

Nitrogen and Phosphorus Budgets of Polyculture System of Shrimp *Litopenaeus vannamei* with Golden Pompano *Trachinotus ovatus*

Wei Yu^{1,2}, Jinxi Wu^{2,3}, Heizhao Lin^{1,2*}, Xiaolin Huang^{1,2}, Yukai Yang^{1,2}, Zhong Huang^{1,2}, Tao Li^{1,2}, Guoliang Wen², Yucheng Cao², Wang Zhao², Yan Liu², Changping Yang²

¹Shenzhen Base of South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shenzhen Guangdong

²Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation and Utilization, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou Guangdong

³Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong
Email: *linheizhao@163.com

Received: Jan. 31st, 2020; accepted: Feb. 11th, 2020; published: Feb. 18th, 2020

Abstract

An experiment was conducted in 21 outdoor enclosures (4 × 6 m) to evaluate the nitrogen and phosphorus budgets of polyculture system of shrimp *Litopenaeus vannamei* with Golden pompano *Trachinotus ovatus*. Shrimp of 3.4 g were stocked into all enclosures at a density of 48,000 per acre, in which C (Control), F4, F8, F12, F16, F20, F24 groups stocked with 0, 4, 8, 12, 16, 20 and 24 golden pompano of 65 g, respectively. All treatments and the control were randomly allocated to enclosures in triplicate each. The whole experiment lasted 60 days. The results showed that polyculture of shrimp and Golden pompano significantly improved the growth rate and survival rate of shrimp, and increased the utilization of nitrogen and phosphorus by cultured aquatic species. The yield and nitrogen and phosphorus utilization efficiency of shrimp in F12 group were better than those in the control and other monoculture groups.

Keywords

Litopenaeus vannamei, *Trachinotus ovatus*, Polyculture, Nitrogen and Phosphorus

凡纳滨对虾和卵形鲳鲹混养系统氮磷收支的研究

*通讯作者。

文章引用: 虞为, 吴进喜, 林黑着, 黄小林, 杨育凯, 黄忠, 李涛, 文国樑, 曹煜成, 赵旺, 刘岩, 杨长平. 凡纳滨对虾和卵形鲳鲹混养系统氮磷收支的研究[J]. 农业科学, 2020, 10(2): 95-105. DOI: 10.12677/hjas.2020.102014

虞为^{1,2}, 吴进喜^{2,3}, 林黑着^{1,2*}, 黄小林^{1,2}, 杨育凯^{1,2}, 黄忠^{1,2}, 李涛^{1,2}, 文国樑², 曹煜成², 赵旺², 刘岩², 杨长平²

¹中国水产科学研究院南海水产研究所深圳试验基地, 广东 深圳

²中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东 广州

³广东海洋大学水产学院, 广东 湛江

Email: linheizhao@163.com

收稿日期: 2020年1月31日; 录用日期: 2020年2月11日; 发布日期: 2020年2月18日

摘要

采用21个24 m²的围隔进行凡纳滨对虾单养和凡纳滨对虾-卵形鲳鲹混养氮磷收支的研究。试验分为7组, 每组3个平行。各围隔放养均重为3.4 g/尾的对虾1728尾(即48,000尾/亩), 放养65 g/尾的卵形鲳鲹分别为0尾(C组)、4尾(F4组)、8尾(F8组)、12尾(F12组)、16尾(F16组)、20尾(F20组)和24尾(F24组)。试验周期为60 d。结果表明, 对虾池塘混养卵形鲳鲹明显提高了对虾的生长率和存活率, 增加了养殖生物对氮磷的利用率。其中F12组的对虾产量和对虾对饲料氮磷利用率均高于单养组和其他混养组。

关键词

凡纳滨对虾, 卵形鲳鲹, 混养, 氮磷

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2018年我国凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)养殖总量达108万吨, 占对虾养殖总量的80.6% [1]。我国凡纳滨对虾主要以单养为主, 近年来凡纳滨对虾养殖业在发展的同时也面临着相当严重的危机[2]。随着凡纳滨对虾单养模式对高产量的追求, 放养密度和投饵量不断增加, 造成大量氮磷沉积在池塘底泥中[3] [4]。李卓佳等开展了凡纳滨对虾单养模式中氮磷收支的研究, 表明50.5%和80%的输入氮、磷沉积在养殖池塘底部[5]。当养殖系统中的氮、磷超出养殖生物和浮游生物生长需求时, 会导致水质恶化、养殖病害频发、养殖效益下降等诸多问题, 并造成巨大的资源浪费和环境污染[6]。

为解决凡纳滨对虾单养所面临的上述问题, 诸多学者开展凡纳滨对虾混养模式的研究, 以期提高对投入饲料利用率, 优化养殖水体环境, 减少疾病发生。对虾池塘混养不同的鱼类, 如罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)、褐篮子鱼(*Siganus fuscissens*)和鲫鱼(*Carassius auratus*)等, 能改善养殖水质、降低水体的弧菌数量、提高饲料利用率和对虾存活率, 从而提高养殖的生态效益和经济效益[3] [7] [8] [9] [10]。

卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)俗称金鲳, 经济价值高, 生长速度快, 已成为我国南方沿海养殖的首选品种, 其养殖方式主要以鱼排网箱和抗风浪深水网箱为主[11] [12]。在经过数年的高速发展之后, 由于布局不合理, 养殖密度过高, 已造成了养殖水环境和生态环境的恶化, 导致卵形鲳鲹病害日渐严重, 产品

质量下降, 养殖效益每况愈下[13][14]。卵形鲳鲹能够适应对虾养殖池塘的生长环境, 与对虾在占用水体空间上具有互补性, 是对虾池塘很好的混养对象。迄今, 国内外有关凡纳滨对虾与卵形鲳鲹混养的研究鲜有报道。为此, 笔者进行凡纳滨对虾单养和凡纳滨对虾-卵形鲳鲹混养的试验, 研究其氮磷收支和养殖生物对氮磷利用率的差异, 以期建立凡纳滨对虾-卵形鲳鲹混养模式提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验地点和围隔

2019年7~9月, 在中国水产科学研究院南海水产研究所深圳试验基地选取一口面积为3亩的池塘, 设置围隔进行试验。在池塘中设置3排试验围隔, 每排7个, 各围隔之间没有水交换, 相互独立。围隔面积均为 24 m^2 ($4\text{ m} \times 6\text{ m}$), 围隔以竹桩及竹竿构成支架, 以聚乙烯编织布为隔水材料, 将其包围并固定在支架上。在每个围隔中均匀布置16个增氧气石, 由一台功率为4 kW的鼓风机充气增氧。

2.2. 试验材料

凡纳滨对虾购于深圳市海源生物科技有限公司, 平均体重3.4 g (养殖一个月); 卵形鲳鲹购于深圳市龙岐庄实业发展有限公司。

2.3. 确定混养卵形鲳鲹合适规格的预实验

混养实验开始前, 先进行预实验以确定合适的卵形鲳鲹规格。对虾标粗养殖一个月后平均体重为3.4 g。在 2 m^3 水体的水泥池中开展对虾(体重3.4 g)和不同规格卵形鲳鲹(体重分别为25 g/尾、45 g/尾、65 g/尾、85 g/尾和100 g/尾)混养的预实验, 结果表明25 g/尾、45 g/尾和65 g/尾的卵形鲳鲹不能捕食对虾, 而85 g/尾和100 g/尾的卵形鲳鲹则不同程度地捕食对虾。然后, 向不同规格卵形鲳鲹(25 g/尾、45 g/尾和65 g/尾)投喂死虾(体重3.4 g), 发现65 g/尾的卵形鲳鲹能快速摄食死虾, 而25 g/尾和45 g/尾的卵形鲳鲹由于口径较小, 不能摄食死虾。预实验结果表明65 g/尾的卵形鲳鲹不能捕食对虾、能快速摄食死虾, 因此确定混养卵形鲳鲹的合适规格为65 g/尾。基于以上预实验结果开展以下实验内容。

2.4. 试验设计与管理

围隔放养均重为3.4 g/尾的对虾1728尾(即 7.2×10^5 尾/ hm^2), 放养65 g/尾的卵形鲳鲹分别为0尾(C组)、4尾(F4组)、8尾(F8组)、12尾(F12组)、16尾(F16组)、20尾(F20组)和24尾(F24组)。对虾和卵形鲳鲹于2019年7月22日放养, 试验于9月19日结束, 试验持续60 d。试验期间每天投喂南美白对虾饲料(购于越群海洋生物科技有限公司)3次, 日投喂量为对虾体重的5%~8%, 具体投喂量根据对虾的摄食情况及时调整。试验期间, 水温为 27.6°C ~ 33.6°C , 水体溶氧为 5.48 ~ $7.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.5. 采样与分析

分别于试验开始和结束时采集水样, 用 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 氧化法同时测定总氮和总磷[15]。试验期间, 用带刻度的烧杯接自然降雨, 估算降雨量, 用 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 氧化法测定总氮和总磷。

在试验开始和结束时分别采集养殖动物和底泥样品, 试验期间采集不同型号的饲料和调水产品样品。对虾、卵形鲳鲹、底泥、饲料、和调水产品于 60°C 烘干测定干物质比例后研细, 用元素分析仪测定总氮, 用酸溶-钼锑抗比色法测定总磷[16]。

采得底泥样品后, 离心(2000 r/min , 30 min , 4°C)得间隙水, 稀释后用 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 氧化法测定总氮和总磷, 据此计算氮、磷的渗漏[17]。

2.6. 计算公式

2.6.1. 试验动物生长指标的计算

对虾、卵形鲳鲹的增重率(Weight gain rate, WGR)、特定生长率(Specific growth rate, SGR)和存活率(Survival ratio, SR)分别按以下公式计算:

$$WGR = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100\% \quad [3]; \quad (1)$$

$$SGR (\% \cdot d^{-1}) = (\ln W_2 - \ln W_1) / T \times 100\% \quad [3]; \quad (2)$$

$$SR (\%) = N_2 / N_1 \times 100\% \quad [3]. \quad (3)$$

其中 W_2 和 W_1 分别表示虾或鱼终末体质量和起始体质量, T 表示试验天数, N_2 和 N_1 分别表示收获虾或鱼的数量和放养虾或鱼的数量。

2.6.2. 氮磷收支的计算

氮磷收支分别按式(4)和(5)计算:

$$\text{氮(磷)输入总量} = S_{1N(P)} + T_{1N(P)} + F_{N(P)} + M_{N(P)} + PV_{1N(P)} + R_{N(P)} \quad (4)$$

$$\text{氮(磷)输出总量} = S_{2N(P)} + T_{2N(P)} + PV_{2N(P)} + ST_{N(P)} + L_{N(P)} \quad (5)$$

式中 $S_{1N(P)}$ 和 $S_{2N(P)}$ 分别为对虾放养和收获时的总含氮量(或含磷量); $T_{1N(P)}$ 和 $T_{2N(P)}$ 分别为卵形鲳鲹放养和收获时的总含氮量(或含磷量); F 为配合饲料的总含氮量(或含磷量); M 为调水产品的总含氮量(或含磷量); $PV_{1N(P)}$ 和 $PV_{2N(P)}$ 分别为池塘初始水体和终末水体的总含氮量(或含磷量); R 为降雨的总含氮量(或含磷量); ST 为沉积物的总含氮量(或含磷量); L 为渗漏的总含氮量(或含磷量)。

2.6.3. 养殖生物对饲料氮磷利用率的计算

养殖生物对饲料氮磷利用率是指实验动物增重部分所含的氮磷占投入饲料氮磷总输入量的百分数, 按公式(6)和(7)计算:

$$UE_x = (Whx \times whx_{N(P)} - Wsx \times wsx_{N(P)}) / W_t \quad (6)$$

$$UE_t = \sum UE_x \quad (7)$$

式中 x 表示对虾或卵形鲳鲹; UE_x 表示 TN 或 TP 的利用率; Whx 表示收获的 x 的总重量; Wsx 表示放养的 x 的总重量; $whx_{N(P)}$ 和 $wsx_{N(P)}$ 分别放养 x 和收获 x 的氮磷干重质量分数; W_t 表示饲料的氮磷含量; UE_t 表示总利用率。

2.7. 数据处理

实验数据采用 Excel 2013 进行处理, 通过 SPSS 18.0 进行统计分析, 所得数据以“平均值±标准差”表示, $P < 0.05$ 表示差异显著。

3. 结果

3.1. 各试验组养殖生物的收获情况

如表 1 所示, 混养组中 F8 组和 F12 组对虾增重率和特定生长率均显著大于单养组($P < 0.05$), F4 组和 F16 组对虾增重率和特定生长率与单养组差异不显著($P > 0.05$), 而 F20 组和 F24 组对虾增重率和特定生长率均显著小于单养组($P < 0.05$)。混养各组对虾存活率均高于单养组, 其中 F12 组显著高于单养组($P < 0.05$)。F4 组、F8 组和 F12 组对虾产量显著高于单养组($P < 0.05$), 而 F24 组的产量显著小于单养组($P < 0.05$)。

卵形鲳鲹的增重率和特定生长率随着密度的增大而显著增加($P < 0.05$), 当鱼的密度超过 F12 组时, 鱼的增重率和特定生长率随着密度的增大而显著减小($P < 0.05$); 各组的存活率均为 100%; 鱼的产量与放养密度正相关。

Table 1. Harvest information on cultured aquatic species under different groups

表 1. 各试验组养殖动物的收获情况

指标	C	F4	F8	F12	F16	F20	F24
虾增重率	239.21 ± 4.61 ^c	240.03 ± 6.11 ^c	260.07 ± 5.10 ^d	275.36 ± 4.16 ^e	231.05 ± 9.12 ^c	214.48 ± 9.49 ^b	195.52 ± 4.48 ^a
虾特定生长率	2.03 ± 0.02 ^c	2.04 ± 0.03 ^c	2.14 ± 0.02 ^d	2.20 ± 0.02 ^e	1.99 ± 0.05 ^c	1.91 ± 0.05 ^b	1.81 ± 0.03 ^a
虾存活率	81.69 ± 2.58 ^a	86.00 ± 1.56 ^{ab}	86.56 ± 0.52 ^{ab}	88.53 ± 4.04 ^b	85.24 ± 4.91 ^{ab}	83.47 ± 1.56 ^{ab}	82.39 ± 1.84 ^a
虾产量/kg·24m ⁻²	16.16 ± 0.14 ^{bc}	17.09 ± 0.07 ^d	18.18 ± 0.17 ^e	19.41 ± 1.01 ^f	16.55 ± 0.69 ^{cd}	15.40 ± 0.37 ^b	14.27 ± 0.27 ^a
鱼增重率	无	127.92 ± 62.13 ^a	151.79 ± 41.98 ^b	193.57 ± 24.07 ^c	158.60 ± 21.93 ^b	168.48 ± 39.55 ^{bc}	162.24 ± 10.68 ^{bc}
鱼特定生长率	无	1.33 ± 0.46 ^a	1.52 ± 0.27 ^b	1.79 ± 0.14 ^c	1.58 ± 0.14 ^b	1.63 ± 0.24 ^{bc}	1.61 ± 0.07 ^{bc}
鱼存活率	无	100 ± 0.00	100 ± 0.00	100 ± 0.00	100 ± 0.00	100 ± 0.00	100 ± 0.00
鱼产量/kg·24m ⁻²	无	0.38 ± 0.10 ^a	0.79 ± 0.23 ^b	1.52 ± 0.20 ^c	1.65 ± 0.19 ^c	2.19 ± 0.69 ^d	2.53 ± 0.17 ^d

注: 表中同一行数据角标字母相同为差异不显著, 不同为差异显著。

3.2. 试验中各投放物的氮磷含量

如表 2 所示, 对虾饲料的氮磷含量随着饲料粒径的增大而减小; 收获对虾的氮磷含量高于放养对虾; 收获鱼的氮含量高于放养鱼。

Table 2. Nitrogen and phosphorus contents of feed, fertilizer, and stocked and harvested aquatic animals in different groups

表 2. 饲料、放养及收获养殖生物和调水产品的干物质和氮磷含量

指标	1号饲料	2号饲料	3号饲料	放养虾	收获虾	放养鱼	收获鱼	肥水王	单细胞藻类生长素	利生菌王
干物质(%)	92.41	91.92	92.15	20.18	23.42	24.32	29.18	93.41	94.31	95.42
N(%干重)	6.62	6.41	6.34	8.72	11.58	8.73	10.82	8.68	11.43	1.33
P(%干重)	1.52	1.47	1.36	0.57	0.98	0.45	0.58	0.83	1.82	0.38

3.3. 各试验组试验前后水体及降雨的氮磷含量

各组水体的氮磷含量在实验前后的变化见表 3。各组水体氮磷含量末值均大于初始值, 单养组水体的氮、磷浓度末值分别为 9.23 mg·L⁻¹ 和 0.65 mg·L⁻¹; 混养各组水体的氮、磷浓度末值分别为 6.03~8.86 mg·L⁻¹ 和 0.40~0.62 mg·L⁻¹; 其中, F8、F12、F16、F20 和 F24 组的氮、磷浓度末值均显著大于单养组($P < 0.05$)。试验期间, 降雨的氮磷含量分别为 0.8 mg·L⁻¹ 和 0.03 mg·L⁻¹。

Table 3. The initial and final content of nitrogen and phosphorus in water of different groups

表 3. 实验前后养殖水体的氮磷含量

指标		C	F4	F8	F12	F16	F20	F24
初始值 (mg·L ⁻¹)	N	1.65 ± 0.13	1.65 ± 0.13	1.65 ± 0.13	1.65 ± 0.13	1.65 ± 0.13	1.65 ± 0.13	1.65 ± 0.13
	P	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02
末值 (mg·L ⁻¹)	N	9.23 ± 1.41 ^a	8.86 ± 1.21 ^a	7.33 ± 1.01 ^b	6.42 ± 0.98 ^c	6.23 ± 1.10 ^c	6.03 ± 1.22 ^c	6.13 ± 1.41 ^c
	P	0.65 ± 0.04 ^a	0.62 ± 0.02 ^a	0.53 ± 0.03 ^b	0.47 ± 0.05 ^{bc}	0.43 ± 0.02 ^c	0.45 ± 0.05 ^c	0.40 ± 0.03 ^c

3.4. 各组试验前后底泥的氮磷含量

各组底泥的氮磷含量在实验前后的变化见表 4。由于各试验组在同一池塘，各组底泥的氮磷初始值大小相当；各组底泥的氮磷含量末值比初始值均有所提高，但差异不显著。

Table 4. The initial and final content of nitrogen and phosphorus in bottom soil of different groups

表 4. 实验前后围隔底泥干物质、氮、磷含量

指标		C	F4	F8	F12	F16	F20	F24
干物质 (%)	初始值	79.23 ± 3.03	80.05 ± 4.14	79.31 ± 3.83	79.18 ± 4.26	79.88 ± 5.25	79.80 ± 4.35	79.34 ± 3.82
	末值	77.56 ± 3.26	78.81 ± 4.23	78.71 ± 4.55	77.94 ± 4.71	78.53 ± 3.94	77.83 ± 4.25	78.26 ± 4.57
氮 (%干重)	初始值	0.32 ± 0.03	0.33 ± 0.05	0.32 ± 0.04	0.33 ± 0.02	0.33 ± 0.02	0.33 ± 0.04	0.33 ± 0.03
	末值	0.84 ± 0.05	0.87 ± 0.06	0.89 ± 0.03	0.88 ± 0.02	0.87 ± 0.05	0.85 ± 0.07	0.82 ± 0.04
磷 (%干重)	初始值	0.21 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.21 ± 0.01	0.22 ± 0.02	0.22 ± 0.01	0.21 ± 0.02	0.22 ± 0.03
	末值	0.39 ± 0.05	0.40 ± 0.03	0.40 ± 0.02	0.41 ± 0.04	0.40 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.39 ± 0.05

3.5. 各试验组饲料、放养及收获养殖生物和调水产品的重量

各组水体初始体积均为 36 m³，由于蒸发的因素，各组水体终末体积均为 31.2 m³。试验期间各试验组的降雨量为 1200 L。各组的饲料和调水产品投放量以及对虾与卵形鲳鲹的放养量和产量见表 5。

Table 5. The weight of feed, fertilizer, and stocked and harvested species in different groups

表 5. 各试验组饲料、放养及收获养殖生物和调水产品的重量(单位: kg)

组别	1号 饲料	2号 饲料	3号 饲料	放养虾	收获虾	放养鱼	收获鱼	肥水王	单细胞藻 类生长素	利生 菌王
C	4.75	4.75	6.33	5.82	16.16	无	无	1.23	1.04	0.84
F4	5.09	5.09	6.78	5.86	17.09	0.26	0.64	1.23	1.04	0.84
F8	5.24	5.24	6.99	5.83	18.18	0.52	1.32	1.23	1.04	0.84
F12	5.21	5.21	6.94	5.84	19.41	0.78	2.30	1.23	1.04	0.84
F16	4.77	4.77	6.36	5.87	16.56	1.04	2.69	1.23	1.04	0.84
F20	4.54	4.54	6.05	5.87	15.40	1.31	3.51	1.23	1.04	0.84
F24	4.37	4.37	5.82	5.86	14.27	1.56	4.10	1.23	1.04	0.84

3.6. 各试验组氮磷收支情况

从表 6 可以看出，饲料和调水产品输入氮磷量是氮磷总输入的主要部分，两者输入氮之和在对虾单养组和对虾混养组中占氮磷总输入分别为 87.72% 和 84.67%~87.91%，两者输入磷之和在对虾单养组和对虾混养组中占磷总输入分别为 92.34% 和 94.30%~95.50%。如表 7 所示，底泥沉积的氮在对虾单养组和混养组占氮总输出分别为 42.48% 和 42.09%~44.48%，底泥沉积的磷在对虾单养组和混养组占氮总输出分别为 75.94% 和 75.73%~76.72%。累积在水体的氮在对虾单养组和混养组占氮总输出分别为 21.83% 和 14.01%~19.80%，累积在水体的磷在对虾单养组和混养组占氮总输出分别为 8.14% 和 5.29%~7.32%，其中 F12、F16、F20 和 F24 组水体累积氮磷占氮磷输出的比例均显著小于单养组 ($P < 0.05$)。对虾单养组和混养组养殖生物利用的氮总输出分别为 33.22% 和 34.64%~41.90%，对虾单养组和混养组养殖生物利用的磷总输出分别为 14.89% 和 15.25%~17.90%，其中 F12、F16、F20 和 F24 组养殖生物利用的氮磷占氮磷输出的比例均显著大于单养组 ($P < 0.05$)。

Table 6. Income and expenditure of nitrogen in different groups
表 6. 各试验组氮的收支情况

指标	C	F4	F8	F12	F16	F20	F24
总输入	1324.81 ± 120.01	1398.31 ± 118.52	1434.67 ± 104.67	1433.01 ± 90.71	1353.03 ± 118.10	1312.63 ± 131.04	1283.44 ± 116.18
饲料	939.6 ± 72.54 (70.92 ± 7.72)	1006.83 ± 83.68 (72.00 ± 8.31)	1038.05 ± 67.82 (72.35 ± 6.53)	1030.77 ± 72.79 (71.93 ± 7.10)	944.77 ± 55.32 (69.83 ± 5.86)	898.79 ± 64.51 (68.47 ± 7.17)	864.25 ± 58.24 (67.34 ± 6.73)
调水产品	222.49 (16.79)	222.49 (15.91)	222.49 (15.51)	222.49 (15.53)	222.49 (16.44)	222.49 (16.95)	222.49 (17.34)
放入虾	102.36 ± 8.23 (7.73 ± 0.62)	103.15 ± 9.12 (7.38 ± 0.65)	102.65 ± 7.29 (7.15 ± 0.51)	102.74 ± 6.21 (7.17 ± 0.43)	103.31 ± 8.53 (7.64 ± 0.59)	103.24 ± 6.19 (7.87 ± 0.46)	103.15 ± 8.71 (8.04 ± 0.68)
放入鱼	无 无	5.48 ± 0.67 (0.39 ± 0.05)	11.12 ± 1.42 (0.78 ± 0.09)	16.65 ± 1.75 (1.16 ± 0.12)	22.10 ± 1.98 (1.63 ± 0.15)	27.75 ± 2.07 (2.11 ± 0.16)	33.19 ± 2.86 (2.59 ± 0.22)
初始水体	59.40 (4.48)	59.40 (4.25)	59.40 (4.14)	59.40 (4.15)	59.40 (4.39)	59.40 (4.53)	59.40 (4.63)
雨水	0.96 (0.07)	0.96 (0.07)	0.96 (0.07)	0.96 (0.07)	0.96 (0.07)	0.96 (0.07)	0.96 (0.07)
总输出	1318.89 ± 118.24	1396.12 ± 106.74	1432.42 ± 112.68	1429.44 ± 95.36	1350.72 ± 104.65	1308.55 ± 121.32	1279.23 ± 105.74
收获虾	438.20 ± 20.45 (33.22 ± 1.60 ^{ab})	463.39 ± 24.36 (33.19 ± 1.74 ^{ab})	493.05 ± 30.26 (34.42 ± 2.11 ^{ab})	526.29 ± 32.96 (36.82 ± 2.31 ^b)	448.96 ± 28.78 (33.24 ± 2.13 ^{ab})	417.57 ± 30.42 (31.91 ± 2.32 ^a)	387.00 ± 26.32 (30.25 ± 2.06 ^a)
收获鱼	无 无	20.25 ± 2.56 (1.45 ± 0.19)	41.68 ± 4.82 (2.91 ± 0.34)	72.70 ± 6.38 (5.09 ± 0.45)	84.91 ± 7.49 (6.29 ± 0.52)	110.72 ± 8.51 (8.46 ± 0.63)	129.44 ± 9.10 (10.12 ± 0.69)
终末水体	287.98 ± 14.54 (21.83 ± 1.10 ^b)	276.43 ± 12.11 (19.80 ± 0.87 ^{ab})	228.70 ± 11.93 (15.97 ± 0.83 ^b)	200.30 ± 8.10 (14.01 ± 0.57 ^b)	194.38 ± 9.61 (14.39 ± 0.71 ^b)	188.14 ± 9.78 (14.38 ± 0.75 ^b)	191.26 ± 8.29 (14.95 ± 0.65 ^b)
底泥沉积	566.32 ± 32.56 (42.48 ± 2.50)	604.44 ± 25.67 (43.14 ± 1.83)	639.39 ± 28.91 (44.48 ± 2.02)	601.79 ± 21.52 (41.85 ± 1.50)	592.43 ± 20.93 (43.69 ± 1.55)	563.43 ± 23.74 (42.74 ± 1.81)	542.67 ± 24.67 (42.09 ± 1.93)
渗漏	32.41 ± 2.53 (2.46 ± 0.19)	33.82 ± 2.49 (2.42 ± 0.18)	31.87 ± 3.61 (2.22 ± 0.25)	31.92 ± 2.98 (2.23 ± 0.21)	32.36 ± 3.02 (2.40 ± 0.22)	32.79 ± 2.74 (2.51 ± 0.21)	33.08 ± 2.21 (2.59 ± 0.25)

注：表中同一行数据角标字母相同为差异不显著，不同为差异显著。括号内数据为该项目在输入或输出中的百分数(%)，表 7 同此。

Table 7. Income and expenditure of phosphorus in different groups
表 7. 各试验组磷的收支情况

指标	C	F4	F8	F12	F16	F20	F24
总输入	252.39 ± 20.13	267.74 ± 18.94	274.98 ± 19.37	273.64 ± 14.86	254.73 ± 15.29	244.74 ± 16.31	237.29 ± 15.08
饲料	210.10 ± 10.26 (83.24 ± 4.07)	225.11 ± 12.57 (84.08 ± 4.69)	232.09 ± 11.06 (84.40 ± 4.02)	230.46 ± 12.48 (84.22 ± 4.56)	211.24 ± 11.53 (82.93 ± 4.53)	200.96 ± 10.67 (82.11 ± 4.36)	193.23 ± 11.29 (81.43 ± 4.76)
调水产品	30.52 (12.09)	30.52 (11.40)	30.52 (11.10)	30.52 (11.16)	30.52 (11.98)	30.52 (12.47)	30.52 (12.86)

Continued

放入虾	6.69 ± 0.56	6.74 ± 0.55	6.71 ± 0.62	6.72 ± 0.48	6.75 ± 0.54	6.75 ± 0.49	6.74 ± 0.41
	(2.65 ± 0.22)	(2.52 ± 0.21)	(2.44 ± 0.23)	(2.45 ± 0.18)	(2.65 ± 0.21)	(2.76 ± 0.20)	(2.84 ± 0.17)
放入鱼	无	0.28 ± 0.03	0.57 ± 0.04	0.86 ± 0.41	1.14 ± 0.58	1.43 ± 0.36	1.71 ± 0.48
	无	(0.11 ± 0.01)	(0.21 ± 0.01)	(0.31 ± 0.15)	(0.45 ± 0.23)	(0.58 ± 0.15)	(0.72 ± 0.20)
初始水体	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04	5.04
	(2.00)	(1.88)	(1.83)	(1.84)	(1.98)	(2.06)	(2.12)
雨水	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.02)
总输出	249.04 ± 10.63	264.32 ± 11.35	270.52 ± 12.67	270.56 ± 10.98	253.44 ± 11.73	241.42 ± 12.38	234.53 ± 11.49
收获虾	37.08 ± 2.27	39.22 ± 3.05	41.73 ± 3.81	44.54 ± 4.02	37.99 ± 3.83	35.34 ± 2.99	32.75 ± 2.08
	(14.89 ± 0.91)	(14.84 ± 1.15)	(15.42 ± 1.41)	(16.46 ± 1.49)	(14.99 ± 1.51)	(14.64 ± 1.24)	(13.96 ± 0.89)
收获鱼	无	1.09 ± 0.15	2.23 ± 0.18	3.90 ± 0.23	4.55 ± 0.36	5.94 ± 0.41	6.94 ± 0.58
	无	(0.41 ± 0.06)	(0.83 ± 0.07)	(1.44 ± 0.09)	(1.80 ± 0.14)	(2.46 ± 0.17)	(2.96 ± 0.25)
终末水体	20.28 ± 1.95	19.34 ± 1.25	16.54 ± 0.94	14.66 ± 0.81	13.42 ± 0.96	14.04 ± 0.83	12.48 ± 0.56
	(8.14 ± 0.78 ^b)	(7.32 ± 0.47 ^{ab})	(6.11 ± 0.35 ^{ab})	(5.42 ± 0.29 ^a)	(5.29 ± 0.38 ^a)	(5.82 ± 0.34 ^a)	(5.32 ± 0.24 ^a)
底泥沉积	189.12 ± 10.21	201.96 ± 13.62	207.54 ± 12.84	204.89 ± 12.49	194.87 ± 15.74	183.38 ± 16.18	179.52 ± 13.75
	(75.94 ± 4.09)	(76.41 ± 5.15)	(76.72 ± 4.75)	(75.73 ± 4.62)	(76.89 ± 6.21)	(75.96 ± 6.70)	(76.54 ± 5.86)
渗漏	2.56 ± 0.16	2.71 ± 0.21	2.48 ± 0.18	2.57 ± 0.25	2.61 ± 0.21	2.73 ± 0.14	2.84 ± 0.17
	(1.03 ± 0.06)	(1.03 ± 0.08)	(0.92 ± 0.06)	(0.95 ± 0.09)	(1.03 ± 0.08)	(1.13 ± 0.06)	(1.21 ± 0.07)

3.7. 各试验组养殖生物对饲料氮磷利用率

如表 8 所示, F8、F12 和 F16 组对虾对饲料氮磷的利用率均大于单养组, 但差异不显著($P > 0.05$)。混养组中养殖生物对输入氮磷的利用率均大于单养组, 其中 F12、F16、F20 和 F24 组显著大于单养组($P < 0.05$)。

Table 8. Nitrogen and phosphorus utilization efficiencies of feed in different treatments

表 8. 各试验组养殖生物对饲料氮、磷的利用率

养殖生物	指标	C	F4	F8	F12	F16	F20	F24
对虾 (%输入)	氮	46.63 ± 2.13	46.02 ± 3.54	47.49 ± 2.83	51.06 ± 3.25	47.52 ± 4.22	46.46 ± 3.71	44.78 ± 4.85
	磷	17.65 ± 1.26	17.42 ± 2.23	17.98 ± 1.51	19.33 ± 1.74	17.99 ± 1.24	17.58 ± 1.24	16.95 ± 1.57
卵形鲳鲀 (%输入)	氮	无	2.01 ± 0.16	4.02 ± 0.34	7.05 ± 0.51	8.99 ± 0.49	12.32 ± 1.05	14.98 ± 1.13
	磷	无	0.48 ± 0.05	0.96 ± 0.06	1.69 ± 0.12	2.15 ± 0.17	2.95 ± 0.21	3.59 ± 0.34
虾和鱼 (%输入)	氮	46.63 ± 2.13 ^a	48.04 ± 3.02 ^a	51.51 ± 4.21 ^{ab}	58.11 ± 4.32 ^b	56.51 ± 3.47 ^b	58.78 ± 4.51 ^b	59.76 ± 3.93 ^b
	磷	17.65 ± 1.26 ^a	17.90 ± 1.53 ^a	18.94 ± 1.72 ^{ab}	21.02 ± 2.15 ^b	20.14 ± 1.96 ^b	20.54 ± 2.16 ^b	20.54 ± 1.84 ^b

注: 表中同一行数据角标字母相同为差异不显著, 不同为差异显著。

4. 讨论

4.1. 各试验组对虾的收获情况

近年来, 许多国内外学者对对虾与不同种类的鱼类混养展开了较为深入的研究。张嘉晨等研究发现,

混养点带石斑鱼可以提高凡纳滨对虾的特定生长率和存活率[18]。笔者前期研究发现,凡纳滨对虾特定生长率和存活率随着罗非鱼混养密度增大而呈现下降趋势[3]。本研究中,F12组(混养卵形鲳鲹密度为5000尾/hm²)中凡纳滨对虾的特定生长率最大,一旦混养卵形鲳鲹密度超过333尾/亩时,凡纳滨对虾的特定生长率逐渐减小。当混养卵形鲳鲹密度超过5000尾/hm²时,凡纳滨对虾的特定生长率随着混养卵形鲳鲹密度增大而不断下降。究其原因,可能是混养过多的卵形鲳鲹会加剧鱼虾对食物、溶解氧和空间竞争,从而导致凡纳滨对虾不能摄食足够的饲料,降低对虾的特定生长率[19]。因此以对虾为主的养殖模式中,混养卵形鲳鲹的密度不宜过高。

混养各组对虾存活率均高于单养组,其中F12组显著高于单养组。卵形鲳鲹是肉食性鱼类,在对虾池塘混养的肉食性鱼类可快速捕食死虾和病虾,切断病害传播途径,进而提高对虾的存活率[20]。许多鱼类黏液具有抗菌、抗真菌和细胞毒(杀伤带抗原的靶细胞)活性,和对虾混养后可以降低水体致病菌的数量,有助于改善养殖环境,提高对虾存活率[21][22]。先前的研究均表明混养过多的鱼会导致对虾存活率比单养组低[3][7][18],但本研究中混养组凡纳滨对虾的存活率均大于对虾单养组,这是由于混养的卵形鲳鲹规格合适,其口径小,不能捕食对虾。

4.2. 混养对的氮磷收支的影响

氮和磷是水产动物正常生长发育所需的两种重要元素,也是评价水体富营养化的重要指标[23]。研究氮磷收支可以揭示养殖系统中氮和磷的来源和归宿,是评价养殖生物对输入氮磷利用率和养殖污染程度的有效方法[24][25]。不同对虾养殖模式中,氮磷输入的来源比例有所差异,但饲料和肥料是输入氮磷的主要组分,其输入比例在80%以上[6]。李卓佳等开展了对虾单养和混养模式氮磷收支的研究,单养模式中饲料与肥料占氮磷总输入分别为87.8%和97.9%,混养组饲料与肥料占氮磷总输入分别为81.8%~91.9%和96%~98.7% [5];李金亮等报道,饲料是对虾养殖系统中最主要的氮磷输入源,占池塘氮和磷总输入的91.76%~93.68%和94.55%~96.97% [26];Sahu等研究发现,对虾精养模式中饲料氮磷输入占总输入氮磷的比例分别为94.43%~95.03%和91.92%~95.36% [27]。本研究中单养组饲料与调水产品占氮磷总输入分别为87.8%和97.9%,混养组饲料与调水产品占氮磷总输入分别为81.8%~91.9%和96%~98.7%,与上述研究相比,差别不大。

底泥沉积、养殖水体和养殖生物是氮磷输出的主要组分。本研究中,底泥沉积的氮磷在对虾单养组和混养组占氮磷总输出的比例差不多,但F12、F16、F20和F24组水体累积氮磷占氮磷输出的比例均显著小于单养组,F12、F16、F20和F24组养殖生物利用的氮磷占氮磷输出的比例均显著大于单养组。与单养相比,对虾混养模式可以提高对输入氮磷的利用率[17]。张凯等报道,凡纳滨对虾与三疣梭子蟹混养可以显著提高氮磷的利用率[28];李卓佳等研究认为,对虾池塘混养罗非鱼混养可以大幅度提高氮磷利用率,其中氮的利用率提高了13.6%~24.7%,磷的利用率提高了4.3%~7.6% [5]。与上述研究结果相似,本研究中虾池混养卵形鲳鲹显著提高了养殖生物对氮磷的利用率,减少了氮磷在养殖水体积累。这是因为卵形鲳鲹摄食了过剩的对虾饲料和病弱虾,减少了饲料溶失,可以提高输入氮磷的利用率。本研究的输入总氮磷稍大于输出总氮磷,可能的原因是围隔上吸附有机质中的氮磷未被考虑。

综上所述,凡纳滨对虾(3.4 g/尾,放养密度为 7.2×10^5 尾/hm²)和卵形鲳鲹(65 g/尾,放养密度为5000尾/hm²)混养,可以提高养殖生物对输入氮磷的利用率,提高凡纳滨对虾的生长性能和产量。

基金项目

深圳市科技计划知识创新基础研究项目(编号:JCYJ20170817103947002, JCYJ20170817103922921, JCYJ20170817103856495);深圳市大鹏新区科技创新和产业发展专项资金资助项目(编号:PT202001-21);

中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(2018ZD01); 国家自然科学基金青年科学基金项目(NSFC 31602167), 现代农业产业技术体系建设专项虾蟹体系岗位科学家经费(编号: CARS-48); 农业部财政专项(南海水产研究所南海渔业中心南沙渔业管理工作经费); 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设专项资金(编号: 2019KJ149, 2019KJ143)。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [2] 袁瑞鹏, 刘建勇, 胡志国, 等. 凡纳滨对虾与点带石斑鱼混养的试验研究[J]. 水产科学, 2015, 34(7): 413-417.
- [3] 虞为, 李卓佳, 王丽花, 等. 对虾单养和对虾-罗非鱼混养试验围隔水质动态及产出效果的对比[J]. 中国渔业质量与标准, 2013, 3(2): 89-97.
- [4] 虞为, 李卓佳, 朱长波, 等. 我国对虾生态养殖的发展现状、存在问题与对策[J]. 广东农业科学, 2011, 38(17): 168-171.
- [5] 李卓佳, 虞为, 朱长波, 等. 对虾单养和对虾-罗非鱼混养试验围隔氮磷收支的研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 50-55.
- [6] 王申, 高珊珊, 蒋力, 等. 水产养殖系统氮磷营养盐收支及其生态影响研究[J]. 水产学杂志, 2018, 31(5): 50-57.
- [7] 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.
- [8] 程海华, 郭建林, 顾志敏, 等. 混养鲫鱼对罗氏沼虾种虾培育效果的影响[J]. 水产科学, 2019, 38(3): 416-419.
- [9] 郭晓奇, 周发林, 马志洲, 等. 斑节对虾南海 2 号混养黄鳍鲷和褐篮子鱼对池塘水质和生长性能的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(5): 121.
- [10] 徐金根, 陈素文, 张汉华, 等. 凡纳滨对虾不同池塘混养模式的弧菌数量变化[J]. 广东农业科学, 2012, 39(19): 156-159.
- [11] 刘楚斌, 陈锤. 卵形鲳鲹的生物学与养殖技术[J]. 齐鲁渔业, 2009, 26(6): 32-33.
- [12] 韦栋, 李玉壮, 李英. 卵形鲳鲹网箱养殖与病害防治技术[J]. 湖南水产, 2013(6): 87.
- [13] 夏立群, 黄郁葱, 鲁义善. 卵形鲳鲹主要病害及其研究进展[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(23): 140-143.
- [14] 黄浦江. 卵形鲳鲹病害综合防治技术探析[J]. 兽医导刊, 2016(10): 112.
- [15] 刘际弟. 海水中磷氮不同形态的同时测定[J]. 海洋学研究, 2003, 21(3): 47-53.
- [16] 扈传昱, 王正方, 吕海燕. 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.
- [17] 孙云飞, 王芳, 刘峰, 等. 草鱼与鲢、鲤不同混养模式系统的氮磷收支[J]. 中国水产科学, 2015, 22(3): 450-459.
- [18] 张嘉晨, 刘建勇, 袁瑞鹏, 等. 凡纳滨对虾与点带石斑鱼的混养模式[J]. 广东海洋大学学报, 2015, 35(4): 46-50.
- [19] 靳翠丽, 王吉桥, 庞璞敏, 等. 井盐水池塘中国对虾与尼罗罗非鱼混养的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2001, 16(4): 280-286.
- [20] Kwon, J.T., Cheon, J.J., Jin, J.G., et al. (2007) Polyculture of Fleishy Shrimp *Fenneropenaeus chinensis* and White Shrimp *Litopenaeus vannamei* with River Puffer *Takifugu obscurus* in Shrimp Ponds. *Journal of Aquaculture*, **20**, 1-11.
- [21] Magarinos, B., Pazos, F., Santos, Y., et al. (1995) Response of *Pasteurella piscicida* and *Flexibacter maritimus* to Skin Mucus of Marine Fish. *Diseases of Aquatic Organisms*, **21**, 103-108. <https://doi.org/10.3354/dao021103>
- [22] Hellio, C., Pons, A.M., Beaupoil, C., Bourgougnon, N. and Gal, Y.L. (2002) Antibacterial, Antifungal and Cytotoxic Activities of Extracts from Fish Epidermis and Epidermal Mucus. *International Journal of Antimicrobial Agents*, **20**, 214-219. [https://doi.org/10.1016/S0924-8579\(02\)00172-3](https://doi.org/10.1016/S0924-8579(02)00172-3)
- [23] 魏虎进, 程飞, 朱小明, 等. 以缢蛭为主的生态综合养殖池塘氮磷流转研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2013, 52(2):254-258.
- [24] Green, B.W. and Boyd, C.E. (2007) Chemical Budgets for Organically Fertilized Fish Ponds in the Dry Tropics. *Journal of the World Aquaculture Society*, **26**, 284-296. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00257.x>
- [25] 王玲, 张春晓, 钟幼平, 等. 对虾、东方鲀和星虫混养模式的氮磷收支研究[J]. 集美大学学报(自然版), 2013,

18(3): 172-179.

- [26] 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, 2010(5): 15-22.
- [27] Sahu, B.C., Adhikari, S. and Dey, L. (2013) Carbon, Nitrogen and Phosphorus Budget in Shrimp (*Penaeus monodon*) Culture Ponds in Eastern India. *Aquaculture International*, **21**, 453-466. <https://doi.org/10.1007/s10499-012-9573-x>
- [28] 张凯, 田相利, 董双林, 等. 三疣梭子蟹、凡纳滨对虾和菲律宾蛤仔混养系统氮磷收支的研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(2): 44-53.