

在淡水鱼类混养系统中吊养三角帆蚌 对养殖产量和水质的影响

唐金玉, 王 岩*, 戴杨鑫

(浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 通过 78 d 围隔养殖实验检验了在草鱼、鲫、鲢、鳙混养系统中吊养三角帆蚌对鱼产量和水质的影响。设 2 个处理, 处理 I 混养草鱼、鲫、鲢和鳙, 处理 II 在处理 I 基础上按鱼:蚌 = 1:1 的比例配养三角帆蚌。实验期间定期采样分析浮游植物种类组成和生物量、初级生产力(P)、群落呼吸(R)、溶氧(DO)、pH、透明度(SD)、主要离子(CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})、总碱度、总硬度、氨态氮、亚硝酸态氮、硝酸态氮、活性磷、总氮(TN)、总磷(TP)、总有机碳(TOC)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})和生化耗氧量(BOD_5)。结果发现, 吊养三角帆蚌显著降低水体中 Ca^{2+} 浓度, 但对其他指标均无显著影响。处理 II 草鱼、鲫、鲢产量略高于处理 I, 而鳙产量略低于后者, 表明在草鱼、鲫、鲢、鳙混养系统中按 1:1 的比例配养三角帆蚌不会导致草鱼和鲫产量下降, 但导致鳙产量降低。处理 II 浮游植物多样性(Shannon-Weaver 多样性指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数和种类数)、P、P/R、SD 和 DO 略高于处理 I, 而氨态氮、活性磷、TN、TP、 COD_{Mn} 、 BOD_5 和 TOC 略低于后者, 表明在混养系统中配养三角帆蚌可显著降低养殖水体 Ca^{2+} 浓度, 同时可在一定程度上提高浮游植物多样性、P 和 DO 并降低 TN、TP、 COD_{Mn} 、 BOD_5 和 TOC。结果表明, 在淡水鱼类混养系统中适度配养三角帆蚌可提高养殖的经济效益, 同时有助于降低养殖系统内氮、磷和有机废物的积累。

关键词: 鱼类混养; 三角帆蚌; 养殖产量; 浮游植物; 水化学

中图分类号: S 964

文献标志码: A

水产养殖过程中人工输入的营养物质, 如氮、磷的利用效率较低, 因此导致养殖废物在养殖系统中积累。降低养殖废物积累和排放是水产养殖业可持续发展必须解决的问题。通过养殖模式优化可提高水产养殖资源利用效率, 降低养殖污染^[1]。尽管国内外围绕水产养殖模式优化进行了大量有益的探索^[1-5], 但在已有的文献中, 对水产养殖资源利用效率和养殖污染的定量评价尚不多见。池塘养殖是淡水鱼类主要的养殖生产方式。我国淡水鱼类池塘养殖历史悠久, 如综合养殖(integrated culture)或混养(polyculture)等^[6-7]可用于优化养殖模式。然而, 迄今对综合养殖或混养的生态学原理尚不清楚, 通过系统的科学研

究所建立的淡水池塘混养或综合养殖模式尚未见报道。

三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)是培育淡水珍珠的重要经济贝类, 在我国被广为养殖^[8]。在传统的三角帆蚌养殖池塘中, 通常搭配养殖草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、鲫(*Carassius auratus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)等淡水鱼类, 鱼蚌比通常为 1:7 ~ 1:10^[9-10]。研究表明, 配养鱼类有利于三角帆蚌的生长^[8,10-11], 通过优化混养鱼类种类组成和鱼蚌比可提高珍珠产量、鱼产量以及输入氮、磷的利用效率并降低养殖过程中氮、磷废物产量。然而, 在鱼类混养系统中配养三角帆蚌对鱼产量

收稿日期:2013-11-09 修回日期:2013-12-08

资助项目:国家自然科学基金项目(31072227);公益性行业(农业)科研专项(200903028);浙江省淡水养殖重点科技创新团队

通信作者:王 岩, E-mail: ywang@zju.edu.cn

的影响有待检验。吴军等^[12]报道在养鱼池中配养三角帆蚌可改善养殖水体水质,但未进一步评价养蚌对鱼类生长和养殖产量的影响。因此,三角帆蚌与鱼类综合养殖中二者究竟互利还是偏利尚有待明确。本研究检验了在淡水鱼类混养系统中配养三角帆蚌对鱼产量、浮游植物和水化学的影响,目的是为优化淡水池塘养殖模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 三角帆蚌、鱼类及实验围隔

实验于2011年5月30日—8月16日在浙江省诸暨市枫桥实验基地(29°47'60"N,120°23'42"E)进行。所用三角帆蚌分别于2009年4月(简称为3龄蚌)或2010年5月(简称为2龄蚌)购自浙江省龙游市一养蚌场,其中3龄蚌在2010年5月实施了无核珠插片手术。所用草鱼、鲫、鲢和鳙于2011年4月购自浙江省德清市一鱼苗场。实验前,三角帆蚌吊养在枫桥实验基地的一口土池中,鱼种暂养在同一口池塘内的网箱中。暂养期间,每天向网箱内投喂浙江科盛饲料公司生产的混养鱼类配合饲料(编号8006),饲料粗蛋白含量为28%。

利用陆基围隔进行养殖实验。围隔建在一面积为1.33 hm²的土池中。每个围隔由一张长10 m、宽1.7 m、厚5 mm的聚乙烯板围成圆筒(直径1.59 m,面积为8 m²),圆筒接口处用不锈钢螺丝固定。聚乙烯板圆筒下部被埋入池塘底泥中(深20 cm),内部由两条毛竹片围成的框架支撑,内、外两侧用木桩固定。每个围隔底部埋一条直径为20 cm的PVC管道用来进水和排水。

1.2 实验设计与养殖实验

设2种放养模式,处理I混养草鱼、鲫、鲢和鳙,处理II在处理I基础上按鱼:蚌=1:1的比例配养三角帆蚌。每个处理设3个重复,共用6个围隔。实验前,打开围隔进、排水管道,利用水泵向围隔内抽水,使围隔内的水与池塘进行充分交换以保证实验开始时围隔之间水质条件一致。将三角帆蚌放入直径为40 cm的网笼(每个网笼内放4个3龄蚌和1个2龄蚌),吊养在围隔中间水面下40 cm处。将草鱼和鲫放养在围隔内的网箱(1.0 m×1 m×1.5 m)中,将鲢和鳙散养在围隔内。处理I的每个围隔内草鱼、鲫、鲢、鳙放养量

分别为10、5、4、1尾。处理II的每个围隔草鱼、鲫、鲢、鳙放养量同处理I,另外放入20只三角帆蚌(3龄蚌16只,2龄蚌4只)。草鱼、鲫、鲢、鳙的平均初始体质量分别为23.8、41.5、59.0和98.2 g/尾;3龄蚌和2龄蚌的平均初始体质量分别为189.0和63.9 g/只。

实验时间为78 d,期间每天8:00和17:00向围隔内的网箱中投喂科盛8006配合饲料。每个围隔内施2 140 g鸭粪调节水色和透明度。围隔不换水,每个网箱内安放一个增氧泵气头,每晚开动增氧泵12 h以保证网箱内的草鱼和鲫不缺氧。实验结束时,将网箱内的草鱼和鲫捕出称重,利用电子捕鱼器将围隔内的鲢、鳙捕出并称重。取出网笼内的三角帆蚌称重,解剖3龄蚌测量珍珠粒数和重量。

1.3 浮游植物和水化学分析

实验期间,每隔3天分别在早(6:00~8:00)、晚(16:00~18:00)用YSI 85溶氧仪(YSI Scientific Instrument, Yellow Springs, Ohio, USA)和YSI 60 pH计测定围隔内水温、溶氧(DO)和pH,取2次测定的平均值为当日测定值。用塞氏盘在6:00~8:00测定透明度(SD)。每2周用5 L采水器在围隔一侧固定采样点水面下50 cm处采水样。水样灌入1 L玻璃样品瓶中(用于水化学分析)和1 L广口玻璃瓶中(用于浮游植物分析)。浮游植物水样现场用鲁哥氏固定液固定。水化学水样保存在4℃下,并在采样后3 d内完成分析。水化学分析指标包括:碳酸根离子(CO₃²⁻)、重碳酸根离子(HCO₃⁻)、氯离子(Cl⁻)、硫酸根离子(SO₄²⁻)、钙离子(Ca²⁺)、镁离子(Mg²⁺)、钠钾离子(Na⁺+K⁺)、总碱度(Alk)、总硬度(HT)、氨态氮(TAN,包括NH₄⁺-N和NH₃-N)、亚硝酸态氮(NO₂-N)、硝酸态氮(NO₃-N)、活性磷(PO₄-P)、总氮(TN)、总磷(TP)、有机碳(TOC)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、生化耗氧量(BOD₅)。其中,TAN、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、TN、TP、TOC、COD_{Mn}和BOD₅每2周测定1次;CO₃²⁻、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺+K⁺、Alk和HT每4周测定1次。浮游植物分析指标包括:叶绿素a(Chl. a)、浮游植物种类和生物量。其中,Chl. a每2周测定1次;浮游植物种类及生物量每4周测定1次。TAN、NO₂-N、PO₄-P、HCO₃⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Alk、HT

和 COD_{Mn} 根据文献 [13-14] 的方法测定; NO_3-N 采用铜-镉柱还原法测定^[15]; TN 和 TP 根据 Ebina 的方法测定^[16]。TOC 用 Multi N/C 3100 TOC 分析仪 (Analytik Jena AG, Germany) 测定; Chl. *a* 用 Turner10-005 型荧光计测定, 根据荧光计读数和 Chl. *a* 浓度-荧光值 (X) 回归方程: $Chl. a (\mu g/L) = 115.8 X - 4.418$ 计算 Chl. *a* 浓度。浮游植物种类鉴定和定量根据文献^[17] 进行。

每 2 周用黑白瓶法^[14] 测定浮游植物初级生产力和群落呼吸。所用黑、白瓶的容积为 250 mL。在早上 6:00~8:00 挂瓶, 挂瓶深度分别为水表面、1/2 透明度及透明度, 挂瓶时间为 24 h。利用 YSI 58 溶氧仪 (YSI Scientific Instrument, Yellow Springs, Ohio, USA, 配 YSI 5905 BOD 探头) 测定初始 DO 以及挂瓶结束时黑、白瓶内的 DO。根据初始 DO 以及挂瓶结束时黑、白瓶内的 DO 分别计算初级生产力 (P)、群落呼吸 (R) 和 P/R。

1.4 数据计算与统计分析

根据下列公式计算鱼、蚌产量 (W)、珍珠产量 (PW) 和饲料系数 (FCR):

$$W(g) = \text{收获鱼、蚌重量} - \text{鱼、蚌放养重量} \quad (1)$$

$$PW(g) = \text{每个插珠蚌中珍珠平均重量} \times \text{围隔中存活插珠蚌数量} \quad (2)$$

$$FCR = \text{投喂饲料量} / (\text{鱼收获重量} - \text{鱼放养重量}) \quad (3)$$

根据下列公式计算浮游植物 Shannon-

Weaver 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 及 Pielou 均匀度指数 (J)^[18-20]:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (4)$$

$$D = (S - 1) / \log_2 N \quad (5)$$

$$J = H' / H_{\max} \quad (6)$$

式中, S 为样品中浮游植物种数, P_i 为第 i 个种的个体数与样品中的个体总数的比值, N 为样品中个体总数, $H_{\max} = \log_2 S$ 。

根据下列公式计算 $Na^+ + K^+$ 浓度^[14]:

$$\rho_{Na^+ + K^+} (mg/L) = (1/2 \times \rho_{CO_3^{2-}} + \rho_{HCO_3^-} + 1/2 \times \rho_{SO_4^{2-}} + \rho_{Cl^-} - 1/2 \times \rho_{Ca^{2+}} - 1/2 \times \rho_{Mg^{2+}}) \times 25 \quad (7)$$

式中, $\rho_{CO_3^{2-}}$ 、 $\rho_{HCO_3^-}$ 、 $\rho_{SO_4^{2-}}$ 、 ρ_{Cl^-} 、 $\rho_{Ca^{2+}}$ 、 $\rho_{Mg^{2+}}$ 的单位为 mmol/L, $\rho_{Na^+ + K^+}$ 的当量取 2 者的平均值 25。

用 t 检验分析处理 I 和 II 之间养殖产量、FCR、浮游植物多样性指数和生物量、P、R 和水化学指标上的差异, 取 $P < 0.05$ 为差异显著性水平。利用 SPSS 19.0 (IBM® SPSS® Statistics) 软件进行统计分析。

2 结果

2.1 鱼、蚌产量和珍珠产量

处理 II 的围隔内草鱼、鲫鱼和鲢产量平均值略高于处理 I, 但二者间差异不显著 ($P > 0.05$)。处理 I 和 II 之间 FCR 无显著差异 ($P > 0.05$) (表 1)。

表 1 鱼、蚌、珍珠产量及饲料系数 (FCR)

Tab. 1 Yield of fishes and mussel, pearl yield and feed conversion ratio in the enclosures

处理 treatment	鱼产量/(g/围隔) fish yield			蚌产量/(g/围隔) mussel yield		珍珠产量/ (g/围隔) pearl yield	饲料系数 FCR
	草、鲫 grass carp and gibel carp	鲢 silver carp	鳙 bighead carp	3 龄蚌 grafted mussel	2 龄蚌 non-grafted mussel		
I	652 ± 75	282 ± 324	167 ± 12				3.38 ± 0.89
II	687 ± 99	411 ± 265	75 ± 21	223 ± 95	87 ± 52	14.48 ± 4.77	3.46 ± 0.11

注: I: 放养草鱼、鲫鱼、鲢和鳙; II: 放养草鱼、鲫鱼、鲢、鳙和三角帆蚌。数据为平均值 ± 标准差 ($n = 3$)

Notes: I: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp; II: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp + *H. cumingii*. Data are expressed as mean ± SD ($n = 3$)

2.2 浮游植物群落结构和功能

实验期间共检出浮游植物 64 种, 隶属于 7 门 24 科 56 属 (表 2)。实验前期, 围隔中浮游植物优势种为平裂藻 (*Merismopedia* sp.) 和微囊藻 (*Microcystis* sp.), 后期处理 I 围隔内转为腔球藻

(*Goelosphaerium* sp.), 处理 II 围隔内转为平裂藻。处理 II 的围隔内出现的浮游植物种数多于处理 I, H' 、 D 和 J 也略高于处理 I, 但二者间无显著差异 ($P > 0.05$, 表 3)。

表 2 实验期间围隔内出现的浮游植物种类
 Tab. 2 Species of phytoplankton observed in the enclosures during the experiment

门 phylum	种类 species	处理 I treatment I	处理 II treatment II
蓝藻 (Cyanophyta)	平裂藻 (<i>Merismopedia</i> sp.)	+ *	+ *
	色球藻 (<i>Chroococcus</i> sp.)	+	+
	隐球藻 (<i>Aphanocapsa</i> sp.)	+	+
	微囊藻 (<i>Microcystis</i> sp.)	+ *	+ *
	鱼腥藻 (<i>Anabaena</i> sp.)	+	-
	腔球藻 (<i>Goelosphaerium</i> sp.)	+ *	+ *
	蓝纤维藻 (<i>Dactylococcopsis</i> sp.)	+	-
	尖头藻 (<i>Raphidiopsis</i> sp.)	+	-
	念珠藻 (<i>Nostoc</i> sp.)	+	+ *
	鞘丝藻 (<i>Lyngbya</i> sp.)	+	+
	螺旋藻 (<i>Spirulina</i> sp.)	-	+
	颤藻 (<i>Oscillatoria</i> sp.)	-	+
	绿藻 (Chlorophyta)	翼膜藻 (<i>Pteromonas</i> sp.)	+
衣藻 (<i>Chamydomonas</i> sp.)		-	+
空球藻 (<i>Eudorina</i> sp.)		+	+
实球藻 (<i>Pandorina morum</i>)		-	+
空星藻 (<i>Coelastrum</i> sp.)		+	+
弓形藻 (<i>Schroederia</i> sp.)		+	+
螺旋弓形藻 (<i>Schroederia spiralis</i>)		+	-
被刺藻 (<i>Franceia ovalis</i>)		+	-
四角藻 (<i>Tetraedron</i> sp.)		+	+
小球藻 (<i>Chlorella</i> sp.)		-	+
月牙藻 (<i>Selenastrum</i> sp.)		+	+
蹄形藻 (<i>Kirchneriella</i> sp.)		+	+
拟新月藻 (<i>Closteriopsis</i> sp.)		+	+
四刺藻 (<i>Treubaria triappendiculata</i>)		+	-
肾形藻 (<i>Nephrocytium</i> sp.)		+	-
并联藻 (<i>Quadrigula chodatii</i>)		-	+
集星藻 (<i>Sorastrum hantzschii</i>)		+	+
单角盘星藻具孔变种 (<i>Pediastrum simplex</i> var.)		+	-
二角盘星藻 (<i>Pediastrum duplex</i>)		+	-
四角盘星藻 (<i>Pediastrum tetras</i>)		+	+
整齐角盘星藻 (<i>Pediastrum integrum</i>)		+	-
纤维藻 (<i>Ankistrodesmus</i> sp.)		+	+
微茫藻 (<i>Micractinium</i> sp.)		-	+
十字藻 (<i>Crucigenia apiculata</i>)		+	+
四足十字藻 (<i>Crucigenia tetrapedia</i>)		-	+
四角十字藻 (<i>Crucigenia quadrata</i>)		+ *	+ *
二形栅藻 (<i>Scenedesmus dimorphus</i>)		+ *	+ *
四尾栅藻 (<i>Scenedesmus quadricauda</i>)		+ *	+ *
栅藻 (<i>Scenedesmus</i> sp.)		+	-
拟韦斯藻 (<i>Westella linearis</i>)		+	-
转板藻 (<i>Mougeotia</i> sp.)		-	+
四星藻 (<i>Tetrastrum</i> sp.)		+	-
鼓藻 (<i>Cosmarium</i> sp.)		+	-
月形双形藻 (<i>Dimorphococcus lanatus</i>)		+	-
角星鼓藻 (<i>Staurastrum</i> sp.)		-	+
锥刺四棘鼓藻 (<i>Arthrodesmus subulatus</i>)		-	+
双胞胎藻 (<i>Geminella</i> sp.)	-	+	
四月藻 (<i>Tetrallantos lagerheimii</i>)	+	+	

续表 2

门 phylum	种类 species	处理 I treatment I	处理 II treatment II
裸藻 (Euglenophyta)	血红裸藻 (<i>Euglena sanguinea</i>)	+	+
	囊裸藻 (<i>Trachelomonas</i> sp.)	+	+
	卵形鳞孔藻 (<i>Lepocinclis ovum</i>)	+	+
	扁裸藻 (<i>Phacus</i> sp.)	+	+
	陀螺藻 (<i>Strombomonas</i> sp.)	-	+
隐藻 (Cryptophyta)	隐藻 (<i>Cryptomonas</i> sp.)	+	+
	蓝隐藻 (<i>Chroomonas</i> sp.)	+	+
黄藻 (Xanthophyta)	黄丝藻 (<i>Heterotrichales</i> sp.)	+	-
硅藻 (Bacillariophyta)	小环藻 (<i>Cyclotella</i> sp.)	-	+
	舟形藻 (<i>Navicula</i> sp.)	-	+
	针杆藻 (<i>Synedra</i> sp.)	-	+
	桥弯藻 (<i>Cymbella</i> sp.)	+	+
甲藻 (Pyrrophyta)	裸甲藻 (<i>Gymnodinium aeruginosum</i>)	+	-
	薄甲藻 (<i>Glenodinium</i> sp.)	+	+

注：“+”：出现；“-”：未出现；“*”：优势种类

Notes：“+” represents the species appearing in the water;“-” represents not found in the water;“*” represents the dominant species

表 3 浮游植物群落多样性指数

Tab. 3 Diversity of phytoplankton in the enclosures

处理 treatment	多样性指数 (H') Shannon-Weaver's index (bit)	丰富度指数 (D) Margalef's index	均匀度指数 (J) Pielou's index	种数 species no.
I	0.96 ± 0.68	0.55 ± 0.35	0.23 ± 0.13	17 ± 10
II	1.64 ± 0.56	0.75 ± 0.20	0.36 ± 0.11	23 ± 6

注：数据表示为平均值 ± 标准差 ($n=2$)

Notes: Data are expressed as mean ± SD ($n=2$)

实验期间围隔内 Chl. *a* 含量随养殖时间延长呈上升的趋势,多数时间处理 II 的围隔内 Chl. *a* 平均值略高于处理 I,但 *t* 检验结果表明二者无显著差异 ($P > 0.05$) (图 1)。实验期间,处理 I 和 II 的围隔内浮游植物平均生物量分别为 5.4×10^8 和 4.4×10^8 个/L,二者间无显著差异 ($P > 0.05$)。处理 I 和 II 的围隔内蓝藻占浮游植物生物量的比例分别为 91.5% 和 85.2% (变化范围为

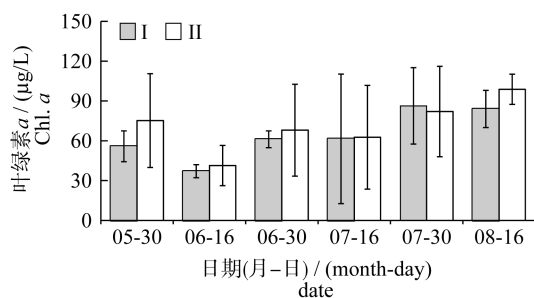


图 1 实验期间围隔内叶绿素含量的变化

Fig. 1 Variation in Chl. *a* in the enclosures during the experiment

69.6%~98.9%),绿藻占浮游植物生物量的比例分别为 7.8% 和 13.6% (变化范围为 0.6%~28.8%)。

实验期间处理 I 的围隔内 P 和 R 平均值均略高于处理 II,但 *t* 检验结果表明二者间无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。处理 I 和 II 的围隔内 P/R 均大于 1,二者间无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 4 实验期间围隔内初级生产力和群落呼吸 [$\text{mg O}_2/(\text{L} \cdot \text{d})$]

Tab. 4 Primary productivity and community respiration in the enclosures during the experiment

处理 treatment	初级生产力 primary productivity (P)	群落呼吸 community respiration (R)	P/R
I	7.46 ± 1.27	4.99 ± 0.67	1.57 ± 0.21
II	8.15 ± 1.30	5.59 ± 1.10	1.65 ± 0.25

注：数据表示为平均值 ± 标准差 ($n=3$),下同

Notes: P/R means ratios of primary productivity to community respiration. Data are expressed as mean ± SD ($n=3$). The same as the following

2.3 水温、SD 和水化学指标

实验期间,围隔内水温变化范围为 23.4 ~ 33.5 °C,平均水温为 28.5 °C(表 5)。与处理 I 相比,处理 II 的围隔内 DO 和 SD(表 5)平均值略高,Alk、HT、TAN、PO₄-P、TN、TP、COD_{Mn}、BOD₅ 和 TOC(表 6、表 7 和表 8)平均值略低。*t* 检验结果表明处理 II 围隔内 Ca²⁺ 显著低于处理 I ($P < 0.05$, 表 6),但二者之间 SD、DO、pH、CO₃²⁻、

HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Mg²⁺、Na⁺ + K⁺、Alk、HT、TAN、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、TN、TP、TN/TP、COD_{Mn}、BOD₅、TOC 和 C/N 等均无显著差异(表 5、表 6、表 7 和表 8, $P > 0.05$)。实验结束时,处理 I 的围隔内 TN、TP、COD_{Mn}、BOD₅ 和 TOC 平均值略高于处理 II,但二者间差异不显著($P > 0.05$, 图 2)。

表 5 实验期间围隔内水温、SD、DO 和 pH

Tab. 5 Water temperature, sechii depth, dissolved oxygen and pH in the enclosures during the experiment

处理 treatment	水温/°C water temperature	SD/cm sechii depth	DO/(mg/L) dissolved oxygen	pH
I	28.4 ± 0.0	30 ± 5	6.22 ± 0.47	7.74 ± 0.15
II	28.5 ± 0.1	34 ± 11	6.90 ± 0.34	7.76 ± 0.11

表 6 实验围隔内主要离子浓度、总碱度和总硬度

Tab. 6 Concentrations of the main ions, total alkalinity and total hardness in the enclosures during the experiment

处理 treatment	HCO ₃ ⁻ / (mg/L)	CO ₃ ²⁻ / (mg/L)	Cl ⁻ / (mg/L)	SO ₄ ²⁻ / (mg/L)	Ca ²⁺ / (mg/L)	Mg ²⁺ / (mg/L)	Na ⁺ + K ⁺ / (mg/L)	Alk/ (mg CaCO ₃ /L)	HT/ (mg CaCO ₃ /L)
I	73.65 ± 4.59	-	5.13 ± 1.58	4.22 ± 0.39	14.27 ± 0.60	4.04 ± 0.69	23.67 ± 1.56	60.43 ± 3.76	52.55 ± 1.91
II	66.60 ± 7.52	-	6.31 ± 0.11	5.13 ± 0.56	12.14 ± 1.06	3.09 ± 0.15	23.36 ± 2.23	54.65 ± 6.17	46.93 ± 7.94

注: - 表示未检测到

Notes: - represents not found according to our analyzed method

表 7 实验围隔内氮和磷含量

Tab. 7 Concentrations of nitrogen and phosphorus in the enclosures during the experiment

处理 treatment	TAN/ (mg/L)	NO ₂ -N/ (mg/L)	NO ₃ -N/ (mg/L)	PO ₄ -P/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	TN/TP
I	0.737 ± 0.175	0.014 ± 0.001	0.087 ± 0.024	0.673 ± 0.271	3.572 ± 0.167	1.305 ± 0.154	6.13 ± 0.61
II	0.711 ± 0.207	0.019 ± 0.011	0.117 ± 0.052	0.330 ± 0.208	3.144 ± 0.626	0.741 ± 0.428	9.83 ± 4.84

表 8 实验期间围隔内有机质含量

Tab. 8 Concentrations of organic matters in the enclosures during the experiment

处理 treatment	COD _{Mn} / (mg/L)	BOD ₅ / (mg/L)	TOC/ (mg/L)	C/N
I	16.85 ± 1.59	18.93 ± 3.36	43.99 ± 19.28	10.54 ± 2.71
II	14.39 ± 3.93	17.46 ± 5.38	28.57 ± 11.85	11.42 ± 4.80

注: COD_{Mn} 表示化学需氧量; BOD₅ 表示生物耗氧量; TOC 表示总有机碳; C/N 表示碳氮比。数据表示为平均值 ± 标准差 ($n = 3$)

Notes: COD_{Mn} represents chemical oxygen demand; BOD₅ represents biological oxygen demand; TOC represents total organic carbon; C/N represents ratios between carbon and nitrogen. Data are expressed as mean ± SD ($n = 3$)

3 讨论

放养种类组成和数量搭配可影响池塘综合养殖或混养产量和营养物质的利用效率^[8,11]。本研究结果表明,在草鱼、鲫、鲢和鳙混养系统内配养一定数量的三角帆蚌,不会导致主养鱼类(草鱼和鲫)的产量下降,同时可额外获得珍珠产量。

配养三角帆蚌的围隔内鲢产量略高于未配养三角帆蚌的围隔,而鳙产量略低于后者,初步分析养蚌对鳙生长不利。三角帆蚌、鲢、鳙均为滤食性动物,其中三角帆蚌可滤食 2.5 ~ 60 μm 的颗粒^[21],鲢可滤食 10 ~ 100 μm 的颗粒^[22],鳙可滤食 17 ~ 3 000 μm 的颗粒^[23]。养殖三角帆蚌可导致浮游植物小型化或直接降低浮游动物生物量^[24],从而

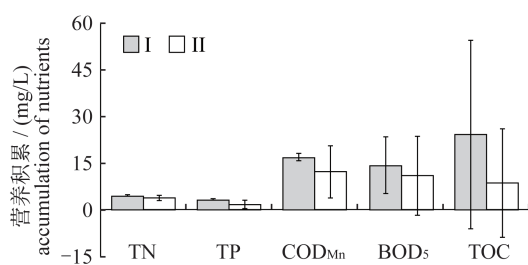


图2 实验期间围隔内 TN、TP、COD_{Mn}、BOD₅和 TOC 积累

Fig. 2 Accumulation in total nitrogen, total phosphorus, chemical oxygen demand, biological oxygen demand and total organic carbon in the enclosures during the experiment

使鳙食物资源缺乏。因此,在鱼蚌综合养殖中鳙放养量不宜过高。鉴于养殖淡水珍珠的收益高于养殖鳙,因此在草鱼、鲫、鲢、鳙混养系统中配养三角帆蚌可提高养殖经济效益。本实验中,配养三角帆蚌的围隔 FCR 略高于未配养三角帆蚌的围隔,这与配养三角帆蚌导致鳙产量下降 (FCR 计算只考虑鱼产量) 有关。

Mueller 等^[22]报道在滤食者的捕食压力下浮游植物呈现小型化的趋势。本实验中,配养三角帆蚌的围隔内浮游植物生物量略低于未配养三角帆蚌的围隔,但 Chl. *a* 含量略高于后者,这一现象与放养三角帆蚌导致浮游植物小型化有关(同样生物量下小型浮游植物 Chl. *a* 含量通常高于大型浮游植物)。朱生博等^[24]报道养殖三角帆蚌的围隔内浮游植物优势种为蓝藻。本实验中,配养三角帆蚌的围隔内浮游植物多样性指数和初级生产力均略高于未配养三角帆蚌的围隔,表明配养三角帆蚌可改善鱼类混养水体浮游植物群落结构和功能。实验开始时围隔内浮游植物优势种为平裂藻和微囊藻,后期配养三角帆蚌的围隔内转为平裂藻,未配养三角帆蚌的围隔内转为腔球藻。这表明无论配养三角帆蚌与否围隔内浮游植物优势种始终为蓝藻,意味着水体理化环境(水温、水动力状态和营养盐含量)是决定浮游植物优势种的主要因素,而放养种类仅能在一定程度上影响浮游植物群落结构和功能。

贝类可通过滤食水体中浮游植物、有机碎屑等悬浮颗粒^[25]增加水体透明度。本实验中,配养三角帆蚌的围隔内透明度略高于未配养三角帆蚌的围隔,证实了配养三角帆蚌可提高鱼类混养系

统的透明度。Miranda 等^[26]报道在罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*) 养殖水体中混养太平洋牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 未导致 DO 下降。本实验中,配养三角帆蚌的围隔内 DO 略高于未配养三角帆蚌的围隔,表明在鱼类混养系统中额外增加三角帆蚌不会使 DO 下降,这与三角帆蚌摄食提高了初级生产力有关,也与三角帆蚌耗氧率较低有关^[27]。

本实验中,配养三角帆蚌的围隔内 Ca²⁺ 浓度显著低于未配养三角帆蚌的围隔,这一结果与早期的有关养殖三角帆蚌可导致水体 Ca²⁺ 浓度下降的研究结论一致^[28]。由于三角帆蚌贝壳生物矿化需要吸收钙,维持 Ca²⁺ 浓度稳定是三角帆蚌池塘养殖水质管理的一项重要内容。Wang 等^[8]认为在鱼蚌综合养殖中投喂鱼类配合饲料可在一定程度上补充 Ca²⁺;戴杨鑫等^[29]认为在不换水的情况下仅靠投喂配合饲料难以维持鱼蚌综合养殖水体中 Ca²⁺ 浓度的稳定。因此,在混养鱼池中搭配养殖三角帆蚌时,应注意预防养殖水体 Ca²⁺ 浓度和硬度下降对鱼、蚌生长产生的不利影响。

本实验中,未配养三角帆蚌的围隔内 N/P 和 C/N 平均值分别为 6.1 和 10.5,配养三角帆蚌的围隔内分别为 9.8 和 11.4。与未配养三角帆蚌的围隔相比,配养三角帆蚌的围隔内 TN、TP、COD_{Mn}、BOD₅和 TOC 平均值略低,表明在鱼类混养系统内配养三角帆蚌可降低养殖水体 N、P 和有机负荷。在鱼类养殖中使用配合饲料显著提高了鱼产量,同时也增加了养殖水体 N、P 和有机废物的积累^[30],导致水体 C/N 和 N/P 变化。当养殖水体中 N、P 和有机废物含量达到一定限度后将影响养殖对象的生长和健康产生负面影响,因此降低 N、P 和有机废物积累是池塘养殖水质管理的核心内容^[2]。贝类可利用水体中各种含氮化合物如浮游植物、鱼类粪便等有机碎屑和溶解无机氮等作为营养资源^[8],具有降低水中氮和有机质含量的作用。本实验中,配养三角帆蚌的围隔内 TAN、PO₄-P 和 TP 略低于未配养三角帆蚌的围隔,这与配养三角帆蚌的围隔内 DO 较高而 TN、TP 较低有关,说明配养三角帆蚌可降低鱼类混养系统内 TAN 积累并加快水中 P 的沉降。养殖双壳贝类有时可导致水中溶解性营养盐含量升高^[25,31-32]。Bruesewitz 等^[33]报道斑马贝 (*Dreissena polymorpha*) 可促进水体中的硝化作

用。本实验中,配养三角帆蚌的围隔内 TAN 浓度略低,NO₃-N 略高,可能与水体中硝化作用增强有关,这一推测有待实验检验。

应该指出的是,尽管与未配养三角帆蚌的围隔相比,配养三角帆蚌的围隔内 DO、浮游植物多样性和初级生产力表现出升高的趋势,TN、TP、COD_{Mn}、BOD₅和 TOC 表现出下降的趋势,但 *t* 检验结果表明配养三角帆蚌与否对上述指标无显著影响。这主要是由于实验围隔内环境波动较大所致。可靠地比较分析不同类型水产养殖水体之间环境条件的差异是水产养殖模式优化研究中面临的难题。根据本研究结果,初步认为在草鱼、鲫、鲢、鳙混养池塘内配养三角帆蚌不会导致鱼产量明显下降,同时有助于降低养殖水体内 TN、TP、COD_{Mn}、BOD₅和 TOC 的积累,对于提高淡水池塘养殖经济效益,减少养殖风险和污染具有积极的作用。

参考文献:

- [1] 王岩.海水池塘养殖模式优化:概念、原理与方法[J].水产学报,2004,28(5):568-572.
- [2] 王岩.关于对虾池混养中的几个问题[J].台湾海峡,1999,18(1):106-112.
- [3] Neori A, Chopin T, Troell M, *et al.* Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture [J]. *Aquaculture*, 2004, 231 (1-4): 361-391.
- [4] Lin C K, Yi Y. Minimizing environmental impacts of freshwater aquaculture and reuse of pond effluents and mud [J]. *Aquaculture*, 2003, 226 (1-4): 57-68.
- [5] Troell M, Halling C, Neori A, *et al.* Integrated mariculture: Asking the right questions [J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1-4): 69-90.
- [6] Lin H R. Polycultural system of freshwater fish in China [J]. *Canadian Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 1982, 39(1): 143-150.
- [7] Milstein A. Ecological aspects of fish species interactions in polyculture ponds [J]. *Hydrobiologia*, 1992, 231(3): 177-186.
- [8] Wang Y, Wang W L, Qin J G, *et al.* Effects of integrated combination and quicklime supplementation on growth and pearl yield of freshwater pearl mussel, *Hyriopsis cumingii* (Lea, 1852) [J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40 (14): 1634-1641.
- [9] DB33/T 402.3-2003.河蚌育珠技术规范,第3部分:育珠蚌养殖与采珠技术规范[S].杭州:浙江省质量技术监督局,2003.
- [10] Yan L L, Zhang G F, Liu Q G, *et al.* Optimization of culturing the freshwater pearl mussels, *Hyriopsis cumingii* with filter feeding Chinese carps (bighead carp and silver carp) by orthogonal array design [J]. *Aquaculture*, 2009, 292(1-2): 60-66.
- [11] 王小冬,王伟良,董向全,等.不同放养和管理模式对三角帆蚌生长与养殖产量的影响[J].上海水产大学学报,2006,15(3):315-320.
- [12] 吴军,马楠,施丽丽,等.三角帆蚌对精养鱼塘水体主要水质因子的调控[J].南京师大学报:自然科学版,2005,28(3):92-96.
- [13] 黄祥飞.湖泊生态调查观测与分析[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [14] 魏复盛.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] Parsons T R, Takahashi M. *Biological Oceanographic Processes* [M]. New York; Oxford and New York Pergamon Press, 1973.
- [16] Ebina J, Tsutsui T, Shirai T. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation [J]. *Water Research*, 1983, 17(12): 1721-1726.
- [17] 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类—系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
- [18] Shannon C E, Weaver W. *The mathematical theory of communication* [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963.
- [19] Margalef D R. *Perspective in ecological theory* [M]. Chicago: Chicago University Press, 1963.
- [20] Pielou D P, Pielou E C. Association among species of infrequent occurrence: insect and spider fauna of *Polyporus betulinus* (Bulliard) Fries [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1968, 21(2): 202-216.
- [21] 朱爱民,陈文祥,栾建国,等.三角帆蚌食性及摄食率的初步研究[J].水生生物学报,2006,30(2): 244-246.
- [22] Mueller C R, Eversole A G, Turker H, *et al.* Effect of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* and freshwater mussel *Elliptio complanata* filtration on the phytoplankton community of Partitioned Aquaculture System units [J]. *Journal of World Aquaculture Society*, 2004, 35(3): 372-382.
- [23] Cremer M C, Smitherman R O. Food habits and growth of silver and bighead carp in cages and ponds

- [J]. *Aquaculture*, 1980, 20(1): 57 - 64.
- [24] 朱生博, 王岩, 王小冬, 等. 不同放养和管理模式下三角帆蚌养殖水体中的浮游生物和初级生产力[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(3): 401 - 407.
- [25] 刘旭博, 李珂, 周德勇, 等. 三角帆蚌对蓝藻的滤食作用及其对沉水植物生长的影响[J]. *水生态学杂志*, 2011, 32(2): 17 - 24.
- [26] Miranda A, Lizarraga-Armenta J, Rivas-Vega M, et al. Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, cultured with tilapia, *Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis niloticus* in a recirculation system [J]. *Journal of World Aquaculture Society*, 2010, 41(5): 764 - 772.
- [27] 郑侠飞, 王岩. 池塘养殖三角帆蚌的耗氧率[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2013, 39(4): 460 - 466.
- [28] 戴杨鑫, 王岩, 唐金玉, 等. 不同混养鱼类和投喂方式对鱼蚌综合养殖水体化学特征的影响[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(2): 351 - 360.
- [29] 戴杨鑫, 唐金玉, 王岩, 等. 不同施肥方法对鱼蚌综合养殖水体水化学的影响[J]. *水产学报*, 2013, 37(3): 407 - 416.
- [30] 王小冬, 王岩, 王伟良, 等. 不同放养和管理模式下三角帆蚌养殖水体的水化学特征[J]. *水产学报*, 2008, 32(2): 303 - 308.
- [31] Makarewicz J C, Bertram P, Lewis T W. Chemistry of the offshore surface waters of Lake Erie: pre-and post-*Dreissena* introduction (1983 - 1993) [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2000, 26(1): 82 - 93.
- [32] 杨东妹, 陈宇炜, 刘正文, 等. 背角无齿蚌滤食对营养盐和浮游藻类结构影响的模拟[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(2): 228 - 234.
- [33] Bruesewitz D A, Tank J L, Bernot M J. Delineating the effects of zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) on N transformation rates using laboratory mesocosms [J]. *Journal of North American Benthological Society*, 2008, 27(2): 236 - 251.

Effects of co-culturing freshwater pearl mussel *Hyriopsis cumingii* in a fish polycultural system on fish yield and water quality

TANG Jinyu, WANG Yan*, DAI Yangxin

(College of Animal Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: An enclosure experiment was conducted to evaluate the effect of co-culturing freshwater pearl mussel *Hyriopsis cumingii* in a fish polycultural system consisting of grass carp *Ctenopharyngodon idellus*, gibel carp *Carassius auratus*, silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* and bighead carp *Aristichthys nobilis* on fish yield and water quality. Two treatments were examined. In treatment I, polyculture of grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp was used. In treatment II, the mussel was co-cultured in polycultural system of grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp used in treatment I with a mussel-fish ratio of 1:1. The experiment lasted 78 days, during which water samples were collected regularly, and species composition and biomass of phytoplankton, primary productivity (P), community respiration (R), dissolved oxygen (DO), pH, sechii depth (SD), main ions (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$), total alkalinity, total hardness, ammonia (TAN), nitrite, nitrate, reactive phosphate, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total organic carbon (TOC), chemical oxygen demand (COD_{Mn}), biological oxygen demand (BOD_5) were monitored. The results showed that co-culturing *H. cumingii* significantly decreased the Ca^{2+} concentration in the enclosures, but did not significantly affect the other water quality parameters, such as species composition and biomass of phytoplankton, diversity of phytoplankton (Shannon-Weaver's index, Margalef's index, Pielou's index), P, R, DO, pH, SD, CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, total alkalinity, total hardness, TAN, nitrite, nitrate, reactive phosphate, TN, TP, TOC, COD_{Mn} and BOD_5 . Yields of grass carp, gibel carp and silver carp were relatively high, while production of bighead carp and accumulation of TN, TP, COD_{Mn} , BOD_5 and TOC were low in treatment II, compared with treatment I. Therefore, co-culturing the mussel in a fish polycultural system of grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp not only enhanced economic income of aquaculture practice, but also reduced the accumulation of nitrogen, phosphorus and organic matter.

Key words: fish polyculture; *Hyriopsis cumingii*; yield; phytoplankton; water chemistry

Corresponding author: WANG Yan. E-mail: ywang@zju.edu.cn