

韩士群, 周庆, 姚东瑞, 等. 水产养殖模式对池塘水环境 and 环境负荷量的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(3): 578-584.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.03.014

水产养殖模式对池塘水环境 and 环境负荷量的影响

韩士群¹, 周庆¹, 姚东瑞³, 常雅军³, 唐伯平²

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 江苏省盐土生物资源研究重点实验室, 江苏 南京 224002; 3. 江苏省中国科学院植物研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了改善养殖环境, 减少排污, 研究和分析了 6 种池塘养殖模式下水体理化指标、底质养分状况、尾水排污量、环境负荷量、氮磷利用率和鱼获物净增产量的变化, 明确不同养殖模式对养殖环境负荷的影响。结果表明: 单养梭鱼(T3)水体总氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、化学需氧量(COD_{Mn})及悬浮物含量都最大, 且极显著大于混养模式。单养模式氮磷利用率显著低于混养模式, 但环境负荷量显著大于混养模式。60% 异育银鲫+30% 梭鱼+10% 鲢、鳙(T5)是最优养殖模式, 其底泥中有机质、总氮、总磷含量最低, 其尾水排放氮、磷、 COD_{Mn} 量最小。T5 的氮、磷环境负荷量最小, 分别为 51.81 kg/t、12.84 kg/t, 饲料的氮、磷利用率最高, 分别为 30.09%、19.15%, 饵料系数最小, 净增产量最大, 是环境、经济较优的养殖模式。

关键词: 养殖模式; 养殖水环境; 环境负荷量; 氮、磷利用率

中图分类号: X714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)03-0578-07

Effects of aquaculture patterns on water environment of fish pond and environmental load

HAN Shi-qun¹, ZHOU Qing¹, YAO Dong-rui³, CHANG Ya-jun³, TANG Bo-ping²

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory for Bioresources of Saline Soils, Nanjing 224002, China; 3. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to improve the aquaculture environment and reduce the sewage, six kinds of aquaculture patterns were carried out in present study. And the water physical and chemical quality, the sediment nutrients, pollutant discharge of aquaculture effluent, the environmental load, nitrogen and phosphorus utilization rate and the net fish yield were respectively investigated during this experiment. The results suggested that contents of total nitrogen(TN), ammonium nitrogen(NH_4^+), nitrate nitrogen(NO_3^-), nitrite nitrogen(NO_2^-), total phosphorus(TP), (COD_{Mn}) and suspended solid(SS) in the monoculture ponds of barracuda (T3) were significantly higher than those in the all polyculture ponds. The nitrogen and phosphorus utilization efficiency of feed in monoculture pattern was significantly lower than that in polyculture pattern, but

the environmental load of nitrogen and phosphorus was significantly higher than that in polyculture pattern. The polyculture mode of allogynogenetic crucian carp (60%), barracuda (30%), silver carp and bighead carp (10%) (T5) was optimum, because their contents of organic matter, TN and TP in the sediment and the amounts of TN, TP and COD_{Mn} in the discharged waste water were lowest. The nitrogen and phosphorus environment loads under the

收稿日期: 2018-02-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD13B04); 江苏省水产三新工程重大项目(D2016-17)

作者简介: 韩士群(1966-), 男, 江苏宿迁人, 博士, 研究员, 主要从事蓝藻治理和水体生态修复研究工作。(E-mail) shqunh@126.com

通讯作者: 唐伯平, (E-mail) boptang@163.com

treatment of T5 were lowest, which were 51.81 kg/t and 12.84 kg/t, respectively. In addition, the nitrogen and phosphorus utilization rate of feed was highest, which was 30.09% and 19.15%, respectively. The feed coefficient was the smallest, and the net fish yield was the largest in the treatment of T5. So, T5 was the optimal aquaculture pattern.

Key words: aquaculture pattern; the environment of aquaculture water; environmental load; utilization rate of nitrogen and phosphorus

水产养殖排污是重要的农业面源污染来源之一,尤其是水产养殖业发达地区^[1-3]。因此,提高饲料利用率,减少养殖尾水中污染物含量,降低环境负荷成为水产养殖业面临的紧迫问题。探索经济效益高和环境友好型的混养模式一直是水产养殖的主要课题。目前,关于混养模式的氮磷收支,能量收支,饲料利用率,环境和经济效益等方面已有大量研究。如罗非鱼和亚马逊河虾混养^[4]以及乌鳢和鳊鱼混养模式的氮磷收支的结果^[5]显示,混养模式比单养模式提高了氮、磷利用率。南美白对虾-缢蛏-梭鱼混养系统的能量收支与利用效率均优于南美白对虾单养系统,底泥沉积率小于单养系统,混养系统的综合生态经济指标优于单养系统^[6]。罗非鱼和虾混养模式,罗非鱼食用藻类和饲料,而虾吃罗非鱼粪便和剩余的饲料,从而提高饲料利用率,减少污染物排放^[7-8]。美国生态水产养殖模式(主要饲养鱼类:滤食性鱼类为80:20,数量比),充分利用了鲢鱼、鳊鱼滤食浮游生物,提高饲料利用率,同时鱼类产量和经济效益显著优于传统混养并且具有明显的环境效应^[9]。沿海滩涂的水产养殖规模化程度高、单塘面积大,因此对周边环境影响大。目前,关于沿海滩涂水产养殖不同模式的环境负荷量差异的研究尚为空白,因此急需开展相关研究,这将有助于探索减少环境污染的新型养殖模式。本研究系统地比较沿海滩涂地区常见的养殖模式(单养或混养)、美国生态养殖模式以及我们研发的模式的池塘水质、底质、饲料利用率、增产量和环境负荷量,为形成环境、经济效益更高、更适合滩涂较大水面的生态混养模式,同时为池塘环境调控和污染物减排提供理论、技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验设计

为了形成适合海涂地区的环境友好型、经济效益高的生态混养模式。以当地常见的单养、混养模式以及美国生态养殖模式的放养品种和比例为基

础,同时根据鱼类摄食特性、生态位特征,设计了不同养殖模式试验。2015年在江苏省大丰市海涂养殖鱼塘进行。养殖品种有:海涂特有品种梭鱼(*Sphyræna*):咸淡水生长,底栖,食饲料残渣和鱼类粪便;异育银鲫(*Silver prussian carp*):中层鱼,食饲料;鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳊(*Aristichthys nobilis*):上层,滤食性;草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*):食草,食饲料等。试验设6个处理,3个平行塘(单塘面积为2.0 hm²,各塘均为刚清淤过)。T1,100%异育银鲫;T2,80:20(数量比)的美国生态养殖模式,80%异育银鲫+20%鲢、鳊(鲢鱼:鳊鱼=3:1,质量比);T3,100%梭鱼;T4,80%异育银鲫+20%梭鱼;T5,60%异育银鲫+30%梭鱼+10%鲢、鳊(鲢鱼:鳊鱼=3:1,质量比);T6,68%异育银鲫+8%草鱼+15%鲢+9%鳊(当地混养模式)。鱼种放养量为1 883 kg/hm²,每尾平均规格分别为:异育银鲫(119.0±3.5)g,鲢鱼(102.0±2.8)g,鳊鱼(121.0±3.6)g,梭鱼(132.0±4.7)g,草鱼(97.0±3.3)g。养殖期4月至11月,每个塘合计投料24 612 kg。饲料主要成分为粗蛋白质31.51%,粗脂肪6.56%,粗灰分15.00%,钙1.52%,总磷1.05%,赖氨酸1.75%,粗纤维12.87%,食盐1.02%,水分12.49%。

养殖期间,根据鱼类活动情况确定开增氧机时间,每个塘开720 h。养殖前30 d内,不换水,根据水量蒸发或渗漏等情况适量补充少量水,维持水深约1.6 m。养殖中后期采取不间断方式逐渐加大换水量,平均每天约换水1%。养殖期间降水量8 232 mm,日照时数1 424 h。

1.2 样品采集与分析

每月采集1次水样。取水面下50 cm深处水样,每口池塘采集3个点的混合样。使用彼得森采泥器采集各池塘的表层底泥,每个池塘采集5个点的混合样,风干待测。11月最后1次采集水样时测定鱼类的生长状况,每个塘不同品种称量10组鱼体质量,每组10~12条。

水体中溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chl.a) 含量现场分别采用 YSI Pro-DO、YSI 6000MSV2 测定。其他指标采用常规测定方法^[10]。

1.3 评估方法

氮磷环境负荷量依据质量守恒提出的方法估算,其原理是每生产 1 t 鱼(养殖品种的产量)所投喂的营养物质,扣除积蓄在养殖生物体中的量,剩余即为环境负荷量,计算公式^[10]为:

$$L_{N,P} = (C \times F_{N,P} - P_{N,P}) \times 10^3$$

$L_{N,P}$ 为氮或磷的环境负荷量(kg/t); C 为饵料系数; $F_{N,P}$ 为饲料中氮或磷的含量; $P_{N,P}$ 为鱼体氮或磷含量。

通过养殖废水向环境中的排污量,利用增量估算,计算公式为:

$$M_i = Q \times C_{\Delta i} \times 10^{-3}$$

M_i 为某种污染物的排放量(kg/hm²); Q 为养殖过程中单位面积废水排放量(m³/hm²); $C_{\Delta i}$ 为排放水体中某种污染物的增量(mg/L)。

1.4 数据处理

不同养殖模式的各种参数差异分析采用多重比较(新复极差法)。不同养殖模式鱼生长状况的差异分析采用单变量方差分析法,变量为养殖模式。相关性采用直线回归分析。采用 SPSS 软件进行数

据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同养殖模式对池塘水体理化指标的影响

2.1.1 水体氮含量 水体总氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮含量的平均值都以 T3 最大,T1 次之,T5 最小。T3 与 T1 处理间差异达显著水平($P < 0.05$); T3 与 T2、T4、T5、T6 之间差异达极显著水平($P < 0.01$); 除了 T1 与 T4 的铵态氮含量不显著,T1 与 T2、T4、T5、T6 之间差异达极显著水平(表 1)。

2.1.2 水体总磷含量 对于水体总磷含量均值来说,T3 与 T1 之间差异不显著,T3、T1 都极显著大于 T2、T4、T5、T6(表 1)。

2.1.3 水体化学需氧量(COD_{Mn}) T3 水体 COD_{Mn} 含量最高,显著高于 T1,极显著高于 T4、T6、T2、T5; T1 和 T2、T4、T5、T6 差异不显著(表 1)。

2.1.4 水体悬浮物含量 悬浮物(SS)与饲料利用状况、鱼类扰动、风浪有关,在一定程度上可以反映养殖水体水质状况,悬浮物质量浓度不仅影响水体藻类生长,而且对养殖生物产生不利影响^[12]。表 1 显示,T3 的悬浮物含量高于其他所有处理,其中与 T1 差异达显著水平;T3 与 T4、T6、T2、T5 的差异均达极显著水平(表 1)。

表 1 池塘水体富营养化因子和悬浮物质量浓度

Table 1 Content of eutrophication factors and suspended matter in the ponds

| 处理 | 总氮 (mg/L) | 铵态氮 (mg/L) | 亚硝态氮 (mg/L) | 硝态氮 (mg/L) | 总磷 (mg/L) | COD_{Mn} (mg/L) | 悬浮物 (mg/L) |
|----|--------------|---------------|----------------|---------------|--------------|----------------------|----------------|
| T3 | 5.37±0.17aA | 1.69±0.09aA | 0.23±0.04aA | 3.12±0.06aA | 0.42±0.03aA | 20.71±0.88aA | 166.77±8.95aA |
| T1 | 4.99±0.15bA | 1.44±0.12bAB | 0.18±0.03bB | 2.80±0.06bA | 0.40±0.02aA | 16.45±0.74bB | 144.65±5.06bAB |
| T4 | 4.12±0.24cB | 1.41±0.06bB | 0.12±0.03cC | 2.20±0.02dB | 0.32±0.01bB | 15.03±0.56bB | 128.22±4.53bcB |
| T2 | 3.82±0.14dB | 0.98±0.04cC | 0.13±0.04cC | 2.31±0.03cB | 0.31±0.02bB | 13.73±0.51bB | 122.53±4.12cB |
| T6 | 3.67±0.13dB | 1.07±0.04cC | 0.14±0.02cC | 2.11±0.04dB | 0.32±0.01bB | 14.13±0.61bB | 127.56±4.43bcB |
| T5 | 3.47±0.12eB | 0.97±0.03cC | 0.11±0.01cC | 2.00±0.04dB | 0.29±0.01bB | 13.56±0.44bB | 120.37±4.76cB |

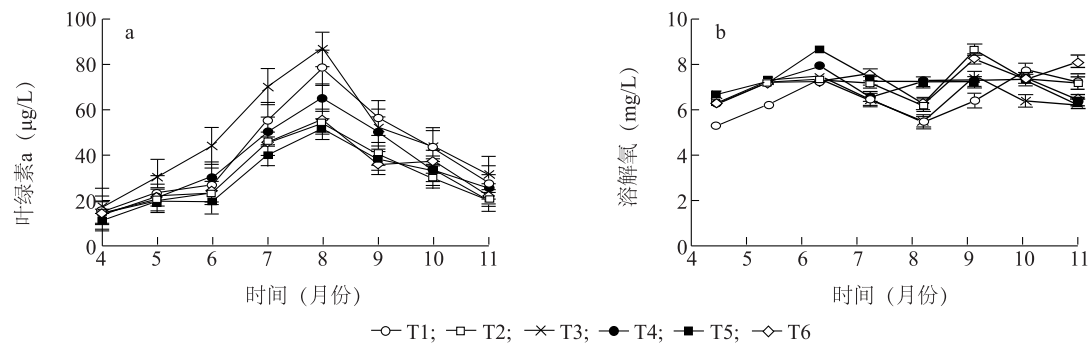
T1:100%异育银鲫;T2:80%异育银鲫+20%鲢、鳙;T3:100%梭鱼;T4:80%异育银鲫+20%梭鱼;T5:60%异育银鲫+30%梭鱼+10%鲢、鳙;T6:68%异育银鲫+8%草鱼+15%鲢+9%鳙;表中数据为平均值±SD;同一列数据后不同小写字母表示差异达显著水平($P < 0.05$),不同大写字母表示差异达极显著水平($P < 0.01$)。

2.1.5 叶绿素含量动态变化 各处理池塘水体叶绿素含量有相似的动态变化趋势(图 1a),都和季节变化有关,从 4 月开始叶绿素含量逐渐增加,到 8 月达到最高,随后逐渐减少,至 11 月最小。总体来看,T3 池塘水体叶绿素含量最大、T1 次之,都显著大于其他处理。将各处理每个月的叶绿素含量与该处理

的对应总氮、总磷含量分别进行线性回归分析,结果表明,每个处理的水体叶绿素含量与总氮含量呈显著正相关($r = 0.71 > r_{0.5}, n = 8$),与总磷含量之间呈极显著正相关($r = 0.87 > r_{0.01}, n = 8$)。说明养殖池塘水体的富营养化受总氮和总磷共同限制,控制养殖水体富营养化必须同时削减水体中总氮和总磷。通

常,海水中氮是藻类生长的限制因子,磷是淡水湖泊中藻类生长的限制因子,当磷负荷高的情况下氮是第二限制因子^[13]。本试验中叶绿素 a 含量和总氮、

总磷均呈显著正相关,可能是水体氮、磷负荷都较高的原因。



T1~T6 见表 1 注。
图 1 叶绿素含量(a)和溶解氧质量浓度(b)动态变化
Fig.1 Dynamic change of chlorophyll a content (a) and dissolved oxygen concentration (b)

2.1.6 池塘水体溶解氧动态变化 总体来看,每个处理的水体溶解氧含量的动态变化趋势相似(图 1b),都和季节变化有关。从 4 月开始逐渐增加,到 6 月溶解氧含量达到第一个峰值,7 月快速下降,8 月更低,9 月达到第二个峰值,随后逐渐减小。将每个月溶解氧含量的平均值进行统计分析,结果表明 T5、T6 显著大于 T1、T3 ($P<0.05$)。将溶解氧含量与叶绿素含量进行回归分析,二者之间相关性不显著($r=0.57<r_{0.5}, n=8$)。这可能是由于池塘水体叶绿素 a 含量较高,出现高浓度藻类争氧的原因^[14]。

2.2 池塘底质厚度、有机质、总氮和总磷含量

试验前各塘都清淤过,底质的各项指标差异不大。试验结束后,各处理底质厚度值顺序为: T3>T1>T2>T6>T4>T5,其中厚度较大的前 4 个处理之间差异都不显著,T3 与 T4、T5 之间都达到了显著差异(表 2)。

T3 底质有机质含量最大,T5 最小,两者之间差异达显著水平。T3 与 T1 之间差异不显著,与 T4、T5 之间差异达显著水平。T1、T2、T4、T6 之间差异不显著(表 2)。

底质中总氮含量 T3 和 T1 差异不显著,T3 与 T6、T4、T2、T5 差异显著,T1 与 T2、T5 差异显著。总磷含量 T3 与 T1、T6 之间差异不显著,T3 与 T2、T4 差异显著,T3 与 T5 差异极显著(表 2)。

将水体、底质中不同形态的氮含量分别与饲料氮利用率进行线性回归分析,都呈极显著负相关($P<0.01$);同样,将总磷、COD 分别与磷利用率回归分析,也有相似结论。因此合适的混养模式可以降低底质与水体富营养化因子含量,改善养殖环境,这和虾与贝类混养^[15]、虾与罗非鱼混养^[16-17]、滤食性鱼类与杂食性鱼类混养^[18-19]等模式可以改良水质的研究结果相同。

表 2 养殖池塘底质状况及养殖废水排污量

Table 2 Sediment status of each pond and pollutant discharge of aquaculture effluent

| 处理 | 底质状况 | | | | 养殖废水排污量 | | | |
|----|--------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|
| | 底质厚度 (cm) | 有机质 (g/kg) | 总氮含量 (g/kg) | 总磷含量 (g/kg) | 总氮含量 (kg/hm ²) | 总磷含量 (kg/hm ²) | COD _{Mn} (kg/hm ²) | 悬浮物含量 (kg/hm ²) |
| T3 | 6.35±0.65a | 25.53±1.97a | 2.61±0.19a | 2.35±0.18aA | 230.61±10.12aA | 17.40±1.34aA | 854.45±35.79aA | 7 927.74±29.80aA |
| T1 | 5.83±0.51ab | 25.14±2.12ab | 2.56±0.12ab | 2.24±0.14abA | 214.60±8.10bAB | 16.34 ±1.01abA | 623.65±22.56bA | 6 734.30±28.11bA |
| T2 | 5.78±0.92ab | 21.50±1.49b | 2.13±0.19c | 2.02±0.12bA | 150.02±7.08cdB | 11.41±0.97bA | 474.53±21.08cA | 5 518.22±26.67cA |
| T6 | 5.21±0.56ab | 22.51±2.12b | 2.40±0.20b | 2.23±0.11abA | 138.21±5.34dB | 11.97±0.66bA | 496.78±9.79cA | 5 797.60±21.34bcA |
| T4 | 4.32±0.87b | 21.94±2.45b | 2.24±0.19bc | 2.17±0.18bA | 161.29±8.12cB | 11.95±2.13bA | 544.68±25.15bcA | 5 822.04±23.01bcA |
| T5 | 4.21±0.72b | 18.01±1.11c | 1.97±0.11c | 1.85±0.12bB | 127.84±7.24dB | 10.34±0.58bB | 465.66±15.11cB | 5 405.18±33.21cB |

T1~T6 见表 1 注。

2.3 养殖废水排污量

通过养殖废水向外排放总氮量的顺序为 T3>T1>T4>T2>T6>T5。T3 与 T4、T2、T6、T5 之间都达到极显著差异,但 T4、T2、T6、T5 之间差异不显著(表 2)。T5 通过养殖废水排放的氮占饲料氮总量的 22%,而 T3 占 40%。

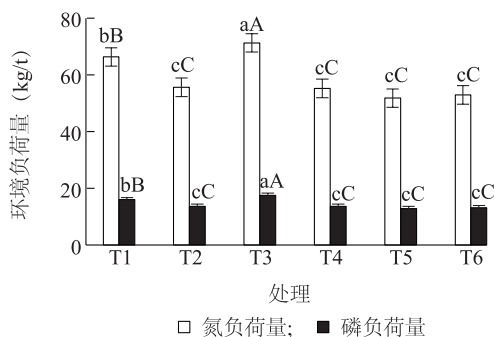
通过养殖废水向外排放总磷量的顺序为 T3>T1>T6>T4>T2>T5, T3 虽然大于 T1,但二者之间差异不显著, T3、T1 分别与 T2、T4、T5、T6 之间差异都达显著水平,但 T2、T4、T6 之间差异不显著(表 2)。T5 通过养殖废水排放的磷占饲料磷总量的 8%,而 T3 占 13%。

通过养殖废水向外排放 COD_{Mn} 量的顺序为 T3>T1>T4>T6>T2>T5。T3 与 T1 的 COD_{Mn} 排放量差异达显著水平,与 T5 之间差异达极显著水平。

T3 的 SS 排放量显著大于 T1、T2、T4、T5、T6,极显著大于 T5。T1 与 T5 之间差异也达到了极显著水平。T2、T4、T6 之间差异不显著。

2.4 环境负荷量、饲料利用率和鱼净增产量

投喂饲料含有的氮、磷是造成环境负荷的主要因素,各处理间的氮负荷量(LN)和磷负荷量(LP)的差异性相似:T3 的 LN、LP 均最大,即每增长 1 t 鱼分别向环境排氮 71.28 kg 和磷 17.54 kg, T5 最小,分别为 51.81 kg、12.84 kg,两者差异达极显著水平;T3 或 T1 的 LN、LP 分别极显著大于 T2、T4、T5、T6;T2、T4、T5、T6 之间差异不显著(图 2)。



T1~T6 见表 1 注。同一指标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

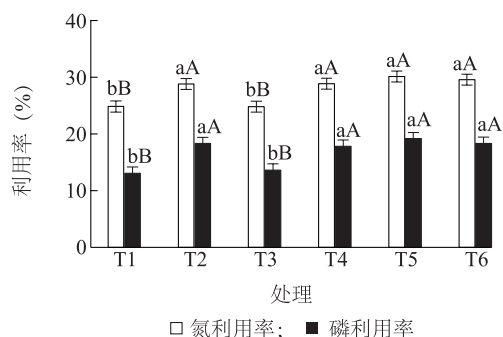
图 2 不同模式的氮、磷环境负荷量

Fig.2 Environmental carrying capacity of nitrogen and phosphorus in different patterns

T5、T6 模式的环境负荷都小于 80:20(数量比)的美国生态养殖模式^[9](T2)。养殖斑点叉尾鮰的

氮磷环境负荷量分别 9.20 kg/t、0.57 kg/t^[18],淡水养殖鲢鱼的氮磷环境负荷量分别为 71.00 kg/t、10.90~11.10 kg/t^[19],金头鲷网箱养殖的氮磷环境负荷量分别为 190 kg/t、28 kg/t,而金头鲷池塘养殖的氮磷环境负荷量分别为 14.25 kg/t、2.57 kg/t^[17]。本研究不同养殖模式的氮磷环境负荷量,介于报道的范围内。

从饲料的氮、磷利用率来看, T5 的氮、磷利用率都最高,分别为 30.09%、19.15%,最低的是 T3,分别为 24.79%、13.61%。T5 与 T3、T1 的氮、磷利用率都达到了极显著差异。T1 与 T3 差异不显著, T2 与 T4 之间差异不显著(图 3)。



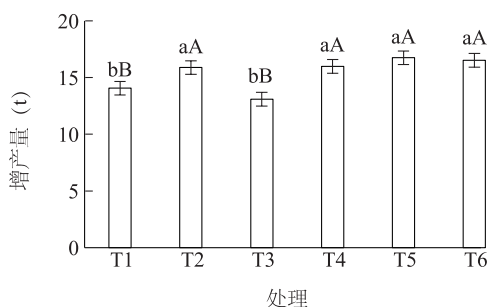
T1~T6 见表 1 注。同一指标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$);不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

图 3 不同模式的饲料氮、磷利用率

Fig.3 Utilization rate of nitrogen and phosphorus in feed with different patterns

T5 的鱼净增产量最高,与 T6、T4、T2 之间差异不显著;T5 的净增产量与 T1、T3 之间差异达极显著水平(图 4)。T5、T6 的饲料系数显著低于其他模式(图 5)。由于 T5 产量高、节省饲料,加上梭鱼价格比常规鱼价格高 20%~50%,因此 T5 是经济效益较高的养殖模式。

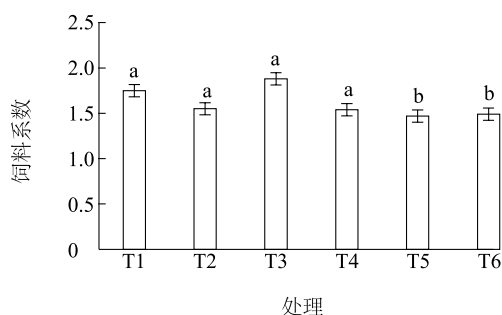
氮、磷的环境负荷量与饲料的氮、磷利用率密切相关,分别将各模式的氮磷的环境负荷量与其饲料氮利用率、磷利用率进行线性回归分析,都呈极显著的负相关 ($P<0.01$)。根据不同品种鱼类和养殖技术,海水鱼类养殖系统中,通过饲料浪费和鱼类粪便排放到环境中磷高达 85%,氮 52%~95%以及碳 80%~88%^[20]。Antonio 研究罗非鱼和虾混养模式结果表明,鱼虾固定氮素占 21%~24%,沉积物氮素占 24%~38%,通过氮气排放到大气占 30%~



T1~T6 见表 1 注。不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

图 4 不同模式的鱼净增产量

Fig.4 Net increment of fish yield in different culture patterns



T1~T6 见表 1 注。

图 5 不同模式的饲料系数

Fig.5 Feed coefficient of fish in different culture patterns

36%^[17]。半精养虾池仅有 5.8 %氮和 4 %磷以对虾产品形式收获,精养池塘分别约 21.7%和 6.0%^[21]。即使是管理最好的养虾场,仍有高达 30%的饵料未被摄食^[22]。淡水网箱养殖虹鳟的饲料有 30%残剩于网箱中^[23];饲料中氮、磷利用率,主要是由鱼类取食和消化决定的,T5 混养模式的氮、磷利用率分别为 30.09%、19.15%,比相关报道的利用率较高,说明这种养殖模式优于一般养殖模式。

T5 的饲料系数最低,氮、磷利用率最高,环境负荷量最小,增产量最大,是本试验中最佳混养模式,是环境经济效益俱佳的生态养殖模式。这种模式充分利用了养殖品种的不同食性,即梭鱼食饲料残渣、鱼类粪便和底栖藻类为主,异育银鲫食饲料为主,鲢、鳙滤食浮游生物为主。这种多营养层次综合养殖实现了养殖系统中营养物质在不同营养级生物间的传递、再循环,增强了自我净化养殖水体的能力,降低了环境压力,提高了经济效益;同时充分利用了水体生态空间,即梭鱼底层,鲫鱼中层,鲢、鳙上层。生态养殖模式可以减少环境负荷,但其排水氮磷

含量仍超过湖泊 V 类水标准,仍会造成湖泊、海洋富营养化,该模式仍有进一步优化的空间。

3 结论

混养模式可改善池塘水环境,其水体、底质中总氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、悬浮物及 COD_{Mn} 或有机质含量都显著小于单养模式。混养模式的氮、磷、 COD_{Mn} 排放量与环境负荷量极显著小于单养模式。60% 异育银鲫 + 30% 梭鱼 + 10% 鲢、鳙 (3:1, 质量比) 是海涂咸淡水体最优的养殖模式,其饵料系数最小,氮、磷利用率和鱼净增产量最大,养殖尾水排污量 and 环境负荷量最低。

参考文献:

- [1] LI W, YANG Q. Wetland utilization in Lake Taihu for fish farming and improvement of lake water quality [J]. Ecological Engineering, 1995, 5(1): 107-121.
- [2] 雷建军, 王大鹏, 肖俊军, 等. 广西岩滩水库不同养殖类型区域沉积物磷分布特征分析 [J]. 南方农业学报, 2017, 48(12): 2288-2294.
- [3] LI H, LI X, LI Q, et al. Environmental response to long-term mariculture activities in the Weihai coastal area, China Author links open overlay panel [J]. Science of The Total Environment, 2017, 601/602: 22-31.
- [4] FERNANDA S D, DANILO C P, WAGNER C, et al. Nitrogen budget in integrated aquaculture systems with Nile tilapia and Amazon River prawn [J]. Aquaculture Int, 2017, 25: 1733-1746.
- [5] ZHANG K, XIE J, YU D, et al. A comparative study on the budget of nitrogen and phosphorus in polyculture systems of snakehead with bighead carp [J]. Aquaculture, 2018, 483(20): 69-75.
- [6] 李廷友, 谢标, 林振山. 有机海水围塘养殖生态系统能量收支与利用效率研究 [J]. 水生态学杂志, 2013, 33(3): 80-84.
- [7] MARQUES H L A, NEW M B, BOOCK M V, et al. Integrated freshwater prawn farming: state-of-the-art and future potential. Reviews in fisheries [J]. Science & Aquaculture, 2016, 24(3): 264-293.
- [8] ALICE C, LI L P, GUO S J, et al. Feed and fishmeal use in the production of carp and tilapia in China [J]. Aquaculture, 2013, 414/415(15): 127-134.
- [9] 梁斌, 张建, 周恩华, 等. 美国生态水产养殖模式与常规混养模式的环境效应比较 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 339-343.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水检测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 210-285.
- [11] 李纯厚, 黄洪辉, 林钦, 等. 海水对虾池塘养殖污染物环境负荷量的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 545-550.

- [12] YANG G J, SONG L, LU X Q, et al. Effect of the exposure to suspended solids on the enzymatic activity in the bivalve *Sinonovacula constricta* [J]. *Aquaculture and Fisheries*, 2017, 2: 10-17.
- [13] LEWIS W M, WURTSBAUGH W A, PAERL H A. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters [J]. *Environ Sci&Technol*, 2011, 45: 10300-10305.
- [14] 韩士群, 严少华, 张建秋, 等. 滩涂池塘生态系统的光合能量利用及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 1038-1047.
- [15] SU Y P, MA S, LEI J L. Assessment of pollutant reducing effect by poly-culture and bioremediation in sediment of marine shrimp ponds [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1559-1567.
- [16] BANCHUEN M, KOU I K, SORAWIT P, et al. Effects of white shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone), and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, stocking density on growth, nutrient conversion rate and economic return in integrated closed recirculation system [J]. *Aquaculture*, 2007, 269(14): 363-376.
- [17] ANTONIO T, CARLOS M, MANUEL P M, et al. Environmental implications of intensive marine aquaculture in earthen ponds [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 981-988.
- [18] SCHWARTZ M F, BOYD C E. Effluent quality during harvest of Channel Catfish from watershed ponds [J]. *Progressive Fish-Culturist*, 1994, 56: 25-32.
- [19] KELLY L A, STELLWAGEN J, BERGHEIM A. Waste loadings from a fresh-water Atlantic Salmon farm in Scotland [J]. *Water Resources Bulletin*, 1996, 32: 1017-1025.
- [20] WU R S. The environmental impact of marine fish culture towards a sustainable future [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 31: 159-166.
- [21] ROBERTSON A I, PHILLIPS M J. Mangroves as filters of shrimp pond effluent: predictions and biogeochemical research need [J]. *Hydrobiology*, 1995, 295: 311-321.
- [22] SIMON J, FUNGE-SMITH, MATTHEW R P, et al. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds implications for sustainability [J]. *Aquaculture*, 1998, 164: 117-133.
- [23] PENCZAK T, GALICKA W, MOLINSKI M. The enrichment of a mesotrophic lake by carbon, phosphorus and nitrogen from the cage aquaculture of rainbow trout *Salmo gairdneri* [J]. *Appl Ecol*, 1982, 19: 371-393.

(责任编辑:陈海霞)