



主持人: 郭志强

不同养殖密度对方斑东风螺循环水 中间培育效果的影响

刘子岭^{1,2}, 石耀华^{1,2}, 郑兴^{1,2}, 顾志峰^{1,2}

(1. 海南大学 海洋学院, 海口 570228; 2. 海南大学 南海海洋资源利用国家重点实验室, 海口 570228)

摘要: 为加强方斑东风螺中间培育过程中养殖水质和疾病管控, 开展了为期 30 d 的循环水养殖实验, 从生长性能、生理酶活性和水质变化等方面探讨了不同养殖密度对方斑东风螺循环水中间培育效果的影响。结果显示: 当养殖密度不超过 1.8×10^4 只· m^{-2} 时, 稚螺的存活率为 $(94.77 \pm 2.18)\%$ 、终末壳长为 (11.14 ± 0.72) mm、日平均生长速度 (0.22 ± 0.02) mm· d^{-1} 和壳长增长率 $(143.23 \pm 15.72)\%$ 均正常, α -淀粉酶 (AMS)、脂肪酶 (LPS)、胃蛋白酶 (PPS) 均正常 ($P < 0.01$), 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、丙二醛 (MDA) 的活性不高 ($P < 0.01$)。同时, 养殖系统中的铵氮和亚硝酸盐峰值随养殖密度的提高而显著上升 ($P < 0.05$)。以上结果表明, 在循环水养殖条件下, 过高的养殖密度会导致过高的 NH_4^+-N 和 $NO_2^- - N$ 浓度峰值, 从而抑制方斑东风螺的生长, 综合考量养殖生产性能及单位面积产量, 方斑东风螺循环水中间培育适宜密度为 1.8×10^4 只· m^{-2} 。

关键词: 方斑东风螺; 循环水养殖; 密度; 存活率; 生长

中图分类号: S966.28

文献标志码: A

文章编号: 1674 - 7054(2023)06 - 0675 - 06

刘子岭, 石耀华, 郑兴, 等. 不同养殖密度对方斑东风螺循环水中间培育效果的影响 [J]. 热带生物学报, 2023, 14(6): 675-680. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20230058

方斑东风螺 (*Babylonia areolata*) 隶属蛾螺科 (Buccinidae)、东风螺属 (*Babylonia*), 是一种具有重要经济价值的海洋腹足类动物, 广泛分布于印度洋-太平洋的热带和亚热带海域^[1-2]。在我国, 方斑东风螺养殖区主要分布于福建、广东和海南等^[3]。由于其经济价值高、生长速度快, 方斑东风螺深受水产养殖从业者的青睐, 并被认为是具有巨大发展潜力的养殖品种。目前, 我国的方斑东风螺年产量已超过 1.25 万 t^[4]。近年来, 由于其自然资源被过度开发, 人们开始不断探索方斑东风螺的育苗和养成技术, 其产业规模也随之不断扩大。目前, 方斑东风螺的养殖方式主要为水泥池流水养殖, 这种养殖方式虽然简单高效, 但是依然伴随着养殖水质不稳定和病害多发的问题^[5-6], 而采用工厂化循环水养殖模式进行方斑东风螺的养

殖可以加强对养殖水质和养殖动物的疾病管控, 还可以进行高密度养殖, 提高单位面积的产量^[7-8]。利用循环水养殖系统进行方斑东风螺的养殖, 主要是通过物理过滤、生物过滤、曝气和泵吸等方式实现对养殖用水的循环利用。由于在循环水养殖系统中, 温度、盐度、pH 和溶解氧等水质指标可控性较强, 可以实现高密度养殖。在循环水养殖系统与流水养殖系统中, 不同规格的稚螺对生存空间的需求不相同^[9]。因此, 选择合理的养殖密度是关键问题。有研究表明, 在流水条件下, 一般东风螺稚螺的中间培育密度为 $1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ 只· m^{-2} ^[10]。故本实验以 2×10^4 只· m^{-2} 的密度为基准设置了 1.2×10^4 、 1.8×10^4 、 2.4×10^4 和 3.0×10^4 只· m^{-2} 4 个密度梯度, 以探索较为适宜的方斑东风螺循环水中间培育密度, 旨在为后续的

收稿日期: 2023 - 04 - 28

修回日期: 2023 - 05 - 15

基金项目: 海南省院士创新平台建设项目 (HD-YSZX-202011); 海南省自然科学基金 (323QN197); 海南大学科研启动基金 (KYQD(ZR)22050)

第一作者: 刘子岭 (1997-), 男, 海南大学海洋学院 2020 级硕士研究生. E-mail: m18789256769_1@163.com

通信作者: 顾志峰 (1975-), 男, 博士, 教授. 研究方向: 水产动物遗传育种研究. E-mail: hnuqz@163.com

方斑东风螺循环水中间培育技术提供参考。

1 材料方法

1.1 实验系统及实验螺 实验在海南省海洋与渔业科学院(琼海基地)进行。方斑东风螺循环水养殖系统由养殖单元和水处理单元组成,水处理单元包括袋式过滤器(过滤精度为 10 μm)和生物滤池(滤料为珊瑚骨和细菌屋)等设备。

养殖池为正方形玻璃钢养殖桶(1 m \times 1 m \times 0.9 m),底部铺设底滤板,在底滤板上方固定 0.25 mm 的聚乙烯塑料网箱,将网箱 3 等分为 3 个独立的养殖单元,每个养殖单元配备 2 个气石,并在网箱底部铺设厚度约为 1~2 cm 的泥沙。生物滤池为直径 0.6 m,高 0.65 m 的聚乙烯塑料圆桶,生物滤池滤料为珊瑚骨与细菌屋,按照 1:1 的比例(质量比)组成生物滤池。物理过滤设备为精度 10 μm 的精密过滤器,养殖单元水体为 700 L,生物滤池水体为 100 L。日循环量为 7.2 m³。

实验所用方斑东风螺稚螺,购自海南坤田海洋生物科技有限公司,螺苗个体起始质量为(0.023 \pm 0.006) g,起始壳长为(4.58 \pm 0.75) mm,起始壳宽为(2.72 \pm 0.48) mm,大小均匀,健康无伤。

1.2 实验方法 实验分为 4 组,依次编号为 D1~D4,分别对应养殖密度为 1.2 \times 10⁴、1.8 \times 10⁴、2.4 \times 10⁴ 和 3.0 \times 10⁴ 只 $\cdot\text{m}^{-2}$,每组 3 个重复。

在每天的上午 8:00 进行投喂,投喂的饵料为新鲜的牡蛎(*Ostreidae*)肉,每日的投喂饵料量约为螺苗体质量的 30%。在养殖过程中,每 4 h 用海水将爬出水面的稚螺冲至水面以下,实验时长为 30 d(2022-09-13—2022-10-13)。

每天观察稚螺的运动和摄食情况,每 5 天取 1 次养殖池中的水样和底质样品,并于实验结束时测量稚螺壳长、壳宽、体质量和存活率。

$$\text{存活率(SR)} = \frac{\text{实验结束稚螺数}}{\text{实验开始稚螺数}} \times 100\%;$$

$$\text{壳长增长率} = \frac{(\text{终末壳长} - \text{初始壳长})}{\text{初始壳长}} \times 100\%;$$

$$\text{日平均生长速度} = \frac{(\text{终末壳长} - \text{初始壳长})}{30}。$$

1.3 样品采集 养殖实验周期结束后,将各组的稚螺经过 24 h 饥饿处理后称重、计数,从每个养殖单元中随机取样 10 只,将稚螺的壳外泥沙冲洗干净,敲碎螺壳,取出螺肉,放入冻存管中,立即将其

放入液氮中进行速冻,然后放入超低温冰箱中(-80 $^{\circ}\text{C}$)保存,用于酶活检测。

称取新鲜底质 10 g(精确至 0.1 g)放于 250 mL 三角瓶中,加 100 mL 氯化钾溶液(2 mol $\cdot\text{L}^{-1}$),用橡皮塞塞紧,振荡 30 min,立即过滤于 100 mL 三角瓶中,用于底质铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)检测。

称取新鲜底质 10 g 放入 100 mL 三角瓶中,加入 0.1 g 硫酸钙和 50 mL 水,塞盖后振荡 10 min,静置 5 min,过滤上清液,用于底质亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)和底质硝酸态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的测定。

1.4 酶活指标的测定 稚螺体内的 α -淀粉酶(α -Amylase, AMS)、脂肪酶(Lipase, LPS)、胃蛋白酶(Pepsin, PPS)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)水平使用南京建成生物技术研究所生产 α -淀粉酶测试盒(Catalog No. C016-1-1)、脂肪酶测定试剂盒(Catalog No. A054-2-1)、胃蛋白酶测定试剂盒(Catalog No. A080-1-1)、过氧化氢酶测定试剂盒(Catalog No. A007-1-1)、总超氧化物歧化酶测定试剂盒(Catalog No. A001-3-2)和丙二醛测定试剂盒(Catalog No. A003-1-2),并按照试剂盒内详细说明书的检测步骤进行。

1.5 水质指标的检测 系统中的水质铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)以及底质铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝酸态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的测定均参照相关标准方法进行^[11]。

1.6 数据分析 实验数据以平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示。使用 DPS 统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),设 $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 方斑东风螺稚螺在不同密度下的生长性能和存活率对比 从表 1 可知,养殖密度对稚螺的终末壳长有显著影响($P < 0.05$),其中, D1 组最高 [(11.18 \pm 1.08) mm], D4 组最低 [(8.91 \pm 0.83) mm]。养殖密度对稚螺的日平均生长速度有显著影响($P < 0.05$),其中, D1 组最高 [(0.22 \pm 0.04) mm $\cdot\text{d}^{-1}$], D4 组最低 [(0.14 \pm 0.03) mm $\cdot\text{d}^{-1}$]。养殖密度对稚螺的壳长增长率有显著影响($P < 0.05$),

其中, D1 组最高 [(144.10±24.58)%], D4 组最低 [(94.54±18.12)%]。养殖密度对稚螺的存活率也有显著影响 ($P<0.05$), 其中, D2 组最高 [(94.77±2.18)%], D4 组最低 [(57.84±1.90)%]。

表 1 不同养殖密度对方斑东风螺稚螺生长及存活率的影响

分组	终末壳长/mm	日平均生长速度/(mm·d ⁻¹)	壳长增长率/%	存活率/%
D1	11.18±1.08a	0.22±0.04a	144.10±24.58a	93.69±2.51a
D2	11.14±0.72a	0.22±0.02a	143.23±15.72a	94.77±2.18a
D3	8.92±1.14b	0.14±0.04b	94.76±24.89b	73.08±0.80b
D4	8.91±0.83b	0.14±0.03b	94.54±18.12b	57.84±1.90c

注: 不同字母表示不同组之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.2 不同密度组的水质对比 如图 1 所示, 养殖密度对循环水养殖系统水质的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高峰有显著影响 ($P<0.05$)。D1、D2、D3 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在第 5 天时到达峰值, D4 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在第 10 天时到达峰值。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值随养殖密度的升高而显著升高 ($P<0.05$), 其中, D4 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值最高, 为 (1.21±0.12) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度峰值最低, 为 (0.50±0.05) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

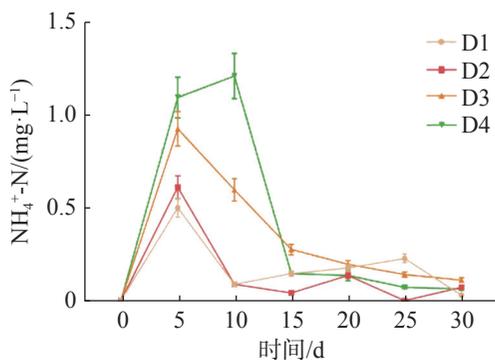


图 1 不同密度下铵态氮浓度变化

如图 2 所示, 养殖密度对循环水养殖系统水质的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度高峰有极显著影响 ($P<0.01$)。各实验组的均在实验第 25 天迎来了 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的高峰, 且 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的峰值随养殖密度的升高而显著升高 ($P<0.01$)。其中 D4 组最高, 为 (1.90±0.18) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 组最低, 为 (0.18±0.02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

如图 3 所示, 在整个实验过程中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不断积累, 在实验结束时, D1、D2、D3、D4 各组的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为 (0.50±0.05)、(0.52±0.05)、

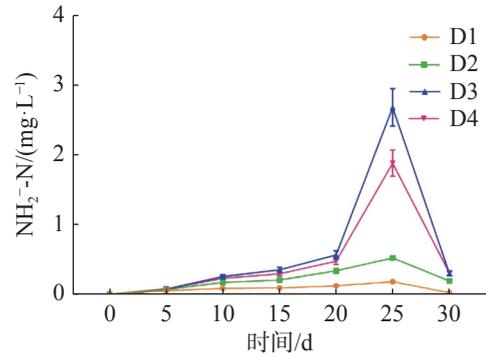


图 2 不同密度下的亚硝酸态氮浓度变化

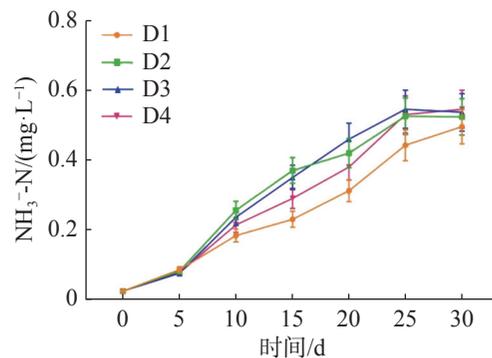


图 3 不同密度下的硝酸态氮浓度变化

(0.54±0.03) 和 (0.54±0.02) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

如图 4 所示, 养殖密度对循环水养殖系统底质 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高峰有极显著影响 ($P<0.01$)。实验各组在实验第 5 天迎来第一次底质 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高峰, 其中 D3 组最高为 (0.74±0.06) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 组最低, 为 (0.31±0.03) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在实验第 25 天, 各实验组迎来第二次底质 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度高峰, 其中 D4 组最高, 为 (1.38±0.14) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 组最低, 为 (0.42±0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

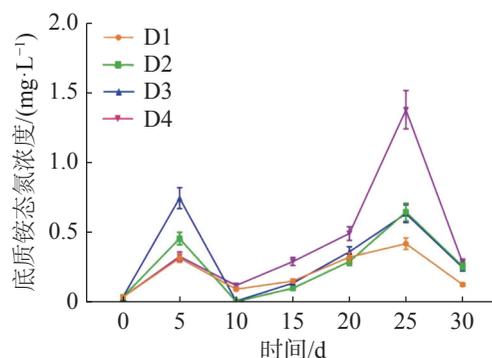


图 4 不同密度下中底质铵态氮的浓度变化

如图 5 所示, 养殖密度对循环水养殖系统底质 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度高峰有极显著影响 ($P<0.01$)。D2、D3、D4 组的底质 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度于第 25 天达到峰

值,而D1组的底质 NO_2^- -N浓度并未出现底质 NO_2^- -N浓度高峰。其中D3组峰值最高,为 $(0.15\pm 0.02)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,D2组峰值最低,为 $(0.052\pm 0.005)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

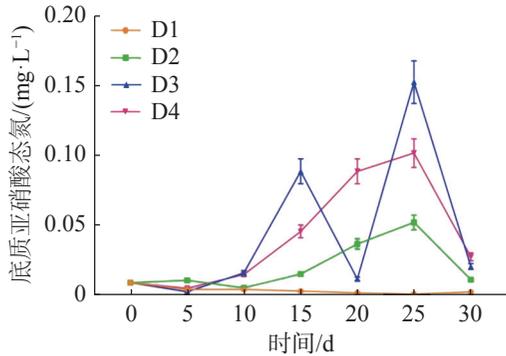


图5 不同密度下底质亚硝酸态氮的浓度变化

如图6所示,各实验组中的底质 NO_3^- -N不断积累,在实验结束时,D1、D2、D3、D4各组的底质 NO_3^- -N浓度分别为 (0.034 ± 0.003) 、 (0.074 ± 0.007) 、 (0.066 ± 0.007) 和 $(0.084\pm 0.008)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

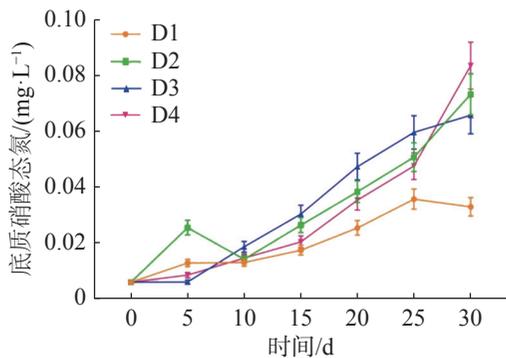


图6 不同密度下底质硝酸态氮的浓度变化

2.3 方斑东风螺稚螺在不同密度下的消化酶活性对比 如图7所示,养殖密度对稚螺AMS、LPS以

及PPS的活力具有极显著影响($P<0.01$)。稚螺体内的AMS活力随养殖密度的提高而显著降低($P<0.01$),其中D1组最高,为 $(10.30\pm 1.02)\text{U}$,D4组最高,为 $(3.64\pm 0.61)\text{U}$ 。稚螺体内的LPS活力随养殖密度的提高而显著降低($P<0.01$),其中D1组最高,为 $(4.14\pm 0.28)\text{U}$,D4组最高,为 $(1.93\pm 0.31)\text{U}$ 。稚螺体内的LPS活力随养殖密度的提高而显著降低($P<0.01$),其中D1组最高,为 $(13.52\pm 0.70)\text{U}$,D4组最高,为 $(3.38\pm 0.99)\text{U}$ 。

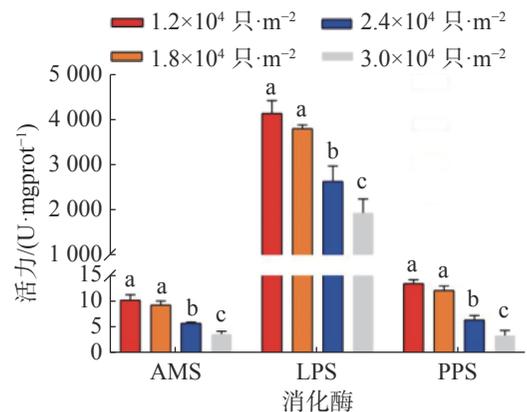


图7 实验结束时不同密度下稚螺的消化活性

2.4 方斑东风螺稚螺在不同密度下的抗氧化酶活性对比 如图8所示,养殖密度对稚螺SOD、CAT以及MDA的活力具有极显著影响($P<0.01$)。稚螺体内的SOD活力随养殖密度的提高而显著提高($P<0.01$),其中D4组最高,为 $(61.67\pm 1.11)\text{U}$,D2组最低,为 $(49.54\pm 2.94)\text{U}$ 。稚螺体内的CAT活力随养殖密度的提高而显著提高($P<0.01$),其中D3组最高,为 $(70.23\pm 2.6)\text{U}$,D2组最低,为 $(56.56\pm 3.94)\text{U}$ 。稚螺体内的MDA活力随养殖密度的提高而显著提高($P<0.01$),其中

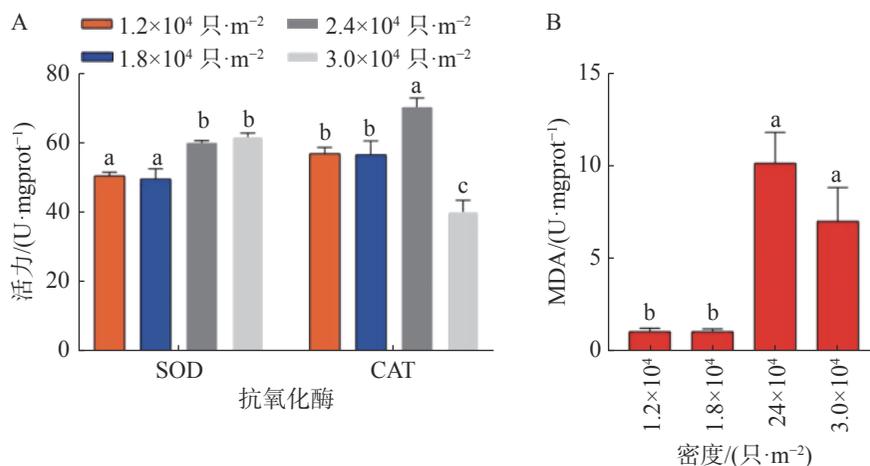


图8 实验结束时不同密度下稚螺的(A)抗氧化酶和(B)MDA的活力

D3组最高,为 $(10.12 \pm 1.65) \text{ nmol} \cdot \text{mL}^{-1}$, D2组最低,为 $(1.05 \pm 0.14) \text{ nmol} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

3 讨论

本实验对比了在相同循环水系统养殖条件下,方斑东风螺稚螺在不同密度下的养殖效果。研究发现,在循环水系统下,以D1(1.2×10^4 只 $\cdot \text{m}^{-2}$)和D2(1.8×10^4 只 $\cdot \text{m}^{-2}$)组的密度养殖的稚螺生长最快,而D3(2.4×10^4 只 $\cdot \text{m}^{-2}$)和D4(3.0×10^4 只 $\cdot \text{m}^{-2}$)组的密度养殖的稚螺生长较慢,这与在刺参(*Apostichopus japonicus Selenka*)、高体革鲷(*Scortum barcoo*)、锯缘青蟹(*Scylla serrata*)、大西洋鲑(*Salmo salar* L.)中的研究结果一致^[12-15],说明在循环水养殖系统中过高的密度会抑制方斑东风螺的生长速度。

在实验第25天,D1、D2组中的稚螺生存状态正常,但D3、D4组的稚螺均出现了食欲不振,行动迟缓的现象,且有大量的稚螺“翻背”和死亡。这一现象可能是养殖环境中过高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度导致的。在循环水养殖过程中,过大的养殖密度会导致过量的代谢废物进入养殖系统,这些代谢废物如果无法及时分解,就会导致养殖系统产生过高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ^[16-17]。养殖环境中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度过高会对养殖生物的机体组织造成损伤,甚至会导致养殖生物的死亡^[18-19]。在这种养殖环境下,养殖生物会受到严重的环境胁迫^[20]。在实验第25天时,D3组的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和底质 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均达到了 (2.68 ± 0.27) 和 $(0.15 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的峰值,D4组的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、底质 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和底质 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均达了 (1.88 ± 0.19) 、 (1.38 ± 0.14) 和 $(0.10 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的峰值。

在消化酶活性方面,消化酶是生物消化系统中的关键物质,其活性的高低直接关系到生物对营养物质的消化能力,所以消化酶的活性常用来了解生物的消化能力。在本实验结束时,方斑东风螺稚螺体内的AMS、LPS和PPS的活性均呈现出随密度的升高而降低的趋势。这可能是由于养殖过程中过高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度峰值破坏了稚螺的消化系统,从而导致稚螺的食欲不振和消化酶活性降低^[21-22]。这说明过高的养殖密度会增加循环水养殖系统的负荷,从而导致水质败坏,对方斑东风螺的消化系统造成破坏。

在抗氧化酶活性方面,贝类在受到环境因子胁迫时,体内会产生超氧阴离子自由基(ROS),并激活抗氧化防御系统,其中SOD首先被激活,将 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 转化为 H_2O_2 和 O_2 ,随后被激活的CAT会将 H_2O_2 分解为 HO_2 和 O_2 ,若生物体内的ROS不断积累,生物体内的生物膜系统会产生损伤,并产生MDA^[23]。在本研究中,D3、D4组稚螺体内的SOD活性和MDA浓度均显著高于D1、D2组($P < 0.01$)。这说明养殖系统中过高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度使D3、D4组中的稚螺处于较强的应激状态。而D4组中的CAT活性显著低于D1、D2组,可能是因为严重的应激使D4组中稚螺的氧化系统遭到了破坏^[18],本实验中,D3、D4组显著升高的MDA含量证明了这一点。

综上所述,从生长速度和提高养殖产量的方面考虑, 1.8×10^4 只 $\cdot \text{m}^{-2}$ 的密度是比较适合本研究中循环水养殖系统下的方斑东风螺中间培育的。这对后续的循环水方斑东风螺中间培育技术的进一步探究具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] KRITSANAPUNTU S, CHAITANAWISUTI N, SANT-HAWEESUK W, et al. Growth, production and economic evaluation of earthen ponds for monoculture and polyculture of juveniles spotted babylon(*Babylonia areolata*) to marketable sizes using large-scale operation [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2006, 25: 913 - 918.
- [2] ZHENG H, KE C, ZHOU S, et al. Effects of starvation on larval growth, survival and metamorphosis of ivory shell *Babylonia formosae habei* Altena et al., 1981 (Neogastropoda: Buccinidae) [J]. *Aquaculture*, 2005, 243(1/2/3/4): 357 - 366.
- [3] LÜ W, ZHONG M, FU J, et al. Comparison and optimal prediction of goptimal prediction of growth of *Babylonia areolata* and *B. lutosa* [J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 18: 100425.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [5] 梁健, 高山, 李永仁, 等. 方斑东风螺肿物致病菌分离及中草药对其的预防效果[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(11): 267 - 269.
- [6] 赵旺, 吴开畅, 王江勇, 等. 方斑东风螺“翻背症”的病原及初步治疗研究[J]. *水产科学*, 2016, 35(5): 552 - 556.
- [7] 王培琛. 淡水石斑鱼(*Cichlasoma managuense*)循环水养殖技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [8] 张龙. 凡纳滨对虾中间培育密度及循环水养殖系统研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- [9] ZHANG Q, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Effects of dietary florfenicol contained feeds on growth and immunity

- of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) in flow-through and recirculating aquaculture system [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 19: e100602.
- [10] 冯永勤, 周永灿, 李芳远, 等. 方斑东风螺规模化苗种繁育技术研究[J]. 水产科学, 2009, 28(4): 209–213.
- [11] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 23rd. Washington, D. C: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), 2017.
- [12] HASTUTI Y P, NIRMALA K, RUSMANA I, et al. Optimization of stocking density in intensification of mud crab *Scylla serrata* cultivation in the resirculation system [J]. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 2017, 16(2): 253–260.
- [13] 罗国芝, 刘刚, 谭洪新. 半封闭循环水养殖系统中高体革鲷养殖密度研究[J]. 上海海洋大学学报, 2012, 21(2): 218–224.
- [14] 祝楠. 刺参循环水养殖系统(RAS)的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] CALABRESE S, NILSEN T O, KOLAREVIC, et al. Stocking density limits for post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) with emphasis on production performance and welfare [J]. *Aquaculture*, 2017, 468: 363–370.
- [16] 陈琛, 赵伟华, 李鹏全, 等. 养殖密度对毛蚶生长和水质净化效果的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(11): 2229–2231.
- [17] 谷潇. 陆基循环水养殖系统中不同养殖密度对异育银鲫“中科5号”苗种生长性能的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [18] ZHAO M, YAO D, LI S, et al. Effects of ammonia on shrimp physiology and immunity: a review [J]. *Review in Aquaculture*, 2020, 12(4): 2194–2211.
- [19] ROMANO N, ZENG C. Toxic effects of ammonia, nitrite, and nitrate to decapod crustaceans: A review on factors influencing their toxicity, physiological consequences, and coping mechanisms [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2012, 21(1): 1–21.
- [20] 张龙, 曲克明, 张鹏, 等. 在循环水养殖系统中养殖密度对红鳍东方鲀应激反应和抗氧化状态的影响[J]. 渔业现代化, 2019, 46(4): 14–23.
- [21] LIANG Z, LIU R, ZHAO D, et al. Ammonia exposure induces oxidative stress, endoplasmic reticulum stress and apoptosis in hepatopancreas of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 54: 523–528.
- [22] GUO H, XIAN J, LI B, et al. Gene expression of apoptosis-related genes, stress protein and antioxidant enzymes in hemocytes of white shrimp *Litopenaeus vannamei* under nitrite stress [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2013, 157(4): 366–371.
- [23] 姜妮妮. 扇贝和皱纹盘鲍对温度变化的生理响应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.

Effects of different culture densities on the intermediate cultivation of *Babylonia areolate* in a recirculating aquaculture system

LIU Ziling^{1,2}, SHI Yaohua^{1,2}, ZHENG Xing^{1,2}, GU Zhifeng^{1,2}

(1. Ocean College, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. State Key Laboratory of Marine Resource Utilization in South China Sea, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: To enhance the water quality and disease control during the intermediate culture process of *Babylonia areolate*, a recirculating aquaculture experiment with a 30-day cycle was conducted. The effects of different stocking densities on the growth performance, physiological enzyme activity, and water quality changes in the recirculating aquaculture system were analyzed. Results showed that when the stocking density exceeded 1.8×10^4 individuals·m⁻², the survival rate, final shell length, daily average growth rate, and shell growth rate of the juveniles *B. areolate* decreased significantly ($P < 0.05$), and that the activities of α -amylase (AMS), lipase (LPS), and pepsin (PPS) decreased significantly ($P < 0.01$), while the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and malondialdehyde (MDA) increased significantly ($P < 0.01$). Meanwhile, the peaks of ammonium nitrogen and nitrite in the culture system significantly increased with the increase of stocking density ($P < 0.05$). Taking into account the aquaculture production performance and unit area yield, the optimal stocking density for intermediate culture of *B. areolata* in the recirculating aquaculture system was 1.8×10^4 individuals·m⁻².

Keywords: *Babylonia areolate*; recirculating aquaculture system; stocking density; survival rate; growth

(责任编辑: 潘学峰)