

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[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(4): 880-886.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.04.019

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

董媛媛¹, 范立民², 胡庚东², 李丹丹², 齐延凯¹, 陈家长^{1,2}

(1. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081; 2. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心/农业农村部长江下游渔业生态环境监测中心/农业农村部淡水鱼类遗传育种和养殖生物学重点开放实验室, 江苏 无锡 214081)

摘要: 为探究生物絮团的饵料替代能力及不同饵料替代率下水体微生物群落功能多样性差异, 采用葡萄糖作为外加碳源进行饵料替代, 分别设置对照、10% 饵料替代处理和 20% 饵料替代处理, 研究生物絮团替代饵料对罗非鱼生长的影响, 并利用 Biolog-ECO 微平板分析法探究不同饵料替代梯度 (0、10%、20%) 下的罗非鱼养殖水体微生物功能多样性的变化。结果表明: 添加碳源 (葡萄糖) 调节碳氮比, 利用葡萄糖作为外加碳源可代替 20% 的饵料, 既能够优化水质状况, 降低饵料系数, 又不会对罗非鱼的生长造成显著影响; 随着饵料替代梯度的增加, 水体中微生物群落对不同碳源的代谢情况有所差异, 不同处理间对糖类碳源的利用强度具有显著差异, 影响水体微生物群落功能多样性。

关键词: 生物絮团; 饵料替代; 微生物群落

中图分类号: S963.21⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2019)04-0880-07

The substitute ability of bioflocs and the analysis of microbial community diversity in the ponds environment

DONG Yuan-yuan¹, FAN Li-min², HU Geng-dong², LI Dan-dan², QI Yan-kai¹, CHEN Jia-zhang^{1,2}

(1. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China; 2. Freshwater Fisheries Research Centre, Chinese Academy of Fishery Sciences/Fishery Eco-Environment Monitoring Center of Lower Reaches of Yangtze River Key Open Lab-oratory for Genetic Breeding and Aquaculture Biology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China)

Abstract: To explore the substitute ability of microbial bioflocs and the functional diversity of the microbial community, the glucose was used as the additional carbon source for substitution. The experimental group was set up with three gradients: the control, the 10% bait substitution and the 20% bait substitution. Effects of bioflocs instead of bait on the growth of tilapia were studied, and Biolog-ECO microplate analysis was used to investigate the microbial functional diversity of tilapia culture water under different bait substitution gradients (0, 10%, 20%). The results showed that adding carbon source (glucose) to adjust the carbon-nitrogen ratio, and using glucose as an external carbon source didn't replace 20% of the bait, which could optimize the water quality, improve the feed conversion ratio, and didn't have a significant impact on the growth of tilapia. With the increase of the substitution gradient of the bait, the microbial community had different metab-

olism to different carbon sources. The utilization intensity of the carbohydrate carbon source in different treatments had significant difference, and the function diversity of the microbial community was different.

Key words: bioflocs; bait substitute; microbial community

收稿日期: 2019-03-01

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金项目 (CARS-46)

作者简介: 董媛媛 (1992-), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 主要研究方向为渔业资源环境保护与监测。(E-mail) 2437836556@qq.com

通讯作者: 陈家长, (E-mail) ffrechen@hotmail.cn

20 世纪 70 年代,以色列专家首次在水产养殖中应用微生物凝絮技术,并命名为生物絮团技术(Biofloc technology, BFT)^[1]。生物絮团是 BFT 的核心,以异养微生物为主,通过生物絮凝作用^[2]将水体中的有机质、原生动植物、藻类等结合在一起^[1]。通过保持养殖水体中相对碳氮比例,利用水体中微生物转换含氮代谢物为菌体蛋白^[3],被生物体所摄入利用^[4]。在溶解氧充足的情况下,生物絮团结合了水中含氮代谢物和微生物物质,然后将其用作养殖对象的额外食物来源^[5]。在生物絮团的干物质中,粗蛋白质含量大于 50.0%,粗脂肪含量为 2.5%,纤维和灰分含量分别为 4.0% 和 7.0%,为杂食性鱼类和滤食性鱼类的良好饵料^[6]。目前,BFT 被一致认为是一种新型有效的水处理技术,具有净化水质^[7]、减少换水量的作用;此外,还有研究结果证明生物絮团能够促进鱼类生长发育^[8]。

罗非鱼被誉为“21 世纪中国献给世界的鱼”,被联合国粮农组织(FAO)列为人类六大主要食品之一^[9],具有生长繁殖快、抗逆性强等优势^[10],是热带、亚热带地区淡水和咸水水域的优良养殖鱼类品种。在集约化、高密度的水产养殖中,养殖苗种、饲料、药物及环境改良剂等对水体环境造成的污染逐渐加剧^[11]。在高投入的养殖模式中,氮的利用率仅有 20%~30%^[6,12],人为投放过多的饵料导致残饵、排泄废物、生物残体等有机物不断积聚在池塘底部,最终超出池塘自我净化能力,导致养殖水体恶化,最终严重影响水产动物的生长和健康^[13]。微生物在生态系统的物质循环和能量流动中起着至关重要的作用。Biolog-ECO 微生物平板法是研究微生物功能多样性的重要工具^[14],其原理是微生物在利用不同类型的碳源过程中,产生的自由电子与四唑染料发生还原反应,进而显示不同的颜色,颜色深浅反映了微生物对碳源的利用程度^[15]。

生物絮团的群落成分与稳定性在一定程度上由不同有机碳源决定^[16],有机碳源的种类和添加方式对生物絮团的群落构成也有一定影响^[17]。研究养殖水体环境中微生物对不同碳源利用能力的差异,能够更全面地了解微生物群落结构组成和代谢功能特征。本研究拟利用葡萄糖补充碳源,用生物絮团进行不同梯度(0、10%、20%)的饵料替代,采用 Biolog-ECO 微生物分析法探究水环境微生物群落结

构和功能。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选用 9 个圆形养殖桶,容积约为 1 000 L。试验前加入新鲜表层土壤,提供土著微生物源。每个桶悬挂一串由全塑夹片和维纶醛化丝组成的组合填料,提供微生物附着基,促进生物絮团的形成和稳定。然后加水约 700 L,置于太阳下充分暴晒 7 d。之后开始为期 60 d 的罗非鱼养殖,试验期间养殖水体温度控制在 25~32 ℃。

选取同批次、同等规格[(6.5±0.5)g]的罗非鱼,每个养殖桶放养 20 尾,养殖过程中进行相同频率的投喂,前期投喂量为罗非鱼体质量的 10%,后期随着水环境和天气的变化,调整投喂量为罗非鱼体质量的 2%~3%。试验设置 3 个不同的饵料替代梯度(0、10%、20%),每处理设 3 次重复。待水中氨态氮质量浓度满足试验要求时,开始添加碳源(葡萄糖)。

根据氨态氮质量浓度调整葡萄糖添加量。根据公式 $A=H \times S \times (30 \times CTAN-N-38)$ 计算碳源添加量 A(g),式中 H 为池塘平均水深(m),S 为池塘面积(m²),CTAN-N 为池塘初始氨态氮质量浓度(mg/L)。先用适量的养殖桶内的水溶解碳源,然后进行全桶均匀泼洒,添加时间为上午投饲后 0.5 h。养殖试验期间为保证供氧充足,在每个养殖桶底部设有纳米微孔增氧管增氧,使水体充分搅动混匀,提高水体溶解氧质量浓度,试验期间养殖水体溶解氧质量浓度维持在 6.5~8.5 mg/L。

1.2 样品采集与分析

自生物絮团形成开始,每隔 7 d 从水面以下 30 cm 处采集水样,检测水质指标,包括总磷、氨态氮、亚硝酸盐、高锰酸盐(COD)质量浓度以及电导率和 pH。采用钼酸铵分光光度法测定总磷质量浓度,纳氏试剂分光光度法测定氨态氮质量浓度,N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定亚硝酸盐质量浓度,高锰酸钾-草酸钠滴定法测 COD 质量浓度。pH、溶氧和电导率采用便携式 YSI(Pro Plus)仪测定。

待生物絮团稳定后,取适量水样按一定比例用 0.85% 生理盐水进行稀释,用 8 孔加样器加到 Biolog-ECO 微平板中,每孔 150 μL,置于 28 ℃ 恒温中避光培

养,用酶标仪读取培养 12 h、24 h、48 h、60 h、72 h、84 h、96 h、108 h、120 h、132 h、144 h、156 h、168 h、180 h 时 Blank 590 和 Blank 750 波长的数值。孔的平均颜色变化率(Average Well Color Development, AWCD)计算公式为 $AWCD = \sum (C-R)/n$, 式中 C 代表每个碳源孔的两波段光密度差值(Blank 590 和 Blank 750), R 代表对照(空白)孔的光密度值, n 为 Biolog-ECO 微平板上碳源种类数量($n=31$)。

1.3 数据处理与统计分析

微生物群落平均活性(AWCD)即平均颜色变化率,反映了水体微生物群落对 6 大类碳源的利用能力和偏好程度,其计算公式参照文献[18]。选择培养 72~96 h 的数据分析不同饵料替代梯度下微生物对 6 大类碳源利用强度的显著性差异,选择培养 72 h 的数据计算各样点的 Shannon 指数、McIntosh 指数、Simpson 优势度指数和丰富度(Richness)指数。运用 Microsoft office 和 SPSS25 软件进行数据处理,用 Origin8.1 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同饵料替代梯度养殖状态下罗非鱼养殖效果

如表 1 所示,减少罗非鱼的饵料投喂,以生物絮团进行不同比例的饵料替代之后,各处理间罗非鱼增质量和饵料系数均差异不显著($P>0.05$)。说明用生物絮团替代饵料投喂,对罗非鱼的生长无显著性影响。

表 1 不同饵料替代梯度下的罗非鱼养殖效果比较

Table 1 Comparison of tilapia culture effects under different bait substitution gradients

处理	增质量(g)	投喂量(g)	饵料系数
对照	102.668±11.943	122.161±0.001	1.201±0.144
替代 10% 饵料	103.544±5.141	109.937±0.201	1.064±0.054
替代 20% 饵料	93.221±0.552	97.760±0.020	1.049±0.006

2.2 不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水环境变化

不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水环境的水质理化指标测定结果(图 1)显示,随着饵料替代率的

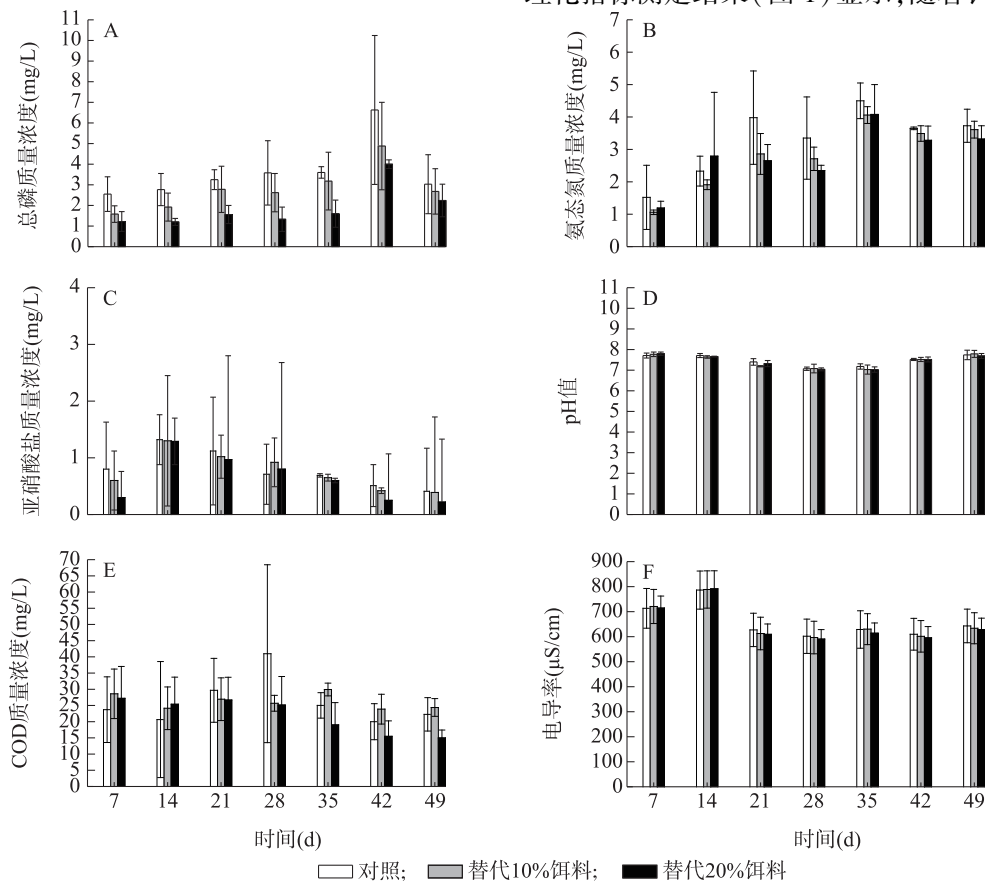


图 1 不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水体的水质理化因子变化

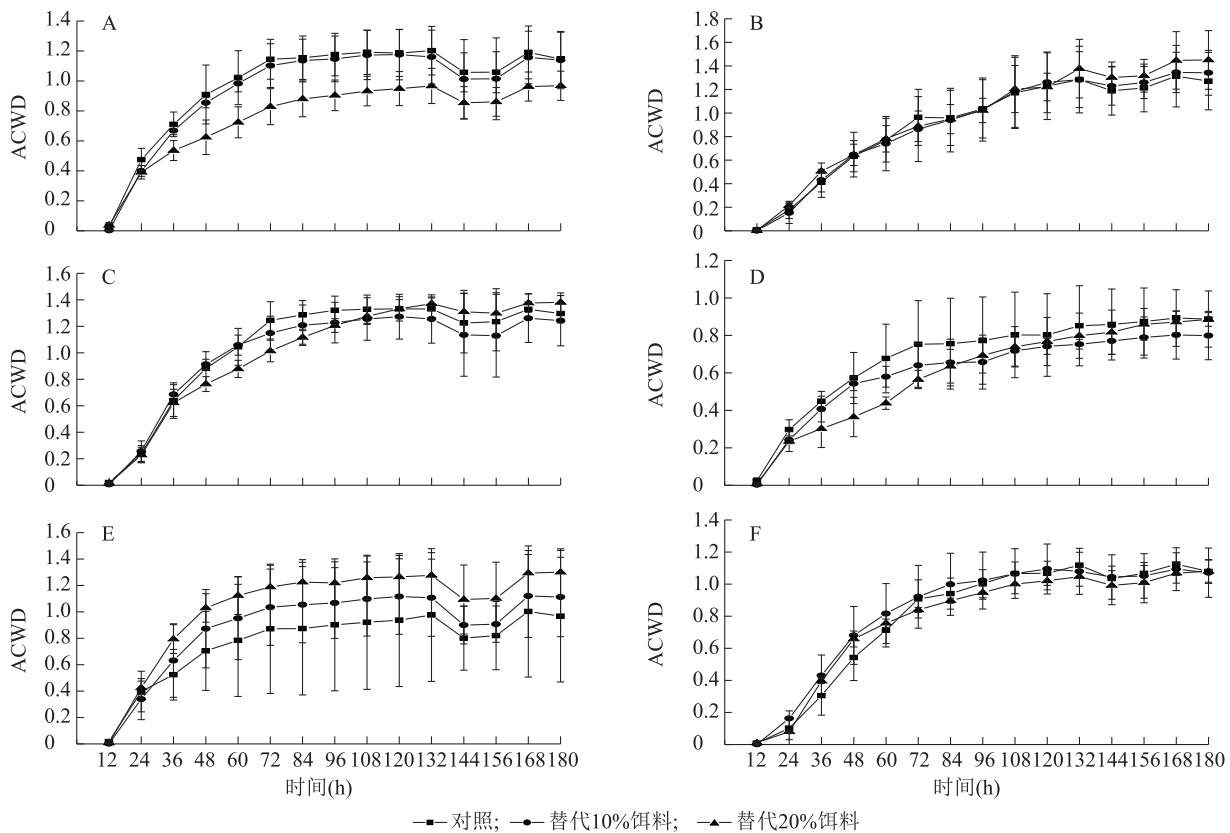
Fig.1 Changes of physical and chemical factors of water quality in tilapia aquaculture under different bait substitution gradients

增加,生物絮团替代 10% 饵料处理总磷和氨态氮水平分别比对照下降 25.56% 和 14.00%, 替代 20% 饵料处理总磷和氨态氮水平分别比对照降低 55.44% 和 17.00%, 水体中亚硝酸盐质量浓度下降幅度不大, 不同处理与对照之间的 pH 值、COD 质量浓度、电导率无差异。

2.3 不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水体中微生物群落对不同碳源的利用强度

Biolog-ECO 板中的 31 种单一碳源分为 6 大类, 即聚合糖类、氨基酸类、脂类、醇类、胺类和酸类。根据不同饵料替代梯度下, 罗非鱼养殖水体中微生物对 Biolog-ECO 板上不同碳源利用情况(图 2)可以看出, 不同饵料替代梯度下水体微生物对 6 大类碳源

的利用强度随着培养时间的推移总体呈现逐渐上升的趋势。对于聚合糖类和胺类的利用, 在 132~168 h, 表现为先下降后上升, 最终趋于平衡的状态; 对氨基酸类碳源, 不同处理之间无明显差异。在对聚合糖类的利用中, 替代 20% 饵料处理明显最低, 而对于胺类碳源的利用, 则明显高于其他 2 个处理。尽管进行了不同梯度的饵料替代, 但水体微生物对脂类和胺类碳源的利用强度较高, 对醇类碳源的利用强度最低。不同处理对氨基酸类、脂类、醇类、胺类以及酸类的利用无显著差异($P>0.05$), 饵料替代率高的水体微生物群落对聚合糖类的利用强度显著低于对照和饵料替代率低的处理($P<0.05$)。



AWCD: 孔的平均颜色变化率 (Average well color development)。A、B、C、D、E 和 F 分别代表聚合糖类、氨基酸类、脂类、醇类、胺类和酸类。

图 2 不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水体微生物对碳源利用

Fig.2 Utilization of carbon sources by tilapia aquaculture water microorganism under different bait substitution gradients

2.4 不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水体微生物多样性指数

表 2 表明, 随着饵料替代梯度的增加, Simpson 指数、McIntosh 指数和丰富度 (Richness) 指数均表现为下降趋势。其中替代 10% 饵料处理, Shannon

指数高于对照 11.87%, Simpson 指数、McIntosh 均匀度指和 Richness 丰富度指数分别低于对照 0.21%、0.30% 和 3.70%, 但差异不显著。替代 20% 饵料处理, Shannon 指数低于对照 7.16%, 另外 3 种多样性指数均低于对照, 但差异不显著。

表 2 不同饵料替代梯度下罗非鱼养殖水体微生物多样性指数

Table 2 Microbial diversity index of tilapia culture water under different bait substitution gradients

组别	Shannon 指数	Simpson 优势度指数	McIntosh 指数	丰富度 (Richness) 指数
对照	2.864±0.368	0.961±0.003	6.086±0.724	27.667±2.309
替代 10% 饵料	3.204±0.058	0.959±0.001	6.068±0.735	26.667±2.309
替代 20% 饵料	2.659±0.367	0.958±0.001	5.544±0.280	26.000±1.000

3 讨论

陈庆荣^[19]利用生物絮团技术培养南美白对虾,发现生物絮团能够促进水体物质循环,降低饵料系数。王超等^[20]在凡纳滨对虾零水交换养殖系统中,利用有机碳源改善生物絮团培育,在减少投饵的情况下,凡纳滨对虾生理健康水平正常。王潮辉等^[21]提出在生物絮团养殖条件下罗非鱼生长速度要快于普通循环水养殖系统。本研究中,生物絮团替代 10% 饵料对罗非鱼生长没有影响,替代 20% 饵料对罗非鱼生长影响也不显著,但是有使生长速度下降的趋势;替代 20% 和 10% 饵料处理的饵料系数均低于对照,这可能是因为生物絮团中成分弥补了饵料中某些营养成分的不足,促进了罗非鱼的生长,但是考虑到罗非鱼的食性问题,还需要通过进一步的摄食观察来验证。增加饵料替代率,养殖水体中总磷、氨态氮、亚硝酸盐含量以及 COD 值均低于对照。生物絮团形成过程对养殖水体 pH 变化具有较大的影响^[22]。在本试验中各处理 pH 低于对照,这可能与水环境中氮循环反应有关。早期研究结果表明,存在于絮团中的某些具有生物活性的物质可以发挥促进生长的积极作用^[23-24],同时对养殖池塘水环境具有良好的调控作用,对形成清洁健康的养殖模式具有一定价值。

养殖水体中微生物群落对 Biolog-ECO 板上 31 种碳源的选择及利用程度,反映了水体微生物对不同种类碳源的代谢偏好^[25],这种差异可能与养殖水体环境因子有关。在对池塘水环境中微生物群落的研究中,杨莺莺等^[26]指出利用率较高的碳源分别为氨基酸类、羧酸类和糖类碳源,其次为聚合物类、胺类,而其他类碳源的利用率较低。史磊磊等^[27]在罗非鱼养殖试验中,悬挂组合填料之后,增强了水体微生物对糖类的利用,降低了对酸类和胺类碳源的利用。赵艳等^[28]报道在人工湿地中,对于糖类和氨基酸类及其衍生物的利用程度大于对脂肪酸及脂类代

谢中间产物及次生代谢物的利用水平。曹煜成等^[29]在罗非鱼池塘水体微生物群落对碳源代谢的动态变化研究中发现糖类碳源的利用强度最高,脂肪类、氨基酸类次之,最低是次生代谢产物类。在本试验中,3 组不同处理下水体微生物群落均表现为对氨基酸类和脂类碳源利用率最高,其次是糖类和胺类碳源,然后是酸类,对醇类碳源的利用率最低,这与杨莺莺等^[26]和曹煜成等^[29]的试验结果大致相同,而与赵艳等^[28]的试验结果相反,这可能是因为外界环境的变化影响了微生物群落对碳源的利用程度。对聚合糖类碳源的利用上,替代 20% 饵料处理的水体微生物群落显著低于对照和替代 10% 饵料处理($P<0.05$)。一方面,有研究结果表明水体中藻类可以分泌出一些高分子物质和黏多糖^[30],这可能与生物絮团的形成机制有关,另一方面在利用葡萄糖作为碳源基质时,菌体产物的芳香碳、羧基碳及羰基碳含量少,而多糖类碳组分含量多^[31],在营养底物供给充足的情况下,微生物在生物氧化和不同产能途径中大量利用糖类物质。由此可见,随着饵料替代率的增加,水体微生物降低了对糖类碳源的利用,这有可能和外加葡萄糖作为碳源有关,过多的残饵和粪便成分和含量发生变化,进而影响了水体微生物对不同类型碳源的代谢差异和强度,进一步证明了水体中微生物代谢多样性的变化。在对胺类碳源的利用上,替代 20% 饵料处理最高,替代 10% 饵料处理次之,对照利用率最低。多胺类物质(腐胺、精胺等)是一类带正电荷的烷基类含氮小分子化合物,广泛参与细胞增殖、分化和凋亡等重要生命过程^[32]。饵料替代率的增加,可能是因为水体中利用胺类碳源的微生物得以扩增和繁殖。史磊磊等^[33]提出摄食状态不同的罗非鱼养殖水体微生物对碳源利用的差异性与水体中微生物的繁殖速度有关。这说明随着饵料替代率的增加,水体中营养物质的差异可能改变了水体中的微生物群落。生物絮团主要成分是有有机碎屑,微生物附着在有机碎屑上,逐渐被

罗非鱼摄食,促进水体物质循环。车建锋等^[34]研究指出生物膜形成不同阶段的微生物的种类有一定差异,对不同碳源的利用程度也有所不同,同样在生物絮团形成的不同时期,水体中微生物种类和数量也可能存在一定差异。

微生物群落多样性指数的变化可以反映微生物群落功能多样性的变化。Shannon 指数、Simpson 优势度指数、McIntosh 指数和 Richness 指数分别反映了水体微生物群落的多样性、优势度、均匀度及丰富度^[35-36]。本研究中,替代 10% 饵料处理 Shannon 指数比对照高,表明其水体微生物多样性增加;替代 20% 饵料处理多样性指数低于对照,但差异不显著,这可能由于试验初期土壤提供的微生物源一致,减少饵料投喂后,后期水体微生物种类无明显变化。Biolog-ECO 微平板法在研究微生物群落变化上有良好的优势,并且能够获得大量多维数据用来表征微生物群落的生理生态特性^[37]。通过主成分分析法可以将不同处理的多元向量转换为互不相关的主元向量,经过降维后主元向量空间上点的位置能直接地反映出不同微生物群落的代谢特征^[15]。生物絮团技术在理论上基本成熟,但在水产养殖实践中应用还没有得到广泛推广,原因有很多方面^[38]。在微生物生态研究中,还可利用宏基因组测序、宏代谢组测序、高通量测序等方法揭示微生物群落功能。有学者更进一步提出利用池塘微生物群落来精确调控优化池塘微生态环境的目标^[39]。伴随着生物絮团技术的发展,其在水产养殖中的应用也不断扩大。在本研究中选择罗非鱼为研究对象,而罗非鱼属于杂食性鱼类,食谱很广,因此在研究对象的选择上,还需要更多的探索。通过外加碳源调节碳氮比例,利用生物絮团替代部分饵料,随着饵料替代梯度的增加,生物絮团既改善了水质,又降低了饲料系数。替代 20% 饵料处理对罗非鱼生长的影响尽管不显著,但是已经有使其生长速度下降的趋势。由于本研究的试验条件与池塘养殖还具有一定差距,因此在实际生产中还需酌情考虑具体的替代比例。另外在使用生物絮团技术的同时选择合适的益生菌进行强化,或者添加有益微藻类来促进生物絮团在替代饵料方面的应用还需要进一步探究。

参考文献:

[1] AZIM M E, LITTLE D C, BRON J E. Microbial protein

production in activated suspension tanks manipulating C : N ratio in feed and the implications for fish culture[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(9):3590-3599.

- [2] 罗国芝,李文清,陈佳捷,等.生物絮凝技术在我国水产养殖中的应用研究现状和发展趋势分析[J].*中国水产*,2013(11):64-67.
- [3] AVNIMELECH Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems [J]. *Aquaculture*, 1999, 176(3/4):227-235.
- [4] AVNIMELECH Y, KOCHBA M. Evaluation of nitrogen uptake and excretion by tilapia in bio floc tanks, using ¹⁵N tracing[J]. *Aquaculture Kochba*, 2009, 287(1):163-168.
- [5] PANIGRAHI A, SUNDARAM M, SARANYA C, et al. Influence of differential protein levels of feed on production performance and immune response of pacific white leg shrimp in a biofloc-based system[J]. *Aquaculture*, 2019, 503:118-127.
- [6] AZIM M E, VERDEGEM M C J, SINGH M, et al. The effects of periphyton substrate and fish stocking density on water quality, phytoplankton, periphyton and fish growth[J]. *Aquaculture Research*, 2015, 34(9):685-695.
- [7] GOLDMAN J C, DENNETT C M R. Regulation of gross growth efficiency and ammonium regeneration in bacteria by substrate C : N ratio [J]. *Limnology and Oceanography*, 1987, 32(6):1239-1252.
- [8] 卢炳国,王海英,谢 骏,等.不同 C/N 形成的生物絮团对草鱼生长性能、水质和非特异性免疫的影响[C]//中国水产学会.2012 年中国水产学会学术年会论文摘要集.2012.
- [9] 张亚楠.广西罗非鱼产业价值链研究[D].南京:南京农业大学,2015.
- [10] 张宗锋.以湛江、茂名海南为例探究我国凡纳滨对虾、罗非鱼养殖现状及面临的问题[D].上海:上海海洋大学,2012.
- [11] 吴 伟,范立民.水产养殖环境的污染及其控制对策[J].*中国农业科技导报*,2014,16(2):26-34.
- [12] DAM A A V, BEVERIDGE M C M, AZIM M E, et al. The potential of fish production based on periphyton[J]. *Reviews in Fish Biology & Fisheries*, 2002, 12(1):1-31.
- [13] 何义进.微生态制剂降解养殖水体氨氮及亚硝酸盐的研究[D].南京:南京农业大学,2007.
- [14] 田雅楠,王红旗. Biolog 法在环境微生物功能多样性研究中的应用[J].*环境科学与技术*,2011,34(3):50-57.
- [15] 席劲瑛,胡洪营,钱 易,等. Biolog 方法在环境微生物群落研究中的应用[J].*微生物学报*,2003,43(1):138-141.
- [16] 聂 伟,刘立鹤,刘 军,等.生物絮团的研究进展[J].*江西水产科技*,2014(4):43-48.
- [17] AMP M, HEIJNEN J J, MCM V L. Effect of dissolved oxygen concentration on sludge settleability[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2003, 62(5/6):586-593.
- [18] MARTÍN-BETANCOR K, RODEA-PALOMARES I, MUNOZ-MARTÍN M A, et al. Construction of a self-luminescent cyanobacterial bioreporter that detects a broad range of bioavailable heavy

- metals in aquatic environments [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6: 186.
- [19] 陈庆荣. 南美白对虾仿生态养殖研究 [J]. *南方农机*, 2017, 48 (12): 83.
- [20] 王超, 潘鲁青, 张开全. 生物絮团在凡纳滨对虾零水交换养殖系统中的应用研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2015 (2): 81-89.
- [21] 王潮辉, 高启, 谭洪新, 等. 生物絮凝系统构建过程对吉富罗非鱼免疫酶和生长的影响 [J]. *中国水产科学*, 2015, 22 (4): 707-715.
- [22] MIKKELSEN L H, GOTFREDSEN A, AGERBAK M, et al. Effects of colloidal stability on clarification and dewatering of activated sludge [J]. *Water Science & Technology*, 1996, 34 (3/4): 449-457.
- [23] JU Z Y, FORSTER I, CONQUEST L, et al. Enhanced growth effects on shrimp (*Litopenaeus vannamei*) from inclusion of whole shrimp floc or floc fractions to a formulated diet [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 14 (6): 533-543.
- [24] CRAB R, DEFOIRDT T, BOSSIER P, et al. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges [J]. *Aquaculture*, 2012, 356/357 (4): 351-356.
- [25] 李志斐, 王广军, 谢骏, 等. 草鱼养殖池塘生物膜固着微生物群落碳代谢 Biolog 分析 [J]. *水产学报*, 2014, 38 (12): 1985-1995.
- [26] 杨莺莺, 李卓佳, 梁晓华, 等. 芽胞杆菌对鱼池微生物群落代谢功能的影响 [J]. *微生物学杂志*, 2009, 29 (3): 11-17.
- [27] 史磊磊, 范立民, 陈家长, 等. 组合填料对水质、罗非鱼生长及水体微生物群落功能多样性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (8): 1618-1626.
- [28] 赵艳, 李锋民, 王昊云, 等. 不同结构好氧/厌氧潜流人工湿地微生物群落代谢特性 [J]. *环境科学学报*, 2012, 32 (2): 299-307.
- [29] 曹煜成, 李卓佳, 文国樑, 等. 罗非鱼主养池塘水体微生物群落对碳源代谢的动态变化 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (1): 172-177.
- [30] CRAB R, AVNIMELECH Y, DEFOIRDT T, et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production [J]. *Aquaculture*, 2007, 270 (1-4): 1-14.
- [31] 李艳. 微生物利用糖类和蓝藻等有机物料参与形成腐殖质的研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
- [32] 吕亚丰, 王艳林. 鸟氨酸脱羧酶抗酶抑制因子-1 与细胞增殖 [J]. *生命科学*, 2016 (3): 399-404.
- [33] 史磊磊, 范立民, 陈家长, 等. 不同摄食状态罗非鱼养殖水体微生物群落功能多样性初探 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34 (5): 147-152.
- [34] 车建锋, 李志斐, 王广军, 等. 混养池塘生物膜微生物群落功能多样性特征分析 [J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26 (6): 862-871.
- [35] ANNE E. Magurran, ecological diversity and its measurement [M]. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1988: 7-45.
- [36] ATLAS R M. Diversity of microbial communities [J]. *Advances in Microbial Ecology*, 1984, 7 (4): 1-47.
- [37] 贾夏, 董岁明, 周春娟, 等. 微生物生态研究中 Biolog Eco 微平板培养时间对分析结果的影响 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21 (1): 10-19.
- [38] 龙丽娜, 李源, 管崇武, 等. 生物絮团技术在水产养殖中的作用研究综述 [J]. *渔业现代化*, 2013, 40 (5): 28-33.
- [39] 范立民, 徐跑, 吴伟, 等. 淡水养殖池塘微生态环境调控研究综述 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32 (11): 3094-3100.

(责任编辑: 张震林)