

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

邓应能^{1,2} 赵培^{1,2} 孙运忠^{2,3} 杨丛海² 黄捷^{2*}

(¹上海海洋大学水产与生命学院, 201306)

(²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 266071)

(³青岛农业大学, 266109)

摘要 本研究尝试将生物絮团技术应用到凡纳滨对虾试验性封闭养殖系统中, 筛选生物絮团养殖所需的适宜碳源及其添加量, 在此基础上研究生物絮团养殖系统中凡纳滨对虾的适宜养殖密度。结果表明, 在养殖密度为 150 和 300 尾/m² 的凡纳滨对虾养殖系统中, 每天按照饲料(蛋白含量 42%) 投喂量的 77% 添加蔗糖, 生物絮团 4 d 即可形成, 在 84 d 的养殖期内, 养殖水体的氨氮和亚硝酸氮浓度均维持在较低水平, 对虾成活率在 80% 以上, 取得较好的养殖收获。

关键词 生物絮团 凡纳滨对虾 封闭养殖

中图分类号 S968.22 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)02-0069-07

Conditions for bio-floc formation and its effects in closed culture system of *Litopenaeus vannamei*

DENG Ying-neng^{1,2} ZHAO Pei^{1,2} SUN Yun-zhong^{2,3}

YANG Cong-hai² HUANG Jie^{2*}

(¹ College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, 201306)

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

(³ Qingdao Agricultural University, 266109)

ABSTRACT Bio-floc technology was applied in closed culture system of *Litopenaeus vannamei*. The optimum carbon source and its addition for bio-floc culture was screened, and the optimum carbon addition and stocking density of *L. vannamei* was determined. Results showed that in closed culture system of *L. vannamei* at the stocking density of 150 and 300 PL/m², sucrose was added in the quantity of 77% feed (containing 42% protein) everyday, bio-floc formed on the 4th day post stocking. During the 84 d culture period, the ammonia-N and nitrite-N concentrations kept at very low levels, and the shrimp survival rate was above 80%,

公益性行业(农业)科研专项经费项目(201103034)、现代农业产业技术体系(nycytx-46)和公益性科研院所基本科研业务费(2009-cb-01/A)共同资助

收稿日期:2011-03-29;接受日期:2011-06-07

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

作者简介: 邓应能(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事生物絮团技术研究。E-mail: denyinnen@126.com

which means better harvest of *L. vannamei* in bio-floc culture system.

KEY WORDS Bio-floc *Litopenaeus vannamei* Closed culture system

随着集约化水产养殖产量的提高,养殖废水大量排放,环境污染严重(吴伟等 1999;胡庚东等 2000)。傅雪军等(2010)通过物理化学手段净化养殖水体,实现养殖用水循环利用,净化速度快但费用高,且二次污染的可能性较大。朱学宝(1989)曾利用细菌絮凝体对滤食性鱼类饵料效果进行研究,揭示絮凝体中的异养微生物不仅是生态系统中的分解者,也是食物链中的生产者。以色列学者 Avnimelech(1999)系统地提出了养殖系统中投入的 C/N 比对养殖系统水质调控的生物絮团反应机制理论,并将其应用到实际生产中,有效降低了养殖水体中的氨氮和亚硝酸氮水平,大大提高了罗非鱼的成活率。絮团中的微生物还可吸收转化养殖水体中的残饵、粪便,有效提高了饲料利用率(Avnimelech 2007)。自 2001 年起,美国南卡罗来纳州已将生物絮团技术应用到海水对虾养殖系统中,并提出了生物絮团对虾养殖的必要因素:一是在养殖系统中适当添加糖浆、淀粉等有机碳源,二是保持养殖系统持续充氧,三是养殖系统温度控制在 30 °C 左右(Rosenberry 2006)。

本研究在前人研究的基础上,将生物絮团技术应用到凡纳滨对虾室内封闭养殖系统中,研究了生物絮团养殖所需添加的适宜碳源及其添加量,在此基础上研究生物絮团养殖系统中凡纳滨对虾的适宜养殖密度,初步建立凡纳滨对虾的生物絮团养殖工艺,为生物絮团技术在凡纳滨对虾工厂化养殖中的有效应用提供技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验场地与设施

试验于 2009 年 7~9 月在山东青岛宝荣水产科技发展有限公司进行。使用 24 个 $\text{O}60\text{ cm}\times 120\text{ cm}$ 和 48 个 $\text{O}55\text{ cm}\times 140\text{ cm}$ 塑料桶进行养殖试验,每桶注入 65 cm 深度的海水,安置于 20 m \times 30 m 的室内水泥池中,浸入 50 cm 深度的海水以保持所有试验桶的温度恒定。每桶底部安装 1 个气石,72 个气石连接一台 1.5 kW 的漩涡气泵(HZ220S,上海富力电机厂)。

1.2 试验材料与管理

凡纳滨对虾 *Litopenaeus vannamei* 仔虾于 2009 年 6 月 8 日购自广东恒兴育苗场,平均体长为 $1.50\pm 0.15\text{ cm}$,对虾在 $600\text{ m}^2\times 1\text{ m}$ 的养殖池内暂养至平均体长 $4.21\pm 0.17\text{ cm}$ 后,于 2009 年 7 月 3 日转至试验桶进行养殖试验。整个养殖过程中水温保持在 25~30 °C,养殖前期进水盐度为 20,24 h 持续充气,维持溶氧在 4 mg/L 以上。每天 6:00、12:00、18:00 和 24:00 按照对虾体重的 4% 投喂粗蛋白含量为 42% 的对虾颗粒饲料(统一,台湾)。放苗后,连续 4 d 按照 1.5 g/m^2 添加利生菌(主要成分为枯草芽孢杆菌、蜡状芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌,总菌数 $\geq 2\times 10^8\text{ CFU/g}$,由中国水产科学研究院南海水产研究所提供)。试验中所用碳源包括葡萄糖、蔗糖、淀粉、麦麸和玉米粉,碳水化合物含量分别为 99.9%、99.9%、85.8%、61.4% 和 75.2%,葡萄糖、蔗糖购自国药集团化学试剂有限公司,其余碳源购自青岛市胶州农产品市场。

1.3 碳源种类的筛选

设定 5 个试验组,每组设 3 个平行,各组凡纳滨对虾的养殖密度为 150 尾/ m^2 。选取葡萄糖、蔗糖、淀粉、麦麸、玉米粉作为碳源,根据 Avnimelech(1999)总结的生物絮团养殖系统的 C/N 比公式计算得出不同碳源的基本添加量,即每天按照饲料投喂量的 77%、77%、90%、150% 和 140% 向养殖水体中分别添加葡萄糖、蔗糖、淀粉、麦麸和玉米粉。养殖 30 d,连续观察生物絮团形成的速度、颜色、状态及作用效果。

1.4 碳源添加量的确定

设定 5 个试验组,每组设 3 个平行,各组凡纳滨对虾的养殖密度为 150 尾/ m^2 。选取 1.3 筛选的蔗糖为碳源,根据 Avnimelech(1999)总结的生物絮团养殖系统的 C/N 比公式计算得出蔗糖的基本添加量,并在此基础

上设定蔗糖添加量的 5 个梯度,即每天按照饲料投喂量的 0、77%、150%、230%和 390%添加蔗糖。养殖 30 d,连续观察生物絮团形成的速度、颜色、形态结构及作用效果。

1.5 添加碳源对不同养殖密度水体的水质参数和对虾生长的影响

按照 1.3 和 1.4 所筛选的碳源种类和添加量,分别添加到养殖密度为 150、300 和 450 尾/m² 的凡纳滨对虾养殖试验桶内,每组设 3 个平行。养殖前 30 d,每 6 d 检测养殖水体的氨氮和亚硝酸氮浓度;养殖后 30 d,每 15 d 检测养殖水体的氨氮和亚硝酸氮浓度;每 30 d 测量对虾的生物学体长及存活率,养殖周期为 84 d。

1.6 生物絮团形成量及理化指标监测

使用沉淀漏斗(1000-0010, Nalgene)测定生物絮团的形成量;通过生物显微镜(DH-2, Olympus)观察生物絮团的形态结构,并通过显微视频成像装置(LY-WN-HPCCD, 成都励扬)拍照;使用游标卡尺(LINKS, 哈尔滨量具刀具)测量对虾的生物学体长;分别采用次溴酸盐氧化法和萘乙二胺分光光度法(国家海洋局 1991)测定养殖水体的氨氮和亚硝酸氮浓度。

1.7 数据统计分析

采用单因素方差分析、Turkeys's 多重比较以及回归分析处理所得数据,以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 碳源种类的筛选

每天按照饲料投喂量的 77%、77%、90%、150%和 140%向养殖水体中分别添加葡萄糖、蔗糖、淀粉、麦麸和玉米粉,观察生物絮团的形成时间(表 1)。按饲料投喂量的 77%添加葡萄糖组的生物絮团形成时间最短,按 77%添加蔗糖组次之,按 90%添加淀粉组最长,按 150%添加麦麸组和按 140%添加玉米粉组均不能形成絮团。养殖过程中观察生物絮团的稳定性(表 1)。按 77%添加蔗糖组形成的生物絮团稳定性最好,按 90%添加淀粉组次之,按 77%添加葡萄糖组最差。养殖过程中观察生物絮团的作用效果(表 1)。按照 77%添加葡萄糖组和蔗糖组的对虾生长状况最好,按 90%、150%和 140%添加淀粉组、麦麸组和玉米粉组的对虾生长状况最差。综合分析各因素,确定生物絮团养殖所需添加的适宜碳源为蔗糖。

表 1 不同碳源添加对生物絮团形成及对虾生长的影响
Table 1 Effects of different carbon addition on bio-floc formation and shrimp growth

碳源 Carbon source	形成时间 Formation time (d)	絮团颜色 Bio-floc colour	状态描述 Status description	养殖状况 Culture state
葡萄糖 Glucose	3	橙黄色	絮团微小,不稳定	对虾健康生长
蔗糖 Sucrose	4	棕黄色	絮团较大,稳定	对虾健康生长
淀粉 Starch	7	棕黄色	絮团形成缓慢,较稳定	30 d 后对虾全部死亡
玉米粉 Corn flour	未形成	无	未形成絮团	14 d 后对虾全部死亡
麦麸 Bran	未形成	无	未形成絮团	14 d 后对虾全部死亡

2.2 碳源添加量的确定

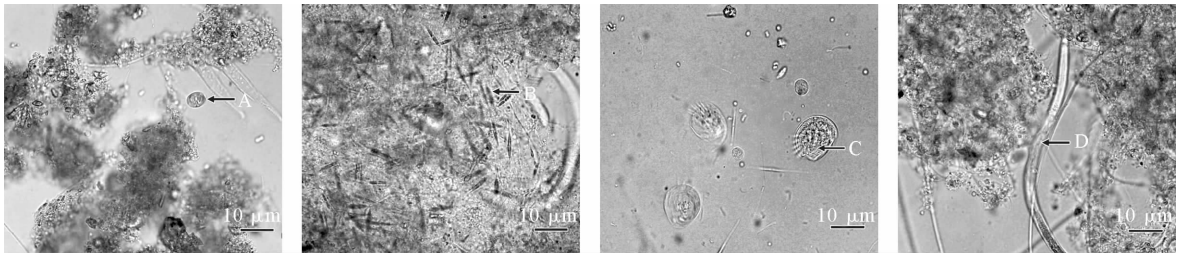
每天按照饲料投喂量的 0、77%、150%、230%和 390%添加蔗糖于养殖水体中,观察生物絮团的形成时间及作用效果(表 2)。按饲料投喂量的 150%、230%和 390%添加蔗糖后,水体透明度逐渐降低,水体颜色呈棕黄色,水体中出现微小颗粒,桶壁黏附大量泡沫和棕黄色物质,养殖第 3 天出现悬浮的棕黄色絮状物,表明生物絮团在 3 d 内即可形成;按饲料投喂量的 77%添加蔗糖,水体到养殖第 3 天才出现微小颗粒,桶壁开始黏附大

量泡沫和棕黄色物质,养殖第4天出现悬浮的棕黄色絮状物,表明生物絮团在4 d内即可形成;不添加蔗糖时,水体颜色和透明度无显著变化,桶壁无黏附物,养殖第7天水体出现极少颗粒状悬浮物,在显微镜下观察同样具备生物絮团形态结构。养殖第8天,使用沉淀漏斗测定各组的生物絮团沉积量(表2)。按饲料投喂量的390%添加蔗糖组的生物絮团沉积量为 14.77 ± 0.40 ml/L,按230%、150%和77%添加蔗糖组的生物絮团沉积量依次降低,不添加蔗糖的生物絮团沉积量为 0.53 ± 0.15 ml/L,仅为77%添加蔗糖组的10%。养殖第10天,显微镜观察各组生物絮团的形态结构(图1),不同蔗糖添加量形成的生物絮团结构类似,均为单细胞藻类、原生动物、水丝蚓等形成的絮状物。养殖第30天,统计各组对虾的存活率(表2)。按饲料投喂量的77%添加蔗糖组的对虾存活率最高,为91.3%。按150%和230%添加蔗糖组的对虾存活率分别为83.8%和88.3%,按390%添加蔗糖组的对虾在养殖第13天出现大量死亡,存活率仅为1.8%,不添加蔗糖组的对虾存活率为39.2%。综合分析各因素,确定生物絮团养殖所需的适宜蔗糖添加量为饲料投喂量的77%。

表2 不同蔗糖添加量对生物絮团形成及对虾生长的影响

Table 2 Effects of different sucrose addition on bio-floc formation and shrimp survival

蔗糖与饲料之比 The ratio of sucrose to feed (%)	形成时间 Formation time (d)	絮团沉积量 Bio-floc volume (ml/L)	对虾存活率 Shrimp survival (%)
0	7	0.53 ± 0.15	39.2
77	4	7.77 ± 0.47	91.3
150	3	8.80 ± 0.95	88.3
230	3	10.87 ± 0.67	83.8
390	3	14.77 ± 0.40	1.8



A. 单胞藻; B. 骨条藻; C. 原生动物; D. 水丝蚓

A. Alga; B. *Skeletonema costatum*; C. Protozoa; D. *Limnodrilus* sp.

图1 生物絮团在显微镜下的形态结构

Fig. 1 Morphology of bio-floc under microscope

2.3 添加蔗糖对不同养殖密度水体的水质参数和对虾生长的影响

2.3.1 水质参数

不同凡纳滨对虾养殖密度(150、300和450尾/ m^2)下,按照饲料投喂量的77%在水体中添加蔗糖,养殖前30 d,每6 d检测养殖水体的亚硝酸氮和氨氮浓度变化(图2、图3)。养殖密度为150尾/ m^2 养殖水体的亚硝酸氮浓度最低,300尾/ m^2 次之,450尾/ m^2 最高,不同养殖密度养殖水体的亚硝酸氮浓度差异显著($P < 0.05$);养殖密度为150和300尾/ m^2 养殖水体的氨氮浓度始终保持在0.1 mg/L以下,而且随着生物絮团沉积量的增大,氨氮浓度进一步降低,而养殖密度为450尾/ m^2 养殖水体的氨氮浓度随养殖时间的延长不断升高,养殖第30天达到0.31 mg/L,与前两组差异显著($P < 0.05$)。养殖后30 d,不定时抽样检测养殖水体的亚硝酸氮和氨氮浓度变化,测定时间分别在45、60、75和84 d,养殖期30~84 d,养殖密度为150尾/ m^2 养殖水体的亚硝酸氮浓度在0.1~0.3 mg/L范围内变化,平均为 0.13 ± 0.08 mg/L,300尾/ m^2 在0.15~0.4 mg/L范围内变化,平均为 0.17 ± 0.11 mg/L,450尾/ m^2 在0.25~0.7 mg/L范围内变化,平均为 0.26 ± 0.18 mg/L;养殖密度为

150 和 300 尾/m² 养殖水体的氨氮浓度始终低于 0.1 mg/L, 平均为 0.014±0.02 mg/L 和 0.019±0.02 mg/L, 450 尾/m² 最高达 0.6 mg/L, 平均为 0.29±0.24 mg/L。

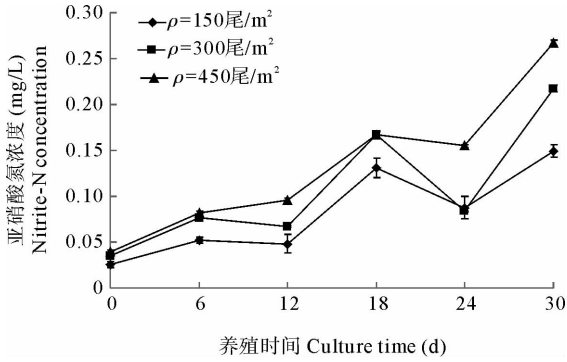


图 2 添加蔗糖对不同养殖密度下水体的亚硝酸氮浓度变化的影响

Fig. 2 Effects of sucrose addition on nitrite-N concentration in different stocking density

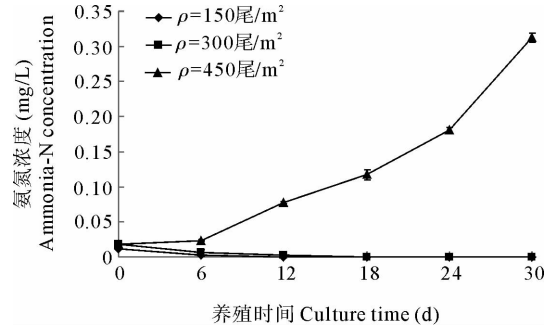


图 3 添加蔗糖对不同养殖密度下水体的氨氮浓度变化的影响

Fig. 3 Effects of sucrose addition on ammonia-N concentration in different stocking density

2.3.2 对虾生长与存活

不同凡纳滨对虾养殖密度(150、300 和 450 尾/m²)下,按照饲料投喂量的 77% 添加蔗糖,养殖过程中测量对虾的生物学体长(图 4)。养殖期 0~24 d,各组对虾的体长无显著差异;养殖第 24 天,对虾体长随养殖密度的降低而升高,养殖密度为 150 尾/m² 的对虾体长显著高于 450 尾/m² ($P<0.05$),而养殖密度为 300 尾/m² 的对虾体长与 150 和 450 尾/m² 无显著差异;养殖期第 54 天,各组对虾的生物学体长差异显著 ($P<0.05$),养殖密度为 150 尾/m² 的对虾体长显著高于 300 和 450 尾/m²,其中养殖密度为 300 尾/m² 与 450 尾/m² 的对虾体长差异不显著。养殖过程中检测对虾的存活率(图 5),养殖第 24 天,养殖密度为 450 尾/m² 的对虾存活率显著低于 150 和 300 尾/m² ($P<0.05$),而养殖密度为 150 尾/m² 与 300 尾/m² 的对虾存活率差异不显著;养殖第 54 天,各组对虾的存活率随养殖密度的升高而降低,养殖密度为 450 尾/m² 的对虾开始出现大量死亡,此时溶氧在 1 mg/L 以下,亚硝酸氮浓度为 0.7 mg/L,氨氮浓度为 0.6 mg/L,死虾腮部黏附大量生物絮团并且虾皮柔软,分析原因可能是水质环境变差,生物絮团大量形成,导致水体溶氧不足,从而致使对虾大量死亡;养殖第 84 天,各组对虾的存活率差异显著 ($P<0.05$),养殖密度为 150 尾/m² 的对虾存活率为 90%,300 尾/m² 的对虾存活率为 83.8%,而 450 尾/m² 的对虾存活率仅为 4.7%;养殖第 98 天收获对虾,养殖密度为 150 和 300 尾/m² 的对虾产量分别为 2.14±0.08 kg/m² 和 3.66±0.36 kg/m²,450 尾/m² 无收获。

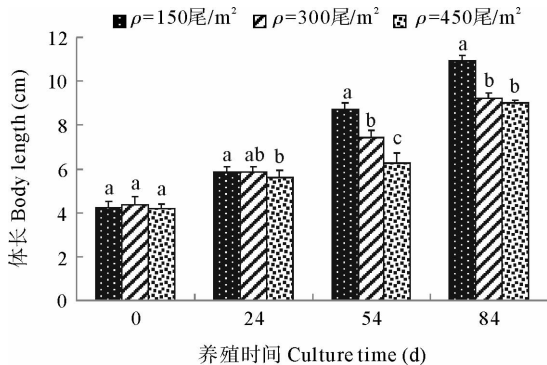


图 4 添加蔗糖对不同养殖密度下凡纳滨对虾生长的影响

Fig. 4 Effects of sucrose addition on growth of *L. vannamei* in different stocking density

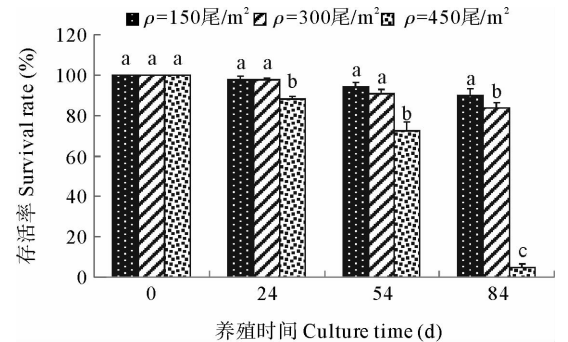


图 5 添加蔗糖对不同养殖密度下凡纳滨对虾存活的影响

Fig. 5 Effects of sucrose addition on survival of *L. vannamei* in different stocking density

综合分析各组水体的水质参数和对虾生长的变化,在养殖密度为 150 和 300 尾/ m^2 时,每天按照饲料投喂量的 77% 在水体中添加蔗糖并保持溶氧在 4 mg/L 以上的条件下,生物絮团 4 d 即可形成,在 84 d 的养殖周期内,养殖水体的氨氮浓度均维持在 0.1 mg/L 以下,亚硝酸氮浓度分别低于 0.3 mg/L 和 0.4 mg/L,成活率分别为 90% 和 83.8%,养殖 98 d 后对虾产量分别达 2.14 ± 0.08 和 3.66 ± 0.36 kg/ m^2 。从产量上看,300 尾/ m^2 的养殖密度更具有养殖优势。

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、原生动物、藻类等而形成的絮状物,这些异养微生物会同化养殖水体的氨氮和亚硝酸氮作为其生长繁殖所需氮源。与此同时,也需消耗大量碳源,这些碳源仅靠投喂饲料经对虾转化而排到水体中的碳是远远不够的,因此需要在养殖过程中合理补充碳源(Avnimelech 1999; Michaud *et al.* 2006)。碳源种类的选择在很大程度上决定着生物絮团的结构和稳定性(Oehmen *et al.* 2004),不同碳源的成本也决定着生物絮团的利用价值(Salehizadeh *et al.* 2004)。本研究选取葡萄糖、蔗糖、淀粉、麦麸、玉米粉等低值原料为碳源,观察生物絮团形成的速度、颜色、状态及作用效果。以蔗糖为碳源,容易被养殖水体中的异养微生物吸收利用,使生物絮团快速形成并稳定存在于养殖水体中;以葡萄糖为碳源,形成的生物絮团在养殖水体中容易消失;以淀粉为碳源,能形成生物絮团,但对虾出现死亡,推测原因可能与淀粉添加量存在一定关系,需要试验进一步验证;而麦麸与玉米粉虽是最廉价的碳源,但它们需要被分解后才能被异养微生物利用,形成生物絮团的速度慢,不适宜作为添加碳源。因此,生物絮团养殖所需添加的适宜碳源为蔗糖。

不同碳源添加量直接影响生物絮团的形成时间及作用效果(Schryver *et al.* 2008)。本研究按照饲料投喂量的 0、77%、150%、230% 和 390% 在水体中添加蔗糖,观察生物絮团的形成时间及作用效果,按照饲料投喂量的 77% 添加蔗糖,生物絮团在养殖第 4 天即可形成,养殖 30 d 对虾存活率高达 91.3%;按照饲料投喂量的 150%、230%、390% 添加蔗糖,生物絮团形成时间最快,絮团沉积量随蔗糖添加量的升高而增大,但对虾存活率随蔗糖添加量的升高而降低,其中 390% 添加蔗糖组的对虾存活率仅为 1.8%,推测原因可能是随着蔗糖添加量的升高,生物絮团颗粒增大,絮团沉积量升高,达到一定的浓度后容易沉积到试验桶底部而影响水质,从而导致对虾大量死亡;不添加蔗糖组的生物絮团形成速度最慢,絮团沉积量最低,对虾存活率为 39.2%。因此,生物絮团养殖所需的适宜蔗糖添加量为饲料投喂量的 77%。

在国内的对虾养殖业中,养殖户为了追求更高的经济效益,不断提高对虾养殖密度。但随着养殖密度的提高,养殖水体的氨氮和亚硝酸氮浓度也不断升高,目前主要通过两种方式改善水质,一是通过大量的水体交换来降低水体中的无机氮,二是利用复杂的循环水净化系统来去除水体中的无机氮,然而这两种方式均需耗费大量的能源,大量的水体交换不仅存在外界病原微生物引入的风险,而且排出的养殖废水容易形成环境富营养化(Avnimelech *et al.* 2003)。1999 年,以色列学者 Avnimelech 系统地提出了养殖系统中投入的 C/N 比对养殖系统水质调控的生物絮团反应机制理论,并将生物絮团技术应用到实际生产中,有效降低了养殖水体中的氨氮以及亚硝酸氮水平(Avnimelech 1999; Avnimelech *et al.* 2009)。自 2001 年起,美国南卡罗来纳州已将生物絮团技术应用到海水对虾的养殖系统中,不仅可以调节水质,提高对虾成活率,而且可以转化残饵粪便,降低饲料系数,在高密度对虾养殖过程中效果尤为显著(Burford *et al.* 2003; Rosenberry 2006)。2009 年,赵

培等人将蔗糖添加的生物絮团技术应用到日本囊对虾高密度精养系统中,在水质调控、饵料利用、抑制病原菌等方面效果显著(Zhao *et al.* 2012)。本研究按照饲料投喂量的 77% 在水体中添加蔗糖,检测不同凡纳滨对虾养殖密度(150、300 和 450 尾/ m^2)下养殖水体的水质参数与对虾生长的变化,养殖密度为 150 和 300 尾/ m^2 时,生物絮团 4 d 即可形成,在 84 d 的养殖周期内,养殖水体的氨氮浓度均维持在 0.1 mg/L 以下,亚硝酸盐浓度分别低于 0.3 mg/L 和 0.4 mg/L,成活率分别为 90% 和 83.8%,养殖 98 d 后对虾产量分别达 2.14 ± 0.08 kg/ m^2 和 3.66 ± 0.36 kg/ m^2 。建议采取 150~300 尾/ m^2 为其合适的养殖密度。值得注意的是,本研究仍属小水体试验,采用高强度的持续充气,既保证了溶氧水平,又能使生物絮团基本处于完全悬浮状态,若将该技术推广到大规模生产中,需要关注在较大的养殖池内气石密度下降,溶氧降低和气流带动的水体流速下降所伴随的

生物絮团沉降等问题。

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

- 朱学宝. 1989. 细菌絮凝体对滤食性鱼类饵料效果的研究. 水产学报, 13(4): 339~345
- 吴 伟, 余晓丽, 胡庚东. 1999. 加氯水体有机浓集物对团头鲂血液指标的影响. 湛江海洋大学学报, 19(4): 26~29
- 国家海洋局. 1991. 海洋监测规范(中华人民共和国行业标准). 北京: 海洋出版社
- 胡庚东, 吴 伟, 陈家长, 瞿建宏. 2000. 含氯消毒剂在水环境中的次生产物及其致突变性研究. 湛江海洋大学学报, 20(3): 45~49
- 傅雪军, 马绍赛, 曲克明, 周 勇, 徐 勇. 2010. 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, 31(1): 95~99
- Avnimelech, Y. 1999. C/N ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176(3-4): 227~235
- Avnimelech, Y., and Ritvo, G. 2003. Shrimp and fish pond soils: processes and management. *Aquaculture*, 220(1-4): 549~567
- Avnimelech, Y. 2007. Feeding with microbial flocs by tilapia in minimal discharge bio-flocs technology ponds. *Aquaculture*, 264(1-4): 140~147
- Avnimelech, Y., and Kochba, M. 2009. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks using ^{15}N tracing. *Aquaculture*, 287(1-2): 163~168
- Burford, M. A., Thompson, P. J., McIntosh, R. P., Bauman, H. R., and Pearson, D. C. 2003. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize. *Aquaculture*, 219(1-4): 393~411
- Michaud, L., Blancheton, J. P., Bruni, V., and Piedrahit, R. 2006. Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. *Aquacultural Engineering*, 34(3): 224~233
- Oehmen, A. 2004. The competition between polyphosphate accumulating organisms and glycogen accumulating organisms in the enhanced biological phosphorus removal process. Ph. D. thesis. The University of Queensland, Brisbane, Australia
- Rosenberry, B. 2006. World Shrimp Farming 2006. Number 19. Shrimp News International. San Diego, USA
- Schryver, P. D., Crab, R., Defoirdt, T., Boon, N., and Verstraete, W. 2008. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. *Aquaculture*, 277(3-4): 125~137
- Salehizadeh, H., and Van Loosdrecht, M. C. M. 2004. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance. *Biotechnology Advances*, 22(3): 261~279
- Zhao, P., Huang, J., Wang, X. H., Song, X. L., Yang, C. H., Zhang, X. G., and Wang, G. C. 2012. The application of bioflocs technology in high-intensive, zero exchange farming systems of *Marsupenaeus japonicus*. *Aquaculture*, In press.