

线纹海马(*Hippocampus erectus*)不同养殖密度下水体理化因子和细菌数量的动态变化

李 锋^{1,2,3}, 罗 伟², 黄良民², 林 强²

(1.中国科学院广州地球化学研究所,广东 广州 510640;2.中国科学院南海海洋研究所,广东 广州 510301;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:研究线纹海马(*Hippocampus erectus*)在室内水泥池不同养殖密度下,水体环境因子和细菌数量的动态变化情况。结果表明,在一个倒池换水周期中,养殖组 1 和养殖组 2 的磷酸磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、硝酸氮($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$)、亚硝酸氮($\text{NO}_2^{-}\text{-N}$)和氨氮($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$)等离子物质的浓度和细菌、弧菌和异养菌数量均随着养殖时间的推移不断上升,通常在换水后 9 d 或 12 d 达到最高,再次换水后降到极低值。单因素方差分析结果表明,在不同养殖密度下, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 等离子浓度随着养殖密度的升高而升高;而低密度养殖池中细菌数比高密度养殖池的细菌数显著更高。养殖水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度与异养细菌数呈负相关关系, $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 浓度与细菌数量和弧菌数呈正相关关系, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 浓度与细菌数、异养菌数和弧菌数呈负相关关系, $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 浓度与细菌数、异养菌数和弧菌数均呈正相关关系。研究结果可为科学开展海马室内规模化养殖提供理论参考。

关键词:线纹海马; 养殖密度; 理化因子; 细菌; 动态变化

中图分类号:S917.4

文献标识码:A

文章编号:1004-874X(2015)02-0114-07

Dynamic variation of physicochemical factors and bacteria under different stocking densities of *Hippocampus erectus*

LI Feng^{1,2,3}, LUO Wei², HUANG Liang-min², LIN Qiang²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Seahorse aquaculture has been getting more and more interests throughout the world, especially in some tropical countries. In China, the mass culture of seahorses in outdoor or indoor cement ponds was the common mode while concerning the culture cost for seahorses. In the present study, the variation of physicochemical factors and bacteria in the culture water under different stocking densities of lined seahorses *Hippocampus erectus* were investigated. The results showed that the concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$, $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ and $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$, as well as the number of total bacterial, heterotrophic bacteria and *Vibrio* increased with culture days. Both the concentration of ions and bacterial number peaked at 9 d or 12 d, and then decreased significantly after the water exchange. One-Way ANOVA analysis demonstrated that the concentration of these ions increased with the increments of stocking densities of seahorses. In addition, a correlation analysis between the concentration of ions and the number of bacteria were performed and results showed that the concentrations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ were negatively correlated with heterotrophic bacteria, and $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ and $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ were positively correlated with the number of total bacterial, heterotrophic bacteria and *Vibrio*. These findings will benefit the mass culture of seahorse in China.

收稿日期:2014-10-23

基金项目:广州“珠江科技新星”人才专项(2011J2200024);广东省海洋渔业科技推广项目(A201001D05,A201201103)

作者简介:李锋(1978-),男,在职博士生,讲师,E-mail:lefeee@126.com

通讯作者:林强(1979-),男,博士,研究员,E-mail:linqiang@scsio.ac.cn

Key words: lined seahorse (*Hippocampus erectus*); stocking density; physical and chemical factor; bacteria; dynamic variation

海马隶属海龙科(Syngnathinae),是珍稀的海洋药用动物,具有极高的经济价值。据统计,全世界每年至少有2 500万条海马作为药材和装饰品进行交易,参与的国家 and 地区接近77个^[1-2]。目前,贸易主要利用的是野生海马资源,而野生海马的资源量随着过度捕捞和栖息地的破坏或污染而面临枯竭^[3]。为了促进海马资源的可持续利用,同时满足日益增长的需求,近几年国内外陆续出现了海马的人工养殖,在人工繁殖、鱼苗培育和成鱼养殖等方面取得了较大突破。但总的来说,目前海马的养殖技术还不成熟、养殖效果并不理想^[4-10]。

近年来,海马养殖产业发展非常迅速,由传统的低密度池养和流水系统养殖^[4-8],逐渐过渡为高密度规模化养殖,养殖水体的质量对海马养殖有重要影响,包括水温、饵料和放养密度等各种因素都会对池养海马养殖水体的理化因子和细菌数量产生较大影响^[10-11]。另外,养殖水体的理化因子和细菌数量相互影响,其动态变化随时都会影响海马的生理状态。然而,在高密度池养条件下,饵料投入量多必然会造成养殖水体中残饵和代谢物增加,同时由于养殖水体环境生态系统简单,缓冲性差,微生态环境易变,养殖系统难以平衡调控,给高效健康养殖带来诸多挑战。因此,了解高密度集约化养殖池的氮磷收支状况及细菌的动态变化,对于指导水产动物的健康养殖具有重要意义。研究报道,工厂化虾池中有90%以上的营养物质来自饵料,大部分以可溶性或非可溶性物质保留在水体中^[12],而且养殖密度显著影响水产动物工厂化养殖水体中的氮磷收支^[13],不仅仅直接影响水产动物的健康,还会促进病原菌的增殖,威胁水产养殖。然而截止到目前,

关于海马人工规模化养殖的报道屈指可数,仅少数学者对海马的饵料及驯化方式做了一些研究^[8-10],尚没有关于海马养殖密度对养殖水体影响的相关研究。海马养殖生产中往往由于养殖水体质量的急剧变化而导致海马生长不适甚至出现大规模死亡现象^[8]。因此,调节好养殖水体的质量成为海马人工养殖急待解决的难点之一,其中合适的养殖密度是水体质量调节的一个重要因素。

线纹海马(*Hippocampus erectus*)是海马属中的中型体格海马,主要分布在大西洋西海岸。近年来,该海马被人工繁育成功并引入中国,因其生长速度快、抗病性强而被迅速推广,成为目前中国海马养殖的主要种类之一^[14-17]。本试验主要研究了在线纹海马室内池养中,不同养殖密度下养殖水体中的理化因子及细菌群落的动态变化,以期为主线纹海马合适的养殖密度和科学的养殖管理提供理论依据,为其健康养殖及病害防治工作提供有力支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2014年3~4月在广东省湛江市德方生物科技有限公司的海马养殖基地进行。试验设置3个试验组,分别是养殖组1、养殖组2和对照组,养殖组1放养150尾,养殖组2放养350尾,对照池不放养海马,每处理设置3个重复。线纹海马的平均体长为 $11.08(\pm 0.37)$ cm,体质量为 $5.96(\pm 1.91)$ g。试验所用水泥池规格为 $3.5\text{ m} \times 4.7\text{ m} \times 1.8\text{ m}$,位于室内车间,养殖水深均为0.6 m。所有水泥池均保持充气状态,期间如果有海马死亡,从备用海马中及时补充,具体养殖信息见表1。

表1 线纹海马3种养殖密度模式下的具体信息

组别	养殖地点	养殖方式	养殖对象	数量(尾)	密度(尾/m ²)	饵料	成活率(%)
养殖组1	室内水泥池	流水养殖	成年海马	150	15.20	冻虾皮	95.33
养殖组2	室内水泥池	流水养殖	成年海马	350	35.46	冻虾皮	92.8
对照组	室内水泥池	流水养殖	无	0	0	无	无

1.2 日常管理

试验前彻底清洗水泥池,池壁泼洒 KMnO_4 (浓度 25 mg/kg)消毒,过滤海水冲洗干净。试验开始注入经两次砂滤和臭氧发生器处理过的新鲜海水。9个养殖池中水体的盐度初始值为 $27(\pm 1)\text{‰}$;pH值初始值为 $8.0(\pm 0.2)$,白天光照强度控制在 $2\ 500\sim 3\ 000\text{ lx}$ 。养殖线纹海马投喂冰冻保存的虾皮,每天

投喂3次,试验组海马饵料的投喂量控制在约占体质量的 $5\%\sim 8\%$,2 h后吸底污和余饵。养殖过程中每隔15 d倒池换水,即一个倒池换水周期,本试验中两次倒池换水的时间分别是3月31日和4月15日。试验初始水温为 $19.8(\pm 0.14)\text{ }^\circ\text{C}$,最终水温为 $24.15(\pm 0.07)\text{ }^\circ\text{C}$,期间有一个寒潮,气温降低,水温也随之变化。

1.3 细菌数量测定

每隔 2 d 定时 (上午 8:30~9:00) 到各池取水样, 分别在每个池子的四周和中间取, 然后立即带回实验室作梯度稀释处理, 接种于异养细菌 2216E 培养基和弧菌专用 TCBS 培养基上, 并做 3 个重复平板, 然后于 28℃ 恒温培养箱中培养 48 h, 参考李秋芳等^[18]的方法进行菌落计数。同时, 对所取水样用 20 μm 孔径筛绢过滤后, 用过滤多聚甲醛固定水体样品, 冰冻保存, 运回实验室用流式细胞仪进行细菌总数的测定。取 500 μL 待测样品加入核酸染料 SYBR Green I, 室温避光放置 30 min, 加入到绝对计数管 (TruCount tube, BD, USA) 中, 并用流式细胞仪计数。记录的参数包括获取的细胞总数和 Beads 的获取数, 最后计算出 3 个平行样品中微生物数目的平均值。样品中微生物细胞数目的计算公式:

$$\text{细胞数目 (个/mL)} = \frac{\text{获取细胞数} \times \text{Beads 总量}}{\text{Beads 获取数} \times \text{样本量}}$$

式中, 绝对计数管的 Beads 总量为 2.08×10^4 。

1.4 水体理化因子测定

用水温计测定各养殖池水温; 国产 WY100Y 手持式折光仪 (成都万辰光学仪器厂) 测定各养殖池

盐度; 便携式 pH 仪测定海水 pH 值。同时, 养殖用水取样后, 立即带回实验室, 依据《海洋监测规范》(GB12763.4-2009) 测定 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的浓度。 NH_4^+-N 采用次溴酸盐氧化法测定, NO_2^--N 采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定, NO_3^--N 采用锌镉还原法测定, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 采用磷钼蓝分光光度法测定。

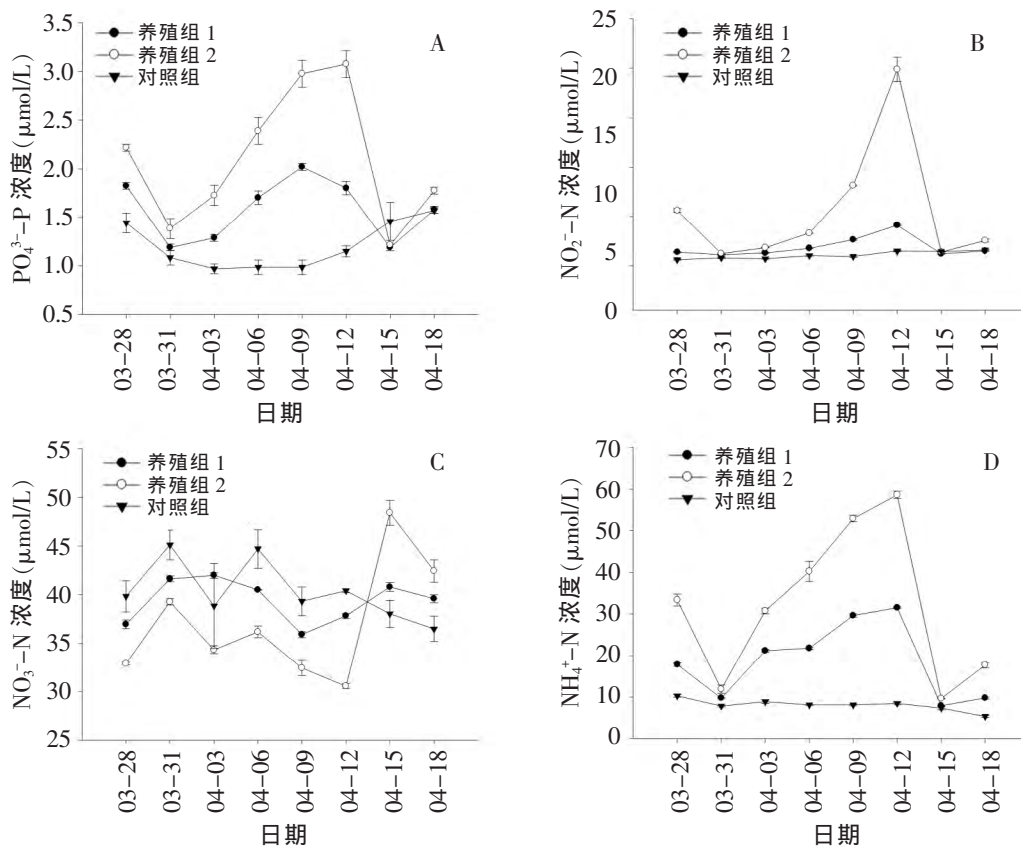
1.5 数据统计与分析

用 SPSS17.0 统计软件对不同试验组的细菌数量与常见理化因子进行单因素方差分析 (ANOVA) 和多重比较, 并采用 Pearson 相关系数进行处理组理化因子与细菌数量之间的关联性分析。

2 结果与分析

2.1 常见理化因子的动态变化

图 1 为线纹海马养殖水体的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度的动态变化。结果表明, 在试验期间, 养殖组和对照组的盐度和 pH 值均没有明显变化。对照组的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度比较稳定 (图 1A), 养殖组 1 和养殖组 2 的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度变化规律类似, 随着养殖时间的推移, 不断上升, 其中养殖组



A: $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$; B: NO_2^--N ; C: NO_3^--N ; D: NH_4^+-N

图 1 不同养殖密度下养殖水体理化因子的变化

1 在换水后 9 d (4 月 9 日) 达到最高 ($2.02 \pm 0.03 \mu\text{mol/L}$), 养殖组 2 在换水后 12 d (4 月 12 日) 达到最高 ($3.07 \pm 0.14 \mu\text{mol/L}$), 再次换水后, 养殖组降到初始极低值。养殖组 2 在整个倒水周期中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度始终显著高于养殖组 1。

各养殖组中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度随倒池换水呈现周期变化 (图 1B), 倒池后处于极低值, 之后逐渐升高。养殖组 1 的变化范围为 $1.03 (\pm 0.03) \sim 4.12 (\pm 0.07) \mu\text{mol/L}$, 养殖组 2 的变化范围为 $1.21 (\pm 0.04) \sim 19.2 (\pm 1.2) \mu\text{mol/L}$; 养殖组 2 的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度不断升高, 但是升高幅度较小, 峰值为 $19.9 (\pm 1.25) \mu\text{mol/L}$ 。而对照组的亚硝氮浓度变化范围为 $0.61 (\pm 0.06) \sim 1.57 (\pm 0.08) \mu\text{mol/L}$, 相对比较稳定。

在试验期间的倒水周期内, 养殖组和对照组中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度呈波动性变化, 变化幅度较小, 但是养殖组 2 中变化相对较大, 变化范围在 $32.9 (\pm 0.12) \sim 48.4 (\pm 1.28) \mu\text{mol/L}$ 之间 (图 1C)。

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的变化与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度的变化趋势类似 (图 1D), 在室内水泥养成池随倒池换水呈现周期变化, 倒池后处于低点, 之后逐渐升高, 在换水后第 12 天 (即 4 月 12 日) 达到峰值, 分别为 $31.5 (\pm 0.19) \mu\text{mol/L}$ 和 $58.6 (\pm 0.89) \mu\text{mol/L}$; 而对照组的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度稳定。

2.2 养殖水体细菌数量的变化

采用流式细胞仪测定各养殖方式下细菌的数量及变化, 线纹海马养殖组 1、养殖组 2 和对照组细菌数量变化情况见图 2A。结果显示, 在 1 个换水周期中, 对照组的细菌数量变化幅度较小, 中间略有波动; 养殖组 1 和养殖组 2 的变化趋势基本一致, 在刚倒池换水时细菌数量最少, 分别为 $1.37 (\pm 0.03) \times 10^5 \text{ CFU/mL}$ 和 $2.43 (\pm 0.72) \times 10^5 \text{ CFU/mL}$ 。随

着海马养殖的进行, 细菌数量逐步增加, 在换水后 12 d 时细菌数量达到巅峰, 分别为 2.34×10^6 、 $8.13 (\pm 1.09) \times 10^5 \text{ CFU/mL}$ 。随着再一次倒池换水, 细菌数量急剧减少至初始水平。在养殖过程中, 养殖组 1 中细菌数量的增长速度显著高于养殖组 2, 在 12 d 时养殖组 1 中细菌数量达到养殖组 2 的 3 倍左右。

各养殖密度下, 异养细菌的变化动态如图 2B 所示。在 1 个换水周期中, 养殖组 1 和养殖组 2 变化动态类似, 在倒池换水后异养细菌急剧升高, 均在换水后 3 d 达到峰值, 分别为 $1.90 (\pm 0.07) \times 10^5$ 、 $2.00 (\pm 0.14) \times 10^5 \text{ CFU/mL}$, 然后急剧下降, 分别在到换水后 6 d 和 9 d 达到极低值, 分别为 $3.85 (\pm 0.50) \times 10^4$ 、 $1.35 (\pm 0.50) \times 10^4 \text{ CFU/mL}$, 之后呈小幅波动。对照组的异养细菌数量变化范围也较大, 在 $2.0 (\pm 0.17) \times 10^3 \sim 2.01 (\pm 0.11) \times 10^5 \text{ CFU/mL}$ 之间。

弧菌数量的变化如图 2C 所示。在 1 个倒池换水周期中, 对照组的弧菌细菌数量极少并且稳定, 养殖组 1 和养殖组 2 的弧菌随着养殖时间的推移不断上升, 在换水后 12 d 达到最高值, 分别为 $2.25 (\pm 0.35) \times 10^4$ 、 $8.05 (\pm 0.35) \times 10^3 \text{ CFU/mL}$, 养殖组 2 的弧菌数量显著多于养殖组 1, 经再次换水后基本恢复初始状态。

另外, 利用 SPSS 分析在换水后 12 d 不同养殖密度处理组间的细菌数总数、异养菌数和弧菌数量是否有差异, 结果 (表 2) 发现, 养殖组 1 细菌总数最多, 显著高于养殖组 2 和对照组。养殖组 1 的异养菌数也是最多的, 与养殖组 2 没有显著差异, 显著高于对照组。养殖组 2 的弧菌数最多, 约为养殖组 1 的 4 倍, 并极显著高于养殖组 1 和对照组。

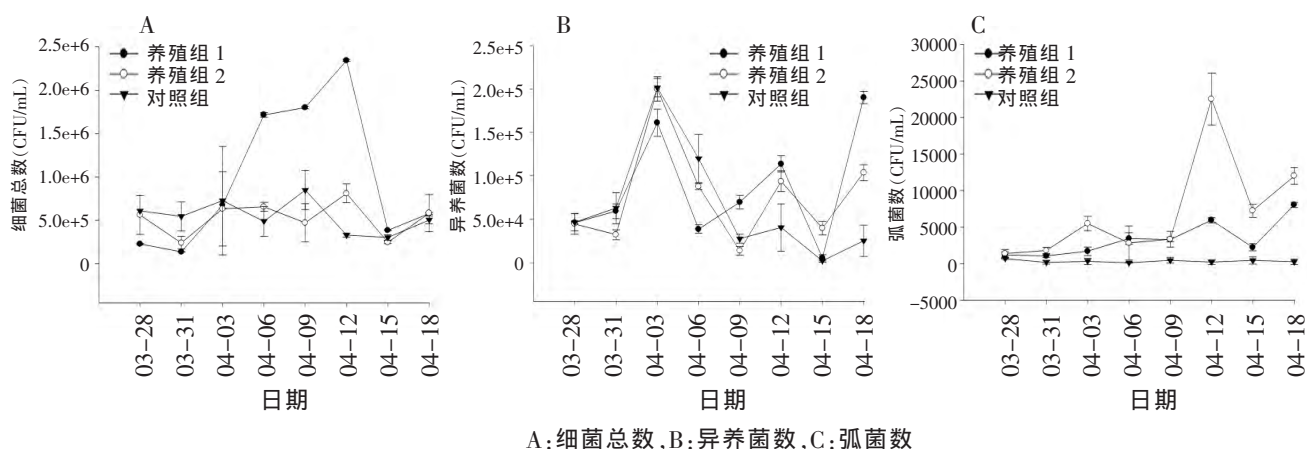


图 2 各养殖密度下水体细菌数量、异养菌和弧菌数量变化

表 2 不同处理组在换水后 12d 的细菌数量 (CFU/mL)、异养菌数 (CFU/mL) 和弧菌数 (CFU/mL)

组别	细菌数 ($\times 10^4$)	异养菌数 ($\times 10^4$)	弧菌数 ($\times 10^4$)
养殖组 1	2345.44±14.14a	113.50±9.19a	5.95±0.35b
养殖组 2	812.78±108.91b	93.50±12.02ab	22.50±3.54a
对照组	331.58±23.78c	40.33±27.30bc	0.23±0.32c

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示经 *Duncan's* 检验差异显著。

2.3 细菌数量变化与常见理化因子的关系

不同养殖密度下养殖水体的细菌数量变化与理化因子的相关关系如表 3 所示。在 2 个养殖组中, $PO_4^{3-}-P$ 的浓度与细菌总数呈正相关关系, 但不显著; 与异养细菌数呈负相关关系, 且在养殖组 1 中显著相关; $PO_4^{3-}-P$ 的浓度与弧菌数量相关性较小。 $NO_2^- - N$ 的浓度与细菌数量和弧菌数呈正相关关系, 且在养殖组 1 中呈极显著相关; 与异养细菌数相关性较小。 $NO_3^- - N$ 的浓度与细菌数、异养菌数和弧菌数呈负相关关系。 $NH_4^+ - N$ 的浓度与细菌数、异养菌数和弧菌数呈正相关关系, 且在养殖组 1 中呈极显著相关。总的来说, 水温对细菌的数量影响较大, 其中温度与弧菌的数量具有极显著正相关关系。

表 3 不同养殖密度下养殖水体的细菌数量与理化因子的相关关系

理化因子	细菌种类	养殖组 1	养殖组 2	对照组
磷 ($PO_4^{3-}-P$)	细菌总数	0.398	0.348	-0.225
	异养菌数	-0.501*	-0.441	-0.611**
	弧菌数	-0.242	0.256	0.216
亚硝酸氮 ($NO_2^- - N$)	细菌总数	0.898**	0.154	-0.522*
	异养菌数	0.073	-0.17	-0.498*
	弧菌数	0.717**	0.029	-0.233
硝酸氮 ($NO_3^- - N$)	细菌总数	-0.527*	-0.162	0.312
	异养菌数	-0.012	0.029	0.007
	弧菌数	-0.233	-0.063	-0.135
氨氮 ($NH_4^+ - N$)	细菌总数	0.872**	0.221	0.091
	异养菌数	0.095	-0.219	0.359
	弧菌数	0.153	0.329	0.146
水温	细菌总数	0.194	-0.633**	-0.121
	异养菌数	0.303	0.290	-0.197
	弧菌数	0.631**	0.590**	0.169

注: “*”表示相关性显著; “**”表示相关性极显著。

3 讨论

3.1 线纹海马各养殖密度下理化因子的变动

随着市场需求的增加, 为了提高海马的养殖产量, 高密度工厂化养殖逐渐成为海马规模化养殖的主要养殖模式。本试验通过在一个倒池换水周期中养殖不同密度的海马, 探讨水体中理化因子的变化, 发现 N、P 等物质随着养殖天数的推移而不断增高, 并在倒池换水前到达最高, 该结果与其他水产动物养殖类似^[19-21]。其主要原因是食物和残渣中的 N、P 不断溶入养殖水体中, 通过分解氧化后变为 $PO_4^{3-}-P$ 、 $NO_3^- - N$ 、 $NO_2^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 等离子, 从而在养殖水体中不断积累, 在下次倒池换水之前通常会达到最高。除此之外, 排泄产物和粪便的分解产物可能是另一个比较重要的原因。与食物残渣相比, 海马的排泄物和粪便比食物更加难以排出, 排泄物和粪便中的 N、P 元素直接进入养殖水体, 导致 $PO_4^{3-}-P$ 、 $NO_3^- - N$ 、 $NO_2^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 等浓度升高。因此, 及时吸出残饵和粪便是减少养殖水体氮磷含量的重要措施。

除了养殖过程的管理方式, 养殖水体的理化因子变动通常还与养殖密度密切相关。本试验发现海马养殖密度越高, 水体 N、P 等含量越高, 该结果与多个先前的报告类似, 李倩等^[20]在研究南美白对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 中发现水体中 TN、TP、 $NH_3 - N$ 、 $NO_2^- - N$ 的浓度随着养殖密度的增加而逐渐增加, 张晓雁等^[21]在中华鲟室内驯养中发现硝酸盐、磷酸盐、总细菌与养殖密度存在显著的正相关关系。随着养殖密度上升, 饵料投喂量增加, 硝酸盐累积量增加。鱼主要从食物中摄取磷, 经代谢后将磷主要以磷酸盐形式排出体外, 当养殖密度升高时, 总排泄物增加水中磷酸盐的累积量也相应升高。然而过高的氨氮浓度对鱼类的免疫系统及生理机能会造成明显影响^[22]。因此, 合适的养殖密度是控制养殖水体中氨氮浓度关键之一。

3.2 线纹海马不同养殖密度下养殖水体中细菌数量的动态

在海洋水产动物集约化养殖的生态系统中, 细菌是各种有机物质的主要分解者, 能够直接将各类碎屑、生物大分子和氨基酸等分解成无机物, 为浮游植物的光合作用提供所需养分, 在物质循环和能量流动中具有无可替代的作用^[23]。因此, 在海马集约化养殖生态系统中, 细菌种类和数量是评价养殖水质优劣的一个重要指标。但室内水泥池养殖水体生态系统相当脆弱, 容易受人为因子、环境因子等影响。在不同的养殖密度下, 养殖水体中细菌数量和类型并不稳定, 总是在一定的范围内上下波动。在

本试验中,从细菌总数变化来看,养殖组 1 和养殖组 2 中的细菌总数均随着养殖天数的增加而不断增加,并在换水前达到最高,在重新换水后细菌总数回到初始值。由于残饵以及代谢物使池中养殖水体腐殖质积累,成为细菌的天然培养基,有利于细菌大量繁衍^[24]。

本试验发现细菌总数和养殖密度有密切关系,低密度养殖池中细菌总数相对高密度养殖池增加更快、更多。这可能和养殖管理有关:在试验中,由于管理员并没有严格按照海马的体质量进行投喂或者经常性地投喂过剩,低养殖密度的海马组饵料的投喂量超出了海马的摄食能力,因此,低密度养殖组中饵料残留往往更多、时间更长。随着残饵在养殖水中的腐败及水体有机质的增加,加剧了水质及底质的恶化,形成有利于细菌增殖的条件,使得水体中细菌总数大量增加。这个观点与之前的多个研究基本一致,吕军仪等^[8]在研究大海马摄食时,认为动物性饵料将会引起水环境中细菌数量显著增加;刘国才等^[25]指出对虾养殖系统中细菌的生产效率比湖泊、河口、海洋等的生产效率高,其原因是虾池中有机质更加丰富,而且更易为细菌利用。

弧菌是海水养殖系统中一类重要的鱼类致病菌或条件致病菌,往往是引发养殖动物发病的一个重要因素^[23,26]。本试验中低密度养殖组和高密度养殖组在弧菌数量上差异显著,吕军仪等^[8]研究饵料对海马养殖水体细菌数量的影响时认为,亲海马组和幼海马组均与空白组的底层弧菌、表底层异养细菌数量呈显著性差异。林伟等^[27]发现动物性饵料中存在着大量的弧菌(一般大于 10^4 个/mL 或 g),当投喂动物性饵料或来源于动物等植物替代性饵料后,水体中的弧菌量就会迅速上升。本试验直接投喂冻虾皮,其中可能含有较高的弧菌量,因此当饵料投的越多,养殖水体的弧菌数量相应越多。本试验发现在海马亲本养殖过程中,亲本的放养密度对弧菌数量的影响比较明显,亲本密度越大,饵料需求越多,排泄量大,因而弧菌数量也就越多。因此,在海马亲本的养殖过程中,合理的亲本放养密度和及时排除水体中的残饵和粪便是降低弧菌的关键之一,从而有效降低海马亲本患病的风险。

3.3 养殖水体理化因子与细菌数量动态变化的相关性分析

在水产动物养殖生态系统中,细菌与环境因子相互影响^[23]。细菌的生长、繁殖均受到环境中各种元素及其相对比例所影响。其中,水温对细菌数量的

动态变化具有重要的影响。线纹海马的适宜生长水温为 $26\sim 29^{\circ}\text{C}$,本试验中,水温随着养殖进程慢慢升高,温度的升高对细菌繁殖具有明显的促进作用,水温与细菌数、异养菌数和弧菌数呈正相关。该结果与其他学者在研究水产动物高密度养殖生态系统时的结果基本一致^[8,28]。养殖水体中的亚硝氮和铵盐浓度对水体细菌数量和异养菌数量产生影响,钟硕良等^[29]认为,异养细菌数量和 NH_4^+-N 、 S^{2-} 的浓度呈正相关,吕军仪等^[8]也发现, NH_4^+-N 与异养菌数量呈正相关且相关性较为显著。本试验中,不管是高密度养殖组还是低密度养殖组的细菌数量、异养菌数量和弧菌数量与亚硝氮和铵盐的浓度均呈正相关,且相关性显著,这一结果再次证实了水体中的亚硝氮和铵盐含量具有促进异养细菌繁衍的作用。一般来说,动物性饵料蛋白含量更高、必须氨基酸种类更齐全、营养更丰富,但是在海马规模养殖中,动物性饵料的投喂往往会对养殖水体理化因子和菌群产生较大影响^[8]。在海马的规模化养殖中,通常饵料投喂量与养殖密度有关,养殖密度越大,投喂量越多,相应的残饵和粪便量也多,致使病菌异常增殖,破坏了养殖生态系中微生物多样性,致使致病病菌异常增殖,给规模化养殖带来巨大风险^[21,28]。因此,在海马规模化养殖中,合适的养殖密度和科学的管理方式是成功养殖的关键。

参考文献:

- [1] Lourie S A, Vincent A C, Hall H J. Seahorse: An identification guide to the world's species and their conservation [R]. London: Seahorse Project, 1999: 214.
- [2] Salin K R, Mohankumaran N C. Resources and biodiversity of seahorses and the need for their conservation in India [J]. Aquaculture Asia, 2006, 10:3-8.
- [3] Lin Q, Lin J D, Zhang D. Breeding and juvenile culture of the lined seahorse, *Hippocampus erectus* Perry, 1810 [J]. Aquaculture, 2008, 277:287-292.
- [4] Lin Q, Lu J, Gao Y, et al. The effect of temperature on gonad, embryonic development and survival rate of juvenile seahorses, *Hippocampus kuda* Bleeker [J]. Aquaculture, 2006, 254: 701-713.
- [5] Planas M, Chamorro A, Quintas P, et al. Establishment and maintenance of threatened long-snouted seahorse (*Hippocampus guttulatus*) broodstock in captivity [J]. Aquaculture, 2008, 283(1-4): 19-28.
- [6] Otero-Ferrer F, Molina L, Socorro J, et al. Effect of different live prey on spawning quality of short-snouted

- seahorse, *Hippocampus hippocampus* (Linnaeus, 1758)[J]. J Word Aquacul Soc, 2012, 43(2): 174–186.
- [7] 邓钢,吕军仪,林强.大海马育苗池水华发生期间细菌动态及相关理化参数[J].中国水产科学,2005,12(4):477–482.
- [8] 吕军仪,李秉记,孙燕燕,等.池养大海马的摄食、生长和生态转换效率[J].水产学报,2002,26(1):61–66.
- [9] Ajiboye O, Yakubu A, Adama T, et al. A review of the use of copepods in marine fish larviculture[J]. Rev Fish Biol Fisher, 2011, 21(2): 225.
- [10] 吕军仪,林强,邓钢,等.动物性饵料对养殖水体中菌数和理化因子的影响[J].中山大学学报(自然科学版),2007, 46(2):59–62.
- [11] 张萍,周鑫,秦伟,等.克氏原螯虾池塘放养密度对浮游生物群落的影响[J].广东农业科学,2014(6):127–131.
- [12] Briggs M R P, Funge-Smith S J. A nutrient budget of some intensive marine ponds in Thailand[J]. Aquac Fish Manag, 1994, 25(8): 789–811.
- [13] 李玉全,李健,王清印,等.养殖密度对工厂化对虾养殖池氮磷收支的影响[J].中国水产科学,2007,14(6):926–931.
- [14] Lin Q, Lin J, Zhang D. Weaning of the juvenile seahorses *Hippocampus erectus* Perry, 1810 from live feed to frozen food [J]. Aquaculture, 2009a, 291:224–229.
- [15] Lin Q, Zhang D, Lin J. Effects of light intensity, stocking density, feeding frequency and salinity on the growth of sub-adult seahorses *Hippocampus erectus* Perry, 1810 [J]. Aquaculture, 2009b, 292: 111–116.
- [16] Lin Q, Lin J, Huang L. Effects of substrate color, light intensity and temperature on survival and skin color change of juvenile seahorses, *Hippocampus erectus* Perry, 1810[J]. Aquaculture, 2009c, 298: 157–161.
- [17] Koldewey H J, Martin-Smith K M. A global review of seahorse aquaculture[J]. Aquaculture, 2010, 302: 131–152.
- [18] 李秋芳,陈碧鹃,曲克明,等.鱼虾混养生态系中细菌动态变化的研究[J].应用生态学报,2002,13(6):731–734.
- [19] 邓吉朋,黄建华,江世贵,等.两种微生物制剂在斑节对虾高密度养殖中的应用效果[J].广东农业科学,2014 (14):121–125.
- [20] 李倩,周志明,杭小英.南美白对虾不同养殖密度水质变化规律与养殖效益的分析[J].中国农学通报,2014,30(2): 100–104.
- [21] 张晓雁,李罗新,危起伟,等.养殖密度对中华鲟行为、免疫力和养殖环境水质的影响[J].长江流域资源与环境, 2011,20(11):1248–1354.
- [22] 韩春艳,郑清梅,陈桂丹,等.氨氮胁迫对奥尼罗非鱼非特异性免疫的影响[J].南方水产科学,2014,10(3):47–52.
- [23] 李卓佳,李烁寒,杨莺莺,等.凡纳滨对虾高位池养殖水体细菌变动及其与理化因子的关系[J].南方水产,2010, 6(4):6–12.
- [24] 李烁寒.不同对虾养殖模式细菌数量动态与环境变化的比较[D].广州:暨南大学,2009.
- [25] 刘国才,李德尚,董双林.对虾养殖围隔生态系统浮游细菌的呼吸与生产[J].应用生态学报,2003,14(11):2079–2080.
- [26] 黄洪辉,林钦,郭志勋,等.有益微生物的应用对海水对虾养殖池塘中细菌数量动态变化的影响[J].南方水产, 2007,3(3):14–19.
- [27] 林伟,陈马马.微藻与细菌相互关系研究在海水养殖中的重要意义[J].海洋科学,1998(4):34–37.
- [28] 曹煜成,李卓佳,文国樑,等.虾-鱼-蟹海水养殖池塘细菌数量动态及其与理化因子的关系[J].广东农业科学, 2013(5):120–123.
- [29] 钟硕良,陈月忠,林克冰,等.虾池底质中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 S^{2-} 和异养细菌含量的变化及其相关性研究[J].台湾海峡,1997, 16(4):449–454.

(责任编辑 储霞玲)