

凡纳滨对虾封闭式养殖池塘水体氨氮、 亚硝氮、硝氮变化规律及消减措施*

刘健¹, 侯冬伟¹, 曾燊正¹, 钟志伟², 高杰锋², 翁少萍^{1,2},
方伟³, 张志³, 何建国^{1,2}, 黄志坚¹

(1. 广东省南海资源与环境重点实验室//中山大学海洋科学学院, 广东 广州 510006;
2. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275;
3. 广东省水生动物疫病预防控制中心, 广东 广州 510220)

摘要: 凡纳滨对虾是全球主要养殖对虾品种, 近年来肝胰腺坏死综合症(hepatopancreas necrosis syndrome, HPNS)造成的损失严重, HPNS的发生与水体理化因子和条件致病菌有一定的相关性。2015年, 选取广东省电白地区1个凡纳滨对虾养殖场43个虾塘进行氨氮、亚硝氮、硝氮的监测。结果显示: 对虾养殖第1-22天内, 氨氮质量浓度在0.01~0.30 mg·L⁻¹的范围内波动, 而亚硝氮低于0.01 mg·L⁻¹, 硝氮在0.01~0.60 mg·L⁻¹的范围内波动, 氨氮与硝氮的变化趋势相似。养殖第22-72天期间内, 氨氮质量浓度波动幅度增大, 处于0.30~1.50 mg·L⁻¹, 有逐步升高趋势; 亚硝氮和硝氮质量浓度同步缓慢升高, 在0.01~0.80 mg·L⁻¹之间波动, 处于平稳升高状态。养殖第72天后, 三氮均处于0.60~1.50 mg·L⁻¹的高水平波动状态, 且质量浓度不断升高。从氨氮和亚硝氮两者波动和升高趋势来说, 氨氮大幅波动变化比亚硝氮提前大约26 d。在养殖过程中选取5个塘分别检测肥水和添加沸石粉前后的氨氮变化, 施用肥料1 d后氨氮平均降低19.50%, 2 d后降低37.54%; 施用沸石粉后在4 d内氨氮分别平均降低47.62%, 23.34%, 60.73%和76.58%。对5个塘投料量和水体三氮平均值的相关性分析显示, 投料量与水体氨氮、亚硝氮和硝氮均有极显著的正相关关系($P < 0.01$)。结果表明, 氨氮是凡纳滨对虾封闭养殖中期和晚期(约第20-95天)的限制性因子, 且在养殖中期受气候等因子影响波动大, 表现出剧烈的震荡特征, 成为养殖环境容纳量主要限制因子; 亚硝氮是养殖中期尤其晚期的限制性因子。

关键词: 凡纳滨对虾; 氨氮; 亚硝氮; 硝氮

中图分类号: S966.12 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2017)06-0116-07

The change regularity and control measure of ammonia, nitrite and nitrate nitrogen in closed culture ponds of *Litopenaeus vannamei*

LIU Jian¹, HOU Dongwei¹, ZENG Shenzheng¹, ZHONG Zhiwei², GAO Jiefeng²,
WENG Shaoping^{1,2}, FANG Wei³, ZHANG Zhi³, HE Jianguo^{1,2}, HUANG Zhijian¹

(1. Key Laboratory of South China Sea Resource and Environment, School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Guangdong Provincial Aquatic Animal Epidemic Disease Prevention and Control Center, Guangzhou 510220, China)

* 收稿日期: 2016-11-23

基金项目: 国家基金联合基金(U1131002); 国家科技支撑项目(2012BAD17B03); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-47); 农业公益性行业科研专项(201103034); 广东省科技计划项目(2012A020602084); 广州市科技计划项目(201510010071); 广东省海洋与渔业局项目(20164200042090023)

作者简介: 刘健(1991年生), 男; 研究方向: 海洋生物学; E-mail: 1395636196@qq.com

通信作者: 黄志坚(1976年生), 男; 研究方向: 海洋生物学; E-mail: lsshzhj@mail.sysu.edu.cn

何建国(1962年生), 男; 研究方向: 海洋生物学; E-mail: lsshjg@mail.sysu.edu.cn

Abstract: *Litopenaeus vannamei* is a major farmed shrimp species in the world, suffering serious losses because of hepatopancreas necrosis syndrome (HPNS) in recent years. The outbreak of HPNS is believed to be correlated with toxic chemical and physical factors as well as opportunistic pathogens. In 2015, we detected the concentration of ammonia, nitrite and nitrate nitrogen in 43 shrimp ponds of a aquaculture farm in Dianbai county, Guangdong province, China. In the first 22 days of breeding, the concentration of ammonia nitrogen ranged from 0.01 to 0.30 mg·L⁻¹, while nitrite nitrogen was below 0.01 mg·L⁻¹. The concentration of nitrate nitrogen ranged from 0.01 to 0.60 mg·L⁻¹, with a similar tendency to that of ammonia nitrogen. During 22 to 72 days of breeding, the concentration of ammonia nitrogen increased from 0.30 mg·L⁻¹ to 1.50 mg·L⁻¹ in volatility. Unlike ammonia nitrogen, the nitrite nitrogen and nitrate nitrogen were generally stable, slowly and synchronously rising from 0.01 mg·L⁻¹ to 0.80 mg·L⁻¹. After 72 days of breeding, their concentration all enhanced and fluctuated between 0.60 mg·L⁻¹ and 1.50 mg·L⁻¹. Compared with the change of nitrite nitrogen, the sharp fluctuation of ammonia nitrogen was occurred about 26 days in advance. Moreover, we also detected the concentration of ammonia nitrogen after the zeolite and fertilizer were added in five shrimp ponds during breeding. The concentration of ammonia nitrogen was reduced by 19.50% at 1 day and reduced by 37.54% at 2 days after fertilizer addition. After adding zeolite powder, ammonia nitrogen was decreased by 47.62%, 23.34%, 60.73% and 76.58% in 4 days, respectively. Results also showed that the feed amount was positive correlated with the concentration of ammonia, nitrite and nitrate nitrogen ($P < 0.01$). In summary, this study showed that the ammonia nitrogen was the limiting factor in closed culture of *L. vannamei* during the middle and late culture period, greatly influenced by climate. Besides, nitrite nitrogen was the restrictive factor, especially in the late culture period. Considering the tendency of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen, the ecological system of closed shrimp culture mode can be divided into early ecosystem, medium ecosystem and late ecosystem.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; ammonia nitrogen; nitrite nitrogen; nitrate nitrogen

凡纳滨对虾是世界养殖产量最高的对虾种类^[1]。但近几年, 由于对虾肝胰腺坏死综合症 (hepatopancreas necrosis syndrome, HPNS)^[2]、早期死亡综合症 (early mortality syndrome, EMS)^[3-5]或急性肝胰腺坏死综合症 (acute hepatopancreas necrosis syndrome, AHPNS)^[6-7]的爆发流行, 对虾养殖产业损失严重^[8-9]。对虾发病原因复杂, 国内外研究主要集中在水质、病原、有毒有害藻类等^[2,10-13]。

养殖水环境与 HPNS 的发生关系密切^[13-14], 虾塘水环境中的氨氮、亚硝氮、硝氮的检测对整个养殖是至关重要的, 尤其是氨氮和亚硝氮, 它们对凡纳滨对虾都有毒害作用, 且在整个养殖过程的不同阶段都呈现不同的变化趋势^[15-17]。当对虾养殖生态系统平衡被打破时, 呈现氨氮胁迫, 对虾处于亚健康状态, 易导致对虾发病^[2]。目前国内外研究主要集中在室内水族箱环境氨氮和亚硝氮对凡纳滨对虾的毒理性研究及室外养殖池塘发病前后水质的监测, 但对室外养殖池塘全程跟踪检测氨氮和亚硝氮等指标的动态变化报道较少^[18-20]。因此全程

跟踪检测凡纳滨对虾养殖水体中的氨氮、亚硝氮等化学指标的动态变化, 了解整个养殖过程的不同阶段各水体指标的波动范围, 进而进行合理有效的调控, 有重要指导意义。

本文选取广东省电白地区某凡纳滨对虾养殖场 43 个虾塘, 进行养殖全程水体氨氮、亚硝氮和硝氮的检测, 并通过对池塘施用肥料和沸石粉调控氨氮进行研究, 为实际生产中对养殖池塘环境进行科学有效的调控提供依据。

1 材料方法

1.1 采样虾池情况

在广东省茂名市电白县广东冠利海洋生物养殖有限公司养殖场, 选取 43 个凡纳滨对虾养殖池塘开展研究。43 个虾塘面积为 0.27 ~ 0.51 hm², 水深 1.2 ~ 1.5 m, 放苗密度 60 万尾/hm²。

1.2 养殖管理

43 个养殖池塘均采用相同的养殖管理模式, 每日分别在 7:00、12:00、18:00 投料, 根据天气、对虾摄食、蜕壳等相关情况适当调节。养殖过

程不换水, 根据情况适量加入肥水产品 (氨基酸肥料 ($7.5 \sim 12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^2$))、沸石粉 ($300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^2$)、益生菌和增氧剂等制品。记录养殖过程中的天气情况和对虾状态。

1.3 样品的采集与分析

分别在 43 个虾塘池塘边和中央附近设水样采集点, 每天上午采集水样一次, 每个取样点取上层 (距离水面 20 cm) 水样。2015 年 7 月 1 日开始投放虾苗 (0.7 cm) 至 10 月 3 日结束实验。实验全程 95 d, 连续监测水体氨氮、亚硝氮、硝氮等理化因子。

43 个池塘水样带回实验室当天测定, 过滤所取水样中的颗粒物, 取滤液用全自动间断化学分析仪 CleverChem 200 (DeChem - Tech, 德国) 进行检测, 参照中华人民共和国国家标准《渔业水质标准》^[21] 规定的测定氨氮、亚硝氮和硝氮的国家标准方法进行分析。

1.4 数据处理

数据用 EXCEL 和 SPSS16.0 统计软件进行统计处理, 采用单因子方差分析 (ANOVA), 以 $P < 0.05$ 为差异显著水平, $P < 0.01$ 为差异极显著水平。

2 结果

2.1 封闭式虾塘中氨氮、亚硝氮、硝氮质量浓度的变化趋势

总体来看, 氨氮在整个养殖过程中都在波动中升高。前 22 d, 氨氮低; 第 23 天后, 氨氮持续升高, 且波动大; 第 48 天以后, 硝氮和亚硝氮开始持续升高。相较于亚硝氮来说, 氨氮升高的时间要提前大约 26 d。

43 口虾塘养殖期氨氮、亚硝氮和硝氮平均值 (图 1) 显示, 在养殖前 22 d (养殖早期), 氨氮出现第一次升高, 但整体平均低于 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (除第 14 天达到 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 在第 14 天之后缓慢降低, 直到氨氮低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 亚硝氮并未出现波动, 一直低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 而硝氮与氨氮的变化趋势相似, 都是先升后降, 硝氮质量浓度在 $0.01 \sim 0.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。

养殖第 23 - 42 天的 20 d 时间里, 氨氮波动范围 $0.33 \sim 0.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝氮和硝氮在 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 并未出现波动。在养殖第 43 - 72 天间, 氨氮出现 2 次剧烈的波动, 第 1 次波动在养殖第 43 - 55 天, 最高达 $1.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时硝氮和亚硝

氮也出现相同升高趋势; 第 2 次波动是在第 56 - 72 天, 最高达 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。养殖第 23 - 72 天的 50 d 时间里 (养殖中期), 主要特点为氨氮处于大幅波动中, 且随养殖时间而波动加剧, 一直处于中高端波动 ($0.30 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 亚硝氮和硝氮也在本养殖阶段逐渐升高。

养殖第 72 天 (养殖晚期) 后, 氨氮出现持续增高趋势, 且一直维持在较高水平, 即一直处于高端波动的状态 ($0.60 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 亚硝氮和硝氮急剧升高, 在 $0.60 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动, 并且在此时硝氮高于氨氮和亚硝氮。在本时期, 三者变化趋势相似且都在高端波动中升高。

由此可见, 氨氮是封闭式对虾养殖模式环境容纳量的主要限制因子, 且在养殖 20 多天后开始胁迫限制作用, 这可能是近年来养殖对虾单位面积产量下降和养殖时间缩短的原因之一。

2.2 投料量与虾塘三氮质量浓度的相关性分析

选取 5 口虾塘 (503#、602#、604#、507#、2#), 进行投料量与三氮质量浓度统计学分析, 结果表明投料量与水体氨氮、亚硝氮和硝氮均有极显著的正相关关系 ($P < 0.01$) (表 1)。5 口虾塘的饲料投喂量随养殖时间而增加, 而三氮也是在养殖前 22 d (养殖前期) 较低, 氨氮平均为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝氮平均为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝氮平均为 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。养殖到第 50 天 (养殖中期) 左右, 三氮在波动中升高, 氨氮平均为 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝氮平均为 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝氮平均为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 本时期三氮分别是养殖前期的 4.2 倍、10.5 倍、1.3 倍。养殖第 72 天 (养殖晚期) 后, 三氮明显高于前中期, 氨氮平均达到 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝氮平均达到 $0.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝氮平均达到 $1.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别是养殖前期的 5.8 倍、45.5 倍、5.6 倍。综上所述, 随投料量的增加, 氨氮、亚硝氮、硝氮质量浓度逐渐升高 (图 2)。

表 1 5 口池塘饲料投喂量和水体三氮的关系¹⁾

Table1 Relationship between feed amount and ammonia-N, nitrite-N, nitrate-N in 5 ponds

三氮	相关系数 r	P 值
氨氮	0.617**	
亚硝氮	0.550**	<0.01
硝氮	0.436**	

1) ** 表示 $P < 0.01$ (极显著线性相关性)

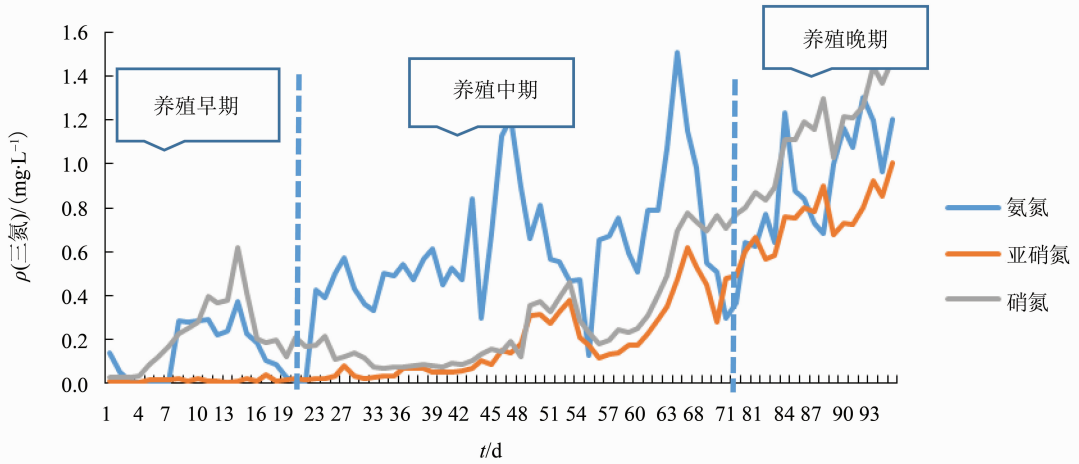


图 1 三氮均值随养殖时间的变化

Fig. 1 Variation of the average value of ammonia-N, nitrite-N and nitrate-N during the culture period

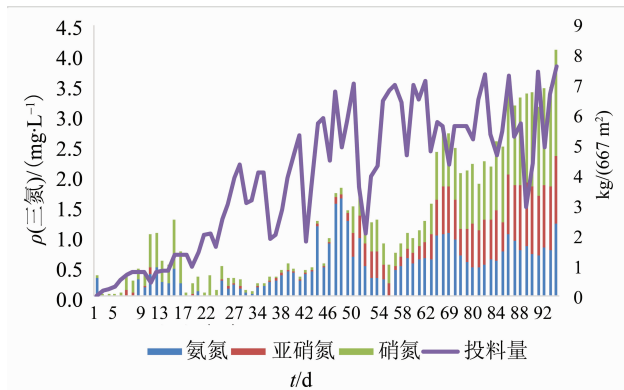


图 2 5 口塘投料量与三氮平均值随养殖时间的变化

Fig. 2 Variation of the feed amount and average value of ammonia-N, nitrite-N, nitrate-N in 5 ponds during culture period

2.3 施肥料前后氨氮的变化

选取养殖过程中正常投料的 5 口塘 (503#、602#、604#、507#、2#), 测定施肥料前后水体氨氮变化 (图 3), 肥水后氨氮在 2 d 内有明显下降。施肥料水前 5 口塘氨氮平均为 $2.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。肥水后 1 d 平均值为 $2.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均降低了 19.50%, 最高降低 30.06%, 最低降低 6.91%; 肥水后 2 d 平均值为 $1.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均降低了 37.54%, 最高降低 52.33%, 最低降低 28.80%。整体看来, 肥水后水体氨氮在 2 d 内呈现不同程度的降低。

2.4 添加沸石粉前后氨氮的变化

选取养殖过程中正常投料的 5 口塘测定沸石粉添加前 3 d 和添加后 4 d 水体氨氮变化 (图 4)。添加当天 5 个塘氨氮质量浓度平均为 $1.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

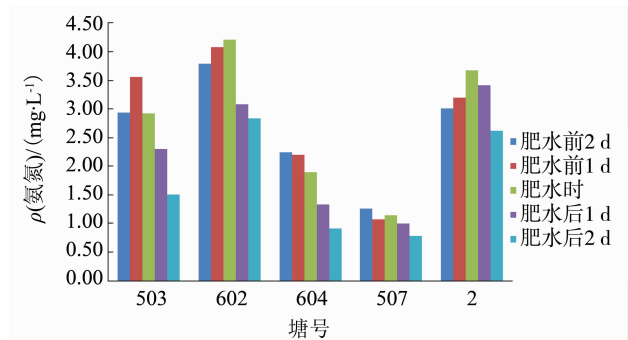


图 3 5 口塘肥水前后氨氮变化

Fig. 3 Variation of ammonia-N value after fertilization addition in 5 ponds

添加后 1 d 氨氮质量浓度为 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2 d 后质量浓度为 $0.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 d 后质量浓度为 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 4 d 后质量浓度为 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与添加时相比平均降低了 47.62%, 23.34%, 60.73%, 76.58%。整体看来, 水体氨氮在添加沸石粉后 4 d 内都会呈现不同程度的降低。

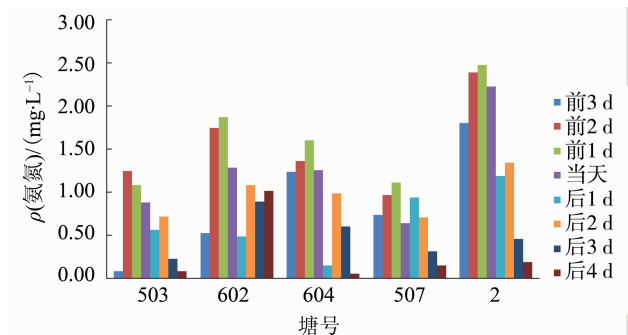


图 4 5 口塘添加沸石粉前后氨氮变化

Fig. 4 Variation of ammonia-N value after zeolite powder addition in 5 ponds

3 讨 论

水质监测是凡纳滨对虾养殖过程中重要的一个环节, 水体理化因子往往直接决定了凡纳滨对虾的养殖结果, 而氨氮、亚硝氮和硝氮又是衡量水质的重要标准^[22]。本研究检测了 43 个虾塘三氮在 90 d 左右的动态变化, 三氮质量浓度随养殖时间逐步升高, 氨氮在升高过程中波动较大, 基本在剧烈震荡中升高; 而亚硝氮和硝氮则较为缓和, 在平稳中升高。从氨氮变化来看, 总体呈现三个养殖阶段, 早期总体在 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 约 22 d 左右, 中期在 $0.30 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间剧烈震荡, 大约 50 天左右, 晚期在 $0.60 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动, 且在波动中升高。与国内其他专家的研究结果相比, 本次实验中氨氮质量浓度的变化范围略高于申玉春^[23]的研究结果 $0.02 \sim 1.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及陈世祥^[24]的研究结果 $0.01 \sim 1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但比李卓佳^[25]的研究结果 $0.01 \sim 4.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 要低, 与张瑜斌^[26]的研究结果 $0.01 \sim 1.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的变化范围相近。在变化趋势上, 本研究中氨氮总体呈现升高趋势, 并且在养殖第 22–72 天 (养殖中期) 左右, 出现大幅剧烈振荡的状态, 这可能是与期间剧烈的天气变化有关。第 72 天后 (养殖晚期), 在轻微震荡中逐渐升高。而在亚硝氮方面, 总体为早期较低, 到晚期急剧升高, 这与国内其他专家研究的氨氮和亚硝氮的总体变化趋势相似^[23–26]。本研究中氨氮随时间变化呈现明显的 3 个阶段变化趋势, 氨氮是凡纳滨对虾养殖中期和晚期的限制性因子, 且在养殖中期受气候等因子影响波动大, 表现出剧烈的震荡特征, 对养殖有一定的影响; 亚硝氮是养殖中期尤其是晚期的限制性因子。对虾养殖池塘的氨氮质量浓度受气候影响比较大, 在气候异常和池塘富营养化的条件下, 水体氨氮质量浓度的剧烈升高导致对虾胁迫严重, 且胁迫提前, 结果是导致养殖时间缩短, 养殖环境容纳量降低。

饲料是对虾集约化养殖生态系统中输入的主要营养盐, 饲料过多投喂, 产生大量粪便沉积在池底, 池底大量的有机质堆积, 有机质分解会消耗氧, 使池底处于低氧的状态, 厌氧菌大量增殖, 有机质不完全分解还会产生大量的氨氮、亚硝氮等有毒有害理化因子, 降低对虾的免疫力, 增加对病原体的易感性, 容易诱发 HPNS 发生^[27]; 过少的饲料输入也会影响对虾的正常生长, 营养盐过少不利于水体功能性藻类的繁殖^[28]。本研究结果表明, 投料量与水体三氮总量呈极显著正相关 ($P <$

0.01), 因此投料量的增加是水体三氮升高的一个重要原因。建议在整个养殖过程应适当投料, 不能盲目过度投料。氨氮质量浓度的升高与降低除了与饲料投喂有关外, 与天气变化, 如阴天降雨有直接关系, 天气变化氨氮就会发生波动, 这也是在养殖过程中氨氮大幅波动有关, 也说明对虾发生 HPNS 与氨氮和天气变化有关。

亚硝氮和氨氮对凡纳滨对虾都有毒害作用。水体中的氨氮达到一定质量浓度后, 非离子氨容易透过细胞膜进入体内, 使得水生动物自身的生理调节失衡, 而引起体内组织缺氧表现为中毒症状^[29]。而一定质量浓度的亚硝酸盐会抑制虾类的生长和变态发育, 尤其对血蓝蛋白载氧能力的破坏被认为是其对虾类产生毒性的主要机制之一^[30]。在本研究中, 与亚硝氮变化相比, 氨氮质量浓度升高时间提前大约 26 d 且超过我国水质渔业标准 (GB11607–89)^[21]。氨氮检测在养殖前、中期显得更为重要。

氨氮由于其毒害作用且在养殖前期就开始升高, 所以控制氨氮的质量浓度极为重要。本研究在肥水后和添加沸石粉后, 氨氮都有不同程度的降低。这可能是因为在肥水后, 藻类迅速繁殖, 一方面产生大量的氧气, 有利于亚硝化细菌和硝化细菌的生长繁殖, 从而加快氨氮向硝氮的转化, 并且在高溶氧的条件下抑制反硝化细菌的繁殖及其作用^[31–32]; 另一方面藻类大量繁殖后, 直接吸收氨氮, 将其转化为藻类自身营养物质, 这与在养殖开始到第 4 天后, 氨氮缓慢降低, 并且低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有关。沸石粉降低氨氮的能力与其物理吸附作用有关, 它能将水体中的氨氮吸附沉降, 达到净化水质的作用^[33]。因此适当肥水和添加沸石粉有助于控制养殖水体中的氨氮。

在凡纳滨对虾封闭的养殖模式生态系统中, 三氮尤其是氨氮在整个养殖过程的检测显得极为重要, 投料与三氮呈显著相关性, 过量投料会快速升高三氮质量浓度, 适当肥水和添加沸石粉有助于氨氮的控制。由于氨氮质量浓度的大范围波动, 1 d 时间里会升高 10 倍, 因此建议每天都要检测氨氮, 并据此采取措施调控降低氨氮质量浓度和缓解氨氮胁迫。

参考文献:

- [1] 周远扬, 曹俊明, 万忠, 等. 2013 年广东对虾产业发展形势与对策建议[J]. 广东农业科学, 2014 (8): 8–11.

- ZHOU Y Y, CAO J M, WAN Z, et al. Development situation and countermeasures of Guangdong shrimp industry in 2014 [J]. *Agricultural Science of Guangdong*, 2014, (8):8-11.
- [2] 黄志坚, 陈勇贵, 翁少萍, 等. 多种细菌与凡纳滨对虾肝胰腺坏死症(HPNS)爆发有关[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2016, 55(1):1-11.
- HUANG Z Z, CHEN Y G, WENG S P, et al. Multiple bacteria species were involved in hepatopancreas necrosis syndrome (HPNS) of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(1):1-11.
- [3] LIGHTNER D V, REDMAN R M, PANTOJA C R, et al. Early mortality syndrome affects shrimp in Asia [J]. *Global Aquaculture Advocate*, 2012, January/February: 40.
- [4] GAA. Cause of EMS shrimp disease identified[J]. *Global Aquaculture Advocate*, 2013, July/August:8.
- [5] FAO. Report of the FAO/MARD technical workshop on early mortality syndrome(EMS) or acute hepatopancreatic necrosis syndrome (AHPND) of cultured shrimp (under TCP/VIE/3304) [R]. FAO Fisheries and Aquaculture Report No. 1053. Rome. Hanoi, Viet Nam, 2013:54.
- [6] LIGHTNER D V, REDMAN R M, PANTOJA C R, et al. Historic emergence, impact and current status of shrimp pathogens in the Americas[J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2012, 110:174-183.
- [7] MOONEY A. An emerging shrimp disease in Vietnam, microsporidiosis or liver disease? [EB/OL]. [2012-02-24]. <http://aquatichealth.net/issues/38607>.
- [8] NACA-FAO. Quarterly aquatic animal disease report (Asia and Pacific Region) [R]. NACA, Bangkok, Thailand, 2011.
- [9] FLEGEL T W. Historic emergence, impact and current status of shrimp pathogens in Asia [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2012, 110:166-173.
- [10] 何建国. 对虾健康养殖与病害防治技术要点[J]. *水产科技*, 2005, 4:9-10.
- HE J G. Key points for the prevention and control of shrimp health [J]. *Fisheries Science & Technology*, 2005, 4:9-10.
- [11] 何建国, 莫福. 对虾白斑综合症病毒暴发流行与传播途径、气候和水体理化因子的关系及其控制措施[J]. *中国水产*, 1999 (7): 34-41.
- HE J G, MO F. The control measures and relationship of the epidemic and transmission path, between climate and phychemical factors of the virus outbreak in the white spot syndrome [J]. *Aquaculture of China*, 1999 (7): 34-41.
- [12] 李贵生, 何建国, 李桂峰, 等. 水体理化因子对斑节对虾生长影响的研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2000, 39:107-114.
- LI G S, HE J G, LI G F, et al. Study on the effects of physicochemical factors on the growth of prawn [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39:107-114.
- [13] VISSER P T, DUERR E O. Water quantity and microbial dynamics in shrimp ponds receiving bagasse-based feed [J]. *World Aquaculture Soc*, 1991, 22(1):56-76.
- [14] ANTONIO T A, CARLOS M, MANUEL P, et al. Environmental impacts of intensive aquaculture in marine water [J]. *Wat Res*, 2000, 34(1):334-342.
- [15] LIN Y C, CHEN J C. Acute toxicity of nitrite on *Litopenaeus vannamei* (Boone) juveniles at different salinity levels [J]. *Aquaculture*, 2003, 224(1/2/3/4):193-201.
- [16] CHEN J C, NAN F H. Lethal effect of nitrite on *Metapenaeus ensis* larvae [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1991, 22(1): 51-56.
- [17] CHEN J C, LIN C Y. Lethal effects of ammonia and nitrite on *Penaeus penicillatus* juveniles at two salinity levels [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology C*, 1991, 100(3): 477-482.
- [18] CHEN J, CHENG S. Hemolymph oxygen content, oxyhemocyanin, protein levels and ammonia excretion in the shrimp *Penaeus monodon* exposed to ambient nitrite [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 1995, 164(7): 530-535.
- [19] SCHULER D J, BOARDMAN G D, KUHN D D, et al. Acute toxicity of ammonia and nitrite to Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at low salinities [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41(3): 438-446.
- [20] CHEN J C, LEI S C. Toxicity of ammonia and nitrite to *Penaeus monodon* juveniles [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1990, 21(4): 300-306.
- [21] 中华人民共和国国家标准—渔业水质标准(GB11607-89) [J]. *环境保护*, 1989 (12):25-27.
- National Standards of the People's Republic of China. Fisheries quality standards (GB11607-89) [J]. *Environmental Protection*, 1989 (12):25-27.
- [22] CHENG S Y, CHEN J C. Accumulation of nitrite in the tissues of *Penaeus monodon* exposed to elevated ambient nitrite after different time periods [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(2):183-192.
- [23] 申玉春, 熊邦喜, 叶富良, 等. 凡纳滨对虾高位池养

- 殖系统的水质理化状况[J]. 湛江海洋大学学报, 2006, 26(1):16-21.
- SHEN Y C, XIONG B X, YE F L, et al. Physicochemical characteristics of water quality in higher-altitude *Litopenaeus vannamei* culture ponds [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2006, 26(1):16-21.
- [24] 陈世祥. 高位虾塘细菌数量变化特点及其与理化因子的关系[J]. 福建水产, 2014, 36(30):219-226.
- CHEN S X. The number of bacteria in the high-level shrimp pond and its relationship with physicochemical factors [J]. Journal of Fujian Fisheries, 2014, 36(30):219-226.
- [25] 李卓佳, 李奕雯, 曹煜成, 等. 凡纳滨对虾海水高位池养殖水体理化因子变化与营养状况分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10):2025-2032.
- LI Z J, LI Y W, CAO Y C, et al. Analysis of Physical-chemical Factors Variation and Nutritional Status of *Litopenaeus vannamei* High Level Seawater Ponds [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(10):2025-2032.
- [26] 张瑜斌, 章洁香, 詹晓燕, 等. 高位虾池养殖过程主要理化因子的变化及水质评价[J]. 水产科学, 2009, 28(11):628-634.
- ZHANG Y B, ZHANG J X, ZHAN X Y, et al. The change of main phychechemical factors and water quality evaluation of the high-level shrimp pond culture [J]. Fisheries Science, 2009, 28(11):628-634.
- [27] 孙国铭, 汤建华, 仲霞铭. 氨氮和亚硝酸氮对南美白对虾的毒性研究[J]. 水产养殖, 2002(1):22-24.
- SUN G M, TANG J H, ZHONG X M. Toxicity research of ammonia nitrogen and nitrite nitrogen to *Penaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2002(1):22-24.
- [28] AVNIMELECH Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems [J]. Aquaculture, 1999, 176(3/4):227-235.
- [29] 李健, 姜令绪, 王文琪, 等. 氨氮和硫化氢对日本对虾幼体的毒性影响[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(1):22-27.
- LI J, JIANG L X, WANG W Q, et al. The toxic effect of ammonia nitrogen and sulfured hydrogen on the larvae of *Penaeus japonicas* [J]. Journal of Shang Hai Fisheries University, 2007, 16(1):22-27.
- [30] CHAND R K, SAHOO P K. Effect of nitrite on the immune response of freshwater prawn *Macrobrachium malcolmsonii* and its susceptibility to *Aeromonas hydrophila* [J]. Aquaculture, 2006, 258(1/2/3/4):150-156.
- [31] VOLKMAN J K, JEFFREY S W, NICHOLS P D, et al. Fatty acid and lipid composition of 10 species of microalgae used in mariculture [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1989, 128:219-240.
- [32] 吴美仙, 李科, 张萍华. 反硝化细菌及其在水产养殖中的应用[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2008, 31(4):467-471.
- WU X M, LI K, ZHANG P H. Denitrifying bacteria and its application in the aquaculture [J]. Journal of Zhejiang Normal University (Nat Sci), 2008, 31(4):467-471.
- [33] 张新颖, 吴志超, 王志伟, 等. 天然斜发沸石粉对溶液中 NH_4^+ 的吸附机理研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5):609-614.
- ZHANG X Y, WU Z C, WANG Z W, et al. Adsorption characteristics of ammonium ions by natural clinoptilolite powder [J]. China Environmental Science, 2010, 30(5):609-614.