

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14255

草鱼与鲢、鲤不同混养模式系统的氮磷收支

孙云飞¹, 王芳¹, 刘峰², 董双林¹

1. 中国海洋大学 教育部海水养殖重点实验室, 山东 青岛 266003;

2. 山东省淡水水产研究所, 山东 济南 250117

摘要: 采取陆基围隔实验法, 选用草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鲤(*Cyprinus carpio*)研究不同养殖模式系统氮磷的收支。实验于 2011 年 5 月开始, 10 月结束, 实验周期为 6 个月, 每月定期采样, 围隔面积为 7 m×7 m。分别测定了草鱼单养(G 组)、草鱼-鲢混养(GS 组)、草鱼-鲤混养(GC 组)、草鱼-鲢-鲤混养(GSC1、GSC2)系统氮磷的输入和输出, 并分析了不同养殖模式水体和底泥氮磷的积累情况。主要实验结果为: (1)不同养殖模式下, 饵料氮磷的输入是系统氮磷输入的主要途径, 分别占总输入的 85.54%~93.38%和 82.60%~84.26%, 其余为放养生物、降水和初始水层。(2)不同养殖模式下, 系统氮的输出依次为养殖生物收获、底泥积累、水层积累、围隔布吸附和氨挥发, 所占比例分别为 62.80%~77.15%、15.19%~27.60%、5.04%~7.71%、1.54%~2.14%和 0.22%~0.30%; 系统磷的输出依次为底泥积累、水层积累、养殖生物收获、围隔布吸附, 所占比例分别为 76.46%~80.04%、13.04%~15.14%、4.09%~9.79%、0.71%~1.16%。(3)不同养殖模式下, 底泥氮积累量 GSC1 组和 GSC2 组显著低于 G 组、GS 组和 GC 组($P<0.05$), 而磷积累量 GSC1 组和 GSC2 组显著低于 G 组和 GS 组($P<0.05$); 水体氮磷积累量 GSC2 组显著低于 G 组($P<0.05$)。 (4)系统氮磷利用率 GSC2 组显著高于 G 组、GC 组和 GSC1 组($P<0.05$)。实验结果表明, GSC2 组(草鱼 0.38 ind/m²、鲢 0.69 ind/m²和鲤 0.55 ind/m²)能有效降低系统氮磷的积累, 提高氮磷的利用率, 是一种高效清洁的草鱼混养模式。

关键词: 草鱼; 鲢; 鲤; 混养系统; 氮; 磷; 收支

中图分类号: S964

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)03-0450-10

池塘养殖在我国淡水养殖中占有重要的地位。根据 2013 年《中国渔业统计年鉴》报道, 2012 年我国淡水养殖年产量达 2 644.54 万 t, 池塘养殖产量占其中的 70.58%^[1]。而草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)又是我国主要淡水池塘养殖种类之一, 2012 年年产量达 478.17 万 t, 在淡水鱼产量中居首位^[1]。随着市场需求的增加, 草鱼的养殖规模也逐年扩大, 放养密度日益增加, 并大量投喂外源性饵料、肥料, 致使水中氮、磷含量升高, 透明度下降, 水体富营养化加重^[2-3]。养殖环境的恶化, 导致鱼类病害增加^[4-6]、养殖产量下降等问题, 一定

程度上影响了草鱼集约化养殖产业的持续发展。

综合养殖是根据生态平衡、物种共生互利和对物质的多营养层次利用等生态学原理, 将生态互利的虾、鱼、贝、藻等多种养殖种类按一定数量关系在同一水体中进行养殖的一种生产形式^[7]。国内外许多学者对草鱼与其他一些品种的混养做了大量研究^[8-12]。研究发现, 草鱼池塘通过混养不同的物种, 可以提高营养物质利用率, 改善养殖水环境, 提高草鱼成活率, 减少流行病害的发生^[8, 13-14]。

在水域生态系统中, 氮磷通常被认为是浮游生物生长的限制性营养元素^[15]。养殖系统内氮磷

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-10-07.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2009CB118706); 山东省自然科学基金项目(ZR2014CM042).

作者简介: 孙云飞(1988-), 男, 博士研究生. E-mail: 13516124352@163.com

通信作者: 王芳, 教授. Tel: 0532-82032435; E-mail: wangfang249@ouc.edu.cn

收支及氮磷的利用率常作为评价养殖模式优劣的重要指标^[16], 并且氮磷收支可以量化养殖水体和底泥的潜在污染水平^[17]。目前, 关于养殖鱼类如斑点叉尾鮰(*Ictalurus punctatus*)^[18]、斑纹鲈(*Morone saxatilis*)^[19]、尼罗罗非鱼(*Onwchrornis nilotieus*)^[20]和凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[21]、斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[22]、中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)^[15]池塘养殖的氮磷收支研究已有报道, 但关于草鱼不同养殖模式系统氮磷收支的研究还未见详细报道。

本研究采用陆基围隔实验法设计了草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)与鲢和鲤混养的 5 种养殖模式, 分别为草鱼单养(G)、草鱼-鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)混养、草鱼-鲤(*Cyprinus carpio*)混养、草鱼-鲢-鲤混养系统氮磷的收支, 通过

比较其不同养殖模式下底泥和水中氮磷积累情况以及系统氮磷的利用率, 以期草鱼养殖结构的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验地点与苗种来源

实验于 2011 年 5—10 月在山东省淡水水产研究所(山东济南)进行。围隔建于面积 0.27 hm² (90 m×30 m), 平均水深为 1.5 m 的淡水池塘中。塘内共设有围隔 15 个, 每个围隔面积为 49 m² (7 m×7 m), 围隔采用聚乙烯编织布围成, 具体结构参见文献[23]。每个围隔均有气石 4 个, 气石通过塑料管与充气泵(2 kW)相连, 连续充气。

草鱼、鲢和鲤苗种购于山东省淡水水产研究所, 苗种规格见表 1。

表 1 草鱼、鲢、鲤不同混养处理组设置
Tab. 1 The designment of *Ctenopharyngodon idellus*, *Hypophthalmichthys molitrix* and *Cyprinus carpio* in different polyculture treatments

n=3; $\bar{x} \pm SD$

处理 treatment	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>		鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>		鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	
	密度/ind·m ⁻² density	规格/(g·ind ⁻¹) individual weight	密度/(ind·m ⁻²) density	规格/(g·ind ⁻¹) individual weight	密度/ind·m ⁻² density	规格/(g·ind ⁻¹) individual weight
G	0.95	79.43±4.91	—	—	—	—
GS	0.77	81.14±6.22	0.45	181.06±29.31	—	—
GC	0.77	82.89±1.32	—	—	0.45	143.08±6.01
GSC1	0.58	81.55±1.03	0.23	145.45±16.39	0.55	148.12±16.97
GSC2	0.38	80.07±4.02	0.69	154.55±5.46	0.55	146.91±11.91

注: G 为草鱼单养; GS 为草鱼-鲢混养; GC 为草鱼-鲤混养; GSC 为草鱼-鲢-鲤混养。
Note: G denotes *C. idellus* monoculture; GS denotes *C. idellus* and *H. molitrix* polyculture; GC denotes *C. idellus* and *C. carpio* polyculture; GSC denotes *C. idellus*, *H. molitrix*, and *C. carpio* culture systems.

1.2 实验设计

实验设草鱼单养(G)、草鱼-鲢混养(GS)、草鱼-鲤混养(GC)和草鱼-鲢-鲤(GSC1、GSC2)混养模式, 共 5 个处理, 每个处理设 3 个重复, 以草鱼单养组为对照, 具体放养情况见表 1。

1.3 养殖管理

实验期间, 每天 8:00、10:00、13:00 和 16:00 投喂“海大牌”草鱼膨化配合饲料, 每天观察摄食情况及残饵量, 并根据天气情况、水温 and 草鱼生长情况及时调整投喂量, 每个围隔在实验结束时投入相同质量的饵料。每天 19:00 至次日凌晨开

增氧机, 同时根据天气状况调整充气时间与时长。整个实验期间除根据需要补充因蒸发、渗透及采样而丢失的水以外, 一直不换水。实验共持续 154 d。

1.4 样品的采集与分析

在实验开始、结束和每月 15 日 08:00 左右采水样, 每个围隔设 3 个采样点, 用有机玻璃采水器采集表层 30~50 cm 水样 1 L, 混合均匀后分别进行硝态氮 NO₃⁻-N、亚硝氮 NO₂⁻-N、氨氮 NH₄⁺-N(以此计算非离子氨浓度)、活性磷酸盐(PO₄-P)、总氮(TN)和总磷(TP)含量的测定, 用于

监测围隔内养殖水体水质指标变化情况,其中硝态氮的测定采用锌-镉还原法,亚硝态氮的测定采用重氮-偶氮光度法,氨氮测定采用纳氏试剂法^[24],活性磷酸盐的测定采用钼蓝法,总氮总磷测定采用 $K_2S_2O_8$ 氧化法^[25]。

分别于养殖生物放养、收获前采集底泥和生物样本。采用徐继荣设计的无扰动底泥采集器^[26]采集无扰动底泥样品(表层 5 cm),采样管($d=5$ cm, $h=33$ cm)可用完后卸下,将 3 个采样点的底泥样品混合均匀后,于烘箱中 60℃ 烘干,研细,经 100 目筛绢过滤后用元素分析仪(Elementar III)测定 TN,用酸溶-钼锑抗比色法^[27]测定 TP。

饲料、实验鱼肌肉于 60℃ 烘干,用研钵研细,经 100 目筛绢过滤后分析 TN 和 TP 含量,测定方法同底泥样品。

养殖期间,用带刻度容器接自然降雨,估算降雨量,同时测定雨水中 TN 和 TP 含量^[25]。

氨的挥发量根据 Blain 公式和 Weilter 的物质转化系数^[28]推算。氨挥发量计算: $F=K \times (NH_3)^{[22]}$,其中, F 为气液界面氨的通量; (NH_3) 为非离子氨浓度(由测定的 TAN 及其他参数计算求得); K 为物质转化系数(cm/h): $K=1.01+0.33U$ (U 为风速, m/s)。

$N、P$ 利用率=养殖生物净产量的 $N、P$ 含量/系统输入的 $N、P$ 总量 $\times 100\%$

1.5 数据处理

使用 SPSS19.0 软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 检验,以 $P<0.05$ 作为差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 各实验组的收获情况

如表 2 所示,收获时,草鱼、鲢和鲤的收获规格分别为 1 011.67~1 023.85 g/ind、1 162.33~1 182.67 g/ind 和 701.33~726.00 g/ind,各处理组之间差异均不显著,其存活率各处理组间差异也不显著($P>0.05$);而净产量各处理组存在显著差异($P<0.05$),主要是因为养殖初期各组间放养密度(表 1)不同造成。

2.2 养殖期间的水质变化

整个养殖过程中水温变化范围为 17.1~34℃,

水体 pH 的变化范围是 7.00~8.42,不同处理组养殖过程中水质变化情况见表 3,硝酸氮的变化范围为 0.12~0.64 mg/L,亚硝酸氮的变化范围 0.01~0.07 mg/L,总氨氮的变化范围为 0.29~2.45 mg/L,活性磷酸盐的变化范围为 0.01~0.50 mg/L。

2.3 不同养殖模式下系统的氮磷输入

不同养殖模式下系统氮磷输入见表 4。从表 4 中可以看出,饲料输入氮磷分别占系统输入氮磷总量的 85.54%~93.38%和 82.60%~84.26%,为主要部分;生物输入氮磷量、降水输入氮磷量和养殖初期水层氮磷量为次要部分。

实验中每个围隔投入饲料量相同,池塘用水来自同一水源,因此饲料输入氮磷和初始水层输入氮磷不同模式间无差异;降水输入氮磷也没有区别。

由于各处理组中放养的草鱼、鲢和鲤比例不同,并且不同生物体氮磷含量不同,因此不同处理组生物输入的氮磷量也不同。其中, G 组生物输入氮磷量分别为 (1.54 ± 0.09) g/m² 和 (0.19 ± 0.01) g/m²,为最低值; GSC2 组生物输入氮磷量分别为 (4.60 ± 0.17) g/m² 和 (0.30 ± 0.04) g/m²,为最高值; GSC1 组次之;而 GS 组和 GC 组介于 G 组和 GSC 组之间。

2.4 不同养殖模式下系统的氮磷输出

不同养殖模式下系统氮磷输出见表 5。从表 5 中可以看出,生物生产氮量和底泥积累氮量分别占氮输出的 62.80%~77.15%和 15.19%~27.60%,为主要部分;水层氮含量、氨挥发量和围隔布吸附氮量分别占系统氮输出总量的 5.04%~7.71%、0.22~0.30%和 1.54%~2.14%,为次要部分。不同养殖模式下底泥积累磷占磷总输出的 76.46%~80.04%,为主要部分,其余部分所占磷总输出比例较小,为次要部分。

从表 4 中可以看出,实验结束时生物生产氮量不同养殖模式间差异显著($P<0.05$)。其中, GSC2 组生物生产氮量最高,显著高于其他各处理组,而 G 组最低,显著低于其他各处理组,围隔布吸附氮量各模式间存在一定的差异,以 G 组最低,且与 GS 组相比差异显著($P<0.05$)。氨挥发输出的氮量各模式间差异不明显($P>0.05$)。

表 2 各养殖模式的收获情况
Tab. 2 Harvest information on cultured aquatic species under different culture modes

模式 treatment	草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>			鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>			鲤 <i>Cyprinus carpio</i>		
	收获规格/(g·ind ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	成活率/% survival rate	收获规格/(g·ind ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	成活率/% survival rate	收获规格/(g·ind ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	成活率/% survival rate
G	1016.67±140.16	9750.94±2899.98 ^d	97.92±2.09	—	—	—	—	—	—
GS	1011.67±170.64	7640.76±2508.14 ^e	97.37±2.63	1182.67±63.06	5148.94±285.71 ^b	96.97±2.63	—	—	—
GC	1013.06±119.54	7650.96±2122.43 ^e	95.37±8.64	—	—	—	702.33±8.02	3057.12±91.84 ^a	96.97±2.63
GSC1	1018.33±208.36	5448.94±1716.31 ^b	97.53±2.14	1181.67±22.90	2330.59±542.85 ^a	96.67±5.77	701.33±9.87	3720.38±148.98 ^b	96.30±3.71
GSC2	1023.85±230.95	7591.78±1216.32 ^a	94.74±5.27	1162.33±37.29	7591.78±2193.86 ^c	96.97±3.03	726.00±19.00	3804.05±181.63 ^b	95.07±2.14

注: 同一列中标有不同字母表示相互差异显著($P<0.05$). G 为草鱼单养; GS 为草鱼-鲢混养; GC 为草鱼-鲤混养; GSC 为草鱼-鲢-鲤混养.
Note: Items with different letters are significantly different ($P<0.05$). G denotes *C. idellus* monoculture; GS denotes *C. idellus* and *H. molitrix* polyculture; GC denotes *C. idellus* and *C. carpio* polyculture; GSC denotes *C. idellus*, *H. molitrix*, and *C. carpio* culture systems.

表 3 实验期间各养殖模式的水质变化状况
Tab.3 Water quality under different culture modes during the experimental period

指标 parameter	养殖模式 treatment				
	G	GS	GC	GSC1	GSC2
温度/℃ temperature	17.1–32.3	17.1–32.3	17.1–32.3	17.1–32.3	17.1–32.3
pH	7.15–8.24	7.07–8.25	7.00–8.20	7.01–8.29	7.11–8.42
硝酸氮/(mg·L ⁻¹) Nitrate nitrogen	0.15–0.53	0.13–0.64	0.14–0.62	0.13–0.53	0.12–0.60
亚硝酸氮/(mg·L ⁻¹) Nitrite nitrogen	0.02–0.04	0.01–0.07	0.01–0.05	0.01–0.07	0.01–0.06
总氮氮/(mg·L ⁻¹) Total ammonia nitrogen	0.29–2.45	0.38–1.32	0.25–1.22	0.47–1.12	0.51–1.17
活性磷/(mg·L ⁻¹) phosphate	0.02–0.47	0.02–0.50	0.01–0.15	0.01–0.20	0.01–0.12

注：表中数值表示为最小–最大值。G 为草鱼单养；GS 为草鱼–鲢混养；GC 为草鱼–鲤混养；GSC 为草鱼–鲢–鲤混养。

Note: Figures in the table are expressed as min–max. G denotes *C. idellus* monoculture; GS denotes *C. idellus* and *H. molitrix* polyculture; GC denotes *C. idellus* and *C. carpio* polyculture; GSC denotes *C. idellus*, *H. molitrix*, and *C. carpio* culture systems.

表 4 不同养殖模式的氮磷输入
Tab. 4 The inputs of nitrogen and phosphorus under different culture modes

$n=3$; $\bar{x} \pm SD$

项目 item	处理 treatment	来源 source				
		饲料/(g·m ⁻²) feed	生物/(g·m ⁻²) animals	降水/(g·m ⁻²) rain	水层/(g·m ⁻²) water	总量/(g·m ⁻²) TN
N	G	41.81±3.76	1.54±0.09 ^a	1.23±0.05	1.08±0.16	45.63±3.73
	GS	41.81±3.76	3.05±0.26 ^b	1.23±0.05	1.08±0.16	47.13±3.74
	GC	41.81±3.76	2.64±0.06 ^c	1.23±0.05	1.08±0.16	46.73±3.74
	GSC1	41.81±3.76	3.36±0.15 ^d	1.23±0.05	1.08±0.16	47.21±3.57
	GSC2	41.81±3.76	4.60±0.17 ^c	1.23±0.05	1.08±0.16	50.73±3.73
P	G	4.40±0.44	0.19±0.01 ^a	0.22±0.05	0.42±0.03	5.22±0.45
	GS	4.40±0.44	0.22±0.03 ^b	0.22±0.05	0.42±0.03	5.25±0.49
	GC	4.40±0.44	0.22±0.01 ^b	0.22±0.05	0.42±0.03	5.26±0.47
	GSC1	4.40±0.44	0.28±0.02 ^c	0.22±0.05	0.42±0.03	5.31±0.45
	GSC2	4.40±0.44	0.30±0.04 ^d	0.22±0.05	0.42±0.03	5.33±0.44

注：同一列中标有不同字母表示相互差异显著($P<0.05$)。G 为草鱼单养；GS 为草鱼–鲢混养；GC 为草鱼–鲤混养；GSC 为草鱼–鲢–鲤混养。

Note: Items with different letters are significantly different($P<0.05$). G denotes *C. idellus* monoculture; GS denotes *C. idellus* and *H. molitrix* polyculture; GC denotes *C. idellus* and *C. carpio* polyculture; GSC denotes *C. idellus*, *H. molitrix*, and *C. carpio* culture systems.

表 5 不同养殖模式的氮磷输出
Tab. 5 The outputs of nitrogen and phosphorus under different culture modes

$n=3$; $\bar{x} \pm SD$

项目 item	处理 treatment	水层/(g·m ⁻²) water	氨挥发/(g·m ⁻²) volatilization	吸附/(g·m ⁻²) absorption	生物/(g·m ⁻²) animals	底泥积累/(g·m ⁻²) sediment	总量/(g·m ⁻²) TN
N	G	2.86±0.29 ^a	0.10±0.01	0.64±0.16 ^a	23.34±0.68 ^a	10.25±1.13 ^b	37.19±0.68 ^a
	GS	2.57±0.13 ^{ab}	0.10±0.02	0.94±0.15 ^b	30.35±1.07 ^b	9.75±1.07 ^b	43.72±0.42 ^b
	GC	2.66±0.23 ^{ab}	0.11±0.01	0.68±0.12 ^{ab}	24.70±0.64 ^c	9.12±0.85 ^b	37.26±0.64 ^a
	GSC1	2.53±0.11 ^{ab}	0.08±0.02	0.76±0.15 ^{ab}	27.32±0.69 ^d	6.96±0.78 ^a	37.66±0.69 ^a
	GSC2	2.39±0.17 ^b	0.09±0.01	0.73±0.11 ^{ab}	37.08±0.65 ^c	7.21±1.03 ^a	47.51±0.65 ^c
P	G	1.13±0.05 ^d	—	0.05±0.01 ^a	0.30±0.07 ^a	5.96±0.79 ^b	7.45±0.89 ^b
	GS	0.98±0.01 ^c	—	0.09±0.02 ^b	0.46±0.02 ^c	5.86±0.68 ^b	7.39±0.71 ^b
	GC	0.88±0.01 ^b	—	0.05±0.01 ^a	0.36±0.05 ^{ab}	4.95±0.57 ^b	6.24±0.62 ^a
	GSC1	0.86±0.01 ^{ab}	—	0.06±0.01 ^a	0.41±0.01 ^{bc}	4.81±0.47 ^{ab}	6.14±0.52 ^a
	GSC2	0.79±0.06 ^a	—	0.04±0.01 ^a	0.60±0.05 ^d	4.65±0.60 ^a	6.08±0.70 ^a

注：同一列中标有不同字母表示相互差异显著($P<0.05$)。G 为草鱼单养；GS 为草鱼–鲢混养；GC 为草鱼–鲤混养；GSC 为草鱼–鲢–鲤混养。

Note: Items with different letters are significantly different($P<0.05$). G denotes *C. idellus* monoculture; GS denotes *C. idellus* and *H. molitrix* polyculture; GC denotes *C. idellus* and *C. carpio* polyculture; GSC denotes *C. idellus*, *H. molitrix*, and *C. carpio* culture systems.

不同养殖模式下水体总氮的积累如表3、表4所示,养殖初期各处理水体的总氮含量为 $(1.08 \pm 0.16) \text{ g/m}^2$,到养殖末期,G组、GS组、GC组、GSC1组和GSC2组水体总氮含量分别升至 $(2.86 \pm 0.29) \text{ g/m}^2$ 、 $(2.57 \pm 0.13) \text{ g/m}^2$ 和 $(2.66 \pm 0.23) \text{ g/m}^2$ 、 $(2.53 \pm 0.11) \text{ g/m}^2$ 和 $(2.39 \pm 0.17) \text{ g/m}^2$ 。其中,GSC2组水体氮的积累量显著低于G组($P < 0.05$),其他处理组差异不显著($P > 0.05$)。

不同养殖模式下底泥氮的积累情况如表4所示,养殖初期,围隔底泥的氮含量为 $(115.34 \pm 1.03) \text{ g/m}^2$,养殖末期,G组、GS组和GC组、GSC1组和GSC2组底泥的氮含量分别为 $(125.59 \pm 1.13) \text{ g/m}^2$ 、 $(125.09 \pm 1.07) \text{ g/m}^2$ 和 $(124.46 \pm 0.85) \text{ g/m}^2$ 、 $(122.43 \pm 0.78) \text{ g/m}^2$ 和 $(122.55 \pm 1.03) \text{ g/m}^2$ 。其中,GSC1组和GSC2组底泥中氮的积累量皆显著低于G组、GS组和GC组($P < 0.05$)。

实验结束时生物生产磷量不同养殖模式间存在差异。其中,GSC2组生物生产磷量显著高于其余各处理组($P < 0.05$),而G组显著低于其他各处理组($P < 0.05$),GC组与GSC1组之间差异不显著($P > 0.05$)。围隔布吸附磷量GS组显著低于其他各处理组($P < 0.05$)。

不同养殖模式下水体总磷的积累从表3、表4中可以看出,养殖初期各处理水体总磷的含量为 $(0.42 \pm 0.03) \text{ g/m}^2$,养殖期间,G组水体磷积累量为 $(0.71 \pm 0.05) \text{ g/m}^2$,GS组和GC组水体磷积累量分

别为 $(0.56 \pm 0.06) \text{ g/m}^2$ 和 $(0.46 \pm 0.09) \text{ g/m}^2$,GSC1组和GSC2组水体磷积累量分别为 $(0.44 \pm 0.04) \text{ g/m}^2$ 和 $(0.38 \pm 0.06) \text{ g/m}^2$ 。其中,GS组和GC组的磷积累量显著低于G组($P < 0.05$),GSC1组和GSC2组显著低于GS组、GC组和G组($P < 0.05$),而GSC1组与GSC2组差异不显著($P > 0.05$)。

不同养殖模式下底泥磷的积累情况如表4所示。养殖初期,围隔底泥的磷含量为 $(13.33 \pm 0.81) \text{ g/m}^2$,养殖末期,G组底泥磷积累量为 $(5.96 \pm 0.79) \text{ g/m}^2$,GS组和GC组底泥磷积累量为 $(5.86 \pm 0.68) \text{ g/m}^2$ 和 $(4.95 \pm 0.57) \text{ g/m}^2$,GSC1组和GSC2组底泥磷积累量为 $(4.81 \pm 0.47) \text{ g/m}^2$ 和 $(4.65 \pm 0.60) \text{ g/m}^2$,其中,GSC1组和GSC2组显著低于G组和GS组($P < 0.05$),GC组、GSC1组和GSC2组之间差异不显著($P > 0.05$)。

2.5 不同养殖模式下生物对氮磷的利用率

不同养殖模式下生物对氮的利用率如图1所示。G组、GS组、GC组、GSC1组和GSC2组生物对氮的利用率分别为 $(47.93 \pm 2.44)\%$ 、 $(58.14 \pm 3.74)\%$ 、 $(47.33 \pm 2.42)\%$ 、 $(51.04 \pm 5.35)\%$ 和 $(63.04 \pm 4.68)\%$ 。其中,GSC2组生物对氮的利用率显著高于GSC1组、GC组和G组($P < 0.05$),GSC1组、GC组和G组之间差异不显著($P > 0.05$),GS组显著高于G组和GC组($P < 0.05$)。

从图1可以看出,G组、GS组、GC组、GSC1组和GSC2组生物对磷的利用率分别为 $(2.17 \pm 0.18)\%$ 、 $(4.49 \pm 0.38)\%$ 、 $(2.49 \pm 0.20)\%$ 、 $(2.47 \pm$

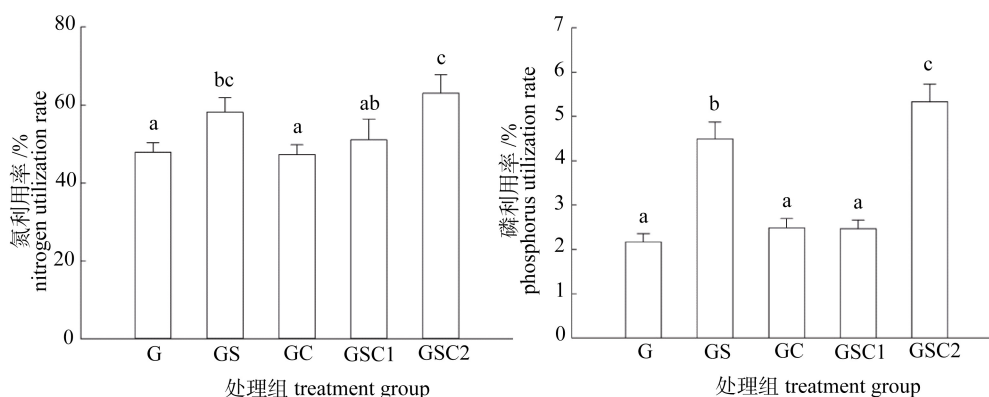


图1 不同养殖模式下生物对氮磷的利用率

G为草鱼单养;GS为草鱼-鲢混养;GC为草鱼-鲤混养;GSC为草鱼-鲢-鲤混养。

Fig 1 The nitrogen and phosphorus utilization rate of animals under different culture modes

G denotes *C. idellus* monoculture; GS denotes *C. idellus* and *H. molitrix* polyculture; GC denotes *C. idellus* and *C. carpio* polyculture; GSC denotes *C. idellus*, *H. molitrix*, and *C. carpio* culture systems.

0.19)%和(5.53±0.40)%。其中, GSC2 组显著高于其他各处理组($P<0.05$), GS 组显著高于 G 组、GC 组和 GSC1 组($P<0.05$), 而 G 组、GC 组和 GSC1 组间差异不显著($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 不同养殖模式下系统氮磷的输入与输出

有关养殖系统氮磷输入的研究已有许多报道, 如凡纳滨对虾不同放养密度的养殖池塘中, 氮磷输入依次为饵料(49.0%~53.9%和 47.5%~50.1%)、肥料(45.3%~50.7%和 65.1%~69.9%)、水层和放养对虾^[16]; 凡纳滨对虾-青蛤(*Cyclina sinensis*)-菊花心江蓼(*Gracilaria lichenoides*)养殖系统中, 氮磷输入依次为饵料(54.7%~75.5%和 81.6%~93.6%)、水层、放养生物和补充水^[29]; 草鱼-鲢-凡纳滨对虾养殖系统中, 氮磷输入依次为饲料(87.03%~90.45%和 90.06%~91.13%)、水层、放养生物和降水^[30]; 罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)养殖池塘中, 投喂饲料输入的氮磷分别占氮磷总输入的 71%~75%和 53%~65%^[31]。本实验也得到了类似的结论, 草鱼-鲢-鲤养殖系统中, 饵料氮磷的输入分别占系统氮磷总输入的 85.54%~93.38%和 82.60%~84.26%。由此可以看出, 饲料投入的氮磷是养殖系统氮磷输入的主要来源。

关于不同养殖模式系统氮磷的输出也有许多报道, 如凡纳滨对虾-青蛤-菊花心江蓼养殖系统中, 收获养殖生物和底泥积累氮输出分别占总输出的 44.4%~51.5%和 11.2%~31.8%, 磷输出分别占总输出的 30.0%~32.5%和 50.3%~68.3%^[29]; 草鱼-鲢-凡纳滨对虾养殖模式下, 收获生物和底泥积累的氮输出分别占总输出的 43.82%~57.99%和 6.05%~9.83%, 磷输出分别占总输出的 17.49%~27.56%和 76.80%~92.38%^[30]; 本实验中, 养殖生物收获氮输出占系统氮总输出的 62.80%~77.15%, 底泥积累的磷占系统磷总输出的 76.46%~80.04%。以上研究结果表明收获养殖生物是系统氮输出的主要部分, 而底泥积累是磷输出的主要部分。这可能与氮磷二者的循环形式不同有关, 磷属于沉积型循环, 主要吸附在水体悬浮颗粒物与沉积物表面^[31]。

3.2 不同养殖模式下生物对系统氮磷的利用率

关于不同养殖模式系统氮磷的利用率也有相关报道, 如泰国高密度斑节对虾养殖池塘氮的利用率为 31%^[22]; 美国阿拉巴马州南美白对虾养殖池塘的氮磷利用率为 39%和 12%^[32]; 凡纳滨对虾、青蛤和菊花心江蓼综合养殖系统中氮磷的利用率分别为 44.4%~51.5%和 7.2%~17.2%^[29]。本研究中, 草鱼不同养殖模式下氮磷的利用率为 58.64%~68.73%和 2.16%~5.62%, 其中, 三元混养模式 GSC2 组氮磷的利用率高于二元混养和单养模式。其原因分析如下:

鲢主要生活在水体上层, 具有特殊的鳃耙结构, 平均孔径为 20~25 μm ^[33], 能滤食到水体中直径最小为 8 μm 的颗粒物, 是一种典型的滤食性鱼类, 并且在滤食水体中的浮游植物的同时还会吞食水体中的含氮磷颗粒碎屑。已有的研究发现, 草鱼和鲢混养系统中, 水体中颗粒有机物(POM)和有机质含量随着混养系统中鲢比例的升高而降低^[34], 每生产 1 t 鲢可以去除水体中 18.84 kg 氮和 1.57 kg 磷, 因此, 混养鲢能有效提高生物对氮磷的利用率, 减少水体氮磷的积累。

鲤生活在水体底层, 其扰动作用不仅可以增加沉积物-水界面的营养盐扩散率^[35], 而且可以增加厌氧沉积物与氧气的接触面积, 促进其氧化分解^[36-37], 导致沉积物向水体中释放氮和磷^[38]。同时, 鲤的扰动作用还可以促进池塘底泥的再悬浮, 促进水体中浮游植物、底栖无脊椎动物和鱼体对氮磷的吸收, 增加其体内氮磷含量^[39]。本实验在用无扰动底泥采集器采集底泥时发现, 沉积物没有呈现明显的分层, 说明鲤的扰动作用对沉积物产生了明显的影响。因此, 在草鱼养殖系统中, 混养适宜比例的鲢和鲤(草鱼 0.38 ind/ m^2 、鲢 0.69 ind/ m^2 和鲤 0.55 ind/ m^2), 不仅可以充分利用水体空间, 还可以减少氮磷在水体和底泥中的沉积, 促进养殖系统中氮磷的循环, 增强水体的生态系统稳定性和提高物质转换效率。

参考文献:

- [1] Fisheries Bureau Ministry of Agriculture. 2013 China

- Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013.[农业部渔业局. 2013 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.]
- [2] Li X F, Chen Y Y. Biology research of inland water and freshwater fisheries sustainable development[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1998, 22(2): 174–180.[李辛夫, 陈宜瑜. 内陆水体生物研究与淡水渔业的可持续发展[J]. 水生生物学报, 1998, 22(2): 174–180.]
- [3] Liu J S, Cui Y B, Liu J K. Research progress on the effects of cage culture on the environment[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1997, 21(2): 174–184.[刘家寿, 崔奕波, 刘建康. 网箱养鱼对环境的影响的研究进展[J]. 水生生物学报, 1997, 21(2): 174–184.]
- [4] He F L, Xiao K Y, Chen G R, et al. Construction and its biological characteristics of tri-pathogenic bacteria syncretic fungus strains of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(2): 241–249.[何福林, 肖克宇, 陈光荣, 等. 草鱼三元病原菌融合子的构建及生物学特性[J]. 水产学报, 2007, 31(2): 241–249.]
- [5] Lei X B. Microstructure and immune cells' distribution of early development immune organs in *Ctenopharyngodon idellus*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013.[雷雪彬. 草鱼免疫器官个体发育的组织结构和免疫细胞变化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.]
- [6] Zhang F, Li Z Q, Yan L M, et al. Isolation of SCFV antibodies against GCRV using phage display technology[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(3): 430–437.[张凤, 李周全, 闫利明, 等. 利用噬菌体展示技术淘选草鱼呼肠孤病毒的单链抗体[J]. 水生生物学报, 2014, 38(3): 430–437.]
- [7] Dong S L. History, principles, and classification of integrated aquaculture in China[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(5): 1202–1209.[董双林. 中国综合水产养殖的发展历史, 原理和分类[J]. 中国水产科学, 2011, 18(5): 1202–1209.]
- [8] Song Q, Tian X L, Wang F, et al. An experimental study on structure optimization for polyculture of grass carp with different species[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(4): 704–714.[宋颀, 田相利, 王芳, 等. 不同草鱼池塘混养系统结构优化的实验研究[J]. 水生生物学报, 2012, 36(4): 704–714.]
- [9] Dai Y X, Wang Y, Tang J Y, et al. Effects of co-cultured fish and feed supplement on water chemistry characteristics of freshwater pearl mussel farming[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013(2): 351–360.[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(2): 351–360.]
- [10] Dai Y X, Tang J Y, Wang Y, et al. Effect of three fertilization programs on the chemical water quality for integrated culture of freshwater pearl mussel and fish[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(3): 407–416.[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.]
- [11] Yang R, Yao Y, Yang X, et al. The dynamics of oxidoreductase activities in sediments in three polyculture models of ponds stocking mainly grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. Agricult Water Manag, 2013, 122: 7–11.
- [12] Jie C, Jin H, Yu Z, et al. Comparative on fish growth and efficiency of three polyculture models in mainly culture grass carp pond[C]. Chinese Society for Oceanology and Limnology Fish Branch, China Zoological Society Fish Branch Abstract Compilation of 2012 Academic Conference. 2012.
- [13] Zhang Z D, Wang F, Dong S L, et al. A preliminary study on structural optimization in polycultural systems of *Ctenopharyngodon idellus* with *Hypophthalmichthys molitrix* and *Litopenaeus vannamei*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(7): 60–66.[张振东, 王芳, 董双林, 等. 草鱼、鲢鱼和凡纳滨对虾多元化养殖系统结构优化的研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(7): 60–66.]
- [14] Zhu F J, Zhu C B, Qi Z X, et al. Comparison of production effect and dynamic water quality among *Litopenaeus vannamei*-*Ctenopharyngodon idellus* polyculture and shrimp monoculture system[J]. Guangdong Agriculture Science, 2011, 38(5): 147–152.[朱方建, 朱长波, 齐振雄, 等. 凡纳滨对虾-草鱼混养模式与对虾单养模式的池塘水质动态及产出效果对比研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(5): 147–152.]
- [15] Su Y P, Ma S, Tian X L, et al. An experimental study on nitrogen, phosphorus and carbon budgets in intensive pond of shrimp *Fenneropenaeus chinensis*[J]. South China Fisheries Science, 2009, 5(6): 54–58.[苏跃朋, 马甦, 田相利, 等. 中国明对虾精养池塘氮、磷和碳收支的研究[J]. 南方水产, 2009, 5(6): 54–58.]
- [16] Qi Z X, Zhang M P. Experimental studies on nitrogen and phosphorus budgets of shrimp culture pond[J]. Journal of Fisheries of China, 1998, 22(2): 124–128.[齐振雄, 张曼平. 对虾养殖池塘氮磷收支的实验研究[J]. 水产学报, 1998, 22(2): 124–128.]
- [17] Adhikari S, Sahu B C, Mahapatra A S, et al. Nutrient budgets and effluent characteristics in giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) culture ponds[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2014, 92(5): 509–513.
- [18] Boyd C E. Chemical budgets for channel catfish ponds[J]. Trans Am Fish Soc, 1985, 114(2): 291–298.
- [19] Daniels H V, Boyd C E. Chemical budgets for polyethyl-

- ene-lined, brackish water ponds[J]. J World Aquacult Soc, 1989, 20(2): 53–60.
- [20] Green B W, Boyd C E. Chemical budgets for organically fertilized fish ponds in the dry tropics[J]. J World Aquacult Soc, 1995, 26(3): 284–296.
- [21] Li J L, Chen X F, Lai Q M, et al. Study on nitrogen and phosphorus budgets and production performance in higher place pond of *Litopenaeus vannamei*[J]. South China Fisheries Science, 2010, 6(5): 13–20.[李金亮, 陈雪芬, 赖秋明, 等. 凡纳滨对虾高位池养殖氮磷收支研究及养殖效果分析[J]. 南方水产科学, 2010, 6(5): 13–20.]
- [22] Briggs M R P, Funge-Smith S J A. A nutrient budget of some intensive marine shrimp ponds in Thailand[J]. Aquacult Res, 1994, 25(8): 789–811.
- [23] Li D S, Yang H S. A Device of land - based experimental enclosure used in ponds[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(2): 199–204.[李德尚, 杨红生. 一种池塘陆基实验围隔[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 1998, 28(2): 199–204.]
- [24] Lei Y Z. Culture Water Environment Chemistry Experiment. Beijing: China Agriculture Press, 2006.[雷衍之. 养殖水环境化学实验. 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [25] Qian J L, Fu L M. Using persulfate oxidation method for the determination of total nitrogen and total phosphorus in water[J]. Environment Science, 1987, 8(1): 81–84.[钱君龙, 府灵敏. 用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷[J]. 环境科学, 1987, 8(1): 81–84.]
- [26] Wang S Y, Xu J R. A single tube undisturbance sampler of no-boundary perturbation[P]. 2004. 200410026847.3[王绍友, 徐继荣. 一种无边界扰动的单管无扰动采样器[P]. 2004. 200410026847.3]
- [27] Hu C Y, Wang Z F. A method of determination of total phosphate in the seawater and marine sediment[J]. Marine Environment Science, 1999, 18(3): 48–52.[扈传昱, 王正方. 海水和海洋沉积物中总磷的测定[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(3): 48–52.]
- [28] Weiler R R. Rate of loss of ammonia from water to the atmosphere[J]. J Fish Board Can, 1979, 36(6): 685–689.
- [29] Chang J, Tian X L, Dong S L, et al. An experimental study on nitrogen and phosphorus budgets in polyculture of shrimp, bivalve and seaweed[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(B05): 33–39.[常杰, 田相利, 董双林, 等. 对虾、青蛤和江蓠混养系统氮磷收支的实验研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(B05): 33–39.]
- [30] Liu P. A preliminary study on budget and variation of organic carbon, nitrogen and phosphorus of grass carp in different poly culture systems[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.[刘朋. 草鱼不同混养系统有机碳、氮和磷收支及变动的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.]
- [31] Casillas-Hernández R. Water quality and nutrient budget in experimental closed tilapia *Oreochromis niloticus* culture systems[J]. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 8 (2): 46–55, 2012.
- [32] Couch J A. Characterization of water quality and a partial nutrient budget for experimental shrimp ponds in Alabama[D]. Auburn, Alabama: Auburn University, 1998.
- [33] Opuszyński K. Comparison of the usefulness of the silver carp and the bighead carp as additional fish in carp ponds[J]. Aquaculture, 1981, 25(2): 223–233.
- [34] Xia B, Gao Q, Dong S, et al. Uptake of farming wastes by silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) in polyculture ponds of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*): Evidence from C and N stable isotopic analysis[J]. Aquaculture, 2013, 404: 8–14.
- [35] Höhener P, Gächter R. Nitrogen cycling across the sediment-water interface in an eutrophic, artificially oxygenated lake[J]. Aquat Sci, 1994, 56(2): 115–132.
- [36] Graneli W. Influence of chironomus-plumosus larve on the oxygen-uptake of sediment[J]. Arch fur Hydrobiol, 1979, 87(4): 385–403.
- [37] Torres-Beristain B. Organic matter decomposition in simulated aquaculture ponds[D]. Wageningen, Netherlands: Wageningen University, 2005.
- [38] Hargreaves J A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds[J]. Aquaculture, 1998, 166(3): 181–212.
- [39] Rahman M M, Jo Q, Gong Y G, et al. A comparative study of common carp (*Cyprinus carpio* L.) and calbasu (*Labeo calbasu* Hamilton) on bottom soil resuspension, water quality, nutrient accumulations, food intake and growth of fish in simulated rohu (*Labeo rohita* Hamilton) ponds[J]. Aquaculture, 2008, 285(1): 78–83.

Nitrogen and phosphorus budgets in grass carp, silver carp, and common carp culture systems

SUN Yunfei¹, WANG Fang¹, LIU Feng², DONG Shuanglin¹

1. The Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Provincial Freshwater Fisheries Research Institute of Shandong, Jinan 250117, China

Abstract: We investigated nitrogen (N) and phosphorus (P) budgets in different grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) culture systems within a land-based enclosure. The experiment began in May and ended in October in 2011. Samples were collected periodically, and the enclosed area was 7 m × 7 m. N and P inputs and outputs were evaluated in grass carp monoculture(G), grass carp and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) polyculture (GS), grass carp and common carp(*Cyprinus carpio*) polyculture(GC), and grass carp, silver carp, and common carp (GSC1 and GSC2) systems. N and P accumulation in water and sediment were analyzed. The results show that fish feed was the main N and P input source in all culture systems (85.54%–93.38% and 82.60%–84.26%). Other sources were the stocked animals, precipitation, and the initial water used. The N output sources in the different culture systems were the stocked animals, sediment accumulation, water accumulation, and absorption and volatilization by the enclosure cloth, which accounted for 62.80%–77.15%, 15.19%–27.60%, 5.04%–7.71%, 1.54%–2.14%, and 0.22%–0.30%, respectively. The P output sources were accumulation in sediment, accumulation in water, culture animals at harvest, and absorption by the enclosure cloth, which accounted for 76.46%–80.04%, 13.04%–15.14%, 4.09–9.79%, and 0.71%–1.61%, respectively. Nitrogen accumulation in sediment from the GSC1 and GSC2 system was significantly lower than that in the G, GS, and GC systems ($P<0.05$), whereas P accumulation in sediment from the GSC1 and GSC2 systems was significantly lower than that in the G and GS systems ($P<0.05$). N and P accumulation in water from the GSC2 system was significantly lower than that in the G system ($P<0.05$). N and P utilization by the GSC2 culture system was significantly higher than that by the G, GC, or GSC1 systems ($P<0.05$). These results indicate that the GSC2 system (grass carp: 0.38 ind/m², silver carp: 0.69 ind/m², and common carp: 0.55 ind/m²) effectively reduced N and P accumulation and enhanced N and P utilization. Thus, the GSC2 system was an effective and clean grass carp polyculture mode.

Key words: *Ctenopharyngodon idellus*; *Hypophthalmichthys molitrix*; *Cyprinus carpio*; polyculture system; nitrogen; phosphorus; budget

Corresponding author: WANG Fang. E-mail: wangfang249@ouc.edu.cn