

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20240325001

<http://www.yykxjz.cn/>

金渝钦, 孟顺龙, 徐慧敏, 宋超, 范立民, 裴丽萍, 李丹丹. 生物絮团模式下大口黑鲈养殖水环境及氮磷收支研究. 渔业科学进展, 2025, 46(2): 204–215

JIN Y Q, MENG S L, XU H M, SONG C, FAN L M, QIU L P, LI D D. Aquatic environment and nitrogen and phosphorus balance in *Micropterus salmoides* culture under biofloc model. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(2): 204–215

生物絮团模式下大口黑鲈养殖 水环境及氮磷收支研究^{*}

金渝钦¹ 孟顺龙^{1,2①} 徐慧敏² 宋超^{1,2}
范立民^{1,2} 裴丽萍² 李丹丹²

(1. 南京农业大学无锡渔业学院 江苏 无锡 214128; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心
农业农村部水产品质量安全环境因子风险评估实验室 中国水产科学研究院内陆渔业生态环境和
资源重点开放实验室 江苏 无锡 214081)

摘要 为探究生物絮团模式下大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)养殖水环境及氮磷收支情况, 在300 L玻璃缸中进行实验, 设置空白组(投喂基础饲料)和生物絮团组(外加葡萄糖维持系统C/N为15), 每组设置3个平行, 放养密度为20尾/缸, 进行60 d的零换水养殖实验。结果显示, 与空白组相比较, 生物絮团模式下养殖系统水体中的NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN和TP含量均有显著降低($P<0.05$), 分别减少了57.07%、80.22%、30.50%、24.64%和31.47%。饲料是养殖系统氮、磷输入的主要方式, 分别占空白组和絮团组氮总输入的(90.60±0.08)%、(87.16±0.19)%, 占磷总输入的(96.08±0.19)%、(92.30±0.24)%。收获的大口黑鲈是养殖系统氮输出的主要方式, 分别占空白组和絮团组氮总输入的(43.04±1.42)%、(44.17±1.53)%; 而底泥累积是养殖系统磷输出的主要途径, 分别占空白组和絮团组磷总输入的(75.92±0.47)%、(74.70±0.71)%。絮团组氮的绝对利用率和相对利用率分别为(44.17±1.53)%、(50.69±1.87)%, 均高于空白组的(43.04±1.42)%、(47.51±1.60)%; 但差异均不显著($P>0.05$); 而絮团组磷的绝对利用率和相对利用率分别为(17.41±0.14)%、(18.87±0.20)%, 均显著高于空白组(13.06±0.36)%、(13.59±0.38)%($P<0.05$)。研究表明, 生物絮团模式养殖大口黑鲈能调节养殖水质, 降低氮、磷累积, 提高养殖生物对氮、磷的利用, 具有良好的生态效益, 对促进我国水产养殖健康绿色发展至关重要。

关键词 生物絮团; 大口黑鲈; 养殖水环境; 氮磷收支; 利用率

中图分类号 S966 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)02-0204-12

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)俗称加州鲈, 原产自北美洲, 是世界上产量最大的淡水肉食性鱼类之一。20世纪70年代, 大口黑鲈被引进入我国台湾,

之后经人工繁育引入广东, 由于其生长快、适应性强、肉质好等优点, 经过半个世纪的发展, 已成为我国重要的水产养殖品种之一(Bai et al, 2008)。根据《中国渔

* 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系(CARS-46)和中国水产科学研究院基本科研业务费: 长江渔业生态环境监测与修复创新团队项目(2023TD18)共同资助。金渝钦, Email: 1519488517@qq.com

① 通信作者: 孟顺龙, 研究员, Email: mengsl@ffrc.cn

收稿日期: 2024-03-25, 收修改稿日期: 2024-04-16

业统计年鉴》(农业农村部渔业渔政管理局等, 2023), 2022年, 我国淡水鲈鱼养殖产量达到80.25万t, 比2021年增长了14.30%。尽管鲈鱼养殖产品对社会有益, 然而, 随着集约化、半集约化养殖方式的发展, 引起养殖水质恶化、病害频发和环境退化等问题, 限制了我国鲈鱼养殖的可持续发展。

目前, 生物絮团技术(biofloc technology, BFT)养殖模式作为传统水产养殖模式可行且环保的替代品被广泛使用(Vinatea *et al*, 2018)。Avnimelech (1999)首次系统地提出了生物絮团的概念, 并指出外加碳源维持养殖系统适宜的C/N比是生物絮团技术养殖模式的核心。BFT养殖系统中含有大量生物絮团, 是由好氧微生物通过絮凝作用将水体中的细菌、藻类、饲料残渣及一些无机物等聚集成絮团状的物质(Schryver *et al*, 2008)。在BFT养殖系统中, 由于蒸发和去除多余的生物絮团, 只有少量的水被交换(Vinatea *et al*, 2018), 并且养殖系统中的微生物对废氮进行再利用(Hargreaves, 2006), 絮团也能被养殖动物摄食, 因此, 其具有保护环境、调节水质以及促进物质循环的作用。目前, 大口黑鲈养殖方式以池塘养殖为主, 并通过大换水的方式维持水质的稳定, 尽管取得了不错的经济效益, 但此方式存在污染生态环境和浪费水资源等弊端(贾松鹏等, 2022; 孙毅等, 2021)。生物絮团模式养殖过程当中不换水(只补充蒸发的水分), 减少了污水排放对环境的污染, 也减少了外界环境中的各种有害因素对养殖生物的危害, 用生物絮团来维持养殖系统水质的稳定, 控制氨氮和亚硝态氮保持在较低的水平并且降低发病率或者不发病, 养殖生物可以健康快速地生长。生物絮团技术养殖模式是有效解决当前水产养殖问题的新型养殖模式之一, 已在罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)、鲫(*Carassius auratus*)、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)等多种水产动物的养殖中应用(Miao *et al*, 2020; 李朝兵, 2012; 罗文, 2013; Ludson *et al*, 2020)。然而, 生物絮团技术养殖模式养殖大口黑鲈的相关研究较少, 本研究把生物絮团应用到大口黑鲈养殖系统中, 探究生物絮团对大口黑鲈养殖水环境的影响, 旨在为大口黑鲈健康绿色养殖提供理论参考。

氮、磷在生态系统中扮演非常重要的角色, 能作为生态系统中物质循环和能量流动特征的指标, 并且氮、磷是水产养殖生态系统中的限制性养分, 其浓度可以直接影响养殖环境的变化。水产养殖活动中饲料、肥料等使用导致养殖系统中氮、磷的累积, 不仅造成养殖水质及周围环境的恶化(Tian *et al*, 2001), 更会导致大量病原传播, 危害养殖生物。为了减少水产

养殖系统中氮、磷的积累, 有必要估算养殖系统的氮、磷收支, 追溯添加到养殖系统中氮、磷的来源与去向。氮、磷收支不仅是评价水产养殖系统中氮磷的利用率、转化率及养殖水体污染程度的有效方法(王彦波等, 2005), 还可以作为水产养殖管理的基础(Teichert-Coddington *et al*, 2000)。通过量化养殖系统中氮、磷的输入和输出, 了解它们的收支情况, 从而探究氮、磷在养殖系统中的利用效率, 这对于改善养殖水质、降低对生态环境的污染、提高养殖生物对饵料的利用率、促进水产养殖业可持续发展至关重要(Dien *et al*, 2018)。目前, 不同养殖生物在不同水产养殖系统的氮、磷收支已经得到了广泛的研究, 例如, 珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus luscoguttatus* ♀)高位养殖池塘(廖洪平等, 2023)、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)混养零换水池塘(张凯等, 2022)、罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)鱼菜共生池塘(高攀等, 2021)、大口黑鲈池塘内循环流水养殖(刘梅等, 2021)、罗非鱼生物絮团技术养殖及循环水养殖模式(Cao *et al*, 2020)。然而, 目前缺乏关于大口黑鲈生物絮团技术养殖模式氮、磷收支分析的信息, 缺乏系统的监测和必要的数据。

因此, 本研究旨在探究大口黑鲈生物絮团技术养殖模式的养殖水环境及氮、磷收支情况, 为今后大口黑鲈的健康养殖和水质管理提供数据支持, 为优化生物絮团技术养殖模式提供理论参考, 对于促进我国水产养殖健康绿色发展和加快养殖模式转型升级至关重要。

1 材料与方法

1.1 实验设置

本实验在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心进行。实验装置为玻璃缸(1.0 m×0.6 m×0.5 m), 每缸300 L容积, 有效水体为200 L。实验设置生物絮团组(投喂一定剂量的葡萄糖)和空白组, 每组设置3个平行, 放养密度为20尾/缸, 本研究自2023年8月22日开始, 进行60 d的零换水养殖实验, 至2023年10月21日结束, 期间只补充因采样、自然蒸发而丢失的水量。实验前, 絯团组每缸底部放置少量池塘底泥, 用以提供土著微生物, 这有助于促进生物絮团的形成(Avnimelech, 2012)。每个缸中添加2个曝气头, 分别置于缸中两侧, 连接SHZ-D(Ⅲ)循环水式多用真空泵, 起到增氧和搅拌水流的作用。

1.2 实验鱼的饲养与管理

实验所用大口黑鲈购自江苏中水东泽农业发展

股份有限公司, 经 14 d 的养殖适应期后, 挑选健康、规格一致的大口黑鲈鱼种 [(33.26±1.18) g/尾], 每缸放养 20 尾。投喂江苏省无锡通威生物科技有限公司特种料分公司提供的大口黑鲈饲料(饲料主要成分为粗蛋白≥46.00%、粗纤维≤6.0%、粗脂肪≥6.0%、粗灰分≤16.0%、总磷≥1.20%、赖氨酸≥2.30%、水分≤12.0%), 每日按照鱼体重的 3%投喂, 每日 09:00 和 17:00 投喂 2 次, 每 15 d 随机取 6 条鱼称重, 以调整饲料投喂量。实验期间水温为 24~30 °C, pH 为 6.5~8.5, 溶解氧维持在 7~9 mg/L。当絮团组 pH 降低时, 添加适量碳酸氢钠, 以维持絮团组系统 pH 为弱碱性(夏耘等, 2014), 以维持生物絮团的稳定性(Furtado *et al.*, 2015)。

1.3 实验碳源与添加方法

实验所用葡萄糖为一水葡萄糖(购自仁和堂药业有限公司), 含碳量为 36.37%。参考 Avnimelech (1999) 的碳氮比计算方法(图 1), 葡萄糖的添加量根据饲料中的含氮量而定, 维持实验组的 C/N 为 15 (胡世康, 2020)。添加葡萄糖时, 先将葡萄糖与少量养殖水体混合搅匀, 然后均匀泼洒在实验缸中, 添加时间在每次投喂饲料 30 min 后。

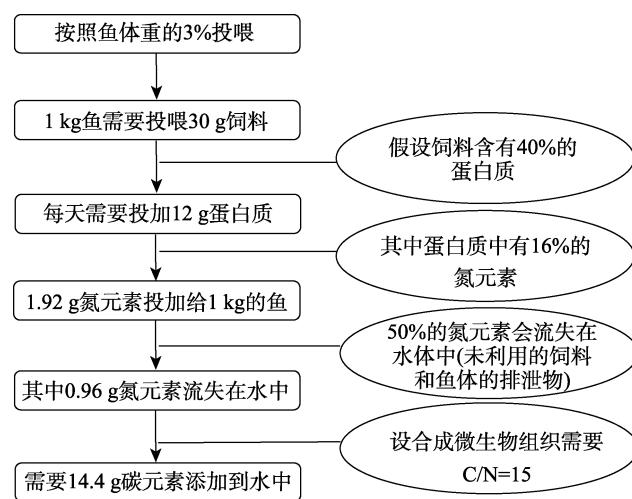


图 1 养殖系统中碳氮比的计算方法
Fig.1 Calculation method of C-N ratio in aquaculture system

1.4 絮团特性

生物絮团沉降量利用英霍夫锥形管测量, 操作方法: 利用英霍夫锥形管取 1 L 的养殖水, 然后静置 30 min, 读取沉淀物的量, 单位为 mL/L。

1.5 样品采集与测定方法

1.5.1 水样采集与水质指标测定 温度、溶解氧和

pH 值使用 YSI Pro 便携式水质检测仪, 每日进行监测。实验开始前每组采集 1 L 水样, 实验开始后, 每隔 10 d 每组采集 1 L 水样, 直到实验结束。养殖水体的总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)和亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)含量分别按过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89)、过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB/T 11893-89)、纳氏试剂光度法(GB 7479-87)、紫外分光光度法(GB/T 5750.5-2006)和 N-(1-萘基)-乙二胺光度法(GB 7493-87)测定。

1.5.2 底泥样品采集与测定 实验结束后将残饵、粪便等沉积物(本实验全作为底泥)进行收集并称重。将每组收集的底泥搅拌均匀后称取一部分样品, 使用冻干机进行冷冻干燥至恒重, 干燥后样品经粉碎处理后采用凯氏定氮法(GB/T 6432-2018)和碱溶-钼锑抗分光光度法(HJ 632-2011)测定其 N、P 含量。

1.5.3 鱼体样品及饲料采集与测定 养殖结束, 先称量每组鱼体的总重, 再采集每组 3 条养殖鱼, 全鱼于冷冻干燥至恒重, 然后粉碎并混合均匀。采集投喂的饲料, 同样冷冻干燥后粉碎混合均匀。取一部分处理后的鱼样和饲料样品测定其 N、P 含量, 方法与测定底泥 N、P 含量相同。

1.6 计算公式

1.6.1 氮、磷利用率的计算 收获养殖鱼的氮、磷总含量占养殖系统氮、磷总输入量的比例称作氮、磷的绝对利用率, 而收获养殖鱼的氮、磷总含量占饲料输入氮、磷总量的比例称作氮、磷的相对利用率。

$$\text{氮的绝对利用率} = \frac{N_h}{N_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{氮的相对利用率} = \frac{N_h}{N_f} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{磷的绝对利用率} = \frac{P_h}{P_{in}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{磷的相对利用率} = \frac{P_h}{P_f} \times 100\% \quad (4)$$

式中, N_h 为收获鱼的总含氮量, N_{in} 为养殖系统氮的输入总量, N_f 为投喂饲料的总含氮量, P_h 为收获鱼的总含磷量, P_{in} 为养殖系统磷的输入总量, P_f 为投喂饲料的总含磷量。

1.6.2 氮、磷收支的计算 根据物质平衡原理, 对养殖系统氮磷的输入和输出进行评估, 具体计算公式如下:

$$N(P)_{IN} = W_{in} + A_{in} + B \quad (5)$$

$$N(P)_{OUT} = W_{out} + A_{out} + M + E \quad (6)$$

式中, W_{in} 为系统初始水体输入的 N、P 量; A_{in} 为通过放养鱼苗输入的 N、P 量; B 为通过饲料输入的 N、P 量; W_{out} 为系统末期水体输出的 N、P 量; A_{out} 为通过鱼体产出输出的 N、P 量; M 为底泥沉积输出的 N、P 量; E 为其他形式输出的 N、P 量; $N(P)_{IN}$ 为输入系统的 N、P 总量; $N(P)_{OUT}$ 为输出系统的 N、P 总量。

1.7 数据统计与分析

所得参数利用 Excel 2021 进行简单分析整理, 用平均值±标准差(Mean±SD)来表示所有数据。使用 SPSS 27 进行单因素方差分析(one-way ANOVA), $P<0.05$ 表示有显著性差异。

2 结果

2.1 生物絮团沉降量的变化

絮团组中生物絮团沉降量的变化情况如图 2 所示, 随着养殖的进行, 絮团的沉降量先升高, 之后逐渐稳定。在养殖 20 d 时, 絮团沉降量达到 (28.33 ± 2.08) mL/L, 之后有较小的波动, 养殖结束时, 沉降量为 (25.33 ± 0.58) mL/L。

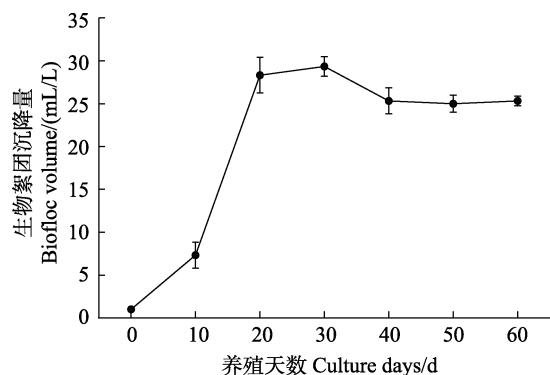


图 2 养殖水体中生物絮团沉降量的变化

Fig.2 Changes of biofloc volume in culture water

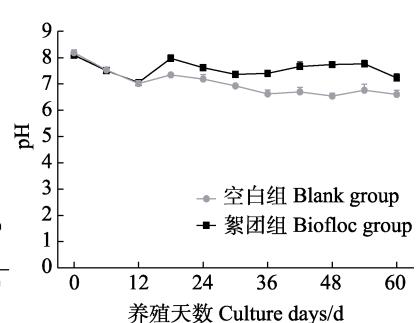
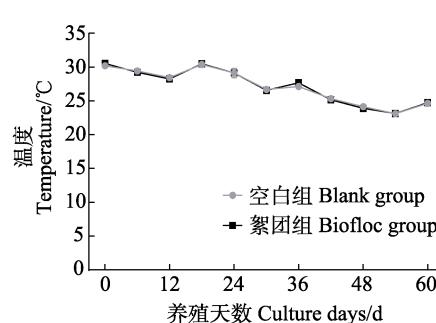
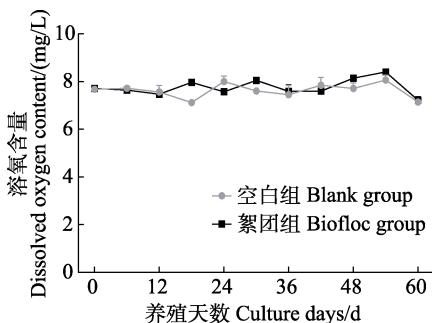


图 3 大口黑鲈养殖水体中溶解氧含量、温度、pH 的变化

Fig.3 Changes of dissolved oxygen content, temperature, and pH in *M. salmoides* culture water

2.2 大口黑鲈养殖水体中溶解氧含量、温度、pH 的变化

养殖期间, 絯团组和空白组养殖水体的溶解氧含量、温度和 pH 变化情况如图 3 所示。絮团组和空白组溶解氧相对稳定, 在整个养殖期间, 呈现降低趋势, 絯团组与空白组之间无显著差异($P>0.05$)。整个养殖过程中, 絯团组水体溶解氧含量平均值为 (7.76 ± 0.35) mg/L, 而空白组为 (7.63 ± 0.34) mg/L。絮团组和空白组水体温度变化趋势相同, 前期温度较高, 之后水温逐步降低。絮团组与空白组水体温度之间无显著差异($P>0.05$)。絮团组和空白组水体 pH 变化趋势相同, 随着养殖的进行, pH 呈下降趋势。整个养殖过程中, 絯团组 pH 平均值为 7.58 ± 0.31 , 空白组为 7.04 ± 0.50 , 除前 3 次测量外, 絯团组水体 pH 均显著高于空白组($P<0.05$)。

2.3 大口黑鲈养殖水体中总氮(TN)、总磷(TP)含量的变化

养殖期间, 絯团组和空白组养殖水体的 TN、TP 含量变化情况如图 4 所示。絮团组和空白组 TN 含量均呈先升高后降低的变化趋势。在养殖 0、50、60 d 时, 絯团组 TN 含量与空白组差异显著($P<0.05$); 其余时间, 两组的 TN 含量并无显著性差异($P>0.05$)。养殖结束时, 絯团组 TN 含量比空白组降低了 24.64%。

絮团组和空白组 TP 含量均呈先升高后降低的变化趋势, 且两组均在养殖 40 d 时达到 TP 含量的最大值 $[(15.02\pm0.95)\text{ mg/L}, (18.86\pm1.37)\text{ mg/L}]$ 。除养殖 10 d、20 d 外, 絯团组 TP 含量与空白组相比差异显著($P<0.05$)。养殖结束时, 絯团组 TP 含量比空白组降低了 31.47%。

2.4 大口黑鲈养殖水体中氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的变化

养殖期间, 絯团组和空白组养殖水体的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、

NO_2^- -N、 NO_3^- -N 含量变化情况如图 5 所示。絮团组和空白组 NH_4^+ -N 含量均呈现先升高后降低的变化趋势，分别在养殖 20 d、30 d 时达到 NH_4^+ -N 含量的最大值，分别为 (3.38 ± 0.12) mg/L 和 (4.38 ± 0.29) mg/L。除养殖 0 d、10 d 外，其余时间，絮团组 NH_4^+ -N 含量与空白组相比显著降低 ($P < 0.05$)。养殖结束时，絮团组 NH_4^+ -N 含量比空白组降低了 57.07%。

絮团组和空白组 NO_2^- -N 含量均呈现先升高后降低的变化趋势，在养殖 20 d、30 d 达到 NO_2^- -N 含量的最大值，分别为 (1.56 ± 0.03) mg/L、 (1.78 ± 0.13) mg/L。除养殖 10 d 外，其余时间，絮团组 NO_2^- -N 含量与空

白组相比差异显著 ($P < 0.05$)；且养殖 20 d 后，絮团组 NO_2^- -N 含量与空白组相比显著降低 ($P < 0.05$)。养殖结束时，絮团组 NO_2^- -N 含量比空白组降低了 80.22%。

絮团组 NO_3^- -N 含量呈现先升高后降低的变化趋势，在养殖 40 d 达到 NO_3^- -N 含量的最大值 (42.71 ± 1.01) mg/L；而空白组 NO_3^- -N 含量呈现一直升高的趋势。在养殖 10 d、50 d、60 d 时，絮团组 NO_3^- -N 含量与空白组差异显著 ($P < 0.05$)；其余时间，两组的 NO_3^- -N 含量并无显著性差异 ($P > 0.05$)。养殖结束时，絮团组 NO_3^- -N 含量比空白组降低了 30.50%。

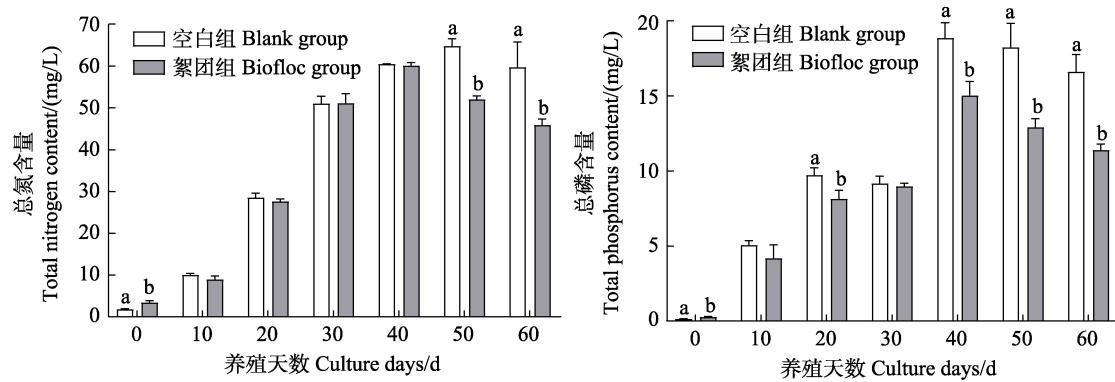


图 4 大口黑鲈养殖水体中 TN、TP 的变化
Fig.4 Changes of TN, TP in *M. salmoides* culture water

不同字母代表组间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

Different letters represent significant difference, the same below.

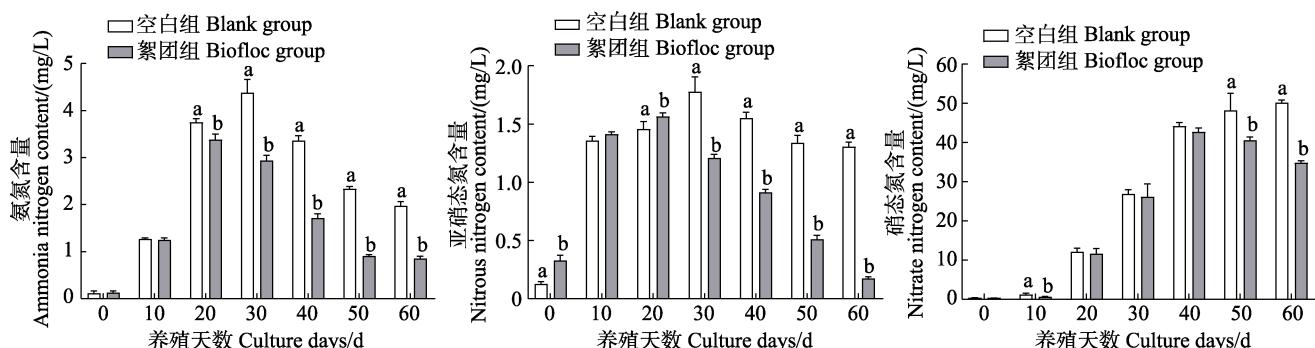


图 5 大口黑鲈养殖水体中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度变化
Fig.5 Changes of NH_4^+ -N, NO_2^- -N and NO_3^- -N concentrations in *M. salmoides* culture water

2.5 氮、磷收支情况

养殖期间，絮团组(B)和空白组(K)养殖系统的氮、磷收支情况如表 1 所示。空白组的氮、磷输入项目主要包括初始养殖水体、放养的大口黑鲈和投喂的饲料，而絮团组多了池塘底泥这一项。饲料投喂是空白组和絮团组养殖系统的主要输入方式，分别占空白组和絮团组氮总输入的 $(90.60 \pm 0.08)\%$ 、 $(87.16 \pm$

$0.19)\%$ ，占磷总输入的 $(96.08 \pm 0.19)\%$ 、 $(92.30 \pm 0.24)\%$ 。其次是放养的大口黑鲈，分别占空白组和絮团组氮总输入的 $(9.13 \pm 0.09)\%$ 、 $(9.49 \pm 0.13)\%$ ，占磷总输入的 $(3.84 \pm 0.19)\%$ 、 $(4.18 \pm 0.14)\%$ 。养殖系统初始养殖水体在氮、磷总输入的占比很小，均低于 1.00%。池塘底泥这一项并不在空白组养殖系统氮、磷输入方式里，而在絮团组中，它分别占氮、磷总输入的 $(2.80 \pm 0.01)\%$ 、 $(3.35 \pm 0.08)\%$ 。空白组和絮团组的养殖系统

氮、磷输出项目主要包括终末养殖水体、收获的大口黑鲈、底泥以及其他方式。收获的大口黑鲈是空白组和絮团组养殖系统氮输出的主要项目，分别占空白组和絮团组氮总输入的(43.04±1.42)%、(44.17±1.53)%；其次是底泥累积，其在空白组和絮团组氮总输入的占比分别为(35.59±3.00)%、(29.73±1.18)%；而其他支出方式分别占空白组和絮团组氮总输入的(12.92±3.87)%、(19.42±0.25)%；终末养殖水体在养殖系统氮总输入的占比最小，分别占空白组和絮团组氮总输入

的(8.46±0.85)%、(6.67±0.27)%。底泥累积是养殖系统磷输出的主要方式，分别占空白组和絮团组磷总输入的(75.92±0.47)%、(74.70±0.71)%；其次是收获的大口黑鲈，其在空白组和絮团组磷总输入的占比分别为(13.06±0.36)%、(17.41±0.14)%；而终末水体分别占空白组和絮团组磷总输入的(8.71±0.74)%、(6.42±0.40)%；其他支出方式在养殖系统磷总输入的占比最小，分别占空白组和絮团组磷总输入的(2.31±0.34)%、(1.47±0.37)%。

表1 不同实验组养殖系统的氮、磷收支情况

Tab.1 Nitrogen and phosphorus balance in farming systems of different experimental groups

		空白组 Blank group		絮团组 Biofloc group	
养殖系统氮、磷收支 Nitrogen and phosphorus budget for farming systems		输入和出量 Inputs, and outputs/g	占氮/磷总输入的百分比 Percentage of total nitrogen input/%	输入和出量 Inputs, and outputs/g	占氮/磷总输入的百分比 Percentage of total nitrogen input /%
氮 Nitrogen	输入 Inputs				
	初始水体 Initial water	0.36±0.02	0.27±0.02 ^a	0.70±0.08	0.54±0.07 ^b
	大口黑鲈 <i>M. salmoides</i>	12.27±0.10	9.13±0.09 ^a	12.21±0.11	9.49±0.13 ^b
	饲料 Feed	121.70±0.88	90.60±0.08 ^b	112.12±1.86	87.16±0.19 ^a
	池塘底泥 Pond sediment	/	/	3.61±0.04	2.80±0.01
	输出 Outputs				
	终末水体 Final water	11.36±1.12	8.46±0.85 ^b	8.58±0.44	6.67±0.27 ^a
	大口黑鲈 <i>M. salmoides</i>	57.81±1.54	43.04±1.42 ^a	56.80±1.15	44.17±1.53 ^a
磷 Phosphorus	输入 Inputs				
	初始水体 Initial water	0.030±0.002	0.080±0.002 ^a	0.06±0.01	0.17±0.02 ^b
	大口黑鲈 <i>M. salmoides</i>	1.39±0.01	3.84±0.19 ^a	1.39±0.01	4.18±0.14 ^a
	饲料 Feed	34.96±1.50	96.08±0.19 ^b	30.68±1.08	92.30±0.24 ^a
	池塘底泥 Pond sediment	/	/	1.11±0.01	3.35±0.08
	输出 Outputs				
	终末水体 Final water	3.16±0.17	8.71±0.74 ^b	2.13±0.08	6.42±0.40 ^a
	大口黑鲈 <i>M. salmoides</i>	4.75±0.21	13.06±0.36 ^a	5.79±0.15	17.41±0.14 ^b

注：/表示此项不存在；同一行数据上标不同字母表示差异显著($P<0.05$)，下同。

Note: / indicates this item does not exist; Data with different letters in the same row are significant different, the same below.

2.6 氮、磷利用率

养殖期间，絮团组和空白组养殖系统的氮、磷利用率情况如表2所示。絮团组氮的绝对利用率和相对利用率分别为(44.17±1.53)%、(50.69±1.87)%，均高于空白组的(43.04±1.42)%、(47.51±1.60)%，但差异均不显著($P>0.05$)。而絮团组磷的绝对利用率和相对利用率分别为(17.41±0.14)%、(18.87±0.20)%，均显著

高于空白组($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 生物絮团对大口黑鲈养殖系统水质的影响

养殖水体中的溶解氧含量对养殖生物非常重要，同时也能影响养殖水体中氮、磷的存在形式。本研究中，空白组与絮团组溶解氧含量稳定在7~9 mg/L，

表 2 不同实验组养殖系统的氮、磷利用率情况
Tab.2 Nitrogen and phosphorus utilization in farming systems of different experimental groups

养殖系统氮、磷利用率		空白组	絮团组
Nitrogen and phosphorus utilization efficiency of aquaculture system		Blank group	Biofloc group
绝对利用率 Absolute utilization /%	氮 Nitrogen 磷 Phosphorus	43.04±1.42 ^a 13.06±0.36 ^a	44.17±1.53 ^a 17.41±0.14 ^b
相对利用率 Relative utilization /%	氮 Nitrogen 磷 Phosphorus	47.51±1.60 ^a 13.59±0.38 ^a	50.69±1.87 ^a 18.87±0.20 ^b

且并未出现显著差异, 原因可能是由于整个养殖期间曝气充足, 使消耗的溶解氧很快得到了补充。在整个养殖期间, 空白组与絮团组养殖系统水体的温度维持在大口黑鲈最适水温范围 15~30 °C 内(刘伟等, 2021), 而大口黑鲈最适 pH 范围为 7.5~8.5(赖文安等, 2003), 只有絮团组水体 pH 在此范围, 且在养殖 18 d 之后, 絮团组水体 pH 均显著高于空白组($P<0.05$), 原因可能是随着养殖的进行, 养殖系统中排泄物与饲料被细菌分解产生了大量酸性物质, 导致了水体 pH 的下降; 但由于絮团组需要维持一定的碱度(Furtado *et al.*, 2015), 添加了一定量的碳酸氢钠, 因此 pH 相对稳定。

一系列的养殖活动会增加养殖水体的营养盐, 而水产养殖水体中营养盐以氮、磷为主。本研究中, 由于大口黑鲈的摄食和排泄, 絯团组和空白组 TN、TP 含量随着养殖的进行不断升高, 但在养殖前期, 两组差异并不显著, 这与生物絮团并未进入成熟稳定期有关(李志斐等, 2015); 而在养殖末期, 空白组 TN、TP 含量虽然有所下降, 但维持在较高水平, 而絮团组则有显著下降, 与空白组相比分别降低了 24.64%、31.47%。石岩等(2019)研究发现, 生物絮凝系统对污水总氮(TN)平均去除率达 27%, 董媛媛等(2019)研究发现, 生物絮团组总磷水平比对照降低 25.56%, 本研究结果与二者类似。这可能由于絮团组内部有着丰富的微生物菌群, 在养殖系统中形成了巨大的食物网, 促进了养殖系统的物质循环和能量流动, 加快了脱氮除磷的进程。

在养殖过程中, 粪便和残饵对水质影响最大, 它们被微生物分解会变成 NH_4^+ -N 等无机小分子, 而 NH_4^+ -N 在水体中发生硝化作用会产生 NO_2^- -N, 这都会引起水质恶化并对鱼类产生毒害作用。本研究中, 在养殖 20 d 后, 絯团组水体 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 含量开始呈减少趋势, 并且此时絮团组中的生物絮团沉降量有明显的升高, 并在之后稳定在一定范围, 说明本研究的生物絮团系统进入了成熟稳定期, 养殖系统中的生物絮团通过异养细菌的同化作用、亚硝化细菌和硝化细菌的硝化作用, 利用了水体中的 NH_4^+ -N, 并促使

了 NH_4^+ -N 向 NO_2^- -N、 NO_2^- -N 向 NO_3^- -N 的转化。在养殖水体中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度出现峰值后, 建立起了完整的硝化系统, 此后 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的含量将减少, 不再继续积累, 这与胡世康(2020)的研究结果一致。与空白组水体 NO_3^- -N 含量不断升高的情况不同, 絯团组呈现先升高后降低的变化趋势, 这可能与絮团组系统内厌氧微生物的反硝化作用有关, 这与 Chen 等(2019)以 PCL 为外源碳源构建生物絮团养殖系统的结果一致。成熟的生物絮团养殖系统有利于为好氧、厌氧以及兼氧微生物提供生长和繁殖的环境, 从而促进系统中氨化、同化、硝化以及反硝化作用的进行, 充分发挥生物脱氮的作用, 有效去除水体中游离的氮源, 达到调控水质的目的(李志斐等, 2015)。

3.2 生物絮团对大口黑鲈养殖系统氮、磷收支的影响

本实验养殖系统氮、磷收支的研究表明, 大口黑鲈养殖系统的氮、磷输入项目主要包括初始养殖水体、放养的大口黑鲈、投喂的饲料还有池塘底泥, 而饲料是氮、磷输入的主要形式, 分别占空白组和絮团组氮总输入的(90.60±0.08)%、(87.16±0.19)%, 占磷总输入的(96.08±0.19)%、(92.30±0.24)%, 这与刘璐等(2021)和李卓佳等(2012)的研究结果一致。饲料在空白组氮、磷总输入中的占比均高于絮团组, 在养殖密度相同的情况下, 原因可能是空白组投入了更多的饲料, 导致饲料贡献的氮总量[(121.70±0.88) g]和磷总量[(34.96±1.50) g]多于絮团组 [(112.12±1.86) g 和 (30.68±1.08) g]。这与 Yuan 等(2019)的研究结果类似, 在相同养殖密度的条件下, 饲料在池塘内循环流水养殖系统氮、磷输入的占比高于传统常规池塘养殖系统, 因为在池塘内循环流水养殖系统中, 养殖生物的运动量增大, 摄食活动加强, 投喂了更多的饲料。此外, 絯团组中由于初始添加了一定量的池塘底泥, 其在氮、磷总输入中也分走了一部分占比。并且, 因为池塘底泥的存在, 虽然两组养殖系统初始水体体积相同, 但絮团组初始水体贡献的氮总量[(0.70±0.08) g]和磷总量[(0.06±0.01) g]多于空白组的[(0.36±0.02) g]和

(0.030 ± 0.002) g], 所以, 初始水体在两组氮、磷总输入中的占比有显著差异。放养的养殖生物占养殖系统氮、磷总输入的比例因养殖生物的不同和养殖模式的不同存在差异, 在本研究中, 两组放养了同一批规格相近的大口黑鲈, 尽管其在空白组与絮团组氮、磷总输入的占比有显著差异, 但是两组大口黑鲈贡献的氮、磷总量是相近的。

本研究中, 大口黑鲈养殖系统的氮、磷输出项目主要包括终末养殖水体、收获的大口黑鲈、底泥还有其他支出方式, 收获的养殖生物和底泥分别是养殖系统氮、磷输出的主要方式。具体表现在, 空白组和絮团组收获的大口黑鲈分别占氮总输入的(43.04 ± 1.42)%、(44.17 ± 1.53)%, 高于底泥在氮总输入中的占比[(35.59 ± 3.00) %、(29.73 ± 1.18)%]; 而底泥分别占空白组和絮团组磷总输入的(75.92 ± 0.47)%、(74.70 ± 0.71)% , 远高于收获的大口黑鲈在磷总输入中的占比[(13.06 ± 0.36)%、(17.41 ± 0.14)%]。这是因为输入养殖系统中的氮元素较为容易被养殖生物所吸收利用, 而只有较少部分的磷元素能被养殖生物利用(刘峰等, 2011)。在孙云飞等(2015)研究草鱼不同混养模式养殖系统的氮、磷收支中, 渔获物占草鱼混养系统氮输出的比例为 72.54%~78.05%, 高于底泥所占的 15.18%~18.48%; 而底泥占系统磷输出的比例为 76.48%~78.34%, 远高于渔获物所占的 6.68%~9.87%, 这与本研究结果一致。而底泥支出占磷总输入的比例远高于其在氮总输入中的比例, 这是因为养殖水体中大部分磷元素是以难溶于水的颗粒形式存在, 容易沉积在养殖系统的底部, 并且可溶性无机磷与底泥中的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等离子结合形成难溶于水的磷酸盐累积在底泥中(杨平等, 2017)。本研究中, 絮团组终末水体支出在系统氮、磷总输入的占比分别为(6.67 ± 0.27)%和(6.42 ± 0.40)%, 均显著低于空白组[(8.46 ± 0.85)%和(8.71 ± 0.74)%]; 同样地, 絯团组底泥支出占系统氮总输入、磷总输入的比例分别为(29.73 ± 1.18)%、(74.70 ± 0.71)% , 均低于空白组(35.59 ± 3.00)%、(75.92 ± 0.47)%。这可能与上文提到絮团组内部有着丰富的微生物菌群有关, 为好氧、厌氧及兼氧微生物提供了良好的微生物环境, 促进了养殖系统的物质循环和能量流动, 加快了脱氮除磷的进程。

本研究中, 养殖系统中其他支出方式是根据氮、磷收支平衡计算得知, 两组养殖系统均有一部分其他支出在氮、磷总输入的占比, 说明两组系统中氮、磷均有一定程度的损失。底泥未 100% 收集可能是系统

氮、磷流失的原因之一。其他支出在氮总输入中的占比[(12.92 ± 3.87) %、(19.42 ± 0.25)%]远高于其在磷总输入中的占比[(2.31 ± 0.34) %、(1.47 ± 0.37)%], 可以印证磷在养殖水体中的流动为沉积型循环, 并无气态溢出, 其在养殖系统的输入、输出基本一致。而氨挥发和反硝化作用产生的氮气溢出养殖系统, 造成了一定量氮的损失, 在丰产鲫(*Carassius auratus var. pengzenensis*)精养池塘(陈明海等, 2015)和对虾养殖池塘(Jean-louis et al, 1998)中, 也有一部分未知的氮损失, 与本研究结果一致。而絮团组其他支出占系统氮总输入的比例高于空白组, 结合絮团组水体 NO_3^- -N 含量显著低于空白组的情况, 推测絮团组中微生物利用 NO_3^- -N 进行了更加强烈的反硝化作用(Jiang et al, 2007), 催化养殖系统中 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 转化为气态分子氮。

3.3 生物絮团对大口黑鲈养殖系统氮、磷利用率的影响

不同的养殖对象因不同的养殖方式而对投入养殖系统中的饲料等物质的利用存在差异, 但养殖生物对投入到养殖系统中的氮、磷利用率普遍偏低, 而未被利用的氮、磷成为水体富营养化的物质基础, 随着养殖的进行, 会导致养殖水体水质的恶化并危害养殖生物, 因此, 提高养殖生物对养殖系统氮、磷的利用率可改善养殖水质, 促进水产养殖可持续发展。提高养殖系统氮、磷利用率的方式有许多, 在一些研究中均有体现, 例如, 钟全福(2019)的研究中, 罗非鱼-家鱼-对虾混养系统的氮、磷利用率(45.45%、28.61%)高于罗非鱼单养养殖系统(42.34%、23.41%); 魏宝成等(2018)的研究中, 团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)序批式池塘养殖系统的氮、磷利用率(28.16%、49.15%)高于分隔式池塘养殖系统(17.64%、47.12%); 刘梅等(2021)研究同样表明, 大口黑鲈池塘内循环流水养殖系统氮、磷利用率[(37.73 ± 1.3) %、(25.51 ± 0.9)]%高于传统常规池塘养殖系统[(35.07 ± 1.1)%、(20.78 ± 0.8)]%。在本研究中, 絯团组系统氮、磷的绝对利用率和相对利用率均高于空白组, 这说明生物絮团养殖系统能促进大口黑鲈对氮、磷的吸收利用, 这可能是因为生物絮团中的成分能被大口黑鲈利用, 促进其吸收系统中的氮、磷, 但考虑到大口黑鲈食性的问题, 还需进一步的实验验证。Cao 等(2020)研究表明, 生物絮团养殖系统与循环水养殖系统相比, 更能促进罗非鱼对养殖系统中氮、磷的利用, 这与本研究结果类似。

4 结论

本研究表明,与空白组相比,生物絮团模式下养殖系统水体中的 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TN 和 TP 含量分别降低 57.07%、80.22%、30.50%、24.64%、31.47%。此外,根据本研究养殖系统的氮、磷收支情况显示,饲料是大口黑鲈养殖系统氮、磷输入的主要方式,饲料占空白组氮、磷输入的比例分别为 $(90.60 \pm 0.08)\%$ 、 $(96.08 \pm 0.19)\%$,而饲料占絮团组氮、磷输入的比例分别为 $(87.16 \pm 0.19)\%$ 、 $(92.30 \pm 0.24)\%$;收获的大口黑鲈和底泥沉积分别是养殖系统氮、磷输出的主要方式,空白组和絮团组收获的大口黑鲈支出氮占氮总输入的比例分别为 $(43.04 \pm 1.42)\%$ 和 $(44.17 \pm 1.53)\%$,而底泥支出在空白组和絮团组磷在总输入磷中的占比分别为 $(75.92 \pm 0.47)\%$ 和 $(74.70 \pm 0.71)\%$ 。但絮团组系统氮、磷的绝对利用率 [$(44.17 \pm 1.53)\%$ 、 $(17.41 \pm 0.14)\%$] 和相对利用率 [$(50.69 \pm 1.87)\%$ 、 $(18.87 \pm 0.20)\%$] 均高于空白组,说明生物絮团模式下大口黑鲈对养殖系统中氮、磷的利用率得到了提高。生物絮团模式养殖大口黑鲈具有良好的生态效益,进一步优化该养殖模式并推广应用到生产实践具有非常好的发展前景,这对促进我国水产养殖健康绿色发展和加快养殖模式转型升级至关重要。

参 考 文 献

- AVNIMELECH Y. Biofloc technology—A practical guide book. 2012
- AVNIMELECH Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. Aquaculture, 1999, 176(3/4): 227–235
- BAI J, LUTZ-CARRILLO J D, QUAN Y, et al. Taxonomic status and genetic diversity of cultured largemouth bass *Micropterus salmoides* in China. Aquaculture, 2008, 278 (1/2/3/4): 27–30
- CAO B, ABAKARI G, LUO G, et al. Comparative analysis of nitrogen and phosphorus budgets in a bioflocs aquaculture system and recirculation aquaculture system during overwintering of tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*). Aquacultural Engineering, 2020, 89: 102026
- CHEN M H, TANG H J, SUN Y Y, et al. Dynamics and budgets of nitrogen and phosphorus in intensive crucian carp culture ponds. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(2): 95–100 [陈明海, 唐汇娟, 孙依依, 等. 丰产鲫精养池塘氮磷的动态与收支. 华中农业大学学报, 2015, 34(2): 95–100]
- CHEN X, LUO G, TAN J, et al. Effects of carbohydrate supply strategies and biofloc concentrations on the growth performance of African catfish (*Clarias gariepinus*) cultured in biofloc systems. Aquaculture, 2019, 517(C): 734808–734808
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2023. Beijing: China Agriculture Press, 2023 [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. 2023 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2023]
- DIEN D L, HIEP H L, HAO V N, et al. Comparing nutrient budgets in integrated rice-shrimp ponds and shrimp grow-out ponds. Aquaculture, 2018, 484: 250–258
- DONG Y Y, FAN L M, HU G D, et al. The substitute ability of bioflocs and the analysis of microbial community diversity in the ponds environment. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(4): 880–886 [董媛媛, 范立民, 胡庚东, 等. 生物絮团的饵料替代能力及水体环境微生物群落多样性分析. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 880–886]
- FURTADO S P, POERSCH H L, WASIELESKY W. The effect of different alkalinity levels on *Litopenaeus vannamei* reared with biofloc technology (BFT). Aquaculture International, 2015, 23(1): 345–358
- GAO P, LI X D, ZHAI X L, et al. Effect of water quality and utilization of nitrogen and phosphorus by *Oreochromis mossambicus*-Ipomoea aquatica symbiosis system. Journal of Fisheries Research, 2021, 43(2): 167–174 [高攀, 李晓东, 翟旭亮, 等. 主养罗非鱼鱼菜共生池塘水质指标的变化规律和氮磷收支. 渔业研究, 2021, 43(2): 167–174]
- HARGREAVES A J. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. Aquacultural Engineering, 2006, 34(3): 344–363
- HU S K. Study on the functional effect of biological flocs in the zero water exchange culture system of *Micropterus salmoides* and *Hybrid snakehead*. Master's Thesis of Guangdong Ocean University, 2020 [胡世康. 生物絮团在大口黑鲈和杂交鳢零水交换养殖系统中功能效应的研究. 广东海洋大学硕士研究生学位论文, 2020]
- JEAN-LOUIS M M, YVES V, OLIVIER G, et al. Shrimp rearing: Stocking density, growth, impact on sediment, waste output and their relationships studied through the nitrogen budget in rearing ponds. Aquaculture, 1998, 164(1): 135–149
- JIA S P, WANG L, XU S Y, et al. Growth characteristics of *Micropterus salmoides* cultured in land-based container with recycling water. Fisheries Science, 2022, 41(4): 622–628 [贾松鹏, 王磊, 徐双阳, 等. 陆基推水集装箱养殖大口黑鲈生长特点分析. 水产科学, 2022, 41(4): 622–628]
- JIANG X, JIN X, YAO Y, et al. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China. Water Research, 2007, 42(8): 2251–2259
- LAI W A, CHEN X Y. A high-yield technique of big mouth bass (*Micropterus salmoides*) culture in pond. Freshwater Fisheries, 2003, 33(3): 57–58 [赖文安, 陈显友. 池塘大面

- 积养殖加州鲈高产技术. 淡水渔业, 2003, 33(3): 57–58]
- LI C B. The study and application of bioflocs as *Aristichthys nobilis* Richardson bait. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2012 [李朝兵. 生物絮团作为鳙饵料的研究与应用. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2012]
- LI Z F, WANG G J, YU D G, et al. Effect of bioflocs on water quality and metabolic functions of microbial community in zero-water exchange tanks. Journal of Shanghai Ocean University, 2015, 24(4): 503–512 [李志斐, 王广军, 余德光, 等. 生物絮团对养殖水体水质和微生物群落功能的影响. 上海海洋大学学报, 2015, 24(4): 503–512]
- LI Z J, YU W, ZHU C B, et al. Study on nitrogen and phosphorus budgets of experimental enclosures with shrimp monoculture and shrimp-tilapia polyculture. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(4): 50–55 [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. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 50–55]
- LIAO H P, ZHANG W Q, DENG Y Y, et al. Dynamics and budgets of nitrogen and phosphorus in higher-place ponds of gentian grouper. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(1): 92–99 [廖洪平, 张文琦, 邓泳妍, 等. 珍珠龙胆石斑鱼高位养殖池塘氮磷动态及收支的研究. 华中农业大学学报, 2023, 42(1): 92–99]
- LIU F, LI X Q, WANG F, et al. Review on budgets and environmental loads of nitrogen and phosphorus in culture system. Marine Environmental Science, 2011, 30(4): 603–608 [刘峰, 李秀启, 王芳, 等. 养殖系统N、P收支及环境N、P负荷量的研究进展. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 603–608]
- LIU L, LI X M, WU X B, et al. Nitrogen and phosphorus budgets of *Mylopharyngodon piceus* and *Aristichthys nobilis* ecological polyculture pond. Freshwater Fisheries, 2021, 51(6): 63–69 [刘璐, 李学梅, 吴兴兵, 等. 青鱼-鳙生态混养池塘的氮磷收支研究. 淡水渔业, 2021, 51(6): 63–69]
- LIU M, YUAN J L, NI M, et al. A comparative study on nitrogen and phosphorus budget and aquaculture effect of *Micropterus salmoides* in two modes. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(3): 718–728 [刘梅, 原居林, 倪蒙, 等. 大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)不同养殖模式氮磷收支及养殖效果研究. 海洋与湖沼, 2021, 52(3): 718–728]
- LIU W, ZHENG T L, MENG Q H, et al. Effect of temperature on *Micropterus salmoides* and its application in aquaculture production. Journal of Aquaculture, 2021, 42(4): 56–57, 59 [刘伟, 郑天伦, 孟庆辉, 等. 温度对大口黑鲈的影响及养殖生产中的应用. 水产养殖, 2021, 42(4): 56–57, 59]
- LUDSON G M, MARCOS A S, ÉRIKA R A, et al. Effects of a zero exchange biofloc system on the growth performance and health of Nile tilapia at different stocking densities. Aquaculture, 2020, 521: 735064–735064
- LUO W. The application of bioflocs technology for crucian carp (*Carassius auratus*). Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2013 [罗文. 生物絮团技术在鲫养殖中的研究与应用. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2013]
- MIAO S Y, HU J T, WAN W L, et al. Biofloc technology with addition of different carbon sources altered the antibacterial and antioxidant response in *Macrobrachium rosenbergii* to acute stress. Aquaculture, 2020, 525: 735280
- SCHRYVER D P, CRAB R, DEFOIRD T, et al. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture. Aquaculture, 2008, 277(3): 125–137
- SHI Y, ZOU L X, SHAN W, et al. Contaminant removal characteristics of bioflocculation-AAAO pilot system and cultivation of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(8): 1866–1874 [石岩, 邹吕熙, 单威, 等. 生物絮凝-AAAO 中试系统污染物去除特性及反硝化除磷菌的培养. 环境工程学报, 2019, 13(8): 1866–1874]
- SUN Y F, WANG F, LIU F, et al. Nitrogen and phosphorus budgets in grass carp, silver carp, and common carp culture systems. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(3): 450–459 [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. 中国水产科学, 2015, 22(3): 450–459]
- SUN Y, WANG Y Y, NIE Z J, et al. Comparison research on survival, growth and gonad maturity coefficient of *Micropterus salmoides* reared in two culture modes. Freshwater Fisheries, 2021, 51(1): 83–89 [孙毅, 王裕玉, 聂志娟, 等. 流水槽和池塘两种养殖模式下大口黑鲈存活率、生长和性腺成熟的比较研究. 淡水渔业, 2021, 51(1): 83–89]
- TEICHERT-CODDINGTON R D, MARTINEZ D, RAMÍREZ E. Partial nutrient budgets for semi-intensive shrimp farms in Honduras. Aquaculture, 2000, 190(1): 139–154
- TIAN X L, LI D S, DONG S L, et al. An experimental study on closed-polyculture of penaeid shrimp with tilapia and constricted tagelus. Aquaculture, 2001, 202(1): 57–71
- VINATEA L, MALPARTIDA J, CARBO R, et al. A comparison of recirculation aquaculture systems versus biofloc technology culture system for on-growing of fry of *Tinca tinca* (Cyprinidae) and fry of grey *Mugil cephalus* (Mugilidae). Aquaculture, 2018, 482: 155–161
- WANG Y B, YUE B, XU Z R. Nitrogen and phosphorus balance in aquaculture. Feed industry, 2011, 2005(18): 49–51 [王彦波, 岳斌, 许梓荣. 池塘养殖系统氮、磷收支研究进展. 饲料工业, 2005(18): 49–51]
- WEI B C, LIU X G, ZENG X L, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus budget of *Megalobrama amblycephala* in two kinds of compound culturing ponds. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(5): 693–702 [魏宝成, 刘兴国, 曾宪磊, 等. 两种复合式池塘养殖团头鲂的氮磷收支分析. 上海海洋大学学报, 2018, 27(5): 693–702]
- XAI Y, QIU L J, YU E M, et al. Dynamic changes of water

- quality factors and composition of prokaryotic and eukaryotic microorganisms during culturing of biofloc. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2014, 21(1): 75–83 [夏耘, 邱立疆, 郁二蒙, 等. 生物絮团培养过程中养殖水体水质因子及原核与真核微生物的动态变化. 中国水产科学, 2014, 21(1): 75–83]
- YANG P, JIN B S, TAN L S, et al. Temporal variation of nutrients fluxes across the sediment-water interface of shrimp ponds and influencing factors in the Jiulong River Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 192–203 [杨平, 金宝石, 谭立山, 等. 九龙江河口区养虾塘沉积物-水界面营养盐交换通量特征. 生态学报, 2017, 37(1): 192–203]
- YUAN J, NI M, LIU M, et al. Analysis of the growth performances, muscle quality, blood biochemistry and antioxidant status of *Micropterus salmoides* farmed in in-pond raceway systems versus usual-pond systems. *Aquaculture*, 2019, 511: 734241
- ZHANG K, WANG G J, GONG W B, et al. Study on organic carbon, nitrogen, and phosphorus budgets of zero-water exchange ponds of grass carp, bighead carp, and crucian carp. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(6): 188–198 [张凯, 王广军, 龚望宝, 等. 草鱼-鳙-鲫零换水池塘有机碳、氮、磷收支研究. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 188–198]
- ZHONG Q F. The nitrogen and phosphorus budgets in polyculture ponds of tilapia as the main species. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(6): 48–53 [钟全福. 罗非鱼为主多品种混养池塘氮磷收支. 广东海洋大学学报, 2019, 39(6): 48–53]

(编辑 陈 辉)

Aquatic Environment and Nitrogen and Phosphorus Balance in *Micropterus salmoides* Culture Under Biofloc Model

JIN Yuqin¹, MENG Shunlong^{1,2①}, XU Huimin²,
SONG Chao^{1,2}, FAN Limin^{1,2}, QIU Liping², LI Dandan²

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214128, China; 2. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Risk Assessment Laboratory for Environmental Factors of Aquatic Product Quality and Safety of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Open Laboratory of Inland Fishery Ecological Environment and Resources, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China)

Abstracts According to the United Nations, the global population is expected to grow by another 2 billion to reach 9.7 billion by 2050. The food production sector faces a great challenge in meeting the growing demand for food with limited land. In this regard, aquaculture may play a key role in maximizing the use of various aquatic resources to produce a wide range of food organisms using a combination of intensive farming practices. However, intensive and semi-intensive Chinese aquaculture practices have led to problems such as water quality decline, disease outbreaks, and environmental degradation, hindering the sustainability of the industry. To address the conservation and biofloc technology has emerged as an eco-friendly solution that maintains water quality, supports environmental conservation, and facilitates material cycling.

Excessive feed and fertilizer addition in aquaculture activities results in an undesirable buildup of nitrogen and phosphorus within the aquaculture system. This accumulation not only degrades the water quality and surrounding environment, but also facilitates the spread of numerous pathogens, posing a significant threat to aquaculture organisms. To mitigate this issue, it is crucial to assess the nitrogen and phosphorus budget in aquaculture systems, tracing the sources and destinations of these nutrients. By quantifying the inputs and outputs of nitrogen and phosphorus, we can gain insights into their utilization efficiency within the system. This understanding is vital for enhancing water quality, minimizing ecological pollution, optimizing feed utilization by aquaculture organisms, and ultimately

① Corresponding author: MENG Shunlong, Email: mengsl@ffrc.cn

promoting the sustainable development of the aquaculture industry. While the nitrogen and phosphorus balance of various cultured organisms in diverse aquaculture systems has been extensively explored, a gap in knowledge regarding the nitrogen and phosphorus balance in the *Micropterus salmoides* biofloc technology culture models remain. Additionally, there is a need for systematic monitoring and collection of pertinent data to fill this gap in knowledge.

To investigate the aquatic environment and nitrogen and phosphorus balance of *M. salmoides* under the biofloc model, an experiment was conducted in 300 L glass tank. The experiment comprised of a blank group, which was fed a basal diet, and a biofloc group, where glucose was added to maintain a C/N ratio of 15. Each group had three parallel setups, with a stocking density of 20 tails per tank. The experiment ran for 60 days, employing a zero-water exchange aquaculture mode. The results revealed a significant reduction ($P<0.05$) in NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N, TN, and TP levels in the water body of the biofloc group compared to that of the blank group, with reductions of 57.07%, 80.22%, 30.50%, 24.64%, and 31.47%, respectively. The results showed that feed was the main source of nitrogen and phosphorus in the blank and biofloc groups, contributing $(90.60\pm0.08)\%$ and $(96.08\pm0.19)\%$ in the blank group, and $(87.16\pm0.19)\%$ and $(92.30\pm0.24)\%$ in the biofloc group, respectively. The main output of nitrogen was harvesting of *M. salmoides*, which accounted for $(43.04\pm1.42)\%$ of the input nitrogen in the blank group and $(44.17\pm1.53)\%$ of that in the biofloc group, respectively. Sediment accumulation was the main pathway of phosphorus export from the culture system, which accounted for $(75.92\pm0.47)\%$ of the input phosphorus in the blank group and $(74.70\pm0.71)\%$ of that in the biofloc group, respectively. The absolute and relative utilization rates of nitrogen in the biofloc group were $(44.17\pm1.53)\%$ and $(50.69\pm1.87)\%$, respectively, which were higher than those of the blank group $(43.04\pm1.42)\%$ and $(47.51\pm1.60)\%$; however, none of the differences were significant ($P>0.05$); whereas the absolute and relative utilization rates of phosphorus in the biofloc group were $(17.41\pm0.14)\%$ and $(18.87\pm0.20)\%$, respectively, which were significantly higher than $(13.06\pm0.36)\%$ and $(13.59\pm0.38)\%$ in the blank group ($P<0.05$).

These results indicate that the biofloc model of *M. salmoides* culture can regulate the aquaculture water quality, reduce nitrogen and phosphorus accumulation, and improve nitrogen and phosphorus utilization efficiency by aquaculture organisms with ecological benefits, which is crucial for promoting the healthy and green development of aquaculture in China.

Key words Biofloc; *Micropterus salmoides*; Aquaculture water environment; Nitrogen and phosphorus budget; Utilization rate