

# 凡纳滨对虾养殖水体悬浮颗粒物特征的初步研究

屈佳乐, 姜玉声\*, 李冰玉, 水利侠, 李欣宇, 张冰倩, 刘心怡, 刘泽群, 王函

大连海洋大学大连市虾蟹繁育与健康养殖重点实验室, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月3日; 发布日期: 2025年3月12日

## 摘要

为探究凡纳滨对虾养殖水体悬浮颗粒物的产生及发展规律, 本试验对养殖过程中悬浮颗粒物的主要来源, 以及曝气量和曝气方式对悬浮颗粒物数量的影响进行研究, 旨在减少在养殖过程中悬浮颗粒物对水质的影响, 解决浓度过高而降低凡纳滨对虾的成活率从而影响养殖效益的问题。在室内水温 $26^{\circ}\text{C}$ ~ $28^{\circ}\text{C}$ , 盐度为30的条件下, 进行了3个试验, 1) 投放30尾凡纳滨对虾仔虾(A1)、不投放凡纳滨对虾(B1); 2) 均采用气石曝气的条件下, 曝气量8 ml/s(A2)、16 ml/s(B2)、24 ml/s(C2)、32 ml/s(D2); 3) 曝气量均为24 ml/s的条件下, 气石曝气(A3)、微孔纳米管曝气(B3)、文丘里射流器曝气(C3)。试验时间为30 d, 结果表明: 在实验过程中A1、B1两组悬浮颗粒物、溶解氧(DO)、总氨氮(TAN)和亚硝酸氮( $\text{NO}_2^-$ -N)浓度均有显著性差异( $P < 0.05$ ), 养殖后期A1组悬浮颗粒物、TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度最大值分别为 $(667.3 \pm 16.7)$  mg/L、 $(1.18 \pm 0.08)$  mg/L和 $(0.52 \pm 0.04)$  mg/L, DO最小值为 $(4.76 \pm 0.08)$  mg/L; 试验结束时C2组的悬浮颗粒物、TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度均显著低于A1组( $P < 0.05$ ), 最小值分别为 $(512.3 \pm 53.3)$  mg/L、 $(1.33 \pm 0.15)$  mg/L和 $(0.37 \pm 0.04)$  mg/L, 溶解氧最小值为 $(5.31 \pm 0.11)$ ; 试验后期B3组的悬浮颗粒物、TAN和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度均显著低于C3组( $P < 0.05$ ), 最小值分别为 $(536 \pm 36.77)$  mg/L、 $(1.62 \pm 0.02)$  mg/L和 $(0.50 \pm 0.04)$  mg/L, 溶解氧最小值为 $(5.31 \pm 0.11)$ 。本试验条件下, 发现约有80.24%的悬浮颗粒物来自凡纳滨对虾的生长代谢, 选择24 mg/L的曝气量和微孔纳米管作为曝气设备能有效地减少悬浮颗粒物的产生, 控制凡纳滨对虾养殖过程中的水质。

## 关键词

凡纳滨对虾, 悬浮颗粒物, 曝气量, 曝气方式

# A Preliminary Study on the Sources and Influencing Factors of Suspended Particulate Matter in the Cultivation Process of *Litopenaeus vannamei*

\*通讯作者。

Jiale Qu, Yusheng Jiang\*, Bingyu Li, Lixia Shui, Xinyu Li, Bingqian Zhang,  
Xinyi Liu, Zequn Liu, Han Wang

Dalian Key Laboratory of Breeding, Reproduction and Aquaculture of Crustaceans, Dalian Ocean University,  
Dalian Liaoning

Received: Feb. 10<sup>th</sup>, 2025; accepted: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2025; published: Mar. 12<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

In order to explore the generation and development law of suspended particulates in the aquaculture water of *Litopenaeus vannamei*, this experiment studied the main sources of suspended particulates in the aquaculture process, as well as the influence of aeration rate and aeration method on the number of suspended particulates, aiming to reduce the impact of suspended particulates on water quality in the aquaculture process and solve the problem that high concentration reduces the survival rate of *Litopenaeus vannamei* and affects the efficiency of breeding. Under the conditions of indoor water temperature of 26°C~28°C and salinity of 30, three experiments were carried out: 1) Put 30 *Litopenaeus vannamei* in the tank (A1) and not with *Litopenaeus vannamei* (B1); 2) Under the condition of aeration of air stone, the aeration volume is 8 ml/s (A2), 16 ml/s (B2), 24 ml/s (C2) and 32 ml/s (D2); 3) Under the condition that the aeration volume is 24 ml/s, aerated by gas stone (A3), aeration of microporous nanotubes (B3), and aeration of Venturi jet (C3). The test time was 30 days, and the results showed that there were significant differences in the concentrations of suspended particulate matter, dissolved oxygen (DO), total ammonia nitrogen (TAN) and nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2^-$ -N) between the A1 and B1 groups during the experiment ( $P < 0.05$ ), and the maximum concentrations of suspended particulate matter, TAN and  $\text{NO}_2^-$ -N in the A1 group in the later stage of cultivation were  $(667.3 \pm 16.7)$  mg/L,  $(1.18 \pm 0.08)$  mg/L and  $(0.52 \pm 0.04)$  mg/L, respectively, and the minimum DO was  $(4.76 \pm 0.08)$  mg/L. At the end of the experiment, the concentrations of suspended particulate matter, TAN and  $\text{NO}_2^-$ -N in the C2 group were significantly lower than those in the A1 group ( $P < 0.05$ ), with the minimum values of  $(512.3 \pm 53.3)$  mg/L,  $(1.33 \pm 0.15)$  mg/L and  $(0.37 \pm 0.04)$  mg/L, respectively, and the minimum values of dissolved oxygen  $(5.31 \pm 0.11)$ . At the end of the experiment, the concentrations of suspended particulate matter, TAN and  $\text{NO}_2^-$ -N in group B3 were significantly lower than those in group C3 ( $P < 0.05$ ), with the minimum values of  $(536 \pm 36.77)$  mg/L,  $(1.62 \pm 0.02)$  mg/L and  $(0.50 \pm 0.04)$  mg/L, respectively, and the minimum values of dissolved oxygen  $(5.31 \pm 0.11)$ . Under the conditions of this experiment, it was found that about 80.24% of the suspended particulate matter came from the growth and metabolism of *Litopenaeus vannamei*, and the selection of 24 mg/L aeration capacity and microporous nanotubes as aeration equipment could effectively reduce the generation of suspended particulate matter and control the water quality in the process of shrimp culture.

## Keywords

*Litopenaeus vannamei*, Suspended Particulate Matter, Aeration Volume, Aeration Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

凡纳滨对虾，又名南美白对虾，学名为(*Litopenaeus vannamei*)，属节肢动物门，甲壳纲，十足目，对

虾属。其生存适温在 18℃~32℃之间，适宜盐度为 1~40，常栖息在水深约 80 cm 的水深环境中，该虾还具有生长周期短、抗逆性强和产量高等优点，故而一直有着很高的市场需求，现已成为我国的重要水产经济养殖品种之一[1]-[3]。随着凡纳滨对虾引进我国及高密度、集约化养殖模式的兴起，其产量与养殖面积一度占据了对虾产业的 90% 左右[4]。然而，随着凡纳滨对虾养殖规模的扩大，高密度养殖、集约化的不断发展，病害和污染等问题开始逐渐显现，其中由于养殖水体中悬浮颗粒物的增多引发 TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 含量超标的现像，对养殖生物本身和食品安全都造成了严重的威胁[5]。

悬浮颗粒物的定义是在水产养殖的水体中直径大于 1 μm 的不可沉降颗粒[6]。据有关研究悬浮颗粒物如果大量累积会引发所养殖鱼虾的鳃阻塞或损伤，致使鱼虾获取氧气的效率降低，影响生长与健康。悬浮颗粒物凹凸不平的表面为细菌和病原体提供了黏附空间，提高了养殖环境的致病风险[7]。池塘养殖中如果悬浮颗粒物的浓度过高，其矿化分解会产生大量的 TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N，沉降渗透到池底破坏池塘养殖的土壤质量，引起水体富营养化，甚至可能导致养殖生物中毒死亡[8][9]。在循环水养殖模式中，悬浮颗粒物的积累间接加重养殖系统其他设备的负担，如异养细菌利用细微颗粒物进行矿化作用，消耗溶解氧并产生氨，加重生物滤池的负担[10]；微粒附着在紫外消毒器表面，削弱杀菌效果[11]。悬浮颗粒物不仅影响养殖动物的健康生长，造成水产养殖效益的损失，也可能加重周围环境与其他养殖设备的负担，因此，保持养殖水体中悬浮颗粒物浓度在一个合适的范围内是十分必要的[12]-[14]。

悬浮颗粒的沉降状态受自身特性和水体动力扰动的影响，造成水体动力扰动的变化因素有很多，胡艺萱、叶继良和吉泽坤分别从调节循环水回流进入水槽时的入水距离和射流角度、反应锥锥体内的养殖水体剪切力和养殖工船船体的横摇运动方向入手，探究水体扰动变化对悬浮颗粒物的影响，并均探索出可以提高排污效率的有效方法[15]-[17]。本试验旨在分析在相同试验条件下，不同大小的曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中所产生悬浮颗粒物的变化所造成的影响，找到在实际养殖生产中合适的曝气量；气石、微孔纳米管和新兴起的文丘里射流器是如今在凡纳滨对虾养殖中较为常见的曝气方式，三种曝气方式对水体的扰动各不相同，因此本文对养殖过程中同样会造成水体扰动变化的曝气量和曝气方式进行初步的探究，以期能为养殖凡纳滨对虾的生产养殖提供有效避免悬浮颗粒物浓度过高而导致的减产的数据，做到有效的调控水质，增加凡纳滨对虾的成活率。

## 2. 材料和方法

### 2.1. 试验材料

凡纳滨对虾仔虾购自辽宁省凌海市海润水产有限公司，对虾的平均体质量为  $0.63 \pm 0.2$  g，体长  $2.3 \pm 0.3$  cm。饲料为天津通威有限公司 0.3 mm 破碎颗粒料。海水取自大连海洋大学黑石礁渔园沿岸，海水经沉淀和砂滤处理后，以漂白粉消毒，连续曝气、紫外杀菌处理后备用，后续需要补充入养殖水槽的水质指标如表 1 所示。

**Table 1.** The water quality indicators of the aquaculture tank will be supplemented  
**表 1.** 补充入养殖水槽的水质指标

养殖水槽内水质指标	每 L 海水中浓度
颗粒物浓度	$16 \pm 4$ mg/L
溶解氧(DO)	$7.23 \pm 0.02$ mg/L
总氨氮(TAN)	0 mg/L
亚硝酸氮( NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N )	0 mg/L

## 2.2. 试验方法

### 2.2.1. 探究凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物的主要来源

为确定系统中悬浮颗粒物的主要来源，将养殖系统内有无凡纳滨对虾做一个对比。将 6 个容积均为 90 L 的养殖水槽分为两组，取其中 3 个养殖水槽投入 30 尾凡纳滨对虾仔虾，是为 A1 组；剩余三个水槽不投放仔虾，是为 B1 组，连续养殖 30 d，每组设置 3 个平行。

各组均在每日早 6:30 进行排污补水，每 3 d 检测水体中氨氮含量、亚硝酸氮含量和悬浮颗粒物浓度，每日早晚投喂两次，每次投喂饲料量为 3 g。

使用重量法不定期测定悬浮颗粒物浓度，通过玻璃纤维滤膜抽滤水样，在 103℃~104℃烘箱中烘干 2 h 后称重，使用精度为 0.001 g 的天平称量悬浮物重量，再除以水样采集体积，得到最终的悬浮颗粒物浓度。

$$\text{悬浮颗粒物浓度 } C_i = [(W_2 - W_1)/V] \times 100\% \quad (1)$$

式中， $W_2$  是干燥后滤膜的质量， $W_1$  是过滤前滤膜的质量， $V$  是水样体积，所得  $C_i$  为第  $i$  h 的悬浮颗粒物浓度；

取样后对水样进行分类编号，2 h 内在水化试验室实验室完成测定，水质的测定方法如表 2。

**Table 2.** Methods for determining water quality  
**表 2. 水质测定方法**

水质指标	测定方法
悬浮颗粒物浓度	重量法[18]
TAN	纳氏试剂法[19]
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	重氮-偶氮光度法[19]
DO	便携式溶氧仪
pH	便携式 pH 计

### 2.2.2. 曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物的影响

为探究水体动力中曝气量对养殖水体水的影响进而影响水体中悬浮颗粒物的变化，将 12 个装有 30 尾凡纳滨对虾的养殖水槽分为 4 组，其中 A2、B2、C2 和 D2 组的曝气量分别为 8 ml/s、16 ml/s、24 ml/s 和 32 ml/s，将每个养殖槽内的气石布置在槽体中央，距离槽底深度 1/5 处，来进行曝气充氧，每组设置 3 个平行。

养殖及测定方法同上。

### 2.2.3. 曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物的影响

为探究水体动力中不同的充氧曝气方式对水体影响进而影响水体中悬浮颗粒物变化，将 9 个装有 30 尾凡纳滨对虾的养殖水槽分为 3 组，其中 A3 组采用气石充氧曝气，B3 组采用微孔纳米管充氧曝气，C3 组采用文丘里射流器充氧曝气，曝气设备的位置选择与 2.2.2 相同，用气流计调节每个装置的曝气速度均设置为 24 ml/s，A3、B3 和 C3 每组均设置 3 个平行。

养殖及测定方法同上。

## 2.3. 数据处理

试验数据以平均值±标准差的形式表示。使用 SPSS27.0.1 软件对数据进行单因素方差(one-way ANOVA)分析，用 Duncan 多重比较法进行组间差异性检验，若  $P < 0.05$ ，则认为存在显著性差异，用

Origin2014 对养虾过程中的 TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度和生物絮团体积进行 Pearson 相关性分析和绘图。

### 3. 结果

#### 3.1. 探究凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物的主要来源

凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度变化如图 1。试验期间, A1 组悬浮颗粒物浓度在前 6 d 低于 B1 组, 第 6 d 后 A1 组开始升高, 显著高于 B1 组( $P < 0.05$ ), 在第 24 d 时变化趋于平缓, 于第 30 d 时达到最大值( $667.3 \pm 16.7$ ) mg/L; B1 组全程变化平缓, 在第 30 日达到最大值( $131 \pm 8.5$ ) mg/L。

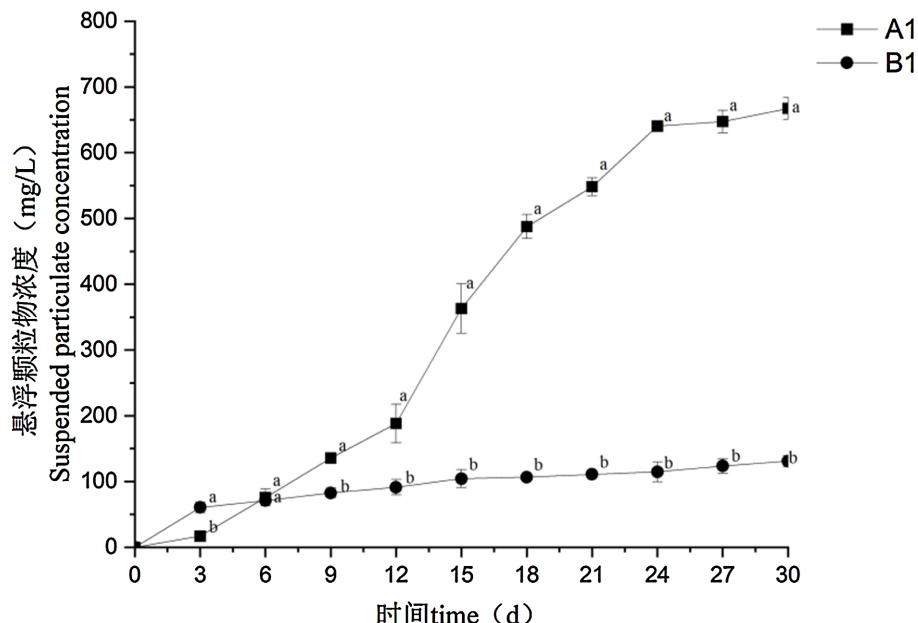


Figure 1. Changes in the concentration of suspended particulate

图 1. 悬浮颗粒物浓度变化

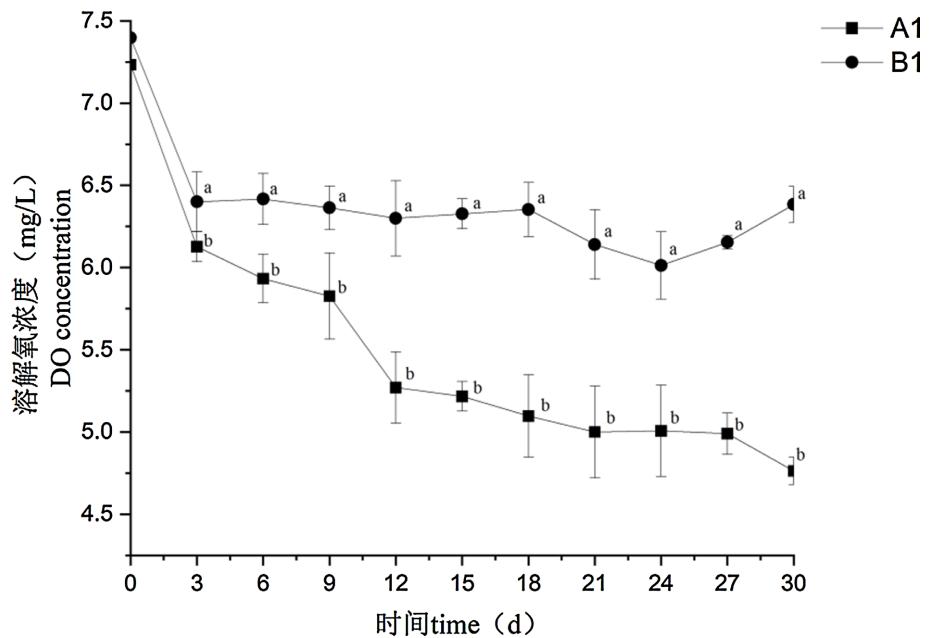
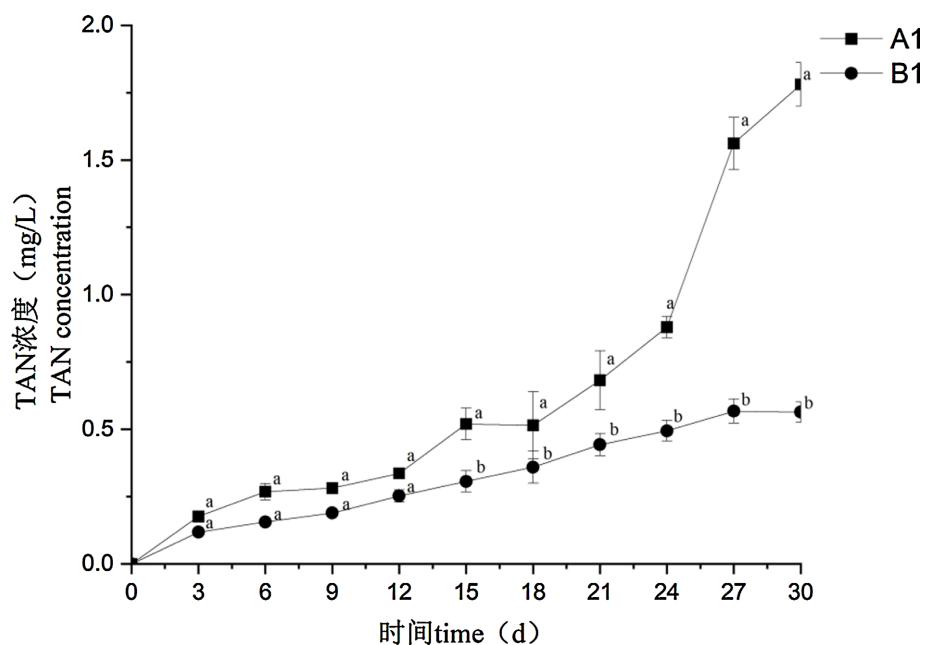
凡纳滨对虾养殖过程中 DO 浓度变化如图 2。在整个试验期间 A1 组与 B1 组的 DO 浓度有显著性差异( $P < 0.05$ )。A1 组 DO 整体呈下降趋势, 在 0 d~12 d 期间下降速率较快, 12 d~30 d 下降趋势较为平缓, 在 30 d 时达到最小值, 为( $4.76 \pm 0.08$ ) mg/L; B1 组 DO 先下降然后平稳波动, 在第 24 d 时 DO 浓度达到最小值( $6.01 \pm 0.21$ ) mg/L。

凡纳滨对虾养殖过程中 TAN 变化如图 3。试验期间, A1、B1 组 TAN 均呈上升趋势, 在 0 d~12 d 期间, A1 组与 B1 组无显著性差异, TAN 升高速度相近。第 12 d~第 30 d, A1 与 B1 出现显著差异( $P < 0.05$ ), A1 组 TAN 浓度升高速率变快, 在第 30 d 时 TAN 浓度达到最大值( $1.78 \pm 0.08$ ) mg/L; B1 组 TAN 浓度在整个试验过程中呈持续升高, 在第 27 d 时 TAN 浓度达到最大值( $0.56 \pm 0.04$ ) mg/L。

凡纳滨对虾养殖过程中  $\text{NO}_2^-$ -N 变化如图 4。试验期间, A1、B1 组  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度均呈上升趋势, 在整个试验期间, A1 组的  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度显著高于 B1 组( $P < 0.05$ )。第 0 d~15 d, A1 组和 B1 组  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度的上升趋势较快, 15 d 后, 上升趋势开始变的平缓, 两组均在第 30 d 时达到最大值, 分别为( $0.52 \pm 0.04$ ) mg/L 和( $0.26 \pm 0.01$ ) mg/L。

#### 3.2. 不同曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物和水质的影响

不同曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度影响如图 5。整个试验期间各组悬浮颗粒物

**Figure 2.** Changes in the concentration of DO**图 2.** 溶解氧浓度变化**Figure 3.** Changes in the concentration of TAN**图 3.** 总氨氮浓度变化

均呈上升趋势。试验前期，各组悬浮颗粒物浓度未出现明显差异，12 d~30 d 期间，A2 组开始快速升高与另外三组出现显著性差异( $P < 0.05$ )。试验结束时，B2、C2、D2 三组均达到最大值，分别为 $(637.6 \pm 26.4)$  mg/L、 $(512.3 \pm 53.5)$  mg/L、 $(483 \pm 32.1)$  mg/L，A2 组在第 27d 时达到最大值 $(372.3 \pm 60.1)$  mg/L。

不同曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中 DO 浓度影响如图 6。整个试验期间 A2、B2 两组整体呈下降趋势，实验后期 21 d~30 d 期间 B2 组显著高于 A2 组( $P < 0.05$ )，两组均在试验结束时达到最小值，分别为

$(4.45 \pm 0.07)$  mg/L 和  $(4.47 \pm 0.06)$  mg/L；在 15 d~30 d 试验期间内 C2 和 D2 无显著差异，30 d 时 C2 组达到最小值  $(5.31 \pm 0.11)$  mg/L，27 d 时 D2 组达到最小值  $(5.36 \pm 0.22)$  mg/L。

不同曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度影响如图 7。整个试验期间各组 TAN 浓度均呈上升趋势，A2 组显著高于其他三组( $P < 0.05$ )；在实验前期 B2、C2、D2 三组 TAN 浓度接近，试验结束时，各组 TAN 均达到最大值，分别为  $(2.16 \pm 0.05)$  mg/L、 $(1.47 \pm 0.23)$  mg/L、 $(1.33 \pm 0.15)$  mg/L 和  $(1.03 \pm 0.05)$  mg/L。

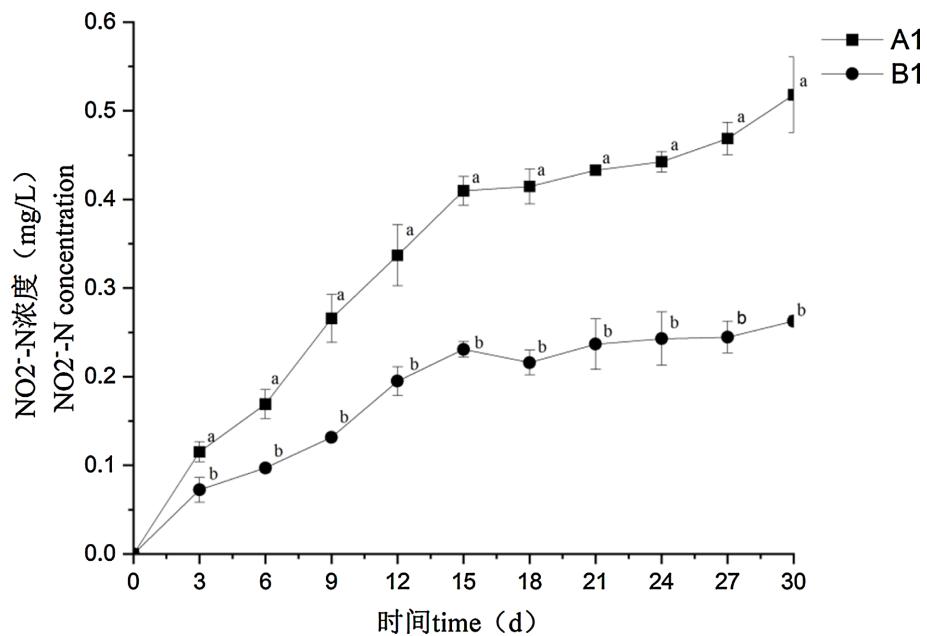


Figure 4. Changes in the concentration of  $\text{NO}_2^-$ -N

图 4. 亚硝酸氮浓度变化

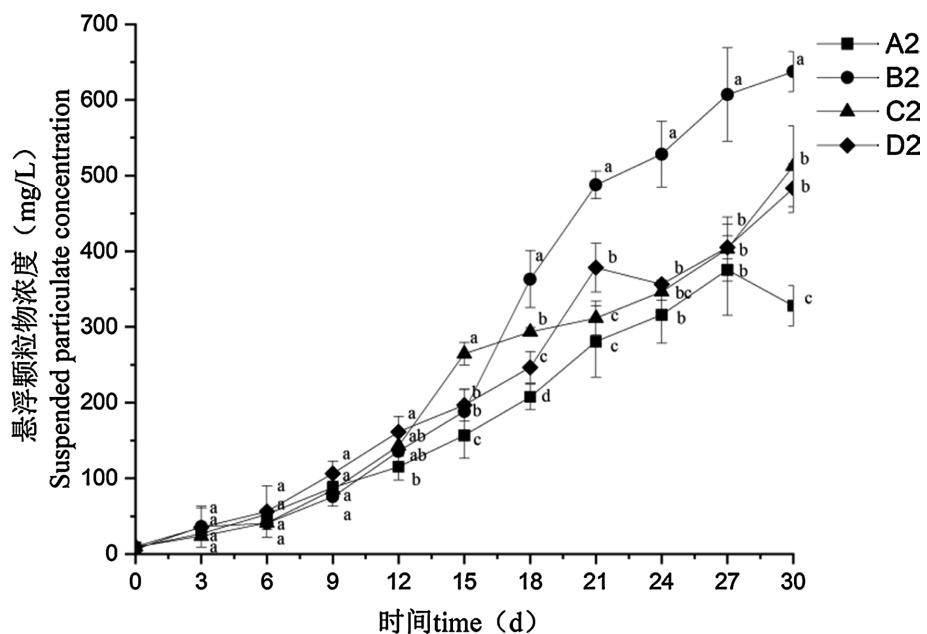


Figure 5. Changes in the concentration of suspended particulate

图 5. 悬浮颗粒物浓度变化

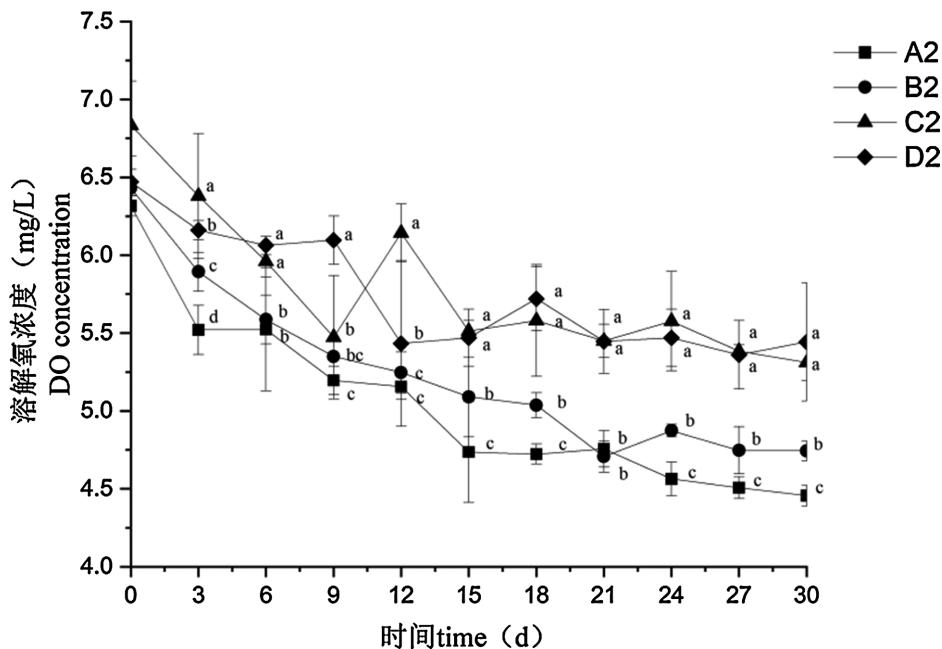
**Figure 6.** Changes in the concentration of DO

图 6. 溶解氧浓度变化

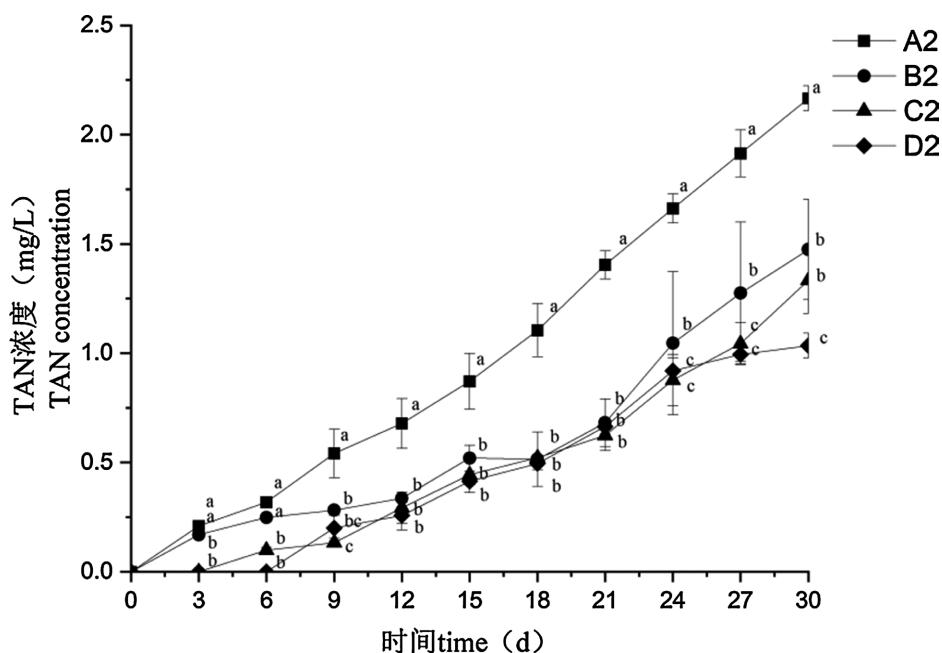
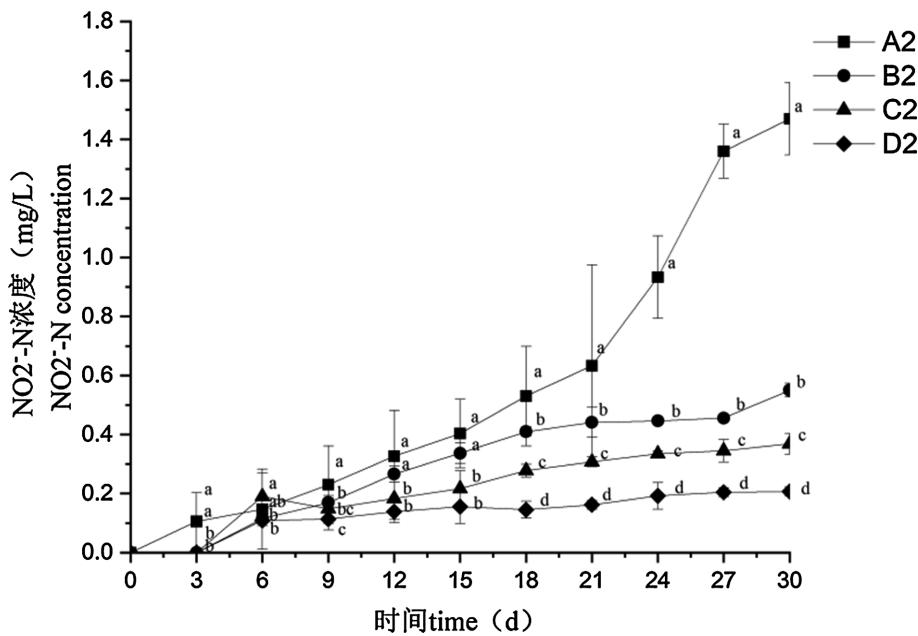
**Figure 7.** Changes in the concentration of TAN

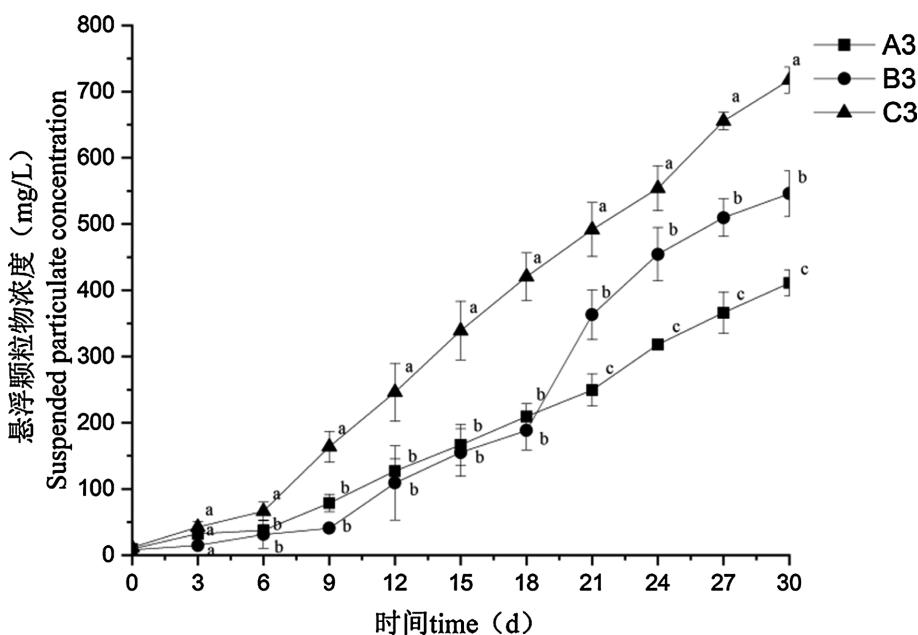
图 7. 总氨氮浓度变化

不同曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度影响如图 8。整个试验期间各组均呈上升趋势，试验中后期第 9 d~30 d 期间内，A2 组  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度开始显著高于其他三组( $P < 0.05$ )；相比 A2 组 B2、C2、D2 三组升高趋势较为平缓，15 d~30 d 期间内三组  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度具有显著性差异( $P < 0.05$ )。各组的  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度均在试验结束时达到最大值，分别为 $(1.47 \pm 0.12)$  mg/L、 $(0.55 \pm 0.02)$  mg/L、 $(0.37 \pm 0.04)$  mg/L 和 $(0.21 \pm 0.02)$  mg/L。

**Figure 8.** Changes in the concentration of  $\text{NO}_2\text{-N}$ **图 8. 亚硝酸氮浓度变化**

### 3.3. 不同曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物和水质的影响

不同曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度影响如图 9。整个试验期间内各组悬浮颗粒物浓度均呈上升趋势。从 6 d~30 d 试验结束, C3 组悬浮颗粒物浓度显著高于另外两组( $P < 0.05$ )；18 d~30 d 期间内, A3、B3 两组出现显著差异( $P < 0.05$ )。三组悬浮颗粒物浓度均在试验结束时达到最大值, 分别为(411 ± 20.01) mg/L、(536 ± 36.77) mg/L 和(397.3 ± 19.75) mg/L。

**Figure 9.** Changes in the concentration of suspended particulate**图 9. 悬浮颗粒物浓度变化**

不同曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中 DO 浓度影响如图 10。整个试验期间各组均呈波动式下降。在试验 12 d~30 d 期间 B3 组 DO 浓度显著高于其他两组( $P < 0.05$ )，在试验 15 d~27 d 期间内 C3 组 DO 浓度一直低于 A3、B3 两组，并于 24 d 时达到最低值( $4.48 \pm 0.10$ ) mg/L；A3、B3 两组均在试验结束时达到最低值( $4.76 \pm 0.08$ ) mg/L 和( $5.31 \pm 0.11$ ) mg/L。

不同曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度影响如图 11。整个试验期间内各组 TAN

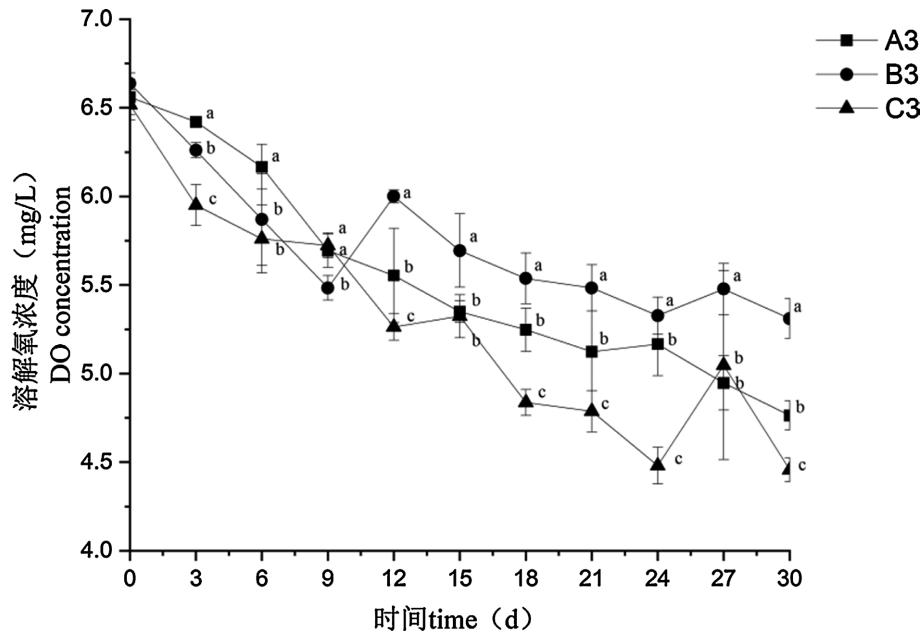


Figure 10. Changes in the concentration of DO

图 10. 溶解氧浓度变化

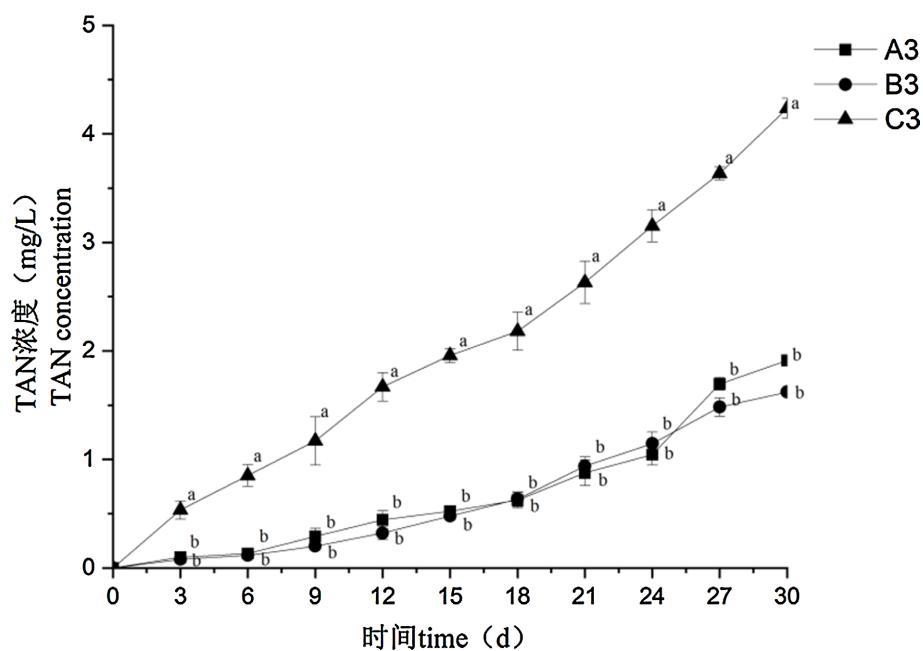


Figure 11. Changes in the concentration of TAN

图 11. 总氨氮浓度变化

浓度均呈上升趋势, A3、B3 组上升趋势较为平缓, 且两组未出现显著差异; C3 组上升趋势较快, 且显著高于 A3、B3 组( $P < 0.05$ )。各组 TAN 浓度均在试验结束时达到最大值, 分别为 $(1.91 \pm 0.05)$  mg/L、 $(1.62 \pm 0.02)$  mg/L 和 $(4.24 \pm 0.09)$  mg/L。

不同曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物浓度影响如图 12。整个试验期间 A3、B3 组上升趋势较为平缓, 且两组未出现显著差异; C3 组上升趋势较快, 且显著高于 A3、B3 组( $P < 0.05$ )。各组  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度均在试验结束时达到最大值, 分别为 $(0.53 \pm 0.02)$  mg/L、 $(0.50 \pm 0.04)$  mg/L 和 $(3.27 \pm 0.40)$  mg/L。

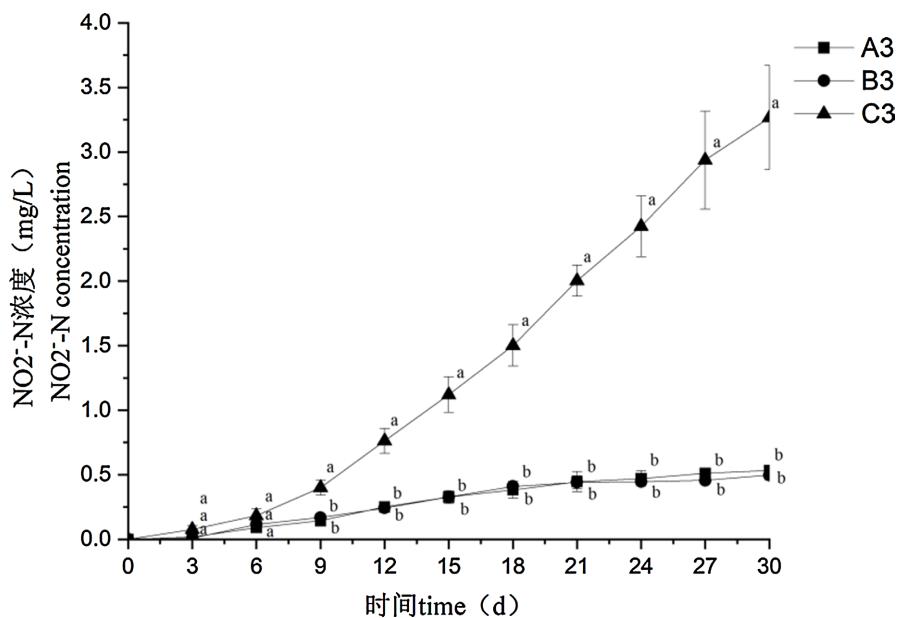


Figure 12. Changes in the concentration of  $\text{NO}_2^-$ -N

图 12. 亚硝酸氮浓度变化

## 4. 讨论

### 4.1. 探究凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物的主要来源

悬浮颗粒物是水产养殖和水质分析领域的一个非常重要的研究方向, 其作为影响水质好坏的一个重要因素, 对养殖的是否成功起着十分重要的作用。本试验通过养殖系统中有无凡纳滨对虾来探究养殖过程中悬浮颗粒物产生的主要来源。在为期 30 d 的养殖试验中, 发现投放凡纳滨对虾仔虾的 A1 组悬浮颗粒物浓度显著高于未投放凡纳滨对虾的 B1 组, 试验结束时 A1 组的悬浮颗粒物浓度约是 B1 组的 5 倍, 由此可知约有 80.24% 的悬浮颗粒物从凡纳滨对虾生长代谢中产生, 此数据与梁则优对养殖尾水的处理研究中结论: 约有 81% 悬浮颗粒物来自于养殖生物的代谢物和次代谢物相吻合[20]。

A1 组的溶解氧显著低于 B1 组, TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 含量也显著高于 B1 组, 林中凌的研究曾提到, 悬浮颗粒物在水中的矿化分解会产生氨态氮和亚硝酸氮, 使水体中 TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 含量升高, 本试验与此结论相吻合。养殖环境中 TAN 浓度过高时会对凡纳滨对虾的发育产生负面影响, TAN 会穿透动物的细胞膜对其造成毒害[21]。而  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度过高时, 养殖生物抗病能力越弱, 从而影响养殖对象的生殖发育[22]。

### 4.2. 不同曝气量对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物和水质的影响

在本试验中, 结合上述悬浮颗粒物、DO、TAN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 数据结果, C2 和 D2 组要明显优于 A2 和

B2 组，在养殖试验的中后期 D2 组养殖凡纳滨对虾的水槽中出现大量的藻类，推测应是曝气量过高而导致养殖水体中藻类大量繁殖[23] [24]，由此可知，曝气量并非越大越有利。C2 组的 TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度在整个试验过程中一直保持在一个合适的浓度区间，研究表明，在养殖凡纳滨对虾仔虾的过程中，水体 TAN 含量不能超过 6.24 mg/L，NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的浓度不能超过 8.9 mg/L，否则将会造成凡纳滨对虾仔虾中毒死亡[25] [26]。将曝气量调整为 24 mg/L 同时也能够减少曝气设备的电能和压缩机的损耗，延长设备的使用寿命，既减少耗电成本又使养殖变得更加绿色。

### 4.3. 不同曝气方式对凡纳滨对虾养殖过程中悬浮颗粒物和水质的影响

本实验中曝气量为 24 mg/L 时，在气石和微孔纳米管对养殖水体的扰动作用下，水中悬浮颗粒物浓度要高于 C3 组，而 C3 组的悬浮颗粒物在养殖水槽的四角出现大量堆积沉降，如果在池塘养殖的环境下，这些堆积沉降的颗粒物会渗透并破坏池塘土壤[27]，蔡世涛的研究表明微孔纳米管可有效净化水体中的 TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的同时也可净化土壤，改善池塘底质[28]。A3、B3 两组的 TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度差异并不明显，在试验后期，B3 组的 DO 含量显著高于 A3 组，这说明在相同曝气量的试验条件下微孔纳米管的溶解曝气效果更好，与韩永望在探究气石和微孔纳米管的曝气效果时所得结论相吻合[29]。在试验结束时观测发现，B2 组凡纳滨对虾仔虾活力、体长和体重对比另外两组更加良好，推测应是微孔纳米管曝气时候造成的垂直扰动水流更加有利于凡纳滨对虾的生长[30]。在本次实验中，B3 组的 TAN 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度也一直保持在一个较低的一个浓度区间，说明选用微孔纳米管进行曝气充氧对凡纳滨对虾的生长更为有利。

### 基金项目

国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”项目(2022YFE0117900)；国家自然科学基金面上项目(42276145)；2023 年大学生创新创业训练计划项目；辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金。

### 参考文献

- [1] 麦贤杰, 黄伟健, 叶富良. 对虾健康养殖学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 6-7.
- [2] Wang, Q., Yu, Y., Yuan, J., Zhang, X., Huang, H., Li, F., et al. (2017) Effects of Marker Density and Population Structure on the Genomic Prediction Accuracy for Growth Trait in Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei*. *BMC Genetics*, **18**, Article No. 45. <https://doi.org/10.1186/s12863-017-0507-5>
- [3] 索建杰, 王玉玮, 姜玉声, 等. 三种凡纳滨对虾养殖模式的水质特征及养殖效果[J]. 水产学杂志, 2015, 28(5): 12-17.
- [4] 中华人民共和国农业农村部. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
- [5] 牛江波, 吴赵军, 李亚松, 等. 循环水养殖模式对凡纳滨对虾养殖水质及生长性能的影响[J]. 渔业研究, 2023, 45(3): 287-296.
- [6] Chen, S., Timmons, M.B., Bisogni, J.J. and Aneshansley, D.J. (1994) Modeling Surfactant Removal in Foam Fractionation: II—Experimental Investigations. *Aquacultural Engineering*, **13**, 183-200. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)90002-7)
- [7] Wong, C.K., Pak, I.A.P. and Jiang Liu, X. (2012) Gill Damage to Juvenile Orange-Spotted Grouper Epinephelus Coioides (Hamilton, 1822) Following Exposure to Suspended Sediments. *Aquaculture Research*, **44**, 1685-1695. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2012.03173.x>
- [8] Yuvanatemiya, V. and Boyd, C.E. (2006) Physical and Chemical Changes in Aquaculture Pond Bottom Soil Resulting from Sediment Removal. *Aquacultural Engineering*, **35**, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.02.001>
- [9] Papageorgiou, N., Kalantzi, I. and Karakassis, I. (2010) Effects of Fish Farming on the Biological and Geochemical Properties of Muddy and Sandy Sediments in the Mediterranean Sea. *Marine Environmental Research*, **69**, 326-336. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.12.007>
- [10] Zhu, S. and Chen, S. (2001) Effects of Organic Carbon on Nitrification Rate in Fixed Film Biofilters. *Aquacultural*

*Engineering*, **25**, 1-11. [https://doi.org/10.1016/s0144-8609\(01\)00071-1](https://doi.org/10.1016/s0144-8609(01)00071-1)

- [11] Davidson, J. and Summerfelt, S.T. (2005) Solids Removal from a Coldwater Recirculating System—Comparison of a Swirl Separator and a Radial-Flow Settler. *Aquacultural Engineering*, **33**, 47-61.  
<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.002>
- [12] Kroupova, H., Machova, J., Piackova, V., Blahova, J., Dobsikova, R., Novotny, L., et al. (2008) Effects of Subchronic Nitrite Exposure on Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **71**, 813-820.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.01.015>
- [13] 季明东. 海水循环水养殖系统悬浮颗粒物去除机制及其粒径分布特征研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [14] 张乐平. 电絮凝对水产养殖水体悬浮颗粒物去除的增强效应研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [15] 胡艺萱, 刘鹰, 任效忠, 等. 基于流态的方形圆弧角养殖池进水系统优化数值研究[J]. 水产学报, 2023, 47(5): 180-191.
- [16] 叶继良, 孙大川, 谭洪新, 等. 不同剪切力对生物絮团粒径及其水处理效果的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(4): 691-701.
- [17] 吉泽坤, 刘晃, 崔铭超, 等. 颗粒特性对矩形养殖舱中颗粒物去除效果的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(5): 1068-1079.
- [18] 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范: 第4部分海水分析: GB17378.4-2007 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [19] 雷衍之. 养殖水环境化学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 26-85.
- [20] 梁则优. 基于物理过滤的池塘圈养尾水处理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [21] 罗静波, 曹志华, 蔡太锐, 等. 氨氮对克氏原螯虾幼虾的急性毒性研究[J]. 长江大学学报(自科版): 中旬, 2006, 3(4): 183-185.
- [22] 黄翔鸽, 李长玲, 郑莲, 等. 亚硝酸盐氮对凡纳滨对虾毒性和抗病相关因子影响[J]. 水生生物学报, 2006, 30(4): 466-471.
- [23] 杨光琅. 三峡库区干流回水对支流水华和沉积物的影响[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2024.
- [24] 黄卫. 水产养殖池塘溶氧知识[J]. 农业知识, 2021(3): 34-35.
- [25] 李健, 陈钊, 常志强, 等. 海水养殖池塘营养物质转化与多营养层次生态养殖[J]. 水生生物学报, 2024, 48(12): 2155.
- [26] 石晓理. 凡纳滨对虾养殖池塘水质对浮游植物和表层底泥微生物多样性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [27] 李亚群. 水产养殖环境污染问题及其控制对策研究[J]. 农村科学实验, 2024(1): 174-176.
- [28] 蔡世涛, 王成端, 徐庆元, 等. 无砾石微孔管地下渗滤系统试验研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 98-101.
- [29] 韩永望, 李健, 潘鲁青, 刘德月. 微孔管增氧和气石增氧对凡纳滨对虾室内养殖影响的比较研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(4): 41-47.
- [30] 徐其建. 饵料及培养方式对龟足人工培育幼体摄食和生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建师范大学, 2021.