

草鱼复合养殖系统间隙水与上覆水中营养盐分布特征

赵 蕾¹ 王 芳^{1*} 孙 东² 董双林¹ 高勤峰¹ 柳炳俊¹

(¹ 中国海洋大学教育部海水养殖重点实验室, 青岛 266003)

(² 山东省淡水水产研究所, 济南 250117)

摘 要 采用陆基围隔实验法, 于 2009 年 6~10 月调查并分析了草鱼复合养殖系统上覆水和沉积物间隙水营养盐(NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, PO₄-P)的时空分布及沉积物总氮(TN)、总磷(TP)和总碳(TC)含量的变化。结果显示, (1)草鱼复合养殖系统上覆水中 NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N 和 PO₄-P 的含量波动范围分别为 0.056~1.499、0.022~0.228、0.049~3.903、0.003~1.882 mg/L, 间隙水中营养盐的平面分布中, NH₄-N 在总无机氮(DIN)中所占比例随着养殖时间的增加而增加, 不同复合养殖系统的营养盐垂直分布特征不同, 规律也不明显。(2)实验结束与实验开始时相比, 沉积物中 TN 和 TP 含量无明显变化, 但 TC 含量显著降低, 以混养模式(GSC)的减少幅度最大。结果表明, 在本实验条件下, 草鱼、鲢鱼与鲤鱼复合养殖系统可有效降低养殖过程中有机物的积累, 降低底层中潜在释放的 NH₄-N 含量, 是一种较为合理的草鱼复合养殖模式。

关键词 草鱼复合养殖系统 营养盐 上覆水 间隙水

中图分类号 S964.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2011)02-0070-08

Distribution of nutrients in the pore water and overlying water in Grass carp *Ctenopharyngodon idellus* polyculture system

ZHAO Lei¹ WANG Fang^{1*} SUN Dong²

DONG Shuang-lin¹ GAO Qin-feng¹ LIU Bing-jun¹

(¹ Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003)

(² Fresh Water Fishery Research Institute of Shandong Province, Jinan 250117)

ABSTRACT Spatial distribution of NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N and PO₄-P in overlying water and pore water, and the change of TN, TP and TC concentrations in sediments in Grass carp *Ctenopharyngodon idellus* polyculture ponds were studied by means of land-based enclosure during June~October, 2009. The results showed that: (1) the concentrations of NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N, and PO₄-P were 0.056~1.499, 0.022~0.228, 0.049~3.903, and 0.003~1.882 mg/L, respectively. The proportion of NH₄-N in the DIN increased over time in the horizontal pore water. Different systems showed different vertical distribution of nutrients. (2) During the experiments, the concentrations of TN and TP didn't change significantly. However, the con-

国家“973”计划课题(2009CB118706)资助

* 通讯作者。E-mail: wangfang249@ouc.edu.cn, Tel: 13969884563

收稿日期: 2011-02-21; 接受日期: 2011-03-11

作者简介: 赵 蕾(1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事养殖水环境化学方面的研究。E-mail: zhaolei--1002@163.com, Tel: 13687613996

centration of TC decreased significantly, especially in GSC. It is suggested that the accumulation of organic matter and potential release of $\text{NH}_4\text{-N}$ in the underlying water can be reduced effectively in Grass carp polyculture system. Therefore, this system might be applied in aquaculture.

KEY WORDS Grass carp polyculture system Nutrients Overlying water
Pore water

在草鱼集约化养殖中,其发病率高、产量低和养殖风险较大一直是突出问题,而水质管理、底质好坏和养殖模式是养殖成败的关键因素(徐文彦等 2006)。氮、磷是水体初级生产力的关键限制性营养元素,沉积物又是水体营养物质的主要宿主,沉积物-水界面是控制沉积物与上覆水之间进行物质与能量交换的重要边界环境(刘敏等 2007),而底栖鱼类通过潜穴、游泳、觅食和避敌等扰动行为,以及对营养盐的吸收、转化、降解和排泄等生理活动,影响着营养盐在水域生态系统中的循环和交换(孙刚等 2006、2008)。Berelson等(1998)研究发现,内源性氮、磷营养盐的产生量占外源性营养盐的比例均超过50%,且沉积物间隙水中营养盐的多寡可直接反映出底质环境的优劣,并在一定程度上影响底栖生物的生存、发育和组成(孙耀等 1993)。近年来对泥-水界面及间隙水中营养盐分布特征的研究多集中在海洋、河口等自然水体和浅海养殖水域(曲克明等 2002;张继红等 2009;沈春宁等 2007),而对淡水养殖池塘内泥-水界面及间隙水中营养盐分布特征的相关研究却较少,查清草鱼单养及复合养殖系统泥-水界面营养盐变化及间隙水营养盐的空间分布,可为优化草鱼复合养殖模式提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 实验池塘与围隔

实验于2009年5~10月在山东省淡水水产研究所进行。围隔建于面积 0.27 hm^2 ($90\text{ m}\times 30\text{ m}$)、平均水深 1.5 m 的淡水池塘中,每个面积为 64 m^2 ($8\text{ m}\times 8\text{ m}$),共12个围隔用于实验,围隔结构参考李德尚等(1998)。每个围隔中间设充气石4个,通过塑料管与池塘岸边一个 2 kW 的充气泵连通;实验期间连续充气。

1.2 实验设计与养殖管理

实验设草鱼单养模式(G)为对照组,草鱼与鲢混养模式(GS)、草鱼与鲤鱼混养模式(GC)以及草鱼、鲢和鲤鱼混养模式(GSC)共3个草鱼复合养殖模式,每个模式设3个重复。具体放养情况见表1。苗种放养时间为2009年5月14日,养殖过程中投喂“海大牌”草鱼膨化配合饲料(福建省漳州市)。每天分别于08:00、10:00、13:00和16:00投喂。日投饵量为草鱼生物量的2%~3%,草鱼生物量根据每个月采样鱼体的平均规格及草鱼的实际存活数目而确定。养殖收获时间为2009年10月18日。

1.3 样品的采集

采样间隔时间为30 d,养殖过程中共采样6次,每次均在早晨投喂前采集样品。采样点选择在距离围隔边约50 cm的位置,每个围隔采集3次,分别使用自制柱状底泥采集器按对角线的形式采集20 cm左右沉积物样品,采用虹吸法吸出上覆水并于24 h内分析水样指标,沉积物样品现场按每段厚度3 cm精确分为4层,所得泥样经过 $4\ 000\text{ r/min}$ 离心20 min后,取上清液再用孔径为 $0.45\ \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤,提取沉积物间隙水。提取的间隙水如不能立刻分析,则加入 HgCl_2 固定,并储存于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 冰柜保存待分析。实验开始和实验结束时的底泥经风干研磨过100目筛后保存待测。

1.4 样品分析方法

采用双通道连续流动营养盐分析仪(AA3型,德国布朗公司)测定上覆水及间隙水中的营养盐($\text{NH}_4\text{-N}$,

NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P)含量,采用元素分析仪(Vario EL III, 德国)测定沉积物样品中的 TN 和 TC 含量, TP 先采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消解(刘光菘 1996)后,采用《水和废水监测方法》(2002)中钼蓝法进行测定。

1.5 数据分析方法

所有数据采用 SPSS 13.0 软件进行统计分析,对相关数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和邓肯氏检验法多重比较,以 $P \leq 0.05$ 为差异显著水平。

表 1 不同养殖模式的放养情况
Table 1 Information on stocking in the different culture modes

模式 Culture mode	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			鲢鱼 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>			鲤鱼 <i>Cyprinus carpio</i>		
	数量 Number (ind/m ²)	放养密度 Density (g/m ²)	放养规格 Size (g/ind)	数量 Number (ind/m ²)	放养密度 Density (g/m ²)	放养规格 Size (g/ind)	数量 Number (ind/m ²)	放养密度 Density (g/m ²)	放养规格 Size (g/ind)
G	0.95	151.37±2.35	159.02±6.03						
GS	0.77	118.54±0.89	154.83±2.01	0.45	32.60±1.45	71.95±5.53			
GC	0.77	118.54±4.02	154.83±9.10				0.36	31.04±1.20	84.57±5.08
GSC	0.58	92.19±3.51	159.46±10.52	0.69	51.15±2.53	74.39±6.37	0.19	14.90±0.28	86.38±5.79

2 结果与讨论

在试验初始时,不同养殖模式上覆水和间隙水中各营养盐无显著差异($P \leq 0.05$)。上覆水及间隙水营养盐的初始背景值见表 2。

表 2 上覆水及间隙水各营养盐初始背景值(平均值±标准差)
Table 2 The content of nutrient in overlying water and pore water at initial experiment (Mean±SD) (mg/L)

	NH ₄ -N	NO ₃ -N	NO ₂ -N	PO ₄ -P
上覆水 Overlying water	0.036±0.008	0.134±0.051	0.261±0.027	0.494±0.011
0~3 cm	0.721±0.098	0.346±0.060		0.172±0.064
3~6 cm	0.818±0.134	0.161±0.034		0.081±0.037
6~9 cm	1.087±0.179	0.095±0.015		0.046±0.011
9~12 cm	1.325±0.204	0.107±0.029		0.013±0.011

2.1 上覆水营养盐的分布特征

不同养殖模式下上覆水中营养盐含量的变化见图 1。从图 1 可以看出,整个养殖过程中,上覆水 NH₄-N 的波动范围为 0.056~1.499 mg/L,各模式的 NH₄-N 含量均随养殖时间的延长而增加,单养模式(G)的 NH₄-N 显著低于混养模式(GS、GC 和 GSC) ($P \leq 0.05$)。NO₃-N 与 NO₂-N 的波动范围分别为 0.022~0.228 mg/L、0.049~3.903 mg/L,二者在各养殖模式中的平均值均呈现 G>GS>GSC>GC,且在最高值出现的月份,单养模式(G)显著高于混养模式(GS、GC 和 GSC) ($P \leq 0.05$),但是 NO₃-N 的最高值出现在 8 月份,NO₂-N 的最高值出现在 7 月份。PO₄-P 在 6~9 月份总体上呈下降趋势,10 月份混养模式的 PO₄-P 含量显著增加 ($P \leq 0.05$),而单养模式(G)无明显变化。

上覆水中大部分的氨氮来自沉积物和水界面处新近沉积的、高质量的有机质的矿化分解,小部分来自更深层的有机物的矿化分解(Hargreaves 1998)。本试验作为投饵池塘,随着残饵、代谢物在底部的积累增多,沉积于底质中的含氮有机物不断腐烂转变为 NH₄-N,使得上覆水中 NH₄-N 随养殖时间的延长而增加。上覆水

中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在养殖前期有一定的增加,这是因为养殖前期底层沉积物少而溶氧较高,无 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的积累,有利于硝化反应的进行;而随着养殖时间的延长,增加的底层沉积物的分解消耗了大量氧气,使得底层处于还原态的环境,阻碍了 $\text{NH}_4\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的转变过程, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 作为氧化态物质必会减少。上覆水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 之所以总体上呈下降趋势,可能是因为底泥再悬浮后,水体中溶解氧含量增加,使得因底泥扰动而进入水体中的铁、铝、锰等金属离子被氧化,吸附营养盐能力得到加强;特别是吸附溶解性磷酸盐的能力得到加强,导致水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量下降(秦伯强等 2006)。

从上覆水的营养盐含量可看出,混养模式(GSC 和 GC)比混养模式(GS)、单养模式(G)的氨氮含量高,硝态氮和亚硝态氮含量却很低,这可能是因为鲤鱼对底泥的扰动,使沉积的有机物悬浮,增加了底层的耗氧,抑制了硝化反应的进行。

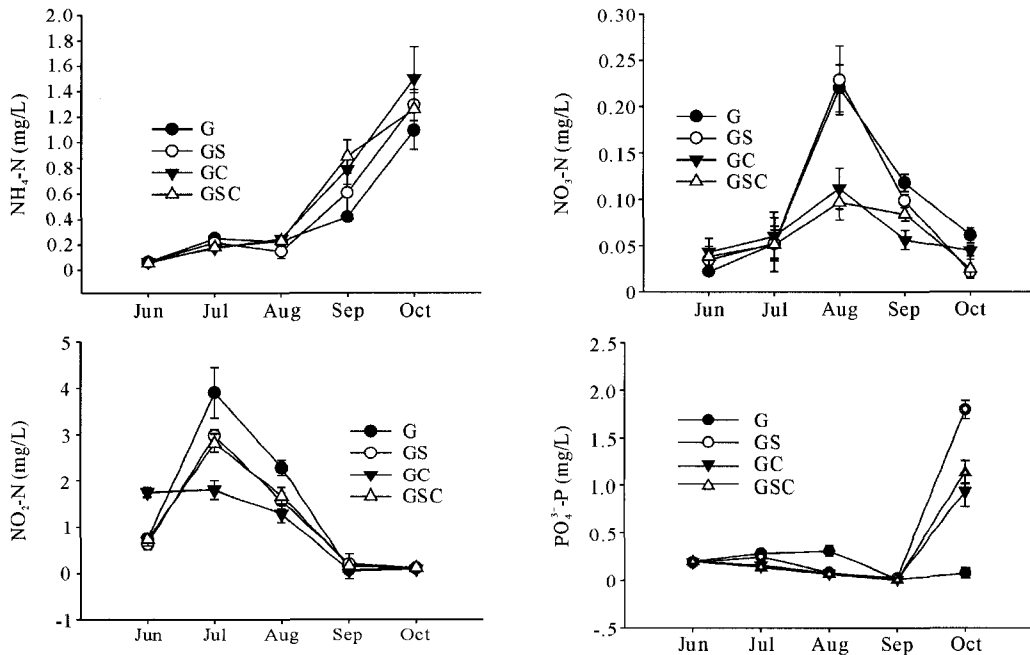


图 1 上覆水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量变化
Fig. 1 Variation of the content of nutrients in the overlying water

2.2 表层间隙水营养盐的分布特征

不同养殖模式表层间隙水(0~3 cm)中的营养盐变化见图 2。从图 2 可以看出,养殖过程中表层间隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的波动范围为 1.76~10.01 mg/L。单养模式(G)在整个试验过程中均与混养模式差异显著($P \leq 0.05$),且波动剧烈,在 8、9 月份高氨氮的现象明显;与上覆水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 不同的是,最高值并没有出现在混养模式(GSC 或 GC),而是出现在单养模式(G)。范成新等(2000)的研究表明,生物对底部的扰动能够促使底泥再悬浮,使间隙水中以及吸附于底泥颗粒上的分子态 NH_3 在底部再悬浮作用下,更易进入上覆水体,部分经物理挥发逸出水面进入大气,较大程度降低了表层底泥中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的含量。因此,混养模式(GSC 和 GC)中鲤鱼对底部的扰动可能是造成其表层间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量低于单养模式(G)的原因。

表层间隙水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变化范围为 0.001~0.022 mg/L;在 7、8 月份各模式的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 无显著差异($P \leq 0.05$),含量较低;混养模式(GS 和 GSC)的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 整体变化趋势相同,波动显著。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的变化范围为 0.014~0.105 mg/L,其含量远高于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量,且二者无相似变化趋势,可能因为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 作为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 之间转化的中间物质,对环境因素比较敏感,采样和样品处理过程中任何一种外界条件的变化都可能引起化学反应的变化而造成 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的积累。混养模式(GC)中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 略高于其他模式,而混养模式(GSC)

中, $\text{NO}_2\text{-N}$ 始终低于其他模式且无明显波动。

表层间隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的变化范围为 $0.02\sim 0.747\text{ mg/L}$ 。在 8、9 月份, 单养模式与混养模式间差异极显著 ($P\leq 0.01$), 混养模式的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 最大值出现在 8 月份, 其他月份基本维持在 0.07 mg/L 左右; 而单养模式的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 最大值出现在 9 月份, 整体波动幅度大。

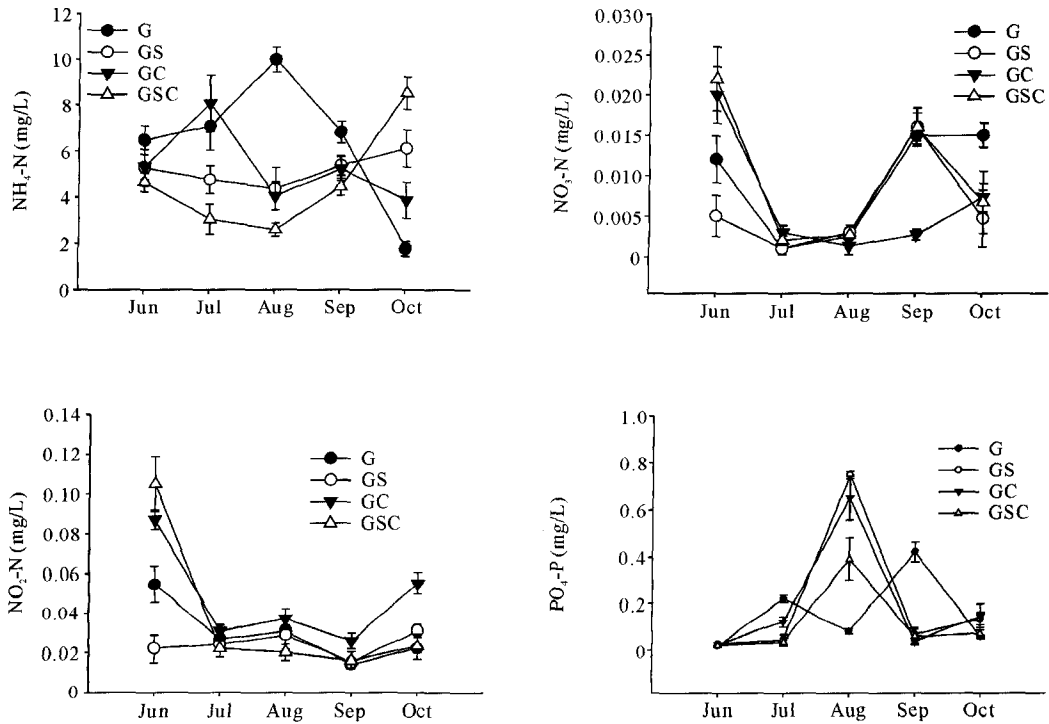


图2 表层间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的含量变化

Fig. 2 Variation of content of nutrients in the pore water of surface sediment

2.3 上覆水与表层间隙水营养盐的关系

各养殖模式的表层间隙水(0~3cm)中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是上覆水中的 10~25 倍, 始终高于上覆水中的 $\text{NH}_4\text{-N}$, 如此大的浓度差, 我们由此可推断出表层间隙水对上覆水有较强的释放能力; 表层间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 则低于上覆水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$, 二者相差 10 倍以上。而表层间隙水和上覆水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量随季节变化明显, 表现为 6、7、10 月上覆水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 高于表层间隙水中的 $\text{PO}_4\text{-P}$, 8、9 月上覆水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 低于表层间隙水中的 $\text{PO}_4\text{-P}$, 这是由间隙水与上覆水中的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 之间的浓度差决定的, 其必然存在由高浓度向低浓度的分子扩散作用, 因此可以看出, 8、9 月有间隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 向上覆水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 扩散的趋势。

2.4 间隙水营养盐的平面分布特征

4 种模式沉积物间隙水中营养盐的平均值与变化范围见表 3。溶解无机氮(DIN, 为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 三氮之和), DIN 浓度变化为 $17.6\sim 99.6\ \mu\text{mol/L}$, 均值的最高值在 G, 最低值在 GS。

间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的最高值出现在混养模式(GC), 显著高于其他 3 种模式 ($P\leq 0.05$)。间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 主要来自有机质的分解作用, 其大小取决于有机物的浓度及其分解速率。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 DIN 中所占比例随养殖时间的增加而增加, 可能因为随着沉积物中易降解的有机质含量增高, 微生物的耗氧降解很容易造成还原环境, 从而促进反硝化反应的发生, 大量生成氨氮, 造成氮的形态和分布的变化(王文强等 2004)。混养模式(GC)的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 所占比例由实验开始时的 3.5% 增加到实验结束时的 92.2%, 增幅最大, 均值最高; 混养模式

(GSC)的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 DIN 中所占比例略高于 G、GS 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 DIN 中所占比例。

间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之和的平均含量顺序为 $\text{GC} > \text{GSC} > \text{G} > \text{GS}$, 变化幅度顺序为 $\text{G} > \text{GC} > \text{GSC} > \text{GS}$ 。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 是 $\text{NH}_4\text{-N}$ 进一步氧化分解的产物, 因此在氧化环境中间隙水的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度将较高。

间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的平均含量顺序为 $\text{GC} > \text{G} > \text{GS} > \text{GSC}$, 变化幅度顺序为 $\text{G} > \text{GC} > \text{GS} > \text{GSC}$ 。

表 3 间隙水中营养盐平均含量及变化范围
Table 3 Average concentrations and ranges of nutrients in pore water ($\mu\text{mol/L}$)

模式 Mode	DIN	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N/DIN}$ (%) 均值(变化范围) Average(range)	$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{PO}_4\text{-P}$
	均值(变化范围) Average(range)	均值(变化范围) Average(range)		均值(变化范围) Average(range)	均值(变化范围) Average(range)
G	55.1(19.8~99.6)	22.7(3.4~60.6)	35.6(5.94~87.1)	32.4(3.2~85.7)	1.7(0.05~17.63)
GS	51.0(17.6~77.8)	25.9(3.5~71.7)	36.5(6.77~91.3)	25.1(2.5~65.6)	1.0(0.03~7.97)
GC	53.5(42.4~85.8)	30.8(3.6~83.3)	41.5(3.52~92.2)	22.6(2.0~40.2)	1.8(0.14~8.82)
GSC	53.8(19.4~72.8)	29.1(3.1~70.0)	38.8(5.90~90.3)	24.7(2.8~62.1)	0.9(0.03~4.61)

2.5 间隙水营养盐的垂直分布特征

2.5.1 $\text{NH}_4\text{-N}$

不同养殖模式沉积物间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的垂直分布见图 3。间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在 0.932~10.38 mg/L 之间变化。在单养模式, 除 10 月份外的其他月份间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量均随深度的增加而减少。范成新等(1998)分析在沉积物中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的存在主要与沉积物污染水平、生物作用大小、氧化还原状况及水动力影响程度等多种条件有关, 在污染水域, 沉积物中有机质丰富, 表层微生物数量众多, 由于生物分解作用显著而使近表层沉积物缺氧, 容易形成还原环境, 生物参与的反硝化作用和氨化作用较为明显, 使表层间隙水中接纳更多的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进入。混养模式(GS)在同一月份内不同深度的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量差别较小, 可能是表层下的底泥中吸附态的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 不能有效扩散至间隙水中; 混养模式(GC)间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量在整个实验过程中波动紊乱, 无明显规律, 这可能与鲤鱼使底泥始终处于扰动状态有关; 混养模式(GSC)间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量除 10 月份外, 其他月份呈现先增加后减小的趋势。人工养殖池塘的底质与自然水体的底质不同, 人工养殖池塘在放苗前会进行清塘及底质处理, 因此人工养殖池塘沉积物中营养盐的分布与自然水体的沉积物营养盐分布不同。

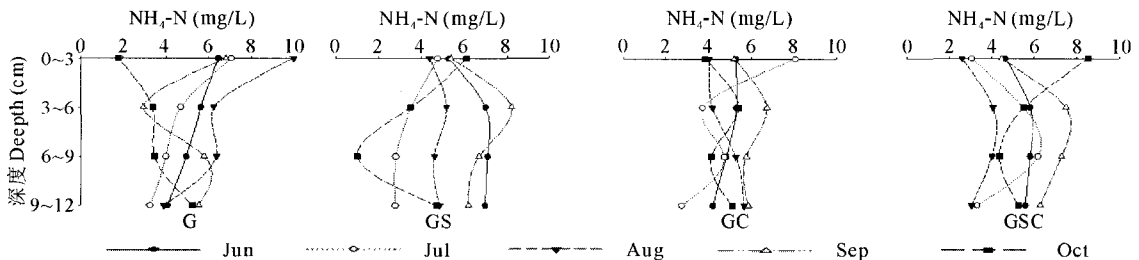


图 3 不同养殖模式沉积物间隙水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of $\text{NH}_4\text{-N}$ in sediment pore water of the different culture modes

2.5.2 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$

不同养殖模式沉积物间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 的垂直分布见图 4。间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 含量在 0.013~0.176 mg/L 之间变化, 总体上呈现先增加后减少的趋势。单养模式(G)和混养模式(GS)间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 含量的最大值出现在 3~6 cm 处, 混养模式(GC)的最大值出现在 6~9 cm 处, GSC 的最大值

随着养殖时间的增加由 6~9 cm 处逐渐转移到 9~12 cm 处。

范成新等(2000)认为相对于上层,下层沉积物通常缺氧程度较高,不仅适宜于厌氧微生物活动,而且适宜于反消化和氨化作用,自高价态($\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 等)向铵态氮等低价态氮转化;宋金明等(2004)认为沉积物中吸附态 $\text{NO}_3\text{-N}$ 主要来自上覆水,其 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的分布受上覆水中浓度和分布的影响;由于硝化作用受制于沉积物中可渗透的氧气含量,通常发生在表层沉积物几厘米之内(赖利等 1984)。尤其是沉积物中营养盐浓度的变化可能是长期积累的结果,与底质本身存在密切联系,可能不是本次养殖试验的直接结果,因此多方面原因导致养殖池塘内 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 的特征分布。

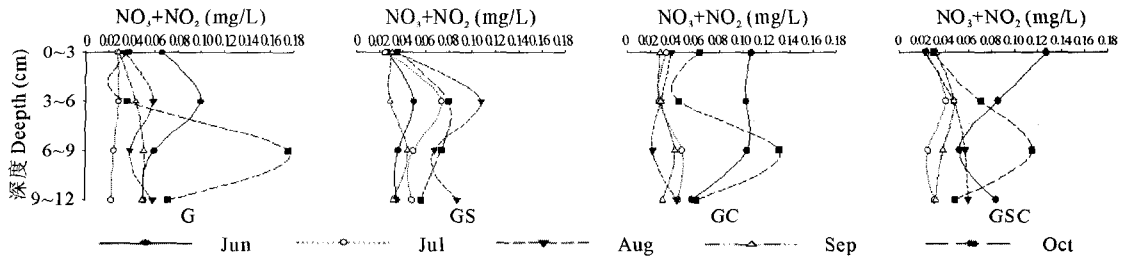


图4 不同养殖模式沉积物间隙水中 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 的垂直分布

Fig. 4 The vertical distribution of $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ in sediment pore water of the different culture modes

2.5.3 $\text{PO}_4\text{-P}$

不同养殖模式沉积物间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的垂直分布见图5。间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度在 0.003~1.67 mg/L 之间变化,均值为 0.078 mg/L。总体呈现 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度随深度的增加而减少的变化趋势。混养模式中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量峰值的出现较单养模式提前 30 d。

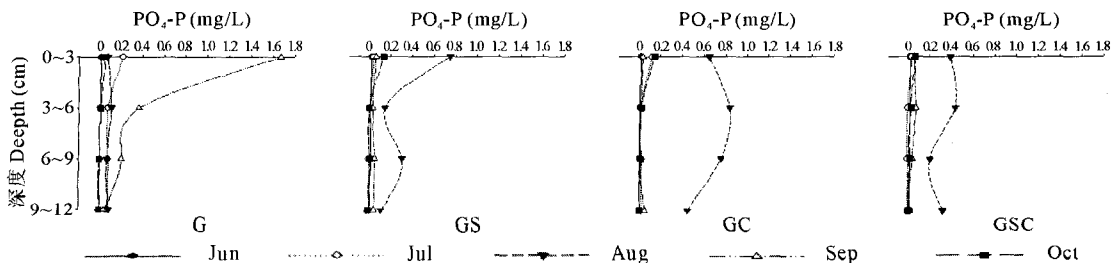


图5 不同养殖模式沉积物间隙水中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的垂直分布

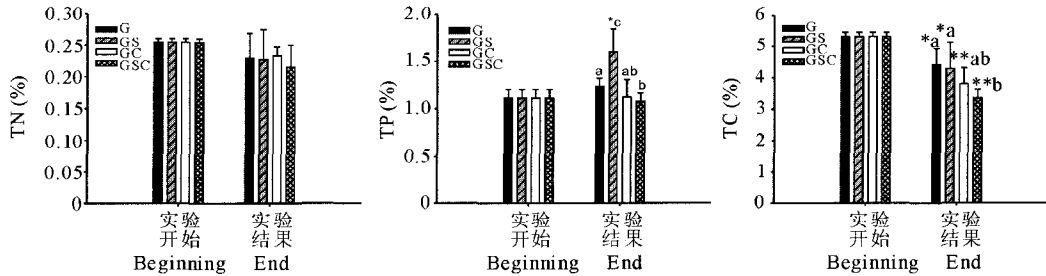
Fig. 5 The vertical distribution of $\text{PO}_4\text{-P}$ in sediment pore water of the different culture modes

2.6 沉积物中 TN、TP、TC 的对比

不同养殖模式下沉积物中 TN、TP、TC 含量的变化见图6。从图6可以看出,实验结束时,TN 含量有所降低,但不同模式间无显著性差异($P \leq 0.05$);混养模式(GS)TP 含量则显著增加($P \leq 0.05$),单养模式(G)、混养模式(GSC 和 GC)则变化不大;但4种模式下沉积物 TC 含量有显著减少($P \leq 0.05$),以混养模式(GSC)的减少幅度最大。Blackburn等(1998)分析,海水养殖鱼塘沉积物扩散到水体中的溶解性物质中的30%是由于鱼类的索食扰动造成的。因此,鲤鱼对底质的扰动可有效地减少底质污染。

3 结论

(1)上覆水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的含量单养模式(G)低于混养模式,但在表层间隙水的营养盐变动中,单养模式(G)的氨氮含量高于混养模式,且在养殖过程中各营养盐的波动比混养模式剧烈。整个实验过程中,间隙水营养盐的变化幅度最大。



注: * 表示相同模式开始与结束相比,差异显著($P \leq 0.05$),未标 * 者表示差异不显著($P > 0.05$);

不同字母表示实验结束时模式间差异显著($P \leq 0.05$)

Note: Data with asterisk indicate beginning and end of the experiment in the same model are significantly different ($P \leq 0.05$), and the data without asterisk are not significantly different ($P > 0.05$);

data with different letter indicate data among models at the end of experiment are significantly different ($P \leq 0.05$)

图 6 实验起止沉积物中 TN、TP、TC 的变化

Fig. 6 The variation of TN, TP, and TC in sediment for the different culture modes

(2) 表层间隙水的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量是上覆水的 10~25 倍,推测表层间隙水对上覆水有较强的释放能力。

(3) 从间隙水的平面分布及垂直分布上看,在 0~15 cm 内, $\text{NH}_4\text{-N}$ 与沉积物深度无明显规律,而 $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 则随深度的增加而减少。混养模式对沉积物间隙水中营养盐含量的影响明显大于单养模式。

(4) 混养模式尤其是 GSC 能有效减少养殖过程中有机物的积累,降低底层中的潜在氨氮含量,是一种较为合理的草鱼复合养殖模式。

参 考 文 献

- 王文强,温玻茂,柴士伟. 2004. 养殖水体沉积物中氮的形态、分布及环境效应. 水产科学, 23(1): 29~33
- 孙 刚,盛连喜,千贺裕太郎. 2006. 生物扰动在水层-底栖界面耦合中的作用. 生态环境学报, 15(5): 1 106~1 110
- 孙 刚,房 岩,韩德复,吕 明. 2008. 水丝蚓对水田沉积物颗粒垂直分布的生物扰动作用. 长春师范学院学报(自然科学版), 27(4): 59~61
- 孙 耀,宋云利,崔 毅. 1993. 丁字湾沉积物间隙水中氮、磷营养盐的分布及其在沉积物-水界面的扩散通量. 海洋水产研究, 14: 105~112
- 曲克明,崔 毅,辛福言,陈民山,宋云利,袁有宪. 2002. 莱州湾东部养殖水域氮磷营养盐的分布与变化. 海洋水产研究, 23(1): 37~46
- 刘光菘. 1996. 土壤理化性质与剖面描述. 北京: 中国标准出版社
- 刘 敏,许世远,侯立军. 2007. 长江口潮滩沉积物-水界面营养盐环境生物地球化学过程. 北京: 科学出版社, 2~6
- 李德尚,杨红生,王吉桥,卢敬让,田相利,刘国才. 1998. 一种池塘陆基实验围隔. 青岛海洋大学学报, 28(2): 199~204
- 张继红,王 巍,蒋增杰,方建光,王诗欢,臧有才,薛素艳. 2009. 獐子岛养殖海域氮、磷的分布特征. 渔业科学进展, 30(6): 88~96
- 沈春宁,蒋增杰,崔 毅,陈碧鹃. 2007. 唐岛湾网箱养殖区水体氮、磷含量特征及潜在性富营养化评价. 海洋水产研究, 28(3): 98~104
- 宋金明,马红波,李学刚,袁华茂,李 宁. 2004. 渤海南部海域沉积物中吸附态无机氮的地球化学特征. 海洋与湖沼, 35(4): 315~322
- 国家环境保护总局. 2002. 水和废水监测方法. 第 4 版, 北京: 中国环境科学出版社
- 范成新,杨龙元,张 路. 2000. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 12(4): 359~366
- 范成新. 1998. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面物质交换. 湖泊科学, 10(1): 53~58
- 徐文彦,齐子鑫,赵永军,唐国盘. 2006. 草鱼池塘集约化养殖模式研究与分析. 郑州牧业工程高等专科学校学报, 26(2): 7~9
- 秦伯强,杨柳燕,陈非洲,朱广伟,张 路,陈宜瑜. 2006. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 51(16): 1 857~1 866
- 赖利 J. P., 切斯特 R. 1984. 化学海洋卷(第六卷). 赵其渊,王 琦,林振宏译. 北京: 海洋出版社
- Berelson, W. M., Heggie, D., Longmore, A. *et al.* 1998. Benthic nutrient recycling in Port Phillip Bay. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 46: 917~934
- Blackburn, T. H., Lund, B. A., and Krom, M. D. 1998. C- and N-mineralization in the sediments of earthen marine fishponds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 44: 221~227
- Hargreaves, J. A. 1998. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture*, 166: 181~212