

## 不同施肥方法对鱼蚌综合养殖水体水化学的影响

戴杨鑫, 唐金玉, 王 岩\*, 李由明

(浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 通过 155 d 的围隔实验检验了不同施肥方法对鱼蚌综合养殖水体水化学的影响。鱼蚌放养种类为三角帆蚌、草鱼、鲫、鲢和鳙, 鱼蚌比例为 1.5:1。施肥处理为施鸭粪(DM)、施化肥(CF)及结合施鸭粪和化肥(DC)。实验期间定期采样分析水化学指标。各施肥处理间透明度(SD)、溶氧(DO)、硫酸根离子、氯离子、碳酸根离子、重碳酸根离子、钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁离子( $\text{Mg}^{2+}$ )、总碱度、总硬度、氨态氮(TAN)、硝酸态氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亚硝酸态氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、活性磷( $\text{PO}_4\text{-P}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸钾指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )均无显著差异, 但围隔 CF 内  $\text{PO}_4\text{-P/TP}$  显著高于围隔 DM, 5 月 20 日—7 月 18 日围隔 CF 内 pH 显著低于围隔 DM。随养殖时间延长, 各处理围隔内 SD、DO、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  呈下降趋势, 但 TAN、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  呈上升趋势。结果表明, 在投喂配合饲料的基础上少量施鸭粪、化肥或结合施鸭粪和化肥不会导致鱼蚌综合养殖水体主要离子、总碱度、总硬度、TAN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量产生显著差异。相比之下, 施化肥的水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较低,  $\text{PO}_4\text{-P/TP}$  较高; 施鸭粪的水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较高,  $\text{PO}_4\text{-P/TP}$  较低; 结合施鸭粪和化肥的水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{PO}_4\text{-P/TP}$  介于施化肥和施鸭粪的水体之间。鉴于结合施鸭粪和化肥的水体珍珠产量高于单独施鸭粪或施化肥的水体, 可认为该施肥措施有利于三角帆蚌生长及其珍珠囊内的珍珠质分泌。

**关键词:** 三角帆蚌; 综合养殖; 养殖模式; 施肥; 水化学

**中图分类号:** S 966.2

**文献标志码:** A

通过施有机肥培育天然饵料养殖滤食性鱼类是我国淡水池塘养殖的成功经验<sup>[1]</sup>。施肥在提高池塘养殖鱼产量方面的作用已得到证实<sup>[1-3]</sup>。围绕水产养殖施肥方法, 包括肥料种类<sup>[4-5]</sup>、施肥强度<sup>[6-10]</sup>等已进行了大量的研究, 然而有关在优化水产养殖放养模式的基础上进行施肥方法优化的研究尚未见报道。

三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)是培育淡水珍珠的主要河蚌品种, 利用三角帆蚌培育的淡水珍珠产量超过世界珍珠产量的 95%<sup>[11]</sup>。在三角帆蚌养殖中广泛采用大量施有机肥(鸭粪)肥水的方法<sup>[12-14]</sup>。大量施有机肥可导致水产养殖水体耗氧有机物和植物营养盐(N 和 P)积累, 并且通过换水造成周边水域富营养化。优化三角帆蚌养

殖模式, 包括优化放养结构和相应的管理技术, 是提高三角帆蚌养殖经济效益, 降低养殖风险和养殖污染的关键<sup>[15]</sup>。研究表明, 优化鱼、蚌综合养殖的放养结构(放养种类及其比例)并向混养鱼类投喂配合饲料可显著提高淡水珍珠产量和鱼产量<sup>[11]</sup>, 在此基础上合理施肥(同时施鸭粪和化肥)可进一步提高淡水珍珠的产量。有关改变鱼、蚌综合养殖的放养结构对养殖水体浮游生物和水化学的影响已有报道<sup>[11,13]</sup>, 然而涉及不同施肥方法对三角帆蚌养殖环境的影响尚缺乏报道。本实验在采用优化的鱼、蚌放养模式的基础上研究了不同施肥方法(施鸭粪、施化肥或结合施鸭粪和化肥)对鱼蚌综合养殖水体水化学的影响, 旨在为建立优化的三角帆蚌养殖模式提供科学依据。

收稿日期:2012-03-26 修回日期:2012-11-29

资助项目:公益性行业(农业)科研专项(200903028);浙江省厅市会商重大技术专项重大项目(2008C02010)

通信作者:王 岩, E-mail: ywang@zju.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验池塘、围隔、三角帆蚌和鱼类

实验于2010年5月20日至10月21日在浙江省诸暨市枫桥实验基地(北纬:29°47'60",东经:120°23'42")进行,所用池塘为一面积为1.33 hm<sup>2</sup>的土池。实验前将池水排干,在池塘中间建18个面积为31.8 m<sup>2</sup>的实验围隔。每个围隔由一张20 m长、1.7 m宽、5 mm厚的聚乙烯(PE)板、木桩和竹圈构成。将PE板卷成直径为6.4 m的圆筒(接口处用不锈钢螺丝固定)并竖直埋入池塘底泥(泥下深度为20 cm)中,沿圆筒筒壁内外两侧每隔1 m打下一根2 m长的木桩(泥下深度约为50 cm)并用铁丝扎紧内外木桩使圆筒保持直立。在圆筒内侧上、下部各放一个由20 m长的竹片围成的圆圈以支撑圆筒。每个围隔底部埋入一根直径20 cm聚氯乙烯(PVC)管保持池塘与围隔间的水交换。

实验所用三角帆蚌为2009年繁育的小蚌,购自浙江省金华市兰溪一养蚌场,实验前吊养在枫桥基地池塘内。实验开始前10天对蚌壳长大于80 mm的蚌进行无核珠插种手术。实验所用草鱼(*Ctenoparyngodon idellus*)、鲫(*Carassius gibelio*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys*

*nobilis*)均为2009年夏花,购自浙江省湖州市德清一淡水鱼鱼苗场,实验前暂养在池塘内的网箱中。

### 1.2 养殖实验

实验开始前用水泵将栎江江水引入池塘,抽水过程中打开围隔底部PVC管,使围隔内水位与池塘水位同时升高。当围隔内水深超过110 cm时关闭池塘闸门并关闭围隔底部PVC。在每个围隔中采用挂袋方法施1 kg鸭粪以培养浮游植物。实验设3个处理,包括施鸭粪(DM)、施化肥(CF)及结合施鸭粪和化肥(DC),每个处理设3个重复,共用9个面积为31.8 m<sup>2</sup>的围隔。围隔放养结构为三角帆蚌20个、草鱼15尾、鲫5尾、鲢5尾和鳙5尾(鱼:蚌比为1.5:1)。三角帆蚌用直径为30 cm的网笼吊养在围隔内距水面30 cm处,草鱼和鲫放养在悬挂于围隔中的网箱(1 m × 1 m × 1.5 m)内,鲢和鳙直接放养在围隔中。

养殖实验进行了155 d。实验期间每天8:00和17:00向混养的草鱼和鲫投喂颗粒配合饲料(科盛8006),并向鲢和鳙投喂粉状配合饲料。根据生产经验并结合围隔中水色和透明度变化进行施肥。施肥方法是将肥料称量并溶于水中后均匀泼洒在围隔内。所用饲料和肥料均一次性购足备用。实验中投饵和施肥量以及养殖的珍珠产量和鱼产量见表1,投饵和施肥输入的氮、磷量见表2。

表1 实验中投饵、施肥量及珍珠产量和鱼产量

Tab.1 Amount of the formulated fish feed and fertilizer used, and the pearl yield and fish yield in the experiment

处理 treatment	颗粒饲料 pellet feed	粉状饲料 powder feed	鸭粪 duck manure	尿素 urea	磷酸二氢钾 KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	珍珠产量 pearl yield	鱼产量 fish yield
DM	6 068 ± 16	7 998 ± 0	6 000 ± 0	0	0	14.5 ± 2.4 <sup>ab</sup>	9 415 ± 472 <sup>a</sup>
CF	5 850 ± 338	7 998 ± 0	0	1 250 ± 0	320 ± 0	11.5 ± 1.2 <sup>b</sup>	6 402 ± 940 <sup>b</sup>
DC	6 058 ± 7	7 998 ± 0	3 000 ± 0	625 ± 0	160 ± 0	15.8 ± 0.9 <sup>a</sup>	8 682 ± 76 <sup>a</sup>

注:DM:施鸭粪;CF:施化肥;DC:施鸭粪和化肥。数据表示为平均值 ± 标准差(n=3),同一列标注不同上标字母者表示差异显著(P<0.05)。

Notes:DM:duck manure fertilizer; CF:chemical fertilizer; DC:duck manure + chemical fertilizer. Data are expressed as mean ± S. D. (n=3), the values in the same column with different superscript are significantly different(P<0.05).

表2 投饵和施肥输入实验围隔中的氮、磷量

Tab.2 Nitrogen and phosphorus inputted into the experimental enclosures by feeding and fertilizing

处理 treatment	氮输入 nitrogen input				磷输入 phosphorus input			
	饲料 feed	鸭粪 duck manure	尿素 urea	总氮 total	饲料 feed	鸭粪 duck manure	磷酸二氢钾 KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	总磷 total
DM	694.5	118.2	0.0	812.8	420.4	295.2	0.0	715.6
CF	684.0	0.0	581.3	1 265.2	414.1	0.0	72.0	486.1
DC	694.1	59.1	290.6	1 043.8	420.1	147.6	36.0	603.7

注:DM:施鸭粪;CF:施化肥;DC:施鸭粪和化肥。数据表示为平均值。

Notes:DM:duck manure fertilizer; CF:chemical fertilizer; DC:duck manure + chemical fertilizer. Data are expressed as mean of two measurements.

### 1.3 水样采集与分析

实验期间每天 7:00 ~ 8:00 用 YSI 550A 型溶氧仪 (YSI Scientific Instrument, Yellow Springs, Ohio, USA) 测定围隔内表层水温 (T) 和溶氧 (DO), 用透明度盘测定透明度 (SD)。用 YSI 63 型 pH 计 (YSI Scientific Instrument, Yellow Springs, Ohio, USA) 测定 pH。2010 年 5 月 20 日起, 每 2 周 (上午) 在围隔内固定位置 (靠近网箱一侧, 深度约 50 cm) 用 5 L 采水器采集水样并运回设在枫桥实验基地的实验室内分析 pH、氨态氮 (TAN)、硝酸态氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亚硝酸态氮 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、活性磷 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )、总氮 (TN)、总磷 (TP)、高锰酸钾指数 ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、钙离子 ( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁离子 ( $\text{Mg}^{2+}$ )、碳酸根离子 ( $\text{CO}_3^{2-}$ )、重碳酸根离子 ( $\text{HCO}_3^-$ )、氯离子 ( $\text{Cl}^-$ )、硫酸根离子 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )、总硬度和总碱度等水化学指标。其中 pH、TAN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、总硬度和总碱度每 2 周分析 1 次,  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  每 4 周分析 1 次。有关水化学指标的分析方法详见文献 [16-17]。

### 1.4 数据计算和统计分析

$\text{Na}^+ + \text{K}^+$  和溶解无机氮 (DIN) 根据如下公式 [14] 计算:

$$[\text{Na}^+ + \text{K}^+] = 25 \times (1/2 \times [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + 1/2 \times [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] - 1/2 \times [\text{Ca}^{2+}] - 1/2 \times [\text{Mg}^{2+}])$$

本实验中用 [ ] 表示浓度。其中,  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  单位为 mmol/L, 将  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  单位从 mmol/L 换算为 mg/L 时, 取

$\text{Na}^+ + \text{K}^+$  原子量平均值为 25。

$$[\text{DIN}] = [\text{TAN}] + [\text{NO}_3\text{-N}] + [\text{NO}_2\text{-N}]$$

利用 SPSS 19.0 (IBM® SPSS® Statistics) 进行统计分析。用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检验不同施肥处理对各水化学指标及养殖的珍珠产量和鱼产量的影响, 用 Duncan 法进行多重比较。用多元回归分析方法比较 DO 与水温 (T)、SD、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  之间的关系, 以及 TAN 与 T、DO、SD、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  之间的关系。取  $P < 0.05$  为差异显著性水平。

## 2 结果

### 2.1 水温、SD、DO 和 pH

实验期间围隔内上午表层水温变化范围为 20.8 ~ 33.3 °C (平均水温为 28.0 °C), 其中 5—8 月水温持续升高, 8—9 月水温维持在 30 °C 以上, 10 月后水温急剧下降至 20 °C。实验期间 DM、CF 和 DC 围隔内 SD 分别为 (44 ± 2)、(44 ± 4)、(42 ± 3) cm (平均值 ± 标准差,  $n = 3$ ); 表层 DO 为 (6.12 ± 0.32)、(6.10 ± 0.84) 和 (6.12 ± 0.33) mg/L; pH 为 8.52 ± 0.16、7.58 ± 0.47 和 8.26 ± 0.42 (pH 仅为 5 次测定的数据, 7 月 17 日后因 pH 计损坏未再测 pH)。各处理间 SD 和 DO 差异不显著 (ANOVA,  $P > 0.05$ ), 但 5—8 月围隔 CF 内 pH 显著低于围隔 DM (根据 5 次测定的数据比较 pH, ANOVA,  $P < 0.05$ )。随养殖时间延长, 各处理 SD 和 DO 均呈现下降趋势 (图 1、图 2)。DO 与 T、SD、TN、TP 以及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  显著相关, 回归方程为  $[\text{DO}] = 23.977 - 0.512T - 0.005SD - 0.283$

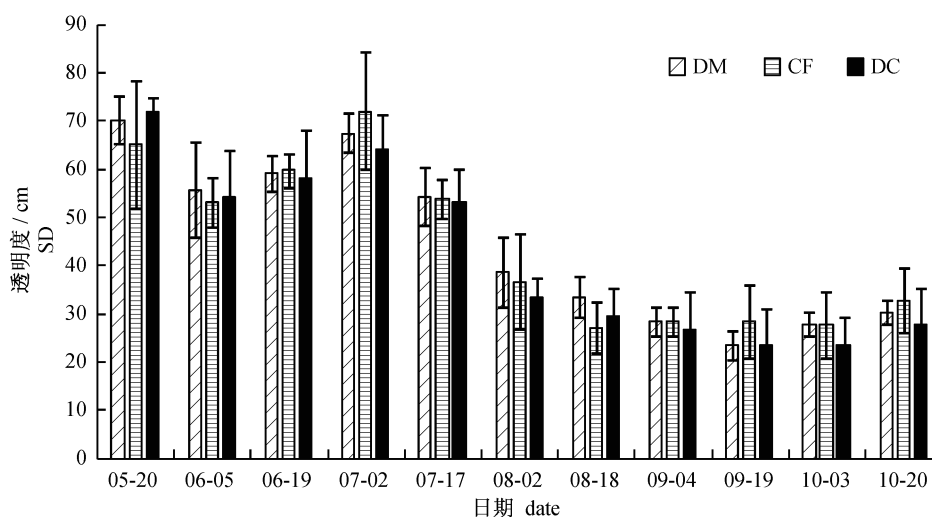


图 1 实验期间透明度的变化

Fig. 1 Variation in secchi depth (SD) in the experimental enclosures

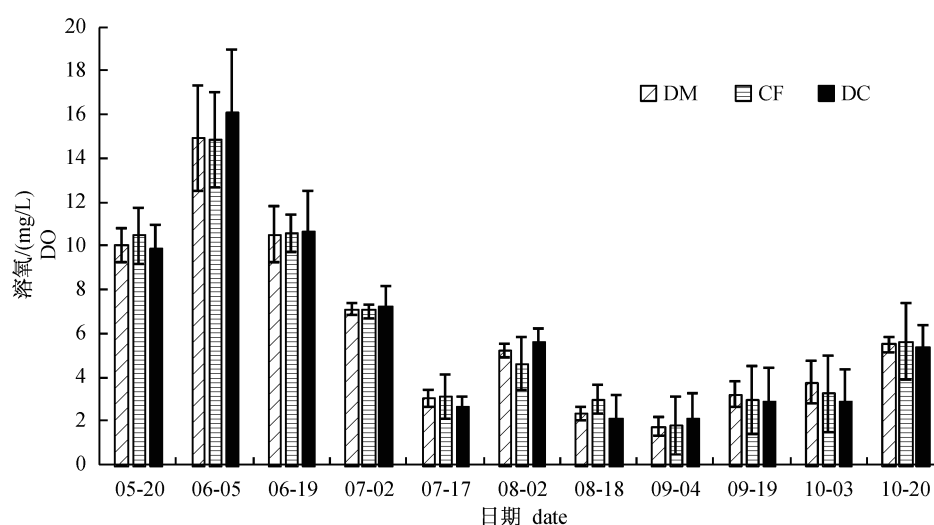


图2 实验期间溶氧的变化

Fig.2 Variation in dissolved oxygen (DO) in the experimental enclosures

[TN] - 6.539[TP] ( $r^2 = 0.682, n = 99, P < 0.0001$ )  
或 [DO] = 22.295 - 0.442 T + 0.014 SD - 0.309  
[COD<sub>Mn</sub>] ( $r^2 = 0.616, n = 99, P < 0.0001$ )。

## 2.2 主要离子、总碱度和总硬度

实验期间各处理间  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、

$\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、总硬度和总碱度均无显著差异 (ANOVA,  $P > 0.05$ ) (表3)。围隔内主要离子、总硬度和总碱度随养殖时间延长而变化,其中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  呈下降趋势 (图3)。

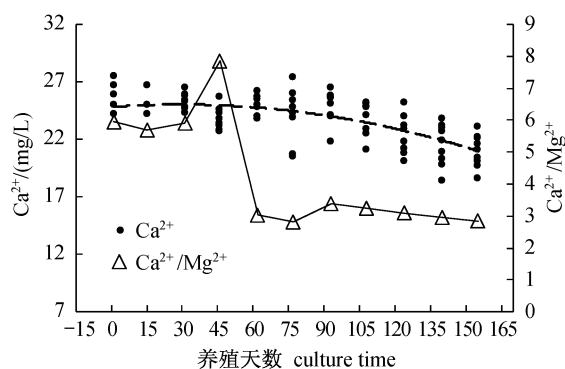
表3 实验期间围隔内主要离子、总碱度和总硬度

Tab.3 Main ions, total alkalinity and total hardness in the experimental enclosures

处理 treatment	$\text{CO}_3^{2-}/$ (mg/L)	$\text{HCO}_3^-/$ (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}/$ (mg/L)	$\text{Cl}^-/$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}/$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}/$ (mg/L)	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ /$ (mg/L)	总碱度/ (mg CaCO <sub>3</sub> /L) total alkalinity	总硬度/ (mg CaCO <sub>3</sub> /L) total hardness
DM	0.11 ± 0.19	76.79 ± 3.75	64.52 ± 4.73	47.80 ± 2.72	23.94 ± 1.39	5.86 ± 0.29	63.02 ± 1.67	63.57 ± 3.10	84.24 ± 3.65
CF	0.62 ± 1.07	75.81 ± 3.76	66.50 ± 6.81	49.61 ± 3.69	23.84 ± 0.99	5.97 ± 0.42	64.23 ± 2.78	64.23 ± 2.78	84.49 ± 2.06
DC	0.00 ± 0.00	71.89 ± 4.18	66.35 ± 9.52	47.74 ± 3.09	23.94 ± 0.53	6.01 ± 0.70	61.11 ± 1.26	59.52 ± 3.46	84.89 ± 4.17

注:DM:施鸭粪;CF:施化肥;DC:施鸭粪和化肥。数据表示为平均值 ± 标准差 ( $n = 3$ )。

Notes:DM:duck manure fertilizer; CF:chemical fertilizer; DC:duck manure + chemical fertilizer. Data are expressed as mean ± SD ( $n = 3$ ).

图3 实验期间围隔内  $\text{Ca}^{2+}$  浓度和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  的变化Fig.3 Variation in concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  and ratio of  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  in the experimental enclosures

## 2.3 氮、磷含量和氮磷比

实验期间各处理间 TAN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  和  $\text{TN}/\text{TP}$  均无显著差异 (ANOVA,  $P > 0.05$ ) (表4)。围隔 CF 内  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  显著高于围隔 DM (ANOVA,  $P < 0.05$ ), 围隔 DM 与 DC 之间以及围隔 CF 与 DC 之间  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  差异不显著 (ANOVA,  $P > 0.05$ )。围隔内 TAN、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN 和 TP 含量随着养殖时间的延长均呈升高的趋势 (图4 ~ 图7)。TAN 与 T、DO、SD、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  显著相关, 回归方程为 [TAN] = 1.346 - 0.009 [DO] - 0.018 T - 0.011 SD - 0.008 [TN] - 0.027 [TP] ( $r^2 = 0.524, n =$

99,  $P < 0.0001$ ) 或  $[TAN] = 1.424 - 0.010 [DO] - 0.524$ ,  $n = 99$ ,  $P < 0.0001$ )。  
 $-0.015 T - 0.012 SD - 0.002 [COD_{Mn}]$  ( $r^2 =$

表 4 实验期间围隔中氮、磷含量和氮磷比  
 Tab. 4 Concentration of nitrogen, phosphorus and ratio of nitrogen to phosphorus in the experimental enclosures

处理 treatment	TAN/ (mg/L)	NO <sub>3</sub> -N/ (mg/L)	NO <sub>2</sub> -N/ (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	TP/ (mg/L)	PO <sub>4</sub> -P/TP/ %	DIN/ PO <sub>4</sub> -P/%	TN/ TP/%
DM	0.303 ± 0.087	0.046 ± 0.007	0.004 ± 0.001	0.081 ± 0.046	2.448 ± 0.227	0.358 ± 0.182	25.9 ± 1.2 <sup>b</sup>	19.8 ± 9.6	14.8 ± 6.7
CF	0.274 ± 0.041	0.039 ± 0.014	0.010 ± 0.007	0.102 ± 0.046	2.456 ± 0.450	0.436 ± 0.142	48.7 ± 11.8 <sup>a</sup>	11.9 ± 5.6	12.0 ± 2.4
DC	0.359 ± 0.129	0.043 ± 0.006	0.005 ± 0.001	0.065 ± 0.053	2.488 ± 0.233	0.413 ± 0.127	38.8 ± 11.8 <sup>ab</sup>	21.3 ± 10.8	10.3 ± 4.0

注:DM:施鸭粪;CF:施化肥;DC:施鸭粪和化肥。数据表示为平均值 ± 标准差 ( $n = 3$ )。

Notes:DM:duck manure fertilizer; CF:chemical fertilizer; DC:duck manure + chemical fertilizer. Data are expressed as mean ± SD ( $n = 3$ ).

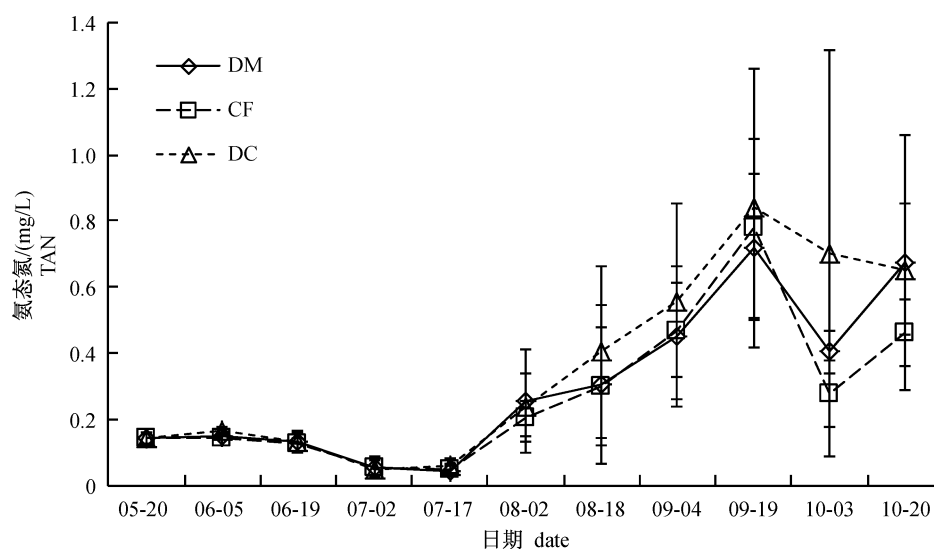


图 4 实验期间围隔内氨氮的变化

Fig. 4 Variation in concentration of ammonia in the experimental enclosures

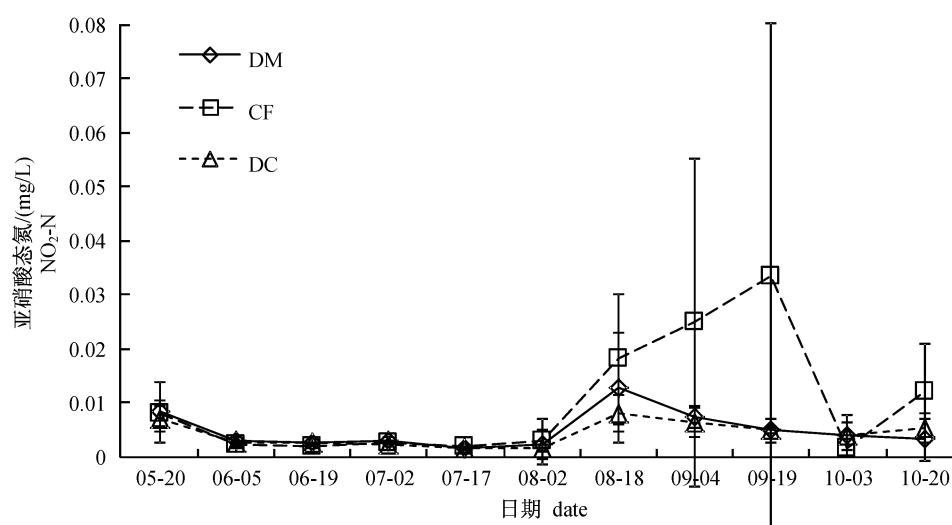


图 5 实验期间围隔内亚硝酸态氮的变化

Fig. 5 Variation in concentration of nitrite nitrogen in the experimental enclosures

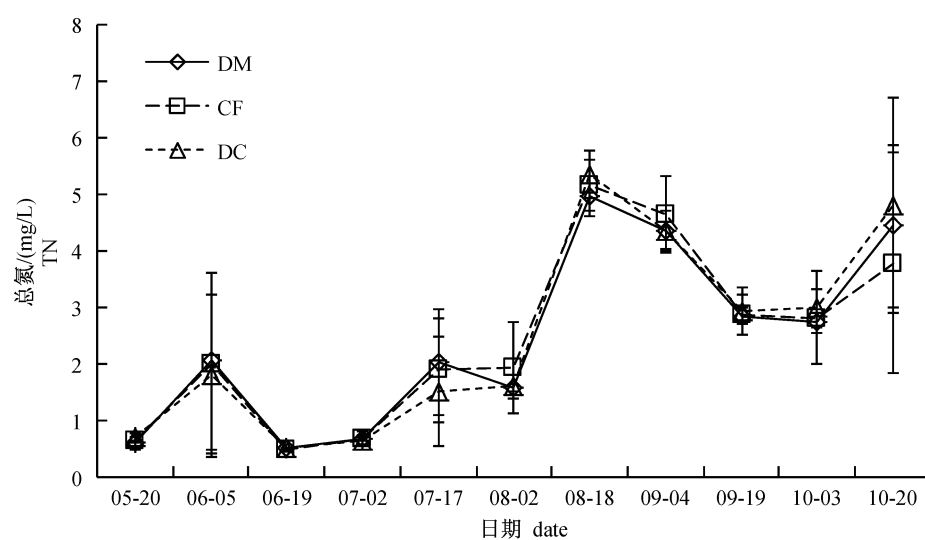


图 6 实验期间围隔内总氮的变化

Fig. 6 Variation in concentration of total nitrogen in the experimental enclosures

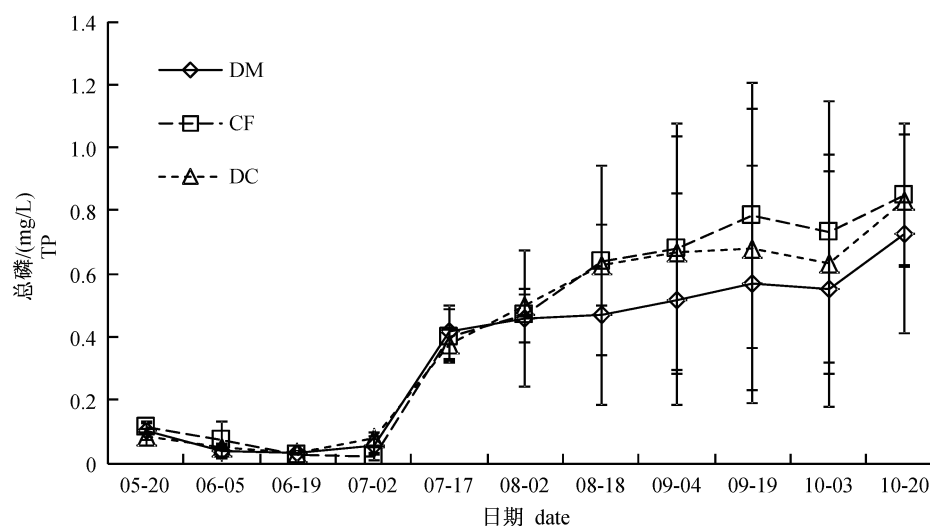


图 7 实验期间围隔内总磷的变化

Fig. 7 Variation in concentration of total phosphorus in the experimental enclosures

#### 2.4 COD<sub>Mn</sub>

实验中,各处理围隔中的 COD<sub>Mn</sub>含量随养殖时间的延长均呈明显上升趋势(图 8);但各处理间 COD<sub>Mn</sub>含量无显著差异(ANOVA,  $P > 0.05$ )。

### 3 讨论

水产养殖施肥的目的是为了增产或降低成本,获得良好的养殖生产效果是施肥研究中必须考虑的问题。鉴于水产养殖中施肥效果与肥料种类和施肥量均密切相关,本研究中化肥和鸭粪施肥量根据生产经验和围隔水质确定,在此基础上

按重量减半的原则计算出结合施鸭粪和化肥的量(表 1 和表 2),而非简单比较等氮、等磷水平下施鸭粪和化肥的差异。这样,研究结果可直接用于指导生产实践。人工养殖水体水化学环境受养殖生物生长代谢及养殖管理措施如投饵、施肥和换水等的影响而处于剧烈波动中<sup>[18]</sup>,在短期内通过有限次数的采样分析结果较难客观反映养殖过程中水化学变化。本研究中实验时间长达 155 d,对于氮、磷等受养殖管理措施影响较大的指标采样分析达 11 次,通过增加数据量以提高分析结果的可靠性和客观性。

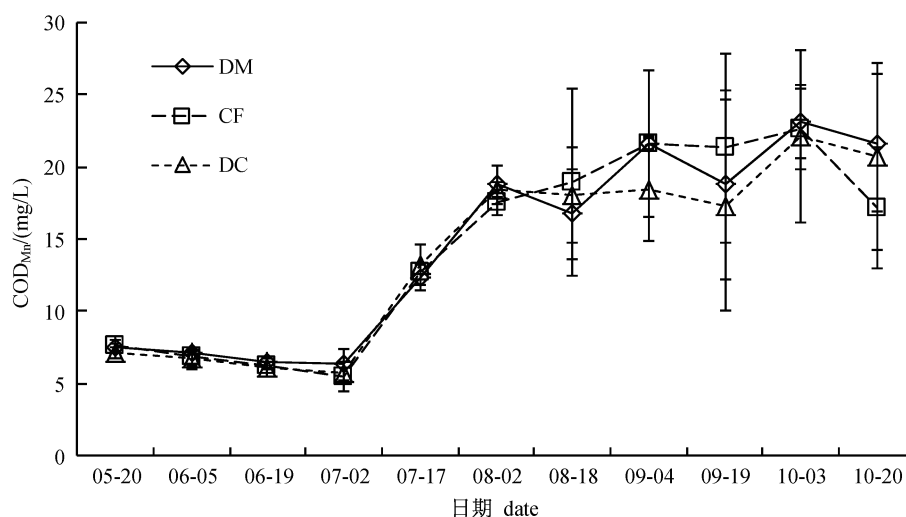


图 8 实验期间围隔内高锰酸钾指数 (COD<sub>Mn</sub>) 的变化

Fig. 8 Variation in chemical oxygen demand in the experimental enclosures

实验中施鸭粪、化肥或结合施鸭粪和化肥对养殖水体 SD 和 DO 未产生显著不同的影响,但 5—8 月间施化肥水体 pH 值低于施鸭粪的围隔,说明与施鸭粪相比,施化肥容易造成水体 pH 下降。研究表明施化肥(特别铵盐和尿素)有使水体酸化的风险<sup>[19-26]</sup>。杨红生等<sup>[26]</sup>认为施化肥时将会产生藻类自荫作用和碳源不足等限制,使养殖的滤食性鱼类不能获得最大鱼产力,但未提及施化肥对 pH 可能产生的影响。水产养殖中保持水体 pH 相对稳定对于养殖生物的存活和生长具有重要的意义<sup>[21]</sup>。水体 pH 可影响三角帆蚌心脏搏动<sup>[22]</sup>、摄食<sup>[23]</sup>、珍珠形成<sup>[24-25]</sup>等,低 pH 可对三角帆蚌养殖的珍珠产量产生负面影响。施化肥的围隔中珍珠产量低于施鸭粪或结合施鸭粪和化肥的围隔(表 1),可能与施化肥的围隔中 pH 较低有关。本研究中随养殖时间的延长 SD 和 DO 呈下降趋势,意味着养殖后期水体中较低的 DO 和 pH 有可能对养殖生物存活和生长产生不利的影响。养殖水体中 DO 通常与水温负相关<sup>[27]</sup>,因此高温季节应密切关注鱼蚌混养水体中 DO 和 pH 变化并适时采取措施(换水、施生石灰、增氧)提高水体的 DO。

实验中施鸭粪、化肥或结合施鸭粪和化肥对养殖水体主要离子、总碱度、总硬度、TAN、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、TN、TP 和 COD<sub>Mn</sub> 含量均无显著差异,这主要是由于本实验是在采用优化的放养结构和投喂配合饲料的基础上进行,施肥的 N、P 输入量仅占养殖的 N、P 输入量的 27%~37%,

故施肥对水化学的影响被投喂配合饲料的影响所掩盖。投喂配合饲料和施肥对养殖水体的 N、P 含量产生不同的影响,一般情况下投喂配合饲料水体中 N 含量较高,施肥水体中 P 含量较高<sup>[18]</sup>。本研究中无论施鸭粪、化肥或结合施鸭粪和化肥,水体中 DIN/PO<sub>4</sub>-P 和 TN/TP 均大于 7,在一定程度上表明投喂饲料对养殖水体 N、P 的影响超过施肥的影响。藻类利用水体中 N、P 的比例约为 7/1<sup>[14]</sup>,通常认为当 N/P 大于 7 时容易产生 P 限制,N/P 小于 7 时容易出现 N 限制。本研究发现,鱼蚌综合养殖水体中 N、P 含量均随养殖时间的延长呈上升趋势,即投饵、施肥输入的 N、P 量超过藻类需求并在水体内积累,因此水体中不会因 N、P 缺乏对藻类产生限制作用,N/P 比例对于评判 N 限制或 P 限制缺乏指示意义。本研究发现,施鸭粪、化肥或结合施鸭粪和化肥的水体中 PO<sub>4</sub>-P/TP 存在显著差异,施鸭粪的水体中 PO<sub>4</sub>-P/TP (26%) 低于施化肥水体中的 PO<sub>4</sub>-P/TP (49%),而结合施鸭粪和化肥的水体中 PO<sub>4</sub>-P/TP (39%) 居中。Green 等<sup>[28]</sup>指出施鸡粪的罗非鱼养殖池塘中 PO<sub>4</sub>-P/TP 为 20%~30%,施化肥池塘中约为 50%。因此 PO<sub>4</sub>-P/TP 可在一定程度上反映出养殖水体施肥(有机肥或化肥)的种类。

Middleton 等<sup>[5]</sup>认为在主养滤食性动物的池塘中,施家禽粪便(如鸭粪)等有机肥比施化肥更有利于养殖生物的生长。Boyd 等<sup>[19]</sup>认为在养殖池塘中应少施有机肥以降低因有机肥在水体中分解而使水体 DO 降低的风险。本研究结果表明:

在鱼蚌综合养殖水体中仅施化肥容易导致水体 pH 下降,从而对三角帆蚌生长和珍珠的产量产生不利影响;施鸭粪可提供藻类所必需的 N 和 P,还可产生大量的溶解有机质和有机碎屑直接作为三角帆蚌和滤食性鱼类的食物,但大量施鸭粪可造成水体中需氧有机物积累<sup>[12,14]</sup>,使水体 DO 下降并导致含氮有机物的厌氧分解(产生  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  等)。Wang 等<sup>[11]</sup>认为在鱼蚌综合养殖中向混养鱼类投喂配合饲料,未被鱼类摄食的饲料及鱼类摄食饲料后所产生粪便以有机碎屑的形式存在,可作为滤食性动物的食物,所产生的作用在一定程度上与施有机肥类似。因此在鱼蚌综合养殖水体中投喂配合饲料可大幅度降低有机肥施用量。养殖实验结果表明,结合施鸭粪和化肥的围隔中珍珠产量高于施鸭粪或施化肥的围隔(表 1),说明结合施鸭粪和化肥具有提高珍珠产量和改善鱼蚌混养水体水质的作用。有关结合施鸭粪和化肥的适宜组合比例及其作用机制有待进一步探讨。

本研究中,养殖水体水化学表现出明显的季节变化特点并且实验期间不同养殖阶段的水化学变化幅度超过不同施肥处理间的差异,这一现象在其它养殖水化学研究中同样出现<sup>[14,18,27]</sup>,表明季节变化(水温、光照、风力、降雨等)和养殖过程中持续的营养物质输入和积累是影响养殖水体水化学的重要因素。随养殖时间延长,水体中的 TAN、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  呈升高趋势,而  $\text{Ca}^{2+}$  呈下降趋势。这与早期研究所得出的结果一致<sup>[11,14]</sup>。因此对养殖各个阶段的投饵、施肥量加以控制以避免养殖水体中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  积累并在高温季节对养殖生物产生危害(DO 和 pH 下降,  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{NO}_2\text{-N}$  异常升高)是鱼蚌综合养殖水体水质管理的必要措施。与 N、P 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的变化趋势相反,水体中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  比例随养殖时间延长呈下降的趋势。水中  $\text{Ca}^{2+}$  对于贝类的生物矿化具有重要的作用<sup>[11]</sup>。Heinemann 等<sup>[29]</sup>指出当  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  低于 1/2 时海水贝类生物矿化中形成的  $\text{CaCO}_3$  晶体结构偏向文石,而当  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  高于 1/2 时偏向方解石。三角帆蚌内形成的淡水珍珠的  $\text{CaCO}_3$  晶体结构以文石为主<sup>[30]</sup>,这是否与淡水中  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  有关尚待进一步研究。淡水池塘养殖生产中常用生石灰杀灭有害微生物和增加水体硬度,施生石灰也是三角帆

蚌养殖中常用的水质管理措施<sup>[11]</sup>。考虑到施生石灰可同时增加水体 pH 和  $\text{Ca}^{2+}$  含量,鱼蚌综合养殖水体水质管理中应将施肥(尤其是施化肥)与施生石灰技术予以结合和优化。

综上所述,在投喂配合饲料的基础上少量施鸭粪、施化肥或结合施鸭粪和化肥不会导致鱼蚌综合养殖水体 SD、DO、主要离子、总碱度、总硬度、TAN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  产生显著差异。相比之下,施化肥的水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较低,  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  较高;施鸭粪的水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较高,  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  较低;结合施鸭粪和化肥的水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}/\text{TP}$  介于施化肥和施鸭粪的水体之间。鉴于结合施鸭粪和化肥条件下水体珍珠产量高于施鸭粪或施化肥的水体,可认为该施肥措施有利于三角帆蚌生长及其珍珠质分泌。

#### 参考文献:

- [1] 张扬宗,谭玉钧,欧阳海,等. 中国池塘养鱼学 [M]. 1 版. 北京:科学出版社,1989.
- [2] Boyd C E. Comparison of 5 fertilization programs for fish ponds [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1981, 110(4): 541 - 545.
- [3] Terziyski D, Grozev G, Kalchev R, et al. Effect of organic fertilizer on plankton primary productivity in fish ponds [J]. Aquaculture International, 2007, 15(3-4): 181 - 190.
- [4] Giap D H, Yi Y, Lin C K. Effects of different fertilization and feeding regimes on the production of integrated farming of rice and prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) [J]. Aquaculture Research, 2005, 36(3): 292 - 299.
- [5] Middleton R J, Reeder B C. Dissolved oxygen fluctuations in organically and inorganically fertilized walleye (*Stizostedion vitreum*) hatchery ponds [J]. Aquaculture, 2003, 219(1-4): 337 - 345.
- [6] Azim M E, Wahab M A, van Dam A A, et al. Optimization of fertilization rate for maximizing periphyton production on artificial substrates and the implications for periphyton-based aquaculture [J]. Aquaculture Research, 2001, 32(9): 749 - 760.
- [7] Wudtisn W, Boyd C E. Determination of the phosphorus fertilization rate for bluegill ponds using regression analysis [J]. Aquaculture Research, 2005, 36(6): 593 - 599.
- [8] Tabinda A B, Ayub M. Effect of high phosphate fertilization rate on pond phosphate concentrations,



- chlorophyll a*, and fish growth in carp polyculture [J]. *Aquaculture International*, 2010, 18 (3): 285 - 301.
- [9] Knud-Hansen C F, Batterson T R. Effect of fertilization frequency on the production of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture*, 1994, 123(3-4): 271 - 280.
- [10] Garg S K, Bhatnagar A. Effect of fertilization frequency on pond productivity and fish biomass in still water ponds stocked with *Cirrhinus mrigala* (Ham.) [J]. *Aquaculture Research*, 2000, 31(5): 409 - 414.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [17] 魏复盛. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 王岩, 齐振雄, 张鸿雁. 不同单养及混养海水实验围隔水化学的研究 [J]. *水产学报*, 1999, 23(4): 350 - 356.
- [19] Boyd C E, Massaut L. Risks associated with the use of chemicals in pond aquaculture [J]. *Aquacultural Engineering*, 1999, 20(2): 113 - 132.
- [20] Hunt D, Boyd C E. Alkalinity losses from ammonium fertilizers used in fish ponds [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1981, 110(1): 81 - 85.
- [21] 章征忠, 张兆琪, 董双林, 等. pH、盐度、碱度对淡水养殖种类影响的研究进展 [J]. *中国水产科学*, 1999, 6(4): 95 - 98.
- [22] 徐在宽. 几种化学因子对三角帆蚌心脏搏动的影响 [J]. *动物学杂志*, 1987, 22(6): 12 - 14.
- [23] 彭建华, 陈文祥, 栾建国, 等. 温度、pH 对二种淡水贝类滤水率的影响 [J]. *动物学杂志*, 2004, 39(6): 2 - 6.
- [24] 邱安东, 石安静. 不同 pH 值对三角帆蚌珍珠质分泌的影响 [J]. *动物学报*, 1999, 45(4): 361 - 370.
- [25] 韩继卫, 龙孝莉, 罗文, 等. pH 值对三角帆蚌珍珠形成的影响 [J]. *水产科学*, 2011, 30(12): 754 - 757.
- [26] 杨红生, 李德尚, 董双林, 等. 海水池塘不同施肥种类养殖罗非鱼效果的比较 [J]. *水产学报*, 1998, 22(2): 87 - 90.
- [27] Ibrahim N, Naggar G E. Water quality, fish production and economics of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and African catfish, *Clarias gariepinus*, monoculture and polycultures [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2010, 41(4): 574 - 582.
- [28] Green B W, Boyd C E. Chemical budgets for organically fertilized fish ponds in the dry tropics [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1995, 26(3): 284 - 296.
- [29] Heinemann F, Launspach M, Gries K, et al. Gastropod nacre: structure, properties and growth-Biological, chemical and physical basics [J]. *Biophysical Chemistry*, 2011, 153(2-3): 126 - 153.
- [30] 张刚生, 李浩璇. 淡水养殖珍珠的矿物组成特征 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2004, 23(1): 89 - 93.

## Effect of three fertilization programs on the chemical water quality for integrated culture of freshwater pearl mussel and fish

DAI Yangxin, TANG Jinyu, WANG Yan\*, LI Youming

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

**Abstract:** A 155-day experiment was conducted in land-based enclosures to examine the effects of three fertilization programs on chemical water quality for integrated culture of freshwater pearl mussel (*Hyriopsis cumingii*) and fishes. The pearl mussel was co-cultured with grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp, and the stocking ratio of fish to mussel was 1.5:1. Three fertilization programs, including fertilizing with duck manure (DM), with chemical fertilizer (CF), and with duck manure and chemical fertilizer in combination (DC), were used. In the experiment, the pH was lower in the CF enclosures than that in the DM enclosures during the earlier phase (from May 20 to July 18). The SD, concentration of dissolved oxygen (DO) and  $\text{Ca}^{2+}$ , and ratio of  $\text{Ca}^{2+}$  to  $\text{Mg}^{2+}$  decreased, while the concentration of ammonia (TAN), nitrite ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) increased, with the progress of the experiment. There were no significant differences in the SD and concentration of dissolved oxygen (DO),  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , hardness, alkalinity, ammonia (TAN),  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) between the fertilization treatments. The ratio of  $\text{PO}_4\text{-P}$  to TP was higher in the CF enclosures than that in the DM enclosures. Our results indicate that using different fertilization programs had no significantly different effects on the major ions, hardness, alkalinity, TAN,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , TN, TP and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  in the enclosures with integrated culture of freshwater pearl mussel with fishes and fed formulated fish feed. The concentration of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  was slightly low, but the ratio of  $\text{PO}_4\text{-P}$  to TP was higher, in the enclosures fertilized with chemical fertilizer, relative to the enclosures fertilized with duck manure, whereas the concentration of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  and ratio of  $\text{PO}_4\text{-P}$  to TP were at median levels in the enclosures fertilized with both chemical fertilizers and duck manure. The higher growth rate and nacre secretion of *H. cumingii* hung in the enclosures supplied with both chemical fertilizers and duck manure suggest this fertilization program is suitable for *H. cumingii* farming.

**Key words:** *Hyriopsis cumingii*; integrated culture; operative models; fertilization; chemical water quality

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