

缢蛭混养对三疣梭子蟹-日本囊对虾综合养殖系统 理化环境和小型底栖动物的影响*

柴欣如¹ 许文军² 张东旭^{2①} 何杰² 刘慧玲¹

(1. 浙江海洋大学水产学院 浙江舟山 316022; 2. 浙江省海洋水产研究所 浙江省海水增养殖重点实验室 浙江舟山 316021)

摘要 滤食性贝类在生态系统中可通过自身生理活动促进系统的物质循环和能量流动,进而影响养殖环境。为从养殖系统底质环境角度为综合养殖系统优化提供依据,建立了 4 个实验生态系统,即在三疣梭子蟹-日本囊对虾养殖系统中混养 3 个不同密度的缢蛭(由低到高分别表示为 PMB₁, PMB₂, PMB₃),并以三疣梭子蟹-日本囊对虾养殖系统(PM)为对照。通过对不同养殖系统底泥理化性质及小型底栖动物丰度、生物量的比较分析,探究缢蛭不同混养密度对养殖系统底质环境的影响。结果显示,总体而言,试验期间缢蛭高密度混养系统 PMB₃底泥 pH 与氧化还原电位(ORP),显著高于其他系统,而底泥有机质含量显著低于其他系统。从小型底栖动物群落物种组成来看,不同养殖系统中线虫在丰度上占主要优势,占总丰度的 35.9%~42.7%;介形类在生物量上占最大优势,占总生物量的 74.2%~81.1%,PMB₃总丰度和总生物量显著高于其他系统。较高混养密度下,缢蛭能通过滤食残饵、粪便等有机物减少底泥有机物质的积累,改善底质环境,提高小型底栖动物丰度和生物量。本试验条件下,根据养殖系统底质环境变化特征,缢蛭放养密度 34.7×10^4 ind./hm² 为最优放养密度。

关键词 缢蛭;理化特性;小型底栖动物;丰度;生物量

中图分类号 S967.4 doi: 10.11693/hyhz20211100276

对养殖系统而言,养殖环境(包括水环境和底质环境)是养殖生物赖以生存的基础,对养殖生物的健康和养殖的成败至关重要(李越蜀, 2014)。养殖过程中,残饵、养殖生物粪便等养殖废物在系统中不断积累,往往超过了养殖系统本身的自净能力。这些养殖废物随着生物地球化学过程在系统中迁移、转化,影响着养殖系统的结构和功能(赵亚波等, 2018)。利用生态学原理,将具有不同生态位的生物混养在同一系统中,不仅能提高养殖系统的物质利用率,同时也能改善、修复养殖环境,增加系统的稳定性(Zhang *et al.*, 2016)。

滤食性贝类在生态系统中具有明显的生态学效应,被称作“生态系统工程师”(Nicholaus *et al.*, 2020),

其能通过自身生理活动促进系统的物质循环和能量流动,进而影响养殖环境。贝类通过摄食和生物沉积作用,将滤食的颗粒有机物以粪便和假粪的形式输送到系统底部,这一过程使得水生生态系统水体和底质耦合起来,提高了有机营养物质的沉积速率(Manju *et al.*, 2016)。而沉积的有机营养物质在微生物作用下可分解转化为无机营养物质重新进入水体中(张凯等, 2015)。有研究表明,贝类养殖区营养物质的再生速率在某种程度上高于非养殖区,即使在自然沉积作用很高、沉积物中有机物含量丰富的区域,贝类的养殖活动依然能够促进无机营养物质从底质中释放出来(范士亮, 2007; 姜磊等, 2009)。

蟹-虾-贝(蛤、蛭、蚶)混养模式是沿海地区重要

* 国家自然科学基金项目, 32002395 号; 国家重点研发计划项目, 2019YFD0900402 号; 浙江省科技厅院所专项, HYS-CZ-003 号; 浙江省海洋水产研究所博士启动基金, 2020B04 号。柴欣如, 硕士研究生, E-mail: chaixinru2019@163.com

通信作者: 张东旭, 博士, E-mail: dxzhang0580@hotmail.com

收稿日期: 2021-11-10, 收修改稿日期: 2021-12-13

的池塘养殖模式(张凯等, 2015)。然而, 目前针对海水养殖池塘中滤食性贝类养殖对养殖环境尤其是养殖底质环境影响的研究仍十分有限。因此, 本研究建立了 4 组实验生态系统, 通过在三疣梭子蟹-日本囊对虾养殖系统中混养不同密度缢蛭, 旨在探究缢蛭对养殖系统底质理化特征及小型底栖动物群落的影响, 以期为梭子蟹综合养殖模式的优化提供数据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于浙江省舟山市长白岛(30°10'N, 122°02'E)开展, 试验所用池塘大小均为 $1.33 \times 10^4 \text{ m}^2$, 其中三个池塘放养三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、日本囊对虾(*Marsupenaeus japonicus*)和缢蛭(*Sinonovacula constricta*), 对照池塘(PM)放养三疣梭子蟹和日本囊对虾。缢蛭放养时间为 4 月初, 梭子蟹放养时间为 6 月初, 日本囊对虾放养时间为 7 月初, 三疣梭子蟹和日本囊对虾的放养密度为 31.2×10^4 、 $22.5 \times 10^4 \text{ ind./hm}^2$, 缢蛭在对虾养殖系统 PMB₁、PMB₂ 和 PMB₃ 的放养密度为 11.6×10^4 、 23.1×10^4 、 $34.7 \times 10^4 \text{ ind./hm}^2$ 。三疣梭子蟹、日本囊对虾和缢蛭的初始平均个体重量分别为 0.024 0、0.008 7 和 0.324 0 g。养殖期间, 投喂杂鱼作为主要饲料, 每日早晚各投喂一次。在大潮期间, 通过进排水口对池塘进行换水, 不同养殖池塘换水量一致。

1.2 样品采集与处理

于 2020 年 4~12 月采集各池塘底泥样品, 初始样采集时间为 4 月初, 其余各月底泥样品均在中旬采集完毕。每个池塘沿对角线选取 3 个采样点, 用底泥柱状采样器(直径: 10 cm)在每个采样点采集 4 管底泥样

品作为每个采样点的平行样。用底泥 pH/ORP 计现场测定底泥温度、pH 和氧化还原电位(ORP)(3 cm 深度; IQ150, Spectrum), 样品置于保温箱中带回实验室进行其他参数测定。有机质含量的测定方法: 冷冻干燥机冻干后, 用研钵将泥样研磨成粉末状, 过 100 目筛, 去除大颗粒不能磨碎的杂质, 450 °C 下灼烧 5 h, 前后重量差视为沉积物中的有机物含量, 用失重的百分率(%)表示。

取 40 mL 表层 5 cm 泥样与 10%福尔马林溶液等体积混合固定, 用于检测小型底栖动物。丰度和生物量的测定方法: 1%的虎红(Rose Bengal)染液对小型底栖动物标本和残渣进行染色, 静置 24 h 后进行粗分, 用 42 μm 孔径套筛过滤后, 转入 Ludox-HS40 硅胶液中悬浮离心, 然后在解剖镜下按类群分选计数, 分类计数后的标本用滤纸吸干固定液称重(Holme *et al.*, 1984; 于婷婷, 2014), 计算小型底栖动物的丰度(ind./cm³)和生物量(μg/cm³)。

1.3 数据处理与分析

数据统计时, 以 4 个平行样均值作为每个采样点的测定值。数据分析采用 SPSS 22.0 软件。试验期间, 不同养殖系统底质理化指标与生物指标的差异采用重复测量方差分析, 小型底栖动物与理化性质之间的相关性采用 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 养殖生物收获情况

各养殖系统养殖生物收获情况见表 1。总体来看, 缢蛭产量随放养密度增大而增大, 梭子蟹和对虾产量以 PMB₁ 为最高。

表 1 不同养殖系统的产量情况
Tab.1 The yield of different aquaculture systems

海水养殖池塘	产量/(kg/hm ²)		
	三疣梭子蟹	日本囊对虾	缢蛭
PM	735.0	435.0	—
PMB ₁	810.0	495.0	930.0
PMB ₂	765.0	450.0	1 595.0
PMB ₃	720.0	420.0	2 400.0

注: PM 为对照养殖池塘; PMB₁、PMB₂、PMB₃ 分别为不同放养密度的养殖池塘

2.2 沉积物理化特性变化

试验期间, 不同养殖系统底质温度、pH、ORP 及有机物含量变化如图 1 所示。总体而言, 试验期间, 不同养殖系统底质温度均呈先升后降的趋势, 8 月温度

最高, 平均值为(21.33±6.35) °C (图 1a), 差异性分析结果显示, 3 种处理组和对照组之间温度无显著差异。

如图 1b 所示, 试验期间, PM、PMB₁、PMB₂ 和 PMB₃ 底泥 pH 平均值分别为 7.55±0.09、7.58±0.09、

7.56±0.10 和 7.65±0.07。差异性分析结果显示, PMB₃ 底泥 pH 值显著高于其他处理组($P<0.05$), 而 PM、PMB₁、PMB₂ 之间则无显著差异($P>0.05$)。

总体来看, 试验期间不同养殖系统底质氧化还原电位 ORP 均呈先降后升趋势(图 1c), PM、PMB₁、

PMB₂ 和 PMB₃ 中 ORP 平均值分别为(-153.85±25.34)、(-147.15±26.93)、(-141.11±21.68)和(-141.19±17.82) mV。差异性分析结果显示, PMB₂ 和 PMB₃ 氧化还原电位显著高于 PM 和 PMB₁ ($P<0.05$), 而 PMB₂ 和 PMB₃、PM 和 PMB₁ 之间 ORP 则无显著差异($P>0.05$)。

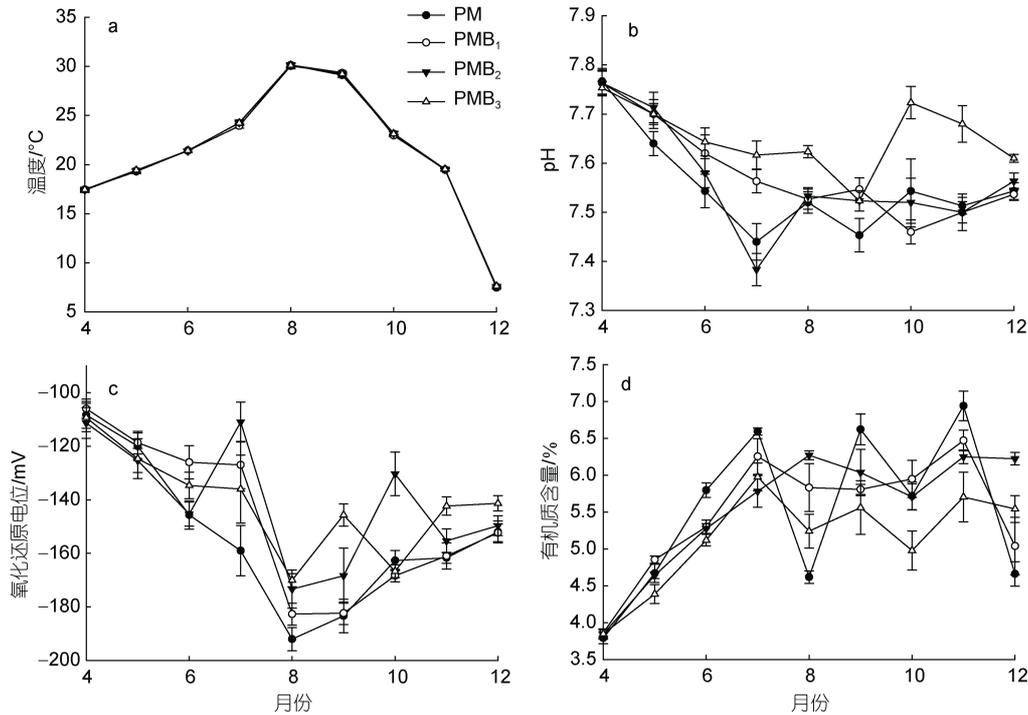


图 1 试验期间各处理沉积物中 4 个理化指标的变化

Fig.1 Variations of four physicochemical indexes in sediment during the experiment

注: a. 温度; b. pH; c. ORP; d. 有机物含量

如图 1d 所示, 试验期间, PM、PMB₁、PMB₂、PMB₃ 有机质含量平均值分别为 5.5%±1.0%、5.5%±0.8%、5.6%±0.8%、5.2%±0.6%。差异性分析结果显示, PMB₃ 有机质含量显著低于其他处理组($P<0.05$), 而 PM、PMB₁、PMB₂ 之间无显著差异($P>0.05$)。

2.3 小型底栖动物的丰度与生物量变化

2.3.1 养殖过程中丰度变化 试验期间, 不同养殖系统底质小型底栖动物的丰度变化如图 2 所示。总体来看, 不同养殖系统主要优势类群均为线虫类(Nematodes), 分别占总丰度的 36.1% (PM)、35.9% (PMB₁)、42.6% (PMB₂)、42.7% (PMB₃); 桡足类(Copepods)和介形类(Ostracoda)次之, 桡足类分别占总丰度的 32.8% (PM)、33.0% (PMB₁)、26.6% (PMB₂)、25.8% (PMB₃), 介形类分别占总丰度的 23.9% (PM)、24.1% (PMB₁)、21.6% (PMB₂)、25.2% (PMB₃); 多毛类(Polychaete)丰度在各养殖系统中占比最小, 分别为 7.2% (PM)、7.0% (PMB₁)、9.2% (PMB₂)、6.3%

(PMB₃)。差异性分析结果显示, 线虫类丰度以 PMB₃ 最大, 为 3.71 ind./cm³, 显著高于其他处理组($P<0.05$); PMB₂ (2.51 ind./cm³)次之, 显著高于 PM 与 PMB₁ ($P<0.05$); 而 PM (1.64 ind./cm³)和 PMB₁ (1.61 ind./cm³) 之间线虫类丰度差异不显著($P>0.05$)。试验期间, PMB₃ 桡足类(2.25 ind./cm³)和介形类(2.19 ind./cm³)丰度显著高于其他处理组($P<0.05$), PM、PMB₁、PMB₂ 之间桡足类和介形类丰度差异不显著($P>0.05$)。

2.3.2 养殖过程中生物量变化 试验期间, 共检获 4 种小型底栖动物主要类群(图 3)。其中, 介形类生物量在不同养殖系统中均最大, 分别占总生物量的 77.9% (PM)、78.2% (PMB₁)、74.2% (PMB₂)、81.1% (PMB₃); 其次为多毛类, 分别为 12.6% (PM)、12.3% (PMB₁)、17.0% (PMB₂)、10.9% (PMB₃); 桡足类和线虫类生物量在各养殖系统中占比均较小。差异性分析结果显示, 试验期间, 介形类生物量在 PMB₃ 中最大, 为 228.00 μg/cm³, 显著高于其他处理组($P<0.05$); PMB₂、

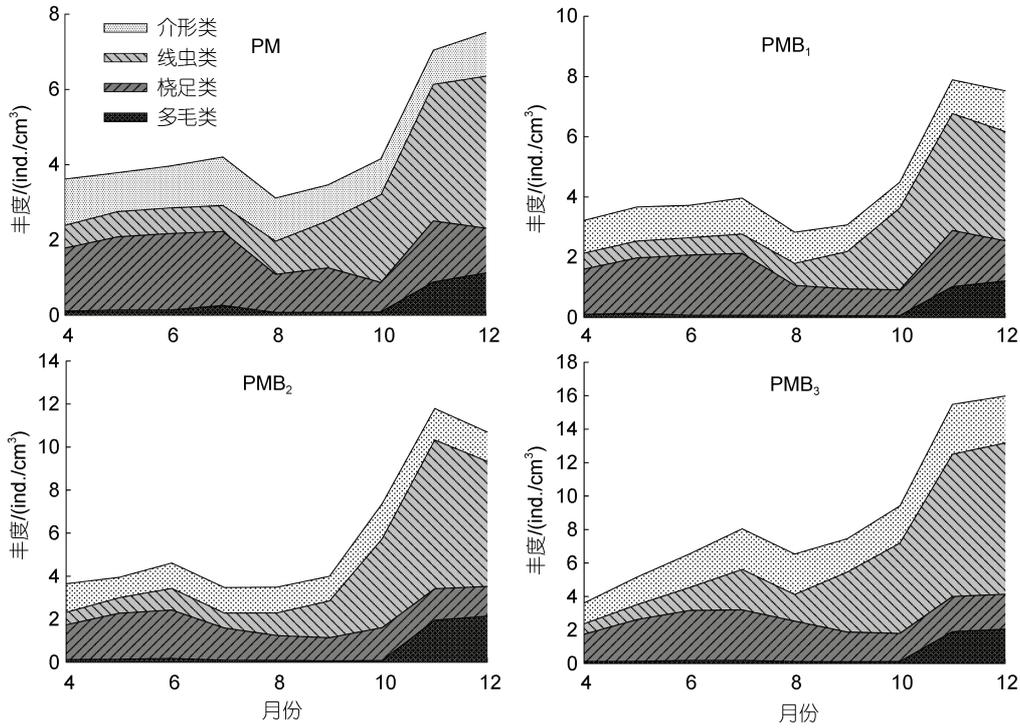


图 2 试验期间小型底栖动物丰度变化

Fig.2 Variations of small benthos abundance during the experiment

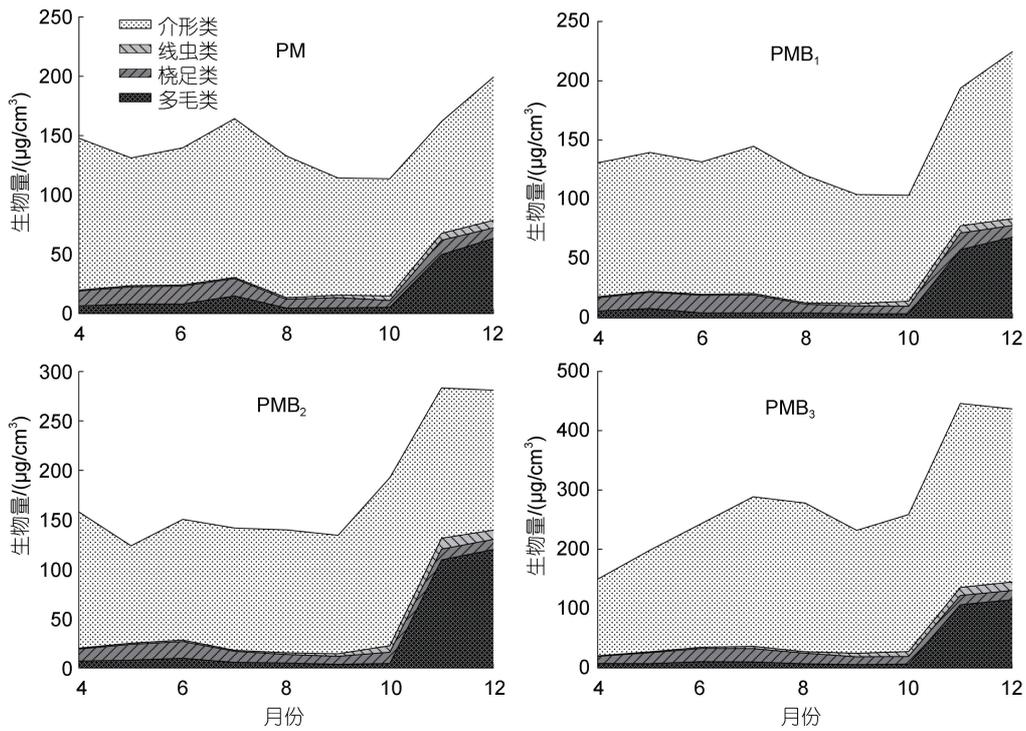


图 3 试验期间小型底栖动物生物量变化

Fig.3 Variations in biomass of meiofauna during the experiment

PMB₁ 和 PM 之间介形类生物量差异不显著($P>0.05$)。试验期间, 多毛类生物量以 PMB₂ ($30.35 \mu\text{g}/\text{cm}^3$)和 PMB₃

($30.52 \mu\text{g}/\text{cm}^3$)为最大, 显著高于 PM ($18.30 \mu\text{g}/\text{cm}^3$)和 PMB₁ ($17.71 \mu\text{g}/\text{cm}^3$) ($P<0.05$), 而 PMB₂ 与 PMB₃, 及

PM 与 PMB₁ 间均无显著差异($P>0.05$)。

2.4 小型底栖动物与理化性质的相关性

小型底栖动物主要类群的丰度与沉积物理化因素的 Pearson 相关系数见表 2。从表可见, 在四个养殖系统中, 多毛类与温度呈显著负相关, 桡足类在 PMB₁ 系统中与氧化还原电位 ORP 呈显著正相关, 介形类在 PMB₁ 与温度呈显著负相关, 在 PMB₃ 与有机质 OM 呈极显著正相关, 其他理化因素和丰度的关系

均未达到显著水平(表 2)。在 PM、PMB₁ 处理中, 温度与总丰度和总生物量均呈显著负相关(表 3)。

3 讨论

3.1 不同系统底质理化性质的变化

在养殖系统中, 养殖动物的粪便、残饵和死亡生物通过厌氧分解产生大量有机酸, 从而降低 pH 值(陈爱华, 2015)。本研究中, 试验期间 PMB₃ 底泥 pH 均值

表 2 4 种小型底栖动物类群的丰度与沉积物理化因素的 Pearson 相关系数

Tab.2 The Pearson correlation coefficient between abundance of four benthic groups and sedimentary physicochemical factors

系统	理化因素	多毛类	桡足类	线虫类	介形类
PM	温度 T	-0.735*	-0.165	-0.578	-0.182
	pH	-0.152	0.192	-0.216	0.210
	氧化还原电位 ORP	-0.152	0.582	-0.204	0.290
	有机质 OM	0.119	0.089	0.207	-0.450
PMB ₁	温度 T	-0.715*	-0.305	-0.494	-0.740*
	pH	-0.305	0.410	-0.632	0.218
	氧化还原电位 ORP	-0.147	0.729*	-0.429	0.439
	有机质 OM	0.111	-0.041	0.362	-0.226
PMB ₂	温度 T	-0.694*	-0.301	-0.482	-0.217
	pH	-0.137	0.447	-0.280	-0.251
	氧化还原电位 ORP	-0.264	0.476	-0.307	0.013
	有机质 OM	0.439	-0.585	0.550	0.263
PMB ₃	温度 T	-0.683*	0.126	-0.490	-0.139
	pH	-0.071	-0.233	-0.152	-0.365
	氧化还原电位 ORP	-0.008	0.062	-0.316	-0.563
	有机质 OM	0.402	0.360	0.539	0.838**
所有系统	温度 T	-0.702*	-0.168	-0.506	-0.368
	pH	-0.194	0.193	-0.382	-0.584
	氧化还原电位 ORP	-0.118	0.587	-0.353	-0.362
	有机质 OM	0.283	-0.073	0.463	0.591

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$

表 3 温度与小型底栖动物总丰度和总生物量的 Pearson 相关系数

Tab.3 The Pearson correlation coefficient of temperature with total abundance and total biomass of small benthos

系统	总丰度	总生物量
PM	-0.738*	-0.758*
PMB ₁	-0.676*	-0.796*
PMB ₂	-0.592	-0.653
PMB ₃	-0.497	-0.411
所有系统	-0.602	-0.630

注: * $P<0.05$; ** $P<0.01$

为 7.65, 显著高于 PM (7.55)、PMB₁ (7.58) 和 PMB₂ (7.56) ($P<0.05$), 而 PM、PMB₁ 和 PMB₂ 之间差异不显

著($P>0.05$)。这可能是因为, 较高混养密度下, 缢蛭较强的滤食作用能大量滤食系统中的残饵、粪便等有机废物, 一定程度上减少了养殖系统中有机物质在底泥中的积累及其分解作用可能产生的 pH 变化, 进而缓解了底泥 pH 的降低。

氧化还原电位 ORP 是沉积物中各种氧化物与还原物发生氧化还原反应的结果, 是检验沉积物状态的一项综合性指标(崔君等, 2018)。本研究中, 试验期间 PMB₃ 底泥氧化还原电位最高, 显著高于对照组和缢蛭低密度混养系统。这表明, 缢蛭较高密度混养能减缓养殖系统底泥氧化还原电位降低的速度。先前有研究表明, 溶解氧是控制氧化还原电位的主要因素

之一,其数值与溶解氧含量的对数呈线性关系(唐晓等,2004)。在养殖系统中,底泥中积累的有机质分解会消耗大量氧气(申玉春等,2010;吴金浩等,2012),造成底泥溶氧不足,导致 ORP 值降低,不利于养殖生物的生长(赵夕旦等,2000;刘爱东等,2021)。而混养较高密度缢蛭后,粪便、残饵和水体中的颗粒有机物等被大量滤食,减缓了有机物在底泥中的积累以及对溶氧的消耗,从而使底质 ORP 值升高。

在规模化贝类养殖区,生物沉降作用十分显著,Hatcher(1994)在加拿大的 Upper South Cove 贻贝养殖区对其生物沉降作用进行了测定,对比邻近非养殖区,发现前者沉降速度是后者的 2 倍多。本研究中,试验期间 PMB₃ 有机质含量最低,显著低于对照组和缢蛭低密度混养系统,表明贝类高密度养殖减少了养殖系统底质有机质积累,这一结果与海区的研究结果相反,推测可能与不同养殖系统的特点有关。在近海贝类养殖区,水体中颗粒有机物是贝类主要的食物来源,吊养的贝类通过滤食和生物沉积作用将水体中的有机物质转移到系统底部,造成有机质沉降加速,这种作用往往大大超过了水体颗粒有机物的自然沉降速度。而在池塘养殖系统中,残饵、粪便及浮游生物等悬浮颗粒有机物是底泥有机质的主要来源,较高的缢蛭混养密度下,贝类会通过滤食作用不断利用这些有机物进行同化作用,使得底泥有机物积累显著减少。

上述分析结果表明,高密度缢蛭混养时,贝类能通过大量滤食养殖环境中残饵等有机物,减少有机物质在底质的积累,使得 pH 值、ORP 值和有机质含量处于较优的状态,底泥环境优于其他处理。

3.2 小型底栖动物丰度和生物量反映底质环境变化

在天然的水生生态系统中,小型底栖动物多在春季繁殖,故多为幼体或低龄个体,而夏秋季基本长大成熟(李永强等,2013;季相星等,2020),因而小型底栖动物在夏秋季丰度、生物量均较高(王航俊等,2020),王昱等(2020)对黑河小型底栖动物群落变化的研究表明,在适宜的生存温度范围内温度升高可加快小型底栖动物的生长。而本研究中,温度与小型底栖动物的丰度和生物量呈显著负相关。这可能是因为黑河是一个天然的水生生态系统,温度等物理因素在小型底栖动物群落结构变化中扮演主导角色;而本研究实验系统为养殖生态系统,温度升高时,虾蟹活动旺盛,摄食强烈,尤其养殖前期对虾会以小型

底栖动物为食,使小型底栖动物的丰度和生物量显著降低。在养殖生态系统中,不同温度下养殖生物生理活动强度对小型底栖动物的影响可能强于温度对小型底栖动物的直接影响。

一般情况下,小型底栖动物丰度和生物量在有机质含量高的沉积物中更高,因为有机质能为小型底栖动物提供大量的食物(任朝亮,2013;杨艳云等,2018)。而本实验中,PMB₃的总丰度和总生物量最高,即缢蛭密度高的混养系统,小型底栖动物的丰度和生物量越高,与先前研究结果相反。这可能是因为,缢蛭密度提高改善了底质的理化性质(本研究中,PMB₃系统 pH 值和 ORP 值最高)。在有机质较为充足的情况下,相对更优的底质理化环境促进了小型底栖动物的生长繁殖,使得小型底栖动物的生物量和丰度增加。这与蔡立哲(2010)对深圳湾小型底栖动物的研究一致,有机质含量与小型底栖动物丰度呈显著负相关,有机质含量越高,底质含氧量越低,含氧量过低可能导致小型底栖动物丰度和生物量降低。

从以上分析可以看出,养殖系统中养殖生物(虾、蟹、贝类)和小型底栖动物在养殖系统中是相互制约、相互促进的有机关系。虾蟹某些生长阶段会摄食小型底栖动物,对其生物量造成影响;贝类能影响底质环境,进而对小型底栖动物生物量及其他养殖生物的生长产生影响(张继红等,2013)。从本试验结果看,在缢蛭放养密度为 34.7×10^4 ind./hm² 的 PMB₃ 系统中,pH、ORP 和小型底栖动物的丰度和生物量高于其他处理组,有较好的环境效益和养殖效益,但要获得最佳的综合效益,仍需结合其他养殖系统优化结果(如系统营养要素收支等)进一步确定。此外,由于实验条件的限制,本实验在生产实践的基础上只设置了 3 个缢蛭密度,实验结果并未表明缢蛭混养密度对综合养殖系统底质环境的影响是否存在拐点。因此,缢蛭密度进一步增加对养殖系统底质环境的影响值得进一步探索。

4 结论

本实验通过对不同养殖系统底泥理化性质和小型底栖动物丰度、生物量的分析比较,结果发现在缢蛭放养密度为 34.7×10^4 ind./hm² 的 PMB₃ 系统中,pH、ORP 和小型底栖动物的丰度和生物量高于其他处理组,有机质含量 OM 低于其他处理组。因此,本实验条件下,基于养殖系统底质环境变化特征,PMB₃ 为最优养殖系统。

参 考 文 献

- 于婷婷, 2014. 黄东海小型底栖动物群落结构和线虫多样性及分布研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 12-13.
- 王昱, 李宝龙, 冯起, 等, 2020. 筑坝截流对黑河上中游大型底栖动物群落结构及物种多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 36(10): 1309-1317.
- 王航俊, 姚炜民, 林义, 等, 2020. 乐清湾大型底栖动物群落及其与环境因子之间的关系[J]. 海洋学报, 42(2): 75-86.
- 申玉春, 陈文霞, 朱春华, 等, 2010. 流沙湾养殖结构优化与生态环境生物修复技术[J]. 水产学报, 34(7): 1051-1061.
- 任朝亮, 2013. 底栖动物扰动对河床渗透性及有机质影响研究[D]. 西安: 西北大学, 35-41.
- 刘爱东, 邵明升, 2021. 不同浓度的 THPS 对刺参养殖底质环境的影响[J]. 中国水产(6): 79-81.
- 李永强, 李捷, 刘会莲, 等, 2013. 海州湾大型底栖动物丰度和生物量的研究[J]. 海洋科学, 37(4): 6-12.
- 李越蜀, 2014. 南美白对虾生态综合养殖池塘底泥细菌群落结构及功能多样性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 3-5.
- 杨艳云, 张继红, 吴文广, 等, 2018. 桑沟湾不同养殖区大型底栖动物的群落结构特征[J]. 水产学报, 42(6): 922-931.
- 吴金浩, 刘桂英, 王年斌, 等, 2012. 辽东湾北部海域表层沉积物氧化还原电位及其主要影响因素[J]. 沉积学报, 30(2): 333-339.
- 张凯, 田相利, 董双林, 等, 2015. 三疣梭子蟹、凡纳滨对虾和菲律宾蛤仔混养系统氮磷收支的研究[J]. 中国海洋大学学报, 45(2): 44-53.
- 张继红, 吴桃, 高亚平, 等, 2013. 5种滤食性贝类对牙鲆的粪便、残饵及网箱养殖区沉降物的摄食行为[J]. 水产学报, 37(5): 727-734.
- 陈爱华, 2015. 河蟹病害预防应从冬季抓起[J]. 渔业致富指南(3): 53.
- 范士亮, 2007. 胶州湾菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)群落底栖生物生产力的现场实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 47-55.
- 季相星, 姚远, 赵颖, 2020. 海州湾南部海域大型底栖动物多样性的研究[J]. 河北渔业(12): 42-47, 51.
- 赵夕旦, 张和森, 宋宇然, 2000. 氧化还原电位的测定及在水族中的应用[J]. 北京水产(6): 44-45.
- 赵亚波, 林志华, 何京, 等, 2018. 虾贝综合养殖池塘纤毛虫群落结构及与环境因子的关系[J]. 生物学杂志, 35(2): 43-47, 59.
- 姜磊, 孙玉忠, 王雪梅, 等, 2009. 海水池塘虾、蟹、贝混养适宜放养密度的初步研究[J]. 齐鲁渔业, 26(5): 18-21.
- 唐晓, 王佳, 2004. 海水 ORP 的影响因素[J]. 装备环境工程, 1(1): 37-39.
- 崔君, 高勤峰, 董双林, 2018. 不同组分底质改良剂对刺参生长和底质环境的影响[J]. 海洋湖沼通报(4): 133-139.
- 蔡立哲, 2010. 湿地底栖动物资源保护研究——以深圳湾为例[J]. 泉州师范学院学报, 28(6): 1-4.
- HATCHER A, 1994. Nitrogen and phosphorus turnover in some benthic marine invertebrates: implications for the use of C:N ratios to assess food quality [J]. Marine Biology, 121(1): 161-166.
- HOLME N A, MCINTYRE A D, 1984. Methods for the Study of Marine Benthos [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 387.
- MANJU M N, RESMI P, RATHEESH KUMAR C S, et al, 2016. Biochemical and stable carbon isotope records of mangrove derived organic matter in the sediment cores [J]. Environmental Earth Sciences, 75(7): 565.
- NICHOLAUS R, LUKWAMBE B, YANG W, et al, 2020. In situ assemblies of bacteria and nutrient dynamics in response to an ecosystem engineer, marine clam *Scapharca subcrenata*, in the sediment of an aquaculture bioremediation system [J]. Journal of Ocean University of China, 19(6): 1447-1460.
- ZHANG K, TIAN X L, DONG S L, et al, 2016. An experimental study on the budget of organic carbon in polyculture systems of swimming crab with white shrimp and short-necked clam [J]. Aquaculture, 451: 58-64.

EFFECTS OF *SINONOVACULA CONSTRICTA* POLYCULTURE ON SEDIMENTARY ENVIRONMENT IN THE INTEGRATED CULTURE SYSTEM OF *PORTUNUS TRITUBERCULATUS* AND *MARSUPENAEUS JAPONICUS*

CHAI Xin-Ru¹, XU Wen-Jun², ZHANG Dong-Xu², HE Jie², LIU Hui-Ling¹

(1. School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Zhejiang Province Key Laboratory of Mariculture and Enhancement, Zhejiang Marine Fisheries Research Institute, Zhoushan 316021, China)

Abstract To optimize the integrated aquaculture system from the perspective of sedimentary environment of aquaculture system, four experimental aquaculture systems were established, i.e., polyculture systems of *Portunus trituberculatus* and *Marsupenaeus japonicus* in three stocking densities (low, middle, and high) of *Sinonovacula constricta* (PMB₁, PMB₂, and PMB₃, respectively), and polyculture system of *P. trituberculatus* and *M. japonicus* (PM). By comparing and analyzing the physical and chemical properties of sediment, the abundance and biomass of small benthos in different aquaculture systems and the effects of stocking densities of *S. constricta* on the sedimentary environment of aquaculture systems were determined. Results show that, in general, the pH and redox potential of sediment in the high-density system (PMB₃) were significantly higher than those in other systems, while the content of organic matter in sediment in PMB₃ was significantly lower than those in other systems. As the composition of benthic community shows, nematodes are dominant in abundance, accounting for 35.9%~42.7% in different systems, and Ostracods accounted for 74.2%~81.1% of the total biomass in different systems. The total abundance and biomass in PMB₃ were significantly higher than those of other systems. At higher culture density, *S. constricta* could reduce the accumulation of organic matter in sediment by filtering the residuals and feces, and thus may improve the sedimentary environment and increase the abundance and biomass of small benthos. Based on the characteristics of sedimentary environment in different systems, the optimal stocking density of *S. constricta* was 34.7×10^4 ind./hm² under the present experimental condition.

Key words *Sinonovacula constricta*; physical and chemical properties; small benthos; abundance; biomass