sup>[19]</sup>。本研究发现BFT反应器在实验过程中出现了SND现象,同时在一定程度上,反应器随着碳氮比升高,出水TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 也越低,去除率也越高,同步硝化反硝化现象也越明显,这与赵玲等<sup>[20]</sup>研究获得的结果相似。对于BFT反应器的SND而言,还需结合反应器更多其他的工艺参数进行共同调控,以达到进一步提高反应器的水处理能力的目的。

### 3.3 不同碳氮比与反应器的ORP值和DO之间的关系

ORP值作为一个衡量氧化还原能力的变量,受环境影响和客观条件限制颇大,尤其是在污水处理中受到水质等客观环境的影响很大<sup>[21]</sup>。由图5可知,随着碳氮比的升高,系统的反应区和沉淀区的DO和ORP值都出现了不同程度的下降,ORP值与C/N呈负相关关系,与DO呈正相关关系;ORP值也是衡量系统反硝化能力的一个指标<sup>[22]</sup>,其与反应器的TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 去除率呈负相关关系。实验发现,在C/N $\geq$ 10时,沉淀区DO的质量浓度在0.07~0.86 mg/L变动时,ORP的变化范围是-25.4~-87.00 mV,分析原因为此时沉淀区处于缺氧和厌氧环境,在持续充足的碳源输入时,显著提高了系统的反硝化能力。因此,ORP值作为一个衡量氧化还原能力的变量和系统反硝化能力的表现,其可为BFT反应器脱氮实时控制参数的控制提供理论依据和现实参考。

## 4 结论

(1) 随着C/N的升高,SVI-30的值越高,反应器絮体的沉降性能越差,系统稳定性也越差。

(2) BFT反应器表现出同步硝化反硝化的能力,并随着C/N的升高,同步硝化反硝化现象也越明显。

(3) 随着C/N的升高,反应器对TN、 $\text{NO}_3^-$ -N

和 $\text{PO}_4^{3-}$ 的去除效果逐渐提高,在C/N=15时去除效果最佳,平均去除率分别为46.6%、43.49%和24.4%,但TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除效果在高C/N时受到抑制。

(4) 在BFT反应器中,反应器的ORP值与反应器的C/N呈负相关关系,与反应器的TN、 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{PO}_4^{3-}$ 去除率呈负相关关系,可作为BFT反应器优化和反硝化特征的实时控制参数。

### 参考文献:

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 中国农业出版社, 2017.  
Fisheries and fisheries administration of the Ministry of agriculture. China fisheries statistics yearbook [M]. China Agriculture Press, 2017.
- [2] 刘文畅, 罗国芝, 谭洪新, 等. 生物絮凝反应器对中试循环水养殖系统中污水的处理效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8):184-191.  
LIU W C, LUO G Z, TAN H X, et al. Treatment efficiency of wastewater in pilot test of biofloc reactor in recirculating aquaculture systems[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(8):184-191.
- [3] 卢炳国, 王海英, 谢骏, 等. 不同C/N水平对草鱼池生物絮团的形成及其水质的影响[J]. 水产学报, 2013, 37(8):1220-1228.  
LU B G, WANG H Y, XIE J, et al. Effect of C/N ratio on bioflocs formation and water quality in zero-water exchange grass carp tanks [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(8):1220-1228.
- [4] ASADUZZAMAN M, RAHMAN M M, AZIM M E, et al. Effects of C/N ratio and substrate addition on natural food communities in freshwater prawn monoculture ponds [J]. Aquaculture, 2010, 306(1/4):127-136.
- [5] GOLDMAN J C, CARON D A, DENNETT M R. Regulation of gross growth efficiency and ammonium regeneration in bacteria by substrate C: N ratio [J]. Limnology and Oceanography, 1987, 32(6):1239-1252.
- [6] LU L, TAN H, LUO G, et al. The effects of Bacillus subtilis on nitrogen recycling from aquaculture solid waste using heterotrophic nitrogen assimilation in sequencing batch reactors[J]. Bioresource Technology, 2012, 124(11):180-185.
- [7] 国家环境保护总局编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.  
State Environmental Protection Administration Committee of the State Administration of environmental protection, water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [8] 彭永臻, 郭建华, 王淑莹, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J]. 环境科学,

- 2008, 29(12):3342-3347.
- PENG Y Z, GUO J H, WANG S Y, et al. Energy saving achieved by limited filamentous bulking under low dissolved oxygen: derivation, originality and theoretical basis [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3342-3347.
- [9] 郝晓地, 朱景义, 曹秀芹. 污泥膨胀形成机理及控制措施研究现状和进展[J]. *环境工程学报*, 2006, 7(5):1-9.
- HAO X D, ZHU J Y, CAO X Q, et al. Situation and development of bulking sludge study: General theories and control measures [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2006, 7(5):1-9.
- [10] 李彤鲜, 费学宁, 池勇志, 等. 活性污泥丝状膨胀早期预警的研究进展[J]. *环境化学*, 2012, 31(8):1151-1156.
- LI T X, FEI X N, CHI Y Z, et al. The research advance on early warning of filamentous sludge bulking [J]. *Environmental Chemistry*, 31(8):1151-1156.
- [11] 孙寓皎, 王勇, 黄霞. MBR 系统内丝状菌污泥膨胀的分子生态学解析[J]. *环境科学*, 2004, 25(s1):56-58.
- SUN Y J, WANG Y, HUANG X. Molecule Ecology Analysis of Filamentous Bacterium Sludge Bulking in MBR [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(s1):56-58.
- [12] 刘旭亮, 彭永臻, 彭赵旭, 等. 高曝气量引发的活性污泥粘性膨胀研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(17):1-5.
- LIU X G, PENG Y Z, PENG Z X, et al. Viscous activated sludge bulking caused by high aeration rate [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(17):1-5.
- [13] 孔秀琴, 陈明义, 王长智. 活性污泥丝状膨胀的模拟试验与控制对策研究[J]. *微生物学杂志*, 2004, 24(6):31-34.
- KONG X Q, CHEN M Y, WANG C Z. Simulation experiment and countermeasure control of filamentous dilation in activated sludge [J]. *Journal of Microbiology*, 2004, 24(6):31-34.
- [14] KRUIT J, HULSBEEK J, VISSER A. Bulking sludge solved?! [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2002, 46(1/2):457-464.
- [15] 白璐, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧条件下活性污泥沉降性的研究[J]. *工业水处理*, 2006, 26(5):54-56.
- BAI L, WANG S Y, PENG Y Z, et al. Study on the settling ability of activated sludge under low DO condition [J]. *Industrial water treatment*, 2006, 26(5):54-56.
- [16] 陈滢, 彭永臻, 杨向平, 等. 低溶解氧 SBR 除磷工艺研究[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(8):40-42.
- CHEN Y, PENG Y Z, YANG X P, et al. Study on Phosphorus Removal Process by Using SBR at Low DO Level [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(8):40-42.
- [17] 左金龙, 彭永臻, 姜安玺, 等. 低溶解氧污泥微膨胀污染物去除性能的研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2009, 25(3):1345-1349.
- ZUO J L, WANG S Y, PENG Y Z, et al. Study on pollutants removal performance with low DO and sludge micro-bulking [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 25(3):1345-1349.
- [18] YANG S, YANG F. Nitrogen removal via short-cut simultaneous nitrification and denitrification in an intermittently aerated moving bed membrane bioreactor. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 195(1):318-323.
- [19] 许育新, 孙鹏, 喻曼, 等. 同步硝化反硝化脱氮在水产养殖废水处理中的应用[J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(7):1119-1121.
- XU Y X, SUN P, YU M, et al. Application of simultaneous nitrification and denitrification in aquaculture wastewater treatment [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2015, 56(7):1119-1121.
- [20] 赵玲, 张之源. 复合 SBR 系统中同步硝化反硝化现象及其脱氮效果[J]. *工业用水与废水*, 2002, 33(2):4-6.
- ZHAO L, ZHANG Z Y. Phenomena of simultaneous nitrification and denitrification and denitrification effect on a combined biofilm & sequencing batch reactor system [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2002, 33(2):4-6.
- [21] 申福维, 阳春, 张智, 等. 循环式活性污泥法氧化还原电位的生产性研究[J]. *水处理技术*, 2011, 37(1):55-57, 61.
- SHEN F W, YANG C, ZHANG Z, et al. Screening of a bioflocculant-producing strain of HNS wastewater-degrading and application study [J]. *Water treatment technology*, 2011, 37(1):55-57, 61.
- [22] SABY S, DJAFER M, CHEN G H. Effect of low ORP in anoxic sludge zone on excess sludge production in oxic-settling-anoxic activated sludge process. [J]. *Water Research*, 2003, 37(1):11-20.



## Effect of carbon-nitrogen ratio-nitrogen ratio (C/N) on the water quality in biofloc reactor

CHEN Wei<sup>1</sup>, TAN Hongxin<sup>1,2,3</sup>, LUO Guozhi<sup>1,2,3</sup>, SUN Dachuan<sup>1,2,3</sup>, LIU Wenchang<sup>1</sup>

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Biofloc reactor was used as a key unit of RAS (Recirculating Aquaculture System). The effects of different C/N on the wastewater treatment of biofloc reactor were investigated, and four different gradients of C/N ratio (DOC, Dissolved Organic Carbon; DIN, Dissolved Inorganic Nitrogen, C/N = 0, 5, 10 and 15) were set. The experimental results showed that: when C/N = 0 (without adding carbon source), the efficiencies of nitrogen and phosphorus removal in the reactor were not obvious, and the accumulation of  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$  appeared. The increase of C/N, the nitrogen and phosphorus removal efficiencies of the reactor were increasing with the rising C/N. The removal efficiency was the best when C/N = 15 ( $P < 0.05$ ), and the removal rate (RR) of TN,  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$  (RR) were 46.6%, 43.49% and 24.4%, respectively. During the whole experiment, when C/N = 0 and C/N = 5, the removal efficiencies of SS, TAN and  $\text{NO}_2^-$ -N were significantly higher than that of C/N = 10 and C/N = 15 ( $P < 0.05$ ). The stability of the reactor gradually became poor with the increasing C/N, and the highest C/N of reactor could be 15. When C/N was 5, the volume index of floc reactor (SVI-30) was sostenuto less than 150 mg/L, and floc expansion did not appear. When  $10 \leq \text{C/N} \leq 15$ , the stability of the reactor became worse, but it had no effect on the efficiency of nitrogen and phosphorus removal in the reactor. The ORP and DO values were negatively related to the C/N of the reactor, and they can be used as the parameters of the BFT reactor to optimize the process. Overall, the BFT reactor had good water treatment efficiencies on SS, TAN and  $\text{NO}_2^-$ -N under low C/N conditions, when C/N was more than 10, it had a good water treatment performance on TN,  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$ , with simultaneous nitrification and denitrification (SND) and phosphorus removal. For BFT reactor used as a key device of RAS, this study can provide reference for further research and application.

**Key words:** C/N; water treatment; biofloc technology; recirculating aquaculture system; aquaculture