

# 不同放苗密度凡纳滨对虾生物絮团 养殖的环境和产出效应

张许光<sup>1,2</sup> 赵培<sup>2</sup> 王国成<sup>3</sup> 王秀华<sup>2</sup> 潘鲁青<sup>1</sup> 黄捷<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>中国海洋大学,青岛 266003)

(<sup>2</sup>农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所,青岛 2660713)

(<sup>3</sup>青岛农业大学,266109)

**摘要** 本研究尝试将生物絮团养殖技术(Bio-floc aquaculture technology, BFA)应用到凡纳滨对虾高密度养殖系统中,研究生物絮团在凡纳滨对虾不同放苗密度下的水质调控、对虾生长及存活等方面的作用效果。试验将 200、400 和 600 尾/m<sup>2</sup>的放苗密度分为传统养殖组(TF200、TF400 和 TF600)和絮团养殖组(BFA)(BF200、BF400 和 BF600)共 6 组,分别在 18 个室内水泥池中进行,其中 BFA 组通过添加益生菌和赤砂糖培养生物絮团,并在养殖过程中极少换水,而传统养殖组进行传统换水养殖管理。经过 113d 的养殖试验,随着放苗密度的增加,水质、对虾存活率和对虾特定增长率逐步下降,然而 BFA 在 400 尾/m<sup>2</sup>的凡纳滨对虾封闭式养殖中有良好效果。与 400 尾/m<sup>2</sup>的传统养殖组(TF400)相比,400 尾/m<sup>2</sup>的 BFA 组(BF400)在养殖过程中生物絮团平均形成量提升 3.25 倍;水体中的亚硝酸氮和氨氮平均含量分别降低 67.9%和 72.7%,而用水量只有传统养殖组的 33%左右;对虾的体重、存活率、特定增长率及单位产量分别提高了 14.5%、156.3%、2.4%和 194.1%;400 尾/m<sup>2</sup>的 BFA 组对虾单位产量达到 4.01±0.94 kg/m<sup>2</sup>,具有最好的环境和产出效应。

**关键词** 生物絮团技术 凡纳滨对虾 封闭养殖系统 养殖密度

**中图分类号** S967.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)03-0111-09

## The environmental and production effect of bio-floc aquaculture of *Litopenaeus vannamei* at different stocking densities

ZHANG Xu-guang<sup>1,2</sup> ZHAO Pei<sup>2</sup> WANG Guo-cheng<sup>3</sup>  
WANG Xiu-hua<sup>2</sup> PAN Lu-qing<sup>1</sup> HUANG Jie<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup> Ocean University of China, Qingdao 266003)

(<sup>2</sup> Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

(<sup>3</sup> Qingdao Agricultural University, 266109)

**ABSTRACT** A 113-day experiment was conducted to investigate the efficiency of bio-floc aquaculture technology (BFA) for water quality control, disease resistance and growth of *Litopenaeus vannamei*.

公益性行业(农业)科研专项经费(201103034)和现代农业产业技术体系专项资金(CARS-47)共同资助

\* 通讯作者。E-mail: huangjie@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85823062

收稿日期:2012-05-14;接受日期:2012-06-07

作者简介:张许光(1986-),男,硕士研究生,主要从事生物絮团研究。E-mail: xuguangplant@163.com, Tel: 15254295469

*naeus vannamei* in intensive farming systems at different stocking densities. The experiment was carried out on traditional farming treatments (TF200, TF400, and TF600) and BFA farming treatments (BF200, BF400, and BF600) at stocking densities of 200, 400 and 600 ind/m<sup>2</sup>, respectively. The six groups of shrimp were kept in 18 indoor cement tanks. Bio-flocs were developed in BFA farming tanks by adding sucrose and probiotic with very little water exchange during the experiment. Traditional farming treatments were cultured with traditional methods. It was found that the water quality, special growth rate and survival rate of the shrimp deteriorated or reduced with the increase of stocking density in all treatments. However, BFA at stocking density of 400 ind/m<sup>2</sup> revealed advantage in closed farming systems of *L. vannamei*, compared with the traditional farming at the same stocking density (TF400). In BF400, the bio-floc volume increased by 3.25-fold, while the concentrations of nitrite-N and ammonia-N decreased by 67.9% and 72.7%, respectively; Water consumption decreased about 33%, and body weight, survival, special growth rate and production per unit of *L. vannamei* increased by 14.5%, 156.3%, 2.4%, and 194.1%, respectively. The production of BFA farming at stocking density of 400 ind/m<sup>2</sup> (BF400) was 4.01±0.94 kg/m<sup>2</sup>, showing the best environmental and production effect.

**KEY WORDS** Bio-floc technology      *Litopenaeus vannamei*      Closed farming systems  
Stocking density

凡纳滨对虾 *Litopenaeus vannamei* 自 1988 年引入我国,养殖规模不断扩大,养殖密度逐年提高,随之而来的负面影响也日益突出(陈亚坤等 2011)。高密度对虾养殖池内常因对虾残饵、粪便以及尸体等的腐败、分解,使营养元素 N、P 等转化为水体中的有害物质氨氮、亚硝酸氮等,引起水质恶变,导致对虾发病甚至死亡,严重阻碍了对虾养殖业的发展(杨世平等 2006)。为了降低养殖池内的氨氮、亚硝酸氮浓度,人们通常将养殖废水通过大换水排放到环境中,这不仅提升了养殖用水和养殖成本,还使废物在环境中不断积累,严重破坏了养殖环境,对海洋生态系统的结构与功能也产生了严重的影响(Piedrahita 2003)。

基于生物絮团养殖技术(Bio-floc aquaculture technology, BFA)和生物安全性的零交换水养殖系统(Bullis *et al.* 2000;Burford *et al.* 2004)可解决上述难题。通过添加碳源和益生菌于养殖水体中,可提高水体的 C/N 比,促使水体中的异养微生物大量繁殖而形成生物絮团,不仅可以降低养殖水体的氨氮和亚硝酸氮水平,而且可以提高饵料的利用率,实现营养物质的循环利用,增强宿主对疾病的抵抗力(Crab *et al.* 2010; Hari *et al.* 2004;De Schryver *et al.* 2008)。生物絮团技术在国外水产养殖尤其是罗非鱼养殖上的应用已较为成熟,但在国内对虾养殖上的应用仍处于探索阶段,因此研究生物絮团技术在对虾养殖,尤其是凡纳滨对虾高密度精养中的应用对国内对虾养殖业的发展具有重要意义。

本实验室在前期研究中已经证实采用生物絮团技术,在养殖水体中合理添加碳源可有效调控对虾养殖水质和提升对虾存活率(邓应能 2012;Zhao *et al.* 2012)。在此基础上,在凡纳滨对虾不同密度精养试验中添加碳源和益生菌,整个养殖过程尽量少换水,研究生物絮团对养殖水质、对虾生长以及存活的影响,探索生物絮团技术应用用于凡纳滨对虾封闭式养殖中的适当养殖密度,为生物絮团技术在对虾养殖中的有效应用提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验场地

试验于 2011 年 7 月 15 日~11 月 4 日(共 113 d)在山东省青岛市宝荣水产科技发展有限公司 4 号养殖大

棚进行。试验池为18个水泥养殖试验池( $4\text{ m}^2 \times 0.7\text{ m}$ ),有独立的给排水系统。每池底部设有 $1\ 200\text{ 孔}/\text{m}^2$ 微孔增氧管( $\text{O}1.5\text{ cm} \times 4\text{ m}$ ),池内四周设有4套气水流循环装置,用于搅拌水体并延长气泡在水体中的停留时间。试验用海水取自蓄水池。

## 1.2 试验材料

凡纳滨对虾 *L. vannamei* 于2011年7月14日购自山东日照某育苗场,平均体长 $0.78 \pm 0.06\text{ cm}$ ,平均体重 $0.009\ 2 \pm 0.001\ 0\text{ g}$ ,经对虾白斑综合征病毒(WSSV)现场快速高灵敏检测试剂盒检测为阴性,用浓度为 $150\text{ g}/\text{m}^3$ 的甲醛溶液药浴20 s后,按不同的放养密度布入各试验池。对虾饵料为某牌对虾配合饵料,粗蛋白含量为42%。有益菌制剂为某商品利生活菌,主要成分为枯草芽孢杆菌、假单胞菌、硝化细菌和反硝化细菌,总菌数为 $10^9\text{ CFU}/\text{g}$ 。有机碳源为某牌赤砂糖,含糖量为99.45%。

## 1.3 试验设计与管理

试验按200、400和600尾/ $\text{m}^2$ 的放苗密度,分别设3个传统养殖组(TF200、TF400和TF600)和3个絮团养殖组(BF200、BF400和BF600),每组设3个平行池,分别按表4-1进行相应的养殖管理,养殖期间及时清除养殖池内的残饵和死虾,每天投喂2~4次,体长1~3 cm时,投饵量占体重的7.0%~10.0%;体长3~7 cm时,投饵量占体重的4.5%~7.0%;体长7~10 cm时,投饵量占体重的3.0%~4.5%;体长大于10 cm时,投饵量占体重的2.0%~3.0%。为准确掌握投饵量,每组设置1个饲料台,观察对虾摄食情况,用以调整投饵量。24 h连续充气。

表1 不同处理组的养殖管理

Table 1 Daily aquaculture management of different groups

编号 No.	放苗密度 Stocking density (ind/ $\text{m}^2$ )	分组 Group	养殖管理 Aquaculture management
TF200	200	传统养殖 Traditional aquaculture	0~30 d,不换水;31~60 d,每3 d换水1/3;60 d后,每2 d换水1/3,常规饲料投喂
BF200	200	絮团养殖 Bio-floc aquaculture	0~60 d不换水,60 d后,每5 d换水1/3,常规饲料投喂,并按饲料投喂量的70%添加赤砂糖,每10 d按 $10\text{ g}/\text{m}^3$ 添加利生活菌
TF400	400	传统养殖 Traditional aquaculture	0~30 d,不换水;31~60 d,每3 d换水1/3;60 d后,每2 d换水1/3,常规饲料投喂
BF400	400	絮团养殖 Bio-floc aquaculture	0~60 d不换水,60 d后,每5 d换水1/3,常规饲料投喂,并按饲料投喂量的70%添加赤砂糖,每10 d按 $10\text{ g}/\text{m}^3$ 添加利生活菌
TF600	600	传统养殖 Traditional aquaculture	0~30 d,不换水;31~60 d,每3 d换水1/3;60 d后,每2 d换水1/3,常规饲料投喂
BF600	600	絮团养殖 Bio-floc aquaculture	0~60 d不换水,60 d后,每5 d换水1/3,常规饲料投喂,并按饲料投喂量的70%添加赤砂糖,每10 d按 $10\text{ g}/\text{m}^3$ 添加利生活菌

## 1.4 絮团形成量的测定

养殖期间,每15 d左右从每个试验池的4个边角和池中央的中层水各取1 000 ml,混匀,再从中取1 000 ml于Nalgene锥形沉淀斗中静置15 min,记录絮团形成量,用生物显微镜(DH-2,OLYMPUS)观察絮团沉淀物的组成成分,并通过显微视频成像装置(LY-WN-HPCCD,成都励扬)拍照。

## 1.5 水质指标测定

养殖期间,隔天用 YSI566 便携式多参数水质测量仪(YSI,美国)在 05:30 和 17:30 测定各养殖池的温度、盐度、溶氧和 pH 等常规水质指标;每 15 d 左右用 YSI9500 便携式水质分析仪并结合氨氮和亚硝酸氮检测试剂盒(YSI,美国)测定各养殖水体的氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和亚硝酸氮(NO<sub>2</sub>-N)含量。

## 1.6 生长指标测定

养殖 113 d 后,排干试验池水收获对虾。每池取虾 50 尾用电子天平(AL104,梅特勒)测量各凡纳滨对虾体重,用电子台秤称量各养殖池的对虾收获总产量,按以下公式计算对虾存活率、对虾特定增长率以及对虾单位产量:

$$\text{存活率}(\%) = \text{对虾单位面积收获数量} / \text{对虾单位面积放苗量} \times 100$$

$$\text{特定增长率}(\%) = [\ln(\text{对虾收获个体重量}) - \ln(\text{对虾初始个体重量})] / \text{养殖天数} \times 100$$

$$\text{单位产量}(\text{kg}/\text{m}^2) = \text{对虾收获总重量} / \text{放养面积}$$

## 1.7 碳源添加量的计算

根据 Avnimelech(1999)总结的生物絮团养殖系统的 C/N 比公式计算本试验的絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 所需要的碳源添加量:

$$\Delta N = \text{Feed} \times \text{Protein feed } \% \times \text{N protein } \% \times \text{N excretion } \%$$

$$\Delta N = \Delta \text{CH} \times \text{C } \% \times \text{E} \times [\text{C}/\text{N}]_{\text{mic}-1}$$

[C/N]<sub>mic</sub> 为异养微生物自身的元素组成,约为 5(Gaudy *et al.*, 1980); $\Delta \text{CH}$  为碳源添加量;C% 为添加碳源的含碳量,约为 50%;E 为异养微生物转化有机物的效率,约为 50%;Feed 为饵料投喂量;Protein feed % 为饵料的粗蛋白含量;N protein % 为蛋白质的含氮量,约为 16%;N excretion % 为饵料中溶解到水体中的氮,约为 50%,由此可以算出要消耗蛋白含量为 42% 的对虾饵料溶解到水体中的氮,所需碳源添加量约为饵料投喂量的 70%。

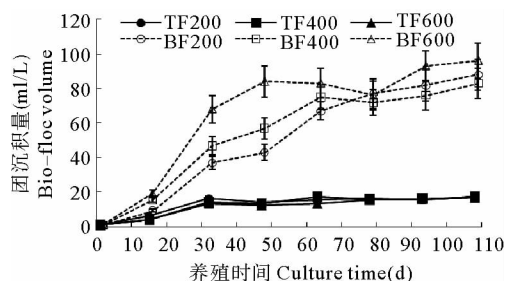
## 1.8 数据统计分析

采用 SPSS 13.0 对数据进行单因素方差分析、Turkey 多重检验,以  $P < 0.05$  作为差异显著水平判定条件。

## 2 结果

### 2.1 生物絮团形成

养殖期间用沉淀漏斗静置水样 15 min 后,读取各池水体中悬浮物的沉积量,由此判断生物絮团的形成情况。从各组水体中悬浮物沉积量趋势可以看出(图 1),絮团养殖组(BF)的沉积量明显高于传统养殖组(TF),105 d 时,BF200、BF400、BF600 的絮团沉积量分别比相应的传统养殖组提升了 4.12 倍、3.76 倍和 4.66 倍,差异显著( $P < 0.05$ ),表明生物絮团养殖组通过红糖的添加,养殖水体中形成了大量的生物絮团。传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 在 0~31 d 期间沉积量不断提升,在 31



TF200、TF400、TF600 分别为传统养殖组 200、400、600 ind./m<sup>2</sup>; BF200、BF400、BF600 分别为絮团养殖组 200、400、600 ind./m<sup>2</sup>。TF200, TF400 and TF600 are traditional farming groups with the farming density of 200, 400, and 600 ind./m<sup>2</sup>, respectively; BF200, BF400, and BF600 are the bio-floc farming groups with the farming density of 200, 400, and 600 ind./m<sup>2</sup>, respectively. Same in the follows

图 1 传统养殖组和絮团养殖组各组水体中悬浮物沉积量的动态变化  
Fig. 1 Dynamic change in deposition of the suspending floccules in the culture tanks

~107 d 期间稳定在 12.60~17.45 ml/L 的较低水平,不同养殖密度组之间的沉积量最终无显著差异( $P>0.05$ );絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 在 0~63 d 期间,生物絮团形成量随养殖密度的增加而持续快速提升,且各组间差异显著( $P<0.05$ ),在 77~108 d 期间各组间的生物絮团形成变化无显著差异( $P>0.05$ ),稳定在 74~96 ml/L 的较高水平。

显微镜下观察传统养殖组和絮团养殖组中生物絮团的形态结构。传统养殖组水体中的悬浮物多为对虾粪便混有少数藻类和微生物等(图 2-a);絮团养殖组所形成的生物絮团与传统养殖组水体中的悬浮物相比,絮状团块更大,数量更多,其中的生物数量更为丰富,可发现大量的藻类、原生动物和微生物等(图 2-b)。

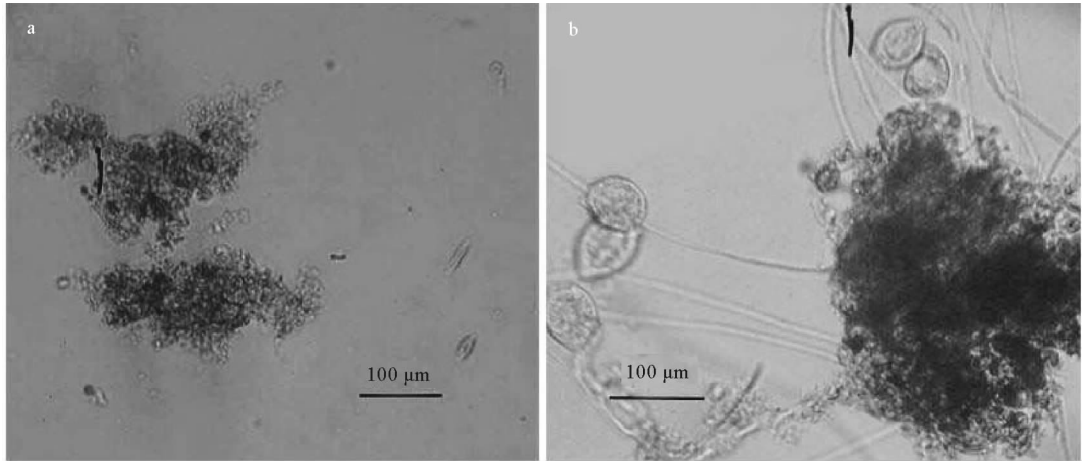


图 2 传统养殖组(a)和絮团养殖组(b)中水体的悬浮物在显微镜下的形态

Fig. 2 Morphology of the suspending floccules in the traditional farming tanks (a) and the bio-floc farming tanks (b)

## 2.2 水质检测

### 2.2.1 pH 和溶解氧

生物絮团养殖条件对水体的 pH 和溶解氧影响较大,对 113 d 养殖过程中的传统养殖组和絮团养殖组的 pH 和溶解氧进行了测定(表 2)。传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 的溶解氧随养殖密度的增加而降低,各组间差异显著( $P<0.05$ );絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的溶解氧随养殖密度的增加而降低,各组间差异显著( $P<0.05$ ),并显著低于各传统养殖组( $P<0.05$ );传统养殖各组的 pH 在 8.33~8.54 范围变动,各组间无显著差异( $P>0.05$ );絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的 pH 养殖密度的增加而降低,各组间差异显著( $P<0.05$ ),并显著低于各传统养殖组( $P<0.05$ )。

表 2 经 113 d 养殖试验水体的溶解氧和 pH 参数

Table 2 DO and pH measurements during the 113-day growth-out period for the treatments

养殖密度 Stocking density (ind./m <sup>2</sup> )	传统养殖 Traditional farming	溶解氧(mg/L) DO	pH	絮团养殖 Bio-floc farming	溶解氧(mg/L) DO	pH
200	TF200	6.78±0.83	8.47±0.15	BF200	4.47±0.64	8.15±0.21
400	TF400	5.49±0.75	8.38±0.17	BF400	4.04±1.23	8.02±0.19
600	TF600	4.37±0.85	8.42±0.13	BF600	3.77±1.57	7.82±0.31

### 2.2.2 养殖水体中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的周期变化

生物絮团形成后可明显降低养殖水体中的  $\text{NO}_2\text{-N}$  的含量(图3)。传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 在 0~30 d 期间的亚硝酸氮含量保持在 0.003~0.243 mg/L 的较低水平,在养殖 46~92 d,随着饲料投喂量增加各组亚硝酸氮含量急剧上升,并随养殖密度的增加,上升幅度加大,养殖 107 d 时 TF200、TF400 和 TF600 的亚硝酸氮含量分别达  $4.42 \pm 0.53$ 、 $6.33 \pm 0.74$  和  $7.46 \pm 1.02$  mg/L;而絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的亚硝酸氮含量的升幅较相应的传统养殖组显著降低( $P < 0.05$ ),平均值分别降低了 62.8%、67.9% 和 45.1%,养殖 108 d 时 BF200 和 BF400 组的亚硝酸氮含量分别为  $1.74 \pm 0.19$  和  $1.68 \pm 0.10$  mg/L, BF600 的亚硝酸氮含量较高,达  $3.78 \pm 0.59$  mg/L。

### 2.2.3 养殖水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的周期变化

生物絮团形成后可明显降低养殖水体中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  的含量(图4)。传统养殖组在 0~14 d 期间的氨氮含量保持在 0.03~0.47 mg/L 的较低水平,15~30 d 时随着饲料投喂量的增加氨氮含量呈快速上升,31~107 d 氨氮含量仍呈持续上升趋势,上升幅度与养殖密度呈正相关,养殖 107 d 时 TF200、TF400 和 TF600 组的氨氮含量分别高达  $4.74 \pm 0.53$ 、 $7.28 \pm 0.93$  和  $9.48 \pm 1.18$  mg/L;絮团养殖组氨氮含量较传统养殖组显著降低( $P < 0.05$ ),BF200、BF400 和 BF600 各组的平均值比相应的传统养殖组分别降低了 67.5%、72.7% 和 62.2%,养殖 108 d 时 BF200 和 BF400 组的氨氮含量分别低至  $1.84 \pm 0.20$  和  $2.04 \pm 0.24$  mg/L, BF600 的氨氮含量为  $3.73 \pm 0.66$  mg/L。

## 2.3 生长测定

### 2.3.1 对虾体重

养殖 113 d 后测量凡纳滨对虾的生物学体重(图5)。传统养殖组和絮团养殖组的组间对虾体重差异显著( $P < 0.05$ ),不同养殖方式的对虾体重均随养殖密度的提高而降低;与传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 相比,絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的对虾体重分别提升了 14.5%、13.9% 和 5.4%;其中 BF200 对虾体重  $20.34 \pm 1.09$  g 和 BF400 的对虾体重  $14.57 \pm 0.59$  g,显著高于 BF600 的对虾体重  $10.26 \pm 0.57$  g,表明生物絮团技术可显著提高对虾生长。

### 2.3.2 对虾存活率

养殖 113 d 后统计对虾的存活率(图6)。传统养殖组和絮团养殖组间的组间对虾存活率差异显著( $P < 0.05$ ),并随养殖密度的增加而降低;与传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 相比,絮团养殖组 BF200、BF400

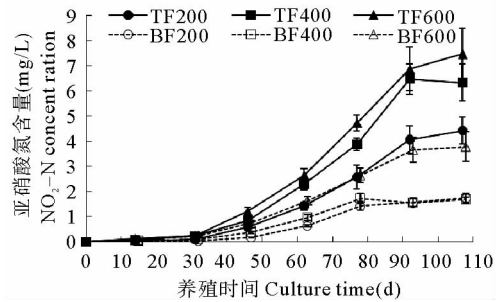


图3 传统养殖组和絮团养殖组养殖水体的亚硝酸氮含量变化

Fig. 3 Concentration of nitrite-N in the traditional farming tanks and bio-floc farming tanks

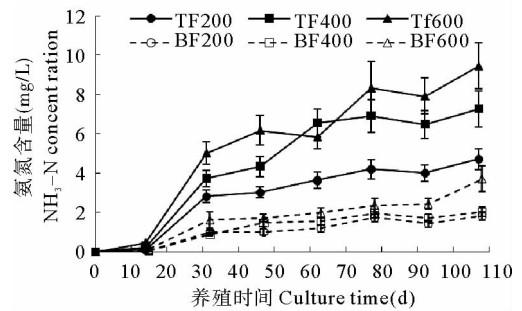


图4 传统养殖组和絮团养殖组中各组养殖水体的氨氮含量变化

Fig. 4 Concentration of ammonia-N in the traditional farming tanks and bio-floc farming tanks

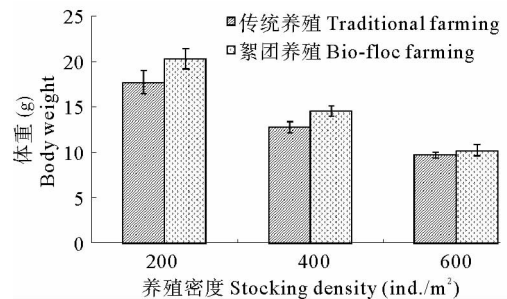


图5 传统养殖组和絮团养殖组收获对虾的体重

Fig. 5 Body weight of shrimp in different treatments upon harvest

和 BF600 的对虾存活率分别提升了 27.0%、156.3%和 102.8%，表明生物絮团技术可显著提高养殖对虾存活率；其中 BF200 的对虾存活率  $75.3\% \pm 11.59\%$  和 BF400 的对虾存活率  $68.3\% \pm 13.32\%$  显著高于 BF600 的对虾存活率  $25.0\% \pm 22.34\%$ 。

### 2.3.3 对虾特定增长率

养殖 113 d 后测量凡纳滨对虾的生物学体重，计算各组对虾的特定增长率(图 7)。传统养殖组和絮团养殖组的组间对虾特定增长率差异显著( $P < 0.05$ )，不同养殖方式的特定生长率均随养殖密度的提高而降低；与传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 相比，絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的对虾特定增长率分别提升了 1.6%、2.4% 和 1.0%；其中 BF200 的对虾特定增长率  $6.98\% \pm 0.05\%/d$  和 BF400 的对虾特定增长率  $6.67\% \pm 0.04\%/d$  显著高于 BF600 的对虾特定增长率  $6.35 \pm 0.05\%/d$ ，表明生物絮团技术可显著提高对虾特定增长率。

### 2.3.4 对虾单位产量

养殖 113 d 后统计对虾的单位面积收获量(图 8)。传统养殖组和絮团养殖组间的对虾单位产量差异显著( $P < 0.05$ )；与传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 相比，絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的对虾单位产量分别提升了 46.4%、194.1%和 118.6%；其中 BF400 的对虾单位产量高达  $4.01 \pm 0.94 \text{ kg}/\text{m}^2$ ，显著高于 BF200 的对虾单位产量  $3.06 \pm 0.43 \text{ kg}/\text{m}^2$  和 BF600 的对虾单位产量  $1.53 \pm 0.35 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

## 3 讨论

生物絮团是养殖水体中以异养微生物为主体，经生物絮凝作用结合水体中有机质、无机质、原生动物和藻类等形成的絮状物。这些异养微生物将水中的氨氮和亚硝酸氮作为其生长繁殖所需氮源，与此同时，也需消耗大量有机碳源。由于异养微生物与单胞藻类等自养微生物不同，不能同化无机碳，其所需的碳源仅靠饵料投入和转化而释放到水中的有机碳是远远不够的，需要在养殖过程中合理补充有机碳源(Avnimelech 1999)。不同的异养微生物在养殖环境中可能扮演具有条件致病作用，当环境条件恶劣时，条件致病微生物可能大量繁殖而导致对虾发病。为了避免条件致病菌的危害，在添加糖类作为有机碳源的同时，本研究还通过定期在水体中添加有益菌，来保证生物絮团中的有益菌优势(Zhao *et al.* 2012)，本研究结果表明，通过向养殖水体中添加红糖和益生菌，能迅速促进养殖水体中形成生物絮团。

已有大量研究表明，放养密度对对虾养殖有着显著影响。衣萌萌等(2012)发现，密度胁迫是影响对虾养殖的一个重要环境因子，随着养殖密度的增大，对虾的活动频率和个体差异增大，耗氧和排氮增加，水质随密度的增加而下降，对虾生长也随密度的增加而下降。本研究表明，随着放养密度增加，水质、对虾特定增长率和存活

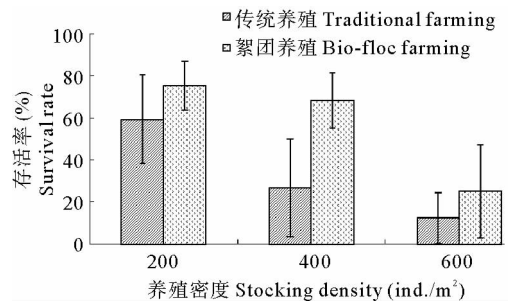


图 6 传统养殖组和絮团养殖组收获对虾的存活率

Fig. 6 Survival rate of shrimp in different treatments upon harvest

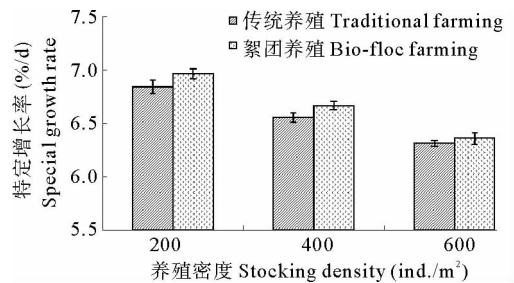


图 7 传统养殖组和絮团养殖组收获对虾的特定增长率

Fig. 7 Special growth rate of shrimp in different treatments upon harvest

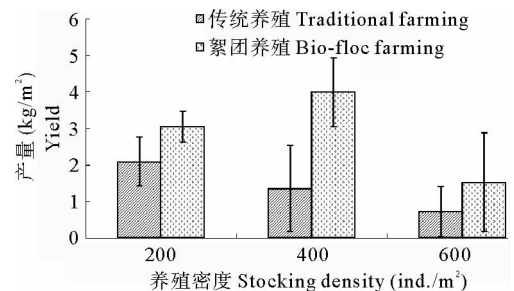


图 8 传统养殖组和絮团养殖组收获对虾的产量

Fig. 8 The yield of shrimp in different treatments

率逐步下降,这与侯文杰等(2010)和陈亚坤等(2011)的研究结果相一致。但生物絮团形成后,可使水体中异养微生物大量生长繁殖并通过硝化与反硝化作用(Liu *et al.* 2010)消耗掉水产饲料溶解到水体中的 N,可明显降低水体中的  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量(Avinimelech 1999),已有研究表明,生物絮团技术在罗非鱼养殖(Azim *et al.* 2008)和对虾养殖(Hari *et al.* 2006)中起到显著的除 N 作用,本研究的结果也表明,与传统养殖组相比,絮团养殖组水体中的氨氮和亚硝酸氮含量都有着显著降低( $P < 0.05$ ),其中与 TF200 和 TF400 组相比,BF200 和 BF400 组的  $\text{NO}_2\text{-N}$  含量分别降低了 62.8% 和 67.9%, $\text{NH}_3\text{-N}$  含量分别降低了 67.5% 和 72.2%,而用水量只有传统技术的 33% 左右,环境效益十分显著;但在 60 尾/ $\text{m}^2$  的凡纳滨对虾封闭式养殖中,由于放苗密度过高,饲料投喂量太大,溶氧降到了 4 mg/L 以下,本实验条件下的养殖手段已无法控制养殖水体的恶化,这种养殖密度未能取得理想效果。

生物絮团形成后,可被鱼虾摄食,Burford 等(2003)使用 $^{15}\text{N}$  标记铵盐肥水,证实了凡纳滨对虾对水体中的絮状物质的摄食。有益菌进入对虾肠道后通过代谢物或表面抗原刺激对虾的免疫系统,同时其与有害菌竞争营养和附着位点,保护对虾免受病原菌的侵染,进而增强对虾的非特异性免疫力,提升对虾存活率(Gatesoupe 1999; Ninawe *et al.* 2009)。Kuhn 等(2009)利用罗非鱼的养殖废水和红糖培养出生物絮团,并制成饲料投喂凡纳滨对虾,实验组生长优于对照组,证实了絮团可被对虾摄食并转化为自身蛋白质。Neal 等(2010)研究发现,在零交换水养殖系统中适宜凡纳滨对虾放养密度是 364 尾/ $\text{m}^2$ ,90d 后单位产量高达 4.10 kg/ $\text{m}^2$ ; Krummenauer 等(2011)通过生物絮团技术养殖凡纳滨对虾,120 d 后,350 尾/ $\text{m}^2$  的凡纳滨对虾单位产量高达 4.09 kg/ $\text{m}^2$ ,远高于 150 尾/ $\text{m}^2$  的 2.15 kg/ $\text{m}^2$  和 550 尾/ $\text{m}^2$  的 3.04 kg/ $\text{m}^2$ ;本实验室前期在 200L 的桶中进行的生物絮团养殖研究中,300 尾/ $\text{m}^2$  的放苗密度经 98 d 养殖,存活率为 83.8%,产量达 3.66 kg/ $\text{m}^2$ ,150 尾/ $\text{m}^2$  的产量为 2.14 kg/ $\text{m}^2$ (邓应能等 2012)。与前人的研究相比,本研究表明生物絮团技术在 400 尾/ $\text{m}^2$  的凡纳滨对虾封闭式养殖中有良好效果,对虾的体重、成活率、特定增长率及单位产量分别比传统养殖的对照组提升了 14.5%、156.3%、2.4% 和 194.1%,应用生物絮团技术按 400 尾/ $\text{m}^2$  放苗的凡纳滨对虾封闭式养殖中的对虾单位产量高达  $4.01 \pm 0.94$  kg/ $\text{m}^2$ ,这与许多前人的研究基本接近。

通过估测养殖过程中所消耗的饲料、赤砂糖、利生活菌、电能及水费等的成本,结合凡纳滨对虾的市价,可大体估算本研究中各组的产出效益(产出/成本)。其中传统养殖组 TF200、TF400 和 TF600 的产出效益大约为 3.5、1.9 和 0.9;而絮团养殖组 BF200、BF400 和 BF600 的产出效益大约为 3.0、2.8 和 0.8,可见放苗密度为 400 尾/ $\text{m}^2$  时,絮团养殖的产出效益高于传统养殖。

当凡纳滨对虾的放养密度为 400 尾/ $\text{m}^2$  时,应用生物絮团养殖技术可取得良好的环境效益和产出效益。

**致谢:**青岛宝荣水产科技有限公司董事长徐宝荣先生及公司相关人员为本研究的试验场地和条件方面提供了大量协助,并为凡纳滨对虾养殖技术提供指导,谨致衷心感谢。

## 参 考 文 献

- 邓应能,赵培,孙云忠,杨丛海,黄捷. 2012. 生物絮团在凡纳滨对虾封闭养殖试验中的形成条件及作用效果. 渔业科学进展, 33(2): 69-75
- 杨世平,邱德全. 2006. 对虾高密度养殖过程中水质的周期变化与分析. 水产科学, 25(9):459-462
- 陈亚坤,郭冉,夏辉,谷震. 2011. 密度胁迫对凡纳滨对虾生长、水质因子及免疫力的影响. 江苏农业科学, 39(3): 292-294
- 侯文杰,臧维玲,刘永士,张煜,杨明,侯文彬,戴习林,丁福江. 2010. 室内凡纳滨对虾养殖密度对水质与生长的影响. 安徽农业大学学报, 37(2): 284-289
- 衣萌萌,于赫男,林小涛,许忠能,周小壮. 2012. 密度胁迫下凡纳滨对虾的行为与生理变化. 暨南大学学报, 33(1): 81-86
- Avinimelech Y. 1999. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. Aquaculture 176(3-4):227-235
- Avinimelech Y, Kochba M. 2008. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using  $^{15}\text{N}$  tracing. Aquaculture 287(1-2): 163-168
- Azim ME, Little DC. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture 283(1-4): 29-35
- Bullis RA, Pruder GD. 2000. Controlled and biosecure production systems-evolution and integration of shrimp and chicken models. Proceedings of



- a Special Session of the World Aquaculture Society 27-30
- Burford MA, Thompson PJ, McIntosh RP and 2 other. 2003. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquaculture* 219(1-4): 393-411
- Burford MA, Thompson PJ, McIntosh RP and 2 others. 2004. The contribution of flocculated material to shrimp (*Litopenaeus vannamei*) nutrition in a high-intensity, zero-exchange system. *Aquaculture* 232(1-4): 525-537
- Crab R, Lambert A, Defoirdt T and 2 others. 2010. The application of bioflocs technology to protect brine shrimp (*Artemia franciscana*) from pathogenic *Vibrio harveyi*. *J Appl Microbiol* 109(5): 1643-1649
- De Schryver P, Crab R, Defoirdt T and 2 others. 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture* 277(3-4): 125-137
- Emerenciano M, Ballester ELC, Cavalli Ro, Wasielesky W. 2012. Biofloc technology application as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp *Farfantepenaeus brasiliensis* (Latreille, 1817). *Aquaculture Research* 43(3): 447-457
- Gatesoupe FJ. 1999. The use of probiotics in aquaculture. *Aquaculture* 180(1-2): 147-165
- Gaudy AF, Gaudy ET. 1980. *Microbiology for Environmental Scientists and Engineers*. McGraw-Hill, New York: 736
- Hari B, Kurup BM, Varghese JT and 2 others. 2004. Effects of carbohydrate addition on production in extensive shrimp culture systems. *Aquaculture* 241(1-4): 179-194
- Hari B, Kurup BM, Varghese JT and 2 others. 2006. The effect of carbohydrate addition on water quality and the nitrogen budget in extensive shrimp culture systems. *Aquaculture* 252(2-4): 248-263
- Krummenauer D, Peixoto S, Cavalli RO and 2 others. 2011. Superintensive culture of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, in a biofloc technology system in southern Brazil at different stocking densities. *J World Aquaculture Society* 42(5): 726-733
- Kuhn DD, Boardman GD, Lawrence AL and 2 others. 2009. Microbial floc meal as a replacement ingredient for fish meal and soybean protein in shrimp feed. *Aquaculture* 296(1-2): 51-57
- Liu YC, Shi HC, Xia L and 5 others. 2010. Study of operational conditions of simultaneous nitrification and denitrification in a Carrousel oxidation ditch for domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology* 101(3): 901-906
- Ninawe AS, Selvin J. 2009. Probiotics in shrimp aquaculture: avenues and challenges. *Crit Rev Microbiol* 35(1): 43-66
- Neal RS, Coyle SD, Tidwell JH, Boudreau BM. 2010. Evaluation of stocking density and light level on the growth and survival of the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in zero-exchange systems. *J World Aquaculture Society* 41(4): 533-544
- Piedrahita RH. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226(1-4): 35-44
- Zhao P, Huang J, Wang XH and 4 others. 2012. The application of bioflocs technology in high-intensive, zero exchange farming systems of *Mar-supenaeus japonicus*. *Aquaculture* 354-355: 97-106