



## 凡纳滨对虾生物絮团养殖系统中泡沫体积与生物絮团及环境的关系

宋逸飞<sup>1</sup>, 张家松<sup>2</sup>, 李 贤<sup>1</sup>, 董登攀<sup>1</sup>, 宋协法<sup>1\*</sup>

(1. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300)

**摘要:** 为探究生物絮团 (BFT) 系统中泡沫体积与生物絮团及环境因子的关系, 以求通过泡沫体积判断生物絮团的运行情况。实验采用 3 组凡纳滨对虾生物絮团养殖系统进行 100 d 的实验研究, 测定泡沫体积、水体表面张力及水环境因子等参数, 选用 Pearson 相关系数进行相关性分析, 研究泡沫体积变化与生物絮团、环境因子之间的关系。结果显示, 泡沫体积与总氨氮 (TAN) 呈现较强的正相关性, 相关系数为 0.571。泡沫体积受生物絮团状况影响, 与絮团体积 (FV) 呈负相关性, 相关系数为 -0.266。泡沫体积由增转降的日期与生物絮团开始形成的日期高度拟合, 二者相差在 5 d 内。随着生物絮团的形成, 泡沫体积逐渐降低。当生物絮团成熟稳定时, 泡沫体积会维持在 0.011 0 m<sup>3</sup>/t 以下 (1 t 水体生成 0.011 0 m<sup>3</sup> 泡沫)。研究表明, 可以通过泡沫体积的变化判断生物絮团的运行情况。本研究可提高生物絮团的可控性, 对凡纳滨对虾生物絮团养殖技术的推广具有重要的指导意义。

**关键词:** 凡纳滨对虾; 生物絮团; 泡沫; 环境因子; 指示作用

**中图分类号:** S 968.22

**文献标志码:** A

生物絮团技术是利用有机废物 (粪便、饲料和死亡物质) 为氮源, 通过控制碳氮比 (C/N)<sup>[1]</sup>, 以培养水体中的微生物 (细菌、藻类和原生动物) 等, 最终将水体中的有机物转化为营养聚合物并可替代部分饲料<sup>[2-3]</sup>, 是凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 养殖的主要技术之一。生物絮团可控性差、操作难度大, 是目前生物絮团技术推广所面临的主要问题。例如通过后期减少甚至停加碳源可以建立自养型的硝化系统<sup>[4-5]</sup>, 如果在停加碳源的过程中如果操作不当, 会影响絮团的形成甚至造成絮团的解絮; 由于絮团在水体中不断增长, 过多的絮团含量会影响水生生物的存活率<sup>[6-7]</sup>, 必须通过人工排除多余的絮团。因此, 寻求一种

便捷有效的方法来提高生物絮团的可控性是目前生物絮团养殖亟待解决的问题之一。

生物絮团技术是城市污水处理活性污泥技术在水产领域的应用, 在活性污泥系统中, 泡沫对活性污泥状态可以起到较好的指示作用。Petrovski 等<sup>[8]</sup>的研究表明, 活性污泥系统中, 泡沫的产生受系统中气泡、表面活性剂和疏水颗粒共同影响; 气温、气压和水温的变化也是影响泡沫产生的重要原因<sup>[9]</sup>。生物絮团技术与活性污泥技术类似, 同时泡沫是生物絮团养殖过程中的标志性产物, 研究生物絮团系统中泡沫体积与系统的关系对提高生物絮团系统可控性至关重要。然而, 目前关于生物絮团养殖系统中泡沫体积与生物絮

收稿日期: 2022-12-01 修回日期: 2023-03-10

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFD2001704)

第一作者: 宋逸飞 (照片), 从事生物絮团研究, E-mail: dabei7620@163.com

通信作者: 宋协法, 从事设施渔业研究, E-mail: yuchuan@ouc.edu.cn



团及环境因子关系的研究尚未见相关报道。

本实验通过对凡纳滨对虾生物絮团养殖过程中泡沫体积变化及其与生物絮团、环境因子之间的关系进行研究, 探求其对生物絮团系统的指示作用, 为凡纳滨对虾养殖过程中生物絮团的预测和控制提供技术支撑。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验设计

本研究获得了中国海洋大学实验动物管理和使用伦理委员会批准, 实验过程中操作人员严格遵守中国海洋大学实验动物管理和使用伦理委员会伦理规范, 并按照中国海洋大学实验动物管理和使用伦理委员会制定的规章制度执行。

本实验于广东省阳江市某凡纳滨对虾养殖场内进行。使用3组完全相同的养殖池(1号池、2号池和3号池)。每组养殖池由大中小3个规格组成, 面积分别为9、27和63 m<sup>2</sup>, 池深1 m。实验期间以红糖(含碳量40.70%)为碳源, 投饵后1 h投放红糖。养殖前期, C/N控制在15~20。絮团形成后, 参考高远等<sup>[10]</sup>的方法, 每日减少5%红糖投入量直至饲料与红糖投放重量比为5:1, 使絮团菌群由异养性菌群向自养性菌群转化。

选用p10期的凡纳滨对虾苗, 每组养殖池投放虾苗4万尾, 从面积最小的养殖池中开始养殖, 第31天, 将对虾转移至中等面积的养殖池中继续养殖, 第61天, 将对虾移至面积最大的养殖池中养殖, 直至实验结束。更换养殖池后每天仅增加6.6 cm水位, 直至水深达到1 m, 防止因过量换水导致环境变化。每天投饵4次(7:00、11:00、15:00、19:00)。参考陈伟等<sup>[11]</sup>的方法, 饲料投喂量根据对虾体长变化进行调整: 体长低于10 cm时, 投喂量为体重的3.0%~4.5%; 体长大于10 cm时, 投喂量为体重的2.0%~3.0%。通过投放小苏打控制养殖水体碱度维持在100以上。所有养殖池全天曝气, 曝气设施完全一致, 出气流量为每立方米水体0.014 m<sup>3</sup>/min。整个实验期间, 每天补充蒸发损失的水分, 当絮团体积(FV)超过10 mL/L或总悬浮固体(TSS)超过400 mg/L时人工换水以排除多余絮团, 换水量不超过10%。实验共持续100 d, 实验结束时每组养殖池对虾产量(261.6±32.3) kg。

### 1.2 水样分析

实验期间, 每日6:00在各个养殖池四角各

取水样1 L混合均匀, 带回实验室进行分析。水样通过0.45 μm滤膜过滤后, 参照APHA标准方法<sup>[12]</sup>分析样品中的TSS和碱度; 参照《海洋监测规范第4部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007), 使用紫外可见光光度计[尤尼柯(上海)仪器有限公司]测量水体中的总氮(TAN)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)和硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N); 使用英霍夫沉降管测量FV, 沉降时间30 min; 溶解氧、酸碱度、盐度和水温采用WTW(Multi 3430, 德国)测定; 总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(TOCV, Shimadzu Seisakusho, 日本)测定。

### 1.3 泡沫体积测定

养殖过程中会出现泡沫堆积现象, 为提高泡沫测量精度, 在原有泡沫清除后1 h测量其体积。清除后1 h泡沫未堆积呈平铺状态, 通过直尺测量高度(*h*)。泡沫面积测量及修正如图1所示, 拍照处理后, 对拍照完成后的图片进行透视修正, 透视修正参考崔帅华等<sup>[13]</sup>的方法, 原图上像素点的变换方法:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -vx & -vy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ m \\ l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, *x*、*y*为原图片上某像素点的坐标; *u*、*v*为透视变换后该像素点的坐标式中存在8个未知数, 通过确认4对*xy*坐标及*uv*坐标, 即可求出未知数并通过变化方程完成整个图像的透视变换。

修正后图片进行二值化处理, 规定像素点亮度值大于127的为白色, 反之为黑色; 在二值化处理后, 对水面反光等误差进行人工修正, 得到最终的图像, 通过计算图像中的白色像素点数目得到泡沫面积(*S*, m<sup>2</sup>/t), 每日6:00测定泡沫体积(*V*, m<sup>3</sup>/t)。泡沫的生成量与水体体积挂钩, 本研究统一采用“m<sup>3</sup>/t”, 以衡量水体体积与对应泡沫的换算关系, 便于养殖人员进行换算。

$$\text{泡沫体积}(V) = \text{泡沫面积}(S) \times \text{高度}(h) \quad (2)$$

### 1.4 水体表面张力测定

实验中水体表面张力每日6:00测定1次。表面张力的测定参考赵贯甲等<sup>[14]</sup>的方法, 采用毛

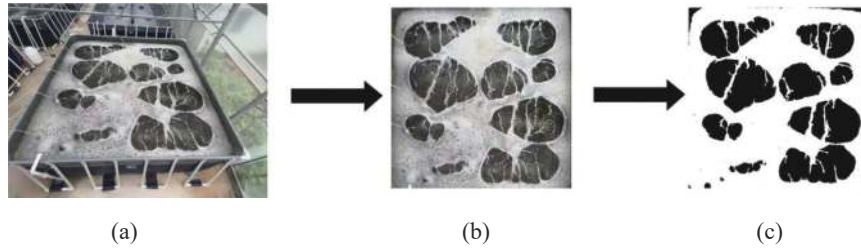


图1 泡沫图像处理

(a) 原始图片, (b) 透视修正后图片, (c) 二极化+人工修正后图片。

Fig. 1 Deal process of foam photos

(a) original image, (b) image after perspective correction, (c) image after binaryzation and manual adjust.

细吸管法, 将毛细吸管浸入液体内部, 由于液体分子之间的作用力小于液体与管壁间的附着力, 液体表面呈凹形, 此时表面张力产生的附加力为向上的拉力, 并使毛细吸管内的液面上升, 直至液柱稳定, 测量液柱上升高度 ( $h$ ) 并计算水体表面张力 ( $\sigma$ ), 计算公式:

$$\sigma = \frac{(p_t - p_g)ghr}{2\cos\theta} \quad (3)$$

式中,  $r$  为毛细管内径 (mm);  $\theta$  为接触角 ( $^\circ$ );  $p_t$  和  $p_g$  分别为液相和气相的密度 ( $\text{g}/\text{m}^3$ );  $h$  代表液柱的高度 (mm);  $g$  为当地的重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ).

### 1.5 数据分析

参考汪冬华<sup>[15]</sup>的方法, 采用统计软件 SPSS 19.0 进行相关性分析, 探讨泡沫体积与环境参数之间的相关性, 选用 Pearson 相关系数度量两个变量之间的相关性, 两个变量之间的 Pearson 相关系数计算公式:

$$p_{x,y} = \frac{\text{cox}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X\sigma_Y} \quad (4)$$

式中,  $\text{cox}(X,Y)$  为两个变量之间的协方差;  $\sigma_X\sigma_Y$  分别为两个变量的标准差之积;  $E$  为数学期望;  $\mu_X$  和  $\mu_Y$  分别为两个变量的均值;  $p_{x,y}$  (Pearson 相关系数) 取值范围为  $[-1, 1]$ , 当取值为  $[-1, 0)$  表示负相关, 取值为  $(0, 1]$  表示正相关。

## 2 结果

### 2.1 养殖过程中水质及絮团变化情况

3 组养殖池的溶解氧维持在  $(7.28\pm 0.39)$  mg/L, 温度维持在  $(30.85\pm 0.95)$   $^\circ\text{C}$ , pH 维持在  $7.91\pm 0.25$ , 碱度维持在每升  $(111.60\pm 22.14)$  mg  $\text{CaCO}_3$ , 盐度维持在  $19.03\pm 1.02$ 。各养殖池间水质参数均无显著差异 (表 1)。

表 1 3 组养殖池 1~100 d 水质参数

Tab. 1 Water and biofloc initial parameters in the three tanks from 1 to 100 days

水质参数 water parameter	1号池 tank 1	2号池 tank 2	3号池 tank 3
溶解氧(mg/L) DO	7.34±0.44	7.30±0.43	7.21±0.31
温度/ $^\circ\text{C}$ temperature	30.78±0.96	30.94±0.99	30.84±0.90
酸碱度 pH	7.93±0.25	7.92±0.25	7.90±0.25
碱度/(mg $\text{CaCO}_3$ /L) alkalinity	119.08±24.46	111.85±21.80	103.86±20.15
盐度 salinity	19.00±1.08	18.99±1.00	19.12±0.97

注: 各养殖池间水质参数均无显著差异。  
Notes: Values are non-significantly different between each tanks.

絮团形成阶段分为未形成期 (阶段 1), 形成期 (阶段 2) 和成熟稳定期 (阶段 3)。在阶段 1, 絮团未形成, 没有净化水质的能力, TAN 不断升高; 在阶段 2, 絮团开始发挥作用, 此时 TAN 下降; 在阶段 3, 絮团已完全形成, 此时水质较好, TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度维持在低值 (0.10 mg/L 以下)。TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度呈先上升后下降的趋势, 且 TAN 浓度快速下降时  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度快速上升并到达峰值, 符合生物絮团形成过程中水质的变化趋势。在阶段 1, 生物絮团尚未形成, TAN 由初始值 0 mg/L 迅速上升, 于第 23 日达到峰值 14.00 mg/L, TOC 由初始值 6.02 mg/L 不断升高; 进入阶段 2, TAN 由峰值迅速下降, 于第 34 日降至 0.63 mg/L。TOC 于 32 日达到峰值后不断下降, 而  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度迅速上升, 在第 47 日到达峰值 18.53 mg/L, 后于第 55 日降至 0.10 mg/L, 此时生物絮团初步形成并开始发挥作用, 但尚不能将水中的亚硝酸盐氮全部转化。在阶段 3, TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度较低, 平均值分别为 0.86 和 0.27 mg/L;  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度较高, 平均值为 11.10 mg/L,

此时生物絮团成熟稳定 (图 2)。

TSS 和 FV 变化如图 3 所示, 养殖池初始 TSS 平均值为 155 mg/L, 之后不断上升, 16 日后稳定在 200 mg/L 以上, 之后基本维持在 200~400 mg/L, 此时水体中 TSS 浓度足够保证生物絮团维持水质稳定<sup>[16]</sup>。FV 由初始值 0 mL/L 不断升高并在进入阶段 2 后首次达到 5.00 mL/L 以上, 在阶段 2, 其平均值为 5.89 mL/L, 之后 FV 被人为控制在 5.00~10.00 mL/L。

### 2.2 泡沫体积变化

1~3 号养殖池泡沫体积变化结果显示 (图 4), 在阶段 1, 泡沫于第 6 日开始出现并不断增加。1

号池、2 号池、3 号池泡沫体积分别于 17、26 和 26 d 到达峰值, 分别为 0.032 1、0.049 7 和 0.027 2 m<sup>3</sup>/t。在阶段 2, 泡沫体积开始下降, 分别于 31、32 和 32 d 降至低值并趋于稳定, 在 32~56 d, 3 组养殖池泡沫体积平均值分别为 0.002 5、0.002 5 和 0.002 7 m<sup>3</sup>/t。在 56 d 进入阶段 3 后泡沫体积较小, 1 号池、2 号池和 3 号池泡沫体积分别维持在 0.008 6、0.011 0 和 0.007 6 m<sup>3</sup>/t 以下, 平均值为 (0.003 5±0.002 0) m<sup>3</sup>/t。

### 2.3 水体表面张力变化

在本实验中, 水体表面张力呈现不断下降的趋势 (图 5)。在实验开始前 10 天下降较为迅速,

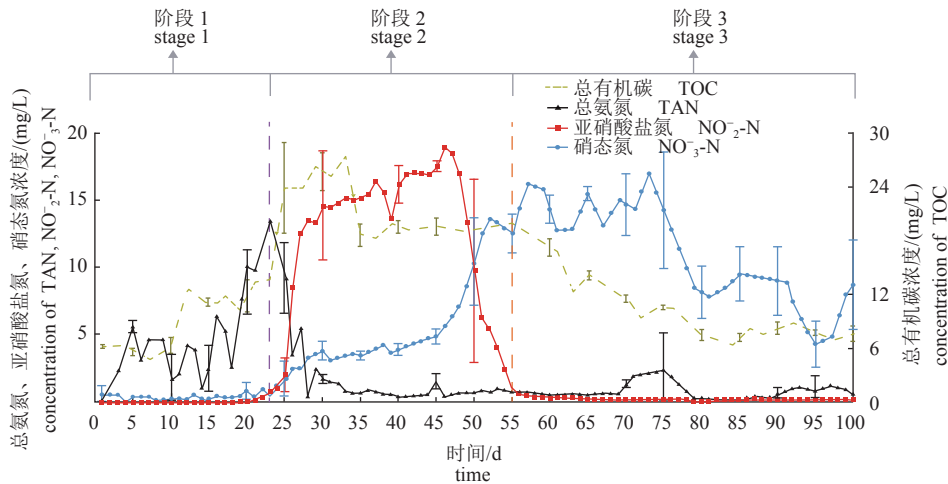


图 2 总氨氮、亚硝酸盐氮、硝态氮、总有机碳浓度日变化曲线

Fig. 2 Daily curves of TAN, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TOC in the three tanks

TAN. total ammonia nitrogen, TOC. total organic carbon.

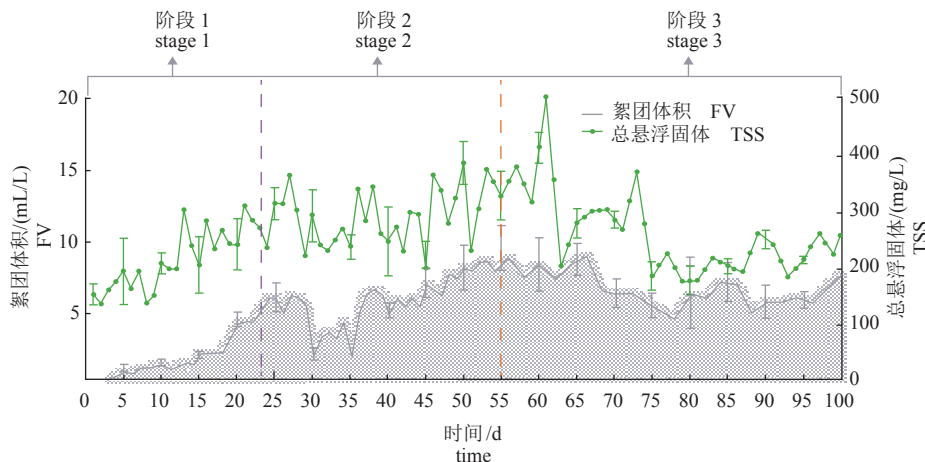


图 3 生物絮团体积及总悬浮固体日变化曲线

Fig. 3 Daily curves of FV and TSS in the three tanks

FV. floc volume, TSS. total suspended solids.

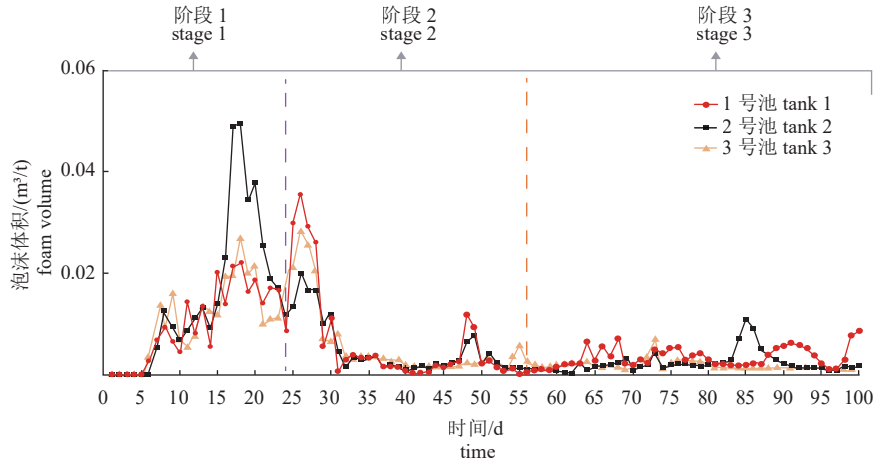


图 4 3组养殖池泡沫体积日变化图

Fig. 4 Daily curves of foam volume in the three tanks

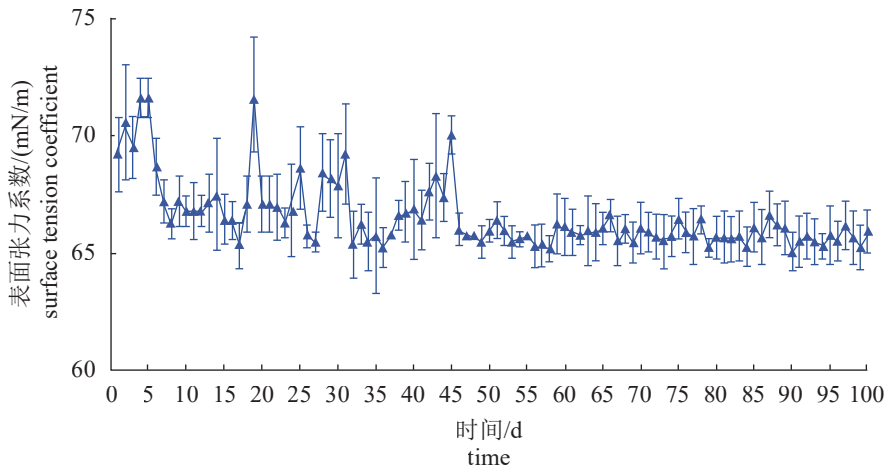


图 5 3组养殖池水体表面张力系数变化

Fig. 5 Daily curves of surface tension coefficient in the three tanks

而后下降缓慢。在前 60 天, 水体表面张力波动较大, 60 天后养殖水体增大, 波动幅度降低, 整个实验过程中表面张力系数呈波动下降, 下降幅度较低, 由初始的  $(69.23 \pm 1.44)$  mN/m 降至实验结束的  $(65.95 \pm 0.82)$  mN/m。

#### 2.4 泡沫体积与生物絮团及环境因子的关系

采用 Pearson 系数对泡沫体积与环境因子进行相关性分析, 发现泡沫体积变动与  $\text{NO}_3^-$ -N、FV、TN、TAN 和盐度相关, 其中泡沫体积与  $\text{NO}_3^-$ -N、TAN 呈负相关性, 相关系数分别为  $-0.447$  和  $-0.229$ , 泡沫体积与 TAN 和盐度呈正相关性, 相关系数分别为  $0.571$  和  $0.556$  (图 6)。考虑到在本次实验中,  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度随养殖天数增加而增加, 二者呈现出较高的正相关性, 因此, 本次分析中

泡沫体积与  $\text{NO}_3^-$ -N 之间的负相关性可以看作是泡沫体积与养殖日期之间的负相关性。泡沫体积与生物絮团参数的相关性分析表明, 泡沫体积与 FV 呈负相关性, 相关系数为  $-0.266$ , 随着絮团体积的增大, 絮团趋向稳定, 泡沫体积不断减小。生物絮团参数与环境因子的相关性分析中, FV 主要受  $\text{NO}_3^-$ -N 和盐度的影响, 其中 FV 与  $\text{NO}_3^-$ -N 呈正相关性, 相关系数为  $0.659$ , 与盐度呈负相关性, 相关系数为  $-0.619$ 。TSS 主要受 TN 和溶解氧影响, 与 TN 呈正相关性, 相关系数为  $0.576$ , 与溶解氧呈负相关性, 相关系数为  $-0.483$ 。

TAN 浓度和泡沫体积的变化结果显示, 泡沫体积的变动曲线与 TAN 的变动曲线趋势相似, 泡沫体积到达峰值后开始下降的日期与 TAN 浓度到达峰值后开始下降的日期相差在 5 d 内, 其中 1

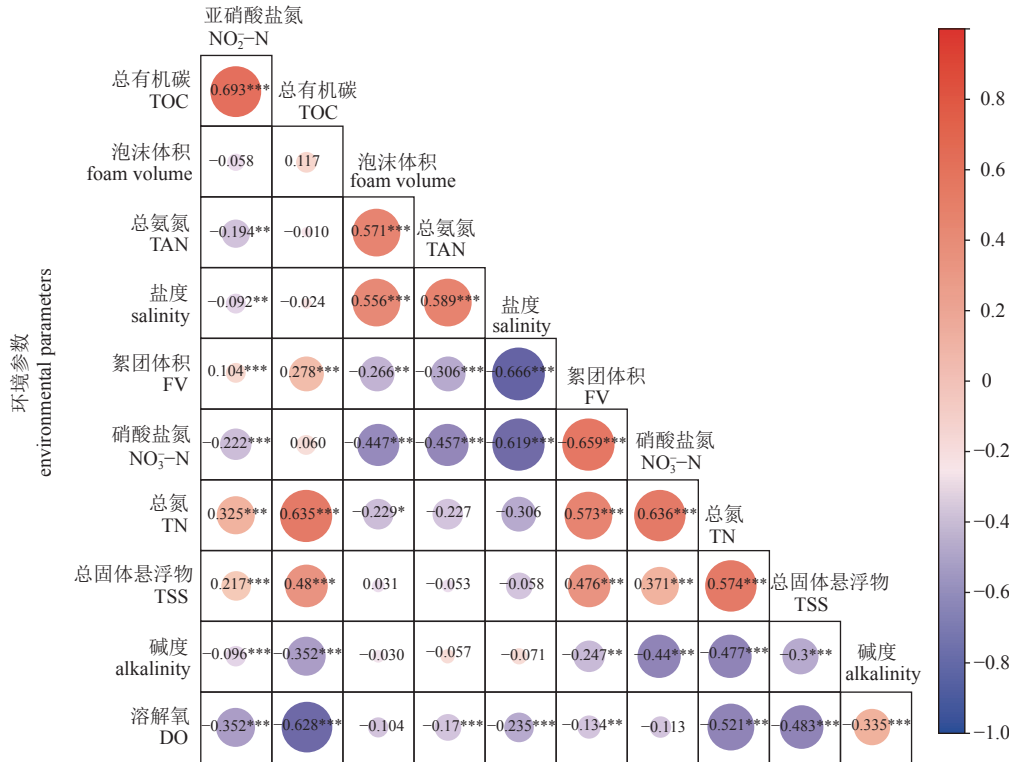


图 6 3组养殖池泡沫体积与环境参数相关性分析图

Fig. 6 Correlation analysis of foam volume and environment parameters in the three tanks

\*.  $P < 0.05$ , \*\*.  $P < 0.01$ , \*\*\*.  $P < 0.001$ .

号池相差 3 d, 2 号池相差 5 d, 3 号池相差 2 d (图 7)。TAN 浓度到达峰值后开始下降的日期是生物絮团由阶段 1 进入阶段 2 的日期, 泡沫体积由峰值开始下降的时间节点与生物絮团阶段转换的时间节点相近。

### 3 讨论

#### 3.1 水质及絮团对泡沫体积的影响

本实验中泡沫体积与水体中 TAN 浓度呈正相关, 相关系数为 0.571, 泡沫体积与 TAN 都呈现先增后降的变化。在絮团未形成期 (阶段 1), 泡沫体积和 TAN 浓度迅速增高, 进入絮团形成期 (阶段 2), 泡沫体积和 TAN 浓度迅速下降。Pujol 等<sup>[17]</sup>、Cha 等<sup>[18]</sup>的研究表明, 污水厂初次启动时会产生大量泡沫, 这种泡沫通常为白色, 重量很轻, 在活性污泥系统启动初期, 污泥量较少而水中有机物过多, 启动时泡沫便会大量出现, 在活性污泥培育成熟之后这种泡沫便会消失, 与本实验结果相似。在生物絮团系统中, TAN 浓度开始下降是生物絮团进入形成期 (阶段 2) 的标志, 泡沫体积到达峰值后开始下降的日期与 TAN 浓度到

达峰值后开始下降的日期相差在 5 d 内, 可作为确定生物絮团启动的辅助指标。絮团体积 (FV) 与泡沫体积呈负相关性, 随着 FV 增加直至生物絮团稳定, 泡沫体积不断下降并稳定趋于低值。当生物絮团进入成熟稳定期 (阶段 3) 后, 泡沫体积分别维持在 0.008 6、0.011 0、0.007 6 m<sup>3</sup>/t 以下。宋阳等<sup>[19]</sup>研究表明, 活性污泥系统中水体在高污泥负荷 (F/M, 有机物/微生物) 下, 高负荷产生的泡沫比例是低负荷的 2 倍。本研究中泡沫体积变动规律与活性污泥系统中泡沫体积变动规律相似, 推测生物絮团系统和活性污泥系统相同, 都受水体中微生物和有机物含量的影响。本实验中, 在絮团未形成期 (阶段 1), 微生物含量较少, 不具有将投放的有机物完全转化的能力, 此时 TAN、TOC 不断积累, 泡沫体积较大。当进入絮团形成期 (阶段 2) 时, TAN 开始下降, 虽然 TOC 仍维持在高值, 但生物絮团开始形成, 微生物含量增加, 泡沫体积此时也随之下降。当生物絮团成熟稳定时 (阶段 3), TOC 不断下降, TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 含量较低, 泡沫体积较小。综上, 生物絮团成熟稳定时, 泡沫体积应维持在低值, 本实验中, 成熟稳定的生物絮团的泡沫体积维持在 0.0110 m<sup>3</sup>/t 以下。

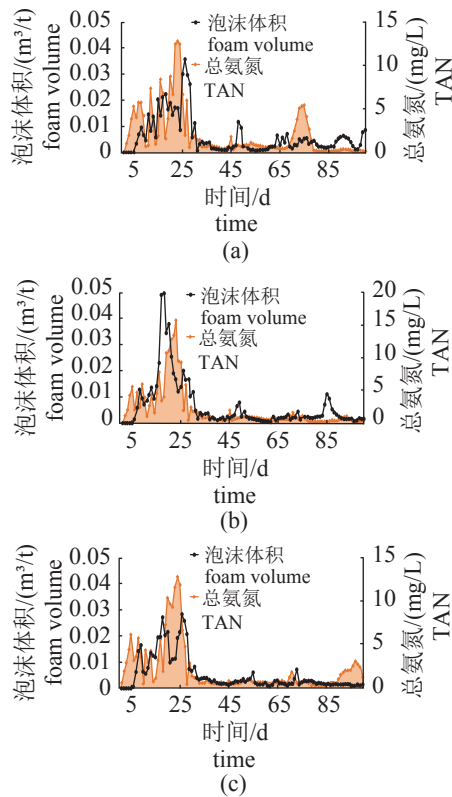


图7 3组养殖池泡沫体积及总氮氮变化

(a) 1号池, (b) 2号池, (c) 3号池。

Fig. 7 Daily curves of foam volume and TAN in the three tanks

(a) tank1, (b) tank2, (c) tank3.

### 3.2 生物絮团系统中影响泡沫体积的因素分析

泡沫的形成受到气泡、水体表面张力、疏水性细菌(疏水颗粒)三者共同影响。水中气泡量、疏水性细菌数量与泡沫体积呈正相关; 水体表面张力与泡沫体积呈负相关<sup>[19-20]</sup>。在盐度 20, 温度 30 °C 的情况下, 正常海水的表面张力系数一般为 71.63 mN/m<sup>[21]</sup>。在本实验中, 水体表面张力随着养殖时间的增加而逐渐降低, 由初始值 (69.23±1.44) mN/m 降至 (65.95±0.82) mN/m, 泡沫体积未随表面张力的下降而增加, 因此在生物絮团系统中, 水体表面张力的变化对泡沫体积的变化并不起主导作用。

鉴于实验中所有实验组曝气设备一致, 排除气泡对泡沫体积的影响; 泡沫体积开始下降的日期早于进行养殖池交换的日期, 排除养殖池交换时加水的影响; 最后在排除水体表面张力变化对泡沫体积的影响后, 推测生物絮团系统中泡沫体积主要受疏水性细菌影响。Blackall 等<sup>[22]</sup>、Maza-Márquez 等<sup>[23]</sup>的研究表明, 在好氧环境, 水体 pH

为 6~8, 温度 23 °C 以上时(与本研究系统环境条件一致), 疏水性细菌是影响泡沫形成的主要因素, 例如在活性污泥系统中, 细胞壁含分枝菌酸的放线菌类 (*Mycolata*) 的生长和积累是形成泡沫的主要原因, 其细胞壁中所含的长链状的分枝菌酸构成了细胞表面疏水性 (CSH), CSH 是泡沫形成浮悬的必要条件, 除此之外, 微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 等疏水性细菌的存在也会导致泡沫产生。宋阳等<sup>[19]</sup>、谢冰等<sup>[20]</sup>的研究表明, F/M 是影响疏水性细菌数量的主要因素, 在高 F/M 条件下, 疏水性细菌会大量增殖并产生大量泡沫。Wei 等<sup>[24]</sup>的研究表明, 微丝菌和放线菌在生物絮团系统中存在, 这也从侧面提高了推测的可信度。综上所述, 生物絮团系统中的泡沫体积推测主要受疏水性细菌数量影响, 在本实验中, 生物絮团未形成(阶段 1)时 F/M 较高, 泡沫大量出现, 随着絮团形成, F/M 下降, 疏水性细菌数量减少, 泡沫量减少。值得注意的是, 疏水性细菌的疏水性受碳源投放影响较大<sup>[8]</sup>, 大量的碳源投放可能是导致生物絮团系统中泡沫量远大于其他养殖系统的原因。

## 4 结论

通过对凡纳滨对虾生物絮团养殖过程中泡沫体积变化及其与生物絮团、环境因子之间关系的研究, 得出以下结论:

①泡沫体积与 TAN 呈较高的正相关性, 泡沫体积由峰值开始下降的时间可作为判定生物絮团开始形成的辅助指标。

②生物絮团稳定, 水质条件较好时泡沫体积维持在较低值, 较低且稳定的泡沫体积可作为判定生物絮团稳定运行的指标, 本次实验中, 成熟稳定的生物絮团的泡沫体积维持在 0.011 0 m<sup>3</sup>/t 以下。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] Avnimelech Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 1999, 176(3-4): 227-235.
- [2] Emerenciano M G C, Martínez-Córdova L R, Martínez-Porchas M, *et al.* Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture[M]. London: IntechOpen, 2017: 92-109.
- [3] El-Sayed A F M. Use of biofloc technology in shrimp aquaculture: a comprehensive review, with emphasis on

- the last decade[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(1): 676-705.
- [4] Liu W C, Luo G Z, Chen W, *et al.* Effect of no carbohydrate addition on water quality, growth performance and microbial community in water-reusing biofloc systems for tilapia production under high-density cultivation[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(7): 2446-2454.
- [5] 王涛, 刘青松, 段亚飞, 等. 低 C/N 驯化生物絮团的自养和异养硝化性能研究 [J]. *海洋渔业*, 2018, 40(5): 614-624.
- Wang T, Liu Q S, Duan Y F, *et al.* Experimental study on autotrophic and heterotrophic nitrification performances of acclimated bio-floc with low C/N ratio[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(5): 614-624 (in Chinese).
- [6] Ray A J, Lewis B L, Browdy C L, *et al.* Suspended solids removal to improve shrimp (*Litopenaeus vannamei*) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal-exchange, superintensive culture systems[J]. *Aquaculture*, 2010, 299(1-4): 89-98.
- [7] Schweitzer R, Arantes R, Costódio P F S, *et al.* Effect of different biofloc levels on microbial activity, water quality and performance of *Litopenaeus vannamei* in a tank system operated with no water exchange[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 56: 59-70.
- [8] Petrovski S, Dyson Z A, Quill E S, *et al.* An examination of the mechanisms for stable foam formation in activated sludge systems[J]. *Water Research*, 2011, 45(5): 2146-2154.
- [9] 李探微, 彭永臻, 陈志根, 等. 活性污泥法的生物泡沫形成和控制 [J]. *中国给水排水*, 2001, 17(4): 73-76.
- Li T W, Peng Y Z, Chen Z G, *et al.* Formation and control of biological foaming in activated sludge process[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(4): 73-76 (in Chinese).
- [10] 高远, 李薏, 董登攀, 等. 凡纳滨对虾养殖系统中异养和自养型生物絮团的微生物特性及其与养殖水环境的关系 [J]. *中国水产科学*, 2022, 29(6): 864-873.
- Gao Y, Li M, Dong D P, *et al.* Microbial characteristics of heterotrophic and autotrophic biofloc in *Litopenaeus vannamei* culturing systems and their relationship with water quality[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(6): 864-873 (in Chinese).
- [11] 陈伟, 谭洪新, 罗国芝, 等. 构建硝化型生物絮凝系统过程中凡纳滨对虾养殖密度对水质与生长的影响 [J]. *上海海洋大学学报*, 2019, 28(2): 247-256.
- Chen W, Tan H X, Luo G Z, *et al.* Effects of stocking density on water quality and growth of *Litopenaeus vannamei* during construction of nitrifying biofloc system[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2019, 28(2): 247-256 (in Chinese).
- [12] American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 21st ed. Washington: APHA-AWWA-WEF, 2005.
- [13] 崔帅华, 余磊, 朱俊卿, 等. 基于透视变换的直升机桨根扭转角测量方法 [J]. *应用光学*, 2023, 44(02): 412-419.
- Cui S W, Yu L, Zhu J Q, *et al.* Measurement method of helicopter blade root torsion angle based on perspective transformation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(02): 412-419 (in Chinese).
- [14] 赵贯甲, 毕胜山, 吴江涛, 等. 毛细上升法表面张力实验系统改进 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(4): 546-548.
- Zhao G J, Bi S S, Wu J T, *et al.* A new surface tension measurement system based on capillary rise method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(4): 546-548 (in Chinese).
- [15] 汪冬华. 多元统计分析与 SPSS 应用 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2010.
- Wang D H. Application of SPSS and multivariate statistical analysis[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2010. (in Chinese).
- [16] Samocha T M. Sustainable biofloc systems for marine shrimp[M]. London: Academic Press, 2019: 133-151.
- [17] Pujol R, Duchene P, Schetrite S, *et al.* Biological foams in activated sludge plants: characterization and situation[J]. *Water Research*, 1991, 25(11): 1399-1404.
- [18] Cha D K, Jenkins D, Lewis W P, *et al.* Process control factors influencing *Nocardia* populations in activated sludge[J]. *Water Environment Research*, 1992, 64(1): 37-43.
- [19] 宋阳, 姜成英, 王爱杰, 等. 城市污水处理厂活性污泥生物泡沫研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2019, 46(8): 1954-1970.
- Song Y, Jiang C Y, Wang A J, *et al.* Research progress towards biological foaming of activated sludge in municipal wastewater treatment plants[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(8): 1954-1970 (in Chinese).
- [20] 谢冰, 徐亚同. 活性污泥污水处理厂生物泡沫产生机理及控制 [J]. *净水技术*, 2006, 25(1): 1-6.
- Xie B, Xu Y T. Review of the mechanism and control of scum and foaming for sewage treatment plant[J]. *Water Purification Technology*, 2006, 25(1): 1-6 (in Chinese).
- [21] 陈国华, 余敬曾, 郭玲, 等. 海水表面张力的研究——海水表面张力同温度和实用盐度之间的经验关系 [J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(3): 306-311.
- Chen G H, She J Z, Guo L, *et al.* Study on the surface tension of seawater—empirical relationship between seawater surface tension and temperature and practical salinity[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(3): 306-311 (in Chinese).
- [22] Blackall L L, Parlett J H, Hayward A C, *et al.* *Nocardia pinensis* sp. nov., an Actinomycete found in activated sludge foams in Australia[J]. *Journal of General Microbiology*, 1989, 135(6): 1547-1558.
- [23] Maza-Márquez P, Gómez-Silván C, Gómez M A, *et al.*



Linking operation parameters and environmental variables to population dynamics of Mycolata in a membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 180: 318-329.

[24] Wei Y F, Wang A L, Liao S A. Effect of different carbon sources on microbial community structure and composition of ex-situ biofloc formation[J]. *Aquaculture*, 2020, 515: 734492.

## Relationship among foam volume, environment parameters and biofloc situation in biofloc system in *Litopenaeus vannamei* culture

SONG Yifei<sup>1</sup>, ZHANG Jiasong<sup>2</sup>, LI Xian<sup>1</sup>, DONG Dengpan<sup>1</sup>, SONG Xiefu<sup>1\*</sup>

(1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** Biofloc technology (BFT) regulates the carbon-to-nitrogen ratio to promote the growth of heterotrophic bacteria, which assimilates ammonia nitrogen in the water into microbial nitrogen, reducing the accumulation of ammonia nitrogen during aquaculture and forming a biofloc consisting of bacteria, organic particles, extracellular polymers, and plankton. It is widely used in *Litopenaeus vannamei* culture. In practical production, relying solely on monitoring indicators such as pH, dissolved oxygen, total ammoniacal nitrogen (TAN), and nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2^-$ -N) cannot comprehensively reflect the real-time formation progress and health status of biofloc. This limitation poses challenges to effective biofloc control, demanding the identification of more appropriate monitoring indicators to ensure biofloc stability. Within the biofloc culture system, foam is a surface feature. Therefore, studying the relationship between biofloc and foam, and identifying effective monitoring indicators is crucial for achieving adequate control over the operational status of the biofloc system. This approach is important in maintaining biofloc stability and ensuring safe production during aquaculture. This study employed three commercial biofloc culture systems for *L. vannamei* and conducted a 100-day experiment focusing on plankton and foam. Parameters such as foam volume, water surface tension, and water environment parameters were measured. By tracking and monitoring the changes in foam volume, the relationship between plankton, foam, and the operational status of the biofloc culture system was analyzed. This allowed for determining of the biofloc's operational condition through the patterns of foam volume. Pearson correlation coefficient was employed to analyze the correlation between foam volume, water surface tension, biofloc mass, water quality factors, and other parameters, investigating the relationship between foam volume and operation status of biofloc. The results revealed that water surface tension did not significantly affect foam. It also showed a positive correlation between foam volume and total ammoniacal nitrogen (TAN) with a correlation coefficient of 0.571. According to the existing evaluation system, when TAN peaked and began to decline, it signified the biofloc entering stage 2. Additionally, the date for the foam volume changed from increasing to decreasing was highly correlated with the date for biofloc began to form, with a time difference of less than five days. With the formation of formation, the foam volume gradually decreased. Therefore, when foam volume started to decline from its peak could serve as an auxiliary indicator to determine the initiation of biofloc development. When the biofloc was stable, and water quality conditions were favorable, the foam volume remained at a relatively low level. A consistently low and stable foam volume could be used as an indicator to assess the stability of the biofloc. This experiment maintained the foam volume during stable biofloc operation below 0.011 0 m<sup>3</sup>/t (0.011 0 m<sup>3</sup> of foam per ton of water). The research results can be valuable for better control of biofloc and provide essential guidance for promoting the *L. vannamei* culture in biofloc technology.

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*; biofloc; foam; environment parameter; indicator

**Corresponding author:** SONG Xiefu. E-mail: [yuchuan@ouc.edu.cn](mailto:yuchuan@ouc.edu.cn)

**Funding projects:** National Key R & D Program of China (2022YFD2001704)