

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.00351

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

戴杨鑫, 王岩, 唐金玉, 李由明

浙江大学 动物科学学院, 浙江 杭州 310058

摘要: 选用草鱼(*Ctenoparyngodon idellus*)、银鲫(*Carassius gibelio*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)作为本研究的混养鱼类, 通过围隔实验检验了不同混养鱼类组合(草鱼+鲫+鲢+鳙或鲢+鳙)和配合饲料投喂方式(投喂或不投喂)对三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)养殖水体化学特征的影响, 实验为期 155 d。结果表明, 实验设计的混养鱼类组合可显著影响鱼蚌综合养殖水体的 Ca^{2+} 、总碱度(Alk)、总硬度(H_T)和总磷(TP)水平; 投喂配合饲料可显著影响 Ca^{2+} 、Alk、 H_T 、氨氮(TAN)、TP 和化学耗氧量(COD_{Mn})。采用混养组合(草鱼+鲫+鲢+鳙)且投喂配合饲料的围隔内溶氧(DO)水平和透明度(SD)较低, Ca^{2+} 、 H_T 、TN、TP、TAN 和 COD_{Mn} 水平较高; 采用混养组合(鲢+鳙)且不投喂的围隔内 DO 和 SD 水平较高, 而 Ca^{2+} 、 H_T 、TN、TP、TAN 和 COD_{Mn} 水平较低。随养殖时间延长, 各围隔内 Ca^{2+} 水平下降, TN、TP、TAN 和 COD_{Mn} 水平升高。实验期间, DO 与 SD 水平呈正相关; DO 和 SD 与 TAN、TN、TP、 Ca^{2+} 和 COD_{Mn} 水平呈负相关。因此, 鱼蚌综合养殖中, 控制 COD_{Mn} 和 TAN 浓度, 维持 Ca^{2+} 稳定及较高的 DO 水平是水质管理的基本目标。

关键词: 三角帆蚌; 综合养殖; 溶氧; 钙; 总氮; 总磷; 化学耗氧量; 草鱼; 鲫; 鲢; 鳙

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)02-0351-10

利用三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)培育的淡水珍珠产量超过世界珍珠产量的 95%^[1]。中国是淡水珍珠主要生产国, 在长江以南多个省区, 包括江苏、浙江、湖南、湖北、江西等均开展了三角帆蚌养殖^[2]。在三角帆蚌池塘养殖中, 目前国内普遍采用鱼蚌混养(鱼类密度很低)、大量施有机肥培养天然饵料的生产方式。大量施有机肥可造成养殖水体富营养化, 并对周边水域产生污染。综合养殖是提高水产养殖产量和营养物质利用效率的有效途径^[3-4], 然而其效益的好坏取决于具体的放养结构和养殖管理措施^[5]。近年来, 围绕池塘鱼蚌综合养殖放养结构和管理措施优化开展了一些研究^[1, 6-7], 但涉及养殖水环境方面的报道较少^[8-9]。

池塘水环境对水产养殖生物存活、代谢和生

长具有重要影响, 水化学指标可反映出养殖生产活动对环境的改变。因此, 分析池塘水化学变化特征不仅为完善池塘养殖模式提供必要的信息, 也为评价水产养殖活动对环境的影响提供科学依据。然而, 由于养殖池塘环境复杂多变, 客观评价其水化学环境至今仍然是一个难题。涉及水产养殖水化学环境的研究已有许多报道^[2, 10-12], 但系统的研究工作相对较少^[13-16], 而比较不同养殖方式对水化学环境影响的研究尚不多见^[9, 15]。本研究对不同混养鱼类种类和投喂配合饲料对鱼蚌综合养殖水体水化学特征的影响进行较全面的分析与观测, 目的是从水化学角度探讨混养鱼类种类搭配和投喂配合饲料方式对养殖环境的影响, 从而为优化三角帆蚌池塘养殖模式提供科学依据。

收稿日期: 2012-02-03; 修订日期: 2012-04-03。

基金项目: 农业部公益性行业(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)。

作者简介: 戴杨鑫(1985-), 男, 硕士研究生, 从事水域生态与水产养殖方面的研究。E-mail: daiyangxin@gmail.com

通信作者: 王岩, 教授。E-mail: ywang@zju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 三角帆蚌、鱼类和实验围隔

实验于 2010 年 5 月 20 日—10 月 20 日在浙江省诸暨市枫桥实验基地进行。所用的三角帆蚌为 2009 年繁育的小蚌, 购自浙江省金华市兰溪, 实验前养在枫桥基地池塘内。实验开始前 10 d 对蚌壳长大于 80 mm 的蚌进行无核珠插种手术。所用草鱼(*Ctenoparyngodon idellus*)、鲫(*Carassius gibelio*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和鳙(*Aristichthys nobilis*)为 2009 年夏花, 购自浙江省湖州市德清县, 实验前在池塘内的网箱中暂养。

实验池塘为一土池, 面积为 1.33 hm²。实验前将池塘内水排干, 在中间平坦处建 30 个实验围隔。围隔建造方法如下: 将一张 1.7 m 宽、5 mm 厚的聚乙烯板卷成圆筒(直径为 6.4 m 或 1.6 m)并用不锈钢螺杆(每隔 10 cm 插入一颗螺杆)固定相接处, 将圆筒直立并埋入池塘底泥中(泥下 20 cm), 在圆筒内部上、下两侧分别用两根 20 m 长的竹片围成的圆圈支撑使其保持圆柱形。沿圆筒内、外侧垂直打下木桩(长 2 m, 泥下深度为 50 cm, 每对木桩间隔 1 m)使其夹住圆筒壁, 使围隔直立。围隔排列成 3 排, 其中直径为 6.4 m(面积为 31.8 m²)的围隔 2 排(18 个), 直径为 1.6 m(面积为 7.8 m²)的围隔 1 排(12 个), 围隔间最小间距为 4 m。每个围隔底部埋入一根直径为 20 cm 的聚氯乙烯管保持池塘与围隔间的水交换。

1.2 养殖实验

实验开始前向池塘内注入栌江水。注水前将围隔底部聚氯乙烯管打开, 使池塘与围隔内水位同时升高。当围隔内水深超过 110 cm 时停止进水, 关闭围隔底部聚氯乙烯管, 使围隔与池塘之间不能进行水的交换。采用挂袋方法向每个围隔内施 1 kg 鸭粪。

实验采用 2 × 2 设计(两种混养鱼类组合, 配合饲料投喂方式为投喂或不投喂), 设 4 个处理: GGSB-F 组投喂配合饲料且混养组合为草鱼+鲫+鲢+鳙; GGSB-NF 组不投喂配合饲料且混养组合为草鱼+鲫+鲢+鳙; SB-F 组投喂配合饲料且混养

组合为鲢+鳙; SB-NF 组不投喂配合饲料且混养组合为鲢+鳙。每个处理设 3 个重复, 共用 12 个面积为 31.8 m²的围隔。三角帆蚌用直径为 30 cm 的网笼吊养在围隔内, 草鱼和鲫养在悬挂在围隔内的网箱(1 m × 1 m × 1.5 m)中, 鲢和鳙放养在围隔内。

实验期间每天 8:00 和 17:00 时向 GGSB-F 组投喂配合饲料(颗粒饲料, 科盛 8006), 向 GGSB-F 组和 SB-F 组投喂配合饲料(粉状饲料)。每天早晨向围隔 GGSB-NF 组投喂牧草(晋草 3 号)。根据围隔内水色和透明度施有机肥和化肥。三角帆蚌和鱼类放养量及实验期间投饵和施肥量见表 1。

1.3 水样采集与分析

实验期间每天早晨用 YSI-550A 溶氧仪(YSI Scientific Instrument, Yellow Springs, Ohio, USA)测定围隔内水温和溶氧(DO), 用透明度盘测定透明度(SD)。每 2 周在围隔 1 侧固定位置用 5 L 采水器采样分析水化学指标, 其中 pH、总氮氮(TAN)、硝酸态氮(NO₃-N)、亚硝酸态氮(NO₂-N)、活性磷(PO₄-P)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、钙离子(Ca²⁺)、镁离子(Mg²⁺)、碳酸根离子(CO₃²⁻)、重碳酸根离子(HCO₃⁻)、硬度(H_T)和碱度(Alk)每两周分析 1 次; 氯离子(Cl⁻)、硫酸根离子(SO₄²⁻)每 4 周分析 1 次。pH 用 YSI-63 pH 计(YSI Scientific Instrument, Yellow Springs Ohio, USA)测定, 其余水化学指标按文献[17-18]所推荐的方法测定。

1.4 数据计算和统计分析

溶解无机氮(DIN)和 Na⁺ + K⁺含量根据以下公式计算^[9]:

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

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

本实验中用[]表示浓度。其中, CO₃²⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、Ca²⁺和 Mg²⁺单位为 mmol/L, 将[Na⁺ + K⁺]单位从 mmol/L 换算为 mg/L 时, 取 Na⁺ + K⁺相对原子质量平均值为 25。

用针对双因素实验设计的方差分析(ANOVA)

表 1 三角帆蚌、草鱼、鲫、鲢和鳙的放养量及饲料和肥料的投入量
Tab. 1 The density of *H. cumingii*, grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp and the amount of the formulated feed, forage grass and fertilizer inputted into the experimental enclosures

项目 item	处理 treatment			
	GGSB-F	GGSB-NF	SB-F	SB-NF
三角帆蚌/(ind·enclosure ⁻¹) <i>H. cumingii</i>	20	20	20	20
草鱼/(ind·enclosure ⁻¹) grass carp	15	15	0	0
鲫/(ind·enclosure ⁻¹) gibel carp	5	5	0	0
鲢/(ind·enclosure ⁻¹) silver carp	5	5	5	5
鳙/(ind·enclosure ⁻¹) bighead carp	5	5	5	5
颗粒饲料/(g·enclosure ⁻¹) pellets feed	6058 ± 7	0	0	0
粉状饲料/(g·enclosure ⁻¹) powder feed	7998	0	7998	0
牧草/(g·enclosure ⁻¹) forage grass	0	14000	0	0
鸭粪/(g·enclosure ⁻¹) duck manure	3000	3000	3000	3000
尿素/(g·enclosure ⁻¹) urea	625	625	625	625
KH ₂ PO ₄ /(g·enclosure ⁻¹)	160	160	160	160

注: GGSB-F 组: 投喂配合饲料混养草鱼+鲫+鲢+鳙; GGSB-NF 组: 不投喂配合饲料混养草鱼+鲫+鲢+鳙; SB-F 组: 投喂配合饲料混养鲢+鳙; SB-NF 组: 不投喂配合饲料混养鲢+鳙。
Note: GGSB-F: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp were co-cultured and fed formulated feed; GGSB-NF: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp were co-cultured without formulated feed supplement; SB-F: silver carp + bighead carp were co-cultured and fed formulated feed; SB-NF: silver carp + bighead carp were co-cultured without formulated feed supplement.

检验混养鱼类种类与投喂配合饲料对各水化学指标的影响及各处理间的差异, 用 Duncan's test 进行多重比较; 用 Person 相关分析检验 DO、SD、TAN、TN、TP、Ca²⁺和 COD_{Mn} 之间的关系; 用回归分析检验 Ca²⁺随时间变化的规律。利用 SPSS 19.0(IBM® SPSS® Statistics)进行统计分析。取 $P < 0.05$ 为差异显著性水平。

2 结果与分析

2.1 水温、DO、pH 和 SD

实验期间水温变化范围为 20.8 ~ 33.3℃(平均 28.0℃), 其中 5—8 月水温持续升高, 8—9 月水温维持在 30℃ 以上, 10 月后水温急剧下降(图 1)。除 5—6 月外, DO 随时间变化趋势与水温相反(图 1)。实验期间围隔 GGSB-F、GGSB-NF、SB-F 和 SB-NF 内 DO 分别为(5.13±0.41)、(7.99±0.73)、(6.80±0.53)和(8.51±0.54) mg/L(平均值±标准差, $n = 3$), 其中围隔 SB-NF、GGSB-NF 内 DO 显著高于围隔 SB-F 和 GGSB-F, 围隔 GGSB-F 内 DO 最低(ANOVA, $P < 0.05$)。5 月 20 日—7 月 17 日 pH 变化范围为 7.45 ~ 8.26, 各处理间无显著差异(因 pH 计损坏, 7 月 17 日后未再测定 pH, 故仅根据 5 次测定的数据进行

pH 比较)。SD 变化范围为 15 ~ 96 cm, 实验初期各处理间 SD 无显著差异, 7 月后各处理间 SD 表现出显著差异, 围隔 GGSB-F 内 SD 低于其他围隔(图 2, ANOVA, $P < 0.05$)。

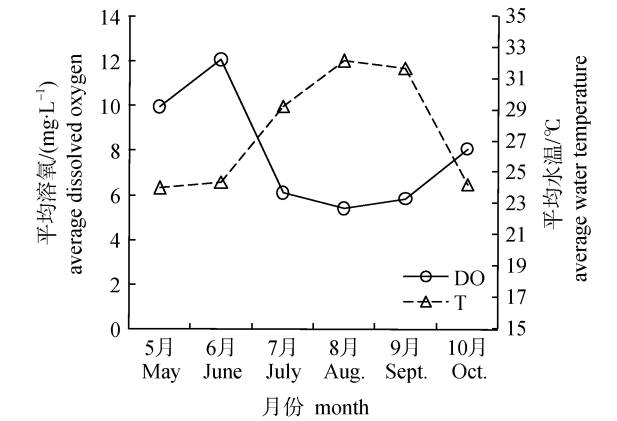


图 1 实验期间围隔内水温和溶氧变化
Fig. 1 Variation in water temperature and dissolved oxygen in the experimental enclosures

2.2 主要离子、H_T 和 Alk

混养鱼类种类可显著影响养殖水体的 HCO₃⁻、Ca²⁺、H_T 和 Alk(ANOVA, $P < 0.05$); 投喂配合饲料可显著影响 Ca²⁺、H_T(ANOVA, $P < 0.05$)、Alk(ANOVA, $P < 0.01$)、CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻(ANOVA, $P <$

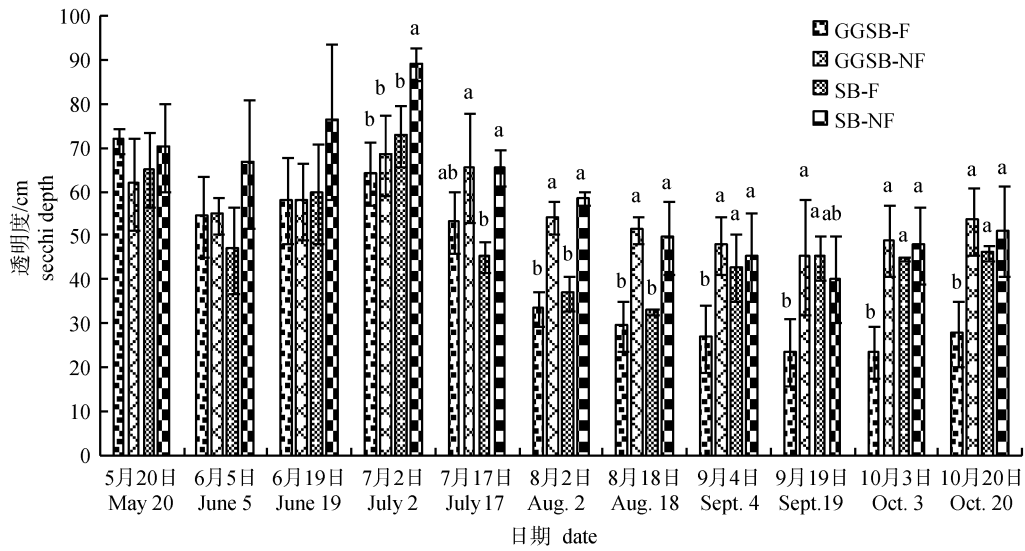


图 2 实验期间各围隔内水体透明度的变化

Fig. 2 Variation in water secchi depth in the experimental enclosures

0.001)。实验期间围隔 SB-NF 中 Ca^{2+} 显著低于其他处理(ANOVA, $P < 0.05$, 表 2); 围隔 GGSB-F 中 ALK 显著低于围隔 GGSB-NF(ANOVA, $P < 0.05$), 但围隔 GGSB-F、SB-F 与 SB-NF 之间以及围隔 GGSB-NF、SB-F 与 SB-NF 之间 ALK 无显著差异(ANOVA, $P > 0.05$)。围隔 GGSB-F 中 H_T 显著高于围隔 SB-NF(ANOVA, $P < 0.05$), 但围隔 GGSB-F、GGSB-NF 与 SB-F 之间以及围隔 GGSB-NF、SB-F 与 SB-NF 之间 H_T 无显著差异(ANOVA, $P > 0.05$)。

围隔内 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 H_T 和 ALK 随时间而变化, 其中

Ca^{2+} 和 H_T 随时间延长呈下降的趋势(图 3)。 Ca^{2+} 与养殖时间(t , 单位 d)之间显著相关, 回归方程为: $[\text{Ca}^{2+}] = -0.0003 t^2 - 0.0159 t + 25.464 (n = 132, r^2 = 0.5437, P < 0.0001)$ 。

2.3 氮、磷和 COD_{Mn}

混养鱼类种类可显著影响养殖水体的 TP($P < 0.05$); 投喂配合饲料可显著影响 TAN($P < 0.01$)、TP 和 COD_{Mn} ($P < 0.001$); 二者对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 TN 均无显著影响($P > 0.05$)。围隔 GGSB-F 中 TAN 显著高于围隔 GGSB-NF 和 SB-NF(表 3, ANOVA, $P < 0.05$), 但围隔 GGSB-F 与 SB-F 之间以及围隔 GGSB-NF、SB-F 与 SB-NF 之间无显著

表 2 实验期间围隔内主要离子、总碱度和总硬度

Tab. 2 Major ions, total alkalinity and total hardness in the experimental enclosures

$n=3; \bar{x} \pm \text{SD}; \text{mg/L}$; 总碱度 ALK、总硬度 H_T : $\text{mg}(\text{CaCO}_3)/\text{L}$

处理 treatment	SO_4^{2-}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	总碱度 total alkalinity	总硬度 total hardness
GGSB-F	66.35±9.52	47.74 ±3.09	0.00 ±0.00 ^c	71.89 ±4.18 ^a	23.94±0.53 ^a	6.08±0.70	61.08±1.25	59.52±3.46 ^b	84.89±4.17 ^a
GGSB-NF	64.13±10.87	48.51±1.24	4.38 ±0.49 ^a	63.22 ±5.95 ^{ab}	23.38±1.47 ^a	5.50±0.12	59.16±1.27	67.07±3.32 ^a	81.11±3.50 ^{ab}
SB-F	68.56±4.32	46.20±1.24	1.35 ±0.31 ^b	70.40 ±5.06 ^a	23.36±1.22 ^a	5.68±0.45	60.34±1.00	62.82±5.04 ^{ab}	81.80±4.20 ^{ab}
SB-NF	67.40±6.99	50.22±3.37	3.72 ±0.69 ^a	58.88 ±3.24 ^b	20.74±0.73 ^b	5.56±1.14	60.08±1.63	61.26±0.73 ^{ab}	74.76±4.02 ^b

注: GGSB-F: 投喂配合饲料混养草鱼+鲫+鲢+鳙; GGSB-NF: 不投喂配合饲料混养草鱼+鲫+鲢+鳙; SB-F: 投喂配合饲料混养鲢+鳙; SB-NF: 不投喂配合饲料混养鲢+鳙。同一列标注不同上标字母者表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: GGSB-F: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp were co-cultured and fed formulated fish feed; GGSB-NF: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp were co-cultured without formulated fish feed supplement; SB-F: silver carp + bighead carp were co-cultured and fed formulated fish feed; SB-NF: silver carp + bighead carp were co-cultured without formulated fish feed supplement. The values in the same column with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

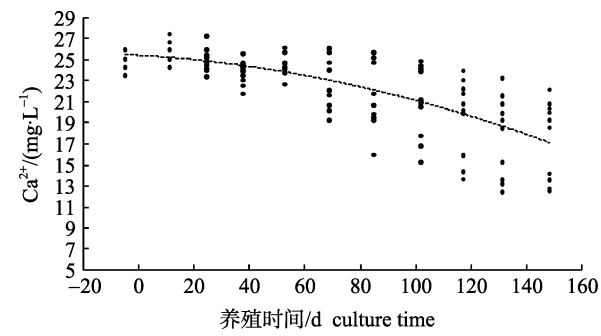


图 3 实验围隔中 Ca^{2+} 浓度随养殖时间变化的趋势
Fig. 3 Variation in Ca^{2+} with the progress of the experiment

差异(ANOVA, $P > 0.05$); 围隔 GGSB-F 和 SB-F 中 TN 显著高于围隔 GGSB-NF(ANOVA, $P < 0.05$); 围

隔 GGSB-F 中 TP 显著高于其他处理(ANOVA, $P < 0.05$); 各处理之间 DIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 TN/TP 均无显著差异(ANOVA, $P > 0.05$); COD_{Mn} 高低次序为围隔 GGSB-F > 围隔 SB-F > 围隔 GGSB-NF 和围隔 SB-NF(ANOVA, $P < 0.05$)。

实验期间围隔内 TAN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP 和 COD_{Mn} 均随养殖时间延长而变化。TAN、TN、TP 和 COD_{Mn} 随养殖时间延长呈升高趋势(图 4—图 7)。

2.4 水质指标间的关系

由表 4 可见, DO 与 SD 之间呈显著正相关($P < 0.05$), DO 和 SD 与 TAN、TN、TP 和 COD_{Mn} 之间

表 3 实验期间围隔中氮、磷和 COD_{Mn}
Tab. 3 Concentration of nitrogen, phosphorus and COD_{Mn} in the experimental enclosures

处理 treatment	TAN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_2\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{PO}_4\text{-P}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	DIN/ $\text{PO}_4\text{-P}$	TN/TP	$\text{COD}_{\text{Mn}}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
GGSB-F	0.359 ± 0.129^a	0.043 ± 0.006	0.005 ± 0.001	0.065 ± 0.053	2.488 ± 0.233^a	0.413 ± 0.127^a	21.7 ± 10.8	10.3 ± 4.0	14.0 ± 0.6^a
GGSB-NF	0.178 ± 0.107^b	0.064 ± 0.006	0.005 ± 0.001	0.022 ± 0.006	1.811 ± 0.323^b	0.197 ± 0.017^b	25.1 ± 7.1	11.3 ± 1.1	9.3 ± 0.7^c
SB-F	0.241 ± 0.070^{ab}	0.055 ± 0.022	0.006 ± 0.001	0.024 ± 0.005	2.391 ± 0.180^a	0.259 ± 0.020^b	32.2 ± 7.9	15.0 ± 5.4	11.2 ± 0.9^b
SB-NF	0.151 ± 0.013^b	0.058 ± 0.006	0.006 ± 0.001	0.018 ± 0.002	2.146 ± 0.174^{ab}	0.195 ± 0.023^b	26.2 ± 10.0	14.2 ± 5.0	9.1 ± 0.6^c

注: GGSB-F: 投喂配合饲料混养草鱼+鲫+鲢+鳙; GGSB-NF: 不投喂配合饲料混养草鱼+鲫+鲢+鳙; SB-F: 投喂配合饲料混养鲢+鳙; SB-NF: 不投喂配合饲料混养鲢+鳙; TAN: 总氨氮; TN: 总氮; TP: 总磷; DIN: 溶解无机氮; COD_{Mn} : 化学耗氧量。同一列标注不同上标字母者表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: GGSB-F: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp were co-cultured and fed formulated fish feed; GGSB-NF: grass carp + gibel carp + silver carp + bighead carp were co-cultured without formulated fish feed supplement; SB-F: silver carp + bighead carp were co-cultured and fed formulated fish feed; SB-NF: silver carp + bighead carp were co-cultured without formulated fish feed supplement; TAN: total ammonia nitrogen; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; DIN: dissolved inorganic nitrogen; COD_{Mn} : chemical oxygen demand. The values in the same column with different superscript letters are significantly different ($P < 0.05$).

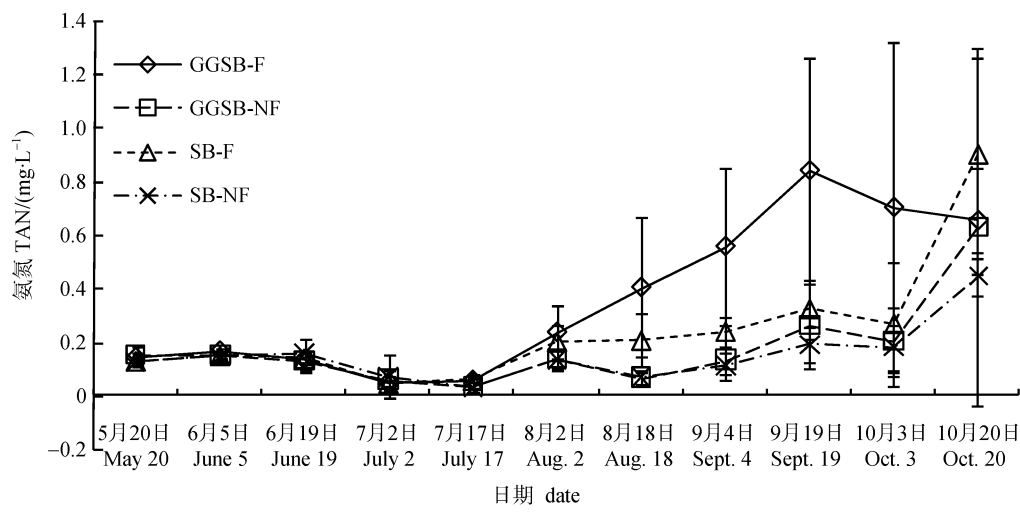


图 4 实验期间围隔内氨氮的变化
Fig. 4 Variation in concentration of ammonia in the experimental enclosures

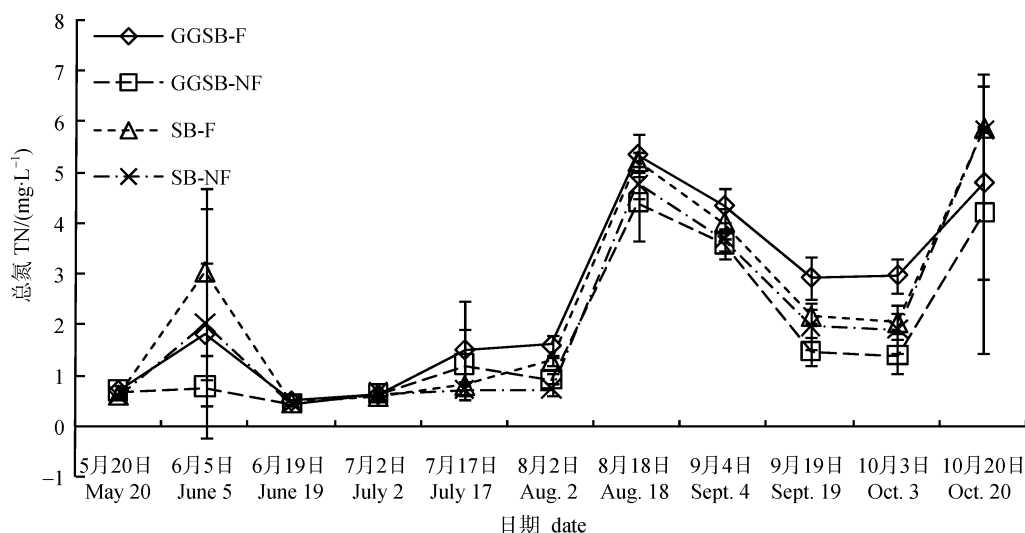


图 5 实验期间围隔内总氮的变化

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

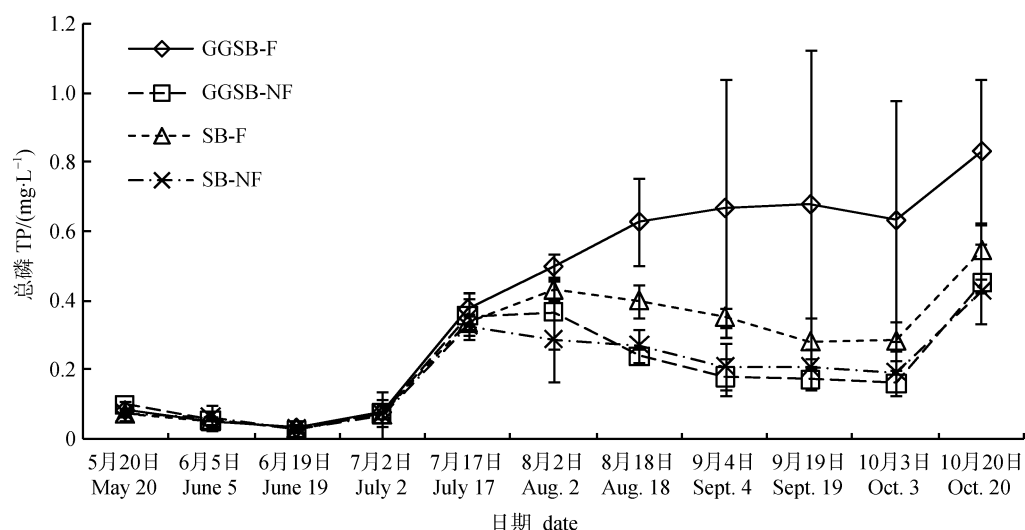


图 6 实验期间围隔内总磷的变化

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

显著负相关($P < 0.05$), TAN、TN、TP 和 COD_{Mn} 之间均为显著正相关($P < 0.05$)。

3 讨论

养殖实验结果表明, 围隔 GGSB-F、GGSB-NF、SB-F 和 SB-NF 内平均珍珠产量分别为 15.8 g、13.9 g、14.6 g 和 10.2 g, 平均鱼产量分别为 8 682 g、2 591 g、5 041 g 和 2 511 g。围隔 GGSB-F 和 SB-F 内珍珠产量高于围隔 GGSB-NF 和 SB-NF, 围隔 GGSB-F 和 GGSB-NF 内鱼产量高于围隔 SB-F 和 SB-NF。本研究中养殖实验长达 155 d, 对主要水

化学参数(pH、TAN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN、TP、 COD_{Mn} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 H_T 和 Alk)分析次数达 11 次, 通过长期、多次采样分析确保实验数据的可靠性和结论的客观性。

本实验中, 多数时间内 DO 随水温升高而下降, 这主要是由于水体内微生物和养殖生物的代谢强度随水温升高而增强。在鱼类混养池塘中也发现了类似趋势^[19]。本实验结果表明当混养鱼类种类相同时, 投喂配合饲料的围隔(GGSB-F 和 SB-F)内 DO 和 SD 显著低于不投喂配合饲料的围隔(GGSB-NF 和 SB-NF); 而在投喂配合饲料的情

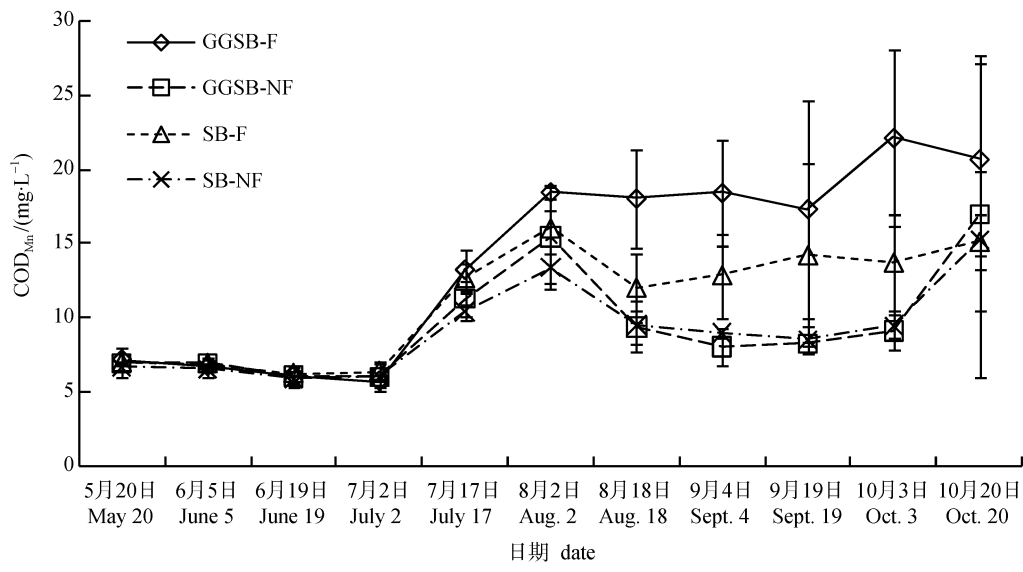


图 7 实验期间围隔内化学需氧量(COD_{Mn})的变化
Fig. 7 Variation in chemical oxygen demand in the experimental enclosures

表 4 水质指标之间的关系
Tab. 4 Relationship between the parameters of water quality

	DO		SD		TAN		TN		TP		COD _{Mn}	
	CC	CP	CC	CP	CC	CP	CC	CP	CC	CP	CC	CP
DO	1		0.406	0.000	-0.190	0.029	-0.309	0.000	-0.599	0.000	-0.466	0.000
SD			1		-0.508	0.000	-0.521	0.000	-0.669	0.000	-0.656	0.000
TAN					1		0.506	0.000	0.603	0.000	0.519	0.000
TN							1		0.583	0.000	0.507	0.000
TP									1		0.769	0.000
COD _{Mn}											1	

注: SD: 透明度; TAN: 总氮; TN: 总氮; TP: 总磷; COD_{Mn}: 化学耗氧量; CC: 相关系数; CP: 相伴概率。各指标观察值共 132 个。
Note: SD: Secchi depth; TAN: ammonia; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; COD_{Mn}: chemical oxygen demand; CC: correlation coefficient; CP: concomitant probability. Number of observed value is 132.

况下, 混养草鱼、鲫、鲢和鳙的围隔(GGSB-F)内 DO 和 SD 显著低于混养鲢和鳙的围隔(SB-F)。鉴于围隔 GGSB-F 内配合饲料投喂量高于围隔 SB-F, 而围隔 GGSB-F 内 DO 和 SD 低于围隔 GGSB-NF, 可见投喂配合饲料是围隔内 DO 和 SD 显著下降的主要原因。本实验结果揭示 GGSB-F 围隔珍珠产量和鱼产量较高的直接负面后果是 DO 下降, 因此在鱼蚌综合养殖中, 对大量投喂配合饲料的池塘进行增氧是有益和必要的。

本实验结果表明: 改变混养鱼类种类可显著影响 TP, 而投喂配合饲料与否不仅影响 TP, 对 TAN 也有显著影响。可见, 投喂配合饲料可通过增加 N、P 输入量进而影响水体的 N、P 含量, 而

改变混养鱼类种类则通过鱼类的活动和代谢影响水体 P 循环。围隔 GGSB-F 内 TAN、TN 和 TP 显著高于其他处理(GGSB-NF、SB-F 和 SB-NF), 证明水体中 N、P 浓度主要取决于通过投喂配合饲料而输入的 N、P 量, 而不是养殖种类对输入的 N、P 的利用效率。与投喂配合饲料相比, 改变混养鱼类种类组成对水体中 N、P 浓度往往仅起到次要的影响。N/P 是判断营养盐对浮游植物限制的重要依据(通常认为 N/P>7 为 P 限制, N/P<7 为 N 限制), 但王岩等^[13]认为, 养殖池塘中的 N、P 浓度及比例很大程度上取决于管理措施, 仅根据 N/P 判断 N 限制或 P 限制存在局限性。通常认为 P 是淡水养殖池塘中浮游植物的主要限制性营养是

盐^[20], 特别是新挖池塘或者 N 含量丰富的池塘中容易出现 P 限制^[21-22]。王小冬等^[9]发现在三角帆蚌养殖中 TN 随养殖时间延长逐渐升高而 TP 逐渐下降, 认为产生 P 限制的可能性相对较大。本实验中, TN 和 TP 均随养殖时间延长而增加, 因此, 尽管 DIN/PO₄-P 和 TN/TP 均大于 7, 尚不足以判定会出现 P 限制。

本实验结果表明投喂配合饲料可导致 COD_{Mn} 增加。围隔 GGSB-F 内 COD_{Mn} 显著高于其他处理, 这与不同处理间 TN、TP 的趋势一致。考虑到淡水养殖水体中 TN、TP 主要以有机 N、P 的形式存在^[9], 可以认为投喂的配合饲料是水体中 N、P 和有机质的主要来源。由此推测: 投喂混养鱼类配合饲料时, 未被鱼类摄食的饲料、鱼粪便或排泄物释放到水中, 增加了水体 N、P 和有机质含量, 导致投喂配合饲料的围隔内有机碎屑以及溶解性有机 C 和有机 N 含量(有机碎屑可作为三角帆蚌和鲢的食物, 溶解性有机 N 可作为三角帆蚌营养物质)明显高于未投喂配合饲料的围隔。因此, 在鱼蚌综合养殖中投喂配合饲料可增加水中溶解性和颗粒有机质(C、N)含量, 而较高浓度的颗粒有机质提供了细菌聚集与生长的媒质。这意味着鱼蚌综合养殖珍珠产量和鱼产量的增加往往伴随出现较高的 COD_{Mn} 和细菌生物量, 本实验中投喂配合饲料的围隔内 COD_{Mn} 与 TN、TP 较高, DO 和 SD 较低初步证明了这一机制。

水中 Ca²⁺ 可影响三角帆蚌贝壳和珍珠的生物矿化^[23], 对三角帆蚌珍珠产量可产生重要的影响^[1]。本实验结果表明混养鱼类种类和投喂配合饲料可显著影响水体 Ca²⁺、H_T 和 ALK。围隔 SB-NF 内 Ca²⁺、H_T 和 ALK 显著低于其他处理, 表明仅施肥不能满足鱼、蚌生长对 Ca²⁺ 的需求。围隔 GGSB-F、GGSB-NF 和 SB-F 之间 Ca²⁺ 无显著差异, 意味着投喂配合饲料或在混养鱼类中增加草鱼和鲫均有益于增加水中的 Ca²⁺。这是因为投喂配合饲料相当于向养殖水体提供 Ca²⁺ (本实验中所用鱼类配合饲料的 Ca 含量为 0.5%~2.0%), 而混养草鱼和鲫可通过草鱼摄食牧草将牧草中的 Ca^[24] 转化为生物可利用的 Ca 或通过鲫的摄食和

活动导致底质中 Ca 向水柱中释放。值得注意的是: 本实验中围隔内 Ca²⁺ 和 H_T 均随养殖时间延长呈下降的趋势, 这表明在不换水的条件下, 仅靠投喂配合饲料及混养草食性和杂食性鱼类难以维持水中 Ca²⁺ 的稳定, 如不及时补充 Ca, 水中 Ca²⁺ 将逐渐降低并最终对鱼、蚌的生长产生限制。在三角帆蚌池塘养殖生产中通常施生石灰, 这是维持水中 Ca²⁺ 稳定的有效措施。

本实验中, 围隔内 TAN、NO₃-N、NO₂-N、PO₄-P、TN、TP、COD_{Mn}、主要离子(SO₄²⁻、Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺ + K⁺)、H_T 和 ALK 均随养殖时间延长而变化, 并且不同实验阶段之间上述水化学指标的差异程度超过实验期间不同处理之间的差异。考虑到实验期间水温 and 养殖管理措施的变化, 作者认为围隔内水化学环境主要取决于输入的营养物质的形态(配合饲料、牧草、肥料)和数量, 以及生物(特别是藻类和细菌)的代谢活动类型与强度。以往研究报道 TN 和 COD_{Mn} 随养殖时间延长而增加^[9-11, 13]。本实验中, 随养殖时间延长, 围隔内 TAN、TN、TP 和 COD_{Mn} 逐渐增加, SD、DO、Ca²⁺ 和总硬度逐渐下降, 这意味着控制 COD_{Mn} 和 TAN 浓度, 维持 Ca²⁺ 稳定和较高的 DO 是鱼蚌综合养殖水质管理的基本目标。

参考文献:

- [1] 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]. Aqu Res, 2009, 40(14): 1634-1641.
- [2] 林青霞, 王岩, 高吉华, 等. 不同地区三角帆蚌养殖水体的水质[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(3): 327-332.
- [3] Troell M, Halling C, Neori A, et al. Integrated mariculture: Asking the right questions[J]. Aquaculture, 2003, 226(1-4): 69-90.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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的浮游生物和初级生产力[J]. 生态学杂志, 2008, 27(3), 401–407.
- [9] 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.
- [10] 张根芳, 邓闽中, 方爱萍. 蚌、鱼养殖模式对水体富营养化控制作用的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 491–495.
- [11] 李应森, 李家乐, 刘仁杰, 等. 外荡养殖三角帆蚌对水体主要水质因子的影响[J]. 上海水产大学学报, 2006, 15(2): 173–177.
- [12] 王岩, 谢宁峡, 林青霞, 等. 诸暨三角帆蚌养殖池塘内水环境、蚌生长与珍珠产量[J]. 淡水渔业, 2009, 39(1), 68–72.
- [13] 雷衍之, 于淑敏, 徐捷. 无锡市河埭口高产鱼池水质研究 I. 水化学和初级生产力[J]. 水产学报, 1983, 7(3): 185–199.
- [14] 姚宏禄, 仇丽, 唐庆宁. 施肥主养鲢鳙非鲫高产池塘的水化学[J]. 水产学报, 1996, 20(1): 81–84.
- [15] Boyd C E. Practical aspects of chemistry in pond aquaculture[J]. Prog Fish-Cultu, 1997, 59(2): 85–93.
- [16] 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.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. 第2版, 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 魏复盛. 水和废水监测分析方法 [M]. 第4版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] Ibrahim N, El Naggar G. Water quality, fish production and economics of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, and African catfish, *Clarias gariepinus*, monoculture and polycultures[J]. J World Aqu Soc, 2010, 41(4): 574–582.
- [20] Boyd C E. Comparison of 5 fertilization programs for fish ponds[J]. Trans Am Fish Soc, 1981, 110(4): 541–545.
- [21] Mischke C C, Zimba P V. Plankton community responses in earthen channel catfish nursery ponds under various fertilization regimes[J]. Aquaculture, 2004, 233(1–4): 219–235.
- [22] Boyd C A, Penseng P, Boyd C E. New nitrogen fertilization recommendations for bluegill ponds in the southeastern United States[J]. North Am J Aqu, 2008, 70(3): 308–313.
- [23] Rhoads D C, Lutz R A. Skeletal growth of aquatic organisms[M]. New York: Plenum Press, 1980.
- [24] 杨冬梅, 李俊年, 何岚, 等. 湘西地区土壤-牧草-山羊钙镁含量的季节性动态特征研究[J]. 生态环境学报, 2010, 6(19): 1300–1305.

Effects of co-cultured fish and feed supplement on water chemistry characteristics of freshwater pearl mussel farming

DAI Yangxin, WANG Yan, TANG Jinyu, LI Youming

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

Abstract: Integrated culture is widely used in freshwater pearl mussel (*Hyriopsis cumingii*) farming; however, water chemistry characteristics relating to *H. cumingii* farming are poorly understood. To assess the effects of co-cultured fish (grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp or silver carp and bighead carp) and formulated fish feed supplement (with or without feed supplement) on water chemistry characteristics, a 155-day field experiment was carried out in land-based enclosures. Four treatments including GGSB-F (co-cultured fish grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp were fed formulated feed), GGSB-NF (co-cultured fish grass carp, gibel carp, silver carp and bighead carp were not fed formulated feed), SB-F (co-cultured fish silver carp, and bighead carp were fed formulated feed) and SB-NF (co-cultured fish silver carp and bighead carp were not fed formulated feed) were established. The results indicated that the combination of co-cultured fish species could significantly affect Ca^{2+} , total alkalinity (ALK), total hardness (H_T) and total phosphorus (TP), while the feed supplement regime affected Ca^{2+} , ALK, H_T , ammonia (TAN), TP and chemical oxygen demand (COD_{Mn}). Dissolved oxygen (DO) and secchi depth (SD) were lower, while Ca^{2+} , H_T , total nitrogen (TN), TP, TAN and COD_{Mn} were higher in the GGSB-F enclosures. Conversely, DO and SD were higher, but Ca^{2+} , H_T , TN, TP, TAN and COD_{Mn} were lower, in the SB-NF enclosures. During the experimental period, Ca^{2+} decreased, while TN, TP, TAN and COD_{Mn} increased. DO and SD were positively correlated with each other and negatively to the levels of TAN, TN, TP, Ca^{2+} and COD_{Mn} . Therefore, water quality management programs should include controlling the concentration of TAN and COD_{Mn} at the levels below the critical values, and maintaining Ca^{2+} and DO at high and constant levels.

Key words: *Hyriopsis cumingii*; integrated culture; dissolved oxygen; Ca^{2+} ; total nitrogen; total phosphorus; chemical oxygen demand; *ctenoparyngodon idellus*; *Carassius gibelio*; *Hypophthalmichthys molitrix*; *Aristichthys nobilis*

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