

凡纳滨对虾幼体不同培育密度对水质、仔虾生长、免疫和抗逆性能的影响

黄永春^{1,2*}, 郑伟刚¹, 黎中宝^{1,2}, 李文静^{1,2}

(1. 集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省海洋渔业资源与生态环境重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 根据福建凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 育苗的培养密度, 设置 16×10^4 尾/ m^3 (I)、 24×10^4 尾/ m^3 (II)、 32×10^4 尾/ m^3 (III)、 40×10^4 尾/ m^3 (IV) 和 48×10^4 尾/ m^3 (V) 5 组无节幼体培育密度, 探索不同培育密度对水质、仔虾生长、免疫因子活性和抗逆性能的影响。实验结果表明: 在同一培育密度条件下, 水中溶解氧 (D.O) 含量和 pH 值随幼体的生长 (蚤状幼体期、糠虾幼体期和仔虾期) 显著下降 ($p < 0.05$), 而活性磷酸盐 ($PO_4^{3-}-P$)、硝酸盐氮 ($NO_3^- -N$)、亚硝酸盐氮 ($NO_2^- -N$)、氨氮 ($NH_4^+ -N$) 和化学耗氧量 (COD) 含量则显著上升 ($p < 0.05$); 在不同培育密度条件下, D.O 含量和 pH 随着培育密度的增加而降低, 而 $PO_4^{3-}-P$ 、 $NO_3^- -N$ 、 $NO_2^- -N$ 、 $NH_4^+ -N$ 和 COD 含量则随着密度的增加而升高, 其中 I 组水质条件最好, 换水率最低, 中密度的 II 和 III 组水质略差于 I 组, 其各水质因子仅在育苗后期的仔虾 (P5) 时与 I 组差异显著 ($p < 0.05$), 而高密度的 IV 和 V 组水质状况均较差, 且换水率较高, 在蚤状幼体 II 时就与 I 组出现显著差异 ($p < 0.05$)。对虾幼体生长和存活率随培育密度增加而下降, I 组仔虾的生长和存活率最高。I 组的饵料投喂量最少, 但与 II 和 III 组无差异 ($p > 0.05$); V 组对虾饵料投喂量最多, 与其他各组差异显著 ($p < 0.05$)。II 和 III 组仔虾免疫相关因子总抗氧化力 (T-AOC)、超氧化歧酶 (SOD)、氧化物酶 (POD)、碱性磷酸酶 (ACP) 和酸性磷酸酶 (AKP) 的活性高, 并在低温、低氧和低盐应激反应中表现优良 ($p < 0.05$)。综合水质理化因子变化、仔虾生长、饵料投喂量和免疫反应等比较, $24 \times 10^4 \sim 32 \times 10^4$ 尾/ m^3 的幼体培育密度较为合适。

关键词: 凡纳滨对虾; 培育密度; 水质; 生长; 免疫; 抗逆性能

中图分类号: S 917.4 **文献标志码:** A

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 又称南美白对虾、白对虾, 原产于南美太平洋沿岸水域, 是当今世界养殖虾类产量最高的三大品种之一, 占我国对虾养殖总产量的 80% 以上, 是我国对虾养殖的绝对优势品种^[1]。然而随着凡纳滨对虾养殖规模的不断增大, 虾苗的需求量越来越大。在对虾

收稿日期: 2019-08-19 **录用日期:** 2020-03-04

基金项目: 福建省科技计划项目 (2017N51012, 2009N3011); 福建省对虾种业项目 (2017FJSC2Y02)

***通信作者:** ychuang@jmu.edu.cn

人工育苗中适当提高幼体密度，可增加单位水体的出苗量，但高密度条件下，对虾幼体新陈代谢加快，耗氧量增加，残饵及代谢废物增加，毒性物质氨氮、亚硝酸盐含量迅速上升，水质发生恶化，导致虾苗生产不稳定。特别是育苗过程中采用高水温、高密度和滥用药物等手段易造成育苗生态环境恶化、虾苗质量下降，以至在养殖过程中虾苗成活率低，从而制约了我国对虾育苗和养殖业的健康可持续发展^[2-4]。对此，不少学者从凡纳滨对虾健康育苗^[4-7]和标准化人工繁育技术^[8]方面开展了相关研究，旨在提高育苗成功率和虾苗质量。而有关育苗培育密度的研究多见锯缘青蟹 (*Scylla serrata*)^[9]、长牡蛎 (*Crassostrea gigas*)^[10]和大竹蛭 (*Soles grandis*)^[11]等水产动物，且密度对凡纳滨对虾生长、水质因子、能量收支和免疫力的影响都是凡纳滨对虾养成阶段的研究结果^[12-17]，而不同凡纳滨对虾培育密对虾幼体的生长、存活等生理生化的研究尚未报道。

培育密度是水产苗种育苗过程中不容忽视的重要因子，培育密度直接影响苗种摄食、生长、健康状况及出苗量。过高的培育密度容易导致水质恶化，会引起一系列的应激反应，最终影响到育苗效果。因此，本研究通过分析凡纳滨对虾幼体不同培育密度对育苗水质、仔虾生长和免疫因子的影响，从生理生态方面进行相关探讨，以期对凡纳滨对虾健康生态育苗技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验设施

实验使用 16 个 1 000 L 黑色实验桶，每桶配备控温仪 1 台（精确度为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）、电热棒（1000 W）1 根，气石 3 个。

1.2 实验材料

实验用虾苗为健康无节幼体（一代苗），实验中投喂虾片、藻粉、BP 粉、黑粒粉等普通虾苗饲料和卤虫无节幼体等。

1.3 实验方法

1.3.1 培育密度分组及培育条件

根据福建地区凡纳滨对虾育苗模式，不同育苗企业无节幼体投放密度不同，其中一代苗无节幼体培育密度一般 400~600 万/池（育苗池规格：5 m \times 5 m，25 m²，下同），土苗一般为 800~1500 万/池。考虑到一代苗的特性，实验按放苗密度分为 5 个密度组，I 组 16 万尾/m³（折合 400 万尾/池，下同），II 组 24 万尾/m³（600 万尾/池），III 组 32 万尾/m³（800 万尾/池），密度 IV 组 40 万尾/m³（1000 万尾/池）和 V 组 48 万尾/m³（1200 万尾/池）。每组设置 3 个重复，实验期间水温控制在

30~31 °C，盐度 28~30，连续充气。

1.3.2 育苗管理及数据记录

无节幼体入池变态开口时投喂角毛藻，然后开始投喂虾片、螺旋藻、黑粒、BP 等饵料，每 3 h 投喂一次，每天投喂 8 次。发育到糠虾幼体开始每天增加投喂 2 次丰年虫。记录整个育苗期间饵料的投喂量。在育苗过程中，蚤状幼体期每天添加调配好温、盐度新鲜海水，日添加量 5%~10%（体积分数，下同），糠虾期开始换水，根据幼体生长和水质变化情况日换水量为 10%~35%。记录每次加/换水量、存活率和饵料投喂量，实验至虾苗发育到仔虾期（P8）结束。

加/换水率=100×（每日加/换水量）/实验桶育苗水量×100%；

存活率=出苗（P8）数/无节幼体数×100%；

饵料投喂量（g/万尾）为生产 1 万尾仔虾（P8）消耗的虾片量。

1.3.3 水质理化因子检测

分别在无节幼体期、蚤状幼体 II 期、糠虾幼体 II 期和仔虾期（P5）采集育苗水样，检测水中溶解氧（D.O）、pH 值、活性磷酸盐（ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ）、硝酸盐氮（ $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ）、亚硝酸盐氮（ $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ）、氨氮（ $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ）和化学耗氧量（COD）的含量。D.O 含量采用 YSI550A 溶氧仪（科雷奥电器公司）测定，pH 采用 STARTER300 型 pH 计（奥豪斯仪器（常州）有限公司）测定， $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等其他水质理化因子按中华人民共和国国家标准（GB/T 12763.4—2007）海洋调查规范测定^[18]。

1.3.4 仔虾生长指标和免疫因子检测

实验结束时每桶随机取 50 尾仔虾（P8）测全长；另外，每桶再随机取 100 尾测定总抗氧化力（T-AOC）、超氧化歧酶（SOD）、氧化物酶（POD）、碱性磷酸酶（ACP）和酸性磷酸酶（AKP），测定方法参照南京建成生物工程研究生产的相关试剂盒说明书。

1.3.5 应激实验

1) 低温应激：每实验桶随机捞取 50 尾仔虾（P8），从水温 30 °C 的育苗水中直接放入 10 °C 的实验用水的塑料桶（3 L）中，逐尾记录实验对虾的死亡时间，统计半致死时间和全部死亡时间。

2) 低氧(干露)应激：每实验桶随机捞取 50 尾仔虾（P8），放在捞网中干露 20 min 后，放回事先准备好的装有原实验用水的塑料桶（3 L）中，逐尾记录实验对虾的死亡时间，统计半致死时间和全部死亡时间，即存活时间。

3) 低盐应激：每实验桶随机捞取 50 尾仔虾（P8），从盐度 25 的育苗水中直接放入淡水的塑料桶（3 L）中，逐尾记录实验对虾的死亡时间，统计半致死时间和全部死亡时间。

1.4 数据分析与处理

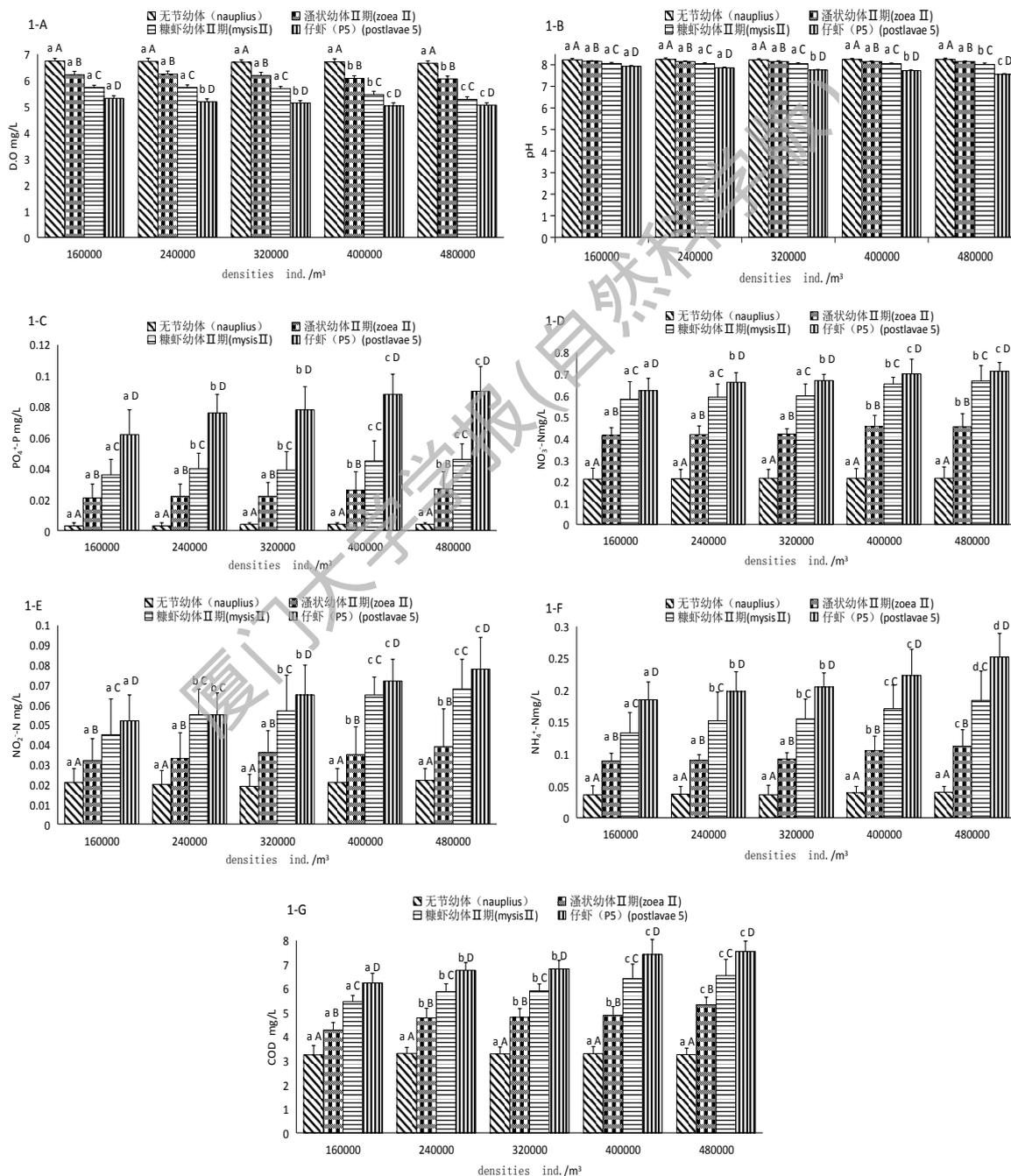
试验数据以平均值±标准差表示，采用 SPSS 10.0 软件进行统计分析，对不同实验组间数据的

比较采用单因素多重方差分析方法进行，差异的显著性设置为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同培育密度下水质理化因子分析

育苗过程中，不同培育密度组的对虾在无节幼体期时，育苗池水中 DO、pH、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 COD 含量基本一致 ($P > 0.05$)；但随着幼体生长，水体的理化因子发生明显变化 (图 1)。



不同小写字母表示不同培育密度同一发育时段间的差异显著, $P < 0.05$; 不同大写的字母表示相同培育密度不同发育时段间的差异显著, $P < 0.05$ (下同)。

图 1 不同培育密度不同阶段 DO 含量 (A)、pH (B)、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (C)、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ (D)、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ (E)、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ (F) 和 COD 的变化

Fig.1 Changes of DO concentration (A), pH (B), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (C), $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ (D), $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ (E), $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ (F) and COD (G) at different stages of breeding densities of *Litopenaeus vannamei* larvae

在同一培育密度条件下, DO 含量和 pH 均随对虾幼体的生长 (蚤状幼体期、糠虾幼体期和仔虾期) 而逐渐下降, 各生长期差异显著 ($p < 0.05$); 而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 COD 含量则逐渐上升, 且各生长期差异显著 ($p < 0.05$)。

在不同培育密度条件下, 育苗池水中 DO 含量和 pH 随着密度的增加而降低, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 COD 含量随着密度的增加而升高。低密度 I 组水质条件在蚤状幼体 II 期、糠虾幼体 II 期和仔虾期 (P5) 3 个生长期均优于其他密度组 ($p < 0.05$), 中密度 II 组和 III 组水质略差于低密度 I 组, 其 DO、pH、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 含量在育苗后期的仔虾期 (P5) 才出现明显差异 ($p < 0.05$), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 含量在糠虾 II 期出现明显差异 ($p < 0.05$), COD 含量在蚤状幼体 II 期出现明显差异 ($p < 0.05$)。高密度 IV 组和 V 组水质状况最差, 在蚤状幼体 II 期时与其他密度组明显差异 ($p < 0.05$)。

2.2 不同培育密度下仔虾的生长性能、换水率和饵料投喂量分析

不同培育密度组的仔虾 (P8) 全长和存活率随培育密度增加而下降, 其中低密度 I 组的仔虾全长和存活率最佳, 中密度 II 组和 III 组差异之间不明显 ($p > 0.05$), 其他各组差异显著 ($p < 0.05$) (表 1)。换水率和饵料投喂量整体随培育密度增加而升高, 其中换水率为 V 组 $>$ IV 组 $>$ III 组 $>$ II 组 $>$ I 组, 各组差异显著 ($p < 0.05$)。V 组饵料投喂量最多, 与其他各组差异显著 ($p < 0.05$); 其次 IV 组与其他各组差异显著 ($p < 0.05$); 再次是 III 组 $>$ I 组 $>$ II 组, 但差异不明显 ($p > 0.05$), 与其他各组差异显著 ($p < 0.05$) (表 1)。

表 1 不同培育密度对仔虾生长、存活率、换水率和饵料投喂量的影响

Tab.1 Impacts on the growth, survival rate, water change rate and feed consumption of post-larvae by different breeding densities of *L. vannamei* larvae

培育密度/(10^4 尾/ m^3)	全长/mm	存活率/%	换水率/(%/日)	饵料投喂量/(g/万尾)
16	8.67 \pm 1.12 ^a	80.23 \pm 2.62 ^a	18.21 \pm 5.24 ^a	22.96 \pm 5.62 ^a
24	8.34 \pm 0.78 ^b	73.57 \pm 3.35 ^b	21.03 \pm 4.56 ^b	22.31 \pm 4.35 ^a
32	8.22 \pm 0.89 ^b	72.23 \pm 2.90 ^b	25.21 \pm 3.71 ^c	23.85 \pm 3.21 ^a
40	7.55 \pm 0.78 ^c	64.13 \pm 2.26 ^c	27.72 \pm 6.32 ^d	25.28 \pm 4.15 ^c
48	7.26 \pm 0.93 ^d	56.30 \pm 3.57 ^d	32.27 \pm 5.24 ^f	28.06 \pm 3.51 ^d

注：不同小写字母表示不同培养密度组之间差异显著， $p < 0.05$ ，下同。

2.3 不同培育密度下仔虾免疫因子活性分析

不同培育密度仔虾免疫相关因子（T-AOC、SOD、POD、ACP 和 AKP）的活性随培育密度增加而升高，当密度 $> 32 \times 10^4$ 尾/ m^3 后免疫相关因子活性下降（表 3）。II 组和 III 组仔虾 T-AOC 的活性高（ $P < 0.05$ ），其次为 I 组 $>$ IV 组 $>$ V 组（ $P < 0.05$ ），各组间差异显著；II 组和 III 组仔虾 SOD 的活性高，后者优于前者（ $p > 0.05$ ），其次为 I 组，再次 IV 组 $>$ V 组（ $p > 0.05$ ），各组差异显著（ $p < 0.05$ ）；III 组仔虾 POD 和 ACP 的活性高，其次为 II 组 $>$ I 组（ $p > 0.05$ ），再次 IV 组 $>$ V 组（ $p > 0.05$ ），各组间差异显著（ $p < 0.05$ ）；III 组仔虾 AKP 的活性高，其次为 II 组 $>$ I 组（ $p > 0.05$ ），再次 IV 组，最差为 V 组，各组间差异显著（ $p < 0.05$ ）。

表 2 不同培育密度下仔虾免疫因子活性的比较

Tab. 2 The innate immunity *L. vannamei* larvae from different breeding densities

培育密度/(10^4 尾 $\cdot m^{-3}$)	T-AOC/(U $\cdot mL^{-1}$)	SOD/(U $\cdot mL^{-1}$)	POD/(U $\cdot mL^{-1}$)	ACP/(U $\cdot mL^{-1}$)	AKP/(U $\cdot mL^{-1}$)
16	3.74 \pm 1.00 ^b	22.54 \pm 3.25 ^b	4.35 \pm 1.20 ^b	2.75 \pm 0.16 ^b	3.38 \pm 0.16 ^b
24	4.27 \pm 1.13 ^a	30.41 \pm 3.66 ^a	4.50 \pm 1.36 ^b	2.81 \pm 0.25 ^b	3.52 \pm 0.35 ^b
32	4.32 \pm 1.85 ^a	30.24 \pm 3.92 ^a	5.02 \pm 1.52 ^a	3.35 \pm 0.28 ^a	3.96 \pm 0.24 ^a
40	3.32 \pm 1.12 ^c	19.54 \pm 3.36 ^c	3.82 \pm 1.25 ^c	2.32 \pm 0.23 ^c	3.08 \pm 0.38 ^c
48	3.01 \pm 0.86 ^d	18.54 \pm 2.65 ^c	3.75 \pm 1.03 ^c	2.27 \pm 0.16 ^c	2.58 \pm 0.38 ^d

2.4 不同培育密度下仔虾的抗应激能力分析

低温、低氧和低盐应激反应的半致死时间和存活时间（全部死亡时间）随培育密度的增加而延长，当达到 32×10^4 尾/ m^3 后随密度的增加而缩短，其中 III 组仔虾半致死时间和存活时间最长，与各组差异显著（ $p < 0.05$ ），其次为 II 组；V 组仔虾半致死时间和存活时间最短，各组差异显著（ $p < 0.05$ ）与其他各组差异显著（ $p < 0.05$ ）（表 3）。

表 3 不同培育密度仔虾抗应激能力的比较

Tab.3 The anti-stress ability of *L. vannamei* larvae from different breeding densities

类别		培育密度/(10^4 尾 $\cdot m^{-3}$)				
		16	24	32	40	48
低温	半致死时间/min	4.78 \pm 0.51 ^b	4.90 \pm 0.72 ^b	6.29 \pm 0.45 ^a	4.71 \pm 0.55 ^b	4.63 \pm 0.41 ^b
	存活时间/min	11.67 \pm 2.65 ^b	17.76 \pm 3.16 ^a	18.25 \pm 1.82 ^a	11.33 \pm 2.05 ^b	8.23 \pm 2.35 ^c
低氧	半致死时间/min	16.37 \pm 0.99 ^b	16.84 \pm 1.57 ^b	19.83 \pm 1.33 ^a	13.93 \pm 1.38 ^c	12.05 \pm 1.29 ^d
	存活时间/min	35.62 \pm 2.86 ^b	36.81 \pm 2.51 ^b	38.25 \pm 2.46 ^a	31.46 \pm 1.57 ^c	28.05 \pm 1.24 ^d
低盐	半致死时间/h	1.78 \pm 0.12 ^b	1.89 \pm 0.16 ^a	1.94 \pm 0.13 ^a	1.61 \pm 0.14 ^c	1.45 \pm 0.08 ^d
	存活时间/h	2.91 \pm 0.15 ^b	3.21 \pm 0.29 ^a	3.35 \pm 0.11 ^a	2.64 \pm 0.17 ^c	2.59 \pm 0.14 ^c

3 讨论

3.1 不同培育密度对水质理化因子的影响

在对虾人工育苗中,对虾幼体需经无节幼体→蚤状幼体→糠虾幼体→仔虾四个阶段,除无节幼体尚未开口摄食,仅消耗自身营养外,其余三个时期经投喂需经 300~80 目筛绢搓洗的饵料。细微的饵料,一方面便于悬浮在水中,有利于虾苗摄食;另一方面,在 30~32 °C 的对虾育苗水温条件下(个别采用 33~35 °C 高温育苗)细微饵料中所含的蛋白质容易被分解而污染水体。同时随着幼体的生长和密度增大,人工饵料投喂量增加,对虾幼体的活动频率,耗氧率和排氨率也逐渐上升,水中残饵和排泄物等有机物质不断积累在育苗池底部,造成氨氮、亚硝酸盐等有毒(害)性物质含量迅速上升,水质状况越来越差。而对虾幼体小,抗逆能力差,需要稳定的环境,无法通过大量换水来改善育苗池水质,育苗过程中无法排污,只能通过加、换水调节水质。因此,对虾幼体培养密度低,污染少,好调控,16×10⁴ 尾/m³ 实验组水质条件最好,换水率最低;24×10⁴ 尾/m³ 和 32×10⁴ 尾/m³ 实验组水质略差于 16×10⁴ 尾/m³,但各水质因子(D.O、pH、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N)在仔虾(P5)之前明显不差异($p > 0.05$);高密度 40×10⁴ 尾/m³ 和 48×10⁴ 尾/m³ 组水质状况最差,换水率最高,且在蚤状幼体 II 就出现明显差异($p < 0.05$)。陈亚坤等^[19]研究表明虾池 pH 值随着对虾养殖密度与养殖时间增加而降低,各组氨氮含量均随着养殖密度和养殖时间增加而增加,低密度组(200、400、600 尾/m²)的氨氮含量低于高密度组(800 尾/m²)($p < 0.05$),这与本实验结果一致。

3.2 不同培育密度对仔虾生长和存活的影响

仔虾生长和存活受到很多因素影响,在对虾人工育苗中,过高的培育密度容易造成虾苗拥挤应激,对虾幼体新陈代谢加快,耗氧量增加,水中残饵及代谢废物增加,引起水体发生恶化,影响虾苗的生长存活。Luis 等^[20]认为培育密度高会加剧对虾幼体幼体间的种内竞争和生存环境压力,并随着培育密度的增加,幼体之间相互频率增加,加剧了幼体间接触、撕咬和吞食程度,从而大幅提高降低存活率。Mahon 等^[13]、Williams 等^[15]和陈亚坤等^[19]研究发现随着密度的升高,虾类的攻击性行为增加,生长速度、存活率等随养殖密度增加而降低,存活率与养殖密度呈负相关。

实验结果表明低密度(16×10⁴ 尾/m³)条件下仔虾生长和存活虽然最好,但达不到应有的育苗量,浪费场地,增加育苗成本。实验中 24×10⁴ 尾/m³~32×10⁴ 尾/m³ 仔虾生长和存活较高,每尾幼体获得适当的饵料和空间,有利于幼体的生长和存活。欧黄思等^[21]在 4 种培育密度组(10×10⁴ 尾/m³、20×10⁴ 尾/m³、30×10⁴ 尾/m³和 40×10⁴ 尾/m³)的实验中发现,幼体从 Z1-P1 期变态发育随密度增加,幼体变态发育成仔虾的时间延长,仔虾期的变态存活率分别 10×10⁴ 尾/m³ (98%) > 20×10⁴ 尾/m³

(86.55%) > 30×10⁴ 尾/m³ (73.33%) > 40×10⁴ 尾/m³ (71.63%)，这也与本研究结果一致。

3.3 不同培育密度对仔虾免疫性状和抗逆性能的影响

由于培育密度变化产生一系列环境因子胁迫而使对虾幼体产生应激反应,在短时间胁迫下,免疫因子可发挥自身的作用,调节机体达到平衡。但长时间胁迫下,会导致对虾幼体长期处于应激状态,而破坏机体的免疫系统,导致免疫酶活性下降和生理功能失调。研究表明对虾免疫因子(酚氧化酶、溶菌酶和碱性磷酸酶)的活性随着养殖密度和养殖时间增加而降低,对虾体内自由基(超氧阴离子)越积越多,与抗病力有关的免疫酶活性降低,对病原体的易感性提高,存活下降^[19]。因此,低温、低氧(干露)和低盐应激实验表明低培育密度下的仔虾(P8)缺少应激能力,而高培育密度下的仔虾由于一直处在紧张的应激状态,体质较弱,对突然改变的环境条件应激能力差,造成存活时间短,而适当密度的仔虾正处在活跃状态,抗应激能力强。因此,培育密度 24×10⁴ 尾/m² 和 32×10⁴ 尾/m² 组对虾在低温、低氧和低盐应激反应表现优良,与其他各组差异显著 ($p < 0.05$)。本实验不同培育密度对仔虾抗应激能力和仔虾免疫相关因子(T-AOC、SOD、POD、ACP 和 AKP)活性影响的结果相互一致。

3.4 适宜培育密度的选择

有关对虾育苗培育密度的报道比较零碎^[5-8,22-23],有 18.4×10⁴ 尾/m³、15×10⁴ 尾/m³~25×10⁴ 尾/m³、20×10⁴ 尾/m³~30×10⁴ 尾/m³、30×10⁴ 尾/m³~35×10⁴ 尾/m³ 和 50×10⁴ 尾/m³ 的对虾幼体培育密度。不同作者从不同研究角度提出不同的结果,其中赵光凤等^[8]和苏利等^[22]分别从标准化人工繁育技术和苗质量控制生产工艺技术方面提出合适密度为 15×10⁴ 尾/m³~25×10⁴ 尾/m³ 和 20×10⁴ 尾/m³~30×10⁴ 尾/m³;李国华等^[5]和骆大鹏等^[7]就生态健康育苗技术方面的要求认为 30×10⁴ 尾/m³~35×10⁴ 尾/m³ 和 20×10⁴ 尾/m³~30×10⁴ 尾/m³ 是合理的培育密度。为避免随着培育密度增加和育苗时间的延长,残饵及代谢废物增加,耗氧量增加,水体恶化,而出现对虾幼体的生长、饵料利用率和免疫系统的机能降低的不利影响,采用较低培育密度固然能避免上述问题的出现,但随着对虾育苗技术的成熟,综合不同培育密度对育苗水质、仔虾生长、免疫性状、抗逆性能以及日常管理的换水率和饵料投喂量的比较分析,24×10⁴ 尾/m³~32×10⁴ 尾/m³的幼体培育密度较为合适。

参考文献:

- [1]黄永春,郑伟刚,陈辉辉,等.两个选育群体对虾生长、消化、免疫酶活性和抗 WSSV 性能的研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2017,56 (2):188-193.
- [2]刘建勇.复合微生物制剂在凡纳滨对虾育苗中的应用[J].海洋科学,2005,29 (4):3640.

- [3]姚晓东. 抗生素在水产养殖中应用存在的问题及对策[J]. 农业与技术, 2016, 36(24): 103.
- [4]李康锡, 叶鹏, 周恩荣. 凡纳滨对虾生态育苗探讨[J]. 海洋与渔业, 2017(2): 52-54.
- [5]李国华, 廖雪明, 吴文东. 凡纳滨对虾健康种苗培育的几个关键环节[J]. 北京水产, 2006(1): 26-27.
- [6]蔡葆青. 凡纳滨对虾健康育苗技术的研究[J]. 福建水产, 2012, 34(1): 16-20.
- [7]骆大鹏, 何玉贵, 杨明秋, 等. 凡纳滨对虾室内生态育苗技术[J]. 现代农业科技, 2015(10): 256-258.
- [8]赵光凤, 李色东, 李桢. 凡纳滨对虾标准化人工繁育技术[J]. 渔业现代化, 2010, 37(6): 29-33.
- [9]徐晓群, 朱小明, 费亮亮, 等. 不同饵料、密度和池底对锯缘青蟹大眼幼体蜕皮变态的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(2): 268-271.
- [10]李华琳, 李文姬, 张明. 培育密度对长牡蛎面盘幼虫生长影响的对比试验[J]. 水产科学, 2004, 23(6): 20-21.
- [11]闫喜武, 赵生旭, 张澎, 等. 培育密度及饵料种类对大竹蛭幼虫生长、存活及变态的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(5): 386-390.
- [12]WYBAN J A, LEE C S, SATO V T, et al. Effect of stocking density on shrimp growth rates in manure-fertilized ponds [J]. Aquaculture, 1987, 61 (1): 23-32.
- [13]MAHON J L. Density alters intraspecific encounters in *Penaeus vannamei*[J]. Pacific Science, 1990, 44(2): 190.
- [14]BROWDY C L, HOLLOWAY J D, PING C O, et al. IHNN virus and intensive culture of *Penaeus vannamei*: effects of stocking density and water exchange rates[J]. Journal of Crustacean Biology, 1993, 13(1): 87-94.
- [15]WILLIXMS A S, DXVIS D A, ARNOLD C R. Density dependent growth and survival of *Peucaeus setiferus* and *Peucaeus vannamei* in a semi-closed recirculation system[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1996, 27(1): 107-112.
- [16]王兴强, 曹梅, 马姓, 等. 密度对凡纳滨对虾存活、生长和能量收支的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 409-412.
- [17]曹梅, 王兴强, 阎斌伦, 等. 密度和投饵频率对凡纳滨对虾存活和生长的影响[J]. 水利渔业, 2006, 26(2): 34-39.
- [18]中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范: GB/T 12763.4—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [19]陈亚坤, 郭冉, 夏辉, 等. 密度胁迫对凡纳滨对虾生长、水质因子及免疫力的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 292-294.
- [20]LUIS C, MAITE M, XAVIER C. Experimental studies on the effect of food in early larvae of the shrimp *Lysmata amboinensis* (De Mann, 1888) Decapoda: Caridea: Hippolytidae [J]. Aquaculture, 2008, 277(1/2): 117-123.
- [21]欧黄思, 梁华芳. 不同培育密度对凡纳滨对虾幼体的生长、变态、存活率及其抗逆性的影响[C]//中国水产学会学术年会论文摘要集. 2014: 92.
- [22]苏利, 时建伟, 张志刚. 凡纳滨对虾育苗质量控制生产工艺技术[J]. 水产科技情报, 2018, 37(6): 292-295.
- [23]曾祥铃, 王安利. 凡纳对虾育苗水中氨氮和亚硝酸盐氮的变化及对虾幼体的影响[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(16): 2433-2437.

Effects of breeding densities on water quality, shrimp growth, immunity and stress resistance of *Litopenaeus vannamei* larvae

HUANG Yongchun^{1,2*}, ZHENG Weigang¹, LI Zhongbao^{1, 2}, LI Wenjing¹

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Fishery Resources and Eco-environment Xiamen 361021, China)

Abstract: According to the *Litopenaeus vannamei* larval breeding densities in 25 m² seedling-raising pond in Fujian Province, five nauplius densities of 16×10⁴ ind./m³ (group I), 24×10⁴ ind./m³ (group II), 32×10⁴ ind./m³ (group III), 40×10⁴ ind./m³ (group IV) and 48×10⁴ ind./m³ (group V) were set up, respectively. The effects of different densities on water quality, growth, immune factor activity and stress resistance of shrimp larvae were explored in this study. The results showed that the content of D.O and pH were found to decrease with different growth stages in larvae (zoea, mysis and post larvae) ($p < 0.05$), however the content of PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, NH₄⁻-N and COD were increased under the same density ($p < 0.05$), respectively. In different densities, the content of D.O and pH were found to decrease with increase breeding densities, however the content of PO₄³⁻-P, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N, NH₄⁻-N and COD increased by increasing breeding density ($p < 0.05$), respectively. The best water quality and the lowest water exchange rate was in group I, and the water quality of medium density group II and III was slightly better than that of group I. The significant difference of the water quality factors between that of group I were only at post larvae 5 (P₅) ($p < 0.05$). The water quality in high density Groups IV and V were the worst, and the water change rate were the highest, and the significant difference between that of group I were at mysis stages II ($p < 0.05$). The growth and survival rate of larvae decreased with the increase of breeding density. In low density group I, the growth and survival rate of larvae were the highest and feeding dose were the least, which there was no difference between that of medium density group II and III between group I ($p > 0.05$). However, the feeding dose was the highest in group V than that of other groups ($p < 0.05$). The immune-related factors (T-AOC, SOD, POD, ACP and AKP) of shrimp larval were highly active in medium density group II and III, and the anti-stress ability on low temperature, hypoxia and low salt were showed more excellent response ($p < 0.05$). Considering water quality, growth, feeding dose, immunity and stress resistance, the suitable density was 24×10⁴ ind./m³ to 32×10⁴ ind./m³.

Keywords: *Litopenaeus vannamei*; breeding density; water quality; growth; immunity; stress resistance